

UNIVERSITE d'ORLEANS
LABORATOIRE d'HYDROGEOLOGIE

En collaboration avec l'ORSTOM,
l'ITCF de BAZIEGE et la chambre
d'agriculture de la Haute-Garonne

T H E S E

présentée

A L'UNIVERSITE d'ORLEANS

U.E.R. de SCIENCES FONDAMENTALES et APPLIQUEES

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR de 3^e CYCLE

spécialité : géologie appliquée (hydrogéologie)

par

Djamel BOUDJEMLINE

SUSCEPTIBILITE AU RUISELLEMENT ET AUX
TRANSPORTS SOLIDES DE SOLS A TEXTURE CONTRASTEE
ETUDE EXPERIMENTALE AU CHAMP SOUS PLUIES SIMULEES

soutenue le 6 juillet 1987
devant le jury composé de

F. LELONG	Président
V. PERTHUISOT	Examinateurs
E. ROOSE	
J. CAVALIE	Invités
C. COSANDEY	

R E M E R C I E M E N T S

Je voudrais remercier en premier lieu M. le Professeur F. LELONG de m'avoir accueilli dans son laboratoire et permis d'effectuer ce travail. Je lui suis très reconnaissant du temps qu'il a consacré à l'élaboration de cette thèse.

Je dois beaucoup à M. ROOSE pour m'avoir initié à la méthode de simulation de pluie et formé dans le domaine de la conservation de l'eau et du sol. Outre le fait qu'il m'a permis d'effectuer une grande partie de mon travail à l'ENGREF et à l'ORSTOM, à Montpellier, ses conseils m'ont été très précieux.

A l'ORSTOM de Montpellier, j'ai beaucoup apprécié la collaboration de M. ALBERGEL qui m'a consacré beaucoup de son temps pour le traitement de mes données et m'a initié à l'outil informatique.

Lors de la campagne du Lauragais, MM CAVALIE et DEUMIER m'ont apporté toute l'aide nécessaire pour le bon déroulement de la campagne. Qu'ils en soient remerciés.

Que M. PERTHUISOT et Mme COSANDEY, qui ont accepté de faire partie de mon jury, soient assurés de ma gratitude.

Je voudrais remercier tout particulièrement les deux équipes qui ont participé aux mesures de terrain avec moi : l'équipe du Mont-Lozère (DURAND, DAUGE, DIDON et DUC) et l'équipe du Lauragais (GOUBE, DRESSAYRE, CONDE, BANGOURA, CAMARA, DIATTA, BOUFAROUA, THONG).

Mes remerciements vont également à Madame PETIT qui a assuré la dactylographie de ce travail.

Que ma famille et mes amis trouvent également ici toute l'expression de ma gratitude pour la patience et les encouragements qu'ils m'ont prodigués.

S O M M A I R E

<u>CHAPITRE I</u>	Résumé	1
	Introduction	3
	La méthodologie	11
1.1	Description de l'appareil	13
1.2	Hydrogramme théorique de ruissellement	16
1.2.1	La phase d'imbibition	16
1.2.2	La phase du régime transitoire	16
1.2.3	La phase du régime permanent	16
1.2.4	La phase de vidange	16
1.3	Le turbidigramme théorique	16
1.3.1	Les différentes phases du turbidigramme	18
1.3.1.1	La phase d'imbibition	18
1.3.1.2	La phase transitoire	18
1.3.1.3	La phase du régime permanent	18
1.3.1.4	La phase de vidange	18
1.4	Définition des symboles utilisés	18
1.5	Mesure des caractéristiques physiques et hydriques du sol	19
1.5.1	Evaluation des différentes composantes occupant la surface du sol	19
1.5.2	Mesure de la rugosité du sol	20
1.5.3	Mesure de l'humidité du sol	20
1.5.4	Mesure de la densité apparente	20
1.5.5	Détermination de la densité réelle	21
1.5.6	La porosité totale	21
1.5.7	Détermination de la charge solide	22
<u>CHAPITRE II</u>	Campagne de simulation au Mont-Lozère : résumé	25
2.0	Introduction	27
2.1	Le milieu	27
2.1.1	Situation géographique	27
2.1.2	La géologie	27
2.1.3	Les sols	28
2.1.3.1	Exemple d'un profil pédologique décrit sur la parcelle PAMd3	30
2.1.3.2	Exemple d'analyse physico-chimique du sol de la parcelle PAMd3	30
2.1.4	L'occupation des sols	31
2.1.5	Le climat	32
2.1.5.1	Les précipitations annuelles	32
2.1.5.2	La pluviosité mensuelle	32
2.1.5.3	Les précipitations journalières	32

2.2	Le plan d'expérience	34
2.3	Le protocole de simulation	36
2.4	Les résultats	38
2.4.1	Etude des conditions initiales	38
2.4.1.1	Caractéristiques des états de surface	38
2.4.1.2	Caractéristiques physiques et hydriques des parcelles	40
2.4.1.3	Les analyses physico-chimiques	44
2.4.2	Présentation des résultats bruts	45
2.4.3	Traitemet statistique	49
2.4.3.1	Etude des corrélations	51
2.4.3.2	Analyse factorielle des correspondances	52
2.4.4	Etude de la variabilité des paramètres hydrodynamiques. Cas des parcelles non labourées	58
2.4.4.1	La hauteur de pluie d'imbibition	58
2.4.4.2	Le ruissellement	67
2.4.4.3	L'intensité de pluie limite	82
2.4.4.4	L'infiltration	85
2.4.5	Etude de la variabilité des paramètres hydrodynamiques : parcelles nues	91
2.4.5.1	La hauteur de pluie d'imbibition	91
2.4.5.2	Le ruissellement	92
2.4.5.3	L'intensité d'infiltration minimale	95
2.5	Les transports solides	97
2.5.1	Les parcelles non labourées	97
2.5.1.1	La turbidité des eaux de ruissellement	97
2.5.1.2	Les transports solides	98
2.5.2	Les parcelles labourées	100
2.5.2.1	La turbidité des eaux de ruissellement	100
2.5.2.2	Les transports solides	100
2.6	Conclusion	102
 <u>CHAPITRE III</u>		
	Campagne de simulation au Lauragais :	
	résumé	105
3.0	Introduction	107
3.1	Etude du milieu	109
3.1.1	Situation géographique	109
3.1.2	La pédologie	109
3.1.3	Conclusion	111
3.1.4	Occupation des sols	111
3.1.4.1	Conclusion	114
3.1.4.2	La climat	114
3.1.4.3	La pluviosité annuelle	117
3.1.4.4	La pluviosité mensuelle	117
3.1.4.5	Les précipitations journalières	117
3.1.5	Courbes Intensité-Durée-Fréquence	119
	Conclusion sur le climat	119
	Conclusion sur le milieu	119
3.2	Le plan d'expérience	121
3.3	Le protocole expérimental	122

3.4	Les résultats	125
3.4.1	Etude des conditions initiales	125
3.4.1.1	Les caractéristiques des états de surface	125
3.4.1.2	Les caractéristiques physiques	128
3.4.1.3	Les analyses physico-chimiques	131
3.4.2	Présentation des résultats bruts	134
3.4.3	Traitement statistique	136
3.4.3.1	Etude des corrélations simples	136
3.4.3.2	Etude des corrélations multiples	141
3.4.3.3	Conclusion	145
3.4.4	Etude de la variabilité inter-traitements des paramètres et variables hydro-dynamiques	146
3.4.4.1	Interprétations et discussions	
3.4.4.1.1	La hauteur de pluie d'imbibition	146
3.4.4.1.2	- Influence de l'état d'humectation initial sur Pi	148
3.4.4.1.3	Conclusion	149
3.4.4.2	Le ruissellement	150
3.4.4.3	Discussion et conclusion	155
3.4.4.3.1	L'infiltration	158
3.4.4.3.2	A/ Généralités	158
3.4.4.3.3	B/ L'intensité d'infiltration en régime permanent	159
3.4.5	Variabilité intra-traitement des paramètres et variables dynamiques	163
3.4.5.1	Conclusion	163
3.4.6	Influence de l'intensité de la pluie sur les paramètres hydrodynamiques	164
3.4.6.1	La hauteur de pluie d'imbibition	164
3.4.6.1.1	- Influence de la pente	166
3.4.6.2	Le ruissellement	166
3.4.6.2.1	- Influence de la pente	168
3.4.6.3	L'intensité d'infiltration minimale (FN)	168
3.4.6.3.1	- Influence de la pente	171
3.4.6.3.2	Conclusion	171
3.4.7	L'exportation des matières solides	174
3.4.7.1	Généralités	174
3.4.7.2	La turbidité des eaux de ruissellement	176
3.4.7.2.1	A/ Variabilité inter-traitements	176
3.4.7.2.2	B/ Variabilité intra-traitement	182
3.4.7.3	Discussion et conclusion	182
3.4.7.3.1	Les débits solides	183
3.4.7.3.2	A/ Variabilité inter-traitements	183
3.4.7.3.3	B/ Variabilité intra-traitement	188
3.4.7.3.4	Discussion et conclusion	189
3.5	Conclusion	191

CHAPITRE IV

4.1	Essai de comparaison hydrodynamique et mécanique des sols argileux du Lauragais, des sols sableux du Mont-Lozère et des sols limoneux de Beaumont-sur-Dème	194
4.1.1	Les paramètres et variables hydro-dynamiques	194

4.1.1	La hauteur de pluie d'imbibition	194
4.1.1.1	Influence du déficit de saturation du sol	194
4.1.1.2	Influence de la rugosité du lit de semence	197
4.1.1.3	Discussion et conclusion	197
4.1.2	Le ruissellement	198
4.1.3	L'intensité d'infiltration en régime permanent	198
4.1.3.1	Influence de l'intensité de la pluie	200
4.1.3.2	Influence de l'état d'humectation initial du sol	203
4.1.4	Conclusion partielle	205
4.2	L'exportation des matières solides	205
4.2.1	Généralités	205
4.2.2	La charge solide moyenne	207
4.2.3	Les débits solides	209
4.2.4	Les facteurs qui influencent la turbidité et les débits solides	209
4.2.4.1	La pente	209
4.2.4.2	Le couvert végétal et les résidus de culture	211
4.2.4.3	L'état structural et l'humidité initiales	211
	Conclusion	211
	Conclusion générale	212
	Bibliographie	
	Annexes	
	Liste des figures.	

R E S U M E

Ce travail vise à définir de façon comparative le comportement hydrodynamique et mécanique (détachabilité) de sols à texture contrastée. Il consiste à :

- analyser les réponses (ruissellement et transports solides) du sol à des averses de pluies artificielles, sur deux grands types de sols, sableux, humifères et argileux, argilo-limoneux.
- étudier la variabilité des réponses à l'intérieur d'un même type de sol, selon l'état de surface du sol (densité de couvert végétal, taille des mottes, pierrosité...)

Les expérimentations ont eu lieu au champ sur des parcelles de 1 m², arrosées par un infiltromètre à aspersion, type ORSTOM, permettant de simuler des pluies de diverses intensités : sur chaque type de sol étudiée, on a testé l'influence de différents états de surface du sol :
- sur le site de sols sableux humifère du Mont-Lozère, on a testé les six états de surface suivants : pelouse saine et dégradée, litière de hêtraie, litière de pessière, lande à genêts, sol nu pioché.
- sur le site argilo-limoneux du Lauragais, on a testé différentes préparations de lits de semence (taille des mottes, degré de tassemement...)

Les résultats confrontés avec ceux obtenus précédemment sur des sols limoneux de la Sarthe (BOUDJEMLINE, 1984 ; RAHELIARISOA, 1986) permettent d'esquisser la synthèse de comportement hydrodynamique et mécanique suivante :

- les pluies d'imbibition des sols nus, dans une fourchette de déficit de saturation en eau donnée, augmentent des sols argileux ($P_i = 9$ à 17 mm) aux sols limoneux ($P_i = 13$ à 65 mm) et aux sols sableux ($P_i = 58$ à plus de 100 mm) ; de même, l'infiltérabilité en régime permanent croît des sols argileux ($FN = 4$ à 6 mm.h⁻¹) aux sols limoneux ($FN = 30$ à 75 mm.h⁻¹) et aux sols sableux ($FN = 60$ à plus de 100 mm.h⁻¹).
- les caractéristiques de détachabilité et de transports solides varient de façon différente ; le maximum de détachabilité et de débit solide transporté est obtenu sur les sols limoneux, et les valeurs les plus faibles sur les sols sableux.

Dans tous les cas, l'infiltérabilité en régime permanent diminue et la sensibilité au ruissellement augmente au cours des averses ; cela traduit une modification des caractéristiques physiques de l'horizon de surface par deux grands processus : tassement dominant probable sur les sols sableux, formation d'une pellicule de battance sur les sols argileux et sur les sols limoneux.

La variabilité des réponses hydrodynamiques pour un type textural de sol dépend de causes multiples : densité de couvert végétal et/ou taux d'humus sont les causes dominantes de cette variabilité pour les sols de Lozère ; travail du sol, taille des mottes et humidité initiale sont les causes dominantes pour les sols limoneux et argileux. La variabilité des valeurs de charge solide dépend des mêmes causes et aussi de la pente.

En résumé la susceptibilité au ruissellement et aux transports solides des sols testés dépend principalement de la dégradation de la tranche superficielle du sol et non de l'engorgement des horizons profonds.

Mots clés : simulation de pluie, ruissellement, infiltérabilité, transports solides, dégradation structurale du sol, état de surface, sols argileux (Lauragais), sols sableux (Mont-Lozère), sols limoneux (Sarthe).

Introduction : Les objectifs et l'approche

La naissance du ruissellement et de sa charge solide pose un problème à la fois d'ordre scientifique et pratique. D'un point de vue scientifique, on se demande si le ruissellement et sa charge solide naissent à la suite de la dégradation d'un état de surface du sol ou de la présence d'une structure profonde plus ou moins imperméable dans le profil du sol. D'un point de vue pratique, on constate une forte dégradation de surface et des phénomènes d'érosion, et ce faisant, dans quelle mesure l'homme, gestionnaire du milieu peut résoudre ces problèmes de ruissellement direct dans le champ cultivé. En Lozère par exemple, on se rend compte comment en modifiant le mode de gestion des bassins, on modifie leur hydrologie. Ce qui nous conduit à essayer d'analyser le fonctionnement des sols aux périodes critiques de l'année, avec des pluies de fréquence rare, pour observer le démarrage de ces processus de dégradation et d'érosion.

De nombreux auteurs se sont penchés sur le problème et ont essayé de mieux cerner le fonctionnement hydrodynamique des sols. Les expériences se sont effectuées soit au champ, soit au laboratoire. Dès le début du XX^e siècle, la première théorie du potentiel de l'eau du sol (BUCKINGHAM, 1907) vit le jour, puis jusqu'aux années 1920, c'est la recherche de constantes pour caractériser le sol (réserve utile, capacité au champ...). Au niveau théorique, on développe les formulations du potentiel de l'eau du sol (GARDNER, 1920) et des appareils de mesure comme les tensiomètres, les membranes à pression etc..., sont mis au point. Par la suite, l'utilisation d'ordinateurs permet l'application des formulations mathématiques. Le développement des instruments de mesure permet la vérification en laboratoire – le plus souvent sur colonne – des théories. C'est alors que les physiciens retournent sur le terrain et se heurtent aux limites de l'approche purement mécanique de l'écoulement. Les théories vérifiées en laboratoire ne se vérifient pas très bien sur le terrain ; on n'arrive pas à mesurer les paramètres nécessaires pour les modèles. Les différentes équipes, même en restant dans le domaine de l'écoulement vertical, se heurtent à la variabilité spatiale des paramètres hydrodynamiques ; elles se heurtent également à la variabilité dans le temps de ces paramètres par suite des modifications structurales des matériaux sous l'effet de contraintes mécaniques (travail du sol et techniques culturales) ou hydrauliques (effet splash, battance).

Ces méthodes de mesure de l'infiltration qui sont d'ailleurs nombreuses, s'effectuent actuellement soit sous lame d'eau, soit sous pluies simulées, au laboratoire ou au champ.

1. - Sous lame d'eau
a. - Au laboratoire

- Sur échantillon remanié : Test de perméabilité de HENIN :

C'est une méthode conventionnelle qui fait partie de la technique de mesure de la stabilité structurale de HENIN. Elle consiste à mesurer le coefficient K de la formule de DARCY sur un poids de 50 g d'échantillon de sol séché à l'air, tamisé à 2 mm, placé dans un tube cylindrique de 8 cm² de section et soumis à une charge constante de 20 mm d'eau. Les résultats de la mesure sont largement dépendants des phénomènes de gonflement et de dispersion qui peuvent affecter l'échantillon. Ceci peut paraître un inconvénient de la méthode, mais c'est aussi tout son objectif puisqu'elle vise un test de comportement relatif à la stabilité structurale (HENIN et MONNIER, 1956).

- Sur échantillon non remanié : Méthode VERGIERE :

Cette méthode consiste à découper un bloc de terre cubique de 10 cm de côté, qu'on place dans une boîte métallique ouverte sur deux faces opposées. La mesure de la vitesse de filtration est faite au laboratoire sous charge constante de 10 cm (BOURRIER, 1965 ; POSS, 1978).

b. - Au champ

- La méthode MUNTZ

C'est une méthode qui consiste à enfoncer de 6 cm dans le sol un cylindre métallique de 1 dm² de section et à y maintenir un plan d'eau de 3 cm d'épaisseur. Autour du cylindre de mesure, on dispose un anneau de garde dans lequel on maintient la même charge constante dont le rôle est d'annuler ou minimiser les effets de bordure : la forme du volume mouillé à la verticale d'un cylindre est, du fait d'infiltrations latérales, celle d'une espèce de champignon renversé ; l'anneau de garde auquel il faut assurer un débit proportionnellement plus important, alimente cette infiltration parasite, le cylindre de mesure étant supposé n'alimenter alors qu'un écoulement vertical. Cette méthode a l'inconvénient d'être grande consommatrice d'eau en sol perméable et longue en sol peu perméable ; elle a le défaut de donner une mesure intégrée sur une certaine profondeur, correspondant à l'obtention du régime stable pour avoir K (MANNERING, MEYER et JOHNSON, 1966).

- La méthode MUNTZ, modifiée par PIOGER :

Cette méthode utilise les cylindres de MUNTZ : on verse 1 l d'eau dans le cylindre de mesure, soit une charge initiale de 10 cm, et on laisse cette quantité d'eau s'infiltrer en maintenant en permanence un niveau égal dans l'anneau de garde. On opère donc à charge décroissante. Cette méthode est économique en eau ; elle est de manipulation très simple et généralement plus rapide que MUNTZ.

- La méthode de PORCHET :

Cette méthode consiste à creuser un trou à la tarrière, à y verser de l'eau et à y mesurer la baisse du niveau liquide en fonction du temps. La surface d'infiltration est constituée par les parois et la base du trou ; la surface latérale est la plus importante tant que l'épaisseur de la tranche d'eau est suffisante : c'est avant tout une mesure de perméabilité horizontale ou oblique (COLOMBANI, LAMAGAT et THIEBAUT, 1973).

- La méthode utilisée par BOIFFIN (1984) consiste à mesurer le diamètre de la tache de sol mouillé à partir d'une alimentation sans charge d'eau, mais au goutte à goutte, à débit constant, grâce à une source (tube capillaire) placée au niveau de la surface du sol. La relation entre le débit apporté et le diamètre de la tache permet de déterminer le flux d'infiltabilité à travers la tache saturée. BOIFFIN utilise sa méthode pour différents stades d'évolution de la surface du sol suite à des pluies naturelles.

L'une des façons d'étudier les transferts de l'eau au champ est l'approche morphologique (cartographie pédologique) : elle consiste à délimiter à une échelle donnée des portions de territoire homogène (unités cartographiques regroupant des sols ayant les mêmes caractéristiques texturales et structurales). On considère généralement qu'à chaque unité correspondent des propriétés hydrodynamiques particulières qui peuvent être mesurées et déterminées pour les différents niveaux d'organisation (MEROT, 1982). Le problème qui se pose est bien sûr l'interprétation de paramètres morphologiques en termes de fonctionnement hydrodynamique. Or, toutes ces méthodes présentent un inconvénient dans la caractérisation des paramètres hydrodynamiques des sols :

- Soit elles utilisent un matériau artificiel reconstitué (POESEN et SAVAT, 1981)
- Soit elles n'étudient que de façon ponctuelle les phénomènes d'infiltation
- Soit elles étudient la dynamique d'infiltation sous lame d'eau et négligent ainsi l'état de dégradation de la surface du sol sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie.

2. - Sous pluies simulées

Pour remédier à ces insuffisances, plusieurs appareils furent construits en vue de reproduire des pluies (simulateurs de pluies).

On distingue deux grands types de simulateurs :

- Les premiers utilisent des dispositifs producteurs de gouttes ; le diamètre des gouttes est différent selon que l'on utilise un dispositif à embouts de diamètre fixe (RIOU, 1966 ; TRICKER, 1979), ou des embouts de diamètre différent (tubes capillaires...) (PALMER, 1962 ; MUTCHEL et MOLDENHAUER, 1963).
- Le deuxième type de simulateurs utilisent l'eau sous pression et des gicleurs. Les énergies cinétiques des pluies simulées sont de plus en plus proches de celles des pluies naturelles ; de 62 à 87 % suivant l'intensité de la pluie pour l'appareil de MEYER (1965) cité par VALENTIN (1981). Ces appareils peuvent arroser des parcelles de grande dimension d'environ 50 m² (MEYER et Mc CUNE, 1963 ; SWANSON, 1965). Des appareils moins encombrants ont été mis au point et appelés "infiltromètres à aspersion" (BERTRAND et PARR, 1960 ; BRYAN, 1974 ; ASSELINE et VALENTIN, 1978 ; YAIR et al, 1980). Ces appareils arrosent des parcelles de 1 m² entourées d'un anneau de garde de quelques m².

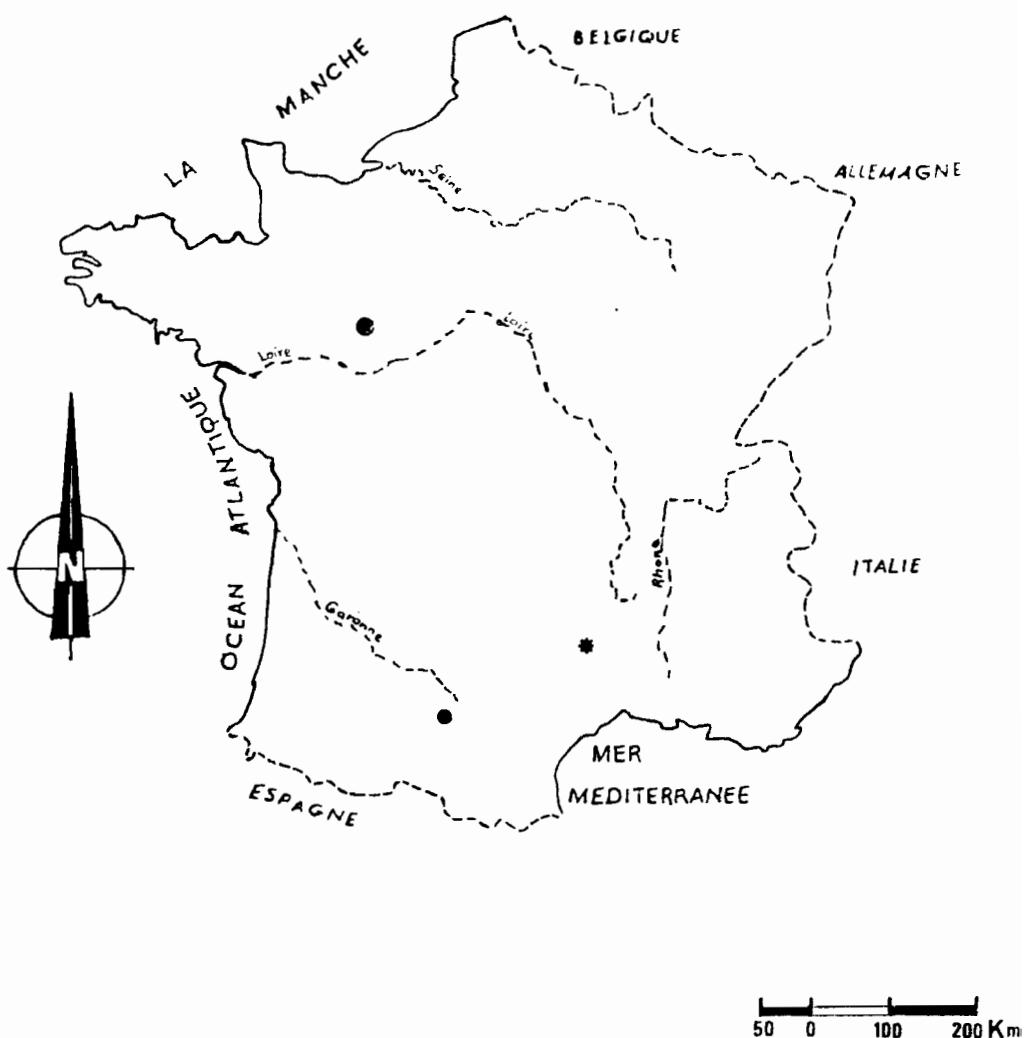
Il nous a semblé utile de travailler à l'échelle du m² où nous avons la possibilité d'assister à la naissance du ruissellement et de sa charge solide sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, d'averses de fréquence décennale aux époques critiques de l'année. ALBERGEL, COLLINET, LAFFORGUE, ROOSE, VALENTIN ... ont travaillé selon cette méthode (simulation de pluie) sur des sols tropicaux en Afrique de l'ouest. ASSELINE, ESCADAFAL, PONTANIER ont utilisé cette méthode en Tunisie. En France, TREVISAN (1986) et RAHELIARISOA (1986) ont travaillé sur les limons battants de la région Centre ; GRIL a travaillé sur les limons et vignobles du Beaujolais ; MASSON a travaillé sur les limons du Nord Pas-de-Calais. ALBERGEL, CASENAVE et VALENTIN (1985) montrent que l'utilisation conjointe d'une cartographie des bassins versants en zones iso-perméables (zone Soudano-Sahélienne), et de la simulation de pluie sur des parcelles représentatives de ces unités, permet la classification des bassins selon des critères de perméabilité. Une première tentative sur deux bassins versants (mare d'OURSI au Brakina-Faso) aboutit à un premier modèle de reconstitution des lames ruisselées à partir d'une cartographie des états de surface (VALENTIN, 1981) et d'une expérimentation au simulateur de pluie (CHEVALLIER, 1982).

Notre travail s'inscrit dans un projet plus vaste (ROOSE-LELONG, 1981) dont l'objectif est d'analyser la variabilité de réaction à des averses assez intenses de type décennal, de sols de texture différente (limono-argileux, sableux humifères et argilo-limoneux) et la variabilité à l'intérieur d'un sol soumis à différentes préparations culturales (fig. 1, tableau 1).

- Sur sols sableux de montagne (Mont-Lozère) : 5 types d'état de surface liés au type de végétation (une pelouse plus ou moins dégradée, une hêtraie, une pessière, des genêts brûlés ou non et des parcelles nues retournées pour tenter de faire la comparaison avec les autres expérimentations (limons de la région Centre et argiles du Lauragais)).
- Sur sols argilo-limoneux du Lauragais : différentes techniques culturales (lits de semence à granulométrie différente, effet de tassemement du labour et de l'épaisseur du lit de semence, effet de la pente et de l'intensité de la pluie).
- Sur sols limoneux de la région Centre : différentes préparations de lits de semence.

Les résultats de l'expérimentation sur les limons de la région Centre, à laquelle j'ai été associé (BOUDJEMLINE, 1984) ont été publiés par RAHELIARISOA (1986) mais ils seront repris ici dans la discussion. Nous présenterons ici les résultats relatifs aux deux autres sols.

- Sols sableux et humifères + différentes litières (Mont-Lozère)
- Sols argileux nus, bien structurés + différentes préparations de lits de semence (Lauragais). Nous tenterons par la suite un rapprochement par analyse de la réaction à une averse décennale (80 mm/h environ) de sols nus finement préparés, de trois textures différentes (limoneuse, sableuse et argileuse).



- LAURAGAIS (HAUTE GARONNE) (sols argileux)
- * MONT-LOZERE (sols sableux)
- BEAUMONT-SUR-DEME (SARTHE) (sols limoneux)

FIG 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DES 3 TYPES DE SOLS ETUDES

Tableau 1 : Tableau synthétique des expérimentations des 3 campagnes expérimentales

	Texture	Pente (%)	Etat de la surface du sol	Nombre de parcelles testées	Protocole appliqué
LAURAGAIS	Argileuse	13 à 20 %	1° essai : différents types de préparation de lit de semence dont :		
			* Labour + LS moyen, N1 et N5 * Labour tassé 1 fois + LS moyen, N2 * Labour tassé 1 fois + LS très fin, N2b * Labour tassé 2 fois + LS moyen, N3 * Labour + LS fin et épais, N4 * Labour + LS fin + 12 mottes, N7 * Labour + LS très fin (cultipacker), N8	..... 7 4 4 4 4 4 4	Une pluie de 40 mm.h^{-1} jusqu'à obtention du régime permanent.
MONT-LOZERE	Sableuse	2 à 5 %	2° essai : Effet intensités dont :		
			* I = 40 mm.h^{-1} * I = 50 mm.h^{-1} * I = 80 mm.h^{-1}	..... 6 3 4	Chaque intensité de pluie est simulée sur une parcelle à part, donc pas de train d'averses.
BEAUMONT SUR DEME	Limoneuse	5 à 36 %	Différentes formations végétales dont :		
			* une pelouse avale ± dégradée * une pelouse amont ± dégradée * une hêtraie * une lande à genêts * un sol nu, pioché	..... 6 4 4 4 4	Un train d'averses constitué de 3 pluies ($90, 110$ et 130 mm.h^{-1}) entrecoupées d'un temps d'arrêt de 30 minutes. Plus une quatrième pluie de 90 mm.h^{-1} sur les parcelles piochées.
			Différents types de préparation de lit de semence dont :		
			* un labour tardif + LS très fin	..... 4	Train d'averses constitué de quatre pluies ($80, 70, 50$ et 30 mm.h^{-1}) ininterrompues. Plus une 5° pluie à 80 mm.h^{-1} après 30 minutes d'arrêt.

Les protocoles expérimentaux appliqués en Lozère et au Lauragais sont différents parce que le contexte de terrain est différent.

En Lozère, on a à faire à des sols sableux de montagne recouverts d'une végétation dense (forêts de hêtres et d'épicéas) ou plus ou moins dégradée (pelouse amont et aval, genêts) ou nus (parcelles retournées). Au Lauragais, les sols sont argileux, cultivés et dénudés (lit de semence au moment des essais). D'autre part, les conditions climatiques sont différentes sur les deux sites : il pleut beaucoup plus au Mont-Lozère où des pluies de forte intensité peuvent survenir à n'importe quelle période de l'année. A titre d'exemple, une pluie de 50 mm h^{-1} pendant 118 mn n'a pas réussi à provoquer le ruissellement au Mont-Lozère, alors que la même pluie déclencherait le ruissellement au Lauragais au bout de 30 mn environ. Or notre but justement est de provoquer le ruissellement et voir l'influence des différentes formations végétales sur ce dernier car les transports solides, comme nous le verrons par la suite, sont très faibles. Il a donc été décidé de simuler une première pluie de 90 mm.h^{-1} , puis une seconde à 110 mm.h^{-1} , puis une troisième à 130 mm.h^{-1} avec toutefois un temps d'arrêt de 30 minutes environ entre chaque pluie. Une quatrième averse d'intensité égale à la première fut simulée en vue de mettre en évidence l'existence éventuelle de phénomènes de réorganisations à la surface du sol. Ce protocole nous permet de déterminer la hauteur de pluie nécessaire et l'intensité de pluie limite pour déclencher le ruissellement d'une part. D'autre part, il nous permet de suivre l'évolution de l'intensité d'infiltration minimale F_n en fonction de l'augmentation de l'intensité de la pluie et l'influence de l'augmentation de cette dernière sur d'autre paramètres hydrodynamiques tels que la hauteur de pluie d'imbibition P_i , le coefficient de ruissellement pour une hauteur de pluie donnée et l'intensité maximale de ruissellement R_x .

Dans le Lauragais, l'objectif est de répondre au problème posé par la chambre d'agriculture et l'I.T.C.F., à savoir quel travail de sol doit-on conseiller aux agriculteurs pour limiter au maximum les risques de ruissellement et d'érosion, suite essentiellement aux orages de printemps tombant sur des terres fraîchement préparées. Les courbes Intensité-Durée-Fréquence dont nous disposons indiquent que des averses de 40 mm.h^{-1} peuvent se produire chaque année pendant 20 minutes. On a donc choisi dans le protocole une pluie de 40 mm.h^{-1} , à durée indéterminée (jusqu'à l'obtention du régime permanent). Mais dans un but de recherche beaucoup plus fondamentale que pratique, on a testé l'influence de l'effet intensité de la pluie sur l'infiltration finale F_N et ceci sur le replat de la parcelle d'expérimentation de l'I.T.C.F., à pente comprise entre 2 et 5 % car les affirmations à ce sujet sont très controversées. Certains auteurs (ALBERGEL et al, 1985 ; COLLINET et VALENTIN, 1979 ; LAFFORGUE, 1979 ; VALENTIN, 1981) affirment que F_N croît quand l'intensité de la pluie croît ; ces derniers auteurs ont surtout travaillé sur des sols tassés après une saison de pluies. D'autres (TREVISAN, 1986 ; RAHELIARISOA, 1986) trouvent que F_N peut diminuer lorsque l'intensité de la pluie augmente ; ils attribuent ceci à une dégradation progressive de la surface du sol (état soufflé du sol au départ). En fait, selon que l'on simule sur sol dégradable des trains d'averses constitués d'intensités croissantes ou décroissantes, F_N diminue quand l'intensité de la pluie croît dans le premier cas et augmente dans le deuxième cas.

Pour essayer d'apporter une contribution à une meilleure connaissance de l'évolution de FN en fonction de l'intensité de la pluie, on a évité dans nos tests sur l'effet intensité, le problème posé par la dégradation de la surface du sol en cours de pluie. Les essais ont été effectués sur des parcelles différentes en supposant que le sol reste homogène d'une parcelle à une autre, ce qui n'est pas tout à fait le cas pour les terreforts du Lauragais.

Nous exposerons dans la première partie la méthodologie. Nous consacrerons la deuxième partie à la campagne du Mont-Lozère et la troisième partie à la campagne du Lauragais. Nous comparerons dans la quatrième partie les résultats du Lauragais obtenus sur pente faible avec ceux de la région centre (RAHELIARISOA, 1986) auxquels nous avons été associés (BOUDJEMLINE, 1983 - DEA).

CHAPITRE I

L A M E T H O D O L O G I E

La méthode choisie est la simulation de pluie qui consiste à reproduire des pluies artificielles dont les caractéristiques sont les plus proches possibles de celles des pluies naturelles (fig. 2). L'appareil arrose une parcelle de 1 m^2 délimitée par un cadre métallique. Les eaux de ruissellement sont recueillies dans des récipients à l'aval des parcelles et les volumes ruisselés sont mesurés régulièrement à l'aide d'un chronomètre toutes les trois minutes ou toutes les six minutes pour suivre l'évolution du ruissellement (et de l'infiltration par déduction) en cours de pluie. L'eau ruisselée est échantillonnée dans des bouteilles de volume connu, ce qui nous permet de suivre l'évolution de la turbidité en fonction du déroulement de l'essai. Cette évolution n'a pas pu être définie au Mont-Lozère car les eaux de ruissellement étaient très faiblement chargées (on a prélevé de gros volumes : jerrycans de dix ou vingt litres). L'avantage de cette méthode est de pouvoir maîtriser tant que possible la pluie (hauteur, durée). Deux pluviomètres sont alignés de part et d'autre de la parcelle pour contrôler l'intensité de la pluie qui peut varier en cours de pluie (chute de pression, rafale de vent, ennui mécanique...).

1.1 - Description de l'appareil

Le simulateur utilisé est un infiltromètre à aspersion mis au point par l'ORSTOM (ASSELINNE et VALENTIN, 1978) (fig. 3) et inspiré de l'infiltromètre à aspersion de BERTRAND et PARR (1960). L'appareil mis à notre disposition par ROOSE (UR 509) a subi quelques modifications. En adaptant un système de friction et de butées sur un nouveau jeu de pignons (ESCADAFAL, M'TIMET et ASSELINNE, 1986), ASSELINNE a rendu possible dorénavant d'abaisser l'intensité de la pluie en-dessous de 30 mm.h^{-1} . Une gamme de 14 à 140 mm.h^{-1} est rendue possible. Le bâti-cadre a d'autre part été sensiblement allégé.

Le système d'arrosage de l'appareil (fig. 3) est fixé au sommet d'une tour en forme de tronc de pyramide de 3,7 m de haut. Cette tour permet la fixation d'une bâche destinée à isoler la parcelle de l'action du vent. Le système d'arrosage est constitué d'un gicleur calibré (Teejet 6560) monté sur un bras mobile et alimenté en eau à débit constant par une moto-pompe : un manomètre permet de contrôler la pression de l'eau. Un mouvement de balancement est imprimé au gicleur par un moteur (moteur d'essuie-glaces) alimenté par une batterie de 12 volts. Un système de bras de levier réglable permet, en faisant varier l'angle de balancement du gicleur, de modifier la surface arrosée au sol et de modifier l'intensité de la pluie en cours d'averse.

L'intensité de l'averse, mesurée sur 1 m^2 , est réglable à tout moment sans arrêter la pluie. En faisant varier l'angle de balancement du gicleur, on augmente ou on diminue la surface arrosée alors que le débit d'eau reste constant. La surface de garde de la parcelle de 1 m^2 varie de $2,5$ à 13 m^2 ; elle est limitée à $6,5 \text{ m}^2$ lors de l'emploi d'une bâche.

La parcelle d'expérimentation de 1 m^2 est délimitée par un cadre métallique enfoncé dans le sol d'environ 5 cm. Le côté aval du cadre est pourvu de trous ou de fentes et est muni d'un canal collecteur du ruissellement qui rejoint une éprouvette par un tuyau souple d'environ 1 mètre de long. Deux pluviomètres linéaires de $0,1 \text{ m}^2$ sont disposés de part et d'autre de la parcelle et servent à contrôler l'intensité de la pluie.

Cette méthode (simulation de pluie) présente plusieurs avantages :

a/ La rapidité : les pluies simulées permettent de tirer des renseignements dans des délais relativement brefs, alors que l'acquisition des données sur parcelles soumises aux précipitations naturelles requiert une durée de dix à vingt ans.

b/ L'efficience : les résultats issus de quelques simulations informent davantage que ceux tirés de séquences pluviométriques naturelles et aléatoires, souvent difficiles à interpréter.

c/ Le contrôle : la possibilité de choisir l'intensité, la durée et la fréquence des averses ; de maintenir constante la pluviométrie.

Cette méthode a toutefois des limites :

a/ Difficulté dans le choix des paramètres à reproduire, étant donné la variation spatiale de ceux-ci, et l'indiffisante connaissance des caractéristiques physiques de la pluie, qui influencent de manière directe l'intensité du ruissellement et de l'érosion.

b/ Le simulateur arrose des parcelles qui comparées au champ, sont très réduites, ce qui empêche l'étude de certains paramètres comme la longueur de la pente.

c/ Difficulté d'extrapolation des résultats obtenus à l'échelle du champ soumis aux précipitations naturelles.

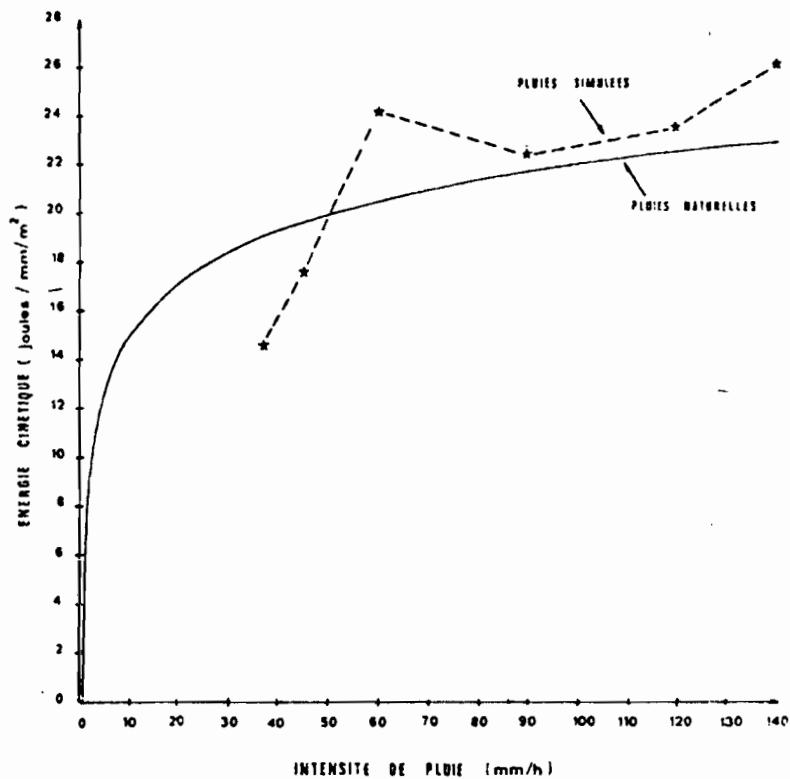


FIG 2. COMPARAISON DES ENERGIES CINETIQUES DES PLUIES NATURELLES
(ABIOJAN) ET SIMULEES (INFILTROMETRE A ASPIRATION)

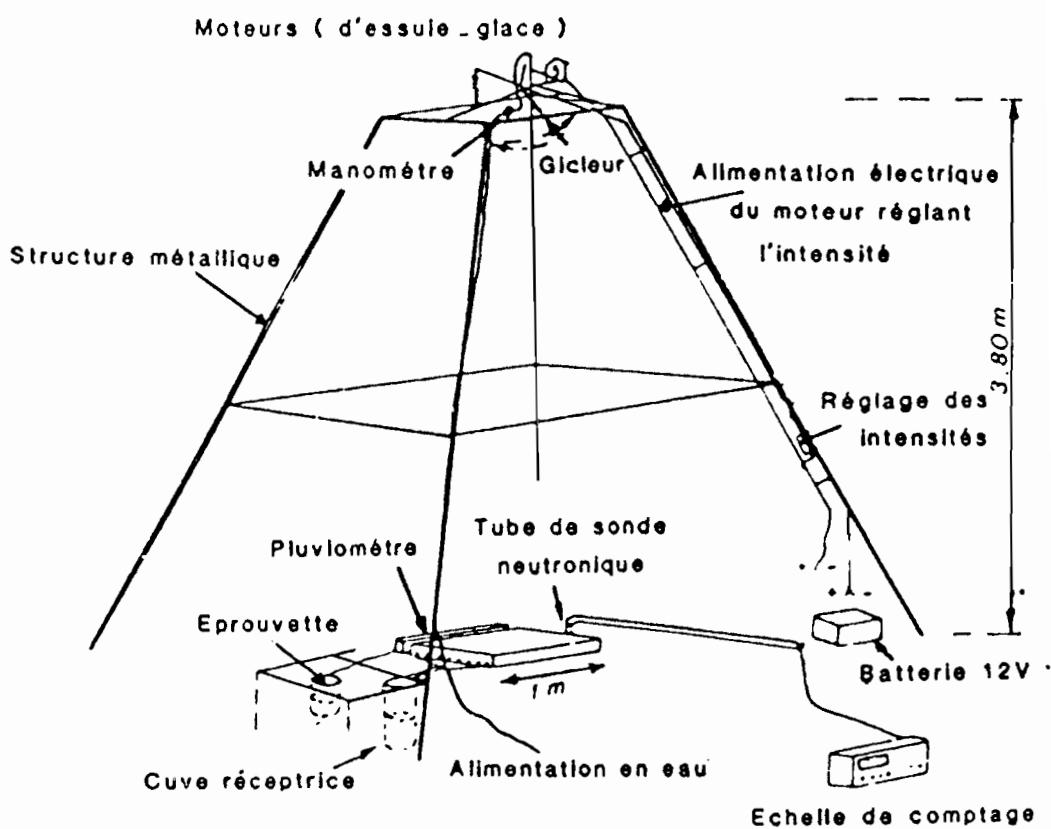


FIG 3: L' infiltromètre à aspersion

1.2 - Hydrogramme de ruissellement

L'hydrogramme théorique type (fig. 4) dont l'interprétation a été faite par LAFFORGUE et NAAH (1976), LAFFORGUE (1977), COLLINET et LAFFORGUE (1979), fait apparaître quatre phases bien individualisées :

- une phase d'imbibition ;
- une phase à régime transitoire ;
- une phase à régime permanent ;
- une phase de vidange.

1.2.1 - La phase d'imbibition

Du début de l'averse to à un temps t_i , on n'observe aucun ruissellement sur la parcelle ; l'intensité d'infiltration est supérieure ou égale à l'intensité de la pluie. A un certain moment, de petites flaques se forment dans des microdépressions et un petit stockage de surface se constitue ; l'intensité d'infiltration commence à être inférieure à l'intensité de la pluie.

1.2.2 - La phase du régime transitoire

Au temps t_i , les flaques débordent et la parcelle commence à ruisseler. L'intensité de ruissellement croît régulièrement jusqu'à atteindre un niveau stabilisé. La hauteur moyenne de la lame d'eau en mouvement à la surface de la parcelle croît également.

1.2.3 - La phase du régime permanent

A partir d'un temps t_m , un régime permanent s'établit et l'infiltration atteint un minimum appelé F_N . Un palier de ruissellement s'établit à la valeur maximale de R_x . Ce régime permanent se poursuit jusqu'à l'arrêt de l'averse, avec : $F_N = I - R_x$.

1.2.4 - La phase de vidange

A l'arrêt de la pluie au temps t_u , le ruissellement se poursuit en décroissant progressivement et s'annule au temps t_f . Cette lame ruisselée est appelée "détention superficielle récupérable".

1.3 - Le turbidigramme théorique

Le turbidigramme est par définition, la courbe d'évolution au cours du temps, de la charge solide des eaux de ruissellement sous une averse d'intensité donnée (fig. 5).

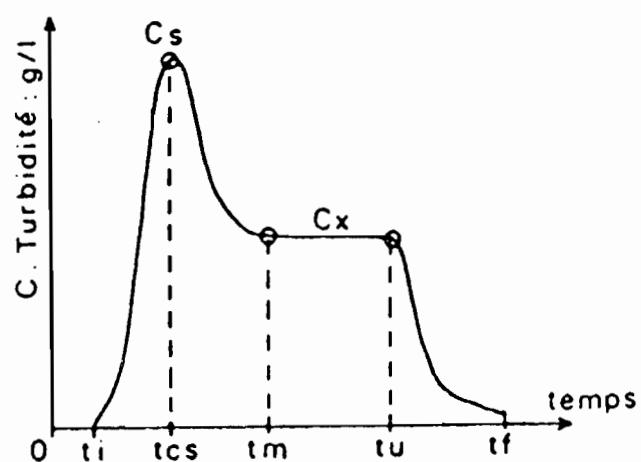
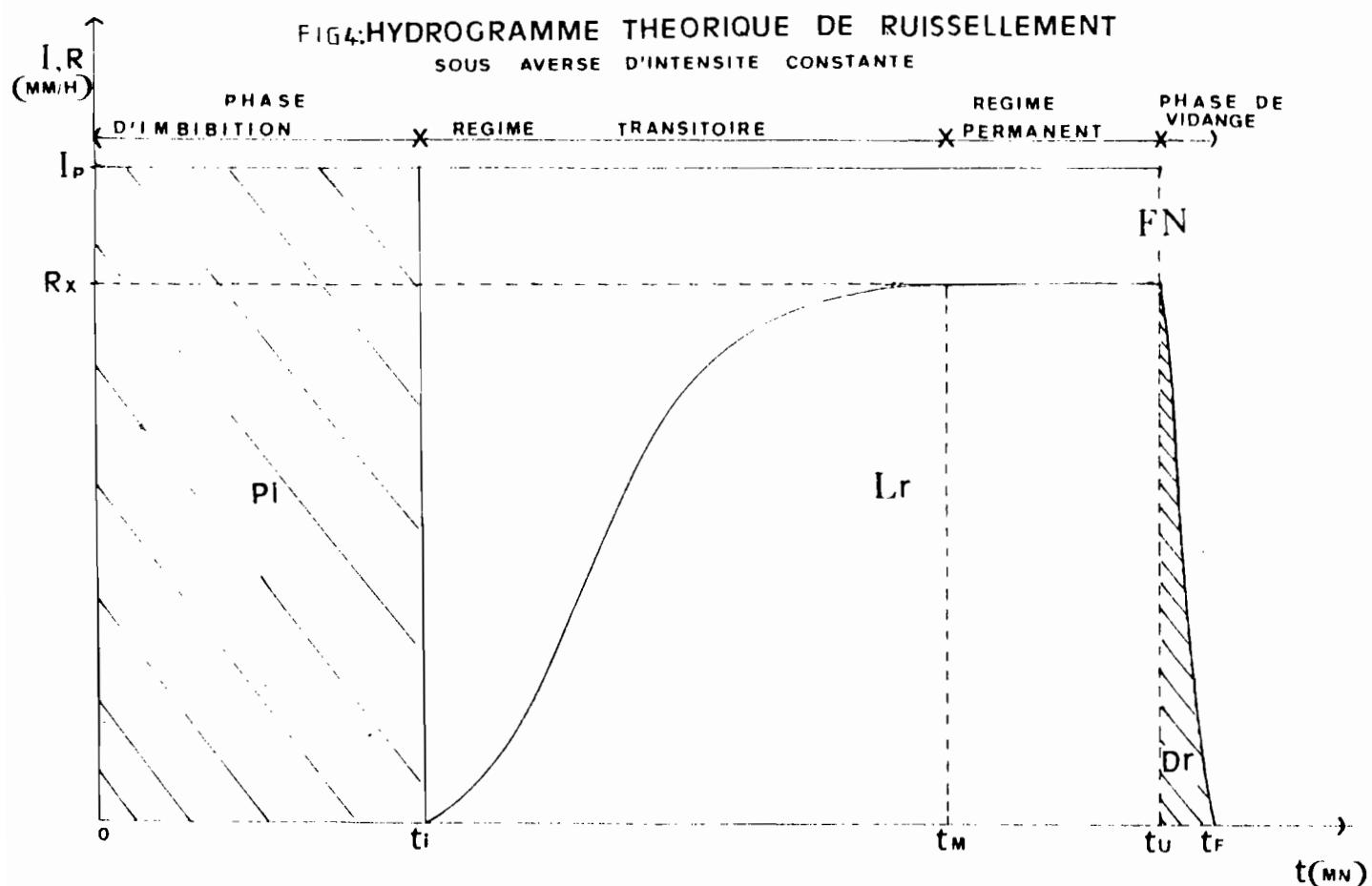


Fig. 5 : Turbidigramme théorique

1.3.1 - Les différentes phases du turbidigramme

Elles sont définies par COLLINET et LAFFORGUE (1979) comme suit :

1.3.1.1 - La phase d'imbibition de t_0 à t_i

Deux processus se superposent pendant cette phase :

- une mobilisation des particules meubles disposées à la surface du sol par humectation : c'est le stock initial c_{st} . Ces particules sont constituées de sédiments délaissés pendant la phase de vidange de l'averse précédente, des matériaux remaniés par la faune du sol ou des poussières apportées par le vent ;
- une désagrégation de la surface du sol du fait de l'impact des gouttes de pluie : c'est c_{sp} , cette composante de la turbidité due à l'effet de rejaillissement ou "splash".

1.3.1.2 - La phase transitoire de t_i à t_m

L'augmentation brutale de la turbidité vers un pic c_s au temps t_{cs} est due à la décharge des composantes $c_{st} + c_{sp} + c_n$, avec c_n : la composante due à l'abrasion des surfaces planes par la lame d'eau de ruissellement en mouvement. Après le temps t_{cs} , on observe une diminution rapide de la turbidité jusqu'à une valeur de palier c_x . Les composantes de la turbidité c_{st} et c_{sp} diminuent tandis qu'augmente l'intensité du ruissellement.

1.3.1.3 - La phase de régime permanent de t_m à t_u

Pendant cette phase, s'instaure un palier de la turbidité c_x , correspondant à la stabilité de l'effet "splash".

1.3.1.4 - La phase de vidange de t_u à t_f

La diminution du ruissellement va entraîner une diminution des transports solides, car l'énergie du ruissellement n'est plus suffisante pour le transport de toutes les particules. C'est à ce moment que va se constituer le stock de sédiments se déposant sur la parcelle sans atteindre l'exutoire.

1.4 - Définition des symboles utilisés

- t : temps compté à partir du début de l'averse, en mn ;
- t_i : début du ruissellement à l'exutoire, en mn ;
- t_u : temps utile ou durée totale de l'averse, en mn ;
- t_f : arrêt du ruissellement, en mn ;

ta : durée de ressuyage entre deux averses successives, en h ;
θs : humidité volumique après la pluie, en % ;
θo : humidité volumique initiale, en % ;
Δi : déficit de saturation en eau du sol, en % ;
I : intensité de la pluie, en mm.h^{-1} ;
Pi : hauteur de pluie d'imbibition, en mm ;
Pu : pluie utile ou hauteur totale de l'averse, en mm ;
Rx : intensité de ruissellement maximal, en mm.h^{-1} ;
FN : intensité d'infiltration minimale, en mm.h^{-1} ;
Lr : hauteur de la lame d'eau ruisselée, en mm ;
Dr : détention superficielle récupérable, en mm ;
Kr : coefficient de ruissellement, en % ;
Cs : turbidité maximale en début de ruissellement, en g.l^{-1} ;
Cx : turbidité stabilisée, en g.l^{-1} ;
Cm : turbidité moyenne, en g.l^{-1} ;
E : débit solide ou érosion en nappe, en g.m^{-2} .

1.5 - Mesure des caractéristiques physiques et hydriques du sol

Parallèlement à la simulation de pluie, plusieurs autres opérations sont effectuées, notamment pour suivre l'évolution des caractéristiques physiques et hydriques du sol et interpréter les mesures de ruissellement et de transport solide en fonction de leur évolution.

Avant et après chaque essai de simulation, une description de la parcelle suivie de mesures de la rugosité de la surface du sol et de la pente de la parcelle sont faites. Dès prélèvements d'échantillons de terre sont effectués à différentes profondeurs pour caractériser l'état hydrique initial puis final de la parcelle d'essai. Des mesures de densité apparente et de densité réelle ainsi que des suivis de cinétique de ressuyage ont été aussi effectuées. Des échantillons d'eau de ruissellement sont prélevés tout au long de l'essai ; ils serviront à la détermination de la charge solide des eaux de ruissellement.

1.5.1 - Evaluation des différents composants occupant la surface du sol

La caractérisation des différents composants recouvrant la surface du sol (herbe, cailloux, différentes classes de mottes, résidus de culture...) se fait à l'aide d'une règle et d'une aiguille. On compte tous les deux centimètres le long d'un transect soit perpendiculaire à la ligne de plus grande pente (cas du Lauragais), soit dans le sens de la pente (cas du Mont-Lozère), tous les éléments qui recouvrent la surface du sol. Cette opération

est répétée cinq fois au Lauragais et quatre fois au Mont-Lozère. On détermine ainsi sur l'ensemble des profils, la surface qu'occupent les différents éléments.

1.5.2 - Mesure de la rugosité de la surface du sol

Au Mont-Lozère, les mesures de rugosité ont été effectuées, comme pour la caractérisation de l'état de la surface du sol, à l'aide d'une règle et d'une aiguille. On mesure selon quatre profils orientés dans le sens de la pente et tous les deux centimètres, la hauteur du microrelief. L'ensemble des points d'un profil permet de tracer une ligne brisée.

Au Lauragais, ces mesures ont été effectuées selon cinq profils orientés perpendiculairement à la ligne de plus grande pente, à l'aide d'une chaînette épousant les formes du microrelief et dessinant une ligne brisée (ROOSE, 1985).

Les valeurs de rugosité ont été quantifiées dans les deux cas par l'indice IR (avec $IR = \frac{\text{ligne brisée}}{\text{ligne droite}} \times 100$) en prenant la moyenne des quatre profils (Mont-Lozère) et la médiane des cinq profils (Lauragais).

1.5.3 - Mesure de l'humidité du sol

L'humidité du sol a été mesurée par la méthode gravimétrique à l'aide d'une tarrière sur plusieurs profondeurs et en plusieurs répétitions (3 à 5). Les échantillons de terre récupérés dans des boîtes tarées sont pesés au laboratoire "en humide" puis mis à l'étuve à 105°C pour y être retirés 24 h après et pesés "en sec". Soient :

P₀ : poids de la boîte vide

P₁ : poids de la boîte vide + poids de la terre humide

P₂ : poids de la boîte vide + poids de la terre sèche

L'humidité pondérale θ_p est définie par :

$$\theta_p \% = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_0} \times 100$$

1.5.4 - Mesure de la densité apparente

Des mesures de densité apparente ont été effectuées au moins une fois par traitement et en cinq répétitions en différentes profondeurs du sol, dans le Lauragais et en trois répétitions pour chaque horizon dans la même fosse qui a servi à la description du profil pédologique, dans le Mont-Lozère. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'un cylindre creux de volume connu (500 cm^3 environ) et récupérés dans des sacs. Au laboratoire, ils sont mis à l'étuve d'où on les retire après 24 heures.

Soient : P_0 : poids du sac vide

P_1 : poids du sac vide + poids de l'échantillon sec.

La densité apparente ρ_a correspond au poids de la terre sèche rapporté au volume du cylindre.

$$\rho_a = \frac{P_1 - P_0}{\text{Volume}}$$

Le produit de la densité apparente ρ_a par l'humidité pondérale θ_p donne l'humidité volumique θ_v :

$$\theta_v = \theta_p \times \rho_a$$

1.5.5 - Détermination de la densité réelle

On prend 50 g de terre sèche qu'on introduit dans un bêcher de 250 cc ; on ajuste avec de l'eau permumée jusqu'à la moitié du bêcher environ ; on laisse bouillir pendant 6 h sur un bac à sable pour chasser les gaz puis on laisse refroidir. Le contenu du bêcher est alors transvasé dans un ballon de 250 cc ; ce dernier est rempli jusqu'au trait de jaugeage par un ajout d'eau permumée. Le ballon plein d'eau doit être préalablement pesé. Soient :

P_1 : poids du ballon plein d'eau

P_2 : poids du ballon avec terre et eau

V : volume réel de l'échantillon que l'on cherche à déterminer

V_1 : volume du ballon rempli jusqu'au trait de jaugeage

P_3 : poids du ballon vide

P_4 : poids de l'échantillon sec (50 g)

on a :

$$P_1 = P_3 + (V_1 \times 1) \quad (1)$$

$$P_2 = P_3 + (V_1 - V) \times 1 + P_4 \quad (2)$$

$$(2) - (1) \quad P_2 - P_1 = P_4 - V$$

$$V = P_4 + P_1 - P_2$$

La densité réelle est :

$$\rho_r = \frac{P_4}{P_4 + P_1 - P_2}$$

1.5.6 - La porosité totale

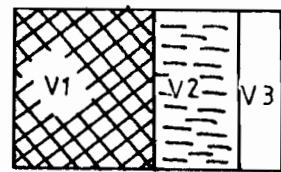
Elle peut se définir comme la fraction de l'unité de volume du sol en place qui n'est pas occupée par la matière solide :

soit un volume apparent V de sol comportant :

- un volume V_2 d'eau
- un volume V_3 de gaz

Le volume solide restant est : $V_1 = V - (V_2 + V_3)$

$$\text{On aura : } P_t = \frac{V_2 + V_3}{V} = \frac{V - V_1}{V}$$



La porosité totale se calcule à partir des résultats des mesures de la densité réelle et de la densité apparente.

$$dr = \frac{P}{V_1} \quad V_1 = \frac{P}{dr}$$

$$da = \frac{P}{V} \quad V = \frac{P}{da}$$

comme $P_t = \frac{V - V_1}{V}$, on obtient :

$$P_t \% = \frac{dr - da}{dr} = 1 - \frac{da}{dr} \times 100$$

La différence entre la porosité totale d'une tranche de sol donnée et de son humidité volumique initiale, rapportée à la porosité totale définit le déficit de saturation de la tranche de sol en question.

$$\Delta i \% = \frac{P_t - \theta_0}{P_t} \times 100$$

1.5.7 - Determination de la charge solide

L'eau ruisselée échantillonnée dans des bouteilles de volume connu est traitée au laboratoire. Après y avoir ajouté 2 cc de sulfate d'alumine à 5 %, on laisse le contenu des bouteilles flocculer. Par la suite, ces dernières sont siphonées et la charge solide est reprise dans des bêchers. Après chauffage à 105° C dans l'étuve, les bêchers et leur charge solide sont pesés sur une balance au 10^{-2} g de précision.

Soient : P_0 : poids du bêcher vide

P_1 : poids du déchirer vide + terre sèche

V : volume de l'échantillon

on a : $C = \frac{P_1 - P_0}{V}$ avec c = charge solide exprimée en g/l.

CHAPITRE II

CAMPAGNE DE SIMULATION AU MONT-LOZERE

R E S U M E

Pour expliquer les différences de ruissellement observées à partir des bilans hydrologiques sur les trois bassins expérimentaux du mont-Lozère (KR pelouse > KR hêtre > KR épicéa), deux hypothèses principales peuvent être évoquées :

Importance des surfaces engorgées ou différence d'état de surface (surface tassée ou dégradée = niveau de commandement d'infiltation). Cette dernière hypothèse a été testée en mai et juin, 1985 à l'aide du mini simulateur de pluie, type ORSTOM, en réalisant 3 intensités de pluie appliquées à six états de surface du sol = pelouse amont et aval, dégradée ou non, genêts brûlés ou non, hêtraie, pessière et sol nu retourné.

L'état d'humectation initial du sol combiné à la densité du couvert végétal, semble contrôler la hauteur de pluie d'imbibition P_i .

Cette dernière varie de 140 à 300 mm sur les surfaces couvertes et de 4 à 30 mm sur les surfaces dégradées. Lorsque le sol est humide, les écarts diminuent ($P_i = 1$ à 10 mm).

L'infiltérabilité est très élevée sur ces sols sableux, caillouteux riches en matières organiques. Elle varie entre 90 à 130 mm.h^{-1} sous forêt et pelouse dense, 40 à 100 mm.h^{-1} sous pelouse dégradée et entre 60 et 80 mm.h^{-1} sous genêts plus ou moins écorbés. Sur sol nu retourné, sableux et riche en matières organiques ($> 10\%$), elle atteint 60 à 70 mm.h^{-1} , ce qui est très élevé. Le coefficient de ruissellement pour une averse de 60 mm et d'intensité voisine de 90 mm.h^{-1} , varie selon l'humidité préalable du sol et surtout selon la densité du couvert végétal qui prime l'effet de la pente. Ce dernier (KR) varie de 0 % sous pelouse dense et hêtre à 2 % (épicéas), 2 à 4 % sous pelouse plus ou moins dégradée et de 6 à 23 % sous genêts.

Il augmente avec l'humidité préalable du sol, l'intensité des pluies, la pente (si surfaces couvertes) et le taux de sol nu. Durant les fortes averses, le ruissellement ne se développe donc pas partout avec la même intensité ; il débute sur les zones engorgées (rivière, tourbières, bas de pente, chaos de rochers, basse terrasse). Ensuite sur les terres tassées et sur-pâturées (proximité de la draille et autres chemins et zones de repos des moutons). Et beaucoup plus tard mais de façon

extrêmement rare, sur les litières d'épicéas, de hêtres et la pelouse saine. Ces résultats confirment donc la théorie "Partial Contributing Area" en montrant le rôle majeur des surfaces engorgées et le rôle secondaire des surfaces dénudées, tassées, surpâturées. Il devrait être possible de modéliser le ruissellement sur ces bassins en établissant une carte des zones engorgées et des états de surface, en complétant les observations au simulateur de pluie et en calant le modèle sur les données hydrologiques acquises sur ces bassins.

La charge de particules fines en suspension dans les eaux de ruissellement sur versant est très faible. Elle naît sur les zones dénudées ($0,1$ à 5 g.l^{-1} sur sol nu) mais elle est piégée par l'herbe et les litières ($0,02$ à $0,3 \text{ g.l}^{-1}$). Elle augmente avec la pente et la surface découverte du sol mais pas automatiquement avec l'intensité de la pluie (elle est fonction de l'augmentation de l'énergie des gouttes de pluie mais aussi de la dilution par augmentation du volume ruisselé). Actuellement, les versants apportent peu de ~~terre~~ à la rivière ($0,1 \text{ t/ha/an}$) mais localement sur les zones dégradées, circule généralement beaucoup d'eau qui provoque du ravinement (généralement peu actif), des éboulements de berge et des chasnes de galets ($0,2 \text{ t/ha/an}$) lors de fortes averses. Les transports solides moyens sont donc de même ordre que les pertes en solution (quelques dizaines de kg/ha/an).

2.0 - Introduction

Le but de la campagne de simulation de pluie qui eut lieu au Mont-Lozère de mai à juin 1985, est d'améliorer nos connaissances sur l'origine du ruissellement et de sa charge solide sur les versants en fonction :

* de 6 litières de différents couverts :

- deux pelouses plus ou moins dégradées (pelouse aval et pelouse amont)
- une hêtraie
- une pessière
- une lande à genêts avant et après écoubage
- un sol nu, pioché en chacune des 4 premières situations.

* de l'inclinaison de la pente

* du type de surface qui dépend de l'importance de la rugosité, de la nature et de la densité du couvert végétal, de la présence de cailloux etc...

Sur chaque type de formation végétale, on a testé 4 parcelles et 6 sur la pelouse aval. L'une de ces 4 parcelles fut reprise quelques jours après l'avoir débarrassé de son couvert végétal puis pioché sur 10 - 15 cm. Sur la lande à genêts, 2 parcelles furent testées dont une première fois avant l'écoubage et une deuxième fois après celui-ci. Au total, 25 parcelles furent testées. Bien qu'on ait choisi des sites groupés, les profils pédologiques ne sont pas identiques. En réalité, on a cherché à apprécier la variabilité totale plutôt que de réaliser des répétitions caractéristiques.

2.1 - le milieu

2.1.1 - Situation géographique :

Les bassins versants élémentaires du Mont-Lozère sont situés sur le flanc sud du massif Cévenol du Mont-Lozère (fig. 6).

Les principales caractéristiques physiographiques des bassins sont représentées dans le tableau 2 (DUPRAZ, 1984).

Tableau 2 : Principales caractéristiques physiographiques des bassins

Nom local	Superficie ha	Altitude moyenne m	Altitudes extrêmes m	Orientation	Pente moyenne du bassin	Pente moyenne du ruisseau	Longueur du cours m	Densité de réseau km/km²
Valat de la Japine	54	1270	1160-1395	N → S	8	3	750	1,39
Valat de la Latte	19,3	1421	1340-1495	NE → SW	20	7	210	0,35
Valat des Cloutasses	31	1386	1290-1495	N → S	10	3	825	2,43

2.1.2 - La géologie

Le substratum des bassins est un granite porphyroïde dit "du Pont-de-Montvert" (WEDRAOGO, 1983) citée par DUC (1984).

Le tableau 3 donne la composition chimique de 2 prélèvements de cette roche non loin des bassins.

Tableau 3 : Composition chimique du granite porphyroïde du Pont-de-Montvert (GRANIER, 1980)

Eléments en % pondéraux	Granite porphyroïde à Vialas	Granite porphyroïde au Pont-de-Montvert
SiO ₂	68,7	68,85
Al ₂ O ₃	15,9	15,85
Fe ₂ O ₃	0,1	1,25
FeO	2,05	1,75
CaO	2,45	2,91
Na ₂ O	3,35	3,10
K ₂ O	5,00	4,20

Les 3 bassins présentent une couverture d'arène granitique d'épaisseur très irrégulière et comportant de nombreux blocs de taille variable (DUC, 1984). Cette couverture arénique proviendrait d'une altération sur place du granite au cours du quaternaire (DEWOLF et al, 1977), accompagnée ou suivie de phénomènes de redistribution de matériau par ruissellement diffus ou par gélifluxion et glissements en masse de matériel saturé d'eau, qui ont induit des hétérogénéités de ces arènes avec des épaisseurs plus ou moins grandes, des textures plus ou moins graveleuses et des blocs plus ou moins nombreux selon la localisation. Cette évolution géomorphologique se poursuit actuellement bien que très atténuée sous l'influence du climat montagnard froid et contrasté. Certaines zones ont été complètement décapées de leur couverture arénique laissant apparaître le granite sur de grandes surfaces (exemple du bassin de la Sapine).

2.1.3 - Les sols

Les sols des bassins du Mont-Lozère sont très sableux et humifères. Sur chaque station d'expérimentation, un profil fut décrit et des échantillons de terre furent prélevés et destinés à des analyses physiques (textures, humidités, densités) et chimiques (bases échangeables, capacité d'échange, pH, C/N ... etc).

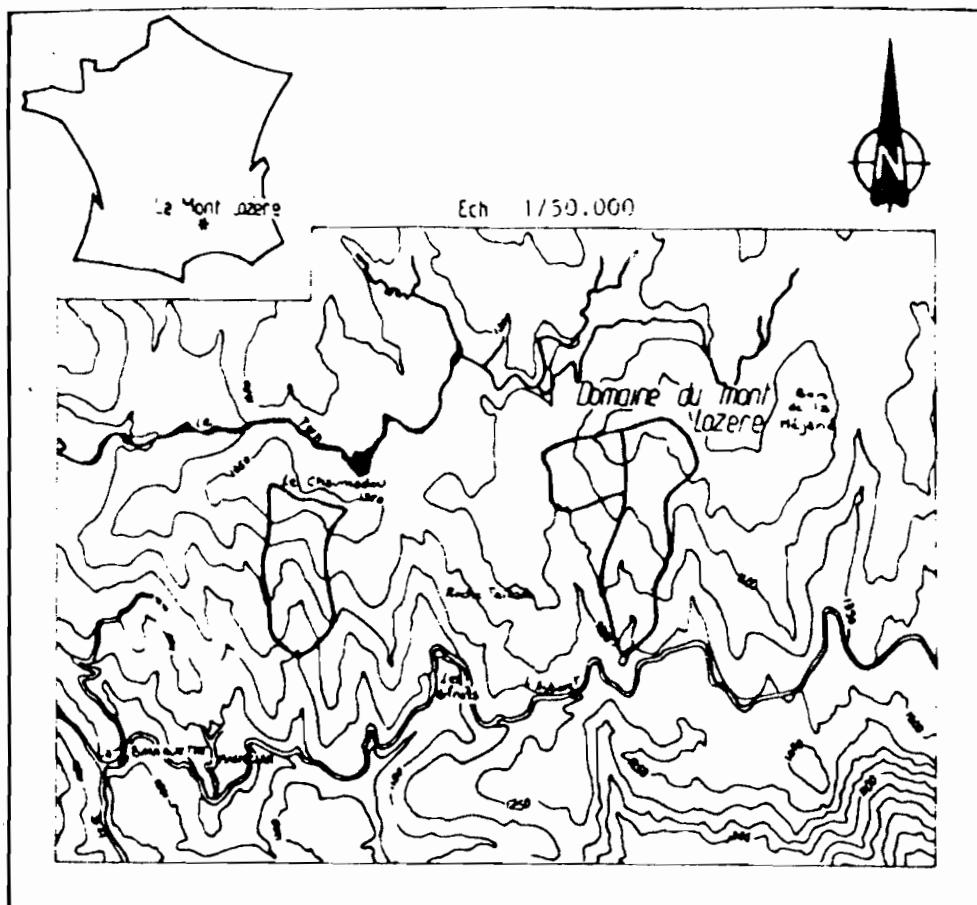


Fig. 6 : Situation géographique des bassins versants expérimentaux du Mont-Lozère

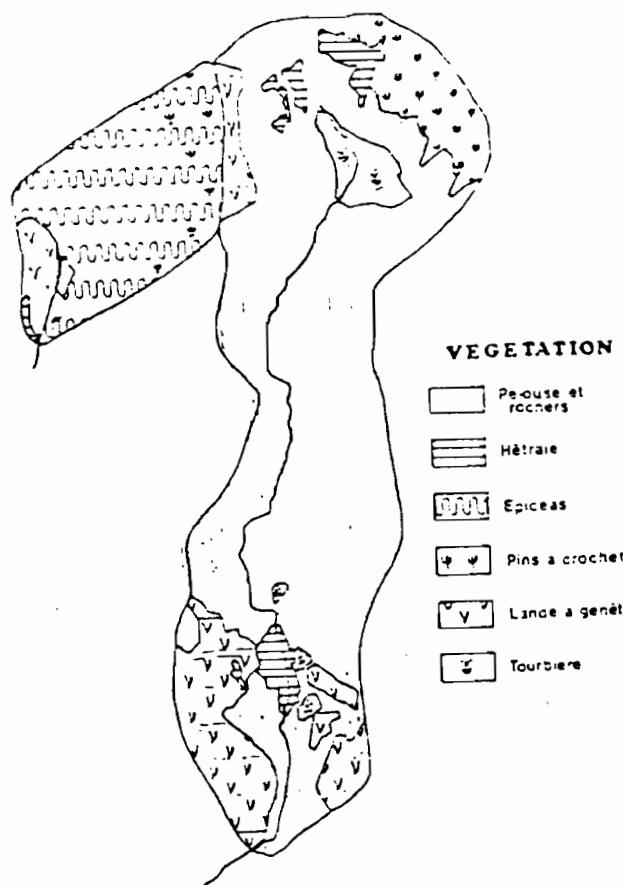
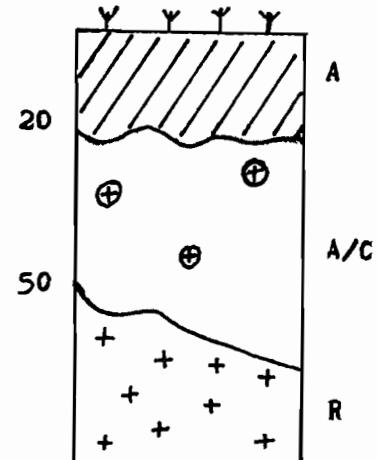


Fig. 7 : Recouvrement des bassins par les diverses formations végétales

2.1.3.1 - Exemple d'un profil pédologique décrit sur la parcelle PAMd3

Horizon 0-20 cm :

- * couleur : brun foncé dûe à la matière organique. Éléments grossiers : 50 % de graviers et cailloux peu altérés
- * texture : sableuse à sable fin et grossier
- * structure : grumeleuse
- * horizon peu compact, très fragile
- * porosité : inter-agrégats très forte et inter-particulaire
- * racines : très nombreuses ; chevelu racinaire fin
- * limite : nette et ondulée



Horizon 20-50 cm :

- * mélange de A et de cailloux et pierres plus ou moins arénisées représentant 50 % de l'horizon
- * mêmes caractéristiques que A à part une teneur en éléments grossiers très supérieure (75 % environ)
- * horizon plus compact
- * limite : plus irrégulière avec granite plus ou moins altéré.

2.1.3.2 - Exemple d'analyse physico-chimique du profil décrit ci-dessous

Tableau 4 : Analyse physico-chimique du sol de la pelouse amont.

horizon	profon- deur cm	H ₂ O eau	GRANULOMETRIE					M.O %	C %	C/N	BASES mé % ÉCHANGEABLES			T/mé/ 100 g	T/T ₀ %
			A	LF	LG	SF	SG				Ca	Mg	K		
A	0-20	4,5	6,5	15,5	4,0	14,2	50,4	7,5	20,0	7,0	0,05	0,08	0,14	12,0	2,2
A/C	20-50	4,4	2,0	14,0	5,0	16,6	59,5	1,5	12,0	8,3	0,04	0,05	0,09	10,0	1,8

La description des autres profils pédologiques et leurs analyses physico-chimiques se trouvent en annexe.

Conclusion :

Les sols du Mont-Lozère sont jeunes, peu épais, humifères, riches en matière organique, notamment les horizons de surface. Leur texture est grossière sablo-graveleuse ; ils sont très poreux, très désaturés et très acides.

2.1.4 - L'occupation des sols

Cinq formations végétales occupent les bassins versants :

- une pelouse, une hêtraie et une lande à genêts couvrent le bassin des Cloutasses
- une pessière couvre le bassin de la latte.

Le tableau 5 montre la composition du couvert végétal sur les bassins (DUPRAZ, 1984) :

Tableau 5 : Recouvrement des diverses formations végétales des bassins versants

VALAT DE LA LATTE	VALAT DES CLOUTASSES
<i>Picea excelsa</i> Lx. ~(futaie équienne) 30 %	<i>Nardus stricta</i> L. (Pelouse) 60 %
<i>Pinus montana</i> Mill. 5 %	<i>Plantago recurvata</i> L. (Pelouse) 15 %
<i>Abies alba</i> Mill. (Fourré) 1 %	<i>Fagus silvatica</i> L. (Bosquet) 5 %
<i>Fagus silvatica</i> (L.) (Taillis) 1 %	<i>Pinus montana</i> Mill. 5 %
<i>Cytisus purgans</i> (L.) Benth (Lande) 12 %	<i>Cytisus purgans</i> (L.) Benth (Lande) 10 %
Tourbière 1 %	Tourbière 5 %

La figure 7 illustre le taux de recouvrement des bassins par les différentes formations végétales.

Si le couvert végétal est réparti de façon homogène et recouvre la totalité du sol (hêtraie et pessière), il n'en est pas de même pour ce qui est des pelouses. En effet, plusieurs formations végétales secondaires occupent la pelouse dont 5 % de hêtres et 10 % de genêts plus ou moins brûlés.

2.1.5 - Le climat :

Le climat du Mont-Lozère est caractérisé par un été court et frais et un hiver très froid. Nous nous intéresserons surtout à la pluviosité qui est l'agent climatique essentiel responsable du ruissellement et de l'érosion en nappe.

2.1.5.1 - Les précipitations annuelles

Elles sont importantes et voisines de 2.000 mm en moyenne par an. Les variations inter-annuelles sont très importantes (fig. 8). La lame d'eau annuelle a varié de 1468 mm en 1983/1984 à 2075 mm en 1984/1985 et de 1550 mm en 1981/1982 à prèsque 2500 mm en 1982/1983. Une part importante tombe sous forme de neige.

2.1.5.2 - La pluviosité mensuelle

La figure 8 indique la pluviosité moyenne mensuelle de 1981 à 1985. On distingue 2 périodes de faible pluviosité :

- la première : de juin à août
 - la deuxième : de janvier à mars
- et 2 périodes de forte pluviosité :
- la première : de novembre à décembre
 - la deuxième ; d'avril à mai.

C'est donc en automne et au printemps qu'il pleut le plus et que les risques de ruissellement (donc de crues) sont maximums.

2.1.5.3 - Les précipitations journalières

Elles sont très variables d'une année à l'autre. Des pluies d'environ 30 mm sont enregistrées au moins une fois par mois. Les plus fortes précipitations journalières sont enregistrées en automne : on a observé en novembre 1982 plus de 200 mm en 24 heures, appert qui a entraîné un ruissellement généralisé sur les pelouses dégradées et les genêts.

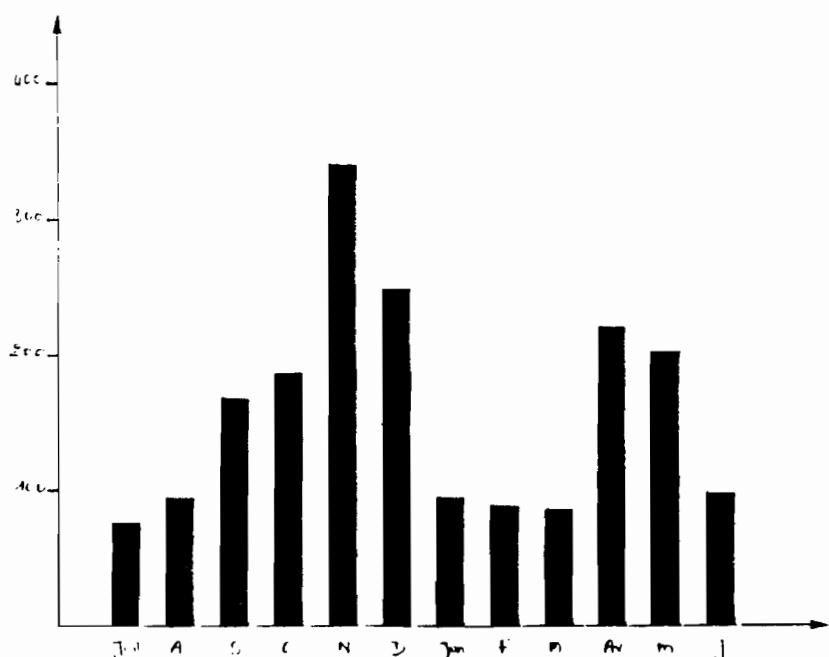
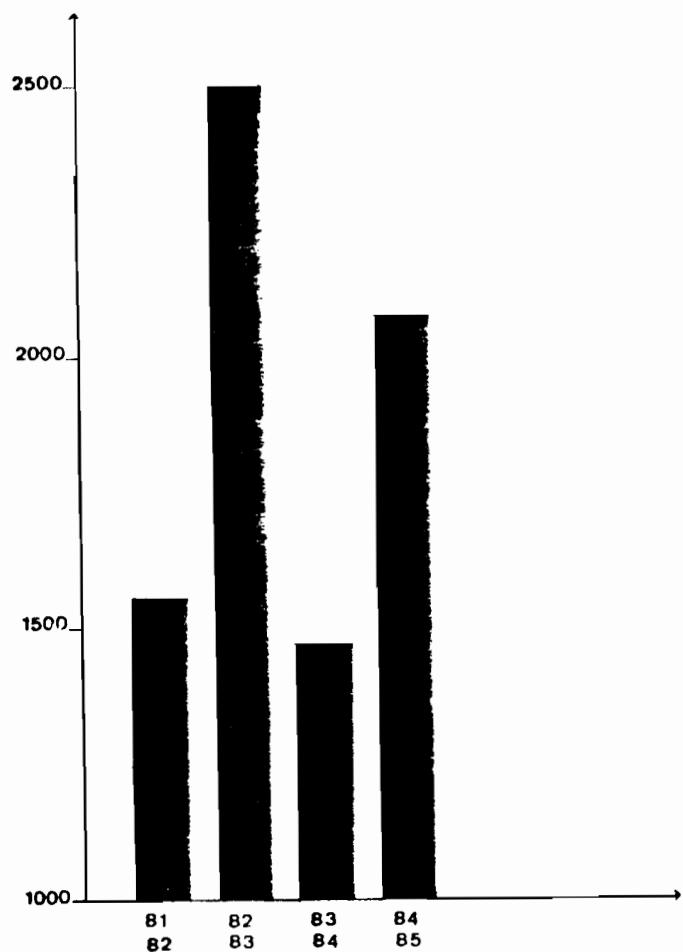


Fig 8 : Pluviométrie annuelle en mm(en haut) et moyenne mensuelle en mm (en bas)
(d'après DUPRAS, 1984)

2.2 - Le plan d'expérience

Présentation des sites et des répétitions :

25 parcelles expérimentales furent choisies pour illustrer 5 types distincts de formations végétales (pelouse aval, pelouse amont, hêtraie, pessière, genêts). Pour chaque type de végétation, les parcelles présentent des différences plus ou moins sensibles d'état de surface, et on a préparé une parcelle de sol nu après avoir éliminé le couvert végétal et pioché le sol sur une profondeur d'environ 20 cm (fig. 9).

6 parcelles furent testées sur la pelouse aval dont :

- PAVd1 : pelouse aval dégradée, 1
- PAVc2 : " saine, 2 avec taupinière
- PAVd3 : " dégradée, 3
- PAVc4 : " saine, 4
- PAVn5 : " nue, 5
- PAVd6 : " dégradée, 6

5 parcelles furent testées sur la pelouse amont dont :

- PAMc1 : pelouse amont saine, 1
- PAMr2 : " ravine, 2
- PAMd3 : " dégradée, 3
- PAMd4 : " dégradée, 4
- PAMn5 : " nue, 5

5 parcelles furent testées sur la hêtraie dont :

- H1 : hêtraie, 1
- H2 : " , 2
- H3 : " , 3
- H4 : " , 4
- Hn5: " nue, 5

5 parcelles furent testées sur la pessière dont :

- E1 : épicéa, 1
- E2 : " , 2
- E3 : " , 3
- E4 : " , 4
- En5 : " nue, 5

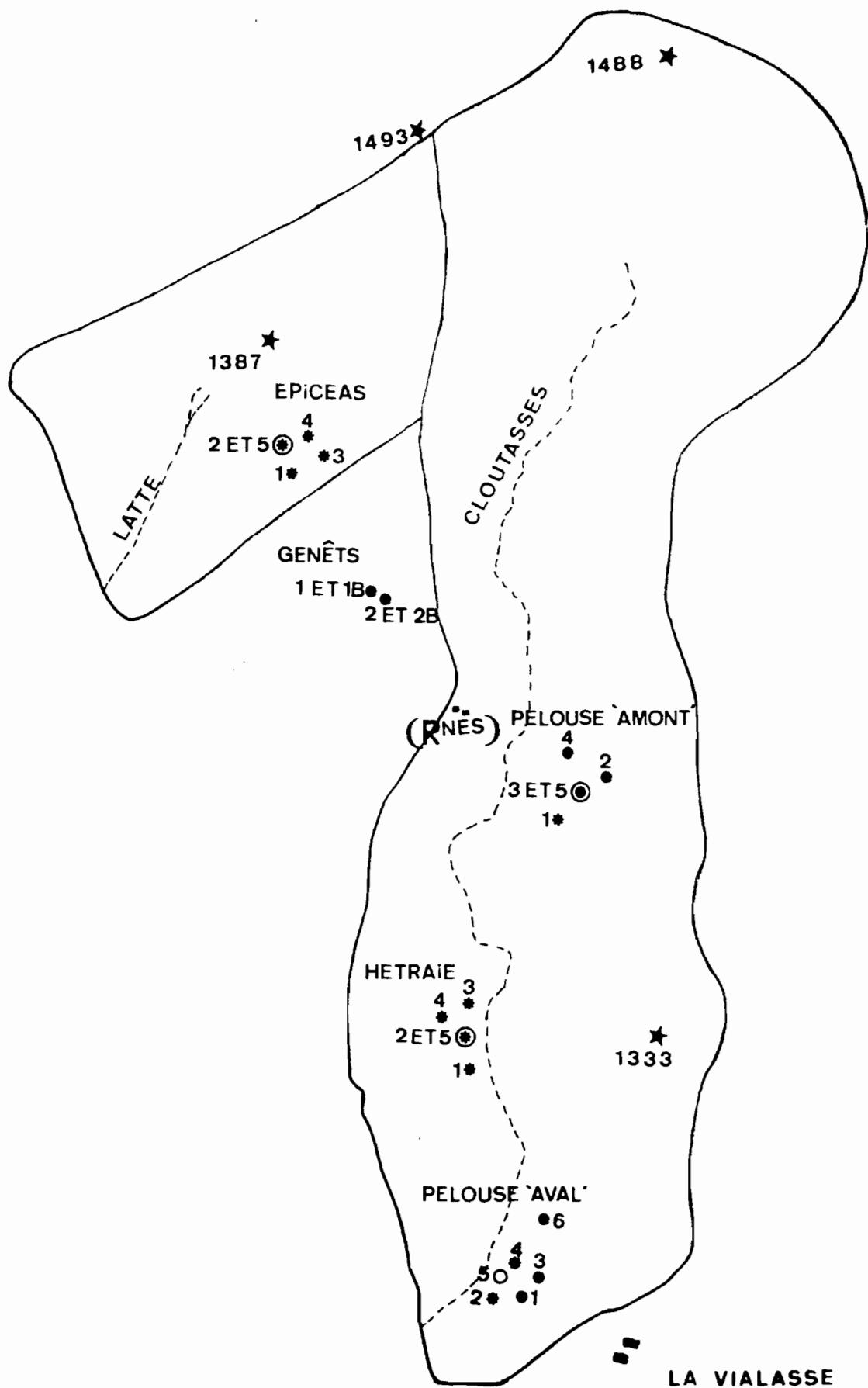


FIG 9 :EMPLACEMENT DES PARCELLES EXPERIMENTALES (tiré de DUPRAZ, 1984)

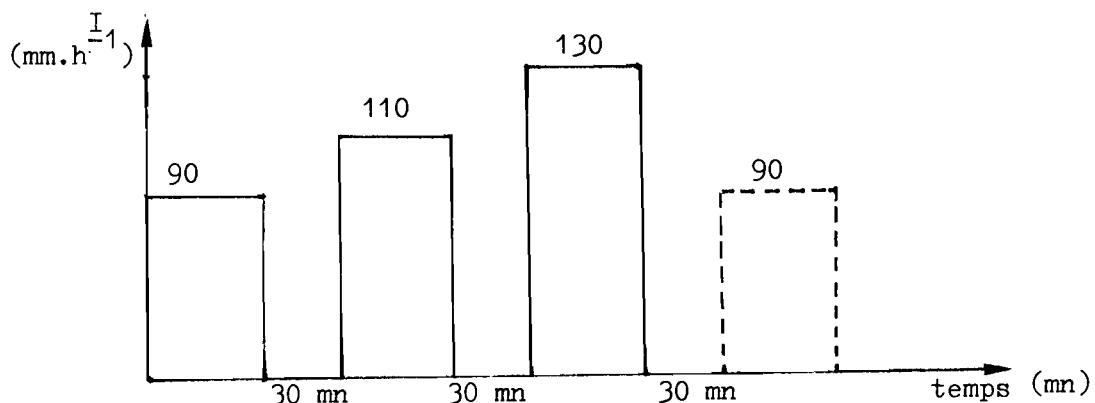
4 parcelles furent testées sur les genêts dont :

- G1 : genêt sain, 1
- G2 : " " , 2
- G1bis : genêt brûlé, 1
- G2bis : " " , 2

Les parcelles genêts sont localisées un peu à l'écart du bassin des Cloutasses.

2.3 - Le protocole de simulation :

Il est constitué d'une première averse de 90 mm.h^{-1} ; après un temps d'arrêt de 30 mn environ, une deuxième averse de 110 mm.h^{-1} est simulée puis après un nouvel arrêt de 30 mn environ, une troisième averse est simulée. Sur les parcelles nues, une quatrième averse d'intensité égale à la première (90 mm.h^{-1} environ) fut simulée en vue de mettre en évidence l'existence éventuelle de phénomènes de réorganisations à la surface du sol.



Chaque averse est prolongé jusqu'à l'obtention du régime permanent de l'infiltration.

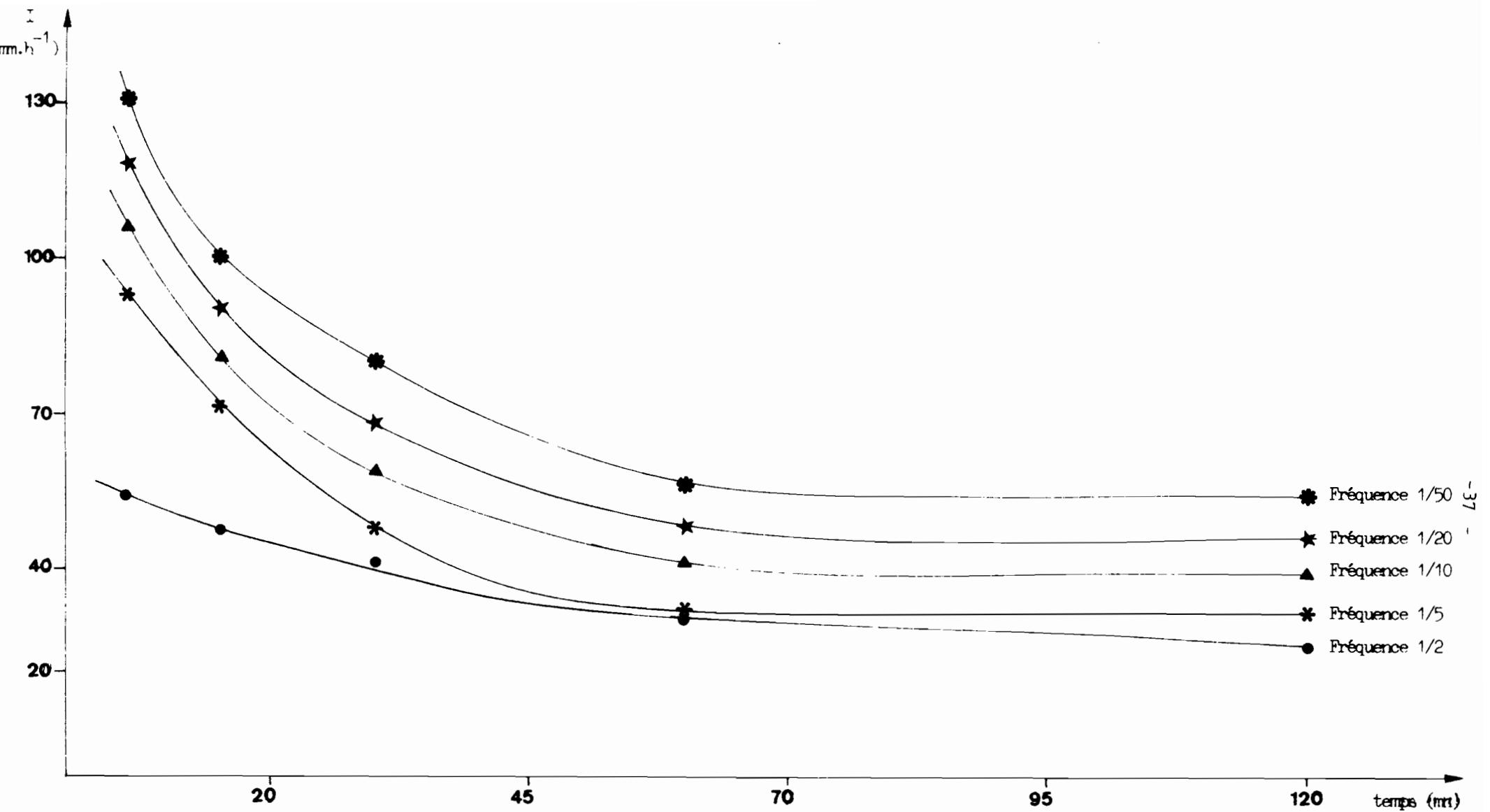


Fig 10 : Courbes Intensité x Durée x Fréquence du Mont-Aigoual (1961-1981) (source : Météorologie Nationale)

Ne disposant pas des courbes intensité-durée-fréquence sur les bassins, on s'est référé à celles du Mont-Aigoual (1961-1981) qui semble-t-il présente les mêmes caractéristiques que le Mont-Lozère. La figure 10 montre qu'une averse de 90 mm.h^{-1} revient une fois tous les 5 ans pendant 7 mn, une fois tous les 10 ans pendant 11 mn, une fois tous les 20 ans pendant 15 mn et une fois tous les 50 ans pendant 21 mn.

Une averse de 110 mm.h^{-1} revient une fois tous les 10 ans pendant 5 mn, une fois tous les 20 ans pendant 8 mn et une fois tous les 50 ans pendant 11 mn.

Une averse 130 mm.h^{-1} revient une fois tous les 20 ans pendant 3 mn et une fois tous les 50 ans pendant 6 mn.

Vu la durée de nos averses simulées, les intensités choisies sont exceptionnelles, mais pour déterminer l'infiltration finale FN, il est indispensable de pousser la durée de l'averse jusqu'à l'obtention du régime permanent de l'infiltration.

2.4 - Les résultats :

2.4.1 - Etude des conditions initiales

2.4.1.1 - Caractéristiques des états de surface a. - Etat de recouvrement des parcelles

Le tableau 6 rassemble les principales variables et facteurs descriptifs des états de la surface du sol.

Sur les pelouses et les genêts, c'est la densité du couvert végétal qui permet de différencier une parcelle d'une autre.

Sous forêt de hêtres et d'épicéas, c'est surtout l'inclinaison de la pente qui permet de différencier les parcelles.

b. - La rugosité

Elle est définie par l'indice IR qui correspond au rapport de la ligne brisée sur la ligne droite, exprimé en %.

L'indice de rugosité est faible pour l'ensemble des parcelles ; les litières (hêtres et épicéas) sont plus rugueuses ($\leq 109 \%$) que les pelouses ($\leq 104 \%$). Le piochage des parcelles nues a eu pour effet d'accentuer la rugosité sur les 2 pelouses (PAVn5 et PAMn5 : 122 et 124 %), par contre son effet est presque nul sur les litières forestières (105 à 107 %).

Tableau 6 : Etat de surface des parcelles

	Code parcelle	Pente %	IR %	Cailloux %	Sol nu %	Herbe %	Litière %	Genêts
Pelouse aval	PAVd1	8	102	25	1	51	24	0
	PAVC2	9	104	16	9	76	0	0
	PAVd3	6	101	19	0	62	19	0
	PAVC4	12	101	0	0	100	0	0
	PAVn5	7	124 100	9	92	0	0	0
	PAVd6	16	102	17	0	55	29	0
Pelouse amont	PAMC1	36	--	0	100	0	0	0
	PAMR2	19	104 102	63	25	5	6	0
	PAMD3	19	102	1	0	38	61	0
	PAMD4	18	103	4	0	49	47	0
	PAMn5	19	122 114	0	76	20	4	0
Hêtreiaie	H1	28	106	0	0	0	100	0
	H2	12	107	0	0	0	100	0
	H3	13	107	0	0	0	100	0
	H4	33	106	0	0	0	100	0
	Hn5	12	105 104	0	90	0	10	0
Pessière	E1	21	104	0	0	0	100	0
	E2	14	109	0	0	0	100	0
	E3	27	108	0	0	0	100	0
	E4	16	105	0	0	0	100	0
	En5	14	107 103	0	25	0	75	0
Genêts sains	G1	34	141	13	11	17	6	53
	G2	33	137	16	9	27	13	35
Genêts brûlés	G1 bis	34	108	19	6	13	32	30
	G bis	33	112	21	12	16	31	20

Définition des différents termes du tableau 6

$$IR : \text{indice de rugosité en \% ; } IR = \frac{\text{ligne brisée}}{\text{ligne droite}} \times 100$$

cailloux : taux de cailloux occupant la surface des parcelles

sol nu : taux de sol nu occupant la surface des parcelles

herbe : taux d'herbe occupant la surface des parcelles

litière : taux de litière (feuilles de hêtres et aiguilles d'épicéas occupant la surface des parcelles

genêts : taux de genêt occupant la surface des parcelles

2.4.1.2 - Caractéristiques physiques et hydriques des parcelles

Les caractéristiques sont définies sur le tableau 7. Les différents termes utilisés sont :

da : densité apparente

Pt : porosité totale en %

cc1 : capacité au champ déterminée à partir des courbes de cinétique de ressuyage, en %

cc2 : capacité au champ déterminée à partir des courbes pF - humidité, en %

Ø : macroporosité, en % ($\emptyset = Pt - cc$)

θ_0 : teneur volumique initiale, en %

θ_s : teneur volumique finale, en %

Δi : déficit de saturation, en % ($\Delta i \% = \frac{Pt - \theta_0}{Pt} \times 100$)

Ø non utilisée : macroporosité non utilisée (fermée), en %

(\emptyset non utilisée = $\theta_s - Pt$)

a/ La teneur en eau :

Elle est assez homogène sur tout le profil pour l'ensemble des parcelles de la pelouse aval et est pratiquement à la capacité au champ : 22 à 25 % (tableau 7).

Sur la pelouse amont, toutes les parcelles sont aussi à la capacité au champ sauf la parcelle PAMC1, très humide (44 %).

Sur la hêtraie, les 5 parcelles testées sont très humides en surface (teneurs supérieures à l'humidité à capacité au champ) (38 à 53 %).

Sur la pessière, la teneur en eau est supérieure à l'humidité à capacité au champ sauf sur les parcelles E3 et E4 (42 à 55 %).

Sur les genêts, toutes les parcelles sauf G1, sont en dessous de l'humidité à capacité au champ.

Tableau 7 : Paramètres et variables décrivant les caractéristiques physiques et hydriques du sol

code parcelle	Profon- deur (cm)	da	Pt %	CC1 %	CC2 %	ϕ %	θ_0 %	θ_s %	Δ_i %	$Q_{\text{non uti-}} %$
PAVd1	0-20	1,3	48	25	-	23	-	35	-	13
	50-70	1,5	40	25	-	15	-	25	-	15
PAVd3	0-20	1,3	48	25	20	23	25	37	48	11
	50-70	1,5	40	25	-	15	-	-	-	-
PAVd6	0-20	1,3	48	25	20	23	22	41	54	7
	50-70	1,5	40	25	-	15	-	-	-	-
PABn5	0-20	1,3	48	25	26	23	22	37	54	11
	50-70	1,5	40	25	-	15	27	36	32	4
PAMC1	0-20	1,3	48	27	-	21	44	-	8	-
	50-70	1,5	40	-	-	-	-	-	-	-
PAMR2	0-20	1,3	48	30	-	18	23	30	52	18
PAMD3	0-20	1,3	48	30	30	18	35	46	27	2
PAMD4	0-20	1,3	48	30	33	18	20	42	58	6
PAMn5	0-20	1,3	48	30	-	18	33	48	31	0
H1	0-20	1,0	60	25	-	35	49	38	18	22
	30-50	1,0	60	35	-	25	-	45	-	15
H2	0-20	1,0	60	25	-	35	55	65	8	0
	30-50	1,0	60	35	-	25	39	50	35	10
H3	0-20	1,0	60	25	-	35	-	-	-	-
	30-50	1,0	60	35	-	25	-	-	-	-
H4	0-20	1,0	60	25	-	35	38	81	36	0
	30-50	1,0	60	35	-	25	22	36	38	24
Hn5	0-20	1,0	60	25	-	35	53	75	12	0
	30-50	1,0	60	35	-	25	46	-	23	-
E1	0-20	1,1	56	33	46	23	55	94	8	0
	50-70	1,2	52	31	-	21	-	46	-	6
E2	0-20	1,1	56	33	30	23	20	42	66	14
	50-70	1,2	52	31	-	21	36	42	30	10
E3	0-20	1,1	56	33	30	23	42	57	30	0
	50-70	1,2	52	31	-	21	-	-	-	-
E4	0-20	1,1	56	33	32	23	30	44	50	12
	50-70	1,2	52	31	-	21	-	-	-	-
En5	0-20	1,1	56	33	33	23	36	53	36	3
	50-70	1,2	52	31	-	21	-	-	-	-
G1	0-20	1,1	56	33	-	23	24	39	57	-
	50-70	1,2	52	31	-	21	-	-	-	-
G2	0-20	1,1	56	33	-	23	24	39	57	-
	50-70	1,2	52	31	-	21	-	-	-	-
G1bis	0-20	1,1	56	33	-	23	26	32	43	24
	50-70	1,2	52	31	-	21	-	-	-	-
G2bis	0-20	1,1	56	33	-	23	24	38	57	18
	50-70	1,2	52	31	-	21	-	-	-	-

b/ La porosité totale

La porosité d'un sol dépend essentiellement de sa texture et de sa structure ; une structure ouverte favorise la vie des racines et l'activité mésafaunique en général, en permettant la circulation de l'air et de l'eau (drainage). Elle est composée d'une microporosité qui correspond au volume des pores capillaires qui retiennent l'eau après ressuyage, et la macroporosité qui, dans les mêmes conditions, reste occupée par l'air et sert aux transferts rapides des eaux de drainage.

La porosité totale en surface (horizon 0-20 cm) est de : 60 % sous hêtraie, 56 % sous pessière et genêts et 48 % sous pelouse.

En profondeur (horizon 50-70 cm), elle est de :

60 % sous hêtraie, 52 % sous pessière et genêts et 40 % sous pelouse. La hêtraie conserve la même porosité totale aussi bien en surface qu'en profondeur alors que pour les autres sites, on note une légère diminution en profondeur (tableau 7).

Dans l'ensemble, les sols sont bien aérés ; on note aucun niveau compact en profondeur. On pourrait donc à priori classer les sols des différents sites du point de vue de leur capacité d'infiltration ainsi : hêtraie > pessière et genêts > pelouses.

c) - La macroporosité :

Le tableau 7 rassemble l'ensemble des résultats obtenus sur les parcelles sur lesquelles la cinétique de ressuyage a été suivie durant plusieurs jours. Ces résultats sont conformes aux tests de laboratoire (courbes pF - humidité) (DURAND, 1985). La macroporosité déterminée par différence entre la porosité totale et la capacité au champ, oscille pour l'horizon 0-20 cm entre 35 % (hêtraie), 23 % (pessière, genêts et pelouse aval) et 18 % (pelouse amont). En profondeur (50-70 cm), elle passe à 25 % (hêtraie), 21 % (pessière et genêts) et 15 % (pelouse aval). On constate donc une diminution de la macroporosité vers la profondeur, diminution qui coïncide avec celle de la porosité totale.

A la fin de l'averse, souvent, la macroporosité n'est pas saturée. A cela, deux explications sont possibles :

* juste à l'arrêt de la pluie, il y a un ressuyage rapide lié à la texture grossière du sol

* présence d'air piégé dans les pores lors de l'humectation.

β - La microporosité : capacité au champ : Rappel théorique

La redistribution est le processus d'écoulement qui, après un apport d'eau fait suite à l'infiltration (AUDRY et al, 1973). Il se manifeste d'abord à l'arrêt de la pluie, généralement quelques minutes après, par une réduction dans la vitesse de progression du front d'humectation. Ce processus conduit le sol à un état pratiquement stable dit ressuyé, atteint après progression plus ou moins rapide du front de redistribution (cf fig. 11).

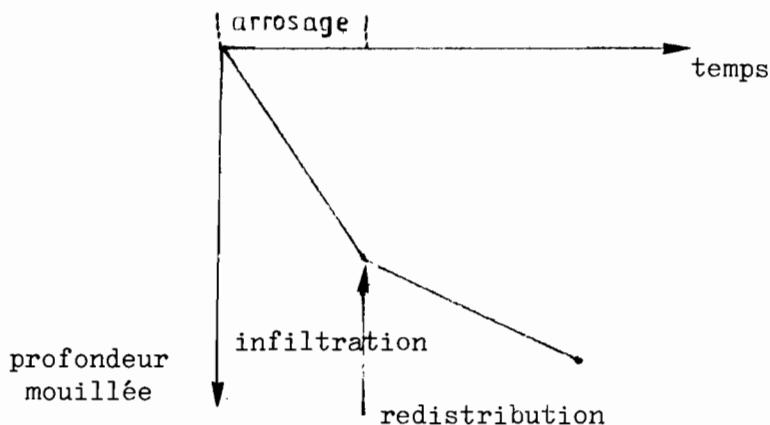


Fig 11 : Vitesse de propagation de l'eau dans le sol

L'observation des courbes de cinétique de ressuyage (fig 1,2 et 3 en annexe), montre une décroissance d'abord rapide de l'humidité, puis de plus en plus lente. Au bout d'un certain temps (48h, maximum), l'humidité n'évolue que très lentement et atteint un palier. Le passage de la dynamique rapide à la dynamique lente est appelé capacité au champ. Cette limite représente la quantité maximum d'eau retenue par le sol ; elle est aussi appelée capacité de rétention et définie comme le remplissage de la microporosité. Pour un même apport d'eau, plus l'humidité initiale du sol est élevée et plus l'épaisseur qui se trouvera portée à la capacité au champ sera grande. Les valeurs de la capacité au champ déterminées à partir des courbes pF - humidité (DURAND, 1985) sont assez proches de celles déterminées à partir des courbes de cinétique de ressuyage (tableau 7). Les échantillons ayant servi à la détermination des courbes pF - humidité ont été prélevés près des parcelles suivantes : PAVn5, PAMd4, PAMc1 et En5.

La capacité au champ de l'horizon 0-20 cm est de 35 % sous hêtraie, 33 % sous pessière et genêts, 30 % sous pelouse amont et 25 % sous pelouse aval. Elle reste stable ou augmente en profondeur sauf pour la pessière et les genêts.

c/ Les profils hydriques :

Les résultats des prélèvements à la tarrière effectués sur le terrain avant et après chaque essai de simulation de pluie, sur toutes les parcelles, permettent de voir comment s'effectue l'avancée du front d'humectation en fonction de la profondeur du sol (fig 4 à 8 en annexe). La distribution de l'humidité volumique en fonction de la profondeur a tendance à montrer une diminution de l'humidité vers la profondeur.

Sur la pelouse aval, le front d'humectation descend jusqu'à plus de 70 cm ; sur la hêtraie, il va au delà de 50 cm et l'allure des profils montre que le front peut aller encore plus loin. Nos prélèvements n'ont pu aller au delà de 50 cm à cause de la présence de cailloux. Sur la pelouse amont, le front d'humectation évolue rapidement jusqu'à 20 cm, puis a tendance à s'estomper ; néanmoins il va au-delà de 50 cm. Sur la pessière et les genêts, le front d'humectation progresse au-delà de 40 cm.

Conclusion :

Ces résultats mettent en évidence l'absence de niveau imperméable dans les profils et indiquent par conséquent que le ruissellement sur les bassins ne peut pas être dû à un engorgement du sol suite à la présence d'un niveau imperméable plus profond.

d/ La densité apparente :

En surface, elle est de 1,0 sous hêtraie ; 1,1 sous pessière et genêts ; 1,3 sous pelouses. Elle augmente en profondeur où elle atteint 1,2 sous pessière et genêts et 1,5 sous pelouses. La pelouse est donc plus tassée que le couvert forestier (tableau 7).

2.4.1.3 - Les analyses physico-chimiques

Les tableaux 1, 2, 3, 4 et 5, en annexe, montrent que :

- les teneurs en matière organique sont assez élevées en surface et varient de 7,5 à 15,6 % :

hêtraie > pessière > pelouse aval > pelouse amont
15,6 % 10,5 % 8 à 9 % 7,5 %

A 40 cm de profondeur, les teneurs varient de 1,5 à 9 % :

pessière > hêtre > pelouse aval > pelouse amont
9 % 5,8 % 3 à 4 % 1,5 %

- Le taux de carbone varie de 2 à 3,8 % en surface et de 0,8 à 2 % à 40 cm de profondeur
- Les teneurs en azote varient de 0,2 à 0,4 % en surface ; elles diminuent en profondeur (0,1 à 0,2 %)
- Le rapport C/N augmente avec la profondeur (7 à 13)
- La capacité totale d'échange est bonne aussi bien en surface qu'en profondeur ; elle est dans tous les cas supérieure à 100 me/100 gr
- Le complexe absorbant est très désaturé (< 20 %)
- Le pH est acide (4 à 5) et le taux de saturation diminue de 6 % en surface à 1,6 % en profondeur (à 70 cm)

2.4.2 - Présentation des résultats bruts :

Les tableaux 8 et 9 indiquent les principaux résultats que l'on peut tirer d'un essai de simulation de pluie. Les figures 12 et 13 représentent des hydrogrammes de ruissellement de terrain obtenus à partir d'essais au simulateur de pluie. Les différents termes des tableaux 8 et 9 sont définis dans le chapitre I. Rappelons que :

$$KR40 = \frac{\text{hauteur cumulée ruisselée pour } 40 \text{ mm de pluie tombée}}{40}, \text{ en \%}$$

$$KR60 = \frac{\text{hauteur cumulée ruisselée pour } 60 \text{ mm de pluie tombée}}{60}, \text{ en \%}$$

E40 : débit solide cumulé pour 40 mm de pluie tombée

E60 : débit solide cumulé pour 60 mm de pluie tombée

Remarque :

- les valeurs de ta sont soit grandes, soit petites ; il n'y a pas de valeurs intermédiaires
- l'intensité de la pluie n'est pas toujours bien contrôlée ; elle est fluctuante à cause de difficultés opératoires.

Le travail d'interprétation va consister à confronter les paramètres hydrodynamiques (Pi, KR, FN) et mécaniques (C, E) avec les variables et paramètres descriptifs de l'état initial des parcelles (couvert végétal, cailloux, rugosité, déficit de saturation)

Tableau 8 : Principaux résultats bruts

Code parcelle	ta (h)	I (mm.h ⁻¹)	Pi (mm)	KR (%)		FN (mm.h ⁻¹)	Cm (g.l ⁻¹)	E (g.m ⁻²)	
				40 mm	60 mm			40 mm	60 mm
PAVd1	< 24 0,00	48,8 90,5	- 67,3	0,0 10,5	0,0 10,1	> 48,8 82,1	0,00 0,04	0,0 0,2	0,0 0,2
PAVC2	< 48 1,15	97,6 117,0	> 195,0 > 200,0	0,0 0,0	0,0 0,0	> 98,0 > 117,0	0,00 0,00	0,0 0,0	0,0 0,0
PAVd3	65,00	93,7	30,9	1,2	1,8	91,4	0,06	0,0	0,0
	0,50	104,5	10,1	11,7	22,3	70,5	0,06	0,3	0,9
	0,50	132,0	10,8	26,5	30,5	74,0	0,06	0,6	1,1
	15,40	95,4	12,8	12,6	23,6	63,4	0,06	0,3	0,8
	0,60	92,3	7,6	36,9	39,2	46,0	0,06	0,9	1,4
PAVC4	< 96 0,00	104,2 110,0	> 105,0 > 110,0	0,0 0,0	0,0 0,0	> 104,0 > 110,0	0,00 0,00	0,0 0,0	0,0 0,0
	0,50	123,2	> 123,0	0,0	0,0	> 123,2	0,00	0,0	0,0
	< 24 1,50	79,0 102,0	58,5 3,3	0,0 59,1	4,0 59,6	60,0	0,33 0,50	0,0 11,8	0,8 17,9
PAVn5	0,50	105,0	2,1	71,9	76,6	22,0	0,56	16,1	25,7
	< 48 1,21	102,0 113,0	4,82 9,3	6,5 8,5	5,7 8,8	100,0 104,0	0,07 0,02	0,2 0,0	0,2 0,1
	1,00	123,0	10,0	17,3	15,0	101,0	0,01	0,0	0,1
PAMc1	0,40	92,0	10,0	13,3	20,6	34,0	0,01	0,0	0,1
	0,50	110,0	7,2	52,4	61,3	21,0	0,03	0,6	1,1
	0,50	130,0	7,9	58,1	65,0	22,0	0,02	0,4	0,8
PAMR2	< 15 0,50	75,0 85,0	2,9 1,3	33,7 40,6	35,7 66,8	37,0 19,0	2,60 0,88	35,0 14,3	55,7 35,2
PAMD3	< 48 0,50	70,0 77,0	5,1 4,7	39,2 51,8	41,7 52,8	37,0 33,0	0,25 0,13	3,9 2,7	6,2 4,1
	0,50	90,0	5,6	52,2	55,3	33,0	0,06	1,2	2,0
	< 24 0,50	92,0 98,0	4,1 3,7	36,4 56,6	41,6 60,5	42,0 33,0	0,05 0,03	0,7 0,6	1,2 1,1
PAMD4	0,50	135,0	4,3	56,7	58,7	52,0	0,03	0,7	1,1
	< 48 0,50	95,0 110,0	167,0 13,1	0,0 7,5	0,0 11,4	90,0 79,0	0,32 0,35	0,0 1,0	0,0 2,4
	0,50	104,0	16,0	12,1	18,5	70,0	0,35	1,7	3,9
H1	< 72 0,00	110,0 115,0	> 100,0 147,0	0,0 0,0	0,0 0,0	> 110,0 97,0	0,00 0,00	0,0 0,0	0,0 0,0
	0,00	124,0	-	21,5	22,6	96,0	0,01	0,2	0,7
	< 24 0,00	80,0 95,0	> 72,0 > 156,0	0,0 0,0	0,0 0,0	> 80,0 > 95,0	0,00 0,00	0,0 0,0	0,0 0,0
H2	0,00	116,0	178,0	2,2	3,1	108,0	0,02	0,0	0,0

Tableau 9 : Principaux résultats bruts

Code Parcelle	ta (h)	I (mm.h ⁻¹)	P ₁ (mm)	KR (%)		F _N (mm.h ⁻¹)	C _m (g.l ⁻¹)	E (g.m ⁻²)	
				40 mm	60 mm			40 mm	60 mm
H3	< 24	92,0	> 92,0	0,0	0,0	> 92,0	0,00	0,0	0,0
	0,0	97,0	> 95,0	0,0	0,0	> 97,0	0,00	0,0	0,0
	0,0	115,0	302,0	0,0	0,0	113,0	0,00	0,0	0,0
	0,0	123,0	-	2,3	2,0	111,0	0,00	0,0	0,0
	0,0	138,0	-	6,6	7,4	126,0	0,02	0,0	0,0
H4	< 24	85,0	> 85,0	0,0	0,0	> 85,0	0,00	0,0	0,0
	0,0	95,0	103,0	6,7	11,7	56,0	0,02	0,0	0,1
	0,5	124,0	16,9	26,2	38,1	40,0	0,01	0,1	0,2
Hn5	< 24	96,0	64,0	0,0	0,0	69,0	5,18	0,0	0,0
	0,5	142,0	3,02	37,2	39,0	82,0	2,62	39,0	61,3
	0,5	102,0	9,9	29,1	33,8	60,0	0,35	4,0	7,1
E1	< 72	102,0	107,0	0,0	0,0	95,0	0,02	0,0	0,0
	0,5	123,0	10,5	12,3	16,6	79,0	0,02	0,0	0,2
	0,5	156,0	7,3	21,7	28,0	90,0	0,03	0,2	0,5
E2	< 24	93,0	> 102,0	0,0	0,0	> 93,0	-	0,0	0,0
	0,0	116,0	107,0	3,7	5,0	97,0	0,06	0,0	-
	0,5	140,0	18,7	8,4	15,1	96,0	0,19	0,6	1,7
E3	< 24	102,0	15,3	1,6	2,2	97,0	0,08	0,0	0,1
	0,5	135,0	4,0	8,7	11,0	108,0	0,12	0,4	0,8
	0,5	155,0	6,4	9,4	15,5	97,0	0,28	1,0	2,6
E4	< 24	87,0	6,8	4,4	3,6	82,0	0,16	0,3	0,3
	0,5	100,0	12,5	7,2	9,1	81,0	0,04	0,0	0,2
	0,5	130,0	15,9	10,4	16,1	78,0	0,03	0,1	0,3
En5	< 24	103,0	> 127,0	0,0	0,0	> 103,0	-	0,0	0,0
	0,0	117,0	138,0	6,0	7,0	98,0	0,14	0,3	0,6
	0,5	150,0	20,1	10,7	16,7	104,0	0,57	2,4	5,4
	0,5	130,0	18,3	9,6	18,3	83,0	0,25	0,9	2,7
G1	< 48	63,0	3,4	-	5,8	58,0	0,12	-	0,4
	0,5	107,0	4,9	-	22,5	81,0	0,06	-	0,8
	1,0	119,0	5,6	-	37,0	66,0	0,06	-	1,3
G2	< 72	99,0	3,5	-	11,6	69,0	0,23	-	1,6
	1,5	107,0	2,6	-	35,0	62,0	0,12	-	2,5
	1,2	112,0	3,4	-	44,0	54,0	0,07	-	1,8
G1 bis	< 144	114,0	3,0	-	23,5	79,0	-	-	-
	0,5	117,0	3,8	-	37,0	66,0	-	-	-
	0,5	120,0	4,1	-	36,6	67,0	-	-	-
G2 bis	< 120	118,0	3,4	-	17,5	76,0	0,12	-	1,2
	0,5	122,0	3,7	-	41,6	67,0	-	-	-
	0,5	130,0	4,1	-	44,2	65,0	-	-	-

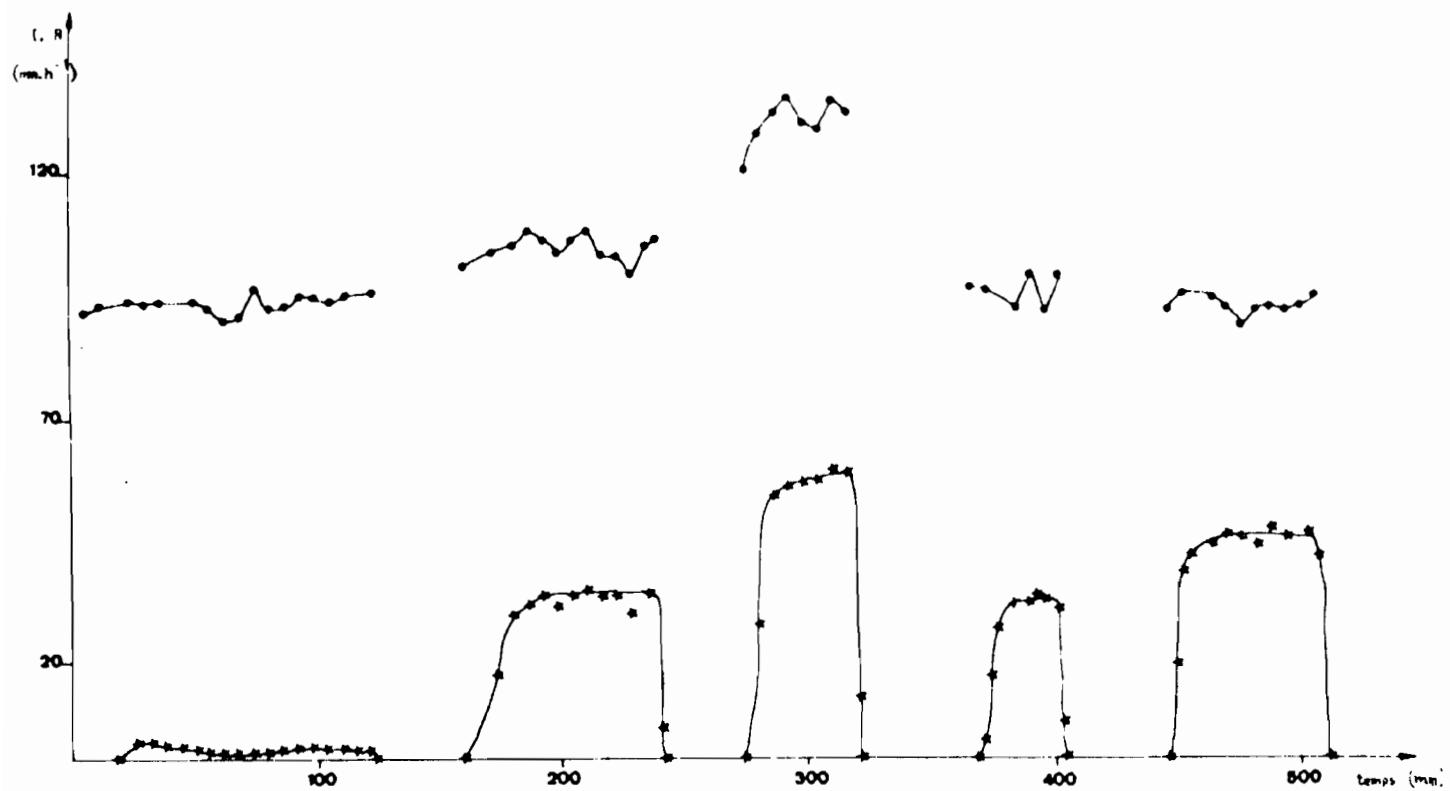


Fig. 12 : Hyéogramme et hydrogramme de ruissellement : parcelle PAVd3

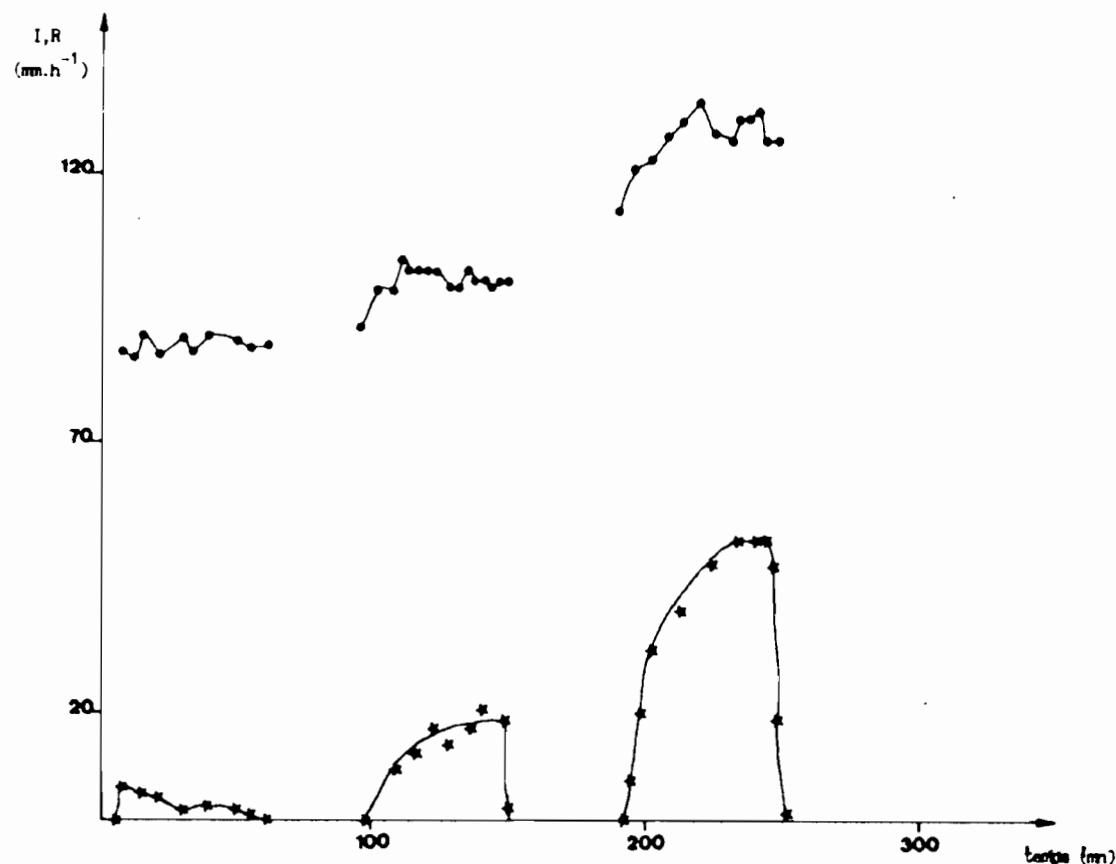


Fig. 13 : Hyéogramme et hydrogramme de ruissellement : parcelle E4

2.4.3 - Traitemet statistique :

L'objectif est d'étudier les relations entre les valeurs des variables hydrodynamiques (Pi, KR, FN, Rx) et mécaniques (C, E) (variables à expliquer) et les paramètres descriptifs de l'état du sol et notamment de l'état de surface (variables explicatives).

Le tableau 10 donne les valeurs des variables et paramètres explicatifs et à expliquer des 25 parcelles testées.

Vu l'hétérogénéité des résultats, nous avons simplifié le tableau de données. Chaque parcelle n'est plus représentée par ses variables hydrodynamiques et mécaniques selon les 3 intensités de pluie du protocole, mais seulement par la plus faible valeur de FN et les autres variables qui lui correspondent.

Définition des différents termes du tableau 10 :

OBS : observation

NP : nom de la parcelle avec P01 (PAVd1) ; P02 (PAVc2) ; P03 (PAVd3) ; P04 (PAVC4) ; P05 (PAVn5) ; P06 (PAVd6) ; P07 (PAMC1) ; P08 (PAMR2) ; P09 (PAMD3) ; P10 (PAMD4) ; P11 (PAMn5) ; H12 (H1) ; H13 (H2) ; H14 (H3) ; H15 (H4) ; H16 (Hn5) ; E 17 (E1) ; E18 (E2) ; E19 (E3) ; E20 (E4) ; E21 (En5) ; G22 (G1) ; G23 (G2) ; G24 (G1 bis) et G25 (G2 bis)

SIT : site avec SIT1 (pelouse aval) SIT2 (pelouse amont),
SIT3 (hêtraie); SIT4 (pessière) et SIT5 (genêts)

P : pente en %

CV : taux de couvert végétal en %

LIT : taux de litière en %

SN : taux de sol nu en %

CA : taux de cailloux en %

FN : intensité d'infiltration minimale en mm.h^{-1}

Pi : hauteur de pluie d'imbibition en mm

Rx : intensité maximale du ruissellement en mm.h^{-1}

KRM : coefficient de ruissellement maximal : $KRM = \frac{Rx}{I}$

KR60 : coefficient de ruissellement pour 60 mm de pluie tombée

ER60 : débit solide cumulé pour 60 mm de pluie tombée

CM : charge solide moyenne

GE : taux de genêts en %

Tableau 10 : CARACTERISTIQUES DES PARCELLES TESTEES AU SIMULATEUR DE PLUIE

OBS	NP	SIT	P	CV	LIT	SN	CA	FN	PI	RX	KRM	KR60	ER60	CM	GE
1	P01	1	8	51	24	1	25	49	67	0	0	0	0	0.0	0
2	P02	1	9	76	0	9	16	117	200	0	0	0	0.0	0.0	0
3	P03	1	6	62	19	0	19	46	8	46	50	39	1.4	0.0	0
4	P04	1	12	100	0	0	0	123	123	0	0	0	0.0	0.0	0
5	P05	1	7	0	0	92	9	22	2	81	77	76	26.0	0.5	0
6	P06	1	16	55	29	0	17	93	6	13	12	8	0.0	0.0	0
7	P07	2	36	100	0	0	0	21	7	89	81	61	1.2	0.0	0
8	P08	2	19	6	7	24	64	19	1	66	78	66	35.0	0.8	0
9	P09	2	19	37	57	0	0	33	5	44	57	53	4.1	0.1	0
10	P10	2	18	56	40	0	4	33	4	65	66	61	1.1	0.0	0
11	P11	2	19	20	4	76	0	70	16	34	33	10	2.1	0.3	0
12	H12	3	28	0	100	0	0	97	147	18	16	0	0.0	0.0	0
13	H13	3	12	..	100	0	0	108	178	8	7	0	0.0	0.0	0
14	H14	3	13	0	100	0	0	113	302	2	2	0	0.0	0.0	0
15	H15	3	33	0	100	0	0	40	17	84	68	38	0.3	0.0	0
16	H16	3	12	0	10	90	0	60	10	42	41	32	6.6	0.3	0
17	E17	4	21	0	100	0	0	79	11	44	36	17	0.5	0.0	0
18	E18	4	14	0	100	0	0	96	19	44	31	15	1.7	0.2	0
19	E19	4	27	0	100	0	0	97	15	5	5	4	0.2	0.0	0
20	E20	4	16	0	100	0	0	78	16	52	40	16	0.3	0.0	0
21	E21	4	14	0	75	25	0	83	18	47	36	18	2.7	0.2	0
22	G22	5	34	17	6	11	13	58	3	5	7	6	0.5	0.1	53
23	G23	5	33	27	13	9	16	54	3	58	52	44	2.8	0.1	35
24	G24	5	34	13	32	6	19	66	4	51	43	36	-	-	30
25	G25	5	33	16	31	12	21	65	4	65	50	44	-	-	20

2.4.3.1 - Etude des corrélations

Le tableau 11 donne la matrice des coefficients de corrélations simples entre ces 12 variables, prises 2 à 2.

Tableau 11 : Matrice des corrélations (18 observations)
Les paramètres et variables sont définis page

	Pente	CV	SN	CA	Δ_i	Pi	I	Rx	FN	KR60	OM	ER60
ER60	-0,185 0,859	-0,749 0,000	0,484 0,000	0,739 0,	0,119 0,000	-0,301 0,135	0,411 0,004	0,427 0,002	-0,551 0,000	0,634 0,000	0,323 0,000	
OM	-0,211 0,687	-0,844 0,000	0,531 0,000	0,650 0,000	-0,097 0,999	-0,349 0,035	-0,314 0,096	0,368 0,020	-0,456 0,000	0,496 0,000		
KR60	0,092 0,999	-0,405 0,005	0,271 0,264	0,354 0,031	-0,056 1,000	-0,617 0,000	0,524 0,000	0,853 0,000	-0,955 0,000			
FN	-0,242 0,453	0,396 0,008	-0,276 0,241	-0,319 0,085	0,117 0,997	0,690 0,000	0,566 0,000	-0,885 0,000				
Rx	0,306 0,118	-0,261 0,322	0,225 0,580	0,132 0,991	-0,190 0,823	-0,659 0,000	-0,120 0,996					
I	0,013 1,000	0,571 0,018	-0,176 0,891	-0,449 0,001	-0,075 1,000	0,309 0,108						
Pi	0,172 0,907	0,286 0,194	-0,252 0,383	-0,119 0,996	0,104 0,999							
Δ_i	-0,214 0,658	-0,059 1,000	-0,025 1,000	0,233 0,522								
CA	-0,172 0,906	-0,046 0,001	0,028 1,000									
SN	-0,321 0,081	-0,906 0,000										
CV	0,359 0,026											
Pente												

Nous ne considérons que les coefficients de corrélation significatifs au moins à 1 % c'est à dire dont le degré de signification (2° chiffre) est inférieur à 1 %.

- la hauteur de pluie d'imbibition (Pi) n'est corrélée significativement avec aucune variable descriptive des états de surface ; elle est corrélée négativement avec le ruissellement (KR60) et positivement avec l'infiltration finale (FN), ce qui est logique.

- l'intensité d'infiltration minimale (FN) est corrélée positivement avec le couvert végétal (CV), la pluie d'imbibition (Pi) et l'intensité de la pluie ; elle est corrélée négativement avec le ruissellement (KR60), la turbidité (Cm) et le débit solide (ER60)
- le ruissellement (KR60) est corrélé négativement avec le couvert végétal (CV), la pluie d'imbibition (Pi) et l'infiltration minimale (FN) ; il est corrélé positivement avec l'intensité de la pluie (I).
- la charge solide (Cm) est corrélée positivement avec le taux de sol nu (SN), le taux de cailloux (CA) et le ruissellement (KR60) ; elle est corrélée négativement avec l'intensité de la pluie (I)
- le débit solide (ER60) est corrélé positivement avec le taux de sol nu (SN), de cailloux (CA), le ruissellement (KR60) et la charge solide moyenne (Cm) ; il est corrélé négativement avec le couvert végétal (CV) et l'infiltration minimale (FN).

L'analyse des régressions multiples permet d'établir les relations suivantes :

$$1. - KR60 = 32,9 - 0,8 FN + 0,4 I ; r^2 = 0,84 ; n = 25$$

Pour réduire le ruissellement (KR60), il faut augmenter l'infiltration FN (fig. 14)

$$2. - FN = - 1,3 + 0,5 I + 0,2 Pi ; r^2 = 0,53 ; n = 25$$

Pour augmenter l'infiltration (FN), il faut augmenter l'intensité de la pluie (lorsque la surface du sol n'est pas dégradable) et prolonger la phase d'imbibition (Pi) (fig. 15)

2.4.3.2 - Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)

Comme méthode d'analyse, nous avons utilisé l'analyse factorielle des correspondances (AFC). Cette dernière a été appliquée au tableau de données (tableau 10).

Les variables définissent des axes à l'intérieur du nuage de points et les représentations sur les axes permettent d'effectuer des regroupements en classes de parcelles "proches" et en classes de variables ayant un comportement similaire. L'AFC propose une représentation de faible dimension du tableau de données, mais elle s'applique de préférence aux variables qualitatives et traite symétriquement et simultanément les lignes et les colonnes du tableau (BOUROCHE et SAPORTA, 1983)

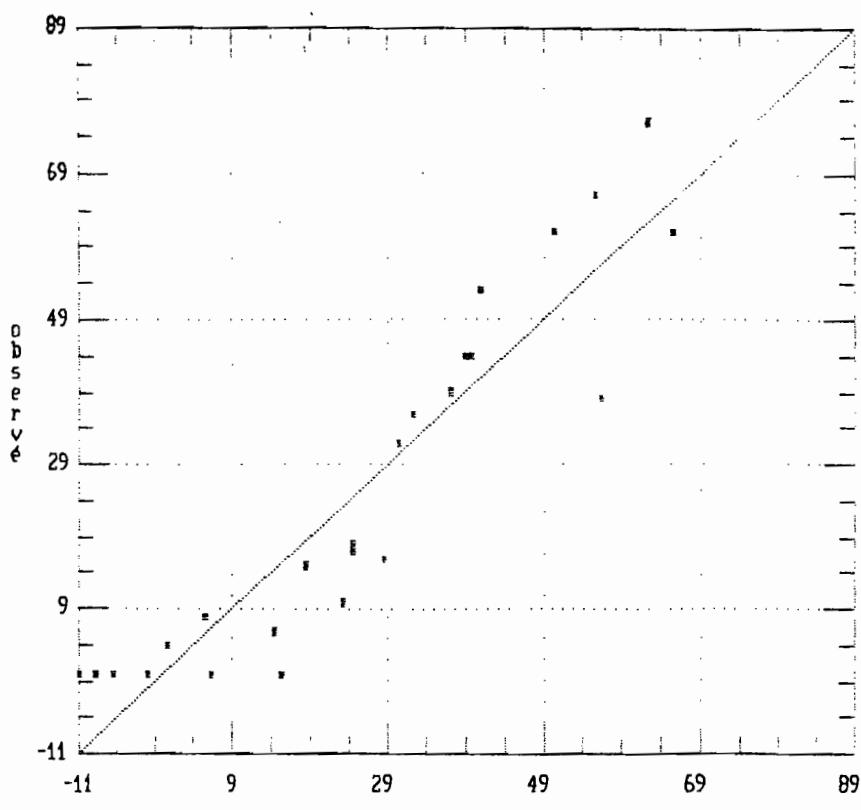


Fig 14 : Influence de l'intensité d'infiltration minimale et de l'intensité de la pluie sur le coefficient de ruissellement KR60

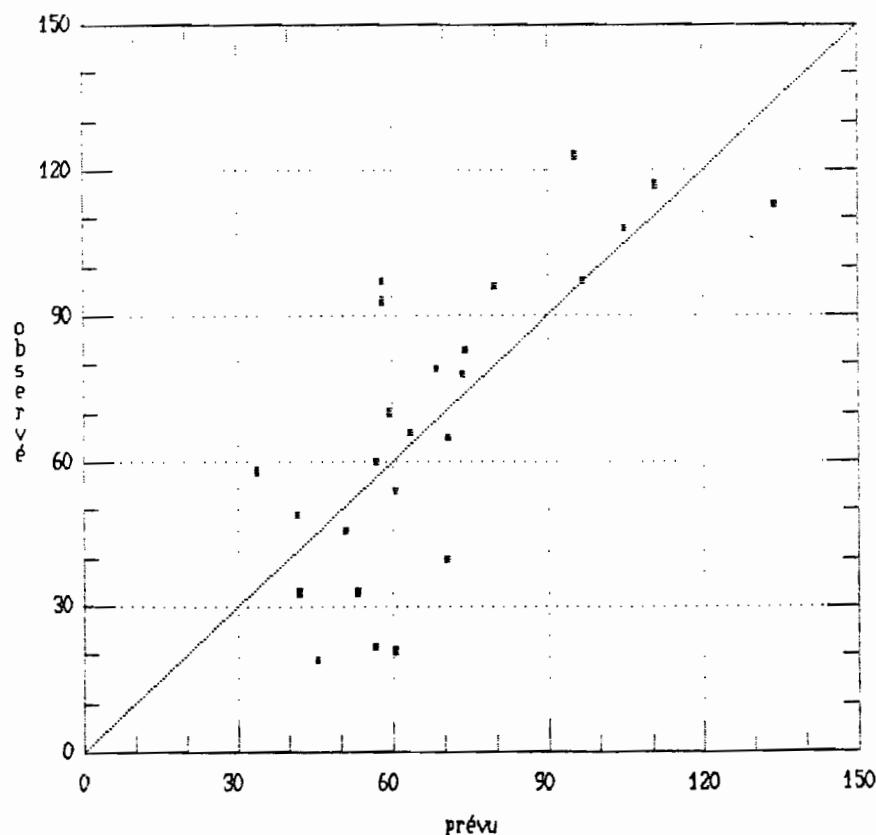


Fig 15 : Influence de l'intensité de la pluie et de la hauteur de pluie d'imbibition sur l'intensité d'infiltration en régime permanent

Les 12 variables du tableau de données ont été subdivisées en classes (tableau 12) :

- 3 classes de pentes (P) : P1 (pente < 12 %)
P2 (12 % < pente ≤ 20 %)
P3 (pente > 20 %)
- 3 classes de taux de couvert végétal (CV) :
CV1 (CV ≤ 6 %)
CV2 (6 % < CV ≤ 75 %)
CV3 (CV > 75 %)
- 3 classes de taux de litière (LIT) :
LIT 1 (LIT < 7 %)
LIT 2 (7 % < LIT ≤ 75)
LIT 3 (LIT > 75 %)
- 3 classes de taux de sol nu (SN) :
SN1 (SN ≤ 6 %)
SN2 (6 % < SN ≤ 75 %)
SN3 (SN > 75 %)
- 2 classes d'intensité maximale de ruissellement (Rx) :
Rx1 ($Rx \leq 30 \text{ mm.h}^{-1}$)
Rx2 ($Rx > 30 \text{ mm.h}^{-1}$)
- 2 classes de taux de cailloux (CA) :
CA1 (CA ≤ 10 %)
CA2 (CA > 10 %)
- 3 classes de coefficient de ruissellement (KR) :
KR1 ($KR_{60} \leq 10 \%$)
KR2 ($10 < KR_{60} \leq 40 \%$)
KR3 ($KR_{60} > 40 \%$)
- 2 classes de débits solides (ER) :
ER1 ($ER_{60} \leq 2 \text{ g.m}^{-2}$)
ER2 ($ER_{60} > 2 \text{ g.m}^{-2}$)
- 2 classes de taux de genêts (GE) :
GE1 (GE = 0)
GE2 (GE > 20 %)

Tableau 12 : CARACTERISTIQUES DES PARCELLES TESTEES AU SIMULATEUR DE PLUIE
ANALYSE DES CORRESPONDANCES

OBS	P1	P2	P3	CV1	CV2	CV3	LIT1	LIT2	LIT3	RX1	RX2	KR1	KR2	KR3	ER1	ER2	SN1	SN2	SN3	CA1	CA2	GE1	GE2
1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
2	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
3	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
4	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
5	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
6	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
7	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
8	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
9	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
10	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1
11	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
12	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
13	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
14	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
15	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
16	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
17	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
18	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
19	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
20	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
21	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
22	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
23	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
24	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
25	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0

Les 3 premiers axes expliquent environ 60 % de l'inertie totale du nuage de points (tableau 13).

Tableau 13 : CARACTÉRISTIQUES DES PARCELLES TESTÉES AU SIMULATION DE PLUIE

VALUEURS PROPRIÉTÉS					
VALUEUR PROPIÉTÉ TRIVIALE: 1.00000000					
NUM	VAL PROPIÉTÉ	POURCENTAGE	CUMUL	TCOURBE REPRÉSENTATIVE	
1	0.36086879	23.199	23.199	.....
2	0.29905465	19.725	62.424	.....
3	0.24987052	16.063	58.487	.....
4	0.15362064	9.816	68.362	.....
5	0.12455027	8.007	76.369	.....
6	0.11850358	7.616	83.987	.....

La figure 16 représente la répartition des variables sur le plan des axes 1 et 2. L'axe 1 sépare les litières abondantes (parcelles de forêt), associées à un faible taux de sol nu et de cailloux, des parcelles genêts associées à un taux moyen de cailloux et de sol nu. L'axe 1 peut être défini comme l'axe de couverture.

L'axe 2 sépare les parcelles à forte érosion, associée à un fort de taux de sol nu et de ruissellement, des parcelles à faible érosion, associée à un faible ruissellement et un fort taux de couvert végétal. L'axe 2 peut être défini comme l'axe de susceptibilité à l'érosion.

L'axe 3 sépare les parcelles à faible pente des parcelles à forte pente. Cet axe peut être défini comme l'axe des pentes.

La figure 17 montre que l'axe de couverture (axe 1) sépare les parcelles de la hêtraie et de la pessière (parcelles sous forêt) des parcelles à genêts. Entre ces 2 groupes, se situent les parcelles dégradées des pelouses.

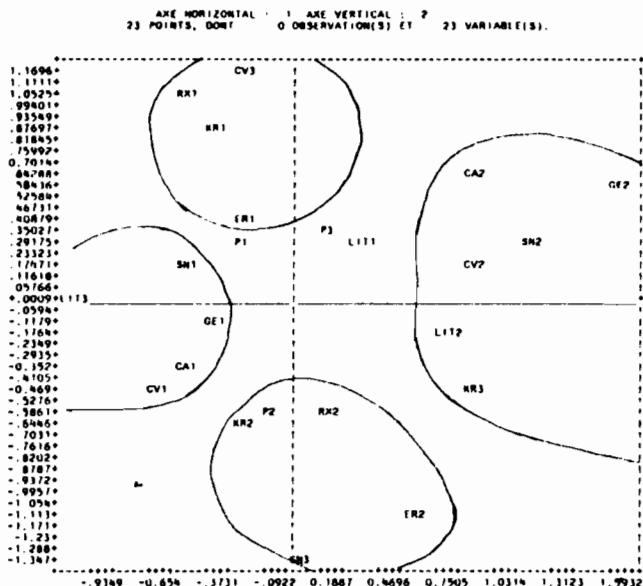
L'axe d'érosion (axe 2) sépare les parcelles nues (tous sites confondus), des parcelles à très fort couvert végétal (pelouse saine).

L'axe des pentes (axe 3) (fig. 18) sépare les parcelles de la pelouse aval des parcelles des autres sites.

Conclusion :

Cette analyse statistique n'a pas donné de résultats tangibles (peu de conclusions pour beaucoup de travail). L'AFC permet néanmoins de faire des regroupements intéressants entre les paramètres hydrodynamiques et les caractéristiques des états de surface. La figure 17 illustre bien ces regroupements, où on peut constater qu'un faible

FIG 16 : CARACTÉRISTIQUES DES PARCELLES TESTÉES AU SIMULATEUR DE PLUIE



ruissellement (KR1, Rx1) est plus proche d'un très fort taux de couvert végétal (CV3) caractérisé par les parcelles de pelouse saine alors que d'un autre côté, on constate que le ruissellement et les débits solides sont plus importants (Rx2, KR2, ER2) sur toutes les parcelles nues ainsi que la ravine (PAMR2).

2.4.4 - Etude de la variabilité des paramètres hydrodynamiques.

Interprétations et discussions : cas des parcelles non labourées :

Dans ce chapitre, nous allons interpréter le comportement des différentes variables hydrodynamiques et les facteurs susceptibles de les influencer.

2.4.4.1 - La hauteur de pluie d'imbibition (P_i)

La hauteur de pluie d'imbibition correspond à la lame d'eau infiltrée avant l'apparition du ruissellement ; elle correspond au niveau de la parcelle à la notion de "précipitation limite de ruissellement" (LAFFORGUE et NAAH, 1976). Selon COLLINET et LAFFORGUE (1979), la hauteur de pluie d'imbibition serait la résultante de 3 termes :

- la hauteur de pluie $P_p = W_p$, infiltrée jusqu'à l'apparition des flaques, avec : $W_p = C_1 (I) (\theta_s - \theta_0)$ où C_1 dépend des caractéristiques hydrodynamiques du sol en surface, ainsi que de l'intensité de la pluie.

θ_s = teneur volumique en eau du sol à saturation

θ_0 = teneur volumique en eau du sol au début de l'averse

- la hauteur de la lame d'eau S_i , immobilisée en surface sous forme de flaques au temps t_i ; elle dépend de l'étendue, de la profondeur et de la disposition des dépressions topographiques du sol.
- la hauteur d'eau ($W_i - W_p$) qui s'infiltre pendant la durée de remplissage des flaques ; elle dépend comme S_i , de la morphologie superficielle. On conçoit que ce terme est une fonction croissante de $(\theta_s - \theta_0)$, avec : $(W_i - W_p) = C_2 (I) (\theta_s - \theta_0) + H_i (I)$ où H_i représente la hauteur d'eau qui s'infiltre sur un sol initialement saturé, avant l'apparition du ruissellement.

Finalement, on obtient ; $P_i = C(I) (\theta_s - \theta_0) + H_i (I)$

Ce modèle est très difficile à appliquer ; plusieurs termes de l'équation sont difficiles à déterminer expérimentalement (S_i ; $W_i - W_p$).

a/ Influence de l'intensité de la pluie sur la hauteur de pluie d'imbibition

Les résultats concernant Pi sont très hétérogènes et avec le protocole utilisé, l'influence de l'intensité de la pluie sur Pi n'a pas beaucoup de sens ; les parcelles sont de plus en plus humides initialement pour des intensités de pluie croissantes.

b/ Influence de la durée du temps de ressuyage (ta) sur la hauteur de pluie d'imbibition

Le tableau 14 montre que Pi est d'autant plus élevée que la durée du temps de ressuyage (ta) est prolongée, donc le sol plus sec. Les plus fortes valeurs de Pi sont observées sous hêtraie et pessière (sauf les parcelles E3 et E4). Certaines valeurs de Pi sont douteuses (E3, E4 et PAVd6). En effet sur ces parcelles, certaines gouttes de pluie avant même d'atteindre la surface du sol, pénètrent à travers les fentes du cadre métallique et arrivent à l'exutoire faisant croire à un début de ruissellement. Comme ces dernières sont très peu chargées, il était parfois difficile de distinguer le vrai début de ruissellement du faux.

Le protocole ne prévoyant que 2 ta (grand ou petit, mais sans valeur intermédiaire), on n'a pu établir de relations entre Pi et ta. Cependant sur la parcelle PAVd3, on a pu suivre l'évolution de Pi en fonction de plusieurs ta et ceci pour une intensité de pluie relativement constante (fig. 19). On obtient la relation :

$$Pi = 7,26 + 0,36 ta ; r^2 = 0,98 ; n = 5$$

Les relations obtenues entre Pi et ta sont les suivantes :

- pelouse aval : $Pi = 8,6 + 0,33 ta ; r = 0,98$
- pelouse amont : $Pi = 5,2 - 0,38 \ln(ta) ; r = -0,28$, non significatif
- hêtraie : $Pi = 7,4 \cdot 10^{-4} e^{1,28ta} ; r = 0,91$
- pessière : $Pi = 9,3 + 1,43 ta ; r = 0,71$
- genêts sains : $Pi = 4,2 - 0,22 \ln(ta) ; r = -0,42$, non significatif
- genêts brûlés : $Pi = 3,9 e^{-1,7 \cdot 10^{-3} ta} ; r = -0,92$

Tableau 14 : Temps de ressuyage (ta) et pluie d'imbibition (Pi)

PAVd3	ta	0,6	15	65
	Pi	7,6	12,8	30,9
PAVd6	ta	0,5	1,2	48
	Pi	6	9	5 ?
H4	ta	0,5	< 24	
	Pi	17	103	
PAMR2	ta	0,5	15	
	Pi	1,3	3	
PAMD3	ta	0,5	< 48	
	Pi	4,7	5,1	
PAMD4	ta	0,5	< 24	
	Pi	3,7	4,1	
E1	ta	0,5	< 72	
	Pi	10,5	107	
E2	ta	0,5	< 24	
	Pi	18,7	107	
E3	ta	0,5	< 24	
	Pi	4	15,3	
E4	ta	0,5	< 24	
	Pi	9	6,8	

Plusieurs auteurs ont montré à l'aide de relations empiriques établies à partir de simulations de pluies que la hauteur de pluie d'imbibition Pi, est proportionnelle au déficit de saturation du sol (AHUJA, DANNER et EL-SWAIFY, 1976 ; VALENTIN, 1981).

$$Pi = A + B \Delta i$$

où A et B sont deux constantes caractéristiques du sol.

Ne connaissant pas l'humidité du sol avant la 2^e pluie et la 3^e pluie, on n'a pu établir des relations entre la hauteur de pluie d'imbibition Pi et le déficit de saturation du sol Δi . Pour caractériser l'état d'humectation du sol, les hydrologues utilisent des indices tel que l'indice des précipitations antérieures (API) -CHEVALLIER, 1983), qui physiquement, signifie l'analogie avec un réservoir qui se vidange et

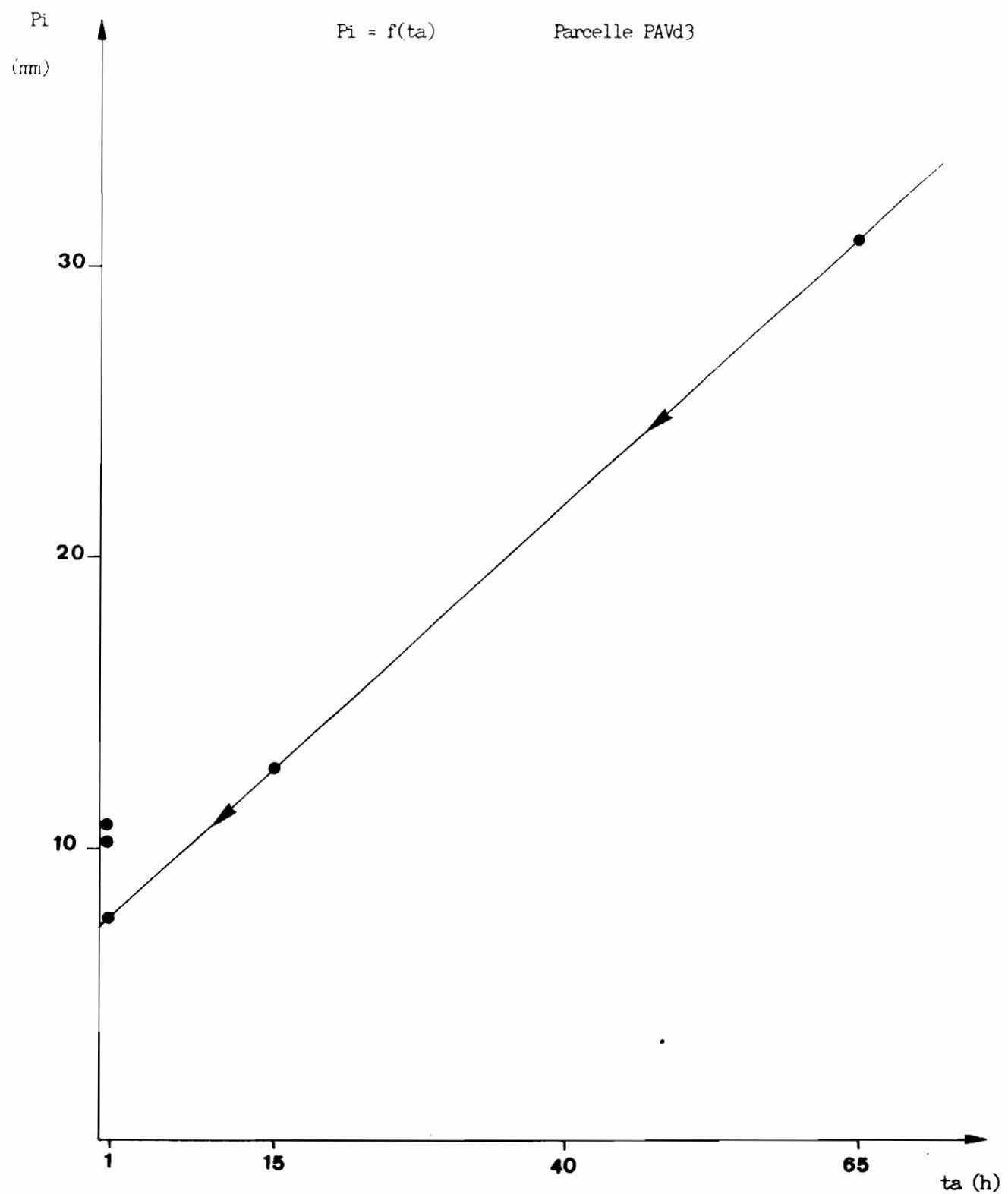


Fig 19 : Evolution de la hauteur de pluie d'imbibition en fonction de la durée du temps de ressuyage

se remplit périodiquement.

Les principaux indices utilisés sont :

1°/ $IH = \sum_{i=1}^j \frac{P_i}{i}$ où P_i = dernière pluie naturelle tombée au temps i
 i = temps en heures séparant la dernière pluie naturelle du début de la pluie simulée ;
c'est l'équivalent de la durée du temps de ressuyage, ta .

2°/ API, proposé par KOHLER et LINSLEY : (API : Antécédent Précipitation Index)

$$API = API_0 K^i \text{ où } API_0 = API_0 e^{-\alpha i}$$

3°/ Après les éléments apportés par la simulation de pluie, API devient :

$$API \equiv IK ; IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) e^{-\alpha \theta}$$

avec IK_n : indice d'humectation immédiatement avant l'averse n

P_{n-1} : hauteur de l'averse de rang ($n-1$) en mm

θ : temps séparant la fin de la pluie ($n-1$) du début de la pluie n , calculé en jour et fraction de jour, à 5 mn près

α : coefficient de calage

$IK = 0$: après une période très sèche.

L'indice des précipitations antérieures API ou IK apparaît comme une grandeur commode pour représenter l'état d'humectation de la surface des sols dans l'étude expérimentale des bassins versants (CHEVALLIER, 1983). Ces indices prennent en compte non seulement le temps de ressuyage ta mais aussi le volume d'eau précipitée entre la dernière pluie naturelle ou simulée et la pluie suivante.

En utilisant l'indice IH qui est le plus simple, on caractérisera ainsi l'état d'humectation du sol avant chaque pluie.

IH est d'autant plus élevé que le sol est humide.

Les meilleures relations établies entre P_i et IH sont les suivantes :

- pelouse aval : $P_i = 23,7 - 2,3 \ln IH$; $r = -0,94$; $n = 8$

- pelouse amont : $P_i = 4,3 + 4 \cdot 10^{-3} IH$; $r = 0,3$; $n = 11$ (non significatif)

- hêtraie : $P_i = 173,7 \cdot e^{-5 \cdot 10^{-3} IH}$; $r = -0,94$; $n = 5$

- pessière : $P_i = 52,7 - 7,5 \ln IH$; $r = -0,73$; $n = 11$

- genêts : $P_i = 3,1 + 5,9 \cdot 10^{-3} IH$; $r = 0,82$; $n = 12$

Les relations obtenues sur la pelouse amont et les genêts semblent très laches. Si la relation n'est pas significative sur la pelouse amont, sur les genêts, tout laisse à penser que Pi croît quand IH croît, ce qui est contradictoire par rapport à l'ensemble des observations. Ceci pourrait être dû à des erreurs dans la détermination de Pi sur les parcelles à genêts.

Il aurait été intéressant de comparer l'évolution de Pi en fonction de IH avec l'évolution de Pi en fonction du déficit de saturation du sol ne serait-ce que pour juger de la fiabilité de l'indice IH. Mais, si IH est connu avant chaque pluie, le déficit de saturation du sol lui, n'est connu qu'au début de la 1^e pluie uniquement, car on ne connaît pas l'humidité du sol au début de la 2^e pluie et au début de la 3^e pluie. On pourrait considérer que les 10 premiers centimètres sont proches de la saturation et que le déficit de saturation tend vers 0.

c/ Variabilité inter-parcelles de la hauteur de pluie

d'imbibition, Pi :

La pelouse aval

Les parcelles totalement couvertes PAVC2 (taupinière) et PAVC4 n'ont pas ruisselé et présentent des Pi largement supérieurs à 200 mm. La parcelle à taupinière (PAVC2) se comporte comme une parcelle totalement couverte. Les parcelles dégradées PAVd3 et PAVd6 ont quant à elles ruisselé. On constate (tableau ci-dessous) que c'est la parcelle la plus sèche initialement qui absorbe le plus d'eau.

Code Parcelle	Pi (mm)	ta (h)	IH	C.V (%)	Pente (%)
PAVd3	30,9	65	0,07	81	6
PAVd6	4,8 ?	< 48	0,13	84	16
PAVC2	> 200	< 48	0,12	76 + ?	9
PAVC4	> 200	< 96	0,08	100	12

Pour les parcelles dégradées, la variabilité de Pi s'explique très bien par les variations du temps de ressuyage et de l'indice IH. Plus le temps de ressuyage est allongé et IH faible, plus le sol est sec et plus il est apte à infiltrer de l'eau. Le déclenchement du ruissellement serait beaucoup plus lié à l'état d'humectation préalable du sol qu'à son état de surface. Le ruissellement se déclenche plus vite sur la parcelle PAVd6 malgré son plus dense couvert végétal mais ceci est sujet à vérification si on veut bien se rappeler que la valeur de Pi de la parcelle PAVd6 (4,8 mm) est douteuse.

La pelouse amont

Code Parcelle	Pi (mm)	ta (h)	IH	CV (%)	Pente (%)
PAMC1	10,0	0,4	87	100	36
PAMR2	3,0	15	0,5	12	19
PAMD3	5,1	< 48	0,1	99	19
PAMD4	4,1	< 24	0,06	96	18

La variabilité entre les parcelles plus ou moins dégradées semble liée aux variations de ta (fig. 20) et à un degré moindre IH. Le taux du couvert végétal est aussi bien lié aux variations de Pi (fig. 21). La parcelle PAMC1 présente la plus forte Pi à cause probablement de son plus dense couvert végétal.

La hêtraie

Code Parcelle	Pi (mm)	ta (h)	IH	CV (%)	Pente (%)
H1	166,8	< 72	0,08	100	28
H2	186,3	< 24	0,008	100	12
H3	283,9	< 24	0,10	100	13
H4	103	< 24	0,27	100	33

Trois parcelles H2, H3 et H4 ont le même ta. Exceptée la parcelle H3, la variabilité de Pi semble liée aux variations de IH. Toujours, excepté la parcelle H3, la variabilité de Pi est bien liée aux variations de la pente topographique. Plus la parcelle est pentue, moins elle infiltre (s'agissant de parcelles couvertes). Il y aurait peut-être une interaction entre le déficit de saturation du sol et la pente du terrain.

P_i

- 65 -

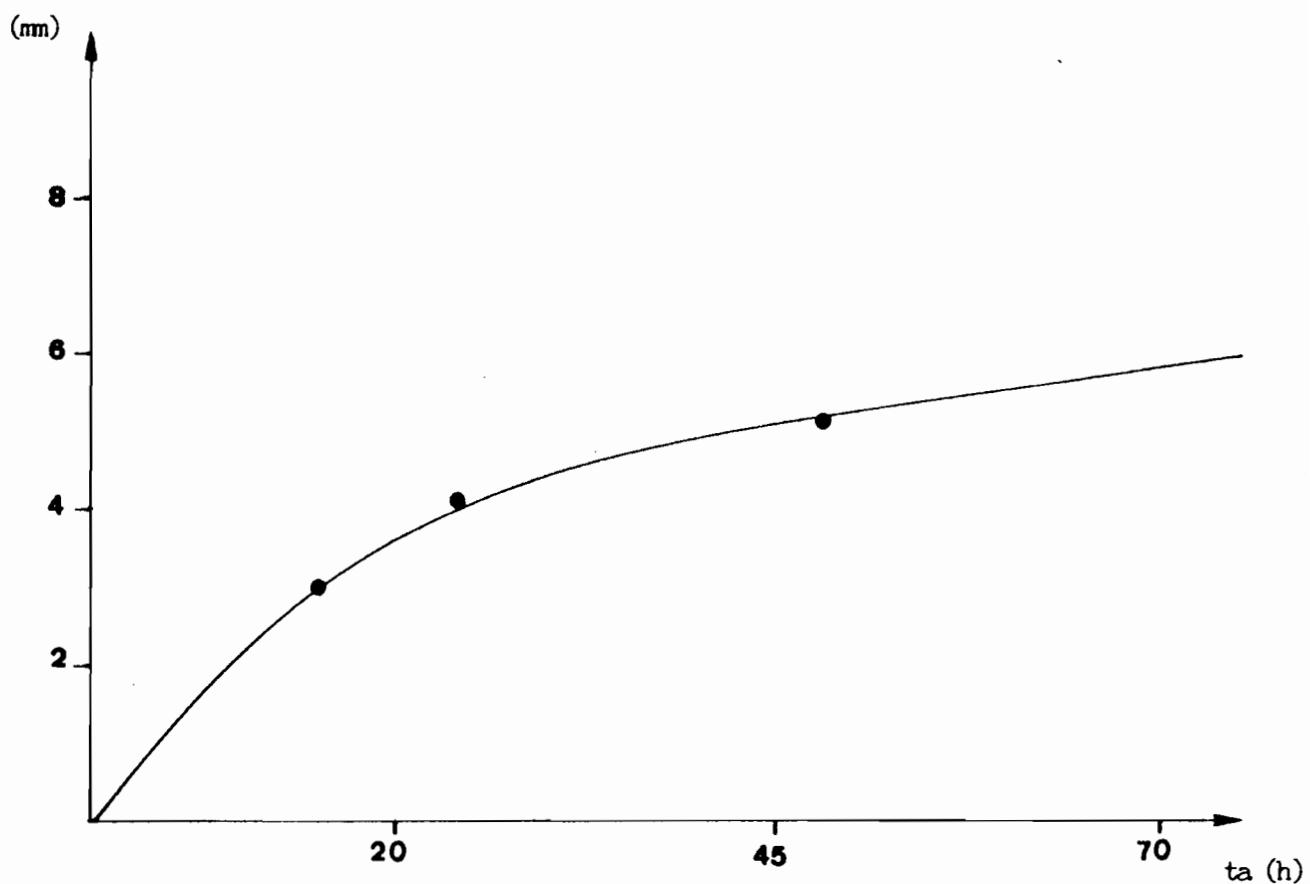


Fig 20 : Evolution de la hauteur de pluie d'imbibition en fonction de la durée du temps de ressuyage (pelouse amont)

P_i
(mm)

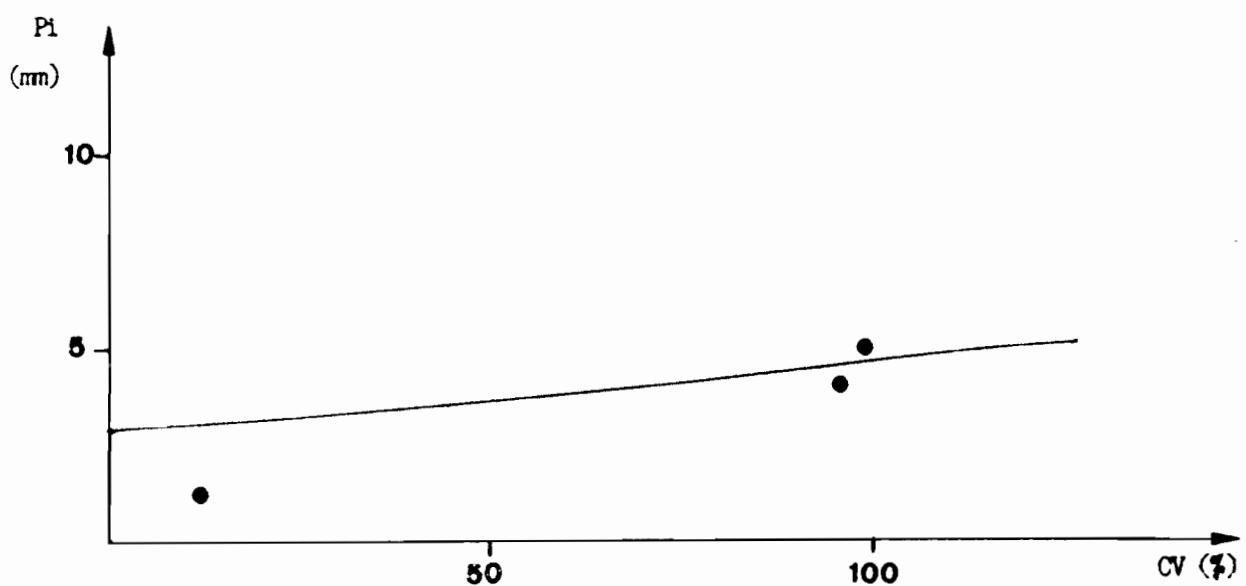


Fig 21 : Evolution de P_i en fonction du taux de couvert végétal (pelouse amont)

La pessière

Code Parcelle	Pi (mm)	ta (h)	IH	CV (%)	Pente (%)
E1	107	< 72	0,02	100	21
E2	107	< 24	0,06	100	14
E3	15,3	< 24	0,20	100	27
E4	6,8	< 24	2,70	100	16

Les parcelles E1 et E2 ont la même Pi et pratiquement le même indice IH (même ordre de grandeur). La variabilité de Pi s'explique bien par les variations de l'indice IH.

Conclusion

Le facteur qui semble influencer le plus et qui détermine la hauteur de pluie d'imbibition est bien l'état d'humectation initial du sol. A ce facteur d'ajoutent le taux du couvert végétal : les parcelles totalement couvertes présentent les plus fortes Pi et ceci même lorsque les pentes sont fortes, ce qui indique que le facteur couvert végétal prime sur le facteur pente topographique.

2.4.2.2 - Le ruissellement

a/ Le coefficient de ruissellement (KR60)

Pour pouvoir comparer les parcelles entre elles ainsi que les différentes formations végétales, nous allons étudier le ruissellement correspondant à une hauteur de pluie de 60 mm (KR60), en tenant compte de la phase d'imbibition. Nous interpréterons la variabilité à l'intérieur de chaque formation végétale puis entre les différentes formations végétales.

La pelouse aval

Les parcelles non dégradées (PAVC2 et PAVC4) n'ont pas ruisselé quelque soit l'intensité de la pluie et ceci pour des hauteurs de pluie dépassant 200 mm.

Sur la parcelle dégradée PAVd3, 2 séquences de pluie ont été simulées : la 1^e séquence, comme le prévoit le protocole, c'est à dire 3 intensités (90, 110 puis 130) entrecoupées par un temps de ressuyage de 0,5 h. La 2^e séquence, 15 h après la fin de la première séquence et comprenant 2 intensités décroissantes (relativement égales).

Sur la parcelle PAVd6, une 4^e pluie d'intensité égale à la 1^e fut rajoutée au protocole pour mettre en évidence une éventuelle dégradation de la surface. La 2^e séquence de pluie sur la parcelle PAVd3 a été rajoutée pour voir l'évolution du ruissellement en fonction de plusieurs durées de temps de ressuyage (ta).

On constate (tableau ci-dessous) que le coefficient de ruissellement (KR60) est plus élevé sur la parcelle PAVd3.

Ceci ne s'explique que par le plus dense couvert végétal de la parcelle PAVd6 (cf tableau 7). Plus la densité de couverte végétale augmente, plus KR 60 diminue.

	KR 60 (%)	I (mm/h)
PAVd3	1,8	93,7
	22,3	104,5
	30,5	132
	23,6	95,4
	39,2	92,3
PAVd6	5,7	102
	8,8	113
	15,0	123
	8,1	106
PAVC2	0,0	97
	0,0	117
PAVC4	0,0	104
	0,0	110

- les faibles valeurs de KR60 à la 1^o pluie sont dues au fait que le sol était plus sec.
- On constate que KR60 croît quand l'intensité de la pluie croît.
- L'influence de la pente topographique sur KR60 est masquée par le facteur couvert végétal. La parcelle PAVd6 plus pentue, ruisselle moins car elle est plus couverte.
- Pour mettre en évidence l'influence de la durée du temps de ressuyage ta sur KR60, il faut que, seul ta varie et que les autres facteurs (couvert végétal, pente, intensité de pluie) restent constantes. Considérons la parcelle PAVd3 et les pluies 1,4 et 5 d'intensité très peu différente, de l'ordre de 94 mm.h^{-1} .

Pour des ta différents, on constate que plus la durée du temps de ressuyage est prolongée, donc plus le sol est sec et plus faible est le ruissellement (KR60) (tableau ci-dessous).

Sur la parcelle PAVd6, pour une pluie de l'ordre de 104 mm.h^{-1} on remarque que KR60 diminue quand ta augmente.

PAVd3 $I = 94 \text{ mm.h}^{-1}$	ta (h)	0,6	15,4	65
	KR60 (%)	39,2	23,6	1,8
PAVd6 $I = 104 \text{ mm.h}^{-1}$	ta(h)	0,5	< 48	
	KR60 (%)	8,1	5,7	

Ces 2 exemples montrent que le ruissellement est une fonction décroissante de la durée du temps de ressuyage.

On ne peut malheureusement pas montrer l'influence de la durée du temps de ressuyage sur les autres sites car le protocole ne le prévoyait pas.

- A la 1^o averse, la parcelle PAVd6 présentait un déficit de saturation du sol en surface supérieur à celui enregistré sur la parcelle PAVd3, ce qui concorde avec ce que l'on a déjà vu avec ta. Un couvert végétal plus dense combiné à un déficit de saturation plus élevé font que la parcelle PAVd6 malgré sa plus forte pente ruisselle moins que la parcelle PAVd3.

ALBERGEL, CASENAVE et VALENTIN (1985) montrent que les variations du coefficient de ruissellement sont bien liées aux variations du couvert végétal. Selon eux, le taux de couverture végétale associée à l'activité mésafaunique est le principal facteur explicatif du ruissellement (ou de l'infiltration) sous végétation naturelle et la nature du profil pédologique n'influence que très peu les phénomènes de ruissellement et d'infiltration dans la zone soudano-sahélienne où ils ont travaillé.

La pelouse amont

Le tableau ci-dessous montre que le coefficient de ruissellement (KR60) est légèrement supérieur sur la parcelle PAMd4 par rapport à la parcelle PAMd3. ces 2 parcelles ayant des pentes pratiquement égales, ne diffèrent que par leur état d'humectation initial et la densité du couvert végétal.

	KR60 (%)	I (mm/h)
PAMC1	20,6	92
	61,3	110
	65,0	130
PAMR2	35,7	75
	66,8	85
PAMd3	41,7	70
	52,8	77
	55,3	90
PAMd4	41,6	92
	60,5	98
	58,7	135

A la 1° pluie ou aux deux averses suivantes, la parcelle PAMd4 présente le plus fort déficit de saturation et le plus faible IH, caractérisant ainsi la parcelle la plus sèche. Par contre aux averses 2 et 3, la parcelle PAMd4 présente des IH plus élevés, ce qui témoigne d'une plus forte humidité ou d'un ressuyage moins rapide. Mais dans tous les cas, que ce soit à la 1° averse ou aux averses suivantes, le coefficient de ruissellement (KR60) est toujours plus important sur la parcelle PAMd4.

Ce qui veut dire que le facteur déficit de saturation ou état d'humectation initial , n'est pas le facteur explicatif principal. Cette variabilité de KR60 est par contre bien liée aux variations du taux de couvert végétal. La parcelle PAMd3 mieux couverte ruisselle moins.

Le fort KR60 de la parcelle non dégradée (PAMc1) ne s'explique que par la saturation de sa couverture pédologique (déficit de saturation faible (environ 8 %) et aussi par sa forte pente). La parcelle appelée ravine (PAMR2) présente deux cas de figures. A la 1° averse, cette parcelle présente un KR60 plus faible que celui observé sur les parcelles dégradées (PAMd3 et PAMd4). Puis à l'averse suivante, c'est elle qui ruisselle davantage que les autres. Cette parcelle a la particularité de présenter un déficit de saturation assez important et un taux de couvert végétal très faible (tableau 7). D'un autre côté, elle présente un taux assez important de cailloux en surface.

Or, plusieurs auteurs ont noté le rôle positif sur l'infiltration, des cailloux qui ont la faculté de dissiper l'énergie cinétique des gouttes de pluie et évitent ainsi la fermeture de la porosité superficielle du sol. Ainsi, GRANT et STRUCHTEMAYER (1959) ont montré dans des expérimentations au laboratoire que lorsqu'on enlève les cailloux (0,24 à 1,27 cm) de la surface du sol, ceci entraîne une augmentation du ruissellement. Des résultats analogues ont été obtenus par JUNG (1960) sur des pentes de 6° et 36 % de cailloux, par EPSTEIN et al (1966) sur des pentes de 5° et 35 % de cailloux et par EVENARI et al (1958-1967) sur des pentes de 6° à 11,5° et 75 % de cailloux. AGASSI (1970) expérimentait au laboratoire sur des pentes de 3° en utilisant de fortes intensités ; il a trouvé une relation positive entre l'infiltration d'une part et le pourcentage de cailloux (0-50 %) d'autre part. Tous ces auteurs insistent sur le rôle positif des cailloux vis à vis de l'infiltration.

Le fort taux de cailloux sur la parcelle PAMR2, associé au faible couvert végétal et au fort déficit de saturation du sol, serait à l'origine du relatif faible KR60 observé sur la parcelle PAMR2. Ainsi 75 % de la surface de la parcelle PAMR2 est protégé contre l'impact des gouttes de pluie (le couvert végétal et les cailloux servant d'écran protecteur). Mais 25 % de la parcelle reste sous la menace de la battance par les gouttes de pluie. Or, à la 1° pluie le sol était assez sec et les agrégats secs présentent une stabilité structurale

assez élevée pour résister à la désagrégation (MOLDENHAUER, manuscrit). Le fort KR60 de l'averse suivante s'explique par une diminution de la stabilité structurale des agrégats du sol devenus humides, et leur désagrégation par les gouttes de pluie serait à l'origine d'une modification de l'état structural de la parcelle en favorisant la formation d'une structure de surface de conductivité hydraulique très réduite. Notons que KR60 croît quand l'intensité de la pluie croît.

Conclusion concernant les pelouses :

Le pourcentage de couvert végétal est le principal facteur explicatif des variations du coefficient de ruissellement. Son influence est telle que le rôle de l'état d'humectation du sol ainsi que celui de la pente topographique sont masqués. Après ce facteur, l'importance du taux de cailloux vis à vis du ruissellement est le facteur le plus important ; les cailloux jouant le rôle d'écran vis à vis des gouttes de pluie dissipent leur énergie cinétique et évitent la fermeture de la porosité de surface (lorsque le sol est faiblement couvert).

La hêtraie

Sur la hêtraie, le passage d'une intensité de pluie à une autre s'est effectué sans avoir observé l'arrêt de 30 mn prévu dans le protocole, si le ruissellement ne s'est pas manifesté. Ainsi, les parcelles H2 et H3 n'ont ruisselé qu'à la 3^e pluie et il n'y a donc pas eu de temps d'arrêt ni entre la 1^e et la 2^e pluie, ni entre la 2^e et la 3^e pluie. Le KR60 est donc nul pour les 2 premières pluies mais il est indéterminable pour la 3^e pluie puisqu'il n'y a pas eu d'arrêt entre la 2^e et la 3^e pluie.

Seules les parcelles H1 et H4 ont ruisselé à la 2^e pluie et seul KR60 de la 3^e pluie est connu sur la parcelle H4 car sur la parcelle H1 il n'y a pas eu de temps d'arrêt entre la 2^e et la 3^e pluie quoique le ruissellement se soit déjà déclenché à la 2^e pluie (?).

Les parcelles étant recouvertes par une litière, ce facteur n'interviendra pas dans l'interprétation de la variabilité inter-parcelles. Malgré l'absence de chiffres concernant KR60 sur toutes les parcelles, on notera que ce sont les parcelles H1 et H4 qui ont ruisselé les premières (à la 2^e pluie) ; et ce sont les parcelles les plus pentues (28 % et 33 %)

alors que les parcelles faiblement pentues H2 et H3 (12 % et 13 %) ne ruissent que plus tardivement, à la 3^e pluie.

Nous allons nous baser sur la hauteur de pluie qu'il a fallu apporter pour déclencher le ruissellement, pour interpréter cette variabilité, c'est à dire la hauteur de pluie d'imbibition P_i . La variabilité de la susceptibilité des parcelles de la hêtraie au ruissellement semble bien liée aux variations de la pente topographique, et l'écart de susceptibilité entre H2 et H3 qui ont la même pente, pourrait résulter de différences d'humidité initiale.

	P_i (mm)	Pente (%)
H1	147	28
H2	178	12
H3	302	13
H4		33

Le ruissellement serait donc une fonction croissante de la pente topographique lorsque le sol est couvert, ce qui est conforme avec les résultats obtenus par ROOSE (1980) sous forêt tropicale humide sous pluie naturelle. COSANDEY, GRIL et al (1985) montrent que la pente n'est pas le facteur déterminant pour le ruissellement sur des versants dénudés (Cévennes), ce qui concorde avec nos résultats sur les pelouses dégradées où les variations du coefficient de ruissellement sont plutôt liées aux variations du pourcentage de couvert végétal et de cailloux.

La pessière :

Le tableau ci-après montre que le coefficient de ruissellement (KR60), comme sur les autres sites croît quand l'intensité de la pluie croît. La variabilité de KR60 d'une parcelle à une autre est faible. mais aucun facteur ne nous a permis de l'expliquer.

	KR60 (%)	I (mm/h)
E1	0	102
	16,6	123
	28,0	156
E2	0	93
	5,0	116
	15,1	140
E3	2,2	102
	11,0	135
	15,5	155
E4	3,6	87
	9,1	100
	16,1	130

Des prélèvements d'échantillons de sols effectués à cet endroit ainsi que sur les autres sites après une période de sécheresse de 40 jours ont été testés au laboratoire (DURAND, 1985). L'échantillon prélevé sur la pessière montrait une humidité minimum de 21 % supérieure à l'humidité à $pF = 4,2$ (point de flétrissement) qui est de 11,5 %, alors que sur les autres sites (pelouses et hêtraie), dans tous les cas, l'humidité minimum était inférieure à $pF = 4,2$. Ceci ne peut s'expliquer que par une alimentation du sol de la pessière par le bas et donc par une probable remontée de nappe. Cette nappe se situerait à une vingtaine de cm du sol lors des grosses pluies d'automne.

Cette remontée de nappe serait à l'origine d'une homogénéisation de l'état d'humectation du sol au niveau de la pessière, ce qui aurait probablement entraîné une faible variabilité du coefficient de ruissellement.

Les genêts :

Les essais effectués sur les genêts avaient pour but la mise en évidence de l'effet de l'écoubage sur le chimisme des eaux et les pertes en terre.

Vis à vis du ruissellement, le tableau ci-après montre sur l'ensemble des 2 répétitions que KR60 est plus élevé lorsque les genêts sont brûlés (pour des pluies différentes). Une diminution du couvert végétal entraîne une augmentation du coefficient de ruissellement (KR50). La variabilité entre les genêts purgatifs (G1 et G2).

est bien liée aux variations du couvert végétal (G2 légèrement moins couverte que G1).

	KR60 (%)	I (mm/h)
G1	5,8	63
	22,5	107
	37,0	119
G1 bis	23,5	114
	37,0	117
	36,6	120
G2	11,6	99
	35,0	107
	44,0	112
G2 bis	17,5	118
	41,6	122
	44,2	130

Il y a une nette différence de couverture du sol au cas où le feu traverse une parcelle. Selon que le feu est précoce ou tardif, ses conséquences sont plus ou moins dangereuses.

Si le feu est précoce, ce qui est notre cas, il passe vite, brûle les parties aériennes désséchées, mais ne détruit ni les souches d'herbes ni les grosses branches : il élimine par contre les jeunes semis, la litière de feuilles mortes et bon nombre d'insectes.

Les feux tardifs sont catastrophiques. En effet, les herbes étant très sèches, le feu s'attarde sur chaque souche d'herbe, détruit la moindre paille, les parties aériennes des buissons ; le sol restera mal protégé pendant un certain temps. Les averses orageuses battent alors la surface du sol et peuvent, si le sol est dégradable, former une pellicule de battance peu perméable qui donne naissance à d'abondantes nappes de ruissellement (ROOSE, 1980).

Comparaison de la susceptibilité au ruissellement des différents sites

La figure 22 met en évidence la présence de 3 grands ensembles qu'on peut classer comme suit du point de vue de la susceptibilité au ruissellement :

- 1/ La pelouse amont
- 2/ la pelouse aval
- 3/ la pessière

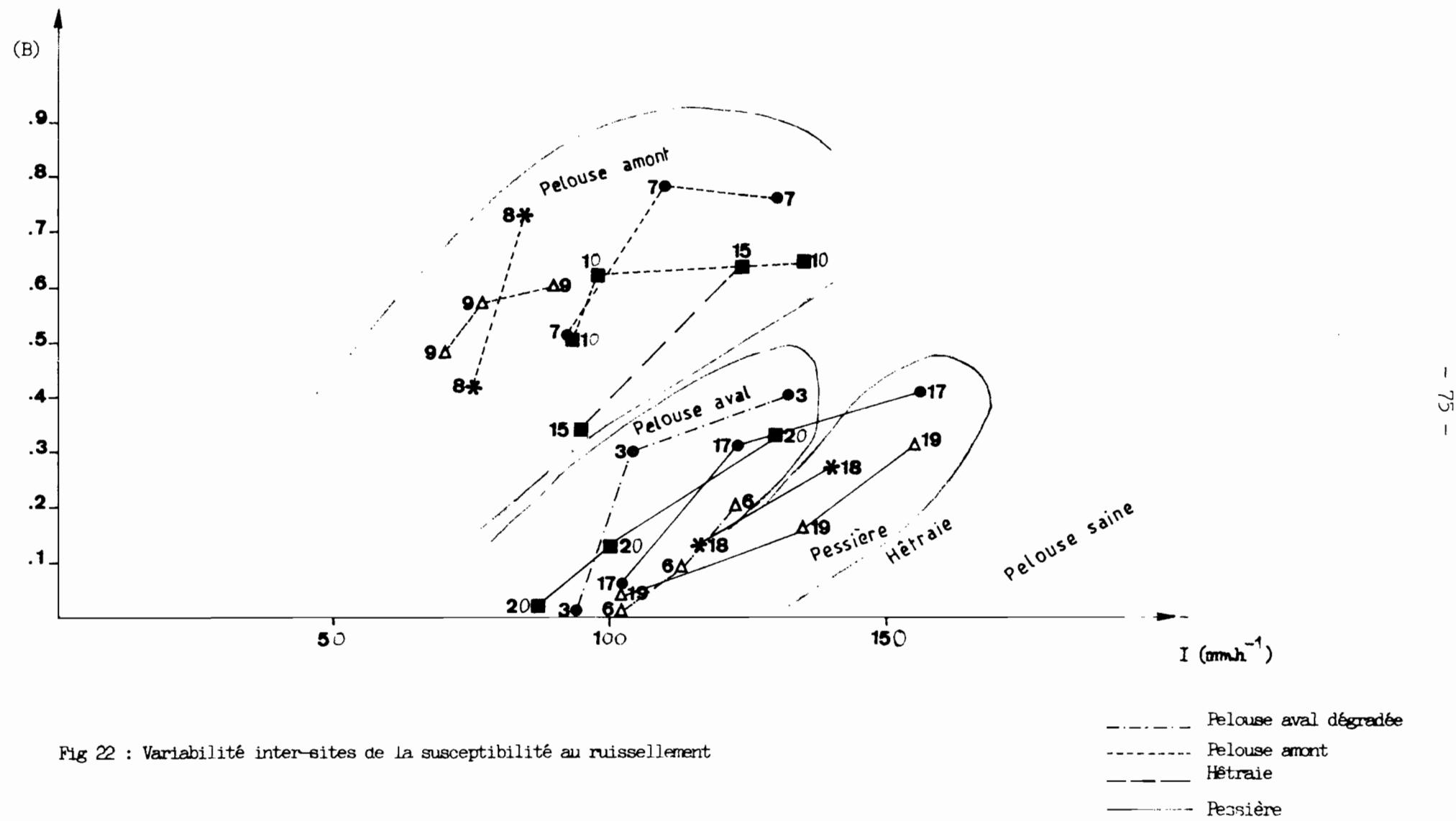


Fig 22 : Variabilité inter-sites de la susceptibilité au ruissellement

La hêtraie vient en dernier, elle n'apparaît pas sur le graphique. Les genêts se situeraient entre la pelouse amont et la pelouse aval. Sur la pelouse aval, le pelouse amont et les genêts, le facteur explicatif essentiel de la variabilité du ruissellement est le taux de couverture végétale et accessoirement le taux de cailloux. Sur la hêtraie et la pessière, le ruissellement est dû à un engorgement de la couverture pédologique. L'état de surface n'intervient pas car les sols sont bien protégés ; la cause de la variabilité étant la pente. La hêtraie ruisselle moins que la pessière, du moins pour une hauteur de pluie de 60 mm et jusqu'à 120 mm, car son sol est plus poreux (60 %) aussi bien en surface qu'en profondeur.

L'intensité de ruissellement maximal, Rx :

Elle est mesurée directement sur le palier de l'hydrogramme. Rx est influencée par l'intensité de la pluie, l'état d'humectation initial du sol, la nature de ce dernier, l'état de sa surface (nature et degré du couvert végétal, cailloux, sol nu etc...), la pente topographique et la rugosité du sol (NASSIF et WILSON, 1975 ; LAFFORGUE et NAAH, 1976 ; ROOSE, 1973).

L'intensité de ruissellement maximal Rx est étroitement liée à l'intensité de la pluie (fig. 23). Rx croît quand I croît (fig. 9 à 12 en annexe). Pour une même intensité de pluie, Rx est d'autant plus faible que le taux du couvert végétal est élevé (pelouse amont et pelouse aval). Sous forêt, Rx semble bien lié à la pente topographique : plus le sol est pentu, plus Rx est élevé.

Le facteur déterminant de Rx semble être le taux du couvert végétal. Mais il y a diverses interactions avec les autres facteurs (temps de ressuyage, état d'humectation initial, pente). Ces derniers facteurs interviennent simultanément, ce qui masque l'expression de chacun d'entre eux.

b/ Les lames ruisselées :

Pour toute parcelle, chaque averse permet de déterminer la relation entre la lame ruisselée et la hauteur de pluie. La courbe qui exprime cette relation peut être assimilée à une droite, la partie incurvée, caractéristique du déficit de saturation du sol en début de pluie étant toujours très brève.

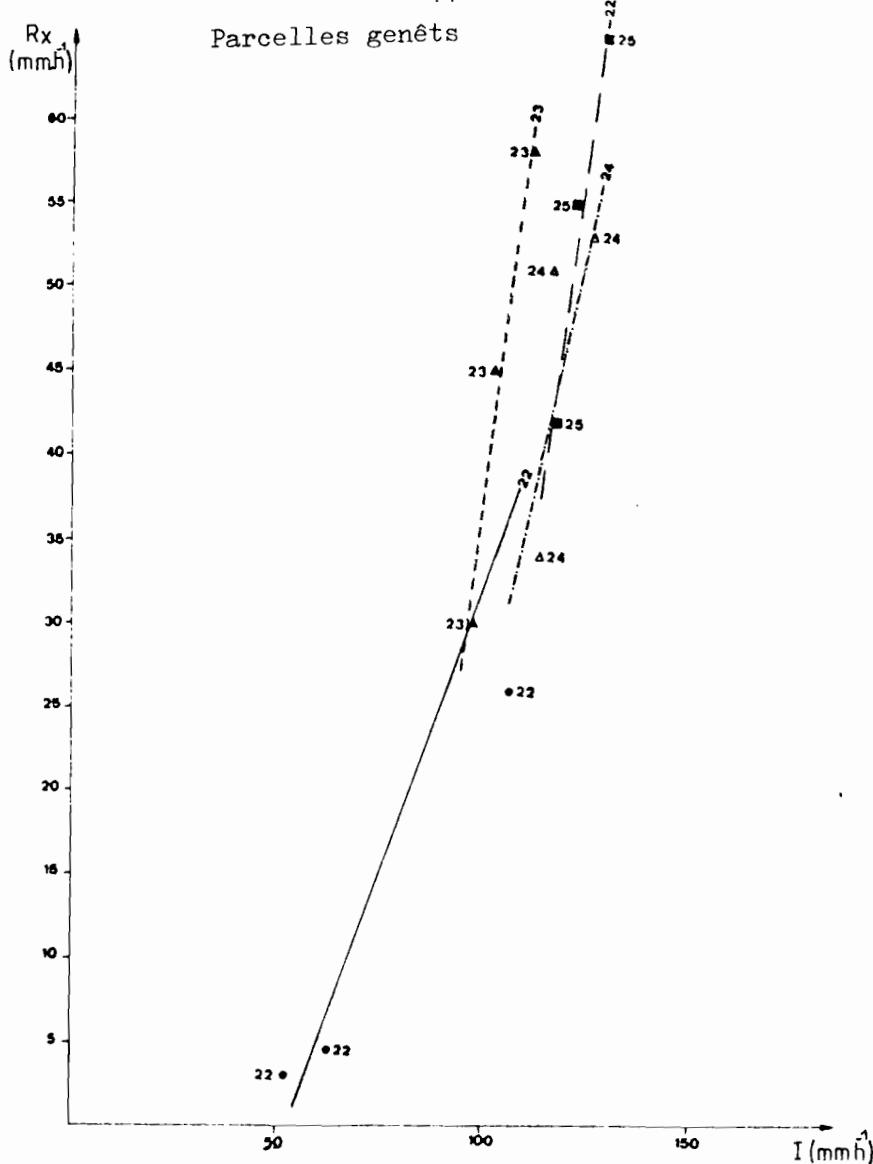


Fig. 23 : Influence de la pluie de l'intensité maximale du ruissellement

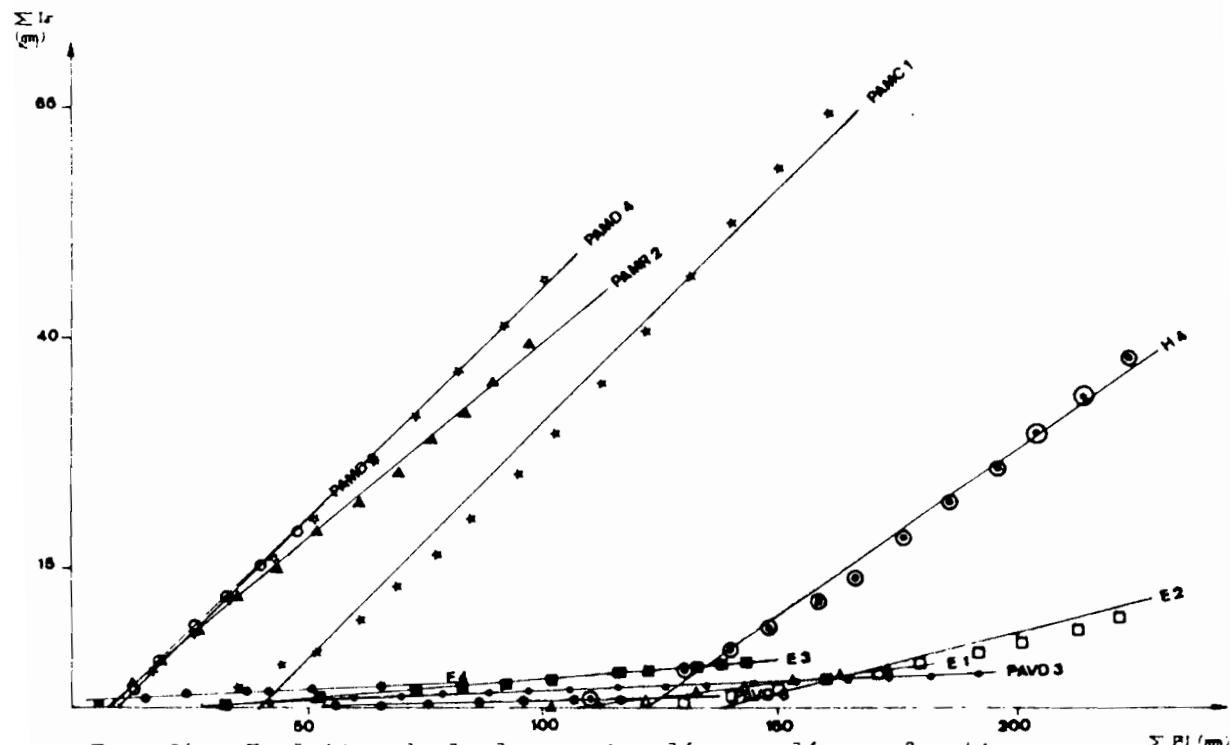


Fig. 24 : Evolution de la lame ruisselée cumulée en fonction de la hauteur de pluie cumulée (1^e aversé)

Les figures 24 à 26 montrent que pour chaque parcelle, la pente de la droite $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$ augmente de la 1^o pluie à la 3^o pluie.

Le tableau 15 montre les coefficients A et B ainsi que le coefficient de corrélation r, des régressions simples de type $y = A + BX$ obtenues entre les lames ruisselées cumulées (ΣLr) et la pluie cumulée (ΣPU).

Le coefficient B, qui correspond à la pente de la droite $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$, est d'autant plus élevé que le ruissellement est important.

- Sur la pelouse aval, le ruissellement semble plus important sur la parcelle PAVd3 et cette variabilité s'explique comme pour KR60 par le plus faible couvert végétal de cette parcelle malgré un faible déficit de saturation; l'influence de la pente est masquée.

- Sur la pelouse amont, le ruissellement augmente de PAMR2 à PAMC1 en passant par PAMd3 et PAMd4. On a la même variabilité que pour KR60, variabilité qui s'explique par le rôle positif des cailloux, combiné au couvert végétal sur la parcelle PAMR2 ; les variations du couvert végétal entre PAMd3 et PAMd4 et la forte humidité initiale (combinée à une forte pente) de la parcelle PAMC1.

- Sur la hêtraie, le ruissellement augmente de H2 et H3 à H1 puis à H4. Ces variations sont très liées à celle de la pente topographique : plus la pente augmente, plus le ruissellement augmente.

- Sur la pessière, la variabilité de la susceptibilité au ruissellement est plus faible et aucun facteur n'arrive à l'expliquer.

Plusieurs remarques peuvent être faites à partir de la figure 24 :

- le ruissellement est très important sur la pelouse amont et la hêtraie à pente très forte (H4).

- dès le déclenchement de celui-ci, on constate 2 types d'évolutions : il croît très légèrement avec la pluie sur la pelouse aval, la hêtraie (faible pente) et la pessière (sauf E2) ; sur la pelouse amont, la hêtraie (forte pente) et (E2), le ruissellement croît très rapidement avec la pluie.

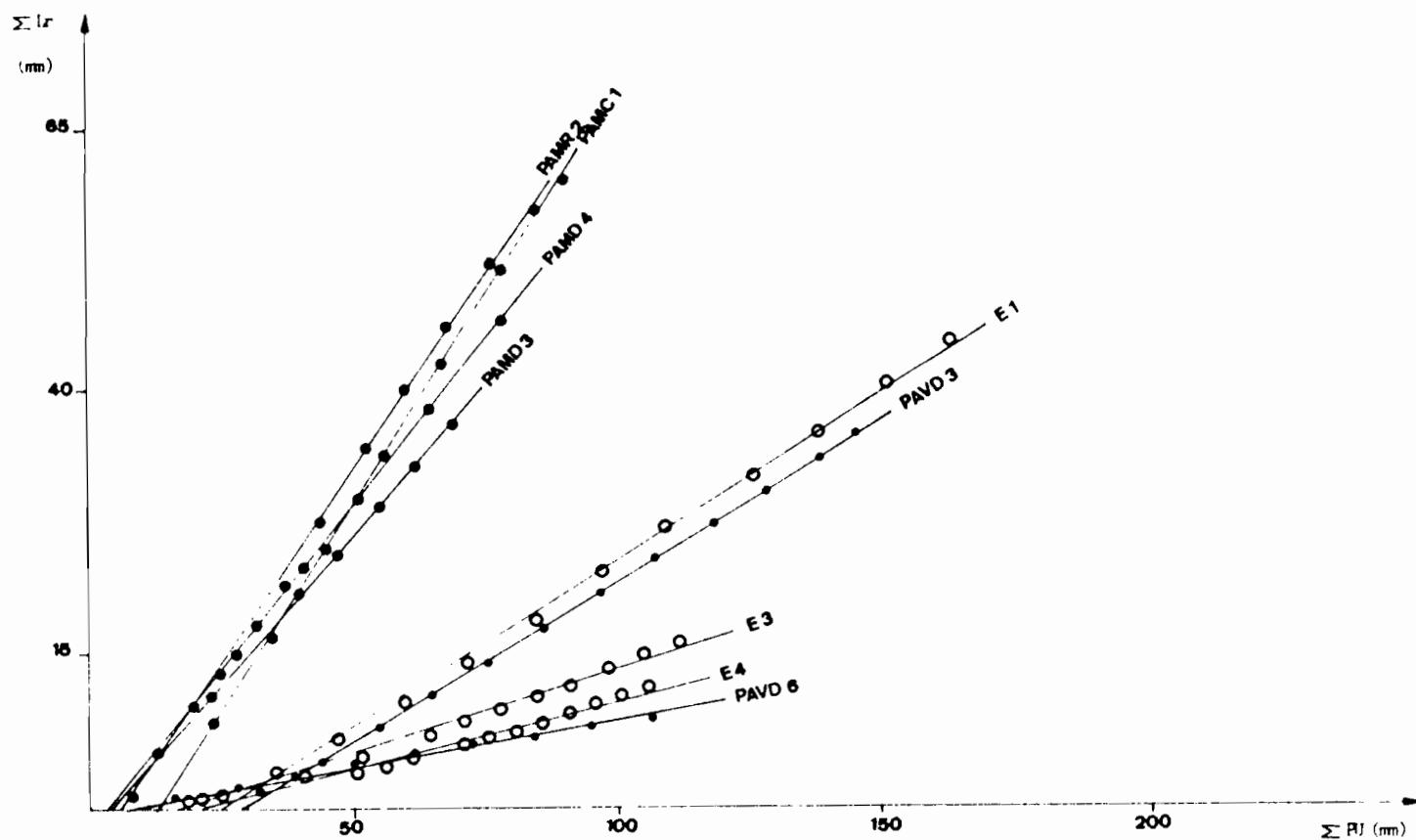


Fig. 25 : Evolution de la lame ruisselée en fonction de la hauteur de pluie cumulée (2° averse)

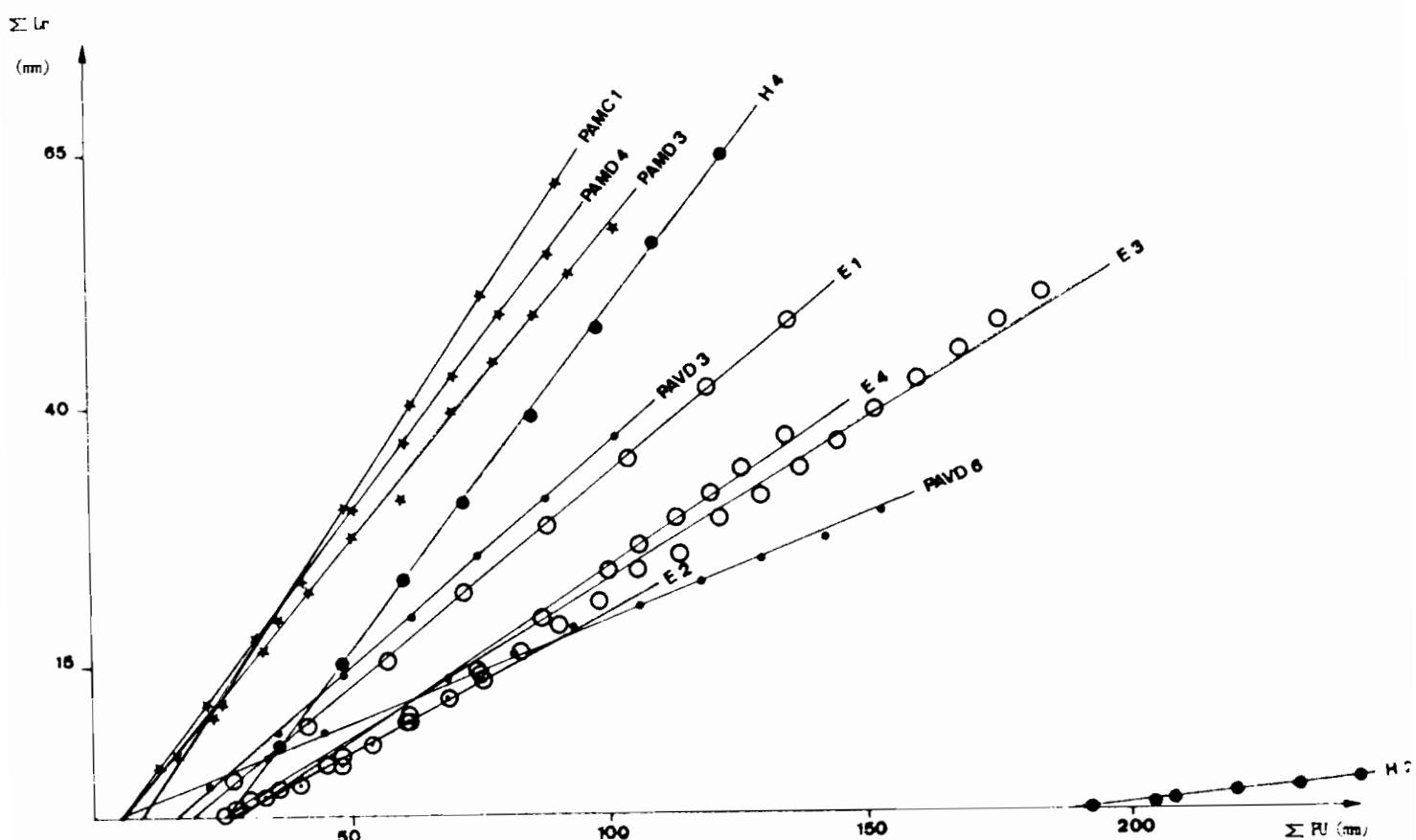


Fig. 26 : Evolution de la lame ruisselée en fonction de la hauteur de pluie cumulée (3° averse)

Tableau 15 : Paramètres expérimentaux des relations

$$\Sigma Lr = A + B \Sigma PU \text{ à la } 1^{\circ} \text{ averse}$$

Code parcelle	A	B	r	n
PAVd3	- 0,19	0,02	0,99	17
PAVd6	- 0,85	0,01	0,99	7
PAMC1	- 37,1	0,51	0,98	27
PAMR2	- 12,6	0,42	0,99	9
PAMD3	- 19,28	0,48	0,99	17
PAMD4	- 40,16	0,50	0,99	13
H1	- 20,68	0,15	0,99	15
H2	- 3,0	0,06	0,99	14
H3	- 3,82	0,06	0,99	6
H4	- 4,69	0,34	0,99	11
E1	- 6,44	0,06	0,99	8
E2	- 17,9	0,13	0,98	19
E3	- 1,0	0,04	0,99	12
E4	0,62	0,02	0,95	10

A la 2^e averse puis à la 3^e averse, les relations entre les lames ruisselées cumulées et la pluie cumulée, sur des sols de plus en plus en plus humides, restent toujours linéaires croissantes (tableau 16). Le coefficient B qui traduit la susceptibilité au ruissellement, augmente de la 1^e à la 3^e averse ; les lames ruisselées augmentent lorsque l'intensité de la pluie croît.

- A la 2^e pluie, la variabilité inter-parcelles est la même que lors de la 1^e pluie pour les parcelles de la pelouse aval. Cette variabilité est liée aux variations du couvert végétal. Au niveau de la pelouse amont, la variabilité reste la même concernant les parcelles dégradées (PAMD3 et PAMD4) comme pour la 1^e pluie. La parcelle PAMR2 qui ruisselait moins que les autres parcelles testées de la pelouse amont lors de la 1^e averse, ruisselle davantage à la 2^e pluie car sa surface a été fortement dégradée lors de la 1^e averse.

Sur la pessière, on note la même variabilité que lors de la 1^o pluie sauf que c'est la parcelle E1 qui ruisselle davantage que E2.

$\Sigma Lr :$ E1 > E2 > E3 > E4
 IH : 342 382 276 179

Mis à part la parcelle E2, la variabilité semble bien liée aux variations de l'indice IH.

- A la 3^o pluie, la variabilité est la même sur la pelouse aval et la pelouse amont, alors que sur la pessière, E4 ruisselle davantage que E3.

Tableau 16 : Coefficients des régressions simples
à la 2^o puis à la 3^o averse

Code parcelle	2 ^o pluie				3 ^o pluie			
	A	B	r	n	A	B	r	n
PAVd3	- 8,80	0,30	0,99	12	- 6,90	0,40	0,99	7
PAVd6	- 0,48	0,09	0,99	11	- 1,10	0,20	0,99	12
PAMC1	-10,26	0,78	0,99	7	- 7,19	0,76	0,99	6
PAMR2	- 4,19	0,73	0,99	10	-	-	-	-
PAMD3	- 2,46	0,57	0,99	9	- 3,55	0,60	0,99	12
PAMD4	- 2,30	0,62	0,99	6	- 3,30	0,65	0,99	9
H4	-14,75	0,64	0,99	9	-	-	-	-
E1	- 7,87	0,31	0,99	12	- 7,90	0,41	0,99	8
E2	- 7,00	0,27	0,99	8	-	-	-	-
E3	- 2,37	0,16	0,99	13	- 8,36	0,31	0,99	20
E4	- 2,61	0,13	0,99	14	- 9,48	0,34	0,99	12

Conclusion :

Le taux de couvert végétal semble être le 1^o facteur en importance dans la variabilité inter-parcelles du ruissellement de telle sorte qu'il masque l'influence du facteur pente et celui de l'état d'humectation initial. Sous hêtraie, du fait de la présence d'une litière forestière qui protège bien le sol, la variabilité du ruissellement semble liée aux variations de la pente topographique, mais d'autres facteurs tels l'abondance et la nature de la matière organique peuvent intervenir. Sur la pessière, la variabilité inter-parcelles est faible.

2.4.4.3 - Intensité de pluie limite (I_1)

L'intensité de pluie limite est l'intensité nécessaire et en dessous de laquelle il ne peut y avoir de ruissellement. Elle peut être déterminée :

- soit graphiquement : c'est l'intersection de la droite $FN = f(I)$ avec la droite $FN = I$
- Soit à partir des coefficients A et B des régressions du type :

$$FN = A + BI \quad \text{avec} \quad I_1 = \frac{A}{1 - B}$$

Le tableau 17 montre que c'est sur la pelouse amont et à un degré moindre les genêts, que les risques de ruissellement sont importants. Sur la pelouse amont, les risques de ruissellement sont permanents ; des pluies de 40 mm.h^{-1} ($I_1 = 40 \text{ mm.h}^{-1}$) pendant 8 mn sont très courantes et peuvent survenir plusieurs fois dans l'année.

- Sur les genêts, il faut une intensité minimale de 70 mm.h^{-1} pendant 4 mn pour déclencher le ruissellement ; de telles averses peuvent se produire une fois tous les 5 ans (cf courbes intensité x durée x fréquence) pendant 15 mn ; elles sont largement suffisantes pour engendrer du ruissellement.
- Sur la pelouse aval dégradée et la pessière, il faut des intensités de l'ordre de 90 mm.h^{-1} pendant au moins 20 mn pour déclencher le ruissellement.

De telles intensités sont de fréquence quinquennale.

- Sur la hêtraie, I_1 n'est pas connu (pas de ruissellement lors des 2 premières averses) ; elle devrait être supérieure à 90 mm.h^{-1} et de fréquence 1/5.

Tableau 17 : Intensité de pluie limite et fréquence de retour

	I_1 en mm.h^{-1}	Fréquence de retour
Pelouse aval dégradée	90	1/5
Pelouse amont	40	annuelle
Hêtraie	-	-
Pessière	92	1/5
Genêts	72	1/5

Ces résultats montrent bien que pour une averse donnée, les bassins ne vont pas ruisseler en même temps, mais ce sont plutôt les parties les moins couvertes, les plus dégradées, les plus engorgées (tourbières, mouillères), les plus pentues et les plus humides (bas de pente) qui vont ruisseler les premières conformément à la théorie Partial Contribubing Area (COSANDEY, 1983). Mais ce ruissellement peut être repris et piégé dans d'autres parties des bassins non encore saturées ; il n'atteindra pas directement la rivière ([cloutasse]). Le ruissellement à l'échelle du bassin versant, sera donc inférieure à celui qu'on observe à la parcelle (tableau 18).

Une cartographie précise des états de surface des bassins, jointe à une expérimentation au simulateur de pluie permettrait de modéliser le ruissellement sur les bassins. ALBERGEL, CASENAVE et VALENTIN, au Burkina-Faso, ont abouti à un modèle de reconstitution des lames ruisselées à partir d'une cartographie détaillée des états de surface et d'une expérimentation au simulateur de pluie.

Tableau 18 : Comparaison du ruissellement sur bassins versants et parcelles expérimentales

Bassin versant	PU mm	Lame ruisselée BV	Lame ruisselée parcellee 1 m ²
Cloutasses	97	5,5	7,0
	157	8,5	12,7
Latte	60	1,6	2,0
	260	34,0	40,5

Nos résultats montrent que l'on peut classer les bassins vis à vis de leur susceptibilité au ruissellement comme suit (fig. 22) :

- 1/ la pelouse dégradée
- 2/ la pessière
- 3/ la hêtraie
- 4/ la pelouse saine

Conclusion

Il y a interaction de plusieurs facteurs liés au sol et à la végétation sur les variables de ruissellement et d'infiltration. Mais ces derniers semblent essentiellement contrôlés par l'intensité de la pluie et l'état d'humectation du sol.

Il semble qu'il n'y a pas de ruissellement si l'intensité des pluies est inférieure à :

90 mm.h⁻¹ sous la pelouse aval dégradée

40 mm.h⁻¹ sous la pelouse amont

92 mm.h⁻¹ sous la pessière

Mais la variabilité entre les parcelles semble bien liée aux variations du taux du couvert végétal ; ce dernier semble être le premier facteur en importance explicatif du ruissellement. Son importance est telle que l'influence de facteurs comme la pente et l'humidité du sol se trouve masquée.

Sous forêt, où le couvert végétal est uniforme et où la litière protège uniformément le sol, la pente topographique semble favoriser le ruissellement.

2.4.4.4 - L'infiltration

A/Généralités

La répartition de la pluie entre infiltration et excès d'eau dépend :

- de l'intensité de la pluie
- des gradients de potentiel dans le sol et de leur évolution au cours de la pluie
- de l'évolution de la structure de la surface du sol (organisations pelliculaires superficielles, tassement).

Considérons un sol homogène non saturé et K_s sa conductivité hydraulique à saturation. Supposons que la surface du sol ne se dégrade pas (ce qui n'est pas le cas des sols nus). A chaque instant, la surface du sol présente une certaine infiltrabilité (fig. 27) définie par HILLEL (1974) comme le flux maximum qu'elle peut absorber lorsqu'elle est maintenue au contact avec l'eau, à la pression atmosphérique. L'infiltrabilité tend vers K_s au fur et à mesure que diminuent les gradients de succion.

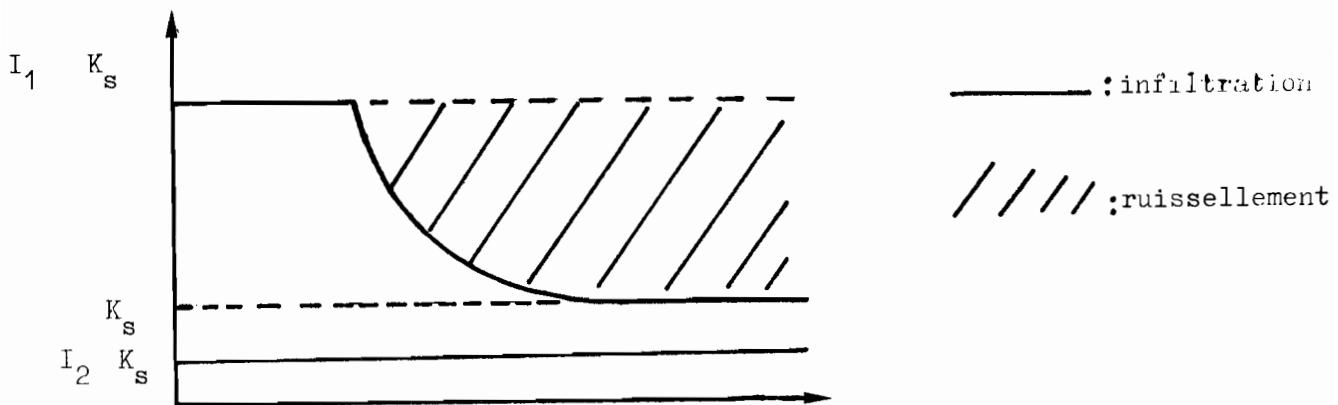


Fig. 27 : évolution de l'infiltrabilité en fonction du temps

Plusieurs modèles décrivent l'évolution de l'infiltrabilité en fonction du temps : Citons la loi de PHILIP (1969)

$$i = \frac{1}{2} St^{-1/2} + K \quad (1)$$

avec i = infiltrabilité

S = sorptivité : paramètre qui traduit l'évolution de la succion matricielle et de la conductivité et dépend de l'état d'humidité initial et de la constitution du sol

K = constante ($K \approx K_s$)

Plusieurs auteurs ont utilisé ce modèle dont HANKS et LARSON (1964). Une autre formulation rend compte analytiquement de la loi de décroissance de l'infiltration depuis une valeur initiale F_0 relativement élevée, jusqu'à une valeur minimale F_N : c'est la loi exponentielle de HORTON (1940) :

$$F(t) = F_N + (F_0 - F_N) e^{-Kt} \quad (2)$$

avec K : constante pour des conditions initiales données

t : temps écoulé depuis le début de la pluie

Ce modèle a été appliqué, entre autres, par LAFFORGUE (1977). Le modèle le plus utilisé est celui de GREEN et AMPT (1911) (AHUJA, 1973 ; AHUJA, Dangler et EL-SWAIFY, 1976).

$$F(t) = K_s (1 + \Psi_f - \frac{\Delta_i}{P_U}) \quad (3)$$

Ce modèle suppose que :

- le potentiel matriciel (Ψ_f) reste constant quelque soit la position du front d'humectation
- la surface du sol est humectée uniformément et sa conductivité hydraulique reste constante.

B/ L'intensité d'infiltration minimale (FN) :

Elle est déterminée, tout comme R_x , sur le palier de l'hydrogramme par différence entre l'intensité de la pluie et l'intensité de ruissellement maximal (R_x).

$$F_N = I - R_x, \text{ en } mm.h^{-1}$$

a - Influence de l'intensité de la pluie sur FN :

D'après FOURNIER (1960), WISCHMEIER (1958), KIRKBY et MORGAN (1980), FEODOROFF (1965), l'intensité de la pluie détermine les modalités de l'infiltration de l'eau dans le sol et le refus d'absorption. NASSIF et WILSON (1975), LAFFORGUE et NAAH (1976), COLLINET et VALENTIN (1979-1982) ont montré que F_N est une fonction croissante de l'intensité de la pluie. LAFFORGUE (1977) estime que l'infiltration en chaque point d'une surface homogène (sols plans, lissés), dépend du déficit de saturation du sol et est indépendante de l'intensité de la pluie : F_N doit rester constante et égale à la conductivité hydraulique saturée (K_s). Mais pour une surface hétérogène (forte rugosité due au travail du sol, couvert végétal, affleurement d'éléments grossiers, fissuration, activité mésofaunique),

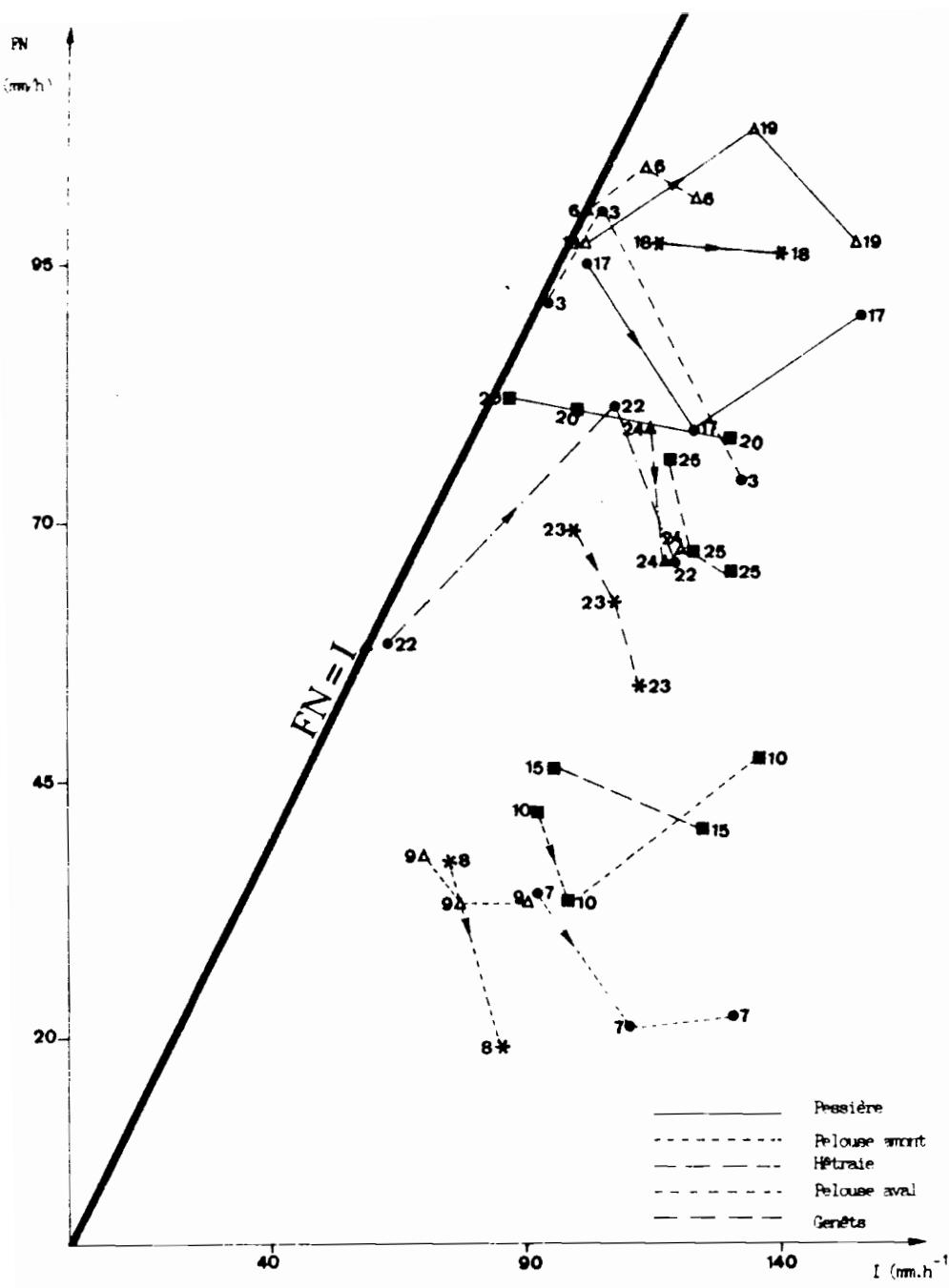


Fig. 28 : Evolution de FN en fonction de l'intensité de la pluie

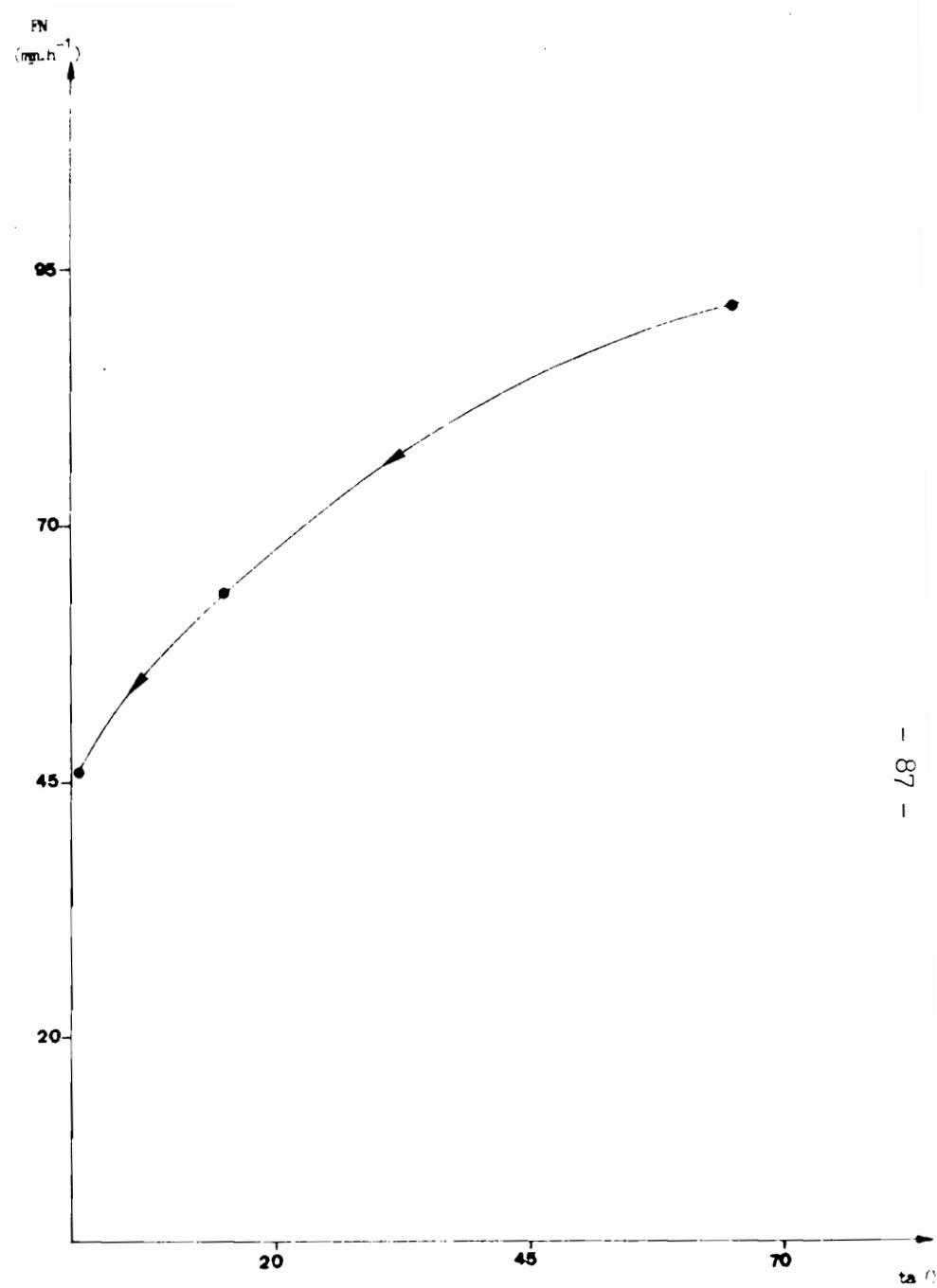


Fig. 29 : Evolution de FN en fonction de ta
(parcelle PAVa3)

les valeurs de FN varient d'un point à un autre ; lorsque l'intensité de la pluie augmente, le nombre de points pour lesquels $I > K_s$ augmente également et par conséquent la fonction $FN = f(I)$ est croissante.

La figure 28 représente l'évolution de FN en fonction de l'intensité de la pluie. Les relations $FN = f(I)$ sont :

- croissantes : PAVC2 et PAVC4 ; H2 et H3
- constantes : PAVd6 ; PAMd3 ; E2 et E4

- ou décroissantes : PAVd3 ; H1 et H4 ; PAMC1 et PAMR2 ; G2 et G2 bis
Ce dernier comportement est le plus fréquent ; parfois, il se manifeste seulement pour les 2 dernières averses (E3, G1). D'après TREVISAN (1986) et RAHELIARISOA (1986), ce comportement résulte d'une modification des caractéristiques de l'horizon de surface sous l'influence de l'effet "splash" et du ruissellement au cours des averses. Quand celles-ci sont produites à intensités croissantes, la diminution de FN quand I croît résulte de la diminution de la conductivité hydraulique de cet horizon par battance, tassement ou autre cause (RAHELIARISOA, 1986). En Lozère, il semble qu'il s'agit soit d'un tassement (l'indice de rugosité est plus faible à la fin de l'essai), soit d'une troncature de l'horizon de surface mettant à nu un horizon moins perméable.

b - Influence de l'état d'humectation du sol sur l'intensité d'infiltration FN :

On peut remarquer à partir des tableaux 8 et 9 que l'intensité d'infiltration FN est relativement élevée à la 1^e averse sur un sol relativement plus sec et ceci sur pratiquement toutes les parcelles. Mais pour mettre en évidence cette influence, il faut tenter de dissocier l'action simultanée de l'intensité de la pluie et du temps de ressuyage (ta). Le protocole prévoit des temps de ressuyage de 30 mn entre 2 averses successives et l'influence du ta est masquée par l'augmentation de l'intensité de la pluie. C'est seulement sur 2 parcelles (PAVd3 et PAVd6) que l'on dispose de plusieurs ta, à intensité plus ou moins égale. La figure 29 montre que pour une intensité de pluie donnée, plus la durée du temps de ressuyage est prolongée, plus l'indice IH est faible, plus le sol est sec et plus l'intensité d'infiltration est élevée.

Ceci concorde avec les observations faites par LAFFORGUE et NAAH (1976) ; LAFFORGUE (1977) ; COLLINET et VALENTIN (1979-1982) ; VALENTIN (1981) et TREVISAN (1986). En fait, FN diminue quand IH est élevé et le sol est humide et cette diminution de FN serait beaucoup plus liée à une modification des caractéristiques de l'horizon de surface que de l'humidité du sol car FN n'intègre pas la phase d'imbibition dans sa détermination. FN sera atteint beaucoup plus rapidement lorsque le sol

c - Rôle de la couverture végétale dans l'infiltration :

Les travaux menés sous forêt dense équatoriale en Guyane (BOULET, HUMBEL et LUCAS (1982)) et en Côte d'Ivoire (CASENAVE, GUIGEN et SIMON (1982)) ; COLLINET (1984) montrent l'influence prépondérante des organisations internes de la couverture pédologique sur les écoulements. En effet l'infiltration est facilitée sous forêt par l'existence d'une macroporosité ouverte en surface, sous la litière. Celle-ci assure avec les plantes de sous-bois et le chevelu racinaire une protection efficace contre l'impact des gouttes de pluie (ou des grosses gouttes qui tombent de la voûte forestière). Les réorganisations superficielles se trouvent limitées ou résultent d'autres mécanismes que la désagrégation sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie. L'uniformité du couvert végétal, le faible développement des réorganisations pelliculaires en surface, favorisent la pleine expression des propriétés hydrodynamiques internes des sols sur le ruissellement : celui-ci résulte le plus souvent d'un débordement de nappe, suite à la saturation de la couverture pédologique, ou de phénomènes d'engorgement suite à la présence d'un niveau imperméable dans le profil. L'écoulement latéral se développe entre le sol et la litière et est continuellement freiné par les aspérités du sol et piégé par les trous laissés par les racines pourries et la faune (ROOSE, 1980).

Dans le contexte montagnard tempéré du Mont-Lozère, on retrouve une capacité d'infiltration très élevée dans les parties boisées et les parties de pelouse saine. Ce n'est que dans les zones dégradées (sur-pâturage, chemins, zones ravinées à sol nu) que l'infiltrabilité diminue beaucoup et que l'on voit les ruissellements superficiels prendre une importance notable en cas de fortes averses, même sur sols filtrants.

Le ruissellement dépend à la fois du milieu physique du sol, des conditions écologiques (qualité et quantité du recouvrement végétal) et de la succession des averses (temps de ressuyage). Sur les bassins versants du Mont-Lozère, le ruissellement a probablement lieu en automne et au printemps (saisons de forte pluviosité) suite à une succession d'averses rechargeant le sol d'où l'influence majeure des engorgements du profil et localement des surfaces dégradées.

La prévision de l'aptitude au ruissellement d'un bassin devra résulter d'une étude fine des états de surface et de leurs variations dans l'espace et dans le temps ou d'une étude pédologique détaillée s'il s'agit d'un milieu forestier.

Conclusion

Il semble qu'il n'y a pas de relation stable permanente entre l'intensité d'infiltration FN et l'intensité de la pluie. Mais plusieurs facteurs sont à prendre en considération dans ces essais : l'intensité de la pluie, mais aussi la hauteur de pluie ainsi que l'humidité du sol et de la modification progressive des structures superficielles. On peut dire que dans tous les cas, FN est très élevée sous forêt de hêtres et d'épicéas ainsi que sous pelouse saine.

2.4.5 - Etude de la variabilité des paramètres hydraulodynamiques : cas des parcelles nues :

Sur chaque site, une parcelle a été piochée à la houe sur une profondeur de 20 cm. Ces parcelles servent à tester la variabilité du sol "inter-végétation" indépendamment du couvert végétal au sens strict. Mais la préparation des parcelles n'a pas été réussie sur la pelouse amont (PAMn5) où on a pioché le sol sans dégager le couvert végétal, ce qui a entraîné un enfouissement de l'herbe dans la couche remuée, ainsi que sur la pessière où l'élimination de la litière d'aiguille d'épicéas n'est pas évidente : après le piochage 75 % de la parcelle est toujours recouverte d'aiguilles d'épicéas.

2.4.5.1 - La hauteur de pluie d'imbibition

Elle est nettement plus faible à la 2°, puis à la 3° averse qu'à la 1° averse . L'explication de la diminution de Pi d'une averse à l'autre est le temps de ressuyage (ta) ou l'indice IH, et l'humidité initiale (qui augmente quand ta diminue). Elle peut aussi être due à l'effet de compaction du sol sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie (compaction ou tassement qui s'accentue de la 1° averse à la 3° averse entraînant une diminution de Pi).

La variabilité de Pi entre les parcelles semble liée aux variations de la pente (Pi serait d'autant plus élevée que la pente est forte) mais on ne pense pas que la pente puisse être le facteur explicatif de cette variabilité car au contraire la pente diminue Pi car l'effet positif de la rugosité diminue (tableau 19). Par contre cette variabilité s'explique bien par le taux de matière organique qui confère au sol une meilleure stabilité structurale. La parcelle En5 ne doit sa forte Pi qu'à son taux élevé de couvert d'épicéas.

Tableau 19 : Variations de Pi en fonction des types de site

	Pi _{mm}	Pente %	M.O %
En5	138	14	11
Hn5	64,0	12	15
PAVn5	58,5	7	9

Conclusion

Les valeurs de Pi sont très importantes comparées à celles sur parcelles non piochées (sauf en ce qui concerne la hêtraie). COLLINET et LAFFORGUE (1979) montrent que le labour crée une macroporosité importante et favorise l'infiltation mais la permanence de son effet dépend de la stabilité structurale des mottes créées en surface (donc de la teneur en matière organique). ROOSE (1973-1976) montre que sur sol ferralitique sablo-argileux d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire) un labour à la houe sur 15 cm de profondeur peut absorber des pluies allant jusqu'à 80 mm. BURWELL et LARSON (1969) ont remarqué le retard apporté au démarrage du ruissellement suite au labour et selon eux, ce retard dépend plus de la rugosité de la surface du sol que de la profondeur de sol remué. Dans le cas des sols nus du Mont-Lozère, il semble bien que Pi est beaucoup plus liée à la stabilité structurale du sol consécutive à la teneur en matière organique.

2.4.5.2 - Le ruissellement

Les représentations des lames ruisselées cumulées en fonction de la pluie cumulée s'ajustent selon une fonction linéaire du type $\Sigma Lr = A + B \Sigma Pu$ (fig. 30, 31 et 32).

Le tableau 20 représente les paramètres expérimentaux de ces relations.

Tableau 20 : Paramètres expérimentaux des relations

$$\Sigma Lr = A + B \Sigma PU$$

code parcelle	1° averse				2° averse				3° averse			
	A	B	r	n	A	B	r	n	A	B	r	n
PAVn5	-13,10	0,17	0,98	12	-2,28	0,63	0,99	7	-2,13	0,78	0,99	8
Hn5	-19,26	0,20	0,98	15	-6,54	0,42	0,99	5	-7,10	0,42	0,99	6
En5	-19,72	0,13	0,99	15	-8,00	0,29	0,99	5	-8,74	0,33	0,99	7

- A la 1° averse, les parcelles peuvent être classées selon un ordre de susceptibilité au ruissellement décroissant : Hn5 > PAVn5 > En5

- Mais à la 2° averse puis à la 3° averse le classement est le suivant :
PAVn5 > Hn5 > En5

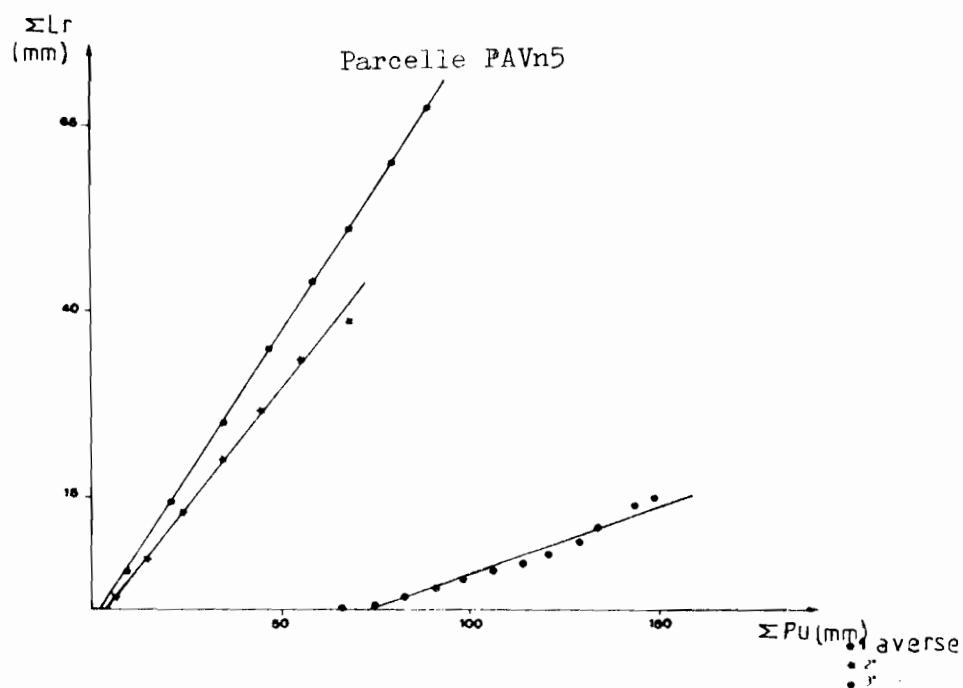


Fig. 30 : Evolution de la lame ruisselée en fonction de la hauteur de pluie cumulée

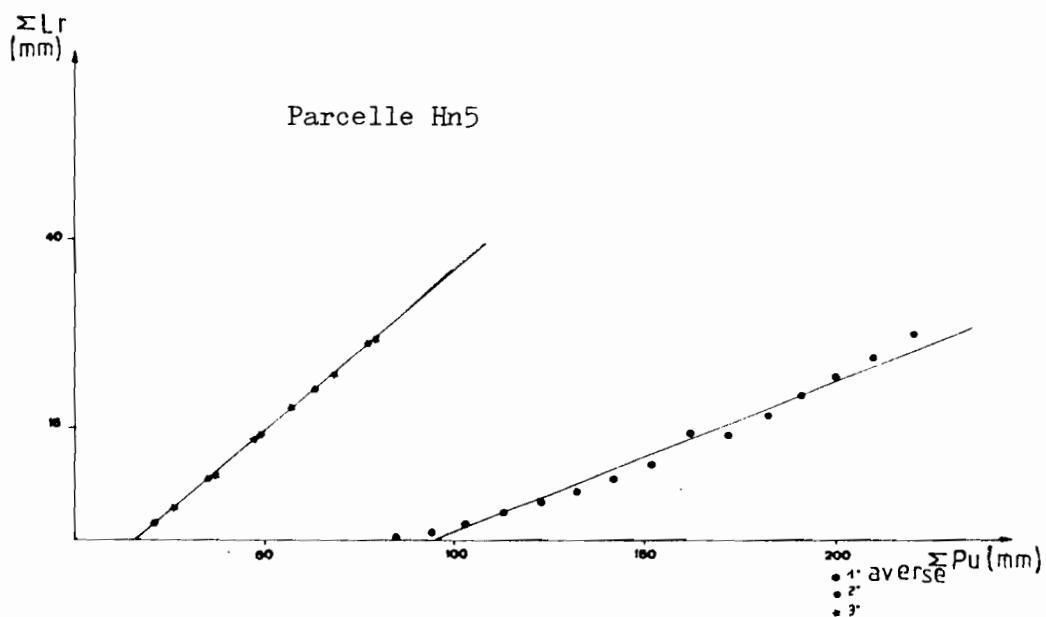


Fig. 31 : Evolution de la lame ruisselée en fonction de la hauteur de pluie cumulée

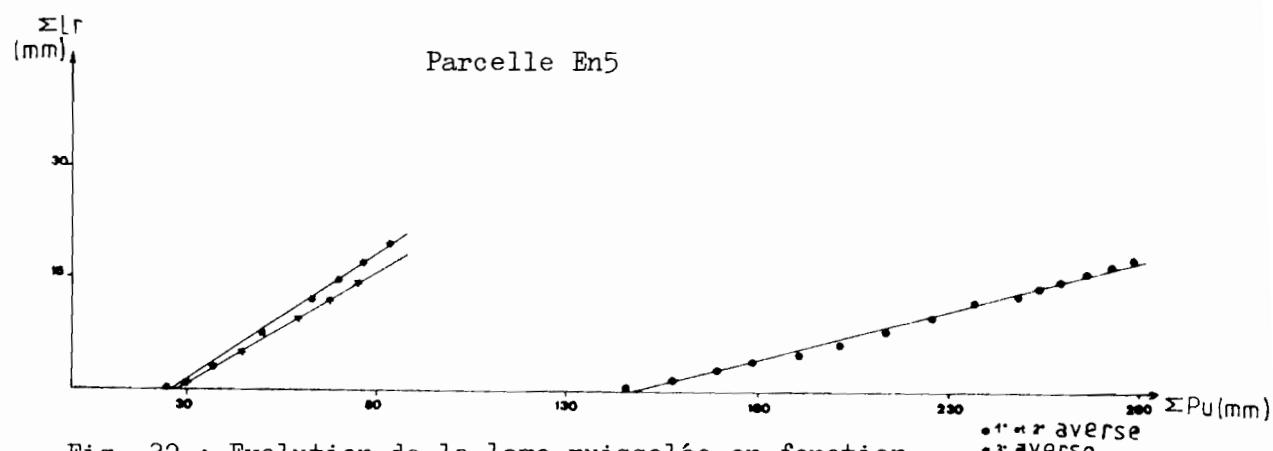


Fig. 32 : Evolution de la lame ruisselée en fonction de la hauteur de pluie cumulée

Cette variabilité de la susceptibilité au ruissellement des parcelles semble liée à la teneur en matière organique ; le sol de la hêtraie étant mieux structuré. Le taux d'aiguilles d'épicéas (75 %) explique la faible susceptibilité au ruissellement de la parcelle En5. Cette variabilité est aussi liée aux variations de la pente topographique, une pente faible favoriserait le ruissellement ce qui peut paraître surprenant, car on pense généralement que le ruissellement coïncide avec la pente. En fait, les relations ruissellement-pente sont mal connues contrairement aux relations érosion-pente. HUDSON (1957) avait émis l'idée selon laquelle, au-delà de 2 % de pente, le ruissellement n'augmente pas forcément avec la pente, contrairement aux transports solides. LAL (1975) constate sur des parcelles nues près d'Ibadan, au Nigéria, qu'il n'y a pas de différence significative du ruissellement sur des pentes variant de 1 % à 15 % ; d'après lui, cela tient aux variations des propriétés hydrodynamiques des sols tout au long du versant. YAIR et KLEIN (1973) affirment qu'il n'y a pas de relation claire entre la pente et le ruissellement alors que MOLDENHAUER, LOVELY, SWANSON et CURRENCE (1971) pensent que la pente a un faible effet sur le ruissellement. ROOSE (1973) explique les relations ruissellement-pente comme suit :

- sur faible pente, le ruissellement n'a pas assez d'énergie pour déplacer en suspension toute la terre désagrégée par la battance des gouttes de pluie ; les sables se trainent donc à la surface du sol, en colmatent les pores et accélèrent la formation d'une pellicule de battance peu perméable.
 - Sur pente forte au contraire, le ruissellement a une énergie suffisante, non seulement pour transporter toutes les particules détachées, mais aussi pour décaper le fond des rigoles et cisailler les surfaces inter-rigoles : les pores restent donc ouverts et le ruissellement est moins important que sur des pentes faibles.
- POESEN (1984) montre, à partir d'expérimentations au laboratoire à l'aide de la simulation de pluie, que le coefficient de ruissellement pour une pente de 2° était de 15,5 % plus important que pour une pente de 15° (initialement, l'humidité du sol doit être à la capacité au champ). Cette relation négative entre le ruissellement et la pente s'explique selon lui, par les modifications des propriétés de la surface au sol, causées par le développement de l'érosion sur des pentes plus raides ; ainsi l'intensité de la battance du sol au cours d'une averse décroît avec la pente.

Dans notre cas, nous ne pensons pas que la pente soit le facteur explicatif du ruissellement mais plutôt à la stabilité structurale de la surface du sol et à sa teneur en matière organique.

Le coefficient de ruissellement (KR60) et l'intensité maximale de ruissellement (Rx) donnent à peu près les mêmes indications : KR60 et Rx croissent avec l'intensité de la pluie et

2.4.5.3 - L'intensité d'infiltration minimale (FN)

Les relations FN - I sont : (tableau ci-dessous) :

- positives pour la hêtraie et la pessière
- négatives pour la pelouse aval.

Les relations négatives de FN = f(I) seraient dues à une dégradation ou un décapage des horizons perméables des sols labourés sous pelouse, moins riches en matière organique et en débris végétaux stabilisants.

Tableau 21 : Evolution de FN en fonction de I

code parcelle	FN (mm/h)	I (mm/h)
PAVn5	60	79
	33	102
	22	105
Hn5	69	96
	82	142
	60	102
En5	> 103	103
	98	117
	104	150
	83	130

On voit que pour les 3 averses, FN est plus élevée sur la pessière que sur la hêtraie et la pelouse aval :

$$\text{En5} > \text{Hn5} > \text{PAVn5}$$

La forte infiltrabilité de En5 est due à la présence d'aiguilles d'épicéas (75 %) qui dissipent l'énergie des gouttes de pluie et augmentent ainsi l'infiltration. Par contre, la variabilité de FN entre la pelouse aval et la hêtraie semble liée à la teneur en

matière organique et donc à la stabilité structurale du sol ou alors à un décapage de la couche humifère superficielle qui serait peut-être plus fragile sous pelouse que sous forêt.

Le tableau 22 représentant les intensités limites de pluie pour déclencher le ruissellement montre bien que le labour entraîne à long terme une diminution de l'infiltérabilité par suite des modifications structurales de la surface du sol sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie (tassemement de la surface du sol caractérisé par la diminution de la rugosité à la fin de l'essai, ou décapage de l'horizon perméable).

L'intensité limite passe de 90 à 70 mm.h⁻¹ sous pelouse aval et de 100 à 44 mm.h⁻¹ sous hêtre. Sous pessière, I_l reste stable ; le labour combiné à une bonne couverture du sol (75 % d'aiguille d'épicéa) n'aurait pas subi de modifications structurales .

Tableau 22 : Comparaison de l'intensité limite entre les parcelles labourées et les parcelles non labourées

I _l en mm.h ⁻¹		
code parcelle	parcelles labourées	parcelles non labourées
PAVn5	71	90
Hn5	44	100
En5	93	92

La diminution de l'infiltérabilité sur les parcelles labourées par rapport aux parcelles non labourées serait dûe à des phénomènes de dégradation de la surface du sol, exposée aux aléas climatiques (et surtout à l'impact de l'énergie cinétique des gouttes de pluie) et notamment à un tassemement de la surface du sol ; ce dernier serait plus accentué sous pelouse (24 %) que sous hêtre (1 %). Ce tassemement serait donc en rapport avec la teneur en matière organique du sol.

MANNERING (1967) notait que l'énergie cinétique des gouttes de pluie, dissipée à la surface du sol, est le facteur principal dans la dégradation de l'état de surface du sol. Une diminution de l'infiltérabilité sur des sols nus a été observée par HILLEL (1960), schmidt et al (1964), EDWARDS et LARSON (1969), FALAYI et BOUMA (1975) et SHARMA (1980).

Il serait hasardeux de généraliser, car ces résultats ne sont acquis que sur 3 parcelles dont une exception (En5).

2.5 - Les transports solides :

Les travaux expérimentaux concernant l'érosion se résument classiquement à 2 modalités principales (ELLISON, 1957 ; FEODOROFF, 1963 ; KIRKBY, 1980) : le rejaillissement des particules solides lors de l'impact des gouttes de pluie, et le transport par le ruissellement.

Le rejaillissement par le "splash" a été mesuré par de nombreux auteurs dont BOLLING (1975-1983) et FREE (1966-1968). Avec la méthode de simulation de pluie, on ne mesure que la naissance du ruissellement et de sa charge solide (l'érosion que l'on mesure intègre aussi bien la détachabilité par le "splash" que par la lame ruisselante). On parlera plutôt de transports solides (érosion en nappe) ou de débits solides, car sur 1 m², le ruissellement ne peut avoir beaucoup d'énergie érodante (en réalité, on observe un début d'érosion en griffe remontante, entre 2 mottes par exemple). La vitesse de l'écoulement a été mesurée pendant la phase du régime transitoire (VALENTIN, 1981) : les valeurs varient entre 2 et 6 cm/s, et sont largement en dessous du seuil de vitesse d'écoulement nécessaire pour pouvoir détacher ne serait-ce que les particules les plus vulnérables (sables fins) (HJULSTROM, 1935).

Le bilan pondéral des transports solides n'est déterminé que par des observations discontinues tout au long de l'essai de simulation : on mesure à intervalles réguliers la charge solide résultant de l'arrachement des particules au contact des gouttes de pluie, ou des particules déjà mobilisées sur place par l'averse précédente, qui est transportée par les eaux de ruissellement et évacuée à l'exutoire. Comme les eaux de ruissellement recueillies pendant les essais de Lozère étaient relativement claires (les sols étant bien couverts), on n'a pris que quelques échantillons assez espacés dans le temps. On détermine ainsi une concentration moyenne pour chaque averse et le produit de cette concentration par le volume ruisselé nous donne les transports solides en g.m⁻².

2.5.1 - Les parcelles non labourées (sous litières) :

2.5.1.1. - La turbidité des eaux de ruissellement

La charge solide moyenne, appelée aussi turbidité est très faible, de l'ordre de 10 mg.l⁻¹; elle varie sur toutes les parcelles, de 20 à 30 mg.l⁻¹ sauf sur la ravine (PAMR2). Mis à part les parcelles E3 et E4, la turbidité diminue quand l'intensité de la pluie augmente

ou bien elle reste indépendante de l'intensité de la pluie ; ce qui peut s'expliquer par une diminution de l'effet "splash" suite à une augmentation de la lame ruisselante qui dilue la concentration (COLLINET et LAFFORGUE, 1979).

2.5.1.2 - Les transports solides ou débits solides

Tout comme la turbidité, les débits solides sont très faibles sur les bassins ($< 3 \text{ g.m}^{-2}$ pour une hauteur de pluie de 60 mm, d'intensité $\geq 90 \text{ mm.h}^{-1}$). Seule la parcelle PAMR2 se détache de l'ensemble à cause probablement de son très fort taux de sol nu, ainsi que la parcelle PAMd3 à cause de sa forte susceptibilité au ruissellement.

La figure 33 permet de classer les parcelles par ordre décroissant de la susceptibilité à l'érosion :

- PAVd3 > PAVd6
- PAMR2 > PAMd3 > PAMd4 > PAMC1
- H4 > H1 > H2
- E3 > E4 > E2 > E1
- G2 > G1

Sur la pelouse aval, la pelouse amont (exceptée la parcelle PAMd3), et les genêts, la variabilité des transports solides est très liée aux variations de la densité du couvert végétal. Plus le couvert végétal est dense, plus les transports solides sont faibles (cf tableau 7). L'interception de l'énergie cinétique des gouttes de pluie par le couvert végétal réduit de façon très significative les pertes en terre. Sur la hêtraie et la pessière (sauf E1), la variabilité est très liée aux variations de la pente topographique : plus elle est raide, plus les transports solides sont importants.

Conclusion

Lorsque le sol est inégalement couvert, les transports solides sont d'autant plus faibles que la densité du couvert végétal est dense (cas des pelouses et des genêts).

Lorsque le couvert végétal est uniforme (hêtres et épicéas), les transports solides semblent d'autant plus importants que la pente du terrain est raide.

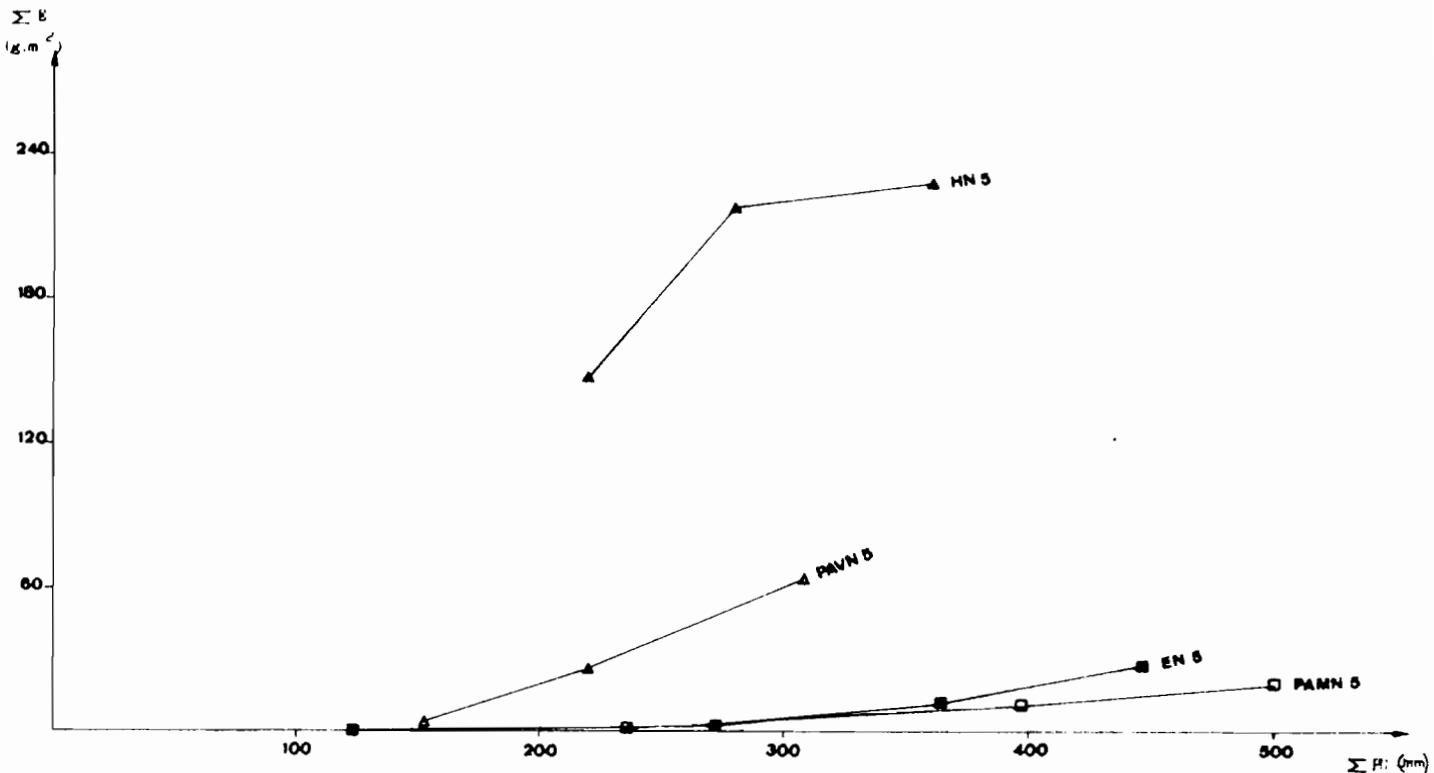


Fig. 34 : Evolution du débit solide cumulé en fonction de la hauteur de pluie cumulée : parcelles nues

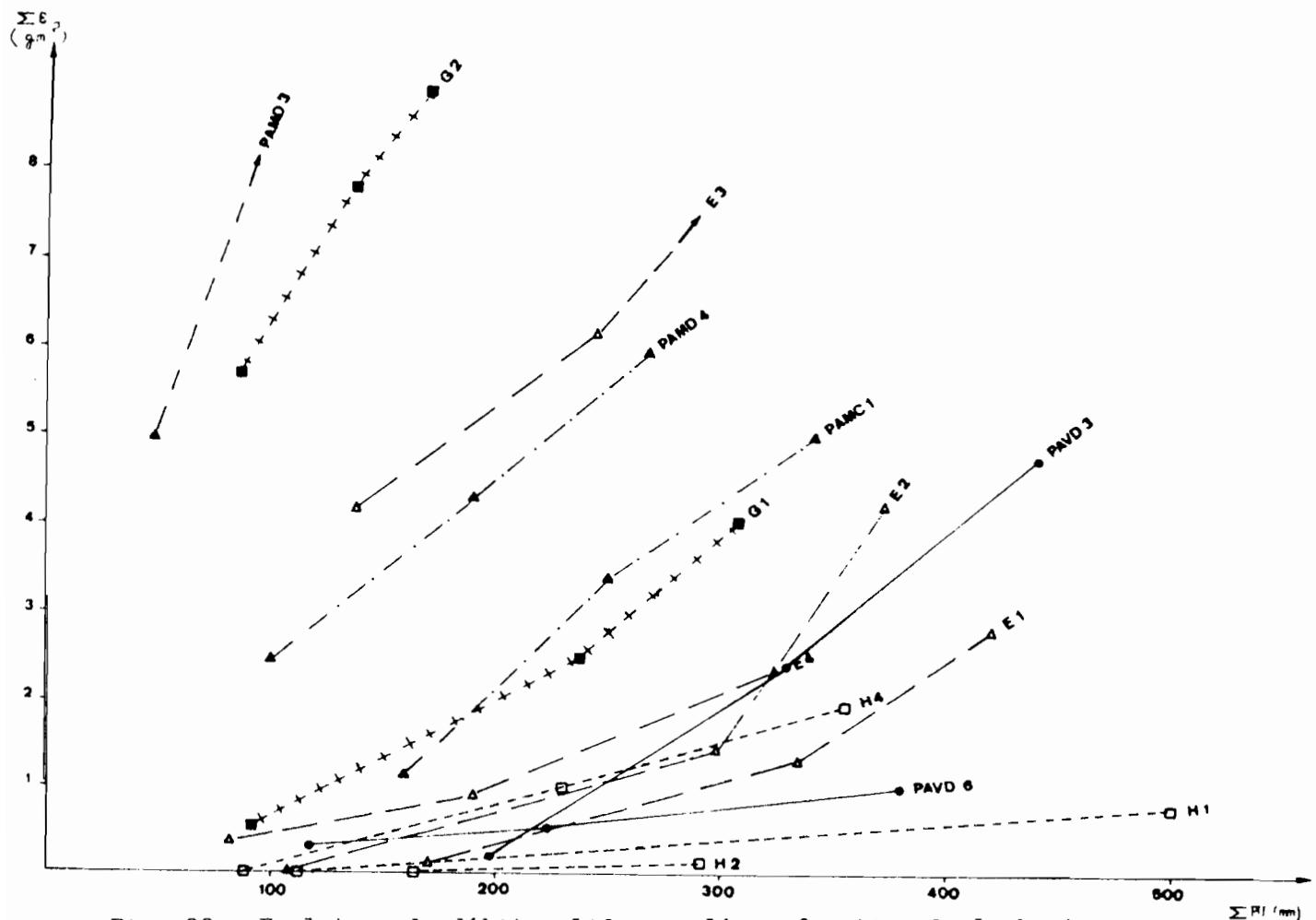


Fig. 33 : Evolution du débit solide cumulé en fonction de la hauteur de pluie cumulée : parcelles couvertes

Tant que le sol est parfaitement couvert, qu'il s'agisse de forêt, de pâturage, de plantes de couverture ou d'un simple paillis de quelques centimètres d'épaisseur (ROOSE et ASSELINE, 1978), les phénomènes d'érosion sont très limités quelque soit l'agressivité des pluies, la fragilité des sols et la pente.

2.5.2 - Les parcelles labourées :

2.5.2.1 - La turbidité des eaux de ruissellement

La turbidité est beaucoup plus élevée ($0,2$ à 5 g/l) que sur les parcelles non labourées ($0,02$ à $0,3 \text{ g.l}^{-1}$).

Sur les parcelles PAVn5 et En5, Cm est très liée à l'intensité de la pluie alors que sur la parcelle Hn5, Cm diminue quelque soit l'intensité de la pluie (tableaux 8 et 9).

L'augmentation de la turbidité quand I augmente s'explique par l'augmentation de l'effet "splash" qui est lui-même lié à l'énergie cinétique des gouttes de pluie et réciproquement. On peut classer les 3 parcelles par ordre de turbidité décroissante comme suit :

$$\text{Hn5} > \text{PAVn5} > \text{En5}$$

La faible turbidité observée sur la parcelle En5 est due au rôle protecteur d'aiguilles d'épicéas en surface (75 %). Alors que la différence entre Hn5 et PAVn5 s'explique par la pente ; la turbidité est d'autant plus élevée que la pente du terrain est raide.

2.5.2.2 - Les transports solides

Ils passent de $1-3 \text{ g.m}^{-2}$ sur parcelles naturelles à environ 60 g.m^{-2} sur parcelles labourées (tableaux 8 et 9). La figure 34 montre que les transports solides diminuent de la hêtraie (Hn5) à la parcelle En5 en passant par PAVn5. La faible érodibilité de En5 s'explique par son couvert végétal d'épicéas, alors que la différence entre Hn5 et PAVn5 est sans doute due à la pente topographique.

La parcelle Hn5 plus pentue s'érode plus que la parcelle PAVn5 malgré ses 10 % de couvert végétal constitué de feuilles mortes de hêtres, contre 0 % pour la parcelle PAVn5.

Sur sol nu, l'influence du couvert végétal sur l'érodibilité du sol est nette. LAL (1975) a montré que la pente n'avait pas d'influence sur l'érosion d'un sol protégé par un mulch. Mais, il semble qu'en dessous d'un certain seuil de couvert végétal (ici = 10 %),

c'est la pente topographique qui contrôle les pertes en terre ; plus elle est forte, plus les pertes en terre sont importantes. Avec un taux de 30 % de couvert de paille, le sol se comporte comme une parcelle dénudée (RAHELIARISOA, 1986). ZINGG (1940), sur des essais effectués aux USA, montre que les pertes en terre augmentent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente.

LAL (1975) montre que l'érosion augmente avec la pente selon une fonction exponentielle lorsque le sol est nu et travaillé dans le sens de la pente. Par contre, l'érosion est indépendante de la pente si on laisse en surface une quantité suffisante de résidus de Culture (mulch).

WISCHMEIER et SMITH (1960) estiment par contre qu'une équation du second degré s'ajuste mieux qu'une fonction logarithmétique.

Conclusion

En général, la turbidité diminue quand l'intensité de la pluie croît sur les parcelles couvertes de végétation (effet de dilution de la concentration), alors qu'elle augmente quand il croît sur les parcelles nues. Les turbidités sont 10 fois plus élevées dans le second cas.

L'effet protecteur du couvert végétal vis à vis des transports solides est très net quand on peut apprécier les différences de densité du couvert végétal. La pente topographique accentue les transports solides sur les parcelles labourées de façon très nette. Elle prime sur le facteur teneur en matière organique.

2.6 CONCLUSION

La hauteur de pluie d'imbibition est élevée ($P_i = 140$ à 300 mm) sur les surfaces couvertes, mais diminue si le sol est dégradé ou très humide ($P_i = 4$ à 30 mm).

En régime permanent, la vitesse d'infiltration (FN) est forte en général sur sol sableux couvert (pelouse en bon état ou forêt) ; elle est plus faible ($FN = 30$ à 90 mm.h $^{-1}$) si le milieu est dégradé, engorgé ou très pentu. Le ruissellement est donc faible pour une pluie standard de 60 mm de hauteur et d'intensité voisine de 90 mm.h $^{-1}$ ($KR60 < 5\%$) si le sol est bien couvert. Pour une intensité plus forte ($I = 130$ mm.h $^{-1}$) limitée à une hauteur de 60 mm, il augmente ($KR60 = 7$ à 28 % sous forêt) et il est encore plus fort si la surface est dégradée ($KR60 = 15$ à 60 % sous pelouse et 36 à 44 % sous genêts).

Les transports solides sont très faibles ($ER60 < 3$ g.m $^{-2}$) tant que les surfaces sont bien couvertes par la végétation basse ou par la litière forestière ; ils dépendent de l'intensité de la pluie, du couvert végétal et de la pente topographique. D'où à l'échelle du bassin, la naissance du ruissellement se fait dans l'ordre suivant :

- sur sol engorgé : bas de pente, tourbières, chaos de rochers et basses terrasses
- sur sol tassé, à végétation surpâturée (proximité de la draille et zones de repos des moutons).
- Enfin, de façon presque généralisée sur les sols couverts par débordement des eaux souterraines lors d'averses exceptionnelles. L'effet du travail du sol se répercute plutôt moins sur le ruissellement que sur les transports solides. Ces derniers sont très faibles sous litières et pelouses et prennent de l'ampleur dès que le sol est travaillé ($ER60 = 5$ à 60 g.m $^{-2}$). Les terres érodées localement sont piégées par le tapis herbacé. Les migrations de terre seulement sont donc localisées et peu de charge arrive à la rivière (cloutasse).

Les pertes en terre par ruissellement diffus ainsi évaluées sont d'un ordre de grandeur – extrapolé à l'hectare – comparables à celles qui sont mesurées dans des fosses à sédiments : 30 kg/ha/an dans le bassin des Cloutasses. Celà pourrait signifier que l'érosion des berges qui est responsable de la majeure partie des apports dans les fosses à sédiments, est d'une intensité comparable en année moyenne aux transports par ruissellement diffus vers les parties basses du bassin : 20 à 50 kg/ha/an. Ces valeurs faibles s'expliquent par l'efficacité du couvert végétal et/ou de la litière forestière qui protège le sol.

CHAPITRE III

CAMPAGNE DE SIMULATION AU LAURAGAIS

R E S U M E

En vue de mettre en évidence l'influence de diverses préparations de lit de semence sur les paramètres hydrodynamiques et mécaniques des sols du Lauragais (30 % d'argile) à pente supérieure à 13 %, une campagne de mesures au simulateur de pluie eut lieu d'avril à juin 1986.

La hauteur de pluie d'imbibition est très liée à l'état d'humectation initial du sol ; elle varie de 10 à 24 mm lorsque le sol est humide, et augmente lorsque le sol est sec (14 à 47 mm). Mais lorsque la surface du sol est encroûtée (pellicule de surface plus ou moins sèche), Π est plus faible et n'est plus contrôlée par l'état hydrique du sol. Π diminue avec la pente et l'intensité de la pluie.

Un seul passage de roue (N2) n'a pas d'effet sur Π . Le double tassement (N3) représente un obstacle très net au drainage et au ressuyage du sol. Le traitement roulé (N8) et celui préparé au rateau (N2b), donc les traitements à éléments structuraux fins montrent les plus faibles possibilités d'infiltration pendant la phase d'imbibition. L'ajout de grosses mottes sur un lit initialement fin (N7) a légèrement augmenté Π par rapport au traitement roulé (N8). Par contre, on ne note pas d'effet favorable de l'épaisseissement du lit de semence, preuve est que l'infiltration dépend plutôt de l'état de surface.

La variabilité de la susceptibilité au ruissellement des différents lits de semence est très importante à l'intérieur même des traitements. Celà tient du fait que les lits de semence ne sont pas bien différenciés les uns des autres car la réalisation de ces derniers n'a pas été identique à ce que l'on souhaitait avoir. Malgré celà, on peut dire que la susceptibilité au ruissellement semble d'autant plus prononcée que le pourcentage de mottes inférieures à 0,5 cm (y compris la surface fermée initialement) est élevé. Le ruissellement est réduit lorsque le sol est sec (car pour une pluie donnée, lorsque Π augmente, KR diminue) et augmente nettement avec l'intensité de la pluie. La pente semble avoir une faible influence sur le ruissellement, son rôle est ambigu, avec toutefois une tendance à une augmentation du ruissellement lorsque la pente est élevée.

L'intensité d'infiltration en régime permanent (FN) semble meilleure sur le traitement témoin (N1) à éléments structuraux relativement grossiers, et le traitement N7 (ajout de grosses mottes) ($6 \text{ à } 17 \text{ mm.h}^{-1}$).

- l'épaississement du lit de semence (N4) n'a pas augmenté FN (5 à 11 mm.h^{-1})
- un seul passage de roue (N2) ne semble pas marquer FN (5 à 14 mm.h^{-1}), par contre le double tassement (N3) est un véritable frein à l'infiltration (1 à 5 mm.h^{-1})
- l'augmentation de la rugosité du traitement (N7) a éléments structuraux initialement fins, a augmenté FN.

L'intensité d'infiltration en régime permanent diminue quand l'intensité de la pluie augmente et semble diminuer lorsque la pente augmente.

La charge solide moyenne est très variable à cause probablement des nombreux lachages de micro-structures ; elle est élevée sur les traitements à éléments structuraux fins (N7 et N8) ($24 \text{ à } 27 \text{ g.l}^{-1}$) si le sol est sec et surtout ($19 \text{ à } 41 \text{ g.l}^{-1}$) si le sol est humide.

La charge solide moyenne est très réduite sur le traitement témoin, N1 ($1,6 \text{ g.l}^{-1}$) et le traitement tassé deux fois, N3 ($1,9 \text{ g.l}^{-1}$) ; elle augmente nettement avec la pente et semble indépendante de l'intensité de la pluie.

Les traitements à éléments structuraux fins (N7 et N8) se caractérisent par des débits solides très élevés ($200 \text{ à } 300 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)

- le traitement témoin (N1) est le plus résistant.

Les débits solides augmentent nettement avec l'intensité de la pluie et la pente et diminuent avec le déficit de saturation du sol.

3.0 - Introduction

Une enquête menée auprès des agriculteurs du Lauragais en 1983 et concernant les problèmes de l'érosion, a permis de mettre en évidence un certain nombre de caractères relatifs à l'érosion dans cette région de la France.

- Les parcelles touchées par l'érosion sont souvent de grandes parcelles (5 à 10 ha) ayant subi des aménagements, tels la suppression de talus ou de fossé. Elles sont pentues : 15 à 30 %, voire plus, et assez longues (plus de 100 m). Elles ont été selon le dire des agriculteurs "bien préparées au printemps", cela veut dire que le lit de semence était relativement fin.
- Les mois les plus sensibles étant de l'avis général les mois d'avril, mai et juin, c'est à dire au moment des orages de printemps.

Ces cas d'érosion sont bien visibles et parfois graves (semis détruits, fossés comblés, recouvrement colluviaux des routes etc...). Il est possible que des phénomènes plus diffus (érosion en nappe) se produisent régulièrement, mais il est difficile d'en apprécier l'importance et les conséquences (DEUMIER et ROOSE, 1985)

A la suite de cette enquête, un certain nombre de propositions ont été avancées, dont :

- une étude pédologique et géomorphologique
- et une étude au simulateur de pluie pour mieux cerner les paramètres relatifs au déclenchement du ruissellement et comparer l'effet de différents itinéraires de travail du sol, en se référant aux études du SRAE du Nord-Pas-de-Calais.

Une première campagne de mesures au simulateur de pluie eut lieu du 15 avril au 15 juin (DEUMIER et ROOSE, 1985) : l'idée de départ était que la sensibilité au ruissellement et à l'érosion provenait davantage de l'état de surface du sol que de l'engorgement des horizons sous-jacents et pour cela, il convenait de tester les effets négatifs probables du roulage et du tassement du sol par les roues d'engins ainsi que les effets positifs possibles de la protection de la surface du sol par les résidus de culture.

Par suite de certaines difficultés rencontrées lors de la première campagne (non répérage de traces de roues, nombre réduit de répétitions, effets parasites dûs au vent etc...), une seconde campagne qui fait l'objet de ce travail, a été effectuée du 15 avril au 25 juin 1986 à NARBONS sur le domaine de la ferme inter-instituts d'ENCRAMBADE.

Dans cette seconde campagne, on a procédé en deux temps :

- une première série d'essais sous pluies simulées a été menée sur des parcelles de sols de versants, assez pentus et a permis d'étudier le comportement hydrodynamique et mécanique de divers modes de préparation de lit de semence (degré d'affinement et de tassemement, épaisseur du lit de semence).
- une seconde série eut lieu ensuite sur des sols moins pentus (lit de semence à éléments structuraux fins) pour étudier l'effet de l'intensité de la pluie et l'effet de pente et comparer les sols du Lauragais avec ceux précédemment étudiés dans la Sarthe.

3.1 - Etude du milieu

3.1.1 - Situation géographique

Le Lauragais occupe la partie orientale du département de la Haute-Garonne, à proximité immédiate de Toulouse.

Il est limité par les vallées de l'Agout puis du Tarn au nord, et par les vallées de l'Ariège, puis de la Garonne au sud et à l'ouest (fig. 1) c'est une région de coteaux dont 92 % de la superficie est occupée par la SAU (Surface Agricole Utile). L'altitude est < 300 m et la densité du réseau de talwegs est très forte (supérieure à 3 km/km²). Une cartographie des pentes (Etchanchu et N'diaye, 1984) fait ressortir 6 classes de pentes (tableau 1).

Tableau 1 : Répartition des pentes dans les coteaux du Lauragais

Pentes	Superficie occupée
0 - 5 %	26
5 - 8 %	12
8 - 12 %	11
12 - 18 %	6
18 - 25 %	20
> 25 %	25

Ce tableau montre qu'environ 51 % de la surface agricole utile (SAU) est occupée par des pentes assez fortes, supérieures à 12 %.

Le substratum géologique molassique est généralement masqué par les formations superficielles limono-argileuses du quaternaire.

3.1.2 - La pédologie :

Les sols des coteaux du Lauragais sont traditionnellement regroupés sous le terme générique de "terrefort" (appellation locale qui évoque des terres lourdes argilo-calcaires). Ce sont des sols bruns calcaires argilo-limono-sableux à limono-argilo-sableux sur molasse calcaire apparaissant au-delà d'une profondeur de 30 à 50 cm (fig. 2). Comme dans tous les coteaux, il est difficile de définir les sols avec précision étant donné leur hétéro-

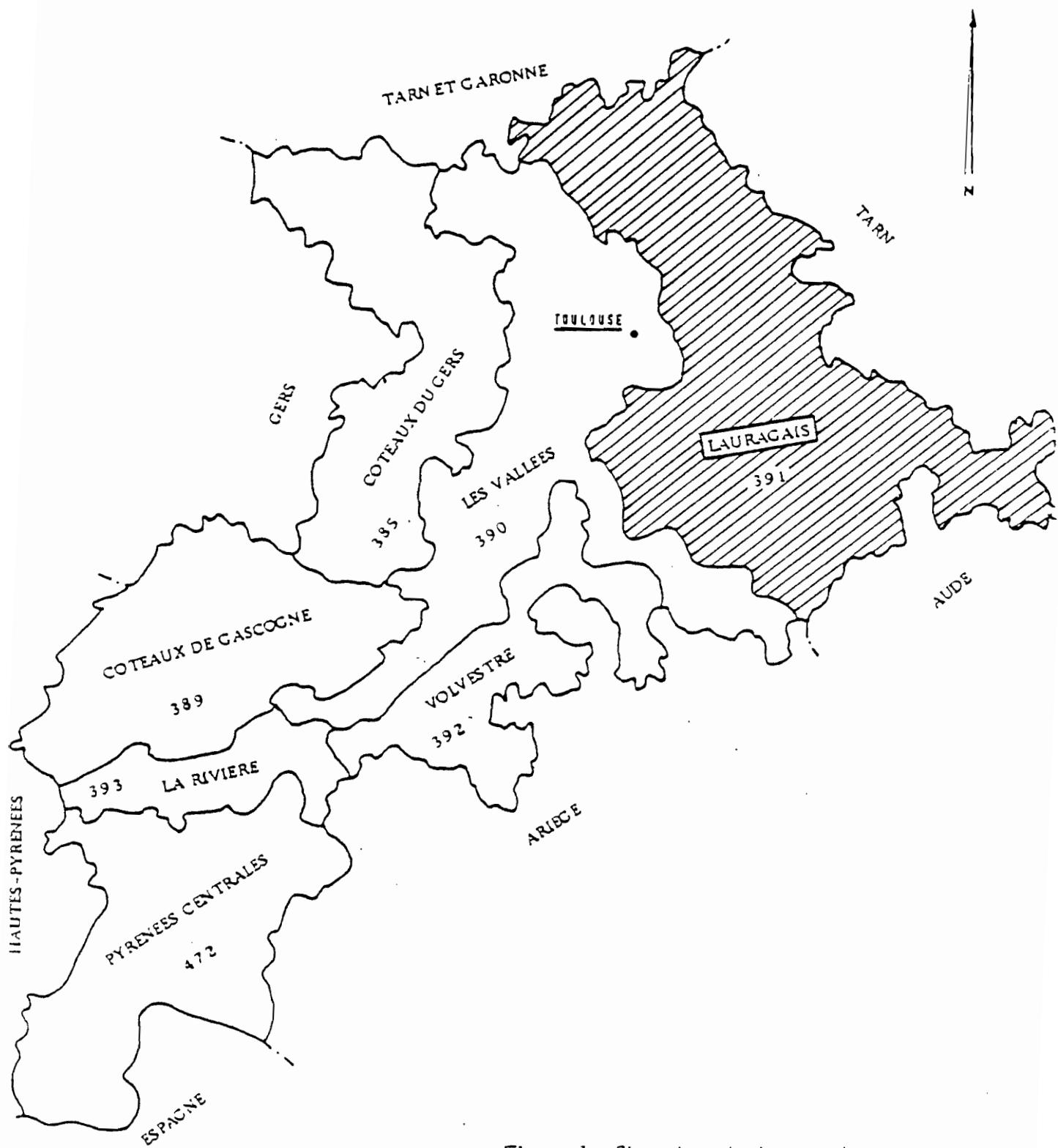


Figure 1 : Situation du Lauragais par rapport aux régions agricoles de la Haute Garonne.

généité très marquée (sols plus ou moins profonds, molasse plus sableuse par endroit, plus argileuse dans d'autres, transition très marquée là où un ancien labour à 40 cm a remonté de la molasse etc...).

Les principaux types de sols rencontrés sont :

- Sols de type Rendzine : sols peu différenciés où l'horizon organique repose sur un substratum de molasse
- Sols bruns calcaires sur molasse et colluvions : ce sont des sols peu évolués qui se localisent essentiellement sur les versants aux pentes les plus fortes. La texture est argileuse, argilo-limoneuse ou sablo-limoneuse avec toujours une fraction importante de fragments calcaires.
- Sols bruns calciques, sur molasse : ils occupent les longs versants aux pentes les plus douces. Les horizons superficiels sont caractérisés par une décarbonisation plus ou moins poussée. La texture est limono-argileuse en surface, argilo-limoneuse puis argileuse en profondeur.

Dans tous les sols, le taux de matière organique est relativement faible (1 à 2,2 %).

La parcelle d'expérimentation de l'ITCF où se sont déroulées les opérations de simulation de pluie est située sur des sols bruns calcaires sur molasse. La profondeur d'enracinement dans ces sols est d'environ 70 cm et la réserve utile varie de 90 mm sur 40 cm à 150 ou 160 mm sur 60 cm de profondeur (CASTILLON, 1984).

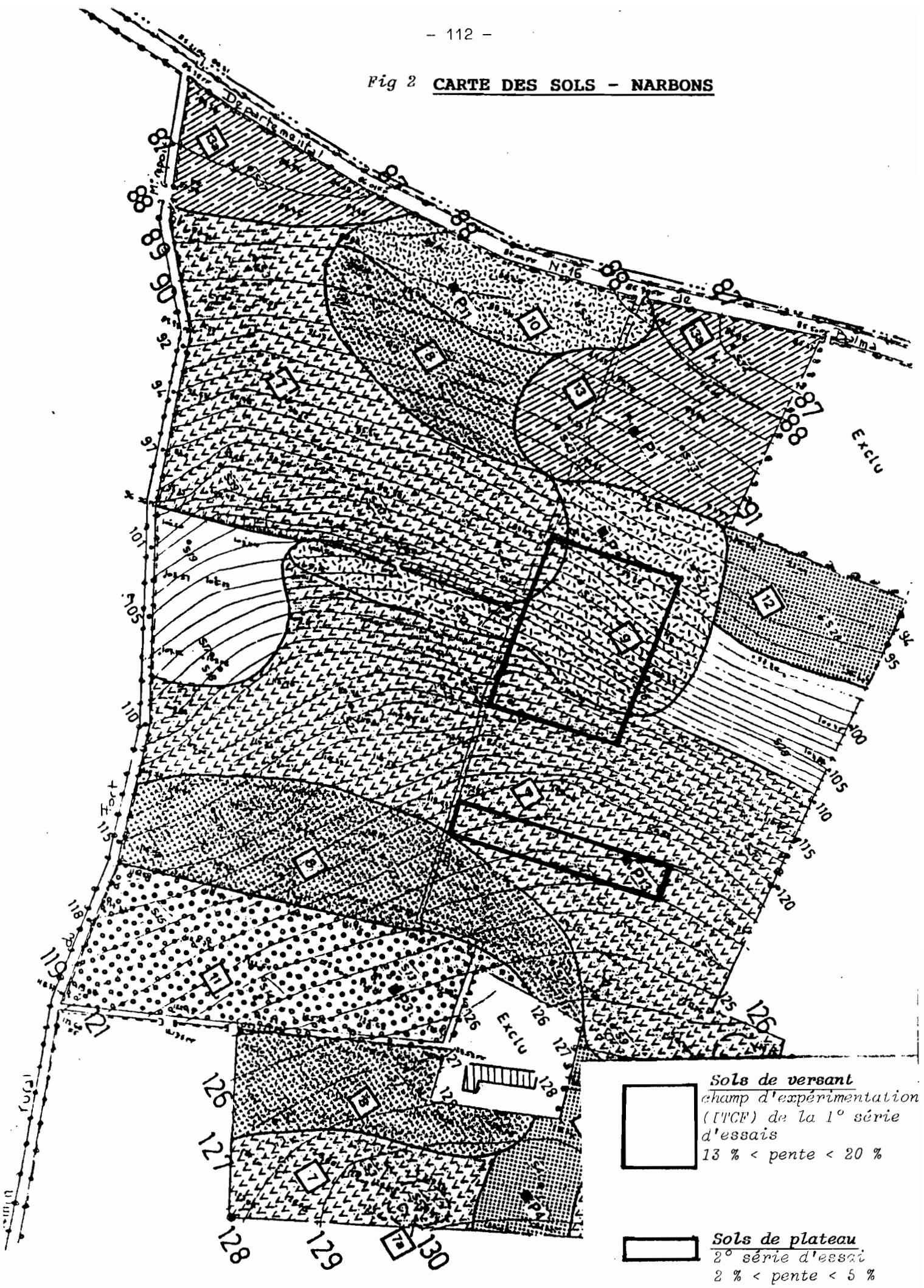
Conclusion :

Du strict point de vue morpho-pédologique, les coteaux du Lauragais peuvent être considérés comme un milieu naturel potentiellement vulnérable à l'érosion. La pente semble être le facteur prépondérant de cette vulnérabilité.

3.1.3 - Occupation des sols :

Le Lauragais est une région de polyculture à dominante céréalière intensive. Ainsi, on y cultive du blé, du maïs, du sorgho, de l'orge et de l'avoine, ainsi que des céréales industrielles (tournesol et colza) qui prennent de plus en plus d'importance dans le système de culture. Parallèlement, on note l'existence de cultures fourragères beaucoup plus secondaires, des vignobles et des vergers.

Fig 2 CARTE DES SOLS - NARBONS



CARTE DES SOLS - NARBONS

1 - Sols développés sur matériaux calcaires



Série 7 : sol calcaire limono-argilo-sableux à argilo-limono-sableux, brun à brun jaune sur molasse calcaire claire, bariolée ocre jaune et gris apparaissant entre 30 et 50 cm.



Série 7a : cailloux calcaires en surface et localement dalle peu profonde.



Série 8 : sol calcique limono-argilo-sableux à argilo-limono-sableux, brun à brun foncé sur molasse calcaire bariolée apparaissant entre 60 et 120 cm.



Série 9 : sol calcaire argilo-limono-sableux profond sur molasse ou colluvions argilo-limono-sableuses plus ou moins calcaires.



Série 10 : sol calcaire limono-argilo-sableux profond sur matériau colluvionné jaune très calcaire et marne profonde.

2 - Sols développés sur matériaux non calcaires



Série 11 : sol calcique, brun foncé, argilo-sableux à limono-argilo-sableux, caillouteux, sur cailloutis apparaissant entre 40 et 100 cm.



Série 12 : sol calcique limono-argilo-sableux à areilo-limono-sableux sur niveaux sableux, sablo-argileux ou argilo-sableux.



Série 13 : sol calcique limono-argileux-sableux à argilo-limono-sableux sur argile limono-sableuse tacheté d'ocre et noir à partir de 60-80 cm - engorgé en profondeur.

Série 13a : zones très engorgées.

3 - Sols complexes



Sols calcaires limono-argilo-sableux à argilo-limono-sableux sur matériaux divers très imbriqués les uns dans les autres, apparaissant dès 30 cm (molasse calcaire bariolée, molasse sableuse grise, molasse argileuse décarbonatée - niveaux caillouteux) - zone de mouillères.

Le système de culture se caractérise par des rotations de culture d'hiver (blé, orge, colza) et des cultures d'été (maïs, sorgho, tournesol). La surface agricole utilisée en 1980 atteignait 126 127 ha, soit 92 % de la surface totale. On avait recensé à cette époque 3894 exploitations de taille relativement importante (SAU moyenne de l'ordre de 32 ha). Sur ces exploitations de grandes parcelles de 10 à 15 ha voire même 30 ha et plus parfois peuvent occuper la totalité d'un versant et dans certains cas les deux versants d'un coteau. Sachant le caractère cumulatif du ruissellement et du ravinement en fonction de la surface, ce parcellaire est peut-être responsable de l'intensité des phénomènes d'érosion constatée. Le tableau 2 donne la répartition en superficie des divers types de cultures de cette région et leur évolution entre 1956 et 1980. On remarque :

- la forte augmentation des cultures céréalières et industrielles au détriment des prairies ou espaces couverts naturels
- la réduction très importante du nombre d'exploitations, allant de paire avec le développement des cultures d'été qui laissent les sols nus pendant la période des précipitations orageuses, souvent intenses.
- l'augmentation spectaculaire de la taille du parcellaire (fig. 3).

Conclusion :

Plusieurs caractéristiques actuelles du paysage agraire et du système cultural tendent plutôt à accroître la vulnérabilité naturelle du milieu morpho-pédologique à l'érosion, essentiellement au printemps. Les principales causes sont :

- les modifications importantes de l'utilisation des sols qui tendent vers une diminution des surfaces totalement en herbe (STH) et une augmentation des surfaces labourées
- les modifications importantes du parcellaire et du paysage agraire, entraînant une augmentation de la taille de la parcelle avec le temps et une diminution des haies, fossés, taillis etc... et obstacles naturels à la propagation du ruissellement.

3.1.4 - Le climat :

Le Lauragais Haut-Garonnais est caractérisé par un climat intermédiaire entre celui à tendance méditerranéenne des régions Audoises et celui à tendance océanique de la vallée de la Garonne.

Nous nous intéresserons uniquement à la pluviosité qui est le facteur climatique essentiel vis à vis du ruissellement et de l'érosion.

TABLEAU 2 Evolution de l'utilisation des sols dans le Lauragais
de 1956 à 1980 (Source : RCA)

Utilisation du sol	1956 (1)		1970-1971		1979-1980	
	ha	%	ha	%	ha	%
blé tendre			33 009	24,9	38 148	30,2
orge			7 554	5,7	8 826	7
maïs grain			18 733	14,2	17 392	13,8
avoine			3 205	2,4	1 837	1,5
autres céréales (2)			20 037	15,1	19 137	15,2
CÉREALES	69 493	47,6	82 538	62,4	85 339	57,7
colza			2 194	1,7	3 714	2,9
autres oléagineux (3)			4 740	3,6	5 739	4,5
autres cultures ind.			31	0	300	0,2
CULT.INDUSTRIELLES			4 771	3,6	9 753	7,7
prairies artificielles			14 363	10,9	9 352	7,4
prairies temporaires			5 816	4,4	2 378	1,9
tourrages annuels			811	0,6	2 358	1,9
CULT.FOURRAGERES			20 990	15,9	14 088	11,2
jacchères			3 355	2,5	2 423	1,9
TERRES LABOUR.	113 429	77,7	112 294	84,3	111 880	88,7
prairies permanentes			10 623	8	8 124	6,4
parcours			1 632	1,2	791	0,6
S.T.H.	13 846	9,5	12 255	9,3	3 915	7,1
vignes	9 412	6,5	5 531	4,2	3 912	3,1
vergiers			1 995	1,5	1 073	0,9
S.A.U.	145 919	100	132 359	100	126 127	100
bois et forêts			7 237		6 203	
Nbre d'exploitations	9 060		4 906		3 894	

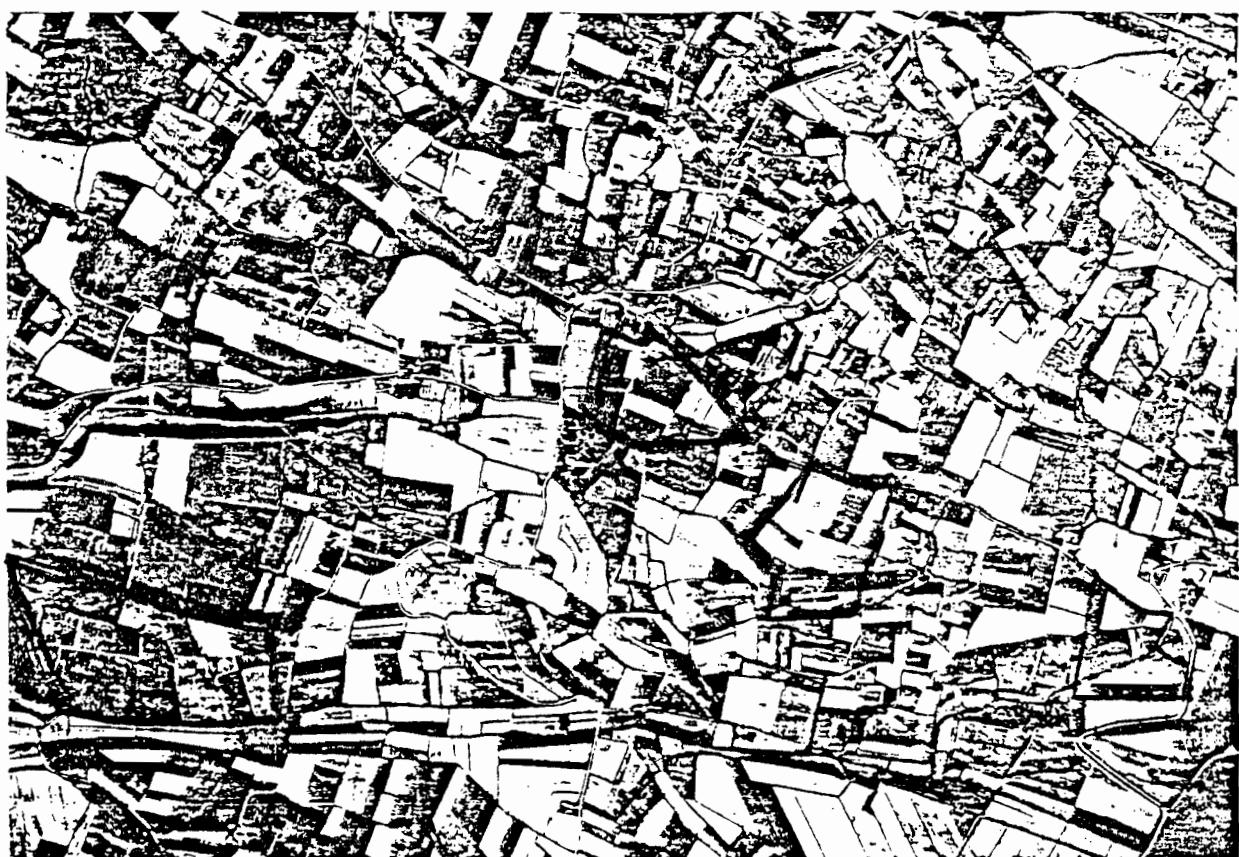
(1) nous n'avons pu obtenir les données que par grands postes

(2) essentiellement sorgho

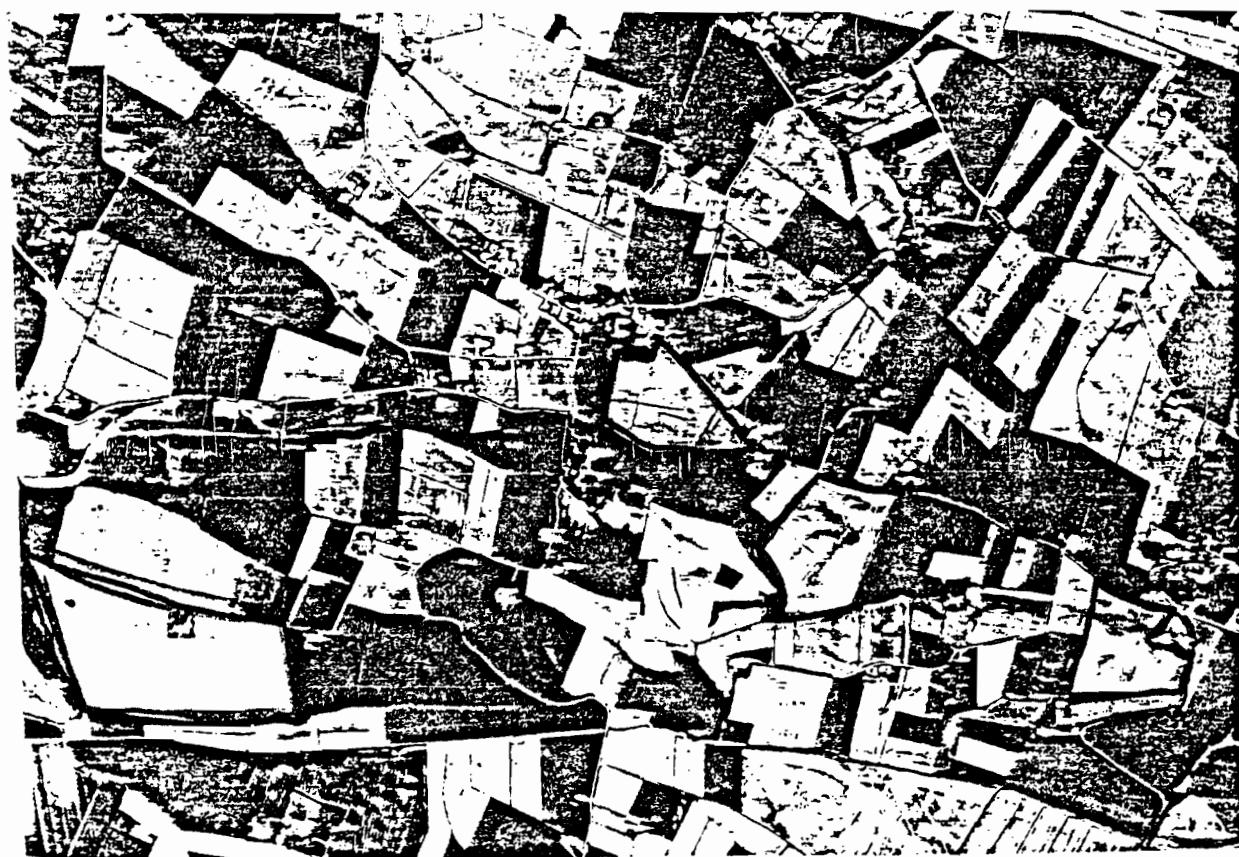
(3) essentiellement tournesol

Fig 3 : EVOLUTION DU PARCELLAIRE DANS LE SECTEUR DE TARABEL

La comparaison des photographies aériennes de 1962 (A) et 1983 (B) montre les regroupements de parcelles effectués depuis 20 ans et l'agrandissement de la taille du parcellaire. Ces transformations ont entraîné la disparition de la plupart des haies visibles sur le cliché de 1962 (échelle des clichés 1 cm \approx 250 m).



A



B

3.1.4.1 - La pluviosité annuelle :

La variation géographique de la pluviosité annuelle semble dépendre surtout de la localisation topographique des différentes stations de mesure et ne montre pas de structure spatiale nette. Si à Villefranche, en fond de vallée, il ne tombe que 700 mm environ il pleut 800 mm à Verfeil et Segréville et 725 mm à Lanta. Par contre les variations inter-annuelles de la pluviosité sont très importantes (50 % de différence entre les saisons 75-76 et 76-77). Cette différence est une des causes de la grande variabilité des phénomènes d'érosion d'une année sur l'autre (fig. 4).

3.1.4.2 - La pluviosité mensuelle :

La figure 5 indique les précipitations moyennes mensuelles à Villefranche (61-80), Ségréville (71-80) et Lanta (71-80). On note un maximum au mois de mai (90 à 100 mm). Dans l'ensemble, c'est de janvier à mai que les précipitations sont importantes ; le minimum se rencontre au mois de juillet (50 à 60 mm). C'est donc de janvier à mai que les risques d'érosion sont maximums d'autant qu'en janvier, les semis d'hiver ne protègent pas encore efficacement le sol tandis qu'en mai ce sont les cultures d'été qui couvrent insuffisamment le sol.

La variabilité inter-annuelle de la pluviosité mensuelle est importante comme le montre une analyse de dépassement des précipitations à Villefranche pour la période 1917-1966 (fig. 6).

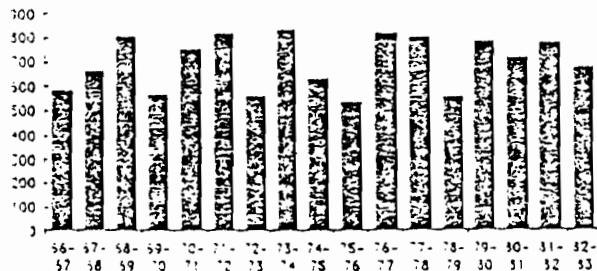
On note que pour chaque mois de printemps (avril, mai et juin), les précipitations mensuelles sont supérieures à 55 mm une année sur deux ; elles sont supérieures à 135 mm une année sur dix. Elles ont atteint 195 mm à Ségréville, 173 mm à Lanta et 23 mm en Crambade en 1986.

3.1.4.3 - Les précipitations journalières :

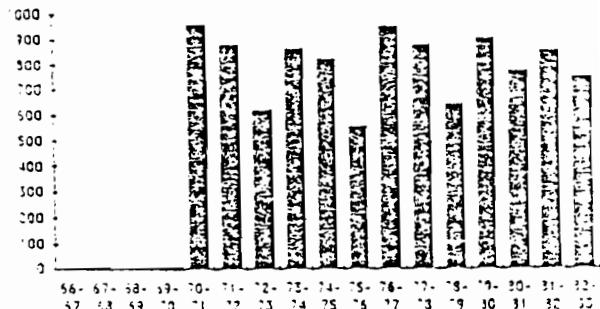
On dispose d'une analyse fréquentielle de la pluie journalière à Villefranche de Lauragais, effectuée sur une période de 50 ans (1917-1966) ; elle précise la période de retour des fortes précipitations journalières. Celles-ci se rassemblent en 3 périodes :

- au printemps (avril, mai, juin), la pluie journalière peut atteindre 30 mm une année sur deux en mai et peut dépasser 50 mm une année sur dix en avril, mai et juin

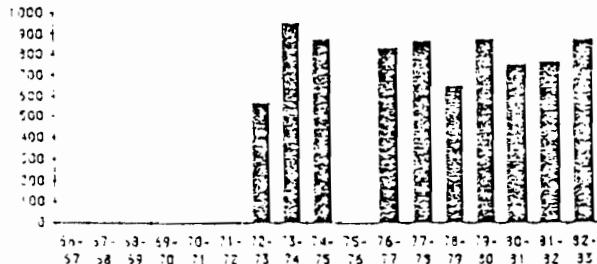
VILLEFRANCHE DE LAURAGAIS



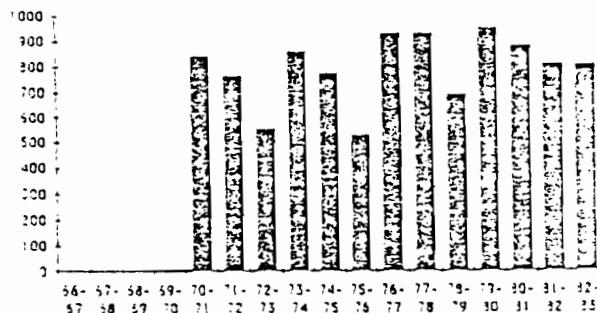
SEGREVILLE



VERFEIL



LANTA



REVEL

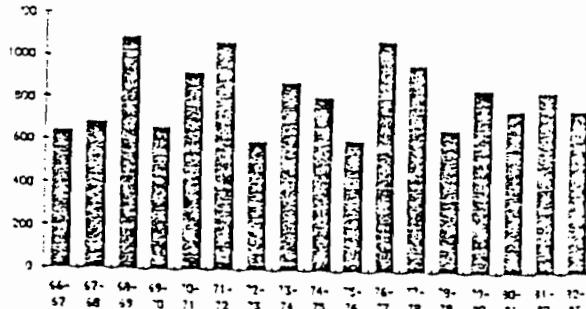


Fig 4 : Pluviométrie annuelle

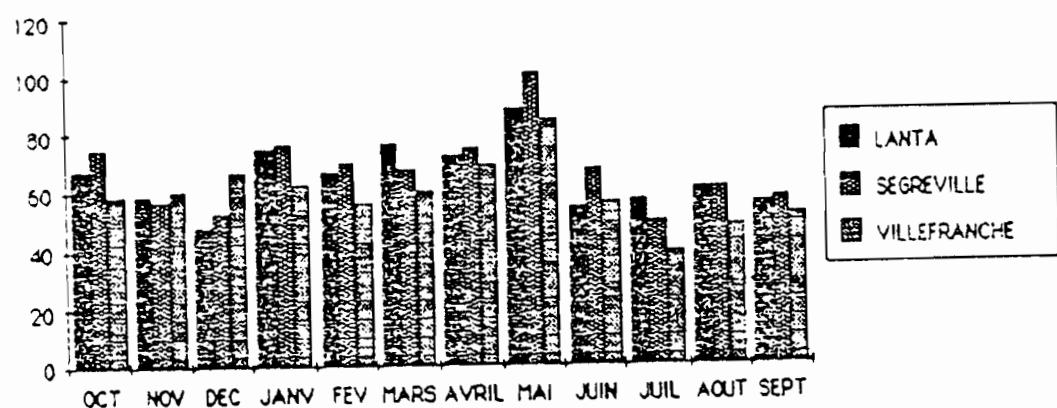


Fig 5 : Pluviométrie mensuelle (mm)

- En août et septembre, sous la forme d'orages, la pluie journalière est légèrement plus faible qu'au printemps.
- En hiver, la pluie journalière est encore plus faible qu'au printemps (fig. 7).

La figure 8 illustrant des épisodes pluvieux sur au moins deux jours consécutifs, montre que la pic de l'été a disparu et qu'il ne reste que les pics de printemps et d'hiver. Les épisodes pluvieux les plus longs se situent au printemps et peuvent atteindre 40 mm une année sur deux et 100 mm une année sur dix pour chacun des mois d'avril, mai et juin.

3.1.4.4 - Courbes Intensité - Durée - Fréquence

La définition de la pluie généralement employée est celle de WISCHMEYER, 1956 cité par DRESSAYRE (1986) : On considère une averse comme terminée lorsqu'un laps de temps de 6 heures s'écoule sans qu'une pluie de 1,3 mm soit précipitée. Il a ainsi été établi les courbes Intensité-Durée-Fréquence à Toulouse-Blagnac sur la période 1948-1957 (fig. 9). On remarque qu'une pluie de 40 mm peut survenir chaque année pendant 20 mn ; une pluie de 70 mm tous les 5 ans pendant 20 mn et une pluie de 120 mm tous les 10 ans pendant 10 mn.

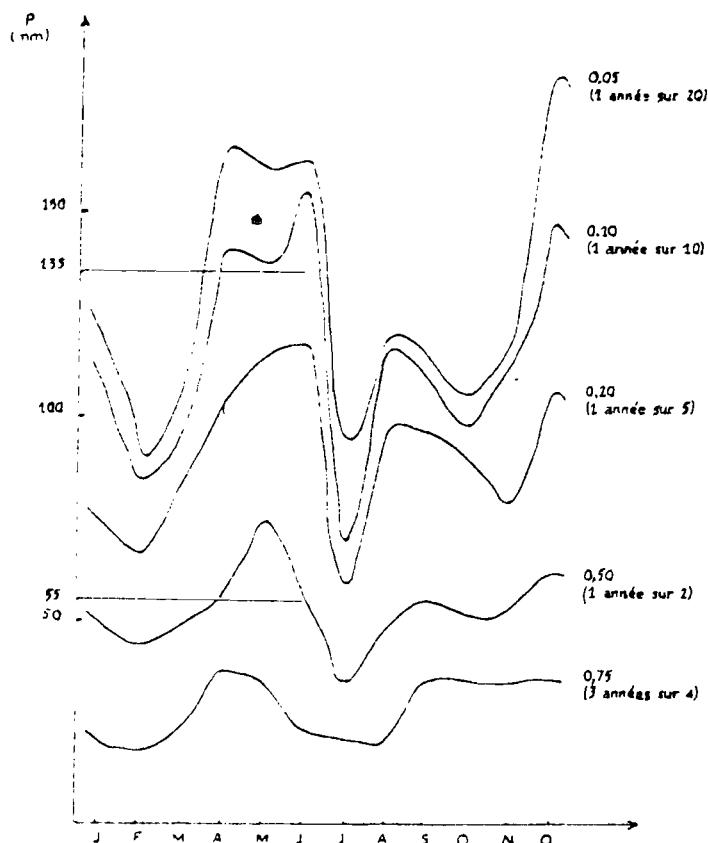
3.1.4.5 Conclusion sur le climat :

Cette étude du climat met en évidence le danger des pluies de printemps qui sont à la fois les plus nombreuses et les plus intenses. En cette saison, les cultures d'été sont très vulnérables et les risques d'érosion importants. Ce sont surtout les averses exceptionnelles qui présentent les plus grands risques. De telles averses sont certes rares, mais il ne faut pas perdre de vue que leur lieu d'occurrence est aléatoire à l'échelle du Lauragais, et qu'il ne se passe pas d'année, selon le dire de certains observateurs, sans qu'un secteur quelconque ne soit touché.

3.1.5 Conclusion sur le milieu :

Au Lauragais, l'érosion des sols est un "penchant naturel favorisé par l'homme". Ce penchant est marqué au printemps lorsque les principaux facteurs du ruissellement et de l'érosion (pluviosité, pente, protection végétale insuffisante, de vastes champs) jouent dans le même sens.

Fig 6 : Probabilité de dépassement des précipitations mensuelles à Villefranche-de-Lauragais (période 50 ans : 1917-1956).



Chacune des courbes représente la pluviométrie mensuelle pour une fréquence donnée. On en déduit facilement les probabilités de dépassement pour un mois donné.

(Source : ACRET)

Fig 7 : Hauteur des précipitations journalières à Villefranche-de-Lauragais :

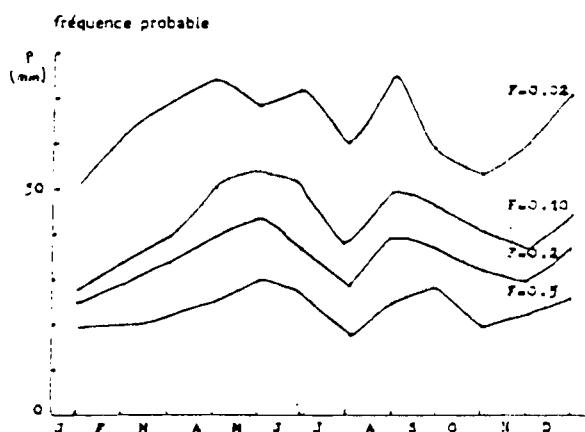


Fig 8 : Épisodes pluvieux à Villefranche-de-Lauragais : probabilité de dépassement

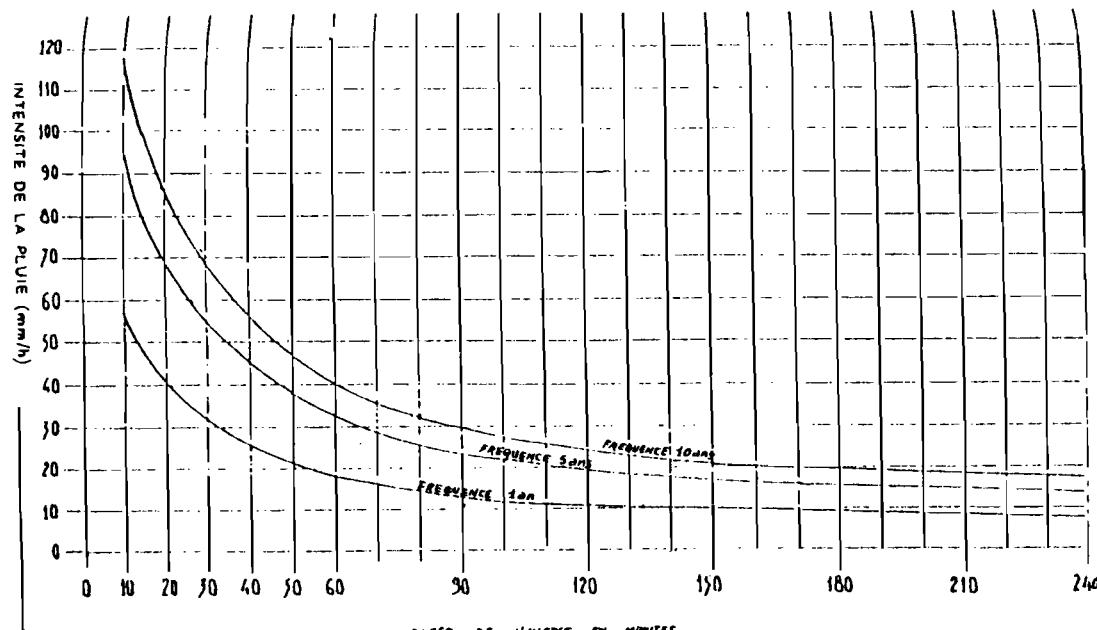
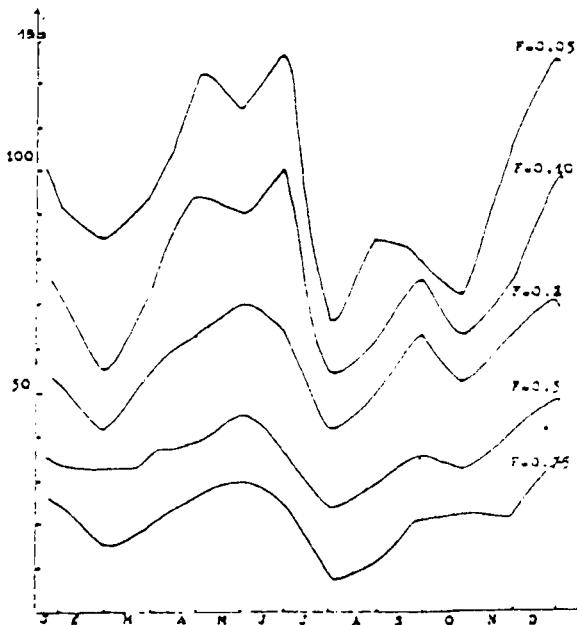


Fig 9 : Courbe intensité durée à Toulouse-Biegnac pour fréquence 1, 5, 10 ans
(sur période 10 ans : 1948-57)

3.2 - Le plan d'expérience :

Sur les "terreforts" du Lauragais, l'objectif est de déterminer quel travail du sol doit-on conseiller aux agriculteurs pour limiter au maximum les risques d'érosion suite aux violents orages de printemps.

Pour cela, deux séries d'essais ont été réalisées :

- la première série sur 13-20 % de pente visait à montrer :

- * l'influence d'un engorgement profond ou d'un état de surface
 - * le rôle du tassement par les roues et la reprise lors de la préparation du lit de semence
 - * l'épaisseur du lit de semence
 - * le rôle de la granulométrie des mottes.
- la deuxième série d'essais sur une pente faible de 2 à 5 % a pour objectif d'étudier l'effet de l'intensité de la pluie pour se rapprocher des conditions expérimentales appliquées antérieurement par TREVISAN (1986) et RAHELIARISOA (1986) sur des sols limoneux battants de la région Centre.

Préparation du champ d'expérimentation :

Après la récolte du tournesol de 1985, la parcelle de NARBONS a été labourée généralement à 30 cm de profondeur. Le labour a été repris au printemps dans le but d'obtenir les lits de semence suivants :

- labour normal + lit de semence à granulométrie moyenne (témoin)

- - - + - - - - grossière

- - - + - - - - fine

- - - + - - - - très fine (cultipacker)

- labour tassé une fois + lit de semence à granulométrie moyenne

- - - deux fois + lit de semnce à granulométrie moyenne

Les conditions hivernales ayant été très favorables à l'évolution de l'horizon labouré, la réalisation des profils souhaités n'a pu être réalisée de façon homogène. Le tableau ci-dessous indique les travaux effectués sur le champ d'expérimentation et les types de profils obtenus.

travail	date	N8	N7	N5	N4	N3	N2b	N2	N1
tassement du labour	12 03					2 fois	1 fois		
reprises	31 03					vibroculteur - rotcherse			
		herse	plate	vibro + rotoherse		herse rotative 5 cm		vibro - rotcor	
semis	passage d'un semoir à vise								
autres préparations	cultipa cker	ajourde gros mats entre les lignes de sème				prise au niveau			

Les profils réalisés ont les caractéristiques suivantes :

- les traitements N1, N2 et N3 ont un lit de semence à granulométrie relativement grossière. Mais le traitement N2 a été tassé une fois et le N3 a été tassé deux fois.
- les traitements N4 et N5 ont un lit de semence à granulométrie relativement moyenne. Le N4 a un lit de semence plus épais (environ 15 cm)
- le traitement N7 a un lit de semence fin auquel on a rajouté quelques grosses mottes pour en faire un traitement grossier
- le traitement N8 a un lit de semence fin, roulé au Cultipacker
- le traitement N2B, une fois tassé, a un lit de semence fin à très fin et a servi lors de la 2^e série d'essais pour comparer avec les parcelles de sols peu pentus.

On voit (fig. 10) qu'il y a trois grands types de préparation de lit de semence et qu'à la seconde série d'essais, toutes les parcelles ont le même état de surface (éléments structuraux fins).

Chaque traitement a donné lieu à quatre répétitions dont deux arrosées 1 heure avant l'essai, une troisième arrosée 12 h avant l'essai et une quatrième non arrosée. Cet arrosage de 10 mn environ, a été décidé afin de maîtriser autant que possible l'état hydrique du sol. Cela devait en outre permettre de vérifier l'influence d'averses répétées. Mais l'arrosage a eu pour conséquence d'encroûter une partie de la surface du sol (environ 10 %) avant même l'essai de simulation.

3.3 - Le protocole expérimental :

Pour tester l'influence des techniques culturales (différentes préparations de lits de semence) et à partir d'une étude du climat qui a montré le danger des pluies de printemps (avril, mai et juin) tombant sur des sols finement préparés et mal protégés par les cultures d'été, il a été décidé de reproduire une pluie de 40 mm.h^{-1} , assez fréquente dans la région (fréquence de retour 1 à 5 ans), mais exceptionnelle si on se réfère à la durée de l'essai de simulation (environ 1 heure).

En effet, pour déterminer des paramètres hydrodynamiques caractéristiques de chaque type de préparation du sol, telle que la conductivité hydraulique à saturation, il était impératif de prolonger l'averse jusqu'à l'obtention du régime permanent d'infiltration.

Dans un autre but plus fondamental en vue de tester l'influence de l'intensité de la pluie sur le ruissellement et les transports solides, une 2^e série d'essais a été menée sur des pentes plus faibles ($\leq 5\%$). Les intensités retenues sont : 40 mm.h^{-1} , 50 mm.h^{-1} et 80 mm.h^{-1} .

L'originalité du protocole consiste dans le fait que chaque parcelle reçoit une seule averse, donc une seule intensité et non un train d'averses constitué d'intensités croissantes ou décroissantes. En effet dans les protocoles constitués de trains d'averses, seule, la 1^e pluie tombe sur un sol non dégradé alors que toutes les averses suivantes tombent sur un sol éventuellement dégradé par les pluies précédentes de sorte que l'interprétation des résultats est parfois malaisée (RAHELIARISOA, 1986).

Le protocole proposé a l'avantage de ne prendre en compte que la variation de l'intensité de la pluie alors que pour les protocoles à intensités successives, il y a une interaction entre l'intensité de la pluie et l'évolution structurale de la surface du sol ; il postule toutefois que les différentes parcelles ayant reçu le même traitement ont des caractéristiques physiques semblables, et que la comparaison n'est pas faussée par la variabilité spatiale du sol, ce qui est loin d'être vérifié. En outre, l'averse de 80 mm.h^{-1} nous servira de comparaison entre les "terreforts" du Lauragais étudiés ici, les sols sableux de montagne, riches en matière organique du Mont-Lozère et les sols limoneux de la Sarthe étudiés par RAHELIARISOA (1986) et par nous-mêmes (1984).

Essai intensité de la pluie

F		12	10	9	7	6	4	2
		13	11		8	5	3	1

Essai travail du sol

N8	N7		N5	N4	N3	N _{2B} N ₂	N1
					4	4B	
						3B	
						2B	
						1B	
					4		
						4	
						3	
						4	
						3	
						2	
						2	
						1	
						1	
F	F + G		M	M	G	F G	G

F : fin

M : moyen

G : grossier

3.4 - Les résultats :

3.4.1 - Etude des conditions initiales :

3.4.1.1 - Les caractéristiques des états de surface :

Pour décrire la surface du sol, 2 techniques sont employées simultanément :

1. - Estimation de la surface occupée par : (tableau 4)

- * les mottes avec différentes classes de diamètre ($< 0,5$ cm ;
 $0,5$ à 1 cm ; 1 - 3 cm ; 3 - 5 cm ; 5 à 8 cm ; 8 à 15 cm ; > 15 cm)
- * la surface fermée ou encroûtée
- * les cailloux
- * les résidus de culture

2. - Mesure de l'indice de rugosité (IR) sur 5 transversales (cf II)

Le taux de mottes > 3 cm permet de classer les traitements comme suit : (tableau 5)

- * groupe des traitements à mottes relativement grossières :
N2, N3 et N7 avec : N3 $>$ N7 $>$ N2
- * groupe des traitements à granulométrie de mottes moyennes :
N1 et N5 (témoins) avec N1 $>$ N5
- * groupe des traitements à granulométrie de mottes fines :
N4 et N8 avec N4 $>$ N8
- * le traitement N2 bis à granulométrie très fine qui est identique au traitement N2 (1 fois tassé) sauf que sa surface a été finement préparé au rateau et qui servira surtout de comparaison avec les parcelles du plateau à pente faible. On note que les parcelles tassées ne correspondent pas à des sols à éléments structuraux plus fins.

L'indice de rugosité IR permet de faire les regroupements suivants, par ordre de rugosité décroissante :

1. - les traitements à rugosité relativement élevée :

- N3, N1, N7 et N2 avec N3 $>$ N1 $>$ N7 $>$ N2

2. - les traitements à rugosité moyenne :

- N4 et N5 avec N5 $>$ N4

3. - N8 et N2b sont des traitements à rugosité faible

On voit à nouveau que le classement par rugosité ne correspond pas exactement au classement par taux de granulométrie de mottes.

Tableau 4 : Caractéristiques des états de surface des parcelles

code parcelle	Pente (%)	ta (h)	IR (%)	Cailloux (%)	Résidus (%)	D 0,5 cm (%)	D 3 cm (%)	D 5 cm (%)
N1-1	15,0	72	112 108	2	0,5	0	83	11
N1-2	15,5	24	114 109	3	1,0	56	78	12
N1-3	17,0	12	124 108	0	0,5	50	93	0
N1-4	19,8	12	120 111	3	0,0	52	83	0
N2-1	17,0	12	118 108	2	0,0	48	76	8
N2-2	16,0	1	115 107	2	0,0	39	90	6
N2-3	17,5	1	114 106	3	0,0	39	92	0
N2-4	20,5	72	110 110	6	1,0	37	82	0
N3-1	17,0	12	126 108	1	2,0	11	51	21
N3-2	15,5	1	114 110	1	0,0	32	66	16
N3-3	19,5	1	120 107	2	1,0	30	65	3
N3-4	20,0	72	113 108	2	0,0	38	73	11
N4-1	13,5	1	117 106	1	1,5	46	91	4
N4-2	16,0	23	110 108	3	2,0	35	91	3
N4-3	20,0	1	116 104	3	1,0	65	92	0
N4-4	21,0	72	115 106	2	3,0	49	86	7
N5-1	-	1	111 110	2	0,0	71	93	0
N5-2	17,5	1	113 105	8	1,0	59	88	0
N5-3	17,0	12	116 105	4	0,5	61	83	6
N7-1	14,0	1	110 110	4	3,0	45	62	22
N7-2	15,5	1	-	1	1,0	43	64	31
N7-3	17,5	10	116 115	2	0,0	27	71	22
N7-4	14,0	30	122 116	2	0,0	34	67	25
N8-1	13,5	1	111 106	3	4,0	65	89	1
N8-2	13,0	1	110 104	3	2,0	78	94	0
N8-3	15,0	144	113 105	4	0,5	61	84	0
N8-4	16,0	14	114 107	2	2,0	84	95	0
N2b-1	15,0	168	109 103	6	0,5	66	93	0
N2b-2	15,0	1	110 102	3	0,0	89	97	0
N2b-3	13,0	24	109 102	3	3,0	68	84	0
N2b-4	16,0	1	110 105	3	0,0	76	97	0
P1	2,0	1	105 104	2	6,0	80	87	0
P2	4,0	1	110 -	1	8,0	79	91	0
P3	5,0	1	108 104	7	9,0	52	83	0
P4	2,0	24	109 106	7	9,8	61	81	0
P5	3,0	72	110 104	7	3,0	68	96	0
P6	3,0	114	107 105	1	2,0	66	97	0
P7	3,5	1	114 104	2	8,0	49	89	0
P8	3,0	1	109 102	3	3,0	79	94	0
P9	2,0	144	111 102	1	2,0	89	98	0
P10	3,0	16	109 104	1	2,0	88	97	0
P11	4,0	120	110 102	0	6,0	68	94	0
P12	5,0	1	109 104	3	3,0	58	93	0
P13	4,5	1	110 104	5	6,0	29	89	0

Tableau 5 : Indice de rugosité et taux de mottes > 3 cm sur l'ensemble des traitements testés

	N1	N2	N3	N4	N5	N7	N8	N2b
taux de mottes > 3 cm %	5 à 16	5 à 21	24 à 44	3 à 8	2 à 12	26 à 33	0 à 12	0
indice de rugosité %	112 124	110 118	113 126	110 117	110 116	110 122	110 114	109 110

Remarque : Les témoins N1 et N5 et les traitements N2,N3 et N4 qui leur sont supposés identiques n'ont finalement pas la même granulométrie de mottes en surface. En effet, l'objectif était d'avoir la même granulométrie de surface sur ces traitements avec comme seule variable un labour tassé une fois (N2), un labour tassé deux fois (N3) et un lit de semence plus épais que le témoin (N4). Les conditions hivernales ont été telles que les profils obtenus sont un peu différents de ceux que l'on souhaitait avoir. D'autres imperfections sont à souligner : l'épaisseur du lit de semence qui devait être identique (environ 10 cm) sur tous les traitements sauf le N4 (étude l'influence d'un lit de semence épais) ne l'est finalement pas.

Le traitement N2 (1 fois tassé) a un lit de semence de 8 cm alors que celui de N3 (2 fois tassé) est réduit à 4 ou 5 cm environ.

Ces différences (involontaires) dans la préparation des lits de semence combinées à la très forte vairabilité spatiale du sol vont rendre difficile l'interprétation des résultats car plusieurs facteurs varient ensemble et ne sont pas indépendants.

Le tableau 5 montre que les traitements les plus grossiers sont ceux dont le labour a été tassé (N2 et N3) alors que N7 ne doit sa forte granulométrie de mottes en surface que grâce à l'ajout de grosses mottes car le lit de semence initial est fin.

Ceci va entraîner des résultats qui paraîtront à première vue contradictoires notamment l'influence des différentes classes de mottes sur les paramètres hydrodynamiques et mécaniques du sol dans l'analyse des corrélations. On voit aussi (tableau 5) que les classements d'état de surface en terme de rugosité et de pourcentage d'éléments grossiers ne se correspondent pas rigoureusement.

Conclusion sur les caractéristiques d'état de surface :

Les valeurs des caractéristiques d'état de surface apparaissent pour un type de traitement donné assez dispersées, à cause sans doute des difficultés de mesure et de la variabilité latérale initiale des sols. En outre, les corrélations que l'on devrait logiquement obtenir entre certaines caractéristiques ne sont pas nettes : exemple : tableau 5 (rugosité - $D > 3$ cm).

3.4.1.2 - Les caractéristiques physiques

a/ L'humidité avant la pluie :

- Au niveau du lit de semence (horizon 0-10 cm), l'humidité volumique avant la pluie est proche de la capacité au champ sur les témoins N1 et N5 ; elle est supérieure à la capacité au champ sur les autres traitements (tableau 6).

Le fait d'avoir arrosé une heure avant l'essai deux parcelles par traitement a eu pour effet d'homogénéiser l'état d'humectation du sol. Mais ceci peut nous renseigner aussi sur la capacité d'infiltration et de ressuage de chaque traitement. En effet, une heure après l'arrosage et juste avant l'essai, les traitements peuvent être regroupés par ordre d'humidité décroissante, comme suit :

$$N3 > N2 > N8 > N5 > N4 > N7 > N2b$$

On constate que les traitements tassés N3 et N2 se démarquent nettement ; avec leur forte humidité, ils indiquent un mauvais ressuage, contrairement aux autres traitements.

- Au niveau du labour (horizon 10-30 cm), la teneur en eau est plus élevée que celle du lit de semence. Elle est à la capacité au champ sur les témoins N1 et N5, sur le traitement tassé une fois (sauf la parcelle N2-1), sur le traitement tassé deux fois (sauf la parcelle N3-1) et sur le traitements à lit de semence épais (N4) ; elle est en dessous de l'humidité à capacité au champ pour les traitements N7, N8 et N2b.

b/ L'humidité après la pluie (cf tableau 1 en annexe) :

- Au niveau du lit de semence (horizon 0-10 cm), les variations de l'humidité sont plus faibles (27 à 31 %) sur l'ensemble des traitements. Seuls les traitements tassés (N2 et N3) s'individualisent avec des humidités plus fortes, ce qui indique que ces tassements sont un frein à l'infiltration.

- Au niveau de l'horizon de labour, l'humidité après la pluie est plus élevée que pour l'horizon de surface sur tous les traitements sauf N3 (2 fois tassé) qui a gardé la même humidité, ce qui confirme que le double tassement est un véritable obstacle à l'écoulement de l'eau.

c/ La porosité totale :

Elle est assez élevée au niveau du lit de semence (0-10 cm) et varie de 50 % (N7, N5, N8) à 56 % (N1 et N4) (tableau 6). Elle est plus faible sur les traitements tassés : 43 % pour N2 et 39 % pour N3 (2 fois tassé). Les témoins N1 et N5 confirment leur hétérogénéité (N1 plus poreux que N5).

Au niveau du labour 10-30 cm la porosité totale diminue sauf sur le traitement N4 où elle reste égale à la porosité de surface. L'épaisseur du lit de semence a entraîné une augmentation de la porosité du labour. Les labours tassés N2 et N3 sont les moins poreux.

Sous le labour (dans la Marne) > 30 cm, la porosité totale diminue davantage et varie de 30 % (N5, N7, N8) à 39 % (N1, N2, N4) ; elle est intermédiaire (35 %) sur le traitement deux fois tassé (N3).

γ/ La porosité de rétention ou capacité au champ :

La cinétique de ressuyage du sol a été suivie sur chaque traitement, sauf le N8. La capacité au champ varie de 20 % (N4) à 32 % (N3) en passant par 23 % (N2, N7, N8) et 27 % (N1 et N5) (fig. 9 à 13 en annexe). Elles confirment le très mauvais ressuyage sur le traitement tassé deux fois (N3).

β/ La macroporosité :

Elle est estimée par différence entre la porosité totale et la capacité au champ, elle varie de 7 % (N3) à 36 % (N4) en passant par 20 % (N2), 25 % (N5) et 29 % (N1, N7 et N8).

On remarque que le traitement deux fois tassé (N3) offre la plus faible macroporosité, alors que le traitement N4 grâce à son lit de semence plus épais donne la plus grande.

δ/ Remarque sur la macroporosité non saturée (tableau en annexe) :

Elle est définie par la différence entre la porosité totale (P_t) et l'humidité à saturation (θ_s). Tout comme sur le Mont-Lozère, on constate qu'à la fin de la pluie, un certain volume de la macroporosité n'a pas été utilisé sauf sur le traitement deux fois tassé qui montre des signes d'engorgement. Cela peut s'expliquer par :

Tableau 6 : Conditions hydriques initiales

code parcelle	lit de senonce 0 - 10 cm			labour 10 - 30 cm			sous-labour 30 - m			$\Delta i \%$ (0-10 cm)	capacité du champ (%)			ta (h)
	$\theta_0 \%$	da	Pt %	$\theta_0 \%$	da	Pt %	$\theta_0 \%$	da	Pt %		lit de senonce	labour	sous- labour	
M1-1	26,2	1,00	56,5	30,8	1,17	49,1	34,9	1,45	36,9	53,5	27,2	33,0	36,6	72
M1-2	24,6	0,99	56,9	29,5	1,19	48,2	34,9	1,46	36,5	56,6	27,2	33,0	36,6	24
M1-3	27,8	1,11	51,7	32,5	1,22	46,9	32,8	1,45	36,9	46,2	27,2	33,0	36,6	12
M1-4	28,4	1,13	50,8	33,8	1,31	43,0	36,8	1,56	32,1	44,0	27,2	33,0	36,6	12
N5-1	28,7	1,17	49,1	32,8	1,36	40,8	34,9	1,59	30,8	41,5	27,2	33,0	36,6	1
N5-2	30,1	1,17	49,1	33,9	1,36	40,8	36,0	1,59	30,8	38,5	27,2	33,0	36,6	1
N5-3	22,5	1,17	49,1	28,9	1,36	40,8	34,8	1,59	30,8	54,1	27,2	33,0	36,6	12
N2-1	29,2	1,29	43,9	38,6	1,49	35,2	37,1	1,53	33,4	33,3	22,8	33,0	35,4	12
N2-2	29,3	1,09	52,6	34,7	1,38	40,0	35,2	1,46	36,5	43,2	22,8	33,0	35,4	1
N2-3	35,0	1,29	43,9	34,2	1,38	40,0	35,6	1,46	36,5	20,2	22,8	33,0	35,4	1
N2-4	22,5	1,29	43,9	29,4	1,38	40,0	31,2	1,46	36,5	48,7	22,8	33,0	35,4	72
N3-1	41,2	1,46	36,5	41,3	1,54	33,0	39,3	1,55	32,6	0,0	32,3	34,6	36,0	12
N3-2	38,4	1,40	39,1	36,0	1,48	35,6	34,8	1,54	33,0	1,7	32,3	34,6	36,0	1
N3-3	38,1	1,40	39,1	35,2	1,47	36,0	35,4	1,54	33,0	2,5	32,3	34,6	36,0	1
N3-4	27,4	1,40	39,1	33,1	1,47	36,0	30,8	1,54	33,0	26,4	32,3	34,6	36,0	72
N4-1	28,2	1,05	54,3	28,3	1,11	50,0	34,1	1,44	37,3	47,9	20,1	25,0	33,4	1
N4-2	26,8	1,02	55,6	26,0	1,05	54,3	35,2	1,39	39,5	51,7	20,1	25,0	33,4	23
N4-3	27,3	1,02	55,6	26,3	1,05	54,3	31,5	1,39	39,5	50,7	20,1	25,0	33,4	1
N4-4	22,6	1,07	53,4	26,0	1,16	49,5	34,8	1,44	37,3	57,5	20,1	25,0	33,4	72
N7-1	28,6	1,13	50,8	28,5	1,25	45,6	34,8	1,59	30,8	43,6	22,9	30,0	33,6	1
N7-2	25,2	1,13	50,8	25,3	1,25	45,6	32,7	1,59	30,8	50,2	22,9	30,0	33,6	1
N7-3	25,9	1,13	50,8	27,8	1,25	45,6	33,4	1,59	30,8	49,0	22,9	30,0	33,6	10
N7-4	17,6	1,13	50,8	21,9	1,25	45,6	32,5	1,59	30,8	65,3	22,9	30,0	33,6	30
N8-1	30,2	1,19	48,2	31,9	1,57	31,7	31,3	1,57	31,7	37,2	22,9	30,0	33,6	1
N8-2	27,0	1,13	50,8	23,2	1,25	45,6	31,3	1,59	30,8	46,8	22,9	30,0	33,6	1
N8-3	12,4	1,13	50,8	19,0	1,25	45,6	27,6	1,59	30,8	75,5	22,9	30,0	33,6	144
N8-4	22,5	1,13	50,8	22,9	1,25	45,6	31,3	1,59	30,8	55,7	22,9	30,0	33,6	14
N8b-1	12,6	1,09	52,6	27,6	1,38	40,0	29,6	1,46	36,5	76,0	22,8	33,0	35,4	168
N8b-2	24,0	1,09	52,6	28,8	1,38	40,0	26,4	1,46	36,5	54,3	22,8	33,0	35,4	1
N8b-3	21,5	1,09	52,6	29,8	1,38	40,0	28,7	1,46	36,5	58,9	22,8	33,0	35,4	24
N8b-4	25,7	1,09	52,6	29,4	1,38	40,0	28,7	1,46	36,5	51,1	22,8	33,0	35,4	1

- soit un rapide ressuyage, ce qui est peu probable à cause de la texture relativement fine
- soit à cause de l'air piégé dans les vides du sol (TOPP et MILLER, 1966 ; SMITH et BROWNING, 1942 ; WELLS et SKAGGS, 1976 et BRAKENSIEK et al, 1977). La compression de l'air peut entraîner l'éclatement des agrégats (VALENTIN, 1981 ; BOIFFIN, 1984), qui est à l'origine de la formation d'une croûte de battance.

d/ Les profils hydriques :

Pour suivre l'évolution du front d'humectation, des échantillons de terre ont été prélevés jusqu'à 40 cm de profondeur, parfois même jusqu'à 60 cm par tranche de sol (0-5 cm ; 5-10 cm ; 10-20 cm ; 20-30 cm ; 30-40 cm ; 40-50 cm ; 50-60 cm) et ceci avant et juste après la pluie. La figure 11 et les figures 1 à 8 en annexe, montrent que :

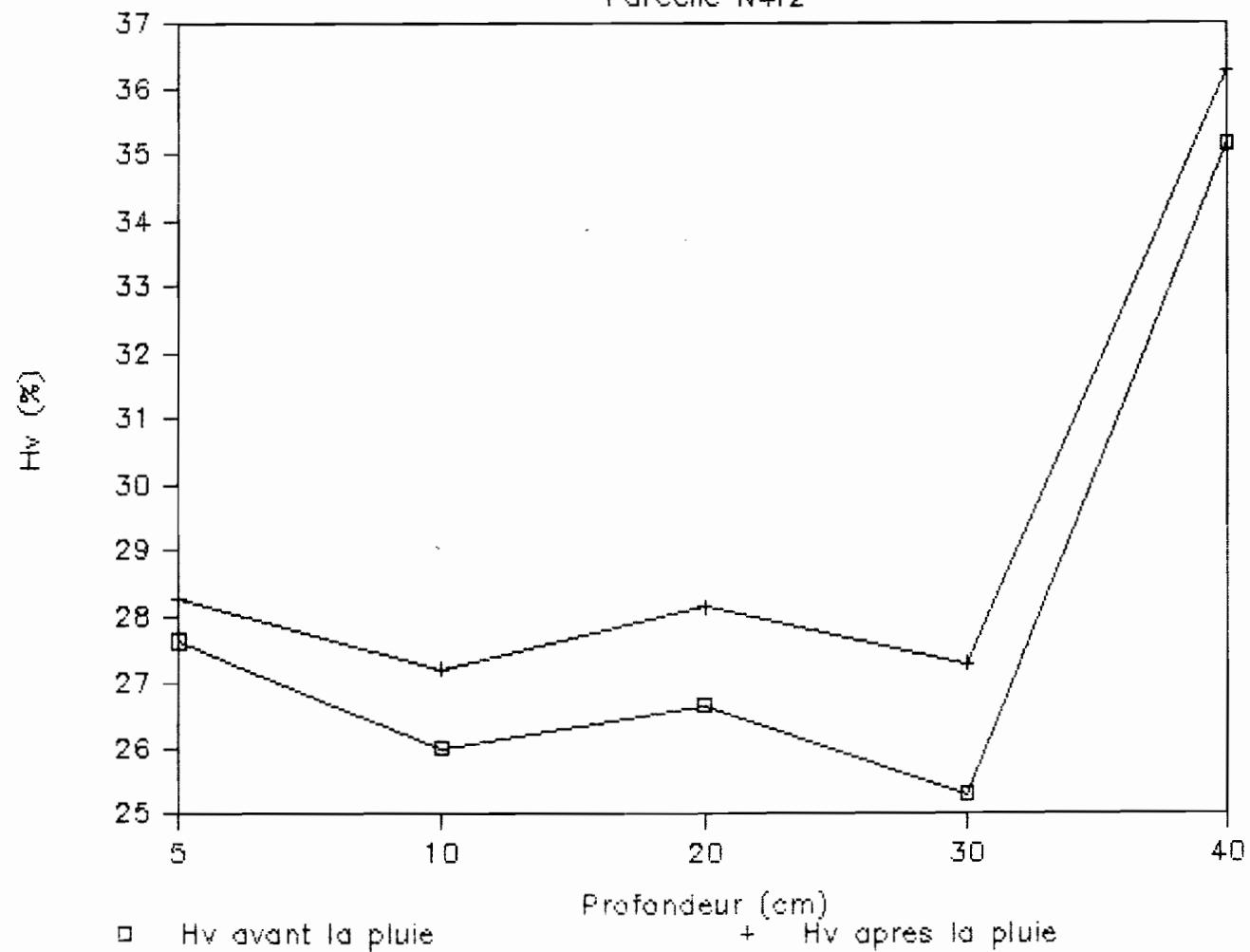
- sur les témoins N1 et N5, le front d'humectation semble progresser au delà de 40 cm ; la semelle de labour située à 30 cm ne semble pas freiner sa propagation. Idem pour les traitements N4 et N2b.
- sur le traitement tassé une fois (N2), le front d'humectation va au-delà de 40 cm ; l'effet d'un seul tassement ne semble pas représenter un frein à l'infiltration de l'eau.
- sur le traitement tassé deux fois (N3), le front d'humectation est freiné à 10 cm et probablement bien avant ; le lit de semence repose sur une sorte de dalle et on a remarqué sur le terrain un écoulement hypodermique à la base du lit de semence.
- sur les traitements N7 et N8 le front avance régulièrement sauf sur la parcelle N8-1 où il est continuellement freiné à partir de 8 cm, ce qui semble indiquer que cette parcelle est située sur un ancien chemin (DEUMIER).

3.4.1.3 - Les analyses physico-chimiques

Des analyses physico-chimiques ont été réalisées dans le cadre de cette campagne, mais leurs résultats ne nous sont pas encore parvenus. Nous nous contenterons ici de présenter ceux disponibles à l'ITCF de Baziège. Les tableaux 7 et 8 montrent que ces sols sont argilo-limoneux ou limono-argileux, riches en éléments fins (argile + limon \approx 70 %). La proportion d'argile et de limon fin est plus importante en surface qu'en profondeur alors que la fraction plus grossière (limon grossier et sable fin) est plus importante en profondeur. L'humidité à $pF = 2,7$ est voisine de l'humidité à capacité au champ obtenue sur le terrain (29 % contre 27 %).

PROFIL HYDRIQUE

Parcelle N4r2



Le taux de matière organique est faible (1,7 %) et les rapports C/N (8 à 9) indiquent la présence d'une matière organique évoluée. La capacité d'échange cationique est élevée, du fait de la forte teneur en argile.

Tableau 7 : Analyse physico-chimique sur le versant ; service ITCF

horizon cm	A %	LF %	LG %	SF %	SG %	EL 2mm %	h % pF	pH eau	M.O %	C/N	Calcaire total %	Calcaire actif %
0-35	34	26	10	17	11	5	29	7,7	1,7	9	6,6	2,0
35-80	31	24	14	20	10	8	27	7,7	0,8	4	7,0	1,2
80-140	33	24	14	19	10	7	27	7,6				

Tableau 8 : Analyse physico-chimique sur le plateau ; source ITCF

horizon cm	A %	LF %	LG %	SF %	SG %	EL 2mm %	h % pF	pH eau	M.O %	C/N	Calcaire total %	Calcaire actif %
0-40	29	21	16	18	14	6	29	7,8	1,7	8	11	6,0
40-70	19	35	20	15	11	4	30	8,0			46	20,9

La fraction (limon grossier + sable fin + sable grossier) est plus importante sur le plateau que sur le versant.

Les tests de stabilité structurale à NARBONS donnent une stabilité structurale médiocre, ($\log_{10} S = 1,28$ à 1,3) sur le plateau et ($\log_{10} S = 1,35$) sur le versant (I.T.C.F., 1984)

L'analyse des spectres de diffraction des rayons X obtenus à partir des fractions argileuses (0-2 μ) et limoneuses (2-20 μ), complétée par l'étude des effets de traitements particuliers (éthylène-glycol ; chlorure de potassium ; chauffage à 500° C pendant 2 h) et par la détermination de la capacité d'échange cationique de la fraction argileuse montre : (DEUMIER et ROOSE, 1985)

- les sols étudiés renferment dans leurs fractions fines, de la silice
- ces sols renferment également de faibles quantités de kaolinite mal cristallisée et dont la contribution à la capacité d'échange cationique est négligeable
- les illites sont nettement plus abondantes dans la fraction limoneuse que dans la fraction argileuse
- les smectites (montmorillonites) sont, avec les illites, les deux minéraux phylliteux les plus abondants. Des vermiculites et des chlorites gonflants mal cristallisées sont associées en proportions variables aux smectites.

3.4.2. - Présentation des résultats bruts :

L'essentiel des résultats sont représentés sur le tableau 9 où :

- la 1^e colonne indique le nom de la parcelle qui est codifié (N = Narbons = nom du lieu) ; le 1^e chiffre indique le numéro du traitement et le 2^e chiffre indique le numéro de la répétition
- I : représente l'intensité de la pluie en mm.h^{-1}
- Pi : représente la hauteur de pluie d'imbibition : c'est la lame d'eau infiltrée avant l'apparition du ruissellement, en mm
- KR : représente le coefficient de ruissellement : c'est la hauteur de la lame ruisselée sur la hauteur de pluie tombée

On distinguera : KR40 = $\frac{\text{hauteur cumulée ruisselée pour } 40 \text{ mm de pluie tombée}}{\text{en \%}}$ $\frac{40}{}$

KR60 = $\frac{\text{hauteur cumulée ruisselée pour } 60 \text{ mm de pluie tombée}}{\text{en \%}}$ $\frac{60}{}$

- FN : représente l'intensité d'infiltration minimale, en régime permanent en mm.h^{-1}

- C : la charge solide ou turbidité des eaux de ruissellement.

On distinguera : Cm = charge solide moyenne, en g.l^{-1}

Cmax = charge solide maximale, en g.l^{-1}

- E : représente les transports solides (érosion en nappe) en g.m^{-2}

On distinguera : E₄₀ = débit solide cumulé pour 40 mm de pluie tombée

E₆₀ = débit solide cumulé pour 60 mm de pluie tombée

Tableau 9 : Résultats bruts

Code parcelle	I mm.h ⁻¹	P ₁ mm	KR %		F _N mm.h ⁻¹	C g.l ⁻¹		E g.m ⁻²	
			40 mm	60 mm		moyenne	maximale	40 mm	60 mm
N1-1	42	47,3	0	0	43	1,6	1,8	0,0	0
N1-2	36	24,0	5	15	17	7,2	7,5	14,4	65
N1-3	39	19,3	21	42,5	6	8,8	13,2	74,8	224
N1-4	45	6,4	48	69,1	9	6,2	9,2	121,0	257
N2-1	38	11,0	52	63,3	5	20,2	29,0	424,0	667
N2-2	41	13,4	75	96,6	12	4,4	7,3	132,0	255
N2-3	43	14,5	27	39,1	14	33,0	44,9	356,0	774
N2-4	35	17,6	36	52,5	5	4,1	8,0	59,0	129
N3-1	38	4,2	69	74,1	5	0,8	1,2	22,0	35
N3-2	39	2,8	75	80,0	3	3,6	6,3	108,0	173
N3-3	42	2,3	61	69,1	5	15,4	28,3	376,0	638
N3-4	37	9,4	62	71,6	1	1,9	9,5	47,0	81
N4-1	37	17,1	17	33,3	11	6,3	7,0	43,0	126
N4-2	36	13,9	30	47,5	5	11,9	34,1	143,0	339
N4-3	36	15,4	25	41,6	7	13,9	35,5	139,0	347
N4-4	39	20,8	5	16,6	8	3,9	5,2	8,0	39
N5-1	43	24,0	3	20,0	10	-	-	-	-
N5-2	44	12,7	42	55,0	8	15,7	24,8	263,0	518
N5-3	37	18,5	15	29,1	12	20,9	35,6	126,0	365
N7-1	35	12,2	30	42,5	9	10,0	25,0	20,0	255
N7-2	35	15,5	25	40,0	7	41,5	85,5	415,0	996
N7-3	38	13,2	26	41,6	9	21,0	34,6	218,0	524
N7-4	39	16,0	22	34,1	15	23,8	36,5	209,0	487
N8-1	39	10,8	27	40,0	11	5,9	15,1	64,0	141
N8-2	41	9,9	34	45,0	13	16,3	32,1	215,0	440
N8-3	40	13,8	30	43,3	10	27,2	43,3	326,0	706
N8-4	38	5,8	50	66,6	6	18,8	43,1	376,0	751
N2b-1	40	39,6	0	7,5	11	4,4	6,6	0,0	198
N2b-2	39	18,6	17	36,6	6	6,0	10,4	41,0	131
N2b-3	43	10,7	45	59,1	4	11,6	18,4	208,0	411
N2b-4	37	12,3	26	40,0	12	14,6	25,5	152,0	350
P1	36	16,3	25	42,5	7	1,9	2,4	19,0	48
P2	42	13,4	25	42,5	8	2,7	4,1	27,0	69
P3	39	12,2	41	52,5	7	3,4	4,0	55,0	107
P4	36	23,8	2	10,0	24	2,0	2,2	1,0	49
P5	41	16,2	18	40,8	4	1,5	2,0	11,0	36
P6	38	38,3	0	5,0	17	1,3	1,7	0,0	39
P7	50	14,3	20	36,6	10	2,0	4,2	16,0	44
P8	52	10,7	37	51,6	9	2,0	2,7	29,0	62
P9	52	25,2	5	25,0	13	2,1	2,5	4,0	31
P10	84	12,6	19	37,5	5	2,4	8,9	17,0	54
P11	80	15,6	28	45,8	6	2,4	3,9	27,0	66
P12	89	9,4	53	65,0	4	2,1	47,5	45,0	82
P13	84	17,2	22	39,1	6	3,0	18,1	26,0	70

Les figures 12 et 13 représentent un hyéogramme, un hydrogramme de ruissellement et un turbidigramme, expérimentaux.

Le travail d'interprétation va consister à confronter les paramètres hydrodynamiques (P_i , KR, FN) et mécaniques (Cm, E) (tableau 9) avec les variables et paramètres descriptifs de l'état initial (temps de ressuyage et déficit de saturation, granulométrie des mottes, indice de rugosité, pente, cailloux, résidus de culture) (tableau 4).

3.4.3 - Traitemet statistique :

L'ensemble des données de terrain (paramètres hydrodynamiques et mécaniques et facteurs et variables descriptifs des états de surface (cf listing) ont fait l'objet d'une analyse statistique qui nous servira surtout de guide dans la recherche de tendances générales du comportement de toutes les parcelles confondues avant d'étudier la variabilité du comportement selon les traitements et les causes de celle-ci.

3.4.3.1 - Etude des corrélations simples

Le tableau 10 montre l'ensemble des corrélations simples entre les variables hydrodynamiques et mécaniques et les facteurs et variables descriptifs des états de surface. Cette matrice a été obtenue sur 45 observations (parcelles) dont 8 appartenant à la campagne de 1985 (DEUMIER, ROOSE ; 1985). Toutes ces parcelles ont reçu une pluie de 40 mm.h^{-1} environ et ne diffèrent que par leur état de surface ainsi que l'état hydrique initial. Les coefficients de corrélation sont faibles à moyens dans l'ensemble. Nous ne considérerons que ceux qui sont significatifs à 1 % au minimum, c'est à dire dont le 2^e chiffre est $\leq 0,01$.

Trois points essentiels se dégagent de cette matrice. Le schéma ci-dessous résume la matrice du tableau 10.

	Δi	IR	$D < 3$	$D > 3$
P_i	+	-	+	-
KR40 ou KR60	-	+	-	+
ER40 ou ER60	-	+	-	+
FN	+		-	+

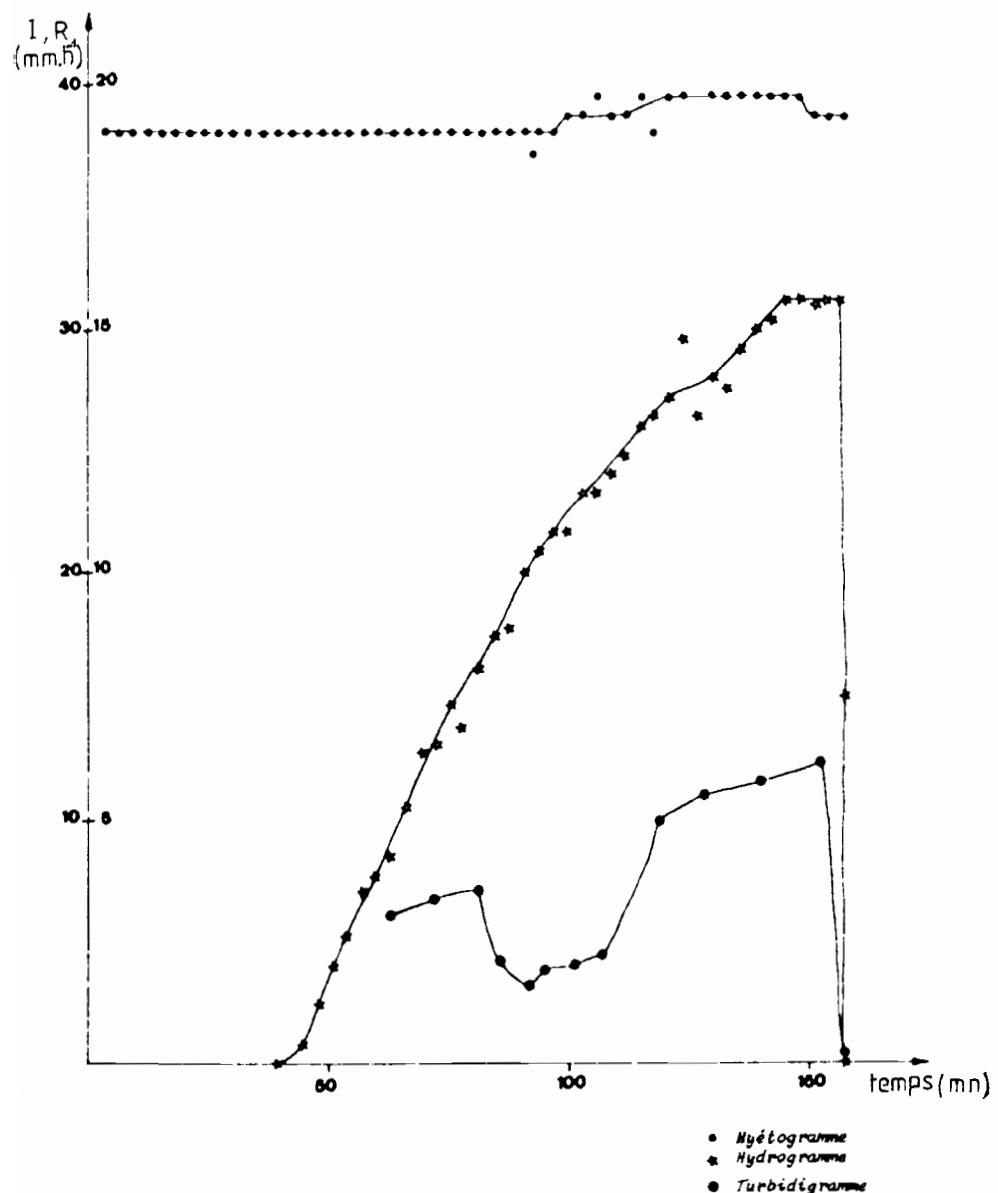


Fig. 12 : Hyéogramme, hydrogramme et turbidigramme au cours d'un orage simulé : parcelle N4-4

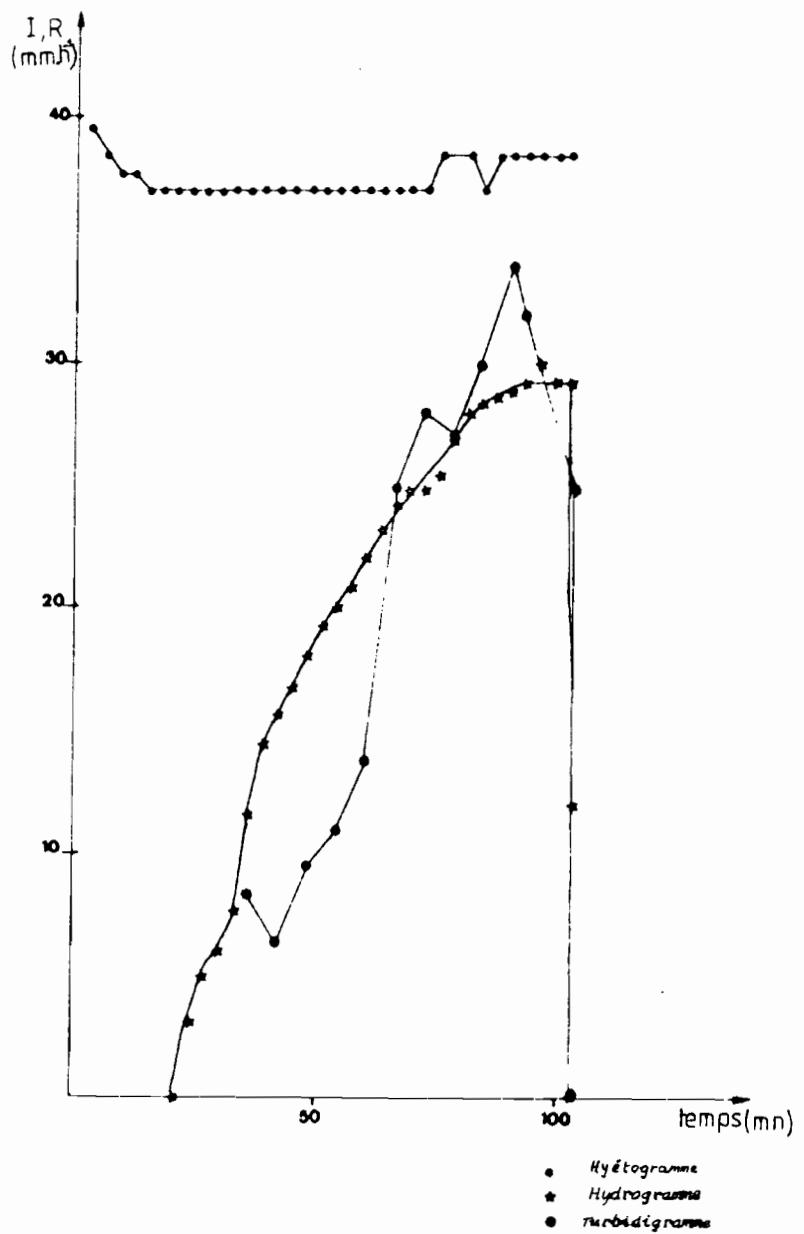


Fig. 13 : Hyéogramme, hydrogramme et turbidigramme au cours d'un orage simulé : parcelle N7-3

Tableau 10 : Matrice de corrélation : essai travail du sol

	Pente	Caill	Résid	IR	Pi	KR60	BR60	KR40	BR40	D ₁	I	R _x	PN	D<0,5	D ₁ ⁺	D ₃	D ₃ ⁺	D ₅	D ₈	Δ ₁
D ₁	-0,18 0,36	0,28 0,30	0,07 1,00	-0,17 0,52	0,59 0,00	-0,63 0,00	-0,07 1,00	-0,71 0,00	-0,22 0,07	0,10 0,99	-0,14 0,82	-0,40 0,00	0,76 0,30	0,21 0,00	1,44 0,00	0,37 0,00	-0,40 0,00	-0,14 0,76	0,76 0,00	
D ₁ ⁺	0,05 1,00	-0,12 0,97	-0,15 0,80	-0,20 0,16	-0,04 1,00	-0,05 1,00	0,01 1,00	-0,00 1,00	-0,08 1,00	0,14 0,85	-0,24 0,22	-0,16 0,60	0,03 1,00	-0,36 0,00	-0,53 0,30	-0,73 0,00	-0,76 0,00	0,85 0,00		
D ₃	0,23 0,34	-0,26 0,00	0,37 0,00	-0,07 1,00	0,04 1,00	0,04 1,00	0,11 0,98	0,00 1,00	0,13 0,94	-0,18 0,39	-0,15 0,34	0,24 1,00	-0,57 0,00	-0,72 0,00	-0,83 0,00	0,88 0,00				
D ₃ ⁺	0,39 0,00	-0,33 0,00	-0,34 0,00	0,61 0,00	-0,32 0,00	0,46 0,00	0,09 0,99	0,46 0,00	0,12 0,94	0,09 0,99	-0,13 0,93	0,02 1,00	-0,09 1,00	-0,65 0,00	-0,96 0,00	-0,93 0,00				
D ₅	-0,23 0,02	0,15 0,72	0,07 1,00	-0,49 0,00	0,32 0,00	-0,42 0,00	-0,00 1,00	-0,42 0,00	-0,03 1,00	-0,00 0,22	0,19 1,00	0,02 1,00	0,07 1,00	0,59 0,00	0,88 0,00					
D ₅ ⁺	-0,48 0,30	0,29 0,00	0,29 0,00	-0,63 0,00	0,30 0,00	-0,46 0,00	-0,09 0,99	-0,46 0,00	-0,14 0,81	-0,09 0,99	0,10 0,99	-0,30 1,00	0,35 1,00	0,78 0,00						
D ₈	0,41 0,00	0,24 0,01	0,32 0,00	-0,49 1,00	-0,06 0,96	-0,12 1,00	0,02 0,96	-0,24 1,00	-0,01 0,01	0,00 1,00	0,01 1,00	0,30 0,00	-0,30 0,00							
PN	-0,18 0,35	0,02 1,00	0,06 0,96	-0,12 0,00	0,71 0,00	-0,63 0,00	-0,18 0,27	-0,54 0,00	-0,21 0,06	-0,05 1,00	0,09 0,99	-0,93 0,00								
R _x	0,20 0,13	-0,00 1,00	-0,10 0,99	0,17 0,48	-0,71 0,00	0,67 0,00	0,27 0,00	0,59 0,30	0,32 0,00	0,10 0,99	0,25 0,00									
I	0,36 1,00	0,05 0,95	-0,12 0,87	0,14 1,00	-0,07 0,16	0,19 0,00	0,26 0,00	0,19 0,18	0,31 0,00	0,15 0,76										
OM	0,37 0,00	-0,01 1,00	-0,39 0,00	0,26 0,00	-0,27 0,00	0,07 1,00	0,98 0,00	0,05 1,00	0,93 0,00											
BR40	0,38 0,00	-0,06 1,00	-0,36 0,00	0,28 0,00	-0,47 0,00	0,42 0,00	0,96 0,00	0,42 0,00												
KR40	0,36 0,00	-0,19 0,23	-0,26 0,14	0,34 0,00	-0,78 0,00	0,97 0,00	0,29 0,00													
BR60	0,40 0,00	-0,07 1,00	-0,39 0,00	0,26 0,00	-0,40 0,00	0,31 0,00														
KR60	0,35 0,00	-0,20 0,19	-0,19 0,19	0,33 0,00	-0,82 0,00															
Pi	-0,25 0,00	0,11 0,98	0,01 1,00	-0,32 0,00																
IR	0,56 0,00	-0,43 0,00	-0,45 0,00																	
Résid	-0,75 0,00	0,31 0,00																		
Caill	-0,20 0,11																			
Pente																				

D_{0,5} = taux de surface fermée - taux de mottes > 0,5 cm

D₁⁺ = D_{0,5} + taux de mottes comprises entre 0,5 et 1 cm

D₃⁺ = D₁⁺ + taux de mottes comprises entre 1 et 3 cm

D₅⁺ = taux de mottes > 3 cm

D₈⁺ = taux de mottes > 5 cm

D₁₀⁺ = taux de mottes > 8 cm

Pente : Inclinaison de la pente en %

Caill : taux de cailloux en %

Résid.: résidus de culture en %

Rugos : indice de rugosité en %

KR : coefficient de ruissellement en %

Pi : hauteur de pluie d'insuffisance en mm

BR : débit solide ou érosion en nappe en g.m⁻²

OM : charge solide moyenne en g/l

I : Intensité de la pluie en mm/h

R_x : intensité maximale de ruissellement en régime permanent, mm/h

PN : - - - - - d'infiltration en régime permanent, mm/h

i : déficit de saturation de l'horizon 0-10 cm

- un fait classique : il existe une relation positive entre la hauteur de pluie d'imbibition P_i et le déficit de saturation Δ_i (fig.14), et en conséquence, une relation négative entre le déficit de saturation Δ_i et les variables liées négativement à P_i (KR40 ou KR60 et ER40 ou ER60). Ainsi la lame d'eau infiltrée avant l'apparition du ruissellement est d'autant plus importante que le sol est sec (AHUJA, DANNER et EL-SWAIFY, 1976 ; VALENTIN, 1981). Le ruissellement et les débits solides sont d'autant plus faibles que le déficit de saturation du sol est élevé.

- un fait paradoxal : on remarque une relation négative entre P_i et l'indice de rugosité (et par conséquent le taux de grosses mottes) et tout ce qui en découle (relation positive entre KR40 ou KR60 et ER40 et ER60 avec l'indice de rugosité IR et le taux de grosses mottes). Ceci peut paraître contradictoire avec l'idée couramment admise que le ruissellement et les transports solides sont plutôt freinés par la présence de grosses mottes et donc d'une surface rugueuse. Mais ceci trouve sa justification dans :

* l'effet de tassement : les parcelles les plus rugueuses, outre les parcelles du témoin (N1) sont les parcelles tassées (traitement tassé deux fois, N3) où le mauvais ressuyage entraîne une humidité initiale forte et donc un fort ruissellement, une faible pluie d'imbibition et une faible intensité d'infiltration finale FN.

* certaines parcelles non arrosées (N1-1, N2-4, N2b-1, P1-6) donc sèches et à faible ruissellement, sont les moins rugueuses.

* l'ajout de grosses mottes sur le traitement N7 a augmenté la rugosité sans pour autant diminuer le ruissellement. Ce traitement se comporte en fait comme les traitements fins N4 et N8.

- une question : pourquoi la relation FN- Δ_i est-elle positive ?

L'infiltration finale FN est le seul paramètre hydrodynamique avec Rx (intensité de ruissellement maximal) qui n'intègre pas la phase d'imbibition dans sa détermination ; elle peut donc nous renseigner sur l'influence des états structuraux de surface (granulométrie, rugosité) sur l'infiltration en régime permanent.

Mais la matrice des corrélations montre que FN est liée positivement avec le déficit de saturation Δ_i . Cette relation peut être expliquée par le contraste entre les parcelles non tassées et les parcelles tassées ; celles-ci sont caractérisées par de faibles valeurs de FN suite au tassement et au mauvais ressuyage qui en découle, contrairement aux premières (parcelles non tassées).

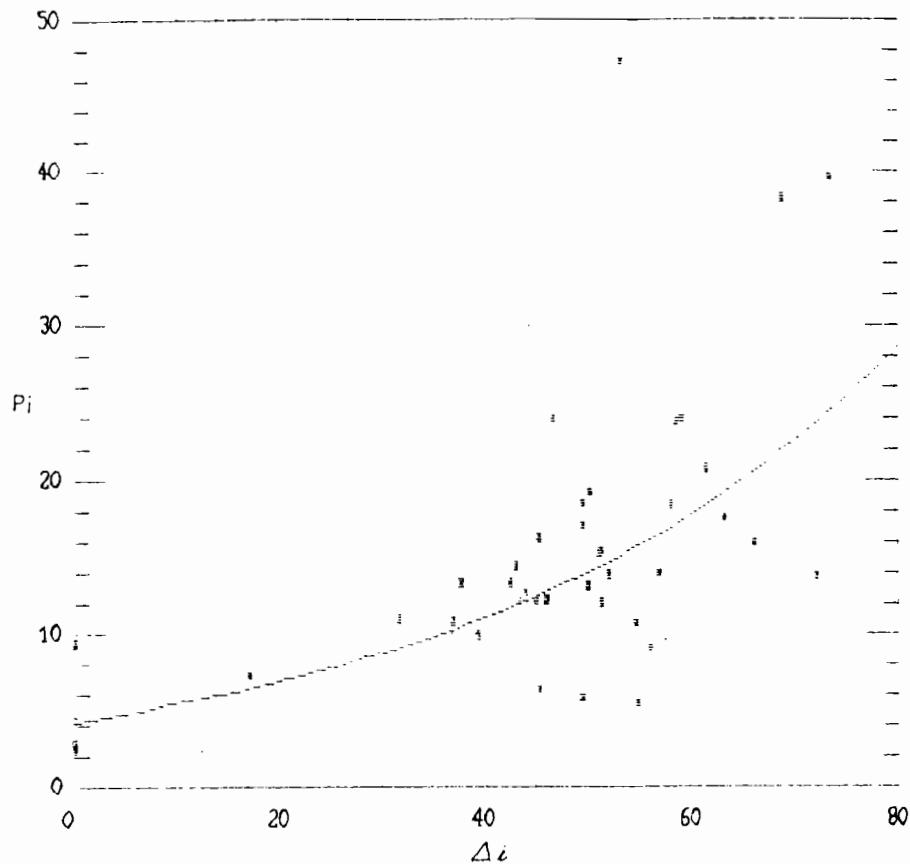


Fig 14 : Evolution de la hauteur de pluie d'imbibition en fonction du déficit de saturation de l'horizon de surface.

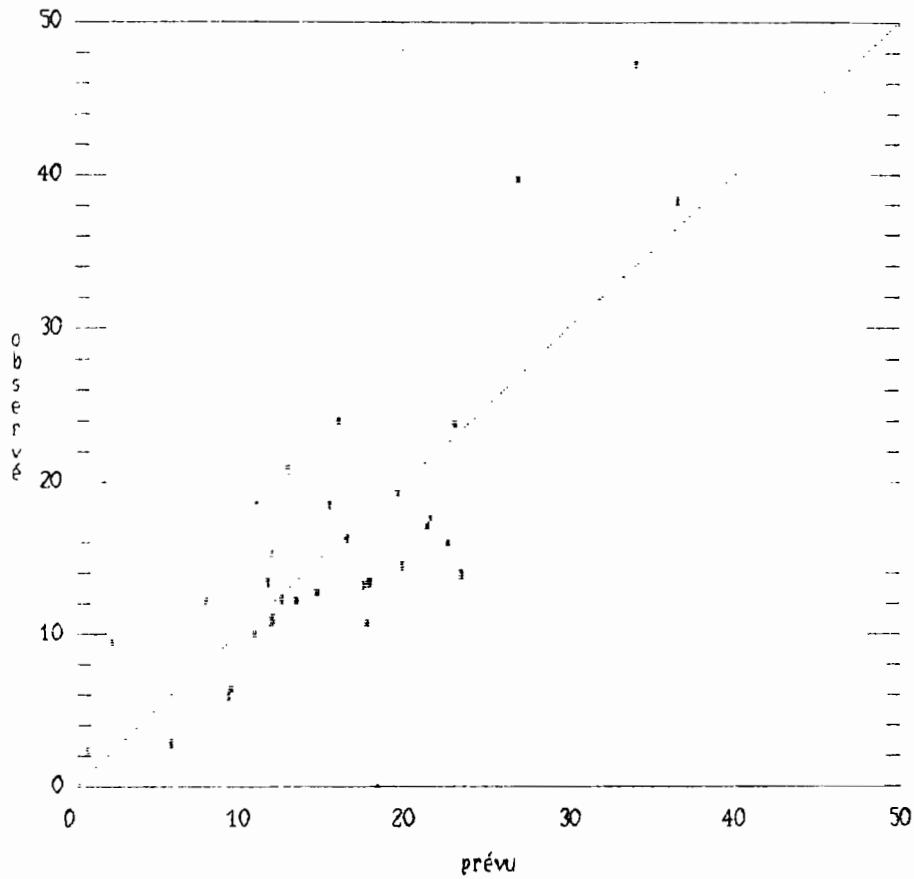


Fig 15 : Evolution de la hauteur de pluie d'imbibition en fonction du taux de mottes < 0,5 cm, du déficit de saturation Δi , du taux de résidus et de la puante.

L'influence des états structuraux de surface sur FN est mise en évidence par les relations entre FN et le taux de mottes inférieures à 0,5 cm ($D < 0,5$) (corrélation négative). L'infiltration en régime permanent est réduite lorsque le lit de semence est constitué d'éléments structuraux fins car ces derniers sont plus sensibles à la battance des gouttes de pluie.

La plupart des auteurs insistent sur l'importance qu'il y a d'éviter de pulvériser la surface du sol lors de la préparation du lit de semence (MANNERRING, MEYER et JOHNSON, 1966 ; MASSON, 1971).

3.4.3.2 - Etude des corrélations multiples :

L'utilisation de la méthode des régressions multiples avec une sélection hiérarchique des variables nous a permis de dégager quelques relations intéressantes.

a/ La hauteur de pluie d'imbibition :

$$Pi = 45,5 - 0,31 D < 0,5 \text{ cm} + 0,2 \Delta i - 1,1 \text{ pente} + 1,41 \text{ résidus} \text{ (fig. 15)}$$

$$R^2 = 0,6 \quad ; \quad n = 33$$

Pour augmenter la hauteur de pluie d'imbibition, il faut diminuer le taux de mottes $< 0,5$ cm ($D < 0,5$ cm), et la pente et augmenter le taux de résidus de culture ainsi que l'état de sécheresse du sol (fig. 15). En effet, une diminution de la pente provoque une augmentation de la phase d'imbibition car elle accroît la capacité de stockage superficiel.

b/ Le coefficient de ruissellement :

Puisqu'il s'agit surtout des risques d'orages de 40 mm, on parlera surtout de KR40.

$$KR40 = 53,8 - 0,76 \Delta i + 0,84 \text{ pente. (fig. 16)}$$

$$R^2 = 0,53 \quad ; \quad n = 33$$

La seule classe de mottes susceptible d'expliquer KR40 est $D < 0,5$ cm mais son introduction dans le modèle réduit le coefficient de détermination R^2 et par là même la fiabilité de la relation.

Ainsi KR40 dépend essentiellement du déficit de saturation initial et de la pente ; les variantes testées de lit de semence ne semblent pas intervenir de façon significative, sans doute parce que la différenciation des lits de semence ou état de surface n'était pas nette. Cette analyse ne fait pas ressortir l'importance majeure du volume ruisselé.

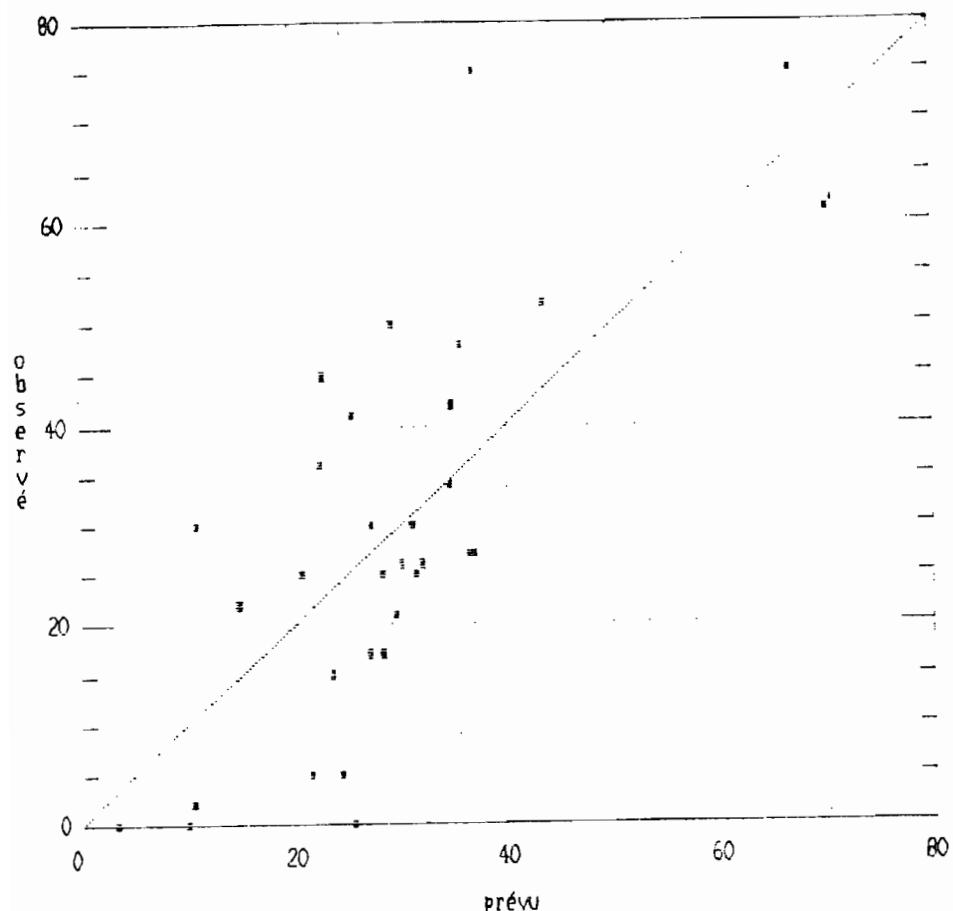


Fig 16 : Evolution du coefficient de ruissellement KR40 en fonction du déficit de saturation Δi et de la pente.

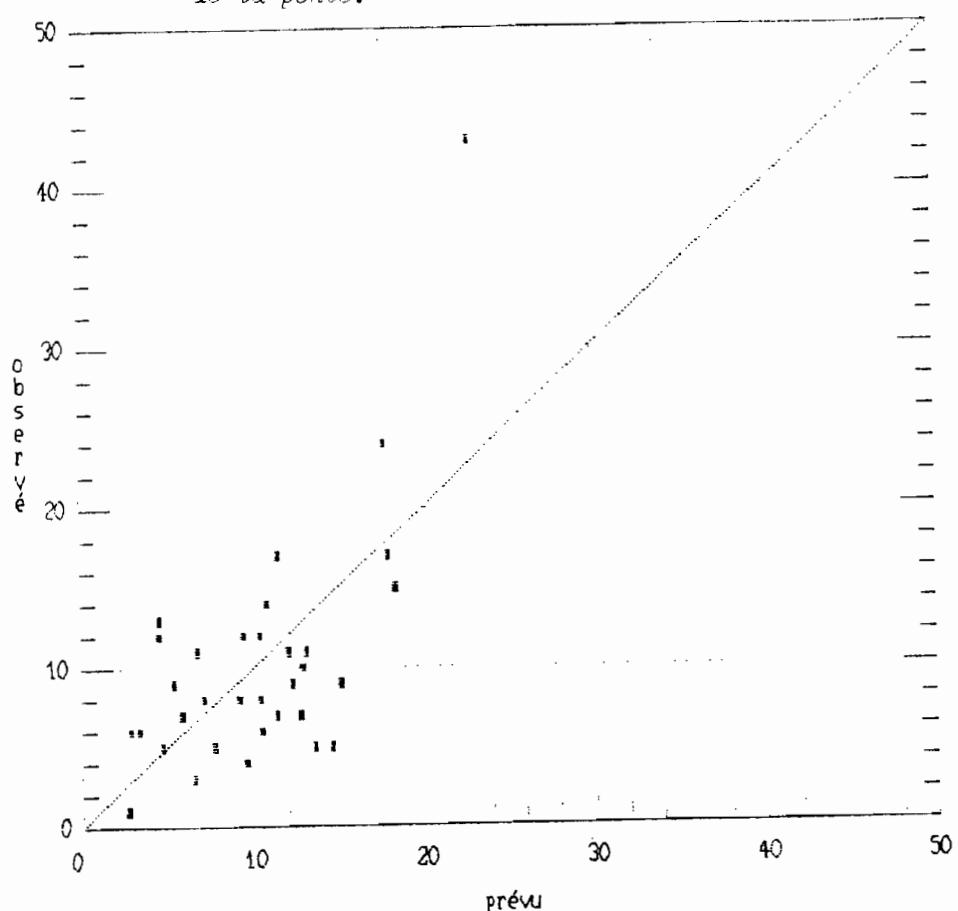


Fig 17 : Evolution de l'intensité d'infiltration minimale FN en fonction du taux de mottes < 0,5 cm, du déficit de saturation Δi et de la pente.

c/ L'intensité d'infiltration en régime permanent :

$$FN = 22,11 - 0,22 D < 0,5 + 0,17 \Delta i - 0,55 \text{ pente} \quad (\text{fig. 17})$$

$$R^2 = 0,40 ; n = 33$$

L'intensité d'infiltration finale est défavorisée par la classe de mottes < 0,5 cm ($D < 0,5$) donc par un lit de semence à éléments structuraux fins, par une forte pente et par le tassement qui entraîne comme on l'a déjà vu, de faibles déficits de saturation initiaux).

d/ La turbidité des eaux de ruissellement :

La charge solide moyenne ne semble être influencée que par la pente du terrain. Les variations de C_m s'ajustent le mieux selon une fonction multiplicative du type :

$$C_m = 0,85 \text{ pente}^{0,8} \quad R^2 = 0,30 \quad n = 33$$

La charge solide moyenne tend à augmenter avec la pente mais cette relation n'est expliquée qu'à 30 % car les variations de C_m sont très importantes (fig. 18).

e/ Les débits solides :

$$ER40 = 106,2 - 6,7 D > 8 + 13,4 C_m - 2,2 \Delta i \quad (\text{fig. 19})$$

$$R^2 = 0,8 ; n = 33$$

On voit que le débit solide croît avec la turbidité, mais qu'il est réduit par la présence de forts taux de mottes de diamètre supérieur à 8 cm ($D > 8$) et par l'existence d'un déficit en eau suffisamment élevé.

On constate que le facteur ruissellement n'est pas inclus dans le modèle et que le débit solide semble beaucoup plus contrôlé par la détachabilité que par les volumes ruisselés. L'introduction du terme ruissellement (KR40) dans le modèle à la place de la charge solide moyenne C_m entraîne une chute du coefficient de détermination qui descend de 0,8 à 0,3. Nous remarquerons par la suite que la turbidité dans le Lauragais semble, lors des essais de simulation, évoluer parallèlement avec les volumes ruisselés et ne répond pas au cas fréquemment rencontré (sur sols limoneux de la Sarthe ou sableux du val de Loire) où la turbidité est maximale au début du ruissellement puis chute brutalement et se stabilise avec l'augmentation de la lame ruisselante.

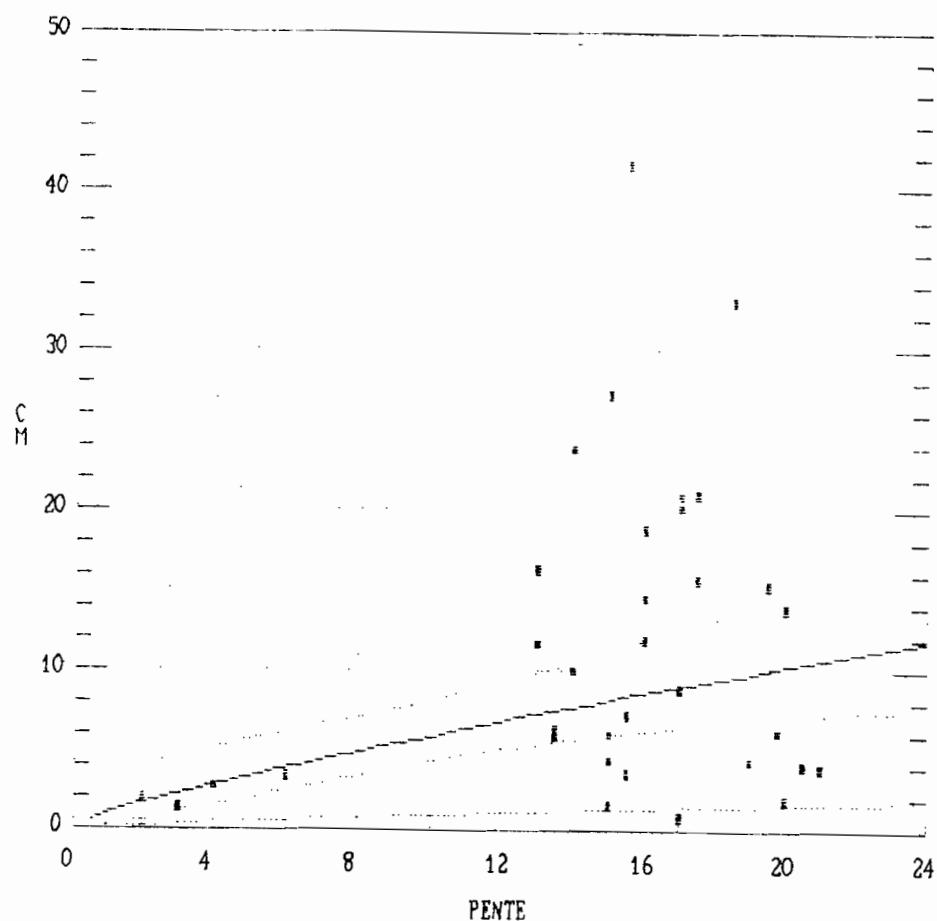


Fig 18 : Evolution de la charge solide moyenne en fonction de la pente.

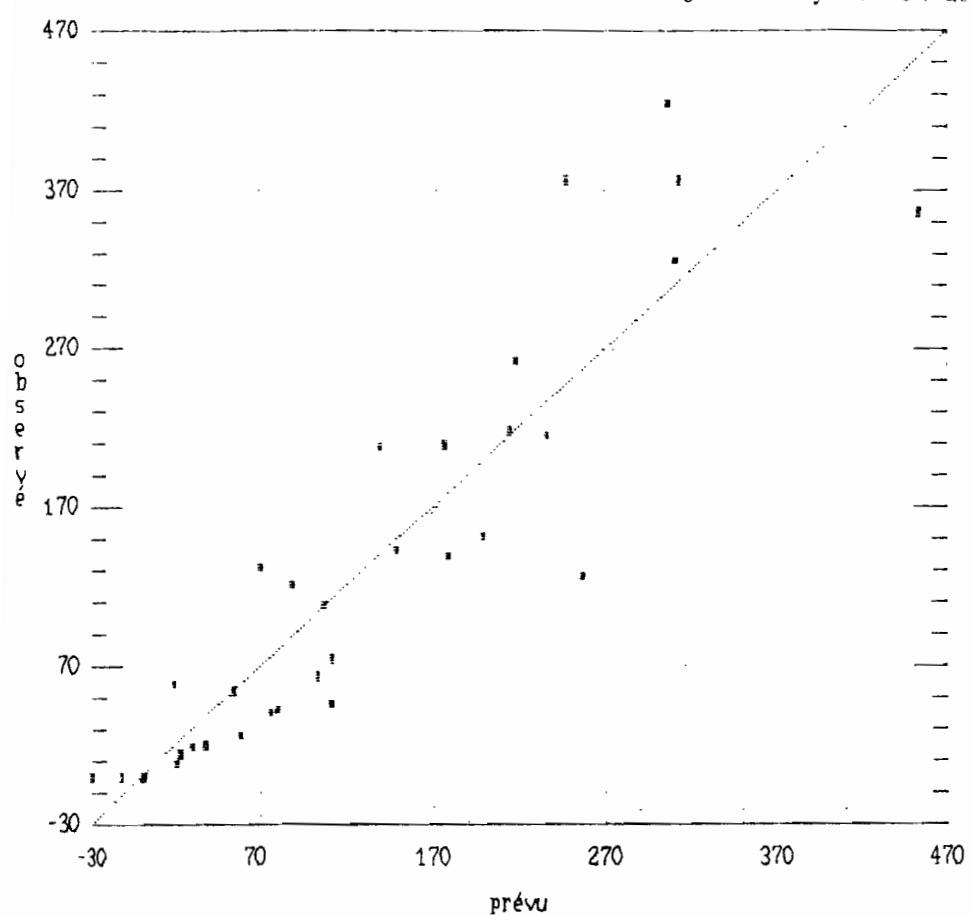


Fig 19 : Evolution du débit solide ER40 en fonction du taux de mottes > 8 cm, de la charge solide moyenne et du déficit de saturation Δi .

3.4.3.3 Conclusion :

Pour réduire les transports solides dans le Lauragais, il faut réduire la charge solide et les volumes ruisselés

- une réduction de la charge solide passe par une diminution de la pente ainsi que celle du rejaillissement par le splash, d'où la nécessité de couvrir le sol par un couvert végétal, des résidus de culture etc...
- la réduction des volumes ruisselés ne peut se faire que par un prolongement de la phase d'imbibition et l'augmentation de l'intensité d'infiltration en régime permanent. Or le prolongement de la phase d'imbibition suppose un sol sec en surface alors qu'une bonne infiltrabilité finale nécessite l'existence de peu de mottes fines en surface et une faible pente.

Les facteurs sur lesquels on peut intervenir pour limiter l'érosion dans le Lauragais sont :

- la pente : réduire la pente par des microbarrages perméables (ROOSE, 1984). Ces derniers représentent un obstacle vis à vis du ruissellement et permettent surtout le piégeage des particules fines transportées par celui-ci.
- la granulométrie des mottes : créer davantage de mottes de 3 à 8 cm de diamètre et peu de mottes fines pour augmenter l'infiltration
- le couvert végétal : couvrir la surface du sol de résidus de culture ou d'engrais verts susceptibles d'améliorer l'infiltrabilité des eaux de pluies tombées aussitôt après le semis, en limitant l'effet de "splash" des gouttes de pluie.

Cependant, une bonne levée des graines a besoin d'un certain pourcentage de terre fine et d'un sol rappuyé. D'où la recherche d'un compromis en créant des mottes fines au niveau de la ligne de semis où on pose les graines et des mottes de 3 à 8 cm au dessus.

- le rouleau tasseur (cultipacker) qui éclate les mottes en surface et donne beaucoup de terre fine, est déconseillé.
- il est souhaitable d'éviter le tassemement par les pneus en limitant le nombre de passages du tracteur.

3.4.4 - Etude de la variabilité inter-traitements des paramètres et variables hydrodynamiques : interprétations et discussions

3.4.4.1 - La hauteur de pluie d'imbibition :

Rappelons que la hauteur de pluie d'imbibition P_i représente la lame d'eau infiltrée jusqu'à l'apparition du ruissellement. Elle suppose donc un apport de pluie suffisant (intensité, hauteur) pour déclencher le ruissellement. Elle dépend, de la texture du sol, de sa structure et de l'état d'humectation de celui-ci.

Pour mettre en évidence cette variabilité, nous allons suivre l'évolution de P_i en fonction du temps de ressuyage (t_a). Pour ceci, on a fait varier ce dernier (t_a). Ainsi, 3 parcelles sur 4 furent arrosées avant l'essai de simulation dont 2 arrosées 1 heure avant l'essai et une 3^e arrosée 12 h environ avant l'essai. La 4^e parcelle a été testée à l'état sec. Cet arrosage s'est effectué sans apport d'énergie pour ne pas dégrader la surface du sol, en utilisant une moustiquaire située à une quinzaine de cm du sol. Mais ceci n'a pas empêché certaines parties des parcelles de s'encroûter.

La fig. 20 représentant l'évolution de P_i en fonction de t_a permet de classer les traitements par ordre de pluie d'imbibition croissante ainsi :

1. - le traitement N3, à éléments structuraux grossiers se détache nettement à cause du double tassement de son labour et de la très faible porosité interne de ses mottes.
2. - le traitement N8, à éléments structuraux fins : la combinaison de la finesse du lit de semence et du léger tassement par le passage du cultipacker justifie les faibles valeurs de P_i sur ce traitement.
3. - L'ajout de grosses mottes sur un lit initialement fin (N7) a augmenté légèrement P_i .
4. - Le traitement N2, à éléments structuraux moins fins, mais tassé une seule fois, présente des valeurs de P_i plus élevées que sur le même traitement mais tassé 2 fois (N3).
5. - Les traitements N4 et N5, à éléments structuraux moyens sont plus favorables à l'infiltration qu'un traitement plus grossier mais tassé (N2 et N3). L'épaississement du lit de semence (N4) n'a pas pour autant augmenté la pluie d'imbibition. Comme quoi, comme l'ont souligné BURWELL et LARSON (1969), le retard apporté au démarrage du ruissellement dépend moins de la profondeur de sol remué que de l'état de la surface du sol (rugosité).

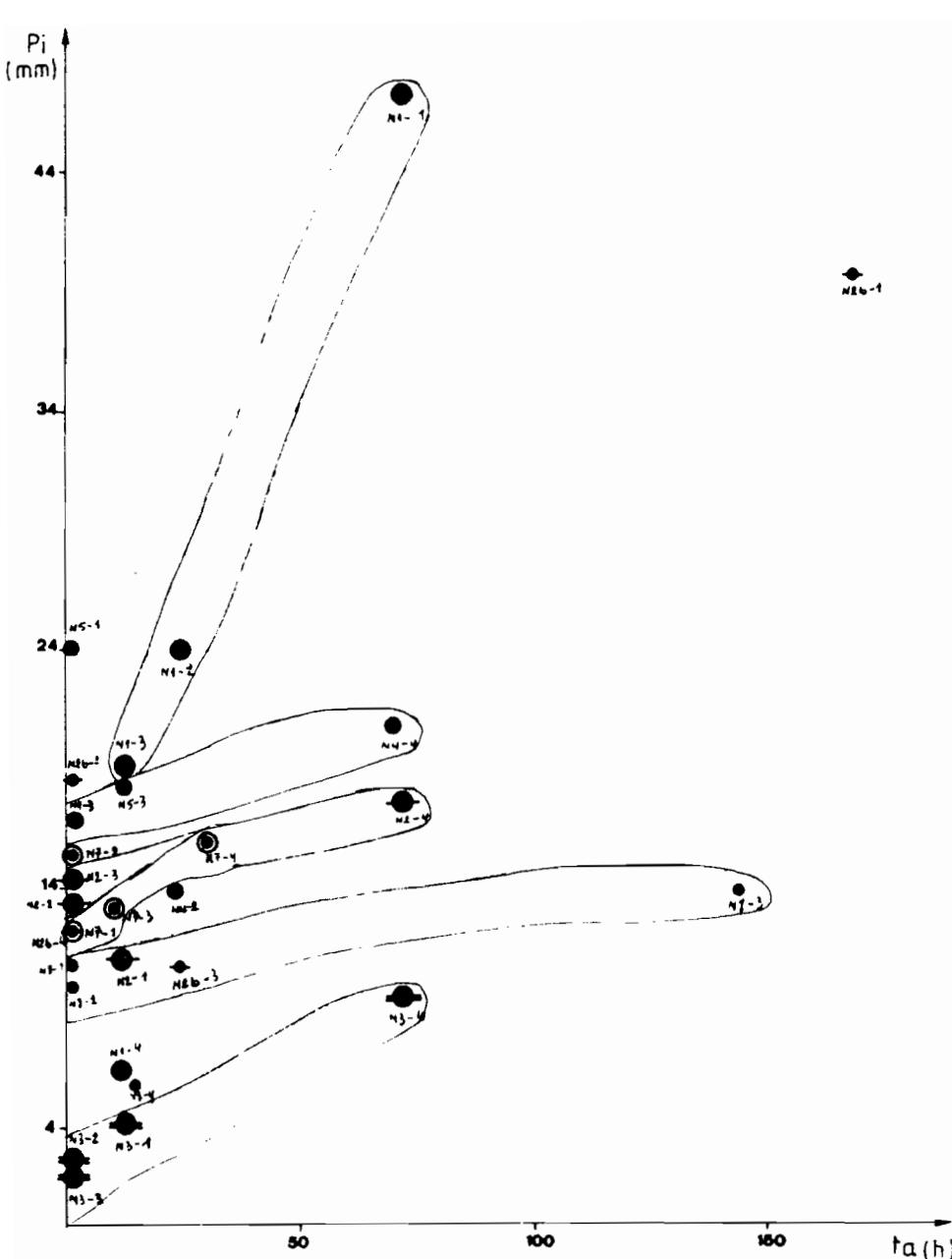


Fig. 20 : Evolution de P_i en fonction du temps de ressuyage t_a

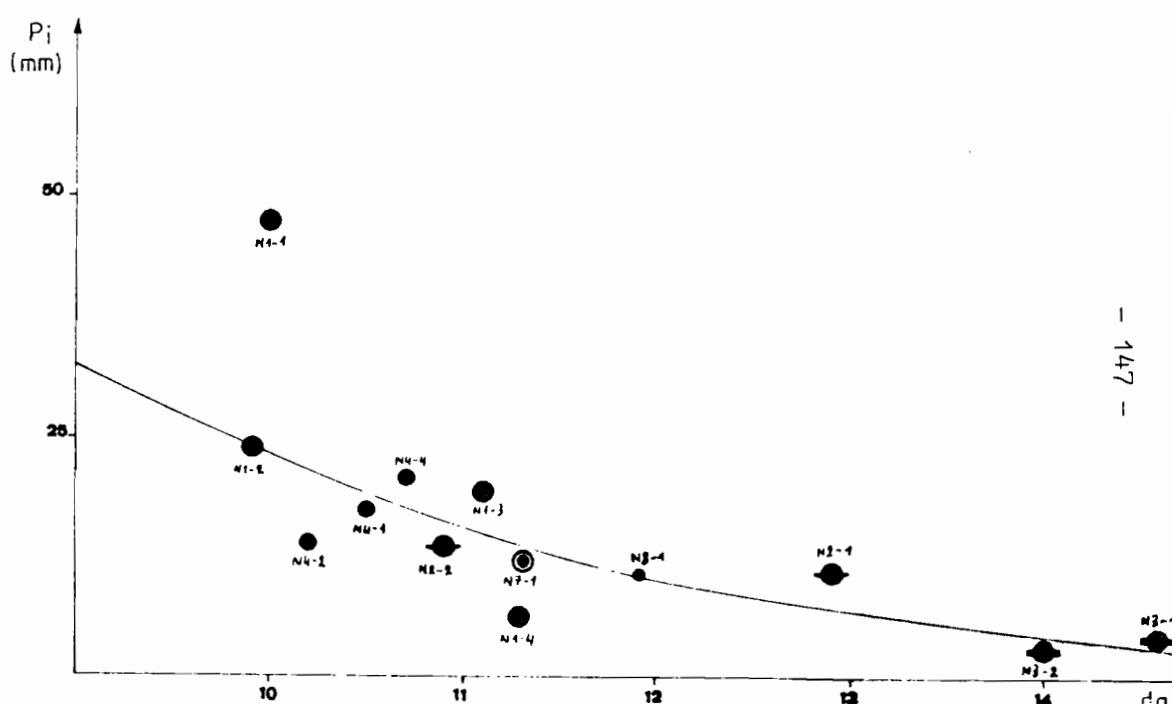


Fig. 21 : Evolution de P_i en fonction de la densité apparente de l'horizon 0-10 cm

6. - Le traitement N1 (témoin), à éléments structuraux plus ou moins grossiers est le plus favorable à l'infiltration avant l'apparition du ruissellement - le traitement N2b à éléments structuraux fins, mais tassé une fois est caractérisé par des valeurs de Pi relativement élevées. Ceci peut être attribué au fait que les profils étaient nettement plus secs du fait de l'ordre chronologique des essais.

La fig. 21 où on a représenté Pi en fonction de la densité apparente de l'horizon de surface (0-10 cm) va dans le même sens : le traitement le plus compacté (N3, 2 fois tassé) se détache de l'ensemble. Le traitement N8 (lit de semence à mottes fines + cultipacker) donne des valeurs de Pi plus basses que les témoins N1 et N5, N4 et N7. Pi est d'autant plus faible que l'horizon de surface est tassé et à granulométrie de mottes plus fines.

Influence de l'état d'humectation initial du sol sur Pi :

Les valeurs de Pi sont faibles lorsque le sol est relativement humide (déficit de saturation faible et $ta = 1$ h) ; elles sont nettement plus élevées lorsque le sol est sec (fig. 20). Mais pour des déficits de saturation intermédiaires ($ta = 12$ h environ), on constate que sur certaines parcelles (N4-2, N8-4, N2b-3) à éléments structuraux fins, Pi est plus faible que pour des parcelles plus humides ($ta = 1$ h). Il est possible que la surface encroûtée apparue lors de l'arrosage se soit stabilisée après 12 h de sécheresse, et que cela ait réduit l'infiltration sur ces parcelles. Nous verrons plus loin lorsque nous aborderons le ruissellement, que ces mêmes parcelles sont les plus susceptibles au ruissellement. En effet, on peut considérer que la croûte de battance apparue lors de l'arrosage 1 h avant l'essai est une pellicule en évolution alors que celle qui a bénéficié de 12 h de sécheresse est une pellicule stabilisée. Des études faites par MOORE (1981) sur des sols selon 3 états de surface : absence de pellicule de battance, pellicule en évolution et pellicule stabilisée, montrent que les paramètres hydrodynamiques de l'infiltration diminuent du stade 0 (absence de pellicule) au stade 2 (pellicule stabilisée). L'auteur conclut (et ceci recoupe nos résultats) que l'effet de la pellicule de battance et de la surface qu'elle occupe est plus significatif que l'effet de l'humidité initiale.

En faisant abstraction des parcelles arrosées 12 h avant l'essai et à pellicule de battance supposée stabilisée, on constate (tableau 11) que P_i croît linéairement avec le déficit de saturation du sol (Δi). Le tableau 11 donne les coefficients A, B et r des régressions simples du type $P_i = A + B \Delta i$

Tableau 11 : Paramètres expérimentaux de la relation $P_i = A + B \Delta i$

Traitement	A	B	r	Traitement	A	B	r
Témoin	- 25,00	0,92	0,43	N7	6,23	0,15	0,80
N1 + N5				N8	6,58	0,10	0,96
N2	4,88	0,20	0,98	N2b	- 40,00	1,05	0,99
N3	2,80	0,24	0,94		-	-	-
N4	- 3,35	0,39	0,90		-	-	-

P_i s'annule pour un déficit de saturation $\Delta i = - A/B$. Mais en pratique P_i n'est jamais nul car le dispositif de mesure est conçu tel que, il existe toujours un temps de latence d'environ 15 secondes (VALENTIN, 1981) avant que l'enregistrement du ruissellement commence.

Conclusion

La hauteur de pluie d'imbibition est très liée à l'état d'humectation initial du sol lorsque la surface du sol n'est pas dégradée ; elle n'est plus contrôlée que par la pellicule de battance si la surface du sol est encroutée. Les tassements par les nombreux passages d'engins culturaux représentent un facteur de diminution de P_i au même titre que la formation d'une pellicule de battance plus ou moins imperméable. La relation obtenue entre P_i et les facteurs et variables descriptifs des états de surface ($P_i = 45,5 - 0,31 D < 0,5 + 0,2 \Delta i - 1,1$ pente), même si elle n'explique P_i qu'à 60 %, montre que pour retarder le ruissellement, il est souhaitable d'éviter l'émettement du lit de semence qui accroît la sensibilité du sol à la battance donc de fabriquer davantage de grosses mottes capables de stocker de l'eau dans les dépressions, de diminuer la pente du terrain et augmenter l'état de sécheresse du sol en améliorant le ressuyage.

4.4.4.2 - Les ruiissements

Pour étudier la variabilité du ruissellement au sein d'un même traitement et entre les différents traitements nous allons voir le comportement de chaque parcelle à une averse de 40 mm pendant 1 heure. L'évolution de la lame ruisselée cumulée en fonction de la hauteur de pluie cumulée s'ajuste très bien selon une fonction du type $\Sigma Lr = A + B(\Sigma PU)$. Le tableau 12 montre les coefficients A, B et r de ces relations. Le coefficient B est d'autant plus élevé que la parcelle est susceptible au ruissellement ; il traduit la susceptibilité du sol au ruissellement. Le même tableau montre que les lames ruisselées calculées à partir de ces relations sont très voisines des lames ruisselées observées. Nous nous baserons sur la pente de la droite $\Sigma Lr = A + B(\Sigma PU)$ pour étudier la variabilité intra-traitement et inter-traitements du ruissellement : voir tableau 12 qui donne les valeurs des paramètres A et B des régressions linéaires et r la valeur des coefficients de corrélation.

Tableau 12 : Paramètres expérimentaux de la relation $\Sigma Lr = A + B(\Sigma PU)$

Code parcelle	A	B	r	n	Dame ruisselée observée au bout de 40 mm de pluie	Dame ruisselée calculée au bout de 40 mm de pluie
N ¹ -1	- 5,30	0,12	0,99	8	0,0	0,0
N ¹ -2	- 13,90	0,38	0,97	21	1,7	1,7
N ¹ -3	- 14,60	0,50	0,98	20	8,5	9,4
N ¹ -4	- 8,77	0,71	0,98	18	19,7	19,6
N ² -1	- 10,88	0,30	0,99	11	21,5	21,1
N ² -2	- 9,05	0,54	0,99	11	17,5	16,5
N ² -3	- 10,60	0,55	0,99	18	10,5	11,4
N ² -4	- 17,80	0,30	0,49	11	14,5	14,0
N ³ -1	- 4,90	0,32	0,99	28	11,5	11,9
N ³ -2	- 4,40	0,35	0,99	20	10,2	9,5
N ³ -3	- 5,48	0,75	0,99	28	24,5	24,5
N ³ -4	- 10,10	0,38	0,99	15	25,3	25,0
N ⁴ -1	- 10,20	0,46	0,98	21	7,0	8,2
N ⁴ -2	- 13,90	0,68	0,99	25	12,3	13,3
N ⁴ -3	- 13,50	0,61	0,98	24	10,0	10,3
N ⁴ -4	- 20,40	0,54	0,98	38	1,8	1,5
N ⁵ -1	- 21,40	0,57	0,98	19	1,7	1,4
N ⁵ -2	- 10,30	0,57	0,99	13	16,6	16,5
N ⁵ -3	- 12,50	0,49	0,99	26	7,0	7,4
N ⁷ -1	- 10,20	0,58	0,99	28	12,1	13,2
N ⁷ -2	- 13,88	0,62	0,99	29	10,0	10,9
N ⁷ -3	- 11,40	0,58	0,99	27	10,5	11,7
N ⁷ -4	- 10,70	0,50	0,99	19	9,8	9,3
N ⁸ -1	- 10,50	0,56	0,99	26	10,8	11,9
N ⁸ -2	- 9,50	0,59	0,99	26	13,6	14,4
N ⁸ -3	- 12,20	0,62	0,99	29	12,0	12,6
N ⁸ -4	- 9,10	0,73	0,99	29	19,8	20,1
N ^{2b} -1	- 29,40	0,58	0,99	28	0,0	0,0
N ^{2b} -2	- 16,10	0,60	0,98	20	5,7	7,9
N ^{2b} -3	- 13,00	0,78	0,99	16	18,0	18,2
N ^{2b} -4	- 9,50	0,52	0,99	19	10,6	11,3

r : coefficient de corrélation

n : effectif = nombre d'observations

a/ Influence du tassement :

La fig. 22 montre que l'effet du tassment (surtout le double tassement) est net : le tassement répété tend à augmenter la susceptibilité du sol au ruissellement. L'effet de la taille des éléments structuraux est masqué par le tassement. On y reviendra en analysant l'effet de la densité apparente.

La représentation graphique de B (pente de la fonction $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$) en fonction de la densité apparente da de l'horizon de surface (0-10 cm) (fig. 23) montre que la susceptibilité au ruissellement augmente selon une fonction logarithmétique avec la densité apparente. On constate que les plus fortes valeurs de da correspondent aux plus fortes valeurs de (B) : ainsi, le traitement tassé 2 fois (N3) à fortes valeurs de da est le plus sensible au ruissellement. Juste derrière vient le traitement tassé une fois (N2). Le traitement à éléments structuraux fins (N8) se fait remarquer à cause probablement du passage du cultipacker. Les autres traitements (N1, N4, N7) montrent de forts écarts de susceptibilité au ruissellement pour des valeurs de da faibles et voisines. La sensibilité au ruissellement doit donc dépendre d'autres facteurs et notamment de leur état de surface.

b/ Influence de l'affinement du lit de semence :

Si on fait abstraction du tassement en enlevant le nuage constitué de parcelles tassées (fig. 22), on trouve une relation croissante entre l'indice (B) qui représente la susceptibilité du sol au ruissellement, et le taux de mottes inférieures à 0,5 cm ($D < 0,5$) : quand le taux de $D < 0,5$ augmente, l'indice (B) augmente également.

L'affinement du lit de semence accroît l'aptitude du sol à ruisseler et une forte porportion de terre fine à la surface du sol favorise les phénomènes de battance (BOIFFIN, 1976 ; ROOSE, 1978 ; BOLLINNE, 1982). Or l'influence de l'encroûtement de la surface du sol sur le ruissellement est plus importante que le type de sol et la porosité de ses différents horizons (DULEY, 1939). C'est pour cela que la plupart des auteurs insistent sur l'importante qu'il y a d'éviter de pulvériser la surface du sol lors de la préparation du lit de semence et que certains auteurs proposent de n'émettre que la ligne de semis et de laisser les inter-lignes en grosses mottes (MANNERING et al) cités par ROOSE (1980).

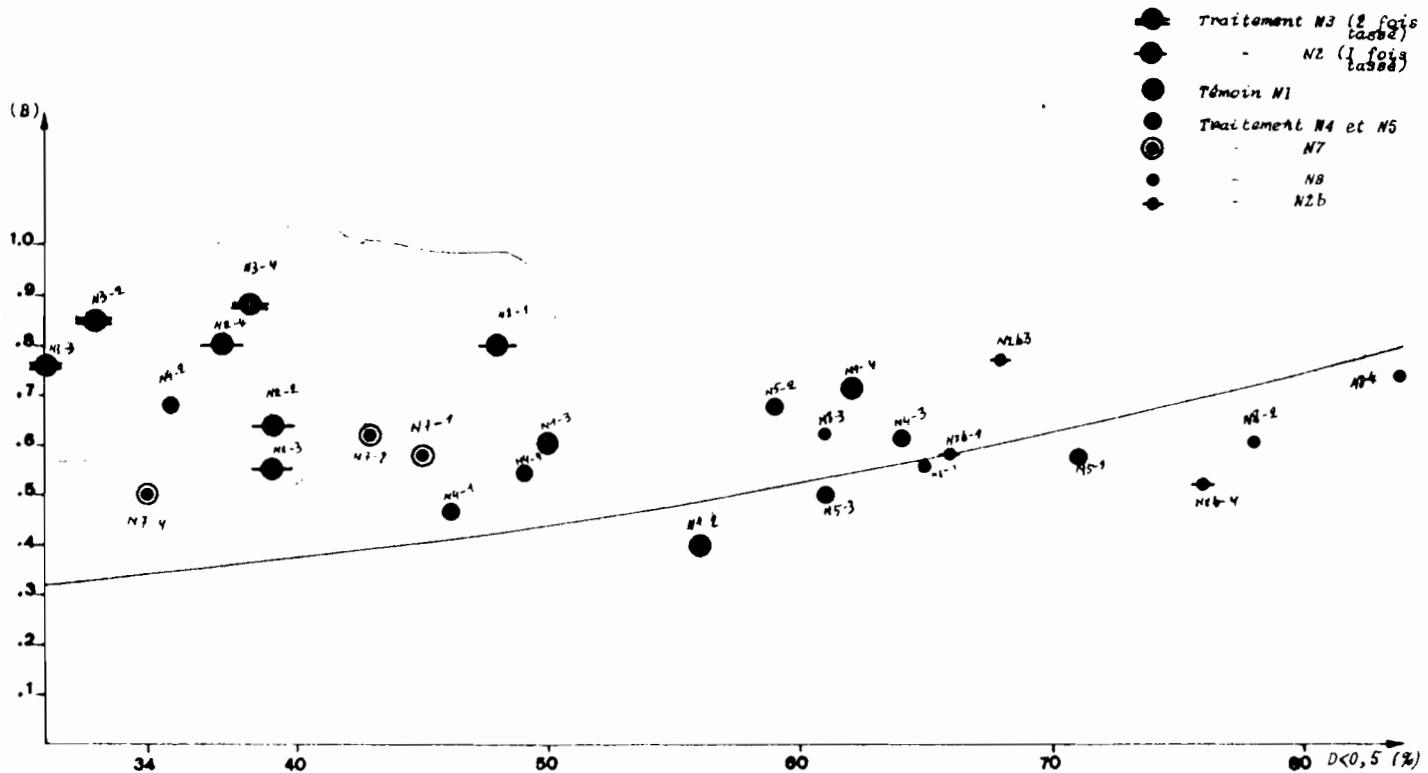


Fig. 22 : Evolution de la pente de la fonction $L_r = f(P_u)$ en fonction du taux de mottes 0,5 cm

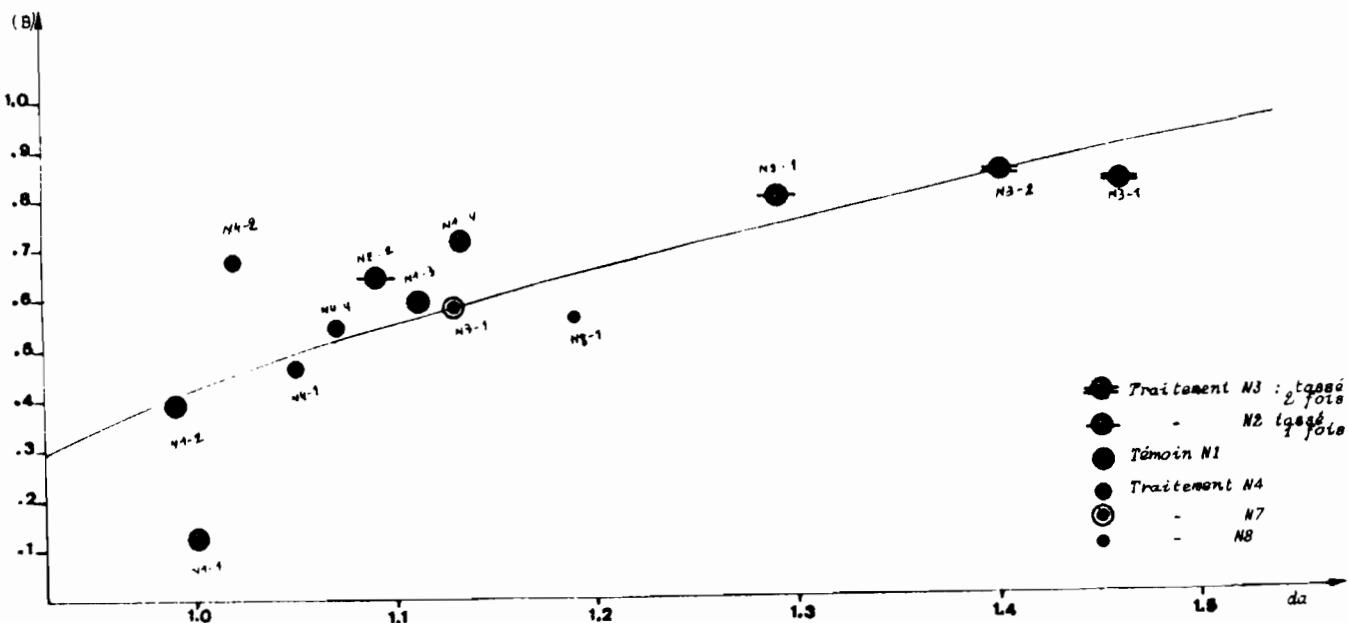


Fig. 23 : Evolution de la pente de la fonction $L_r = f(P_u)$ en fonction de la densité apparente de l'horizon de surface

c/ Influence de la rugosité :

Sur l'ensemble des traitements (N2, N3, N4 et N5, N7, N2b), la susceptibilité au ruissellement diminue faiblement quand l'indice de rugosité augmente (fig. 24), ce qui est logique. Au contraire, le témoin (N1) et le traitement à éléments structuraux fins (N8) montrent une relation croissante entre (B) et IR, ce qui est surprenant. En effet, on admet en général qu'un état structural à mottes grossières réduit le ruissellement (BURWELL et LARSON, 1969 ; JOHNSON et al, 1979). La grosseur des mottes confère au sol une résistance durable à la dégradation par l'énergie cinétique des gouttes de pluie et retarde la formation d'une pellicule de battance peu perméable. De plus, une surface maintenue rugueuse permet le piégeage des flaques dans les dépressions et augmente la surface disponible à l'infiltration.

A la fin de l'essai, l'indice de rugosité IR est beaucoup plus faible (tableau 4), diminution pouvant atteindre 13 % de la valeur initiale de IR. Mais nous n'avons pu suivre la cinétique de l'évolution structurale au cours des averses. On sait d'après BOIFFIN (1984) et TREVISAN (1986) que la décroissance de la rugosité suit une loi exponentielle, en fonction des pluies cumulées.

$$IR = IR_0 \cdot e^{-\alpha PU} \quad (\text{BOIFFIN, 1984}).$$

où : IR et IR₀ représentent l'indice de rugosité final et initial et PU étant la hauteur de pluie utile.

Ce nivellement de la surface au sol est l'une des conséquences directes de la dégradation structurale. Il est dû d'une part à la pluie qui détache les particules des points les plus hauts vers les points les plus bas, et d'autre part, à l'effet du tassemement par l'énergie cinétique de la pluie.

d/ Influence de la pente :

Dans la plage de variations étudiée (13 à 20 %), la pente n'a pas eu d'effet significatif et clair sur la susceptibilité au ruissellement des différents traitements. Celle-ci augmente avec la pente sur les traitements N1, N2 et N8 et diminue quand la pente augmente, sur les traitements N3, N4 et N2b (fig. 25). Ceci indique que la pente n'est probablement pas le facteur explicatif du ruissellement, ne serait-ce qu'à l'échelle de la parcelle de 1 m².

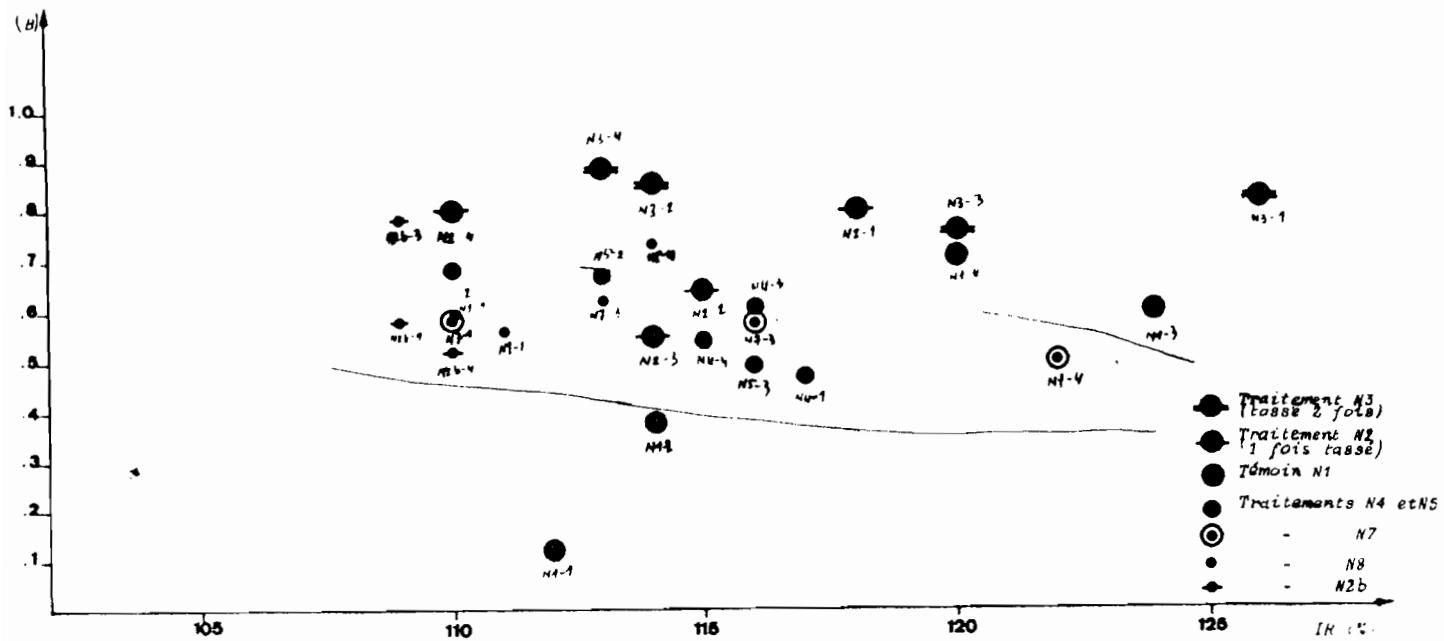


Fig. 24 : Evolution de la pente de la fonction $L_r = A + B$ (PU) en fonction de l'indice de rugosité IR

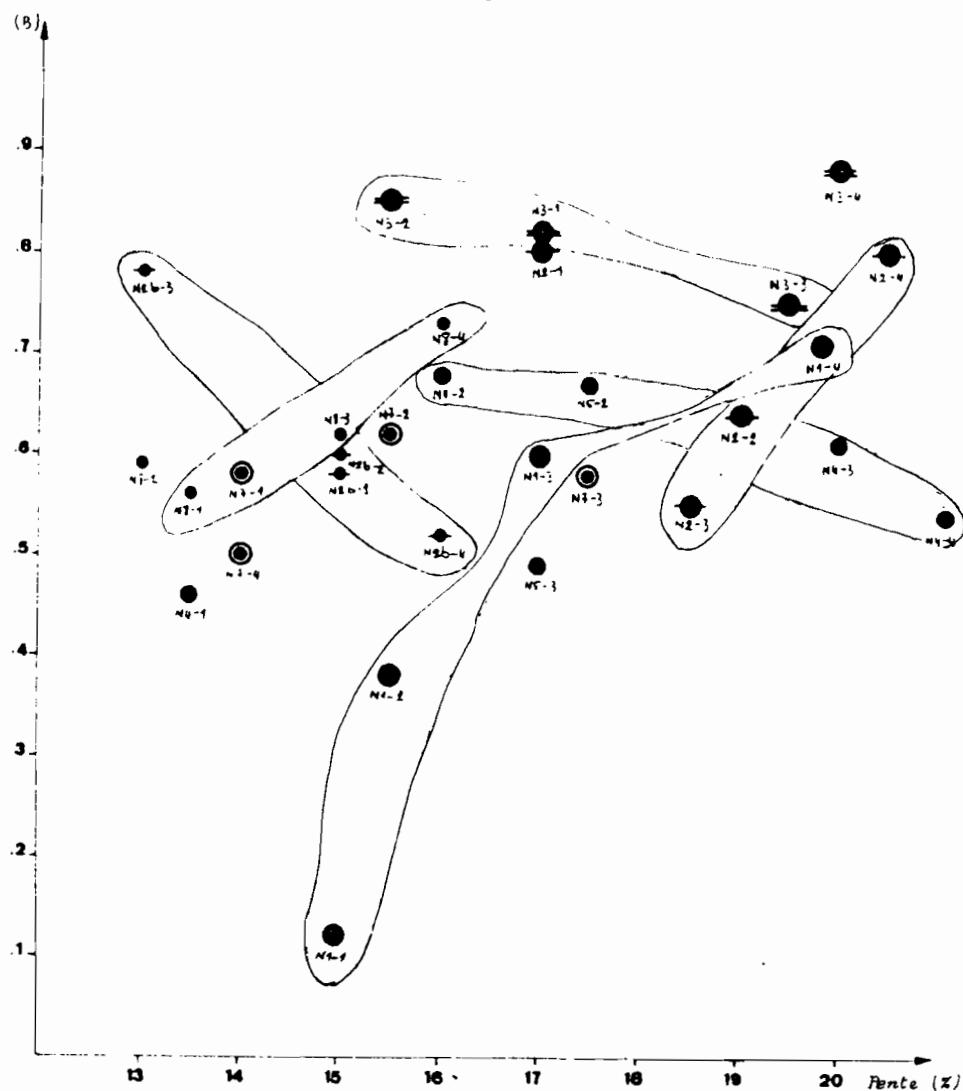


Fig. 25 : Influence de la pente sur la susceptibilité au ruissellement des différents traitements

Plus loin dans le texte, lorsque nous aborderons la seconde série d'essais effectuée sur des pentes plus faibles et où nous avons testé l'effet de l'intensité de la pluie, nous comparerons le ruissellement entre de pentes fortes (15 %) et de pentes faibles et ceci pour une même intensité de pluie (40 mm.h^{-1}).

Discussion et conclusion :

Deux phénomènes dominent et sont nets, malgré les difficultés expérimentales :

1. - Le tassemement par les roues d'engins : les "terreforts" du Lauragais sont peu sensibles au tassemement ; il a fallu deux passages de roue de tracteur pour avoir une réaction nette vis-à-vis du ruissellement (traitement N3). En effet le compactage varie selon la nature du sol (granulométrie) et l'état d'humidité. Le test proctor (fig. 26) montre que l'allure de la courbe est caractérisée par deux points particuliers :

- le point de sensibilité au compactage (S)
- le point M ("optimum" Proctor)

Ces deux points partagent la courbe de compactage en trois domaines.

* pour des teneurs en eau inférieures à W^c (domaine 1), la densité sèche du matériau évolue très peu : le matériau est peu ou pas sensible au compactage ;

* pour des teneurs en eau comprises entre W^c et W^m (domaine 2), la densité sèche augmente avec la teneur en eau : le matériau est sensible au compactage ;

* pour des teneurs en eau élevées (domaine 3), la densité sèche décroît lorsque la teneur en eau augmente ; le matériau est incompressible et la courbe de compactage tend asymptotiquement vers l'hyperbole de saturation.

L'allure de la courbe varie avec l'énergie de compactage employée et la nature du sol (fig. 27). Cette figure montre que l'"optimum" Proctor" sur des sols tels que ceux du Lauragais se situe autour de 15 % en teneur en eau et que pour des teneurs en eau comprises entre 20 et 40 % (teneur en eau des parcelles au moment de l'essai), les sols du Lauragais sont incompressibles.

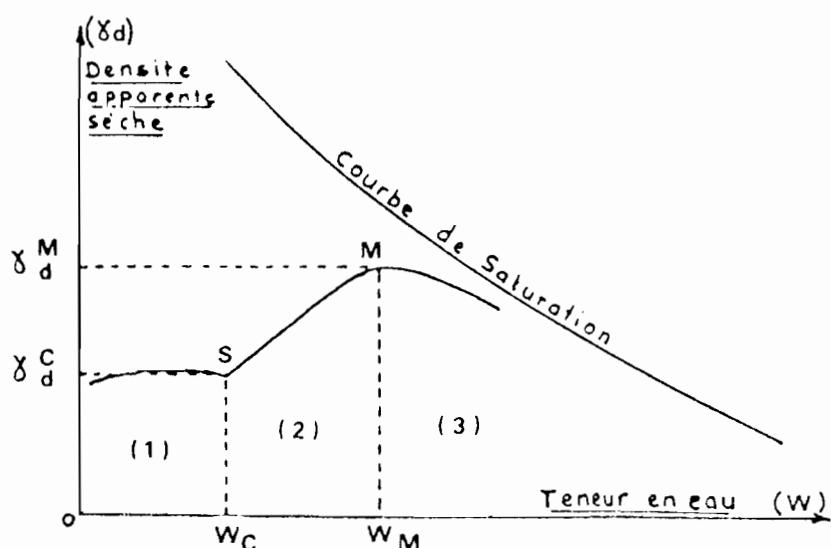


Figure 26 Forme générale d'une courbe de compactage complète
d'après DUCREUX et MANIERE (1984)

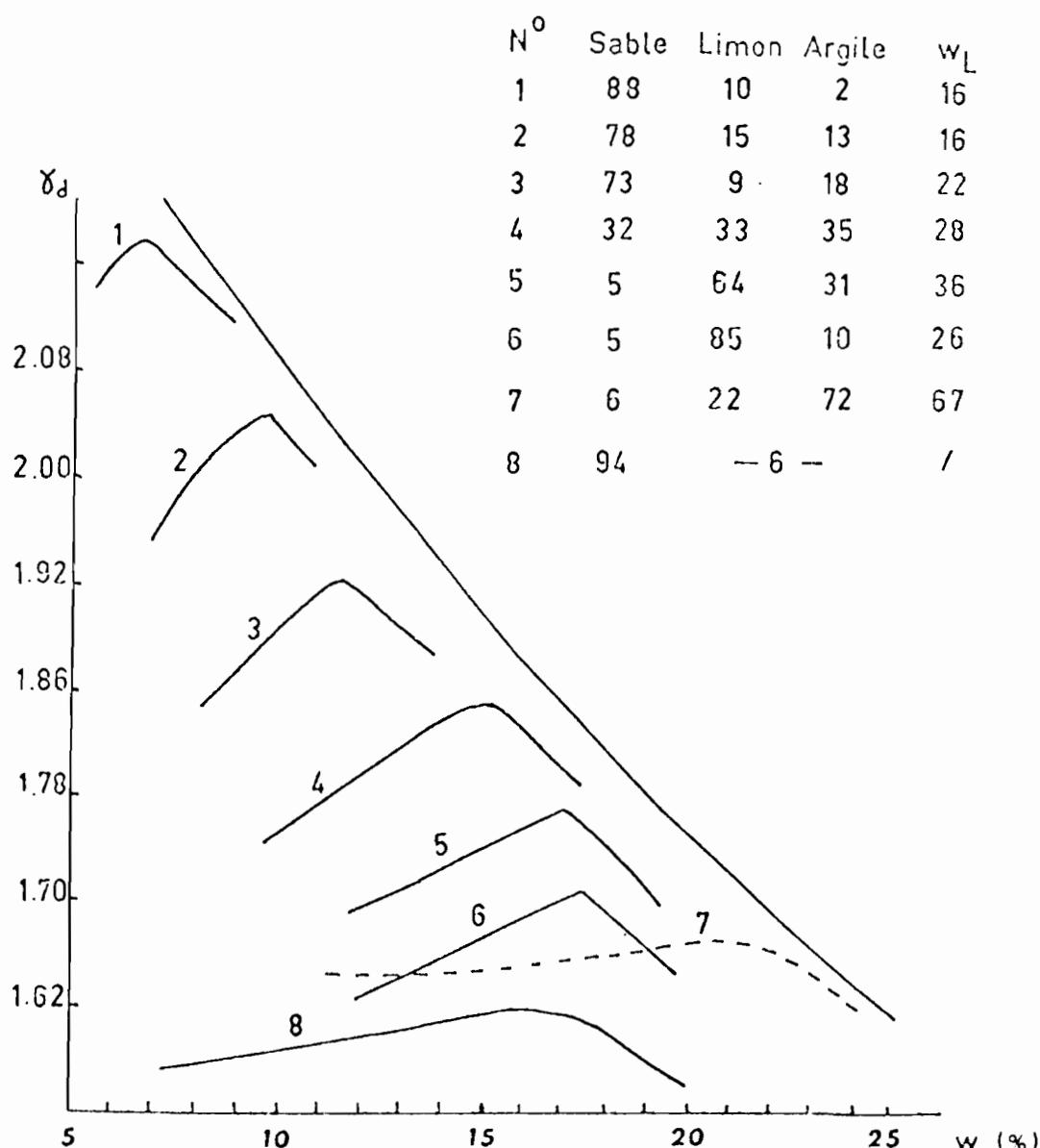


Figure 27 INFLUENCE de la TEXTURE sur la
COMPACITE
d'après MADDISON cité par FAURE (1976)

2. - L'encroûtement : son effet est perceptible sur les parcelles arrosées 12 h à l'avance.

La dégradation de la surface du sol est l'élément majeur responsable du ruissellement. En effet, l'altération de la structure de la surface du sol (surtout les premiers mm superficiels), est causée par l'impact des gouttes de pluie et par l'humectation du sol (VIANI, 1986). Les gouttes de pluie grâce à leur énergie cinétique détachent les particules fines des points les plus hauts vers les points les plus bas.

Ces particules, en s'accumulant, créent des zones de faible perméabilité qui s'étendent sur la surface. Ces zones apparaissent d'autant plus vite que la classe granulométrique est plus fine (SAHORES, 1986). Selon BOIFFIN (1984), l'apparition du ruissellement et son développement, sont la conséquence de la dégradation des premiers mm de la surface du sol ; cette dégradation se fait en deux grandes phases :

- une phase initiale de fermeture de la surface (soit sous l'action des pluies, soit même sans apport d'énergie comme c'est le cas des parcelles arrosées). Il se forme au cours de cette phase des croûtes structurales de quelques mm d'épaisseur, suite à un transfert des particules vers les interstices. Pendant cette phase l'infiltérabilité diminue mais reste supérieure ou égale à l'intensité de la pluie ; elle correspond à notre phase d'imbibition.

- une phase ultérieure où le ruissellement apparaît et au cours de laquelle s'opère une séparation des particules par un tri granulométrique ; ces particules vont former des croûtes stratifiées dans les zones de dépôt (surtout dans les flaques). La vitesse d'épaisseissement de ces croûtes stratifiées dépend de la terre mobilisée ; ainsi le caractère motteux de la surface n'est plus un facteur favorable puisqu'il engendre un épaisseissement rapide des croûtes au niveau des sites d'accumulation (flaques). Selon le même auteur, l'apparition du ruissellement au cours de la 2^e phase de la dégradation, ne se produit que lorsqu'une hauteur importante de pluie tombe avec une intensité supérieure à l'infiltérabilité de la parcelle au début de la pluie ; elle correspond à ce que l'on a appellé intensité de pluie limite en dessous de laquelle aucun ruissellement n'apparaît.

3.4.4.3 - L'infiltration

A/ - Généralités :

Les conditions des états de surface du sol influencent aussi les processus d'infiltration et notamment dans les cas où les sols sont nus, directement exposées aux pluies et sujets à la formation de croûte de battance. En réduisant l'infiltration, la pellicule de battance augmente le ruissellement et par là-même l'érosion et réduit l'eau disponible et nécessaire à la croissance des plantes.

De nombreux auteurs ont constaté que la conductivité hydraulique saturée (K_s) ne reste pas constante lorsque le sol est nu et ils attribuent cet effet à la formation d'organisations pelliculaires à la surface du sol. MANNERING et JERRY (1967) cités par MEYER et MANNERING (1967) montrent que pour une large variété de sols, les vitesses d'infiltration après la formation de la croûte de battance ne sont que 40 % de celles obtenues sur un même sol mais non encroûté. MORIN (1977) cité par SABET (1986) conclut, en étudiant la croûte de battance, que celle-ci est le facteur dominant dans la détermination de la vitesse d'infiltration. ROSE W.C (1962) montre que deux facteurs sont responsables dans la diminution de l'infiltrabilité avec le temps, durant une averse :

- la diminution des gradients hydrauliques au fur et à mesure de l'humectation du profil
- la croûte de battance qui a une grande importance seulement lorsque l'énergie des gouttes de pluie est impliquée.

Une diminution de l'infiltrabilité due à l'encroûtement a été aussi observée par HILLEL (1960), SCHMIDT et al (1964), EDWARDS et LARSON (1969), SHARMA (1980), VALENTIN (1981), BOIFFIN (1984), RAHELIARISOA, TREVISAN et VIANI (1986). Des microphotographies prises par TACKETT et PEARSON (1965) montrent que la croûte formée sous le simulateur de pluie est une pellicule dense d'environ 0,1 mm d'épaisseur.

Des modèles mathématiques concernant l'infiltrabilité à travers des sols encroûtés furent développés par HILLEL et GARDNER (1969), AHUJA (1973) et MOORE (1981). Tous ces modèles supposent que la conductivité hydraulique de la croûte est constante. MORIN et BENYAMINI (1977) développèrent une équation empirique, type HORTON pour la prédition de l'infiltrabilité sur des sols susceptibles à la battance.

$$F(t) = F_f + (F_i - F_f) e^{-(n.a.t)}$$

Ce même modèle appliqué par LAFFORGUE (1976, 1977, 1979) ne semble adapté que pour des sols qui n'évoluent pas et d'après cet auteur, ce modèle n'est pas adapté à des sols labourés.

$$F(t) = F_n + (F_0 - F_n) e^{-kt}$$

$F_f = F_n$ = infiltration finale

$F_i = F_0$ = infiltration initiale

t = temps

n.a = K = constante pour des conditions initiales données.

HILLEL (1974) exprime le flux d'infiltration q à la surface d'un sol encroûté, non saturé au départ, en admettant l'établissement d'un régime d'écoulement permanent.

$$q = K_c (\Psi_u) = K_c \frac{H_o + \Psi_u + Z_i}{Z_i}$$

Kc : conductivité hydraulique de la croûte (supposée saturée)

$K_c (\Psi_u)$: conductivité hydraulique non saturée de la zone sous la croûte, fonction de la succion (Ψ_u) dans cette zone

H_o : hauteur de la submersion

(Ψ_u) : potentiel de succion qui s'exerce à la base de la croûte

Z_i : épaisseur de la croûte

La diminution de l'infiltrabilité peut être due à une augmentation du terme Z_i , par épaississement des croûtes. BOIFFIN (1984) pense que la diminution de l'infiltrabilité est davantage liée à l'épaississement de la croûte qu'à l'extension latérale des plaques.

B/ - L'intensité d'infiltration en régime permanent, F_n

Nous étudierons spécialement l'intensité d'infiltration minimale en régime permanent F_n car les lames infiltrées pour une hauteur de pluie donnée, tout comme les lames ruisseauées, sont très influencées par la phase d'imbibition. En effet les lames infiltrées dépendent très largement de la durée des pluies d'imbibition qui sont elles-mêmes étroitement liées au déficit de saturation et donc de la durée de ressuyage séparant deux pluies successives.

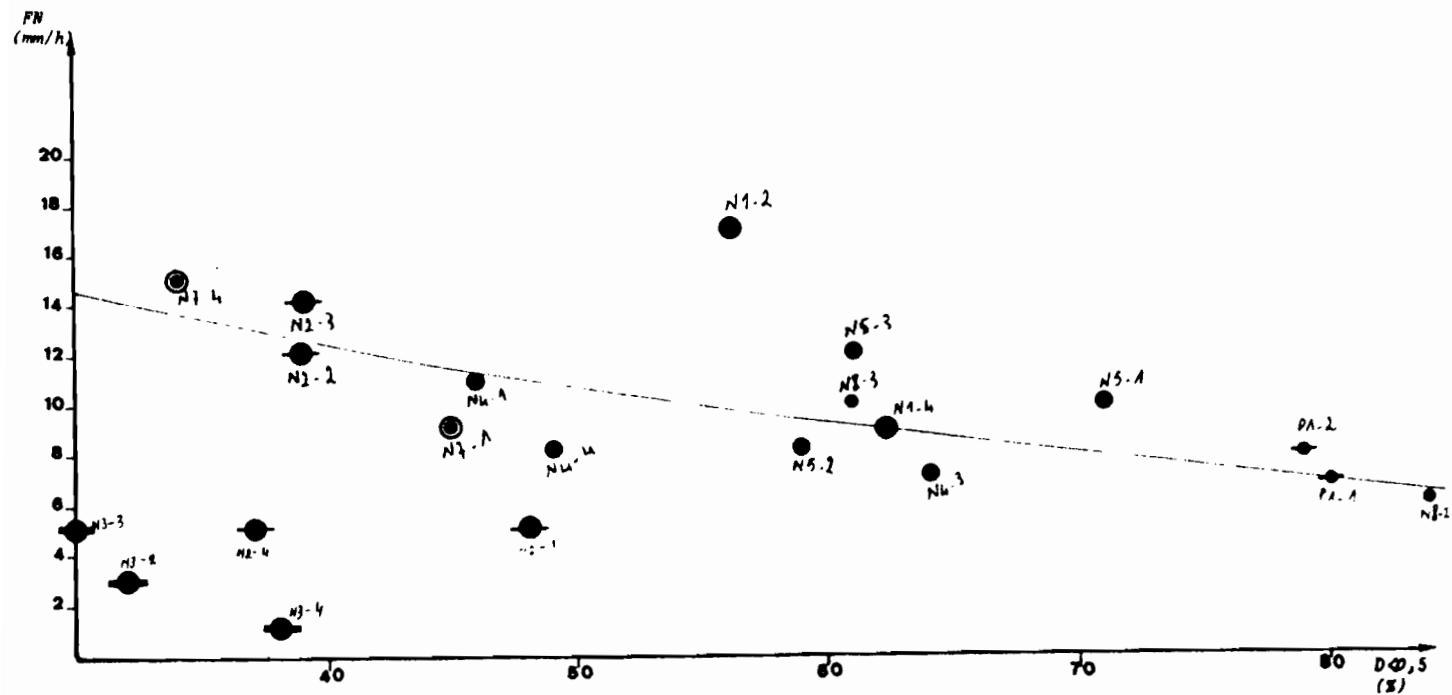


Fig. 28 : Evolution de FN en fonction du taux de mottes 0,5 cm

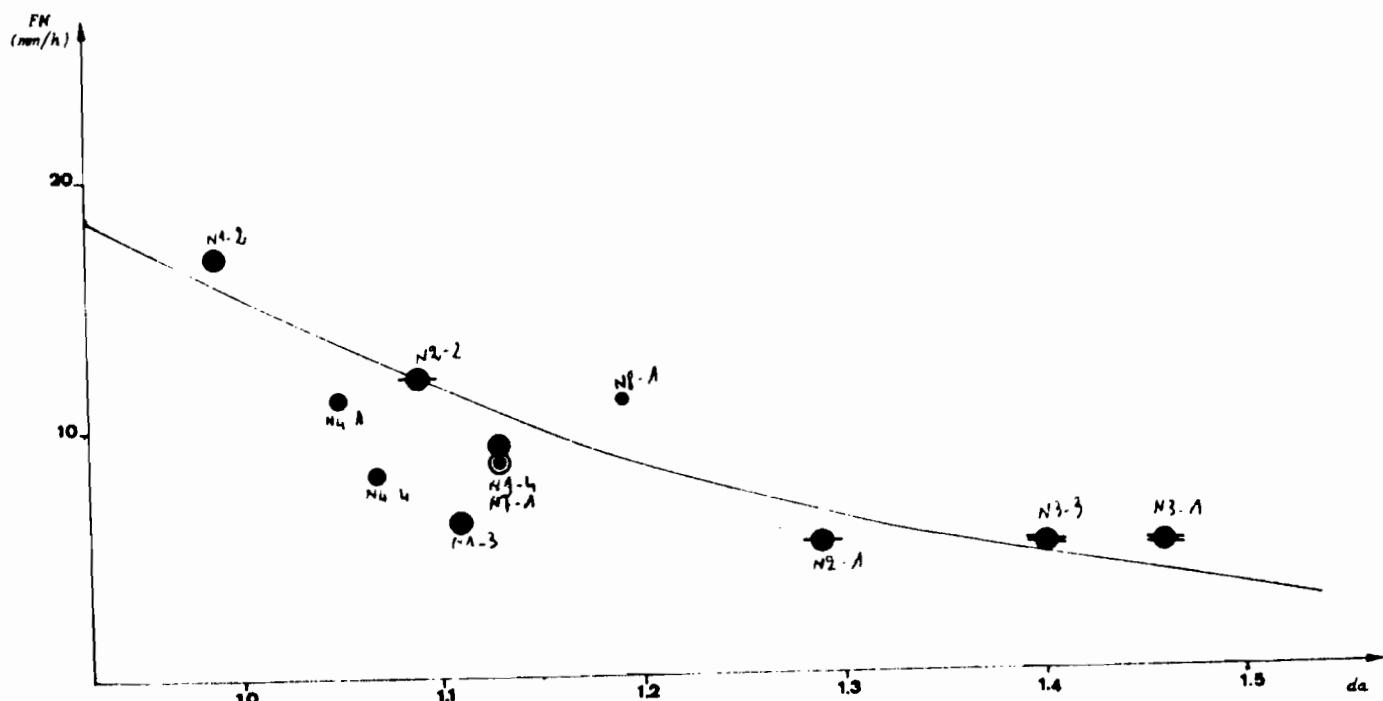


Fig. 29 : Evolution de FN en fonction de la densité apparente de l'horizon de surface

a/ Influence du traitement :

La figure 28 montre que l'effet du tassement, notamment le traitement tassé deux fois (N3) est net : le tassement répété réduit fortement l'infiltration en régime permanent. La figure 29 où on a représenté FN en fonction de la densité apparente de l'horizon de surface montre que FN diminue quand la densité apparente augmente : les plus faibles valeurs de FN correspondent aux plus fortes valeurs de da. Seuls les traitements tassés N3 puis N2 se démarquent. Sur les autres traitements, la forte dispersion des valeurs de FN indique que celle-ci doit dépendre d'autres facteurs tels que l'indice de rugosité où la taille des éléments structuraux entre autres.

b/ Influence de l'affinement du lit de semence :

Comme nous l'avons déjà vu dans le traitement statistique, seul le taux de mottes inférieures à 0,5 cm est corrélé avec FN. La figure 28 montre que FN tend à diminuer quand le taux de mottes inférieures à 0,5 cm augmente. Il semble que l'affinage du lit de semence favorise la désagrégation de la surface du sol et la formation d'une pellicule moins perméable.

Les parcelles arrosées 12 h à l'avance et qui ont montré une forte susceptibilité au ruissellement sont celles où cette dégradation superficielle est la plus nette ; elles confirment l'existence préalable à l'essai d'une pellicule de battance. En séchant, cette dernière se rétracte, devient dure de sorte qu'elle réduit l'infiltrabilité et gène la levée des graines (MOORE, 1981). JOHNSON et LAW (1967) montrent que la levée du semis de betterave pouvait augmenter de 51 % si on cassait la croûte superficielle avant la levée.

c/ Influence de la rugosité :

La figure 30 représentant l'évolution de l'infiltration minimale FN avec l'indice de rugosité IR montre une forte dispersion des valeurs de FN avec cependant une tendance à une augmentation de FN au fur et à mesure que la surface du sol est plus motteuse. En effet une surface constituée d'éléments structuraux grossiers retarde la formation de croûte de battance et par sa capacité de stocker de l'eau dans les dépressions, elle augmente la surface offerte à l'infiltration.

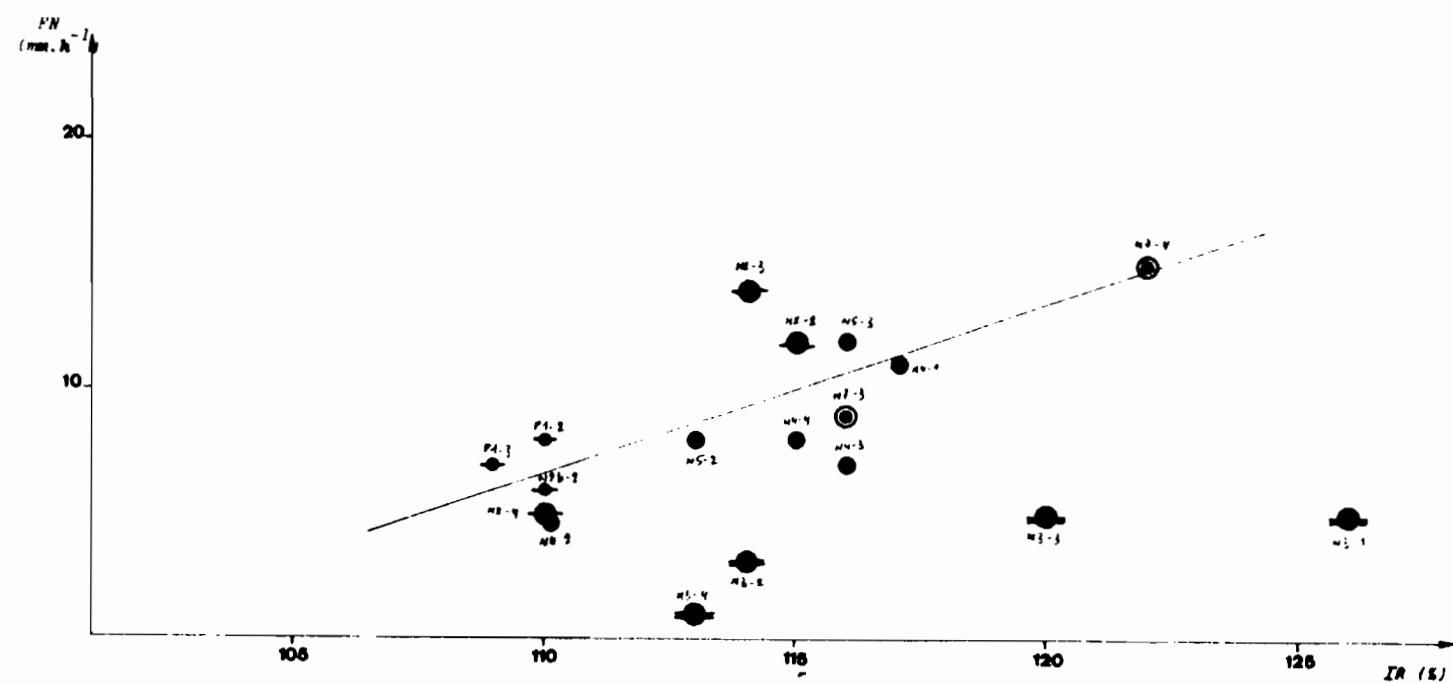


Fig. 30 : Evolution de FN en fonction de l'indice de rugosité IR

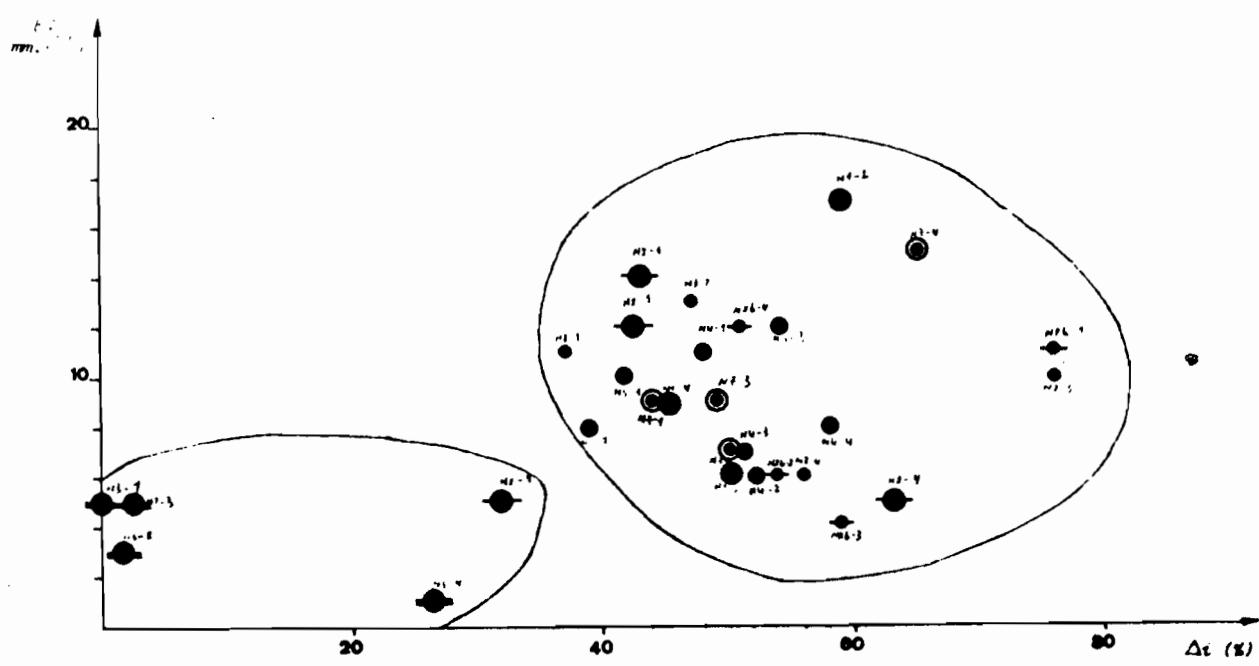


Fig. 31 : Evolution de FN en fonction du déficit de saturation

Selon BOIFFIN (1984) toutefois, le caractère motteux de la surface du sol n'est pas toujours favorable lorsque le ruissellement se déclenche car les mottes en se désagrégant nourrissent l'épaississement des croûtes "sédimentaires" (stratifiées) au niveau des zones d'accumulation qui sont essentiellement les flaques.

d/ Influence de l'état d'humectation initial :

La relation positive obtenue entre FN et le déficit de saturation s'explique par le contraste entre les parcelles non tassées et les parcelles tassées qui sont caractérisées par de faibles valeurs de FN suite au tassemement et au mauvais ressuyage qui en découle (fig. 31).

3.4.5 - Variabilité intra-traitement des paramètres et variables hydrodynamiques :

La variabilité intra-traitement de toutes les variables hydrodynamiques est forte comparée à la variabilité inter-traitements. Elle est liée à l'interaction de plusieurs variables : taux de mottes inférieures à 0,5 cm, indice de rugosité, pente, et état d'humectation initial.

Conclusion :

Les facteurs qui semblent contrôler les variations de la susceptibilité des différents traitements au ruissellement et de l'infiltration finale sont l'état de la surface du sol et sa rugosité ainsi que le degré de compacité de l'horizon superficiel. L'affinement du lit de semence est favorable aux phénomènes de dégradation structurale responsable de la diminution de l'infiltrabilité. L'apparition du ruissellement constitue le stade critique de cette dégradation structurale. Pour éviter cette dernière, il faut retarder autant que possible le déclenchement du ruissellement, donc prolonger la phase d'imbibition en ralentissant la décroissance de l'infiltrabilité. Pour cela, il convient de :

- favoriser le ressuyage des horizons de surface en évitant au maximum les tassemements qui peuvent engendrer des obstacles infranchissables pour l'écoulement de l'eau.
- réduire la présence de terre fine à la surface du sol très sensible à la désagrégation par éclatement ainsi que pas le "splash", donc éviter des préparations fines du lit de semence. Certains outils (herses, canadiens) capables de faire un tri vertical (des grosses mottes sur des petites mottes) sont conseillés.

- conférer à l'horizon de surface une bonne stabilité structurale en maintenant un taux suffisant de matière organique.

Celle-ci ne serait pas d'un grand secours car la stabilité des agrégats augmente avec l'humidité jusqu'à un certain seuil. Or les phénomènes d'éclatement, responsables de la formation de croûte superficielle sont maximums lorsque les agrégats sont secs, donc instables.

- éviter la désagrégation des mottes en limitant le contact sol-gouttes de pluie. Pour cela, il n'y a qu'un seul moyen, c'est couvrir le sol en saison humide par les engrains verts ou laisser les résidus de culture en surface.

3.4.6 - Influence de l'intensité de la pluie sur les paramètres hydrodynamiques :

Pour étudier l'influence de l'intensité de la pluie sur les paramètres hydrodynamiques, une autre série d'essais a été effectuée sur des pentes plus faibles ($< 5\%$). Le sol a été préparé au rateau de la même façon que le traitement N2b. 13 parcelles à états de surface semblables furent testées :

- 6 ont reçu une pluie de 40 mm.h^{-1}
- 3 ont reçu une pluie de 50 mm.h^{-1}
- 4 ont reçu une pluie de 80 mm.h^{-1}

Les résultats des 6 parcelles ayant reçu une pluie de 40 mm.h^{-1} vont être confrontés à ceux du traitement spécialement étudié pour mettre en évidence l'effet de la pente. Ils nous serviront aussi de comparaison avec d'autres résultats obtenus sur d'autres types de sols.

L'ensemble des résultats ont fait l'objet d'une étude statistique et les liaisons entre les différents facteurs et variables sont représentés dans la matrice de corrélation (tableau 14).

3.4.6.1 - La hauteur de pluie d'imbibition Pi :

On vérifie, comme on l'a déjà montré sur les traitements du versant que Pi est très liée au déficit de saturation du sol (corrélation positive) ; elle diminue lorsque la pente augmente. Elle est corrélée négativement avec l'intensité de la pluie, ce qui est explicable en considérant l'énergie cinétique de la pluie : en effet, l'augmentation de l'intensité de la pluie correspond à une augmentation de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, entraînant la fermeture de la surface du sol et sa désagrégation aussi bien par éclatement que par l'effet splash (surtout) qui est réduite.

Tableau 14 : Matrice de corrélation : effet intensité

MOLDENHAUER et LONG (1964) expérimentant sur 5 types de sol de texture différente, soumis à des pluies simulées au laboratoire, montraient que le ruissellement ne se déclenche que si une certaine quantité d'énergie cinétique nécessaire est apportée au sol. Cette quantité d'énergie cinétique est la même quelque-soit l'intensité de la pluie. Ainsi, quand l'intensité de la pluie est élevée, cette énergie est atteinte au bout d'un temps (t) court, mais pour une intensité de pluie plus faible, cette énergie cinétique cumulée est atteinte plus tardivement, raison pour laquelle la hauteur de pluie d'imbibition diminue lorsque l'intensité de la pluie augmente.

Si on évite l'interaction du déficit de saturation, les variations de P_i en fonction de l'intensité de la pluie s'ajustent mieux selon une fonction de puissance (fig. 32)

$$P_i = 62,5 I^{-0,42} \quad ; \quad r = -0,92$$

Influence de la pente du terrain sur la hauteur de pluie d'imbibition P_i :

Nous avons vu jusque là que P_i est fortement influencée par le déficit de saturation du sol. Ainsi pour dégager l'influence de la pente on va écarter l'influence du déficit de saturation en considérant un Δ_i unique ; les parcelles N2b-4 et P1-1 vont nous servir de comparaison ; P_i passe de 16,3 mm sur une pente de 2 % à 12,3 mm sur une pente de 16 %.

La représentation graphique de P_i en fonction de Δ_i sur le traitement N2b et sur les parcelles du plateau (fig. 33) confirme que dans la tranche de variation de Δ_i (40 à 80 %), les valeurs de P_i sur une pente de 2 % sont nettement au dessus des valeurs de P_i sur une pente de 15 %. Cette diminution de P_i lorsque la pente augmente s'explique par une diminution de l'efficacité de la rugosité (ROOSE, 1980) et donc de la capacité de stockage superficielle (VIANI, 1986)

3.4.6.2 - Le ruissellement :

L'intensité de ruissellement maximal (R_x) n'est pas influencée par l'état hydrique du sol, l'influence de l'intensité de la pluie sur ce paramètre peut donc être mise en évidence sans aucune interaction. La figure 34 montre que l'intensité de ruissellement maximal (R_x) est très liée à l'intensité de la pluie, ce qui est logique.

$$R_x = -17,20 + 1,14 I \quad ; \quad R^2 = 0,95 \quad ; \quad n = 12$$

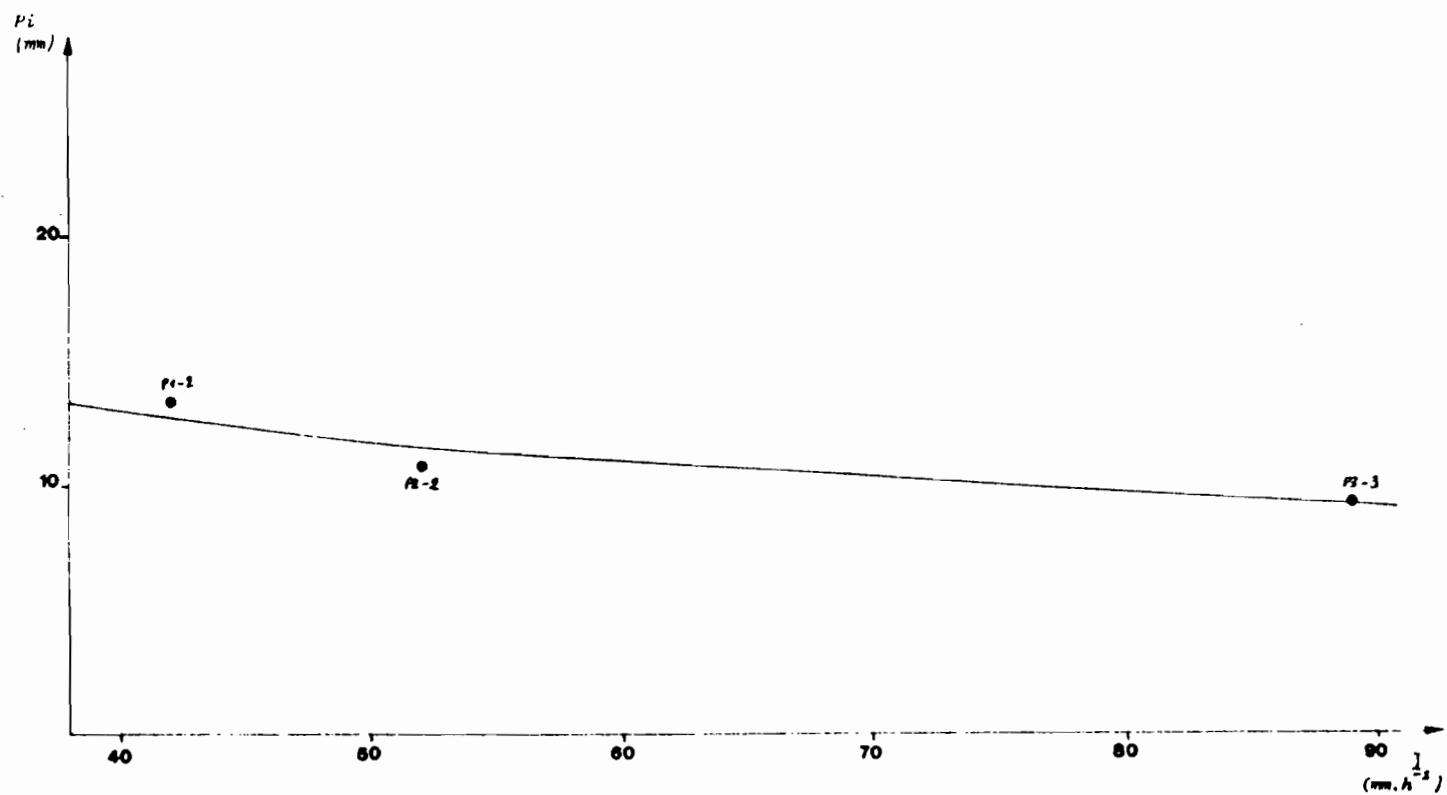


Fig. 32 : Evolution de la hauteur de pluie d'imbibition P_i en fonction de l'intensité de la pluie I

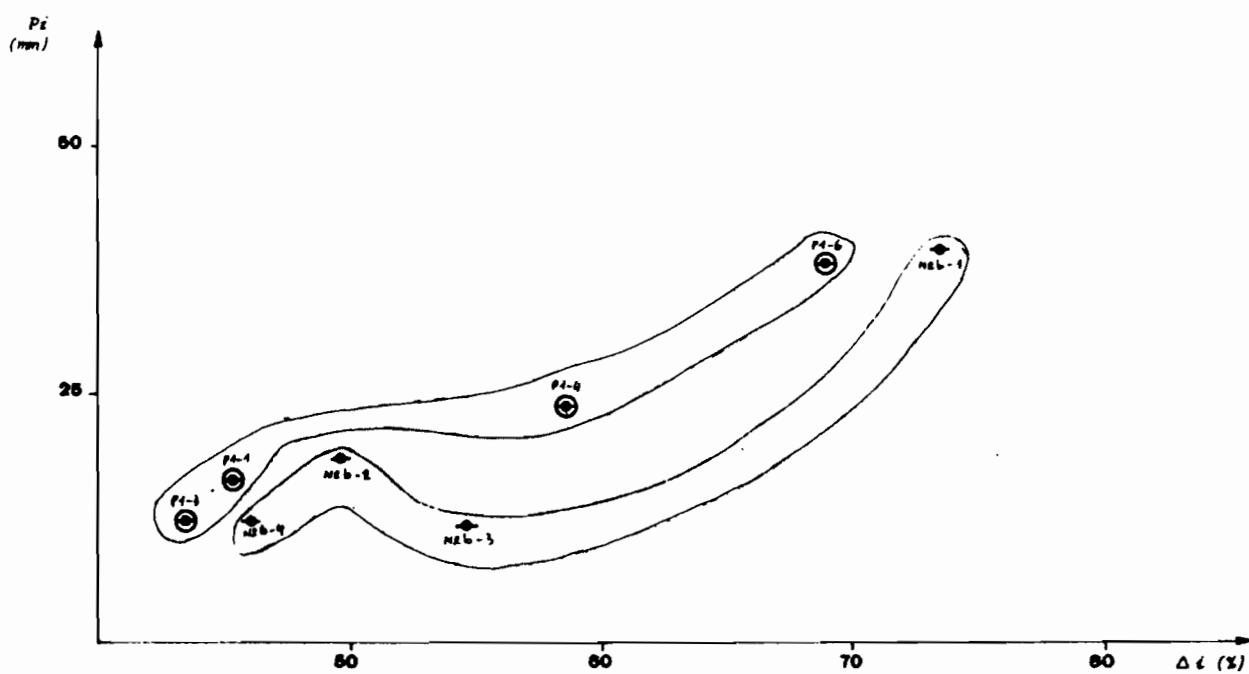


Fig. 33 : Influence du déficit de saturation sur la hauteur de pluie d'imbibition.

◆ Pente = 2%
○ Pente = 15%

Influence de la pente :

La figure 35 représentant l'intensité de ruissellement maximal (Rx) et la susceptibilité au ruissellement (B) sur les parcelles à pente comprise entre 13 et 16 % (N2b) et celles à pente comprise entre 2 et 5 %, montre qu'il n'y a pas de différence significative de la susceptibilité au ruissellement entre les deux classes de pente étudiées. Les valeurs de Rx et (B) obtenues pour les deux classes de pente se recoupent.

Les relations entre la pente et le ruissellement sont controversées. De nombreux auteurs pensent que le ruissellement augmente avec la pente (DULEY et HAYS, 1932 ; ZINGG, 1940 ; HORTON, 1945 ; MEYER et MONKE, 1965). D'autres comme ROOSE (1973) ou POESEN (1984) estiment que le ruissellement peut diminuer lorsque la pente augmente alors que YAIR et KLEIN (1973) affirment qu'il n'y a pas de relation claire entre le ruissellement et la pente.

3.4.6.3 - L'intensité d'infiltration minimale, FN :

Pour éviter l'interaction de la dégradation structurale de la surface du sol et de l'augmentation de l'intensité de la pluie, on a prévu dans notre protocole trois intensités de pluie (40, 50 et 80 mm.h⁻¹). Mais chaque intensité est simulée sur une parcelle distincte. On peut nous reprocher de ne pas tenir compte de l'hétérogénéité spatiale du sol. Mais l'important est que nous ayons homogénéisé l'état de surface des parcelles car celles-ci ont subi les mêmes préparations superficielles (au rateau) et nous considérons que l'infiltérabilité est contrôlée par l'état de surface du sol plutôt que par les horizons plus profonds, ce que pensent d'ailleurs de nombreux auteurs tels que ROOSE (1980), MOORE (1983), ALBERGEL, RIBSTEIN et VALENTIN (1985), RAHELIARISOA (1986) et TREVISAN (1986).

Pour l'intensité de 40 mm.h⁻¹, on a testé six parcelles en faisant varier le temps de ressuyage (1 h, 24 h, 72 h, état sec). Pour l'intensité de 50 mm.h⁻¹, on a testé trois parcelles (deux avec un ta de 1 h et une à l'état sec). Pour l'intensité de 80 mm.h⁻¹, on a testé quatre parcelles (dont deux avec un ta de 1 h, une avec un ta de 16 h et une dernière à l'état sec).

Les résultats de FN sont hétérogènes (fig. 36). Ces variations de FN sont peut être la conséquence de l'hétérogénéité spatiale du terrain. On ne pense pas qu'elles soient liées à l'état d'humectation initial du sol car FN est une valeur limite de l'infiltérabilité, caractéristique du sol, et est en général indépendante de la teneur en eau initiale (HILLEL, 1974). Malgré cette dispersion, il se dégage une nette décroissance

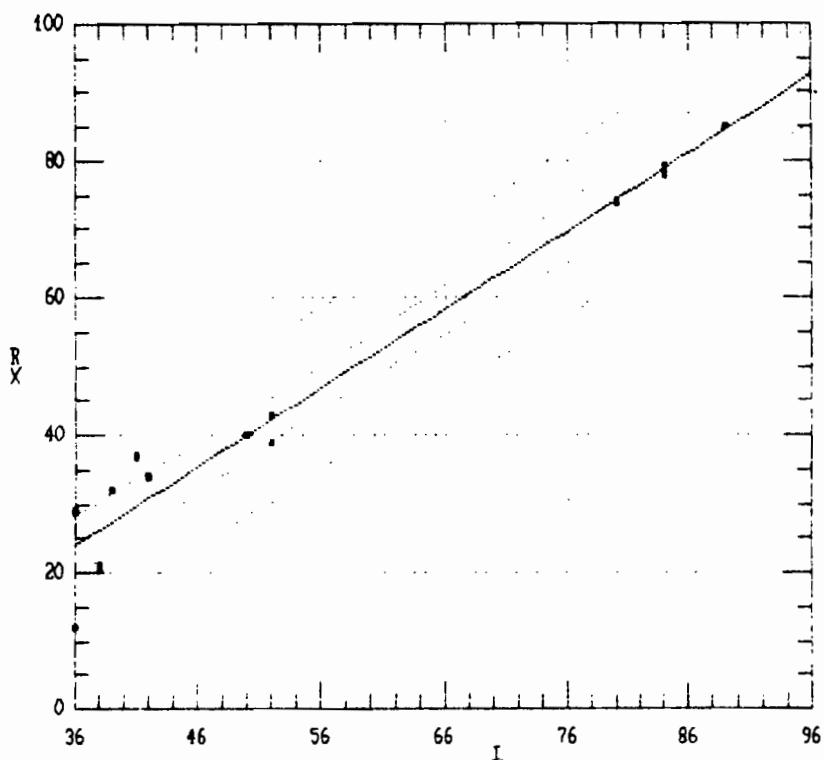
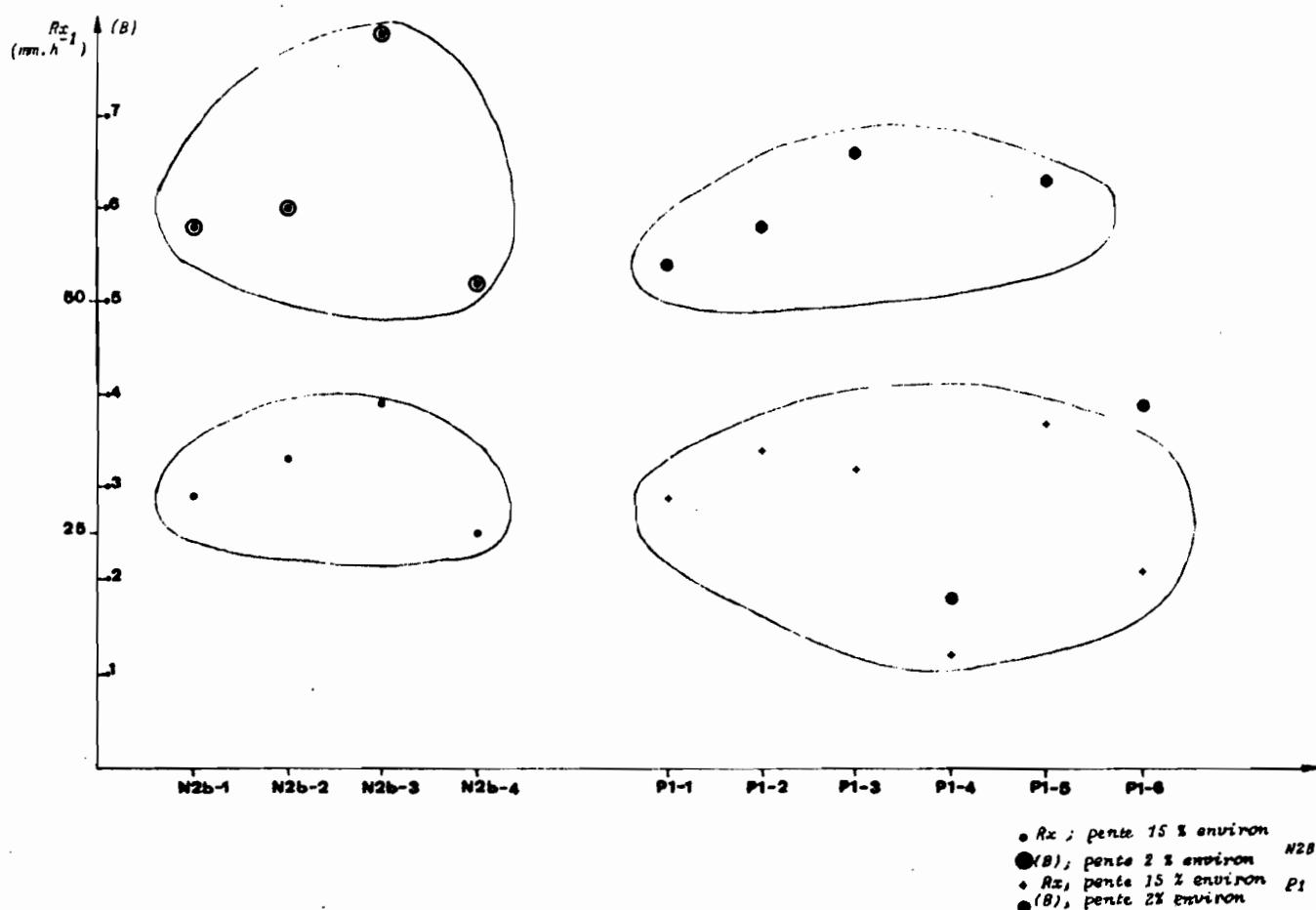


Fig. 34 : Influence de l'intensité de la pluie sur l'intensité de ruissellement# en régime permanent



: Comparaison de la susceptibilité au ruissellement de sols à pente de 15 % et de sols à pente de 2 %

de FN lorsque l'intensité de la pluie augmente (fig. 36). L'augmentation de l'intensité de la pluie de 40 mm.h^{-1} à 50 mm.h^{-1} n'a pas vraiment marqué FN tandis que l'influence de l'intensité de 80 mm.h^{-1} est très significative. Il aurait peut être été plus judicieux de simuler une pluie de 60 mm.h^{-1} au lieu de 50 mm.h^{-1} pour avoir un meilleur espace entre les intensités de pluie simulées.

Cette tendance à une décroissance de l'infiltérabilité en régime permanent, lorsque l'intensité de la pluie augmente a été observée par RAHELIARISOA (1986) et TREVISAN (1986).

Ces derniers attribuent ce phénomène à une dégradation de la surface du sol par les averses précédentes, car leur protocole était constitué d'un train d'averses d'intensité croissante, ce qui n'est pas notre cas.

Si on considère le régime d'infiltation d'un sol sujet à la formation de croûte de surface, le calcul des flux au cours d'infiltation à régime permanent suppose que les conditions d'écoulement permanent implique que le flux à travers la croûte q_c soit égal au flux passant dans la "zone de transmission" q_u en dessous de la croûte (HILLEL, 1974) :

$$q_c = q_u$$

soit

$$K_c \left(\frac{dH}{dZ} \right)_c = K_u \left(\frac{dH}{dZ} \right)_u$$

où K_c , $(dH/dZ)_c$, K_u et $(dH/dZ)_u$ sont la conductivité hydraulique et le gradient hydraulique de la croûte et de la zone de transmission sous la croûte. Le gradient de la zone de transmission tend vers l'unité quand l'infiltation devient constante, puisque le gradient de succion diminue au fur et à mesure que la profondeur humidifiée augmente de sorte que le gradient gravitationnel demeure la seule force motrice. En l'absence d'un gradient de succion dans la zone sous la croûte, on obtient, en prenant la surface du sol comme base de référence :

$$q = K_u (\Psi_u) = K_c \frac{H_0 + \Psi_u + Z_c}{Z_c}$$

où K_u (Ψ_u) est la conductivité hydraulique non saturée de la zone sous la croûte, fonction de la succion Ψ_u dans cette zone ; H_0 est la charge hydraulique positive imposée par la hauteur de submersion en surface et Z_c est l'épaisseur de la croûte.

L'évolution des paramètres K_c et Z_c en cours de pluie, suite à une dégradation structurale, entraîne une diminution de l'infiltérabilité q . Celle-ci est d'autant plus faible que l'épisode pluvieux est agressif (SAHORES, 1986). La diminution de l'infiltérabilité peut très bien être liée à l'épaississement de la croûte (augmentation du terme Z_c). Cet épaississement sera assuré essentiellement par la désagrégation mécanique des agrégats sous l'impact de l'énergie des gouttes de pluie, désagrégation d'autant plus poussée que l'intensité de la pluie est élevée. La compacité des croûtes ainsi que la continuité latérale de ces dernières peuvent aussi être impliquées dans la décroissance de l'infiltérabilité.

L'intensité limite de pluie peut être déterminée :

- soit graphiquement (intersection de la droite $FN = I$ avec la droite $FN = f(I)$,
- soit par régression linéaire : $FN = A + B \cdot I$

$$I_1 = \frac{B}{1 - A}$$

Dans notre cas, on trouve : $FN = 17,2 - 0,14 \cdot I$

$$I_1 = 15 \text{ mm.h}^{-1}$$

Cette intensité est très courante dans la région ; elle est de fréquence annuelle.

Influence de la pente :

Comme pour le ruissellement, l'influence de la pente sur l'infiltérabilité en régime permanent n'est pas nette (tableau 10) ; il se dégage toutefois une légère tendance à une diminution de FN lorsque la pente augmente.

Conclusion :

Sur ces sols argilo-limoneux, la diminution de l'infiltérabilité est une conséquence directe de la dégradation structurale de la surface du sol. Cette dégradation est favorisée par la présence à la surface du sol d'un fort pourcentage de mottes fines qui sont très sensibles à la désagrégation (mécanique par l'effet "splash", et par éclatement) ; elle est d'autant plus poussée que les épisodes pluvieux sont agressifs (intensité - durée).

En considérant une situation moyenne (moyenne des répétitions), on aboutit au schéma de la figure 37 où :

- la décroissance de l'infiltérabilité en dessous de l'intensité pluvio-métrique, survient d'autant plus tardivement que l'intensité de la pluie est faible. En d'autres termes, le ruissellement se déclenche d'autant plus rapidement qu' l'intensité de la pluie est élevée, ce qui concorde avec les observations de MOLDENHAUER et LONG (1964). L'infiltérabilité finale est d'autant plus basse que l'intensité de la pluie est élevée et que la dégradation structurale de la surface du sol atteint son maximum par un épaisissement et/ou une extension de la croûte superficielle.

L'augmentation de l'intensité de la pluie réduit aussi la phase d'imbibition, donc P_i , mais augmente le ruissellement.

L'influence de la pente sur la susceptibilité au ruissellement ou l'infiltération en régime permanent, n'est pas nette ; ceci n'est-il pas dû à la faible longueur de pente des parcelles (1 M) ? Par contre, la pente réduit la pluie d'imbibition par suite de la diminution de l'efficacité de la rugosité.

- L'augmentation de l'intensité de la pluie réduit la phase d'imbibition, donc P_i , car la capacité d'infiltération du sol se trouve rapidement dépassée ; elle accentue el ruissellement et entraîne une décroissance de l'infiltérabilité à cause probablement de l'effet combiné de l'extension et de l'épaissement des croûtes de battance

- L'augmentation de la pente réduit la pluie d'imbibition car l'efficacité de la rugosité diminue.

L'influence de la pente sur le ruisellement et l'infiltération n'est pas nette ; il semble toutefois que la pente augmente le ruissellement et réduit l'infiltération.

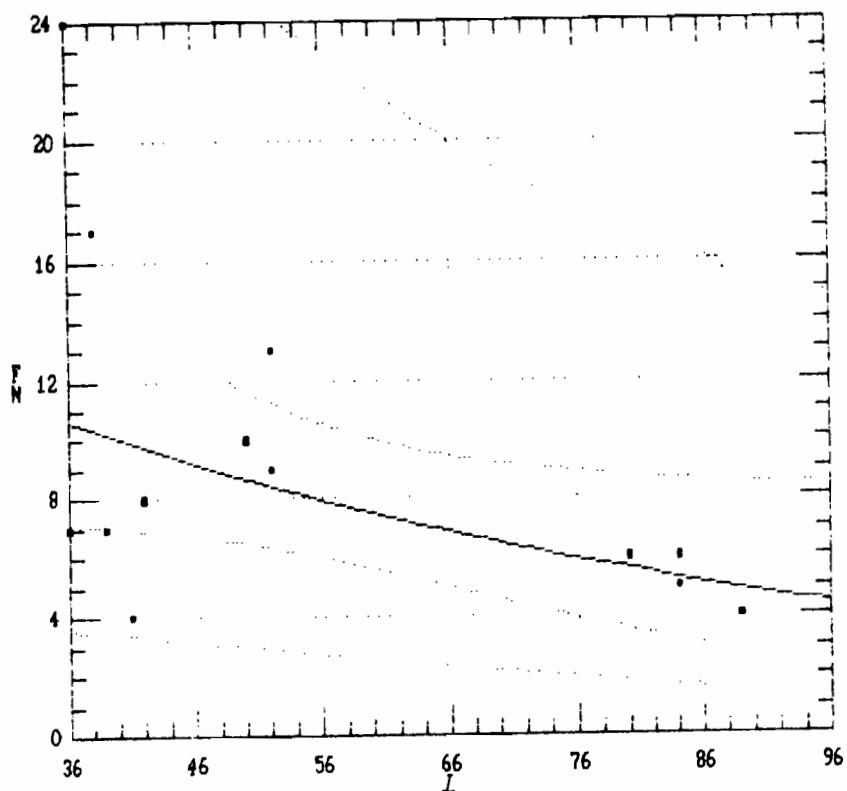


Fig. 36 : Influence de l'intensité de la pluie sur l'intensité d'infiltration en régime permanent

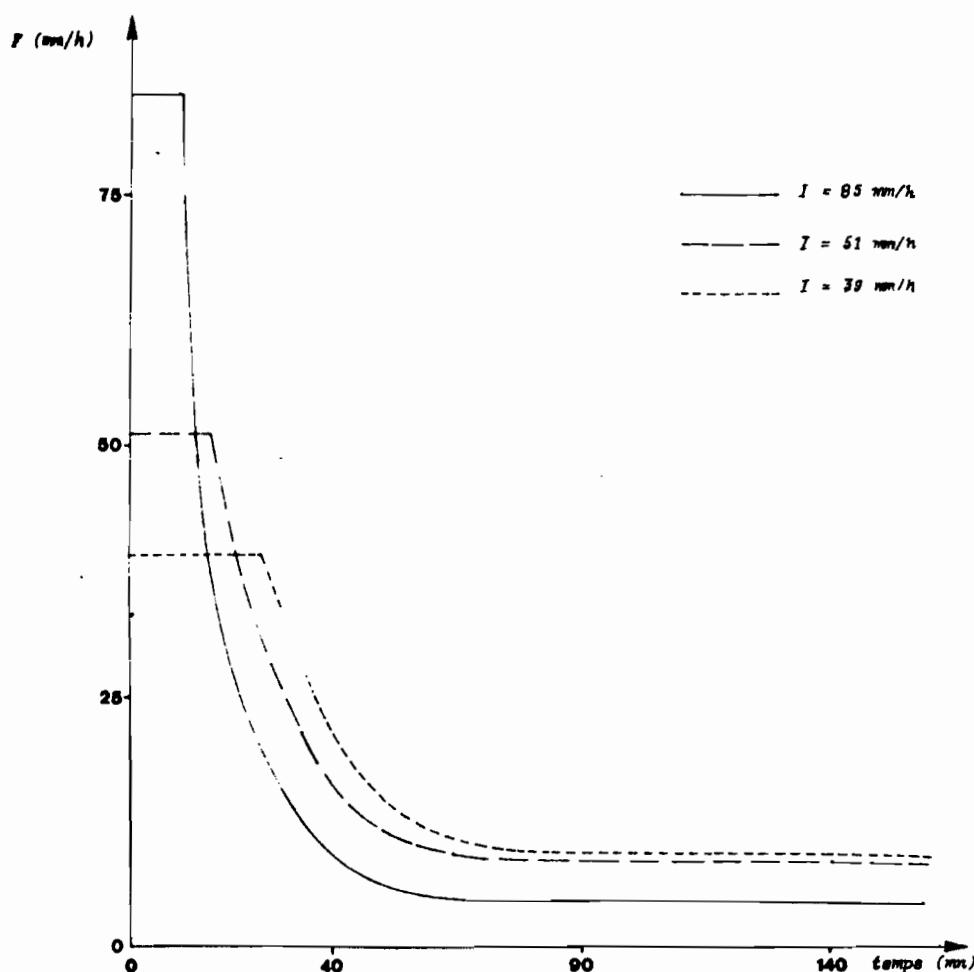


Fig. 37 : Effet de l'intensité de la pluie sur l'infiltration

3.4.7 - L'exportation des matières solides :

3.4.7.1 - Généralités :

La mise en culture expose le sol à l'action directe des précipitations et favorise ainsi les phénomènes de ruissellement et d'érosion. Ces problèmes sont souvent liés au développement de l'agriculture soit par intensification soit par extension des cultures. L'importance économique du problème d'érosion est de taille caractérisée par :

- une perte immédiate de production des champs
- une perte des surfaces exploitables
- une dégradation des surfaces exploitables
- un décapage et une perte de fertilité de l'horizon humifère
- une nuisance sur la qualité des eaux et sur l'envasement.

Aux U.S.A. où certaines régions furent gravement touchées (en 1930, 20 % du territoire américain fut dévasté par l'érosion), des études importantes ont été entreprises dès 1930 (BENNETT, 1939) ; elles ont débouché sur un modèle pour la prédition de l'érosion, appelé "Universal-Soil-Loss-Equation" (WISCHMEIER et SMITH, 1965). Ce modèle a été tiré de l'analyse de 10.000 résultats annuels récoltés pendant 30 ans sur 46 stations. Son objectif est la prévision de l'érosion à l'échelle du champ pour choisir le type d'aménagements nécessaires en vue de garder l'érosion en dessous d'une valeur limite. Ce modèle comporte six grands facteurs qui représentent chacun une équation paramétrique

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P \quad \text{où}$$

A : représente l'érosion ou pertes en terre en t/ha

R : représente l'érosivité des pluies en t/ha par séquence pluvieuse

K : représente l'indice d'érodibilité

S : représente l'inclinaison de la pente en %

L : représente la longueur de pente en mètre

C : représente le rapport entre la perte en terre d'une culture et la perte en terre du même champ maintenu en jachère nue travaillée dans le sens de la pente

P : représente les pratiques de lutte anti-érosive

L'érosivité (R) est la faculté d'une pluie de causer de l'érosion. L'indice d'érosivité est par définition égal au produit de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité maximale en 30 mn ; il caractérise l'effort de l'impact des gouttes de pluie. Le choix de l'intensité maximale en 30 mn I_{30} est purement empirique (BOLLINE et al, 1984) ; il a été fait sur la base d'analyses statistiques pour son adaptation aux conditions climatiques du Centre des U.S.A..

L'utilisation de I_{30} en Europe est sujette à caution car les pluies sont généralement de faible intensité et celles de forte intensité sont le plus souvent inférieures à 30 mm (LAURENT et BOLLINE, 1978).

L'érodibilité (facteur K) est la sensibilité intrinsèque d'un sol à l'érosion; elle dépend uniquement des caractéristiques du sol.

$$K = \frac{A}{R.S.L.2,24}$$

2, 24 est un coefficient de transformation des unités

K est déterminée expérimentalement au champ et représente l'érosion en t/ha lorsque tous les autres facteurs de l'équation ont une valeur unitaire, c'est à dire par unité d'indice d'érosivité des pluies, et lorsque les mesures sont effectuées sur des parcelles longues (22,13 m) installées sur des pentes de 9 %, travaillées parallèlement à la pente et maintenues en jachère nue sans apport de matière organique pendant 3 ans. Un modèle pour estimer K a été proposé par WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS (1971) et ne comprend que 5 paramètres simples qui sont :

- le taux de la fraction granulométrique comprise entre 2 et 10 microns
- le taux de la fraction granulométrique comprise entre 100 et 2000 microns
- la teneur du sol en matière organique (en %)
- la structure du sol
- la perméabilité

Ces cinq paramètres sont des résultats d'analyse de l'horizon Ap corrigés par des observations au champ.

L'équation universelle des pertes en terre permet de prévoir l'érosion annuelle moyenne sur 20 ans pour une parcelle donnée, dans des conditions bien définies. Ce modèle ne peut prévoir les pertes en terre sur une courte période (saison) ou consécutivement à un épisode pluvieux isolé. En négligeant l'état hydrique du sol au moment où survient une précipitation, ce modèle ne peut apprécier la très grande variabilité de réponse que peut fournir une parcelle pour différents événements pluvieux identiques. Il ne s'applique en outre qu'à l'érosion en nappe, sur des sols bruns lessivés tempérés, ferrallitiques et ferrugineux tropicaux dont le paysage est constitué de pénéplaines et de collines. Actuellement, ce modèle sert surtout de guide pratique pour les développeurs. Il ne satisfait pas toujours les scientifiques qui recherchent des modèles physiques qui renseignent davantage sur les processus élémentaires.

Le modèle proposé par MEYER et WISCHMEIER (1969) est basé sur des équations qui évaluent les quatre actions de l'érosion hydrique : détachabilité par la pluie et par le ruissellement et capacité de transport

de la pluie et du ruissellement. Ce modèle calcule les pertes en terre par tronçon de longueur de pente et les achemine vers l'aval (fig. 38) (VIANI, 1986)

Avec la méthode de simulation de pluie, on ne mesure que la naissance du ruissellement et de sa charge solide : l'érosion que l'on mesure intègre aussi bien la détachabilité par le "splash" que le transport par le ruissellement. On parlera plutôt de transports solides ou débits solides ou érosion en nappe car on pense qu'à l'échelle de 1 m² le ruissellement ne peut avoir beaucoup d'énergie érodante.

Le bilan pondéral des transports solides n'est déterminé que par des observations discontinues. Nous étudierons dans ce chapitre la turbidité des eaux de ruissellement et les débits solides. Nous analyserons l'influence que peuvent avoir certains facteurs (état de surface, état hydrique initial, l'intensité de la pluie et la pente topographique) sur ces deux paramètres mécaniques.

3.4.7.2 - La turbidité des eaux de ruissellement :

L'évolution théorique de la charge solide, exprimée en g.l⁻¹, en fonction du temps est décrite dans le chapitre I, fig. 5 . L'observation des turbidigrammes expérimentaux (fig. 12 et 13) montre que la turbidité ne suit pas le schéma théorique énuméré dans le chapitre I et qu'elle peut être fort variable, même en période de stabilité du ruissellement (lâchage de microbarrages, érosion remontante entre deux mottes etc...) ; dans plusieurs cas, elle est même croissante tout au long de l'essai (témoignage d'une fragilisation croissante des mottes en cours d'humectation) (ROOSE et ASSELINE, 1978 ; DEUMIER et ROOSE, 1985). Ce fait a déjà été observé lors de la campagne de 1985 sur les sols du Lauragais.

Signalons qu'à la fin de chaque essai, une quantité importante de terre érodée est piégée dans le canal d'écoulement ; celle-ci est probablement due à l'éboulement des mottes situées à proximité immédiate des fentes drainant les eaux de ruissellement. Cette terre ramassée dans le canal peut atteindre 450 g.m⁻², donc beaucoup plus que les pertes en terre fine en suspension ; elle n'a pas été prise en compte dans les calculs.

Vu l'hétérogénéité de l'évolution de la turbidité en fonction du temps, on a préféré n'étudier que la charge solide moyenne (Cm),

$$\text{avec } C_m = \sum_{i=1}^n C_i/n$$

A/ Variabilité inter-traitements :

Il est difficile de mettre en évidence l'influence des traitements tant la variabilité à l'intérieur d'un même traitement est grande.

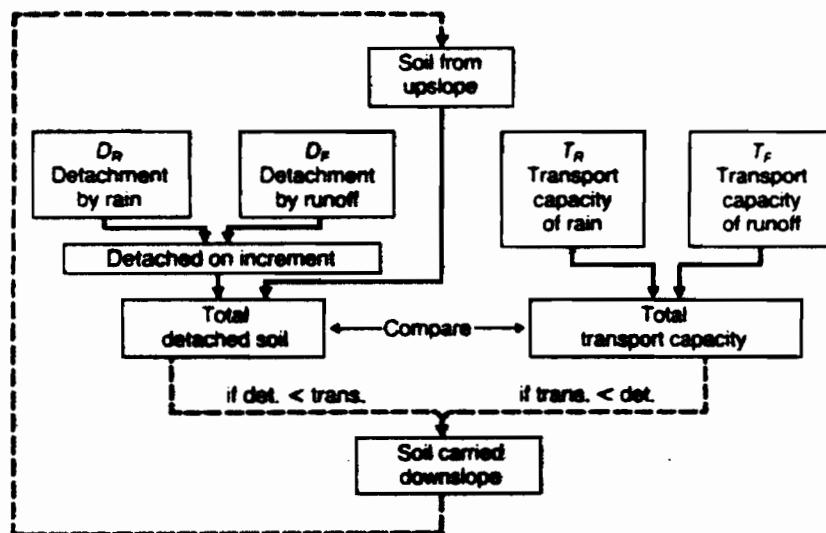


Fig. 38 : Décomposition de l'érosion hydrique selon le modèle de Meyer et Wischmeier

La charge solide moyenne varie de :

- 1,5 à 9 g/l sur le traitement N1)
- 4 à 33 g/l sur le traitement N2) mottes relativement grosses
- 0,8 à 15 g/l sur le traitement N3)
- 4 à 14 g/l sur le traitement N4) mottes moyennes
- 15 à 21 g/l sur le traitement N5)
- 10 à 41 g/l sur le traitement N7)
- 6 à 27 g/l sur le traitement N8) mottes fines
- 4 à 14 g/l sur le traitement N2b)

Si on considère que les parcelles arrosées avant l'essai, en faisant abstraction de certaines répétitions (N2-1, N2-3, N3-3 et N7-2) dont les valeurs de Cm semblent trop élevées par rapport à l'ensemble à cause probablement des phénomènes de lachage plus abondants sur ces parcelles, on obtient :

- N1 : ? (pas de parcelle arrosée 1 heure avant l'essai)
- N2 : $C_m = 4,4 \text{ g.l}^{-1}$
- N3 : $C_m = 3,6 \text{ g.l}^{-1}$
- N4 : $C_m = 6 \text{ à } 14 \text{ g.l}^{-1}$
- N5 : $C_m = 15 \text{ à } 21 \text{ g.l}^{-1}$
- N7 : $C_m = 10 \text{ à } 24 \text{ g.l}^{-1}$
- N8 : $C_m = 6 \text{ à } 17 \text{ g.l}^{-1}$
- N2b : $C_m = 4 \text{ à } 14 \text{ g.l}^{-1}$

Les traitements se classeraient ainsi par ordre de turbidité décroissante :

$$N7 > N8 > N5 > N2b \text{ et } N4 > N2 > N3 > N1 ?$$

Ce sont les traitements à éléments structuraux moyens et fins qui présentent les plus fortes turbidités. Le traitement N3 malgré sa très forte susceptibilité au ruissellement montre les plus faibles turbidités à cause de la rigidité des mottes superficielles fabriquées en condition humide après avoir tassé le labour à 2 reprises. L'ajout de grosses mottes sur un lit de semence initialement fin n'a pas eu d'effet positif sur la turbidité.

Si on ne considère que les parcelles sèches (non arrosées) on obtient par ordre de turbidité décroissante :

$$N8 > N7 > N2b > N2 > N4 > N3 > N1$$

- les traitements à éléments structuraux fins (N7 et N8) se démarquent nettement
- le témoin N1 semble le plus résistant et le plus efficace
- il n'y a pas de grande différence entre l'effet d'un tassemement et l'effet d'un lit de semence plus épais.

Il se dégage une influence nette de l'affinement du lit de semence : les traitements à éléments structuraux fins (N7, N8) s'érodent les premiers alors qu'un traitement moyen à grossier réduit la détachabilité (N1).

Influence de la pente :

Pour mettre en évidence l'influence de la pente sur Cm, on va comparer le traitement N2b (lit de semence à éléments structuraux fins, $I = 40 \text{ mm.h}^{-1}$ et pente = 15 %) avec les parcelles du plateau (lit de semence à éléments structuraux fins, $I = 40 \text{ mm.h}^{-1}$ et pente = 2 %). Si on considère les différents essais correspondant à des temps de ressuyage différents, on trouve que :

- * sur pente de 15 %, Cm varie de 4 à 14 g.l^{-1}
- * sur pente de 2 %, Cm varie de 1,3 à $2,7 \text{ g.l}^{-1}$
- si on considère les parcelles arrosées une heure avant l'essai,
- * sur pente de 15 %, Cm varie de 6 à 14 g.l^{-1}
- * sur pente de 2 %, Cm varie de 1,9 à $2,7 \text{ g.l}^{-1}$
- si le sol est sec,
- * sur pente de 15 %, Cm = $4,4 \text{ g.l}^{-1}$
- * sur pente de 2 %, Cm = $1,3 \text{ g.l}^{-1}$

Dans tous les cas, la turbidité est beaucoup plus élevée lorsque la pente est forte. Ceci est dû à un lachage de structure et à une diminution de l'efficacité de la rugosité. ROOSE et ASSELINE (1978) montrent sur des sols ferralitiques très riches en sables grossiers que la turbidité croît nettement plus vite que la pente : quand celle-ci augmente de 4 à 20 %, la charge solide (turbidité) est multipliée par 17. Sur les sols argileux du Lauragais, l'augmentation de la turbidité est moins rapide : elle est quatre à cinq fois plus élevée lorsqu'on passe d'une pente de 2 % à une pente de 15 %. Ceci s'explique par une meilleure structuration des sols argileux.

Influence de l'état d'humectation initial du sol :

Sur tous les traitements, exceptés N7 et N8 (traitements à éléments structuraux fins), la turbidité est plus faible lorsque l'état initial du sol est plus sec. L'évolution de la turbidité en fonction du déficit de saturation (fig. 39) montre une décroissance de celle-ci au fur et à mesure que Δi croît. De telles observations avaient déjà été faites par ROOSE et ASSELEINE (1978), ROOSE (1980), POESEN et SAVAT (1981) et SABET (1986).

Influence de l'intensité de la pluie :

L'influence de l'intensité de la pluie sur Cm n'est pas claire ; la turbidité semble indépendante de l'intensité de la pluie. On peut penser à une augmentation de l'effet "splash" avec l'intensité de la pluie, mais l'augmentation des volumes ruisselés dilue probablement la charge solide et maintient cette dernière à une valeur relativement stable.

Influence de l'affinement du lit de semence :

En faisant abstraction des parcelles sèches où la turbidité est souvent faible, ainsi que de certaines répétitions où on a estimé que la turbidité n'est liée qu'à des problèmes de lachages (N2-2, N2-3 et N3-3), on constate que la turbidité croît exponentiellement avec le taux de mottes inférieures à 0,5 cm (fig. 40). Les fortes turbidités du traitement N7 ne s'alignent pas sur cette courbe. Elles s'expliquent par le fait que le lit de semence initial était fin et que l'ajout de grosses mottes n'a fait qu'augmenter la turbidité.

L'émettement du lit de semence favorise les pertes en terre. En effet, ce sont surtout les éléments structuraux fins qui sont les plus sensibles à l'effet de "splash" sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie, ainsi qu'aux phénomènes d'éclatement.

Influence du tassement :

Le tassement n'a fait que consolider le sol et rend ce dernier peu sensible au détachement. Mais de telles pratiques ne peuvent être conseillées car elles empêchent le bon ressuyage du sol.

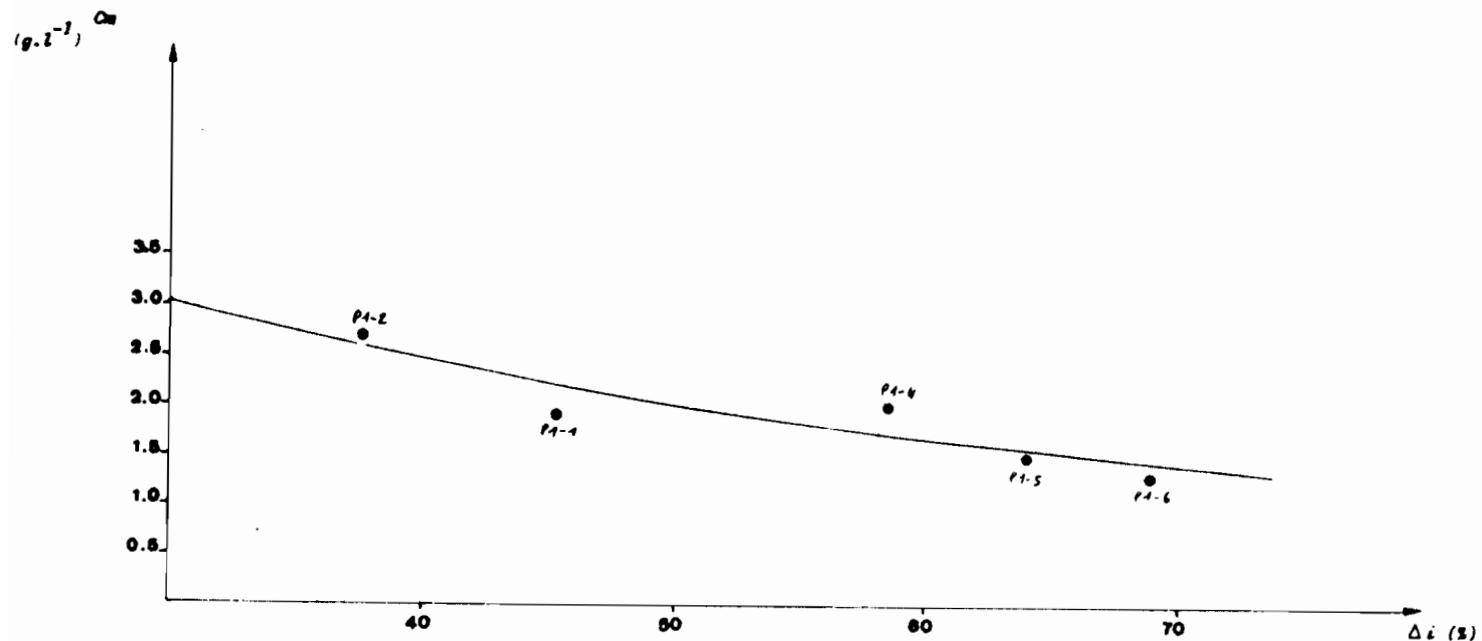


Fig. 39 : Evolution de la turbidité en fonction du déficit de saturation du sol

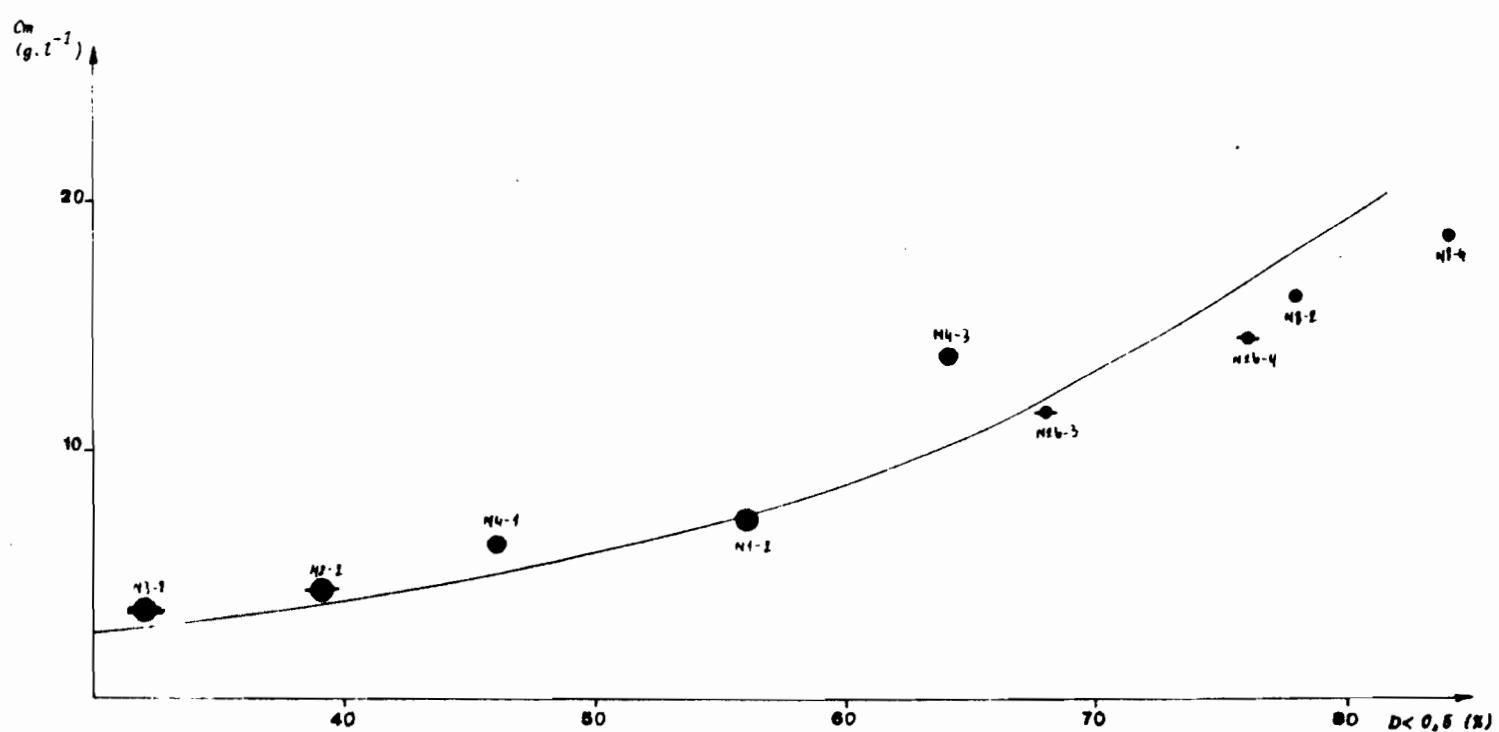


Fig. 40 : Evolution de la turbidité en fonction de mottes inférieures à 0,5 cm

B/ Variabilité intra-traitement :

La variabilité intra-traitement de la turbidité est aussi forte que la variabilité inter-traitements ; elle n'est pas claire. Elle peut être dûe aux phénomènes de lachâges de micro-barrages, plus abondants sur certaines parcelles que sur d'autres. Mais on note une interaction entre les mottes < 0,5 cm et le déficit de saturation du sol.

Discussion – Conclusion :

La turbidité est surtout influencée par la pente du terrain ; elle est aussi liée au taux de mottes inférieures à 0,5 cm, et au déficit de saturation du sol. Mais le facteur causal de la désagrégation des mottes est la pluie. En effet, les phénomènes de désagrégation peuvent avoir plusieurs origines :

- lors de l'humectation, il se produit un gonflement consécutif à la présence d'argile smectifique (les smectites sont avec les illites les deux minéraux phylliteux les plus abondants dans les sols de NARBONS (DEUMIER et ROOSE, 1985). Cette humectation s'accompagne d'une liquéfaction et dispersion des agrégats par suite de la diminution des liens entre les particules du sol (VALENTIN, 1981).
- lors de l'humectation, on peut assister à une désagrégation par éclatement qui survient à la suite d'une baisse de cohésion lors de l'imbibition et du piégeage de l'air dans les agrégats en voie de saturation ; imbibition qui comprime l'air interne et fait éclater les fragments (BOIFFIN, 1984).
- la désagrégation par les gouttes de pluie : l'énergie cinétique des pluies exerce au point d'impact sur les agrégats du sol préalablement humectés, un effet mécanique. Les gouttes de pluie détachent les particules fines de la surface des agrégats et les entraînent en suspension. Les processus de rejaillissement jouent un rôle capital comme le démontre l'expérience de HUDSON (1960) où l'interception d'une partie de l'énergie cinétique des gouttes de pluie par une toile de moustiquaire tendue au dessus du sol a considérablement réduit les pertes en terre. Cette désagrégation sous l'impact des gouttes de pluie diminue progressivement au fur et à mesure que la lame d'eau à la surface du sol devient importante. En effet, l'existence d'un film

d'eau à la surface du sol modifie l'effet érosif de l'impact des gouttes de pluie. Selon plusieurs auteurs, cet effet dépend du rapport diamètre des gouttes/épaisseur de la lame d'eau en surface. Selon PALMER (1965) l'effet du "splash" est maximum pour un rapport égal à 1, MUTCHEL et LARSON (1971) pensent plutôt à un rapport égal à 0,2 alors que pour POESEN et SAVAT (1981), l'existence d'un film d'eau élimine de toute façon l'effet de l'impact.

Ces trois processus de la désagrégation sont maximums pendant la phase d'imbibition. Dès l'apparition du ruissellement leur effet diminue entraînant une diminution de la détachabilité même si certains auteurs pensent que l'impact des gouttes de pluie entretient la turbulence du ruissellement et accroît de ce fait la capacité de transport de ce dernier. Selon VALENTIN (1981), ces processus n'interviennent pas tous avec la même importance pour les différentes classes granulométriques des sols (différentes classes texturales).

3.4.7.3 - Les débits solides :

Les débits solides appelés aussi transports solides ou érosion en nappe, sont le produit par unité de temps de la turbidité (exprimée en g.l^{-1}) par le ruissellement (exprimé en mm) ; ils sont exprimés en $\text{g.m}^{-2} \cdot \text{t}^{-1}$. Dans notre cas, ils seront exprimés en $\text{g.m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

A/ Variabilité inter-traitements :

En faisant abstraction des parcelles N2-1, N2-3, N3-3 et N7-2 où les turbidités enregistrées sont largement supérieures à celles des autres répétitions à cause probablement d'abondants lâchages de micro-barrages, le débit solide varie de :

- 0 à 121 $\text{g.m}^{-2}/\text{h}$ sur le traitement N1
- 59 à 132 $\text{g.m}^{-2}/\text{h}$ sur le traitement N2
- 22 à 108 $\text{g.m}^{-2}/\text{h}$ sur le traitement N3
- 8 à 143 $\text{g.m}^{-2}/\text{h}$ sur le traitement N4
- 126 à 263 $\text{g.m}^{-2}/\text{h}$ sur le traitement N5
- 20 à 218 $\text{g.m}^{-2}/\text{h}$ sur le traitement N7
- 64 à 376 $\text{g.m}^{-2}/\text{h}$ sur le traitement N8
- 0 à 208 $\text{g.m}^{-2}/\text{h}$ sur le traitement N2b

Les traitements se classeraient ainsi par ordre de débit solide décroissant :

$$N8 > N7 > N5 > N2b > N4 > N2 > N1 > N3$$

Si on ne considère que les parcelles arrosées 1 h avant l'essai, on a :

$$N1 : 14 \text{ à } 121 \text{ g.m}^{-2}/\text{h}$$

$$N2 : 132 \text{ g.m}^{-2}/\text{h}$$

$$N3 : 22 \text{ à } 108 \text{ g.m}^{-2}/\text{h}$$

$$N4 : 43 \text{ à } 143 \text{ g.m}^{-2}/\text{h}$$

$$N5 : 126 \text{ à } 263 \text{ g.m}^{-2}/\text{h}$$

$$N7 : 20 \text{ à } 218 \text{ g.m}^{-2}/\text{h}$$

$$N8 : 64 \text{ à } 376 \text{ g.m}^{-2}/\text{h}$$

$$N2b : 41 \text{ à } 208 \text{ g.m}^{-2}/\text{h}$$

On peut classer les différents traitements ainsi, par ordre de débit solide décroissant :

$$N8 > N5 ? > N7 > N2b > N4 > N2 > N1 > N3$$

Sur les parcelles non arrosées, les débits solides sont les suivants :

N1-1	N2-4	N3-4	N4-4	N5	N7-4	N8-3	N2b-1
0,0	59,0	47,0	8,0	pas fait	209,0	326,0	0

On peut les classer ainsi dans un ordre décroissant :

$$N8 > N7 > N2 > N3 > N4 > N2b = N1$$

- * les traitements à éléments structuraux fins (N7 et N8) sont les plus sensibles à l'érosion ; le type de préparation du lit de semence apparaît particulièrement défavorable
- * l'efficacité du traitement témoin (N1) est une nouvelle fois mise en évidence
- * malgré sa faible érodibilité, le traitement tassé deux fois (N3) ne peut être conseillé car c'est le moins filtrant.

Influence de la pente sur les débits solides :

Le traitement N2b et les parcelles du plateau, ayant été soumis à une pluie de 40 mm.h^{-1} , vont nous servir de comparaison pour mettre en évidence l'influence de la pente sur les transports solides.

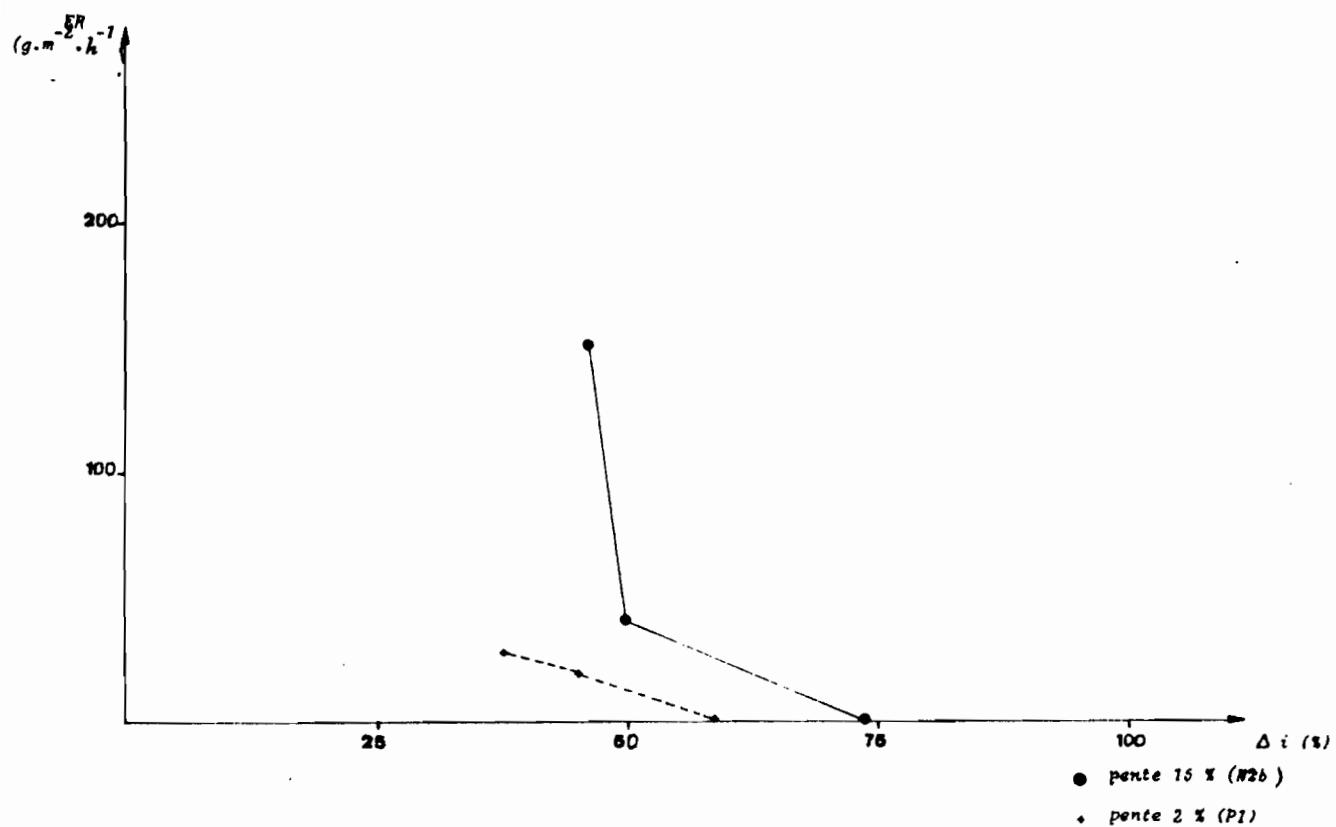


Fig. 41 : Effet de la pente sur le débit solide

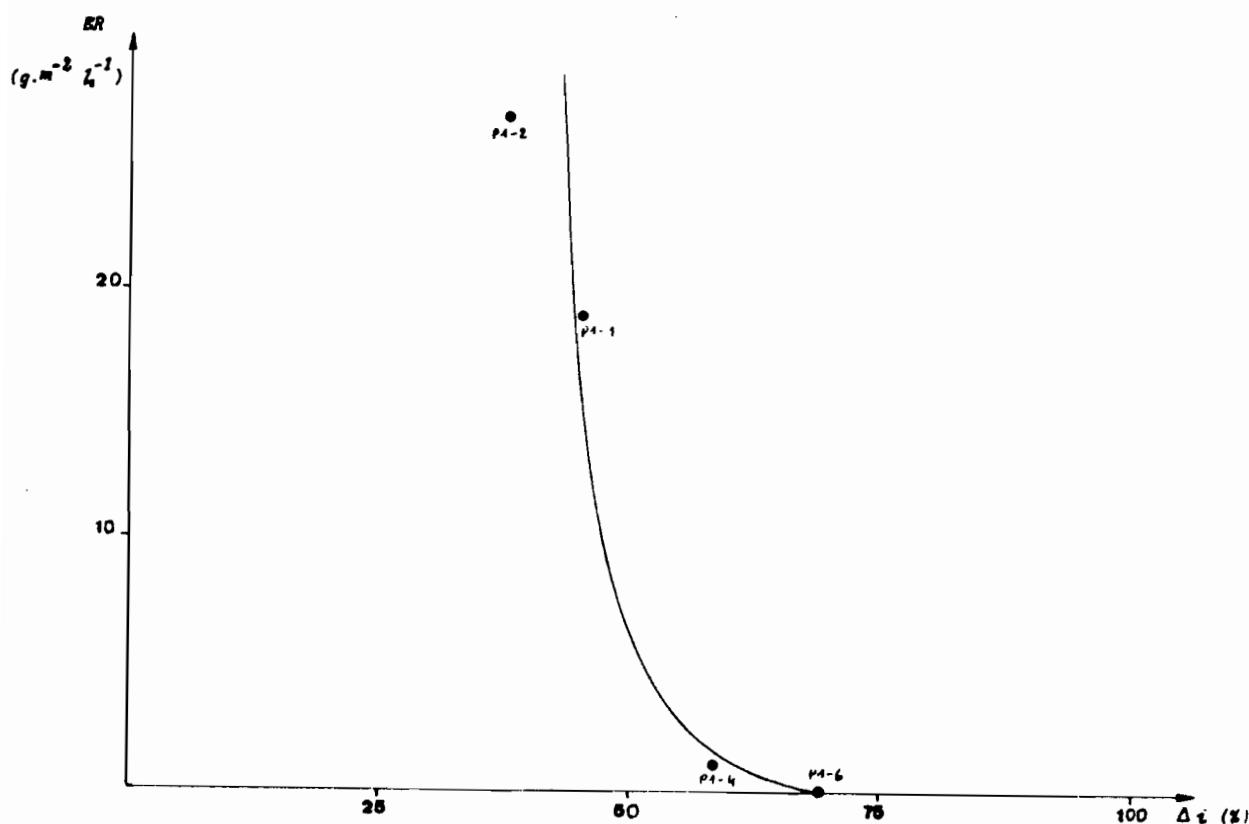


Fig. 42 : Influence du déficit de saturation sur le débit solide

- * sur une pente de 15 %, ER varie de 0 à 208 g.m⁻².h⁻¹
- * sur une pente de 2 %, ER varie de 0 à 27 g.m⁻².h⁻¹
- sur les parcelles non arrosées (sèches) et pour les deux classes de pente, ER = 0
- sur les parcelles arrosées une heure avant l'essai :
 - * sur une pente de 15 %, ER varie de 41 à 152 g.m⁻².h⁻¹
 - * sur une pente de 2 %, ER varie de 19 à 27 g.m⁻².h⁻¹

Dans tous les cas, les transports solides sont beaucoup plus importants sur une pente de 15 % et ceci est illustré par la figure 41. L'augmentation de la pente conduit à des pertes en terre considérables (VIANI, 1986). ZINGG (1940), WISCHMEIER et SMITH (1960), HUDSON (1973), MORGAN (1979) montrent que l'érosion augmente avec la pente. Mais les règles classiques ne s'appliquent plus lorsque le sol est partiellement couvert. LAL (1975) montre que la pente n'avait pas d'influence sur l'érosion d'un sol protégé par un mulch tandis que YAIR et KLEIN (1973) affirment qu'en climat subdésertique, les pertes en terre diminuent avec la pente lorsque le sol est couvert d'éléments grossiers.

Influence de l'état d'humectation initial du sol sur les transports solides :

Les transports solides sont liés aux volumes ruisselés qui eux mêmes dépendent de la phase d'imbibition, donc du déficit de saturation du sol. La figure 42 montre que le débit solide diminue exponentiellement avec le déficit de saturation du sol ; ce qui a été observé auparavant par ROOSE et ASSELINE (1978), ROOSE (1980), SABET (1986) et VIANI (1986).

Influence de l'intensité de la pluie :

Cette influence a été mise en évidence grâce à l'essai effectué sur le plateau. Le débit solide sera désigné sous le code ER qui veut dire érosion (en nappe).

- si on considère différents temps de ressuyage :
 - * pour I (intensité de la pluie) = 40 mm.h⁻¹, ER varie de 0 à 27 g.m⁻².h⁻¹
 - * pour I = 50 mm.h⁻¹, ER varie de 17 à 47 g.m⁻².h⁻¹
 - * pour I = 80 mm.h⁻¹, ER varie de 105 à 140 g.m⁻².h⁻¹
- si on considère les parcelles arrosées une heure avant l'essai (ta = 1 h)
 - * pour I = 40 mm.h⁻¹, ER = 19 à 27 g.m⁻².h⁻¹
 - * pour I = 50 mm.h⁻¹, ER = 29 à 47 g.m⁻².h⁻¹
 - * pour I = 80 mm.h⁻¹, ER = 133 à 140 g.m⁻².h⁻¹

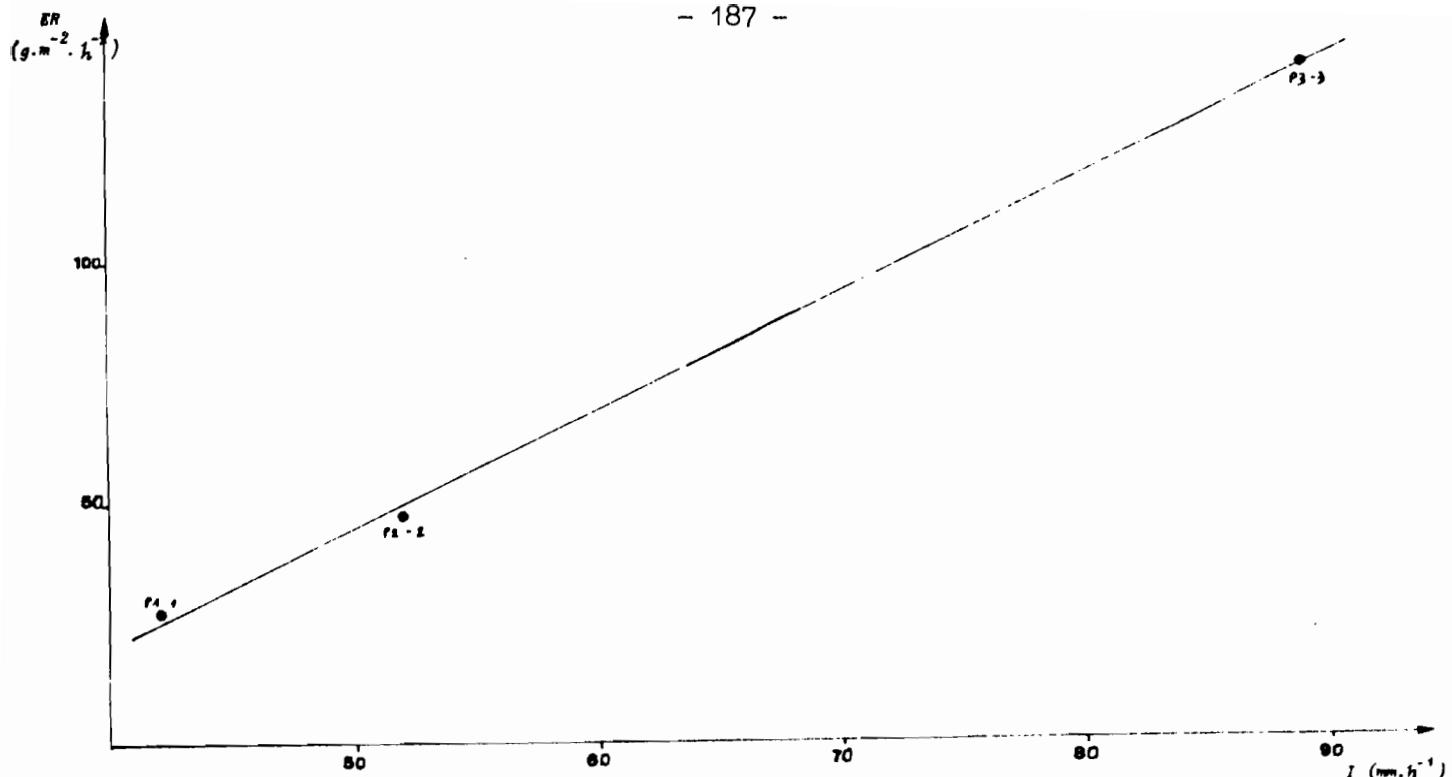


Fig. 43 : Evolution du débit solide en fonction de l'intensité de la pluie

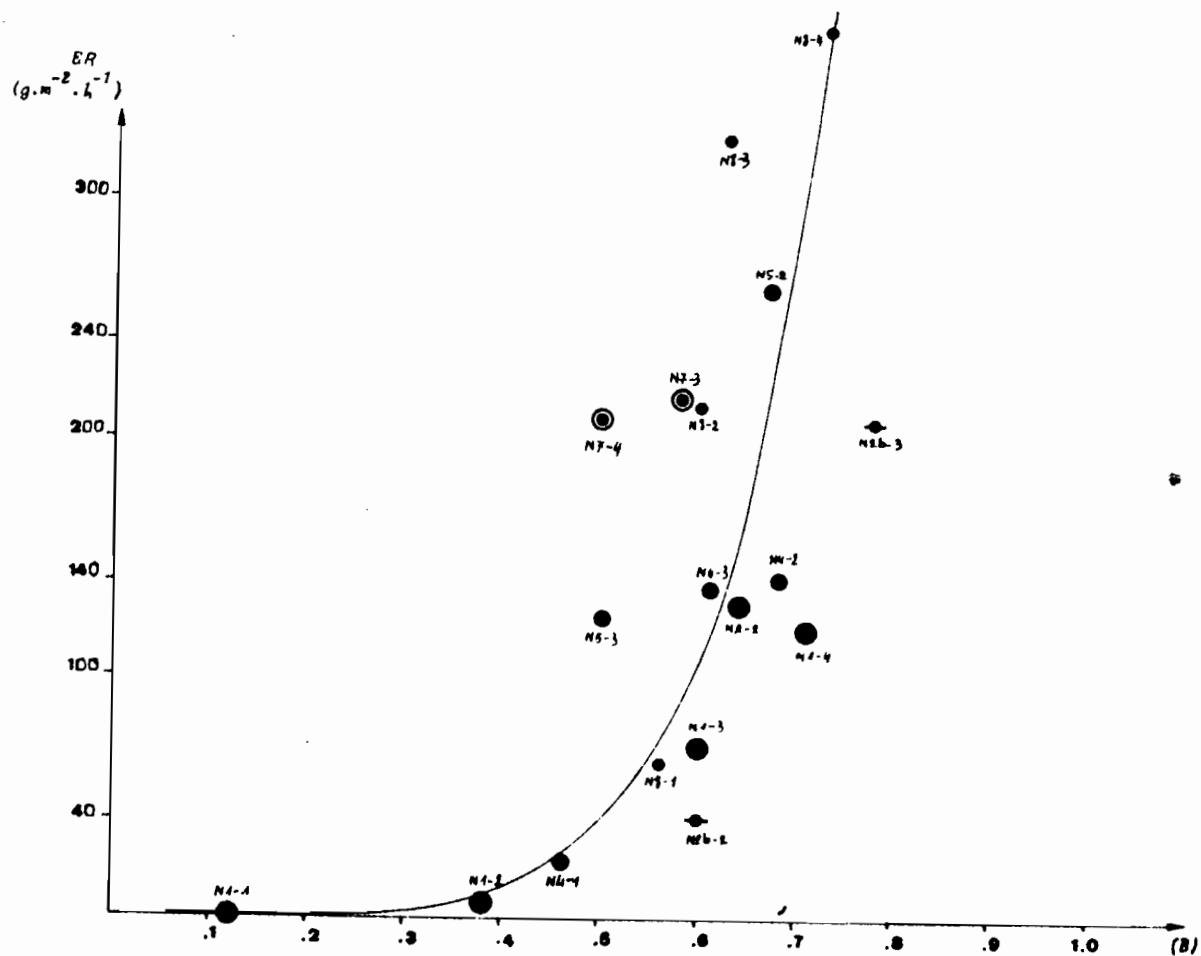


Fig. 44 : Evolution du débit solide en fonction de la susceptibilité du sol au ruissellement

- si on considère les parcelles sèches :

* pour $I = 40 \text{ mm.h}^{-1}$, $ER = 0$

* pour $I = 50 \text{ mm.h}^{-1}$, $ER = 17 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$

* pour $I = 80 \text{ mm.h}^{-1}$, $ER = 105 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$

Dans tous les cas de figure, les transports solides augmentent avec l'intensité de la pluie (fig. 43). L'augmentation de l'intensité de la pluie conduit à une augmentation des transports solides suite à un accroissement du ruissellement et de la concentration (VIANI, 1986). Selon FOURNIER (1967), l'érosion croît nettement avec l'intensité de la pluie car l'énergie cinétique croît très vite avec l'intensité de la pluie tant que celle-ci reste $< 100 \text{ mm.h}^{-1}$, ensuite elle tend vers une valeur constante. HUDSON explique ce fait par l'éclatement des gouttes lors des très fortes intensités pluviales. Selon le même auteur, sur sol argileux, c'est l'intensité de la pluie qui réglerait l'érosion, le ruissellement étant toujours suffisant pour entraîner les matériaux détachés. La composition des éléments érodés est plus semblable à celle du sol en place. Les transports solides viennent pour une large part de l'énergie d'entraînement de la lame d'eau ruisselant (RAHELIARISOA, 1986). Le ruissellement ne ferait donc qu'extérioriser – par un déplacement – un détachement dont il ne serait pas à proprement responsable car il est reconnu que le détachement par les gouttes de pluie est le facteur primordial de l'érosion et que l'effet de l'impact des gouttes de pluie est très largement prépondérant sur celui du ruissellement vis-à-vis de la matière solide (KIRKBY, 1980, ROOSE, 1980). L'énergie du ruissellement est faible sur 1 m (2 à 6 cm/s) d'après BRYAN (1976) et VALENTIN (1981)

B/ Variabilité intra-traitement :

Dans la variabilité intra-traitement des débits solides, il y a une interaction entre le pourcentage de mottes inférieures à 0,5 cm, l'indice de rugosité IR et le déficit de saturation Δi . Mais le paramètre le mieux lié aux variations des débits solides est l'indice (B) qui traduit la susceptibilité du sol au ruissellement :

(B) = pente de la droite $\Sigma Lr = A + B (\Sigma PU)$. Les parcelles les plus susceptibles au ruissellement (donc les plus riches en mottes inférieures à 0,5 cm) sont les plus exposées à l'érosion (fig. 44).

Discussion et conclusion

Sur l'ensemble des traitements, l'érosion (en nappe) est inférieure à 0,6 t/ha/orage, si on extrapole à l'échelle du champ. Mais sur les traitements à éléments structuraux fins (N7 et N8), les pertes en terre sont très élevées et sont estimées au minimum entre 2 et 3 t/ha/orage. Ces chiffres ne tiennent pas compte de la terre piégée dans le canal et qui peut être estimée à 300 g.m^{-2} . L'érosion en nappe peut donc être estimée à 3 t/ha/orage sur les traitements à éléments structuraux fins. Si on se rappelle que ces valeurs ne concernent qu'un érosion en nappe et un seul orage de 40 mm, qu'il faut compter en plus les transports déposés dans le canal de mesure, on se rend compte que l'érosion est un problème réel dans le Lauragais ; les pertes mesurées sont largement supérieures au seuil tolérable (1 à 2 t/ha/an).

En maintenant une intensité de pluie constante, un état de surface identique et en variant la pente, on constate que les pertes en terre passent de $19-27 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ sur une pente de 2 % à $41-208 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ sur une pente de 15 %. A intensité de pluie égale, c'est donc la pente qui contrôle les débits solides lorsque la préparation du sol est identique.

Les pratiques que l'on peut recommander pour réduire les risques d'érosion en nappe découlent naturellement de la mise en évidence des facteurs à risques.

* une rupture de pente par des talus enherbés devrait permettre de réduire de manière efficace les pertes en terre (par piégeage des sédiments).

* des préparations de lits de semence assez rugueux grâce à leur capacité de retenir l'eau dans les dépressions, peuvent réduire les pertes en terre en freinant le ruissellement. Mais cette capacité de stockage superficiel diminue sur pente raide.

* le labour en courbes de niveau réalise une série de sillons toujours perpendiculaires à la ligne de plus grande pente ; il est la seule opération culturale qui permet de remonter la terre. Il réduit efficacement les pertes en terre, mais un tel travail ne peut se faire au-delà d'un seuil d'intensité de pente, estimé par les agriculteurs qui ont utilisé cette méthode, entre 15 % et 30 %.

* le paillage se place parmi les méthodes de lutte les plus efficaces contre le ruissellement et l'érosion. Des études sous pluies simulées (MEYER et al, 1968) ont montré qu'un taux inférieur ou égal à 12,5 kg/are réduit significativement les pertes en terre lors des fortes averses sur des pentes de 3° à 5°. Mais ces taux ne sont pas adéquats pour contrôler les pertes en terre sur des pentes raides. Le paillage présente l'inconvénient de gêner le travail du sol avec des outils classiques et gêne aussi l'efficacité des herbicides.

* les plantes de couverture ou engrais verts utilisés en hiver maintiennent une bonne couverture du sol en saison des pluies ; leur enfouissement au printemps permet un bon drainage et réduit considérablement les problèmes de dégradation physique. En outre, il récupère l'azote du sol libéré en hiver et qui, sous sol nu, va polluer les nappes.

* les cultures en bandes alternées consistent à disposer en travers de la pente une série de bandes de cultures cultivées de telle manière qu'au moment où une bande est dénudée, les deux bandes adjacentes soient couvertes, ou de telle manière qu'au moment où une bande porte une culture laissant place à l'érosion, les deux bandes adjacentes portent une végétation anti-érosive.

Cette méthode n'est malheureusement pas suivie par les agriculteurs qui évoquent une perte de rendement sur ces bandes.

* les cultures associées et les cultures dérobées : lorsque le sol est mal protégé par une culture, l'usage d'association de cultures ou de cultures dérobées afin de protéger un maximum de surface pendant un maximum de temps, constitue un moyen biologique de lutter contre l'érosion.

3.5 Conclusion

Les phénomènes de ruissellement (et d'érosion qui s'en suit) observés sur les différents lits de semence testés au simulateur de pluie dans la région du Lauragais sont liés non pas à un engorgement du sol en profondeur comme le montrent bien les profils hydriques, mais à l'état de la surface du sol suite à la dégradation structurale de ce dernier, en cours de pluie. L'affinement du lit de semence est favorable aux phénomènes de dégradation structurale ; celle-ci est illustrée par la formation, en cours de pluie, d'une pellicule de surface du conductivité hydraulique très réduite, responsable de la diminution de l'infiltrabilité. L'apparition du ruissellement constitue le stade critique de cette dégradation. Pour éviter cette dernière, il faut retarder autant que possible le déclenchement du ruissellement, donc prolonger la phase d'imbibition (car pour une pluie donnée, plus la pluie d'imbibition est élevée, plus le ruissellement est réduit). Pour cela, il convient de :

- favoriser le ressuyage des horizons de surface en évitant au maximum les tassements (donc limiter le nombre de passages de roue d'engins cultureaux) qui représentent des obstacles souvent infranchissables pour l'écoulement de l'eau.
- éviter l'émiettement du lit de semence car ce sont surtout les éléments structuraux fins qui sont sensibles à la désagrégation aussi bien par éclatement que par l'effet "splash". Par conséquent l'utilisation d'outils animés est déconseillée. Par contre, une herse à dent plate permet de ramener en surface les grosses mottes en laissant les mottes plus fines plus bas, au contact avec la graine.
- éviter la désagrégation des mottes en limitant le contact sol-gouttes de pluie. Pour cela, il suffit de couvrir le sol en saison humide en utilisant soit des plantes de couvertures (engrais verts), soit en laissant les résidus de culture en surface.

CHAPITRE IV

E S S A I D E C O M P A R A I S O N

Essai de comparaison hydrodynamique et mécanique des sols argileux du Lauragais, des sols sableux du Mont-Lozère et des sols limoneux de Beaumont-sur-Dème

Dans ce chapitre nous allons comparer les paramètres et variables relatifs à l'infiltration et au ruissellement (P_i ; FN ; B : pente de la droite $\Sigma Lr = A + B (\Sigma PU)$ et les variables du transport solide (la turbidité C_m et le débit solide correspondant à une hauteur de pluie donnée) de trois types de sols à texture contrastée (argiles du Lauragais, sables du Mont-Lozère et limons de Beaumont-sur-Dème⁽¹⁾) préparées lors du semis de printemps et soumis à une averse simulée de 80 mm.h^{-1} environ.

4.1 - Les paramètres et variables hydrodynamiques :

4.1.1 - La hauteur de pluie d'imbibition (P_i) :

4.1.1.1 - Influence du déficit de saturation du sol sur P_i :

Les relations entre P_i et Δ_i sont assez compliquées :

- Au Lauragais, P_i semble positivement liée à Δ_i : la hauteur de pluie d'imbibition est d'autant plus importante que le sol est sec (fig. 1)
- Au mont-Lozère, on a vu dans le chapitre II sur des sols couverts que P_i diminue lorsque le sol est humide. Mais sur les parcelles dénudées, on dispose de peu d'observations pour conclure.
- A Beaumont-sur-Dème, il y a une grande dispersion des valeurs de P_i selon que le labour est précoce ou tardif. Il semble que P_i demeure indépendante de l'état d'humectation initial du sol sur les sols labourés tardivement, et a tendance à diminuer lorsque Δ_i augmente sur les sols labourés précocement, ce qui est surprenant (fig. 1). Cette même figure montre que dans la tranche de variation de Δ_i de 30 à 80 %, la pluie d'imbibition est beaucoup plus élevée sur sol sableux que sur sol limoneux ou argileux.

P_i Mont-Lozère (sables) > P_i Beaumont-sur-Dème (limons) > P_i Lauragais (argiles), ce qui semble lié à la macroporosité texturale du sol.

Mais le déficit de saturation en eau du sol n'est pas la seule variable d'état de surface du sol à considérer, d'autres facteurs doivent intervenir, ce qui explique la variabilité des valeurs de P_i notamment sur le site de Beaumont-sur-Dème.

(1) Les sols limoneux de Beaumont-sur-Dème ont été expérimentés par des essais semblables lors de travaux précédents (BOUDJEMLINE, 1984 ; RAHELIARISOA, 1986).

Tableau 1 : Paramètres hydrodynamiques et mécaniques et variables descriptives des états de surface de parcelles de sol nu fraîchement travaillé

Beaumont-sur-Dème	code parcelle	Pente %	IR %	i %	Pi mm	KR60 %	$F_n \text{ mm.h}^{-1}$	$C_m \text{ g.l}^{-1}$	$E_{60-2} \text{ g.m}$
	10 A	2	131	80,9	18,2	30,8	30,0	15,0	277,2
	10 B	2	124	73,3	13,8	30,8	30,0	7,6	140,6
	10 C	2	122	63,1	16,5	20,8	40,0	9,7	121,0
	10 D	2	130	61,0	18,0	22,5	40,0	9,8	132,3

Lauragais	P3-1	3	109	51,4	12,6	37,5	5,0	2,4	54,0
	P3-2	4	110	74,0	15,6	45,8	6,0	2,4	65,9
	P3-3	5	109	37,0	9,4	65,0	4,0	2,1	81,9
	P3-4	4	110	53,0	17,2	39,1	6,0	3,0	70,4

Mont-Lozère	PAVn5	7	124	68,4	58,5	4,0	60,0	0,3	0,8
	Hn5	12	105	32,0	64,0	0,0	69,0	5,1	0,0
	En5	14	107	30,2	127,0	0,0	103,0	0,0	0,0

- Parcelles de Beaumont-sur-Dème : - labour rapide (fin en profondeur)
 - semis en combiné herse alternative (fin en surface)
- Parcelles du Lauragais : Parcelles dénudées, piochées et finement préparées au rateau
- Parcelles du Mont-Lozère : Parcelles dénudées et piochées.

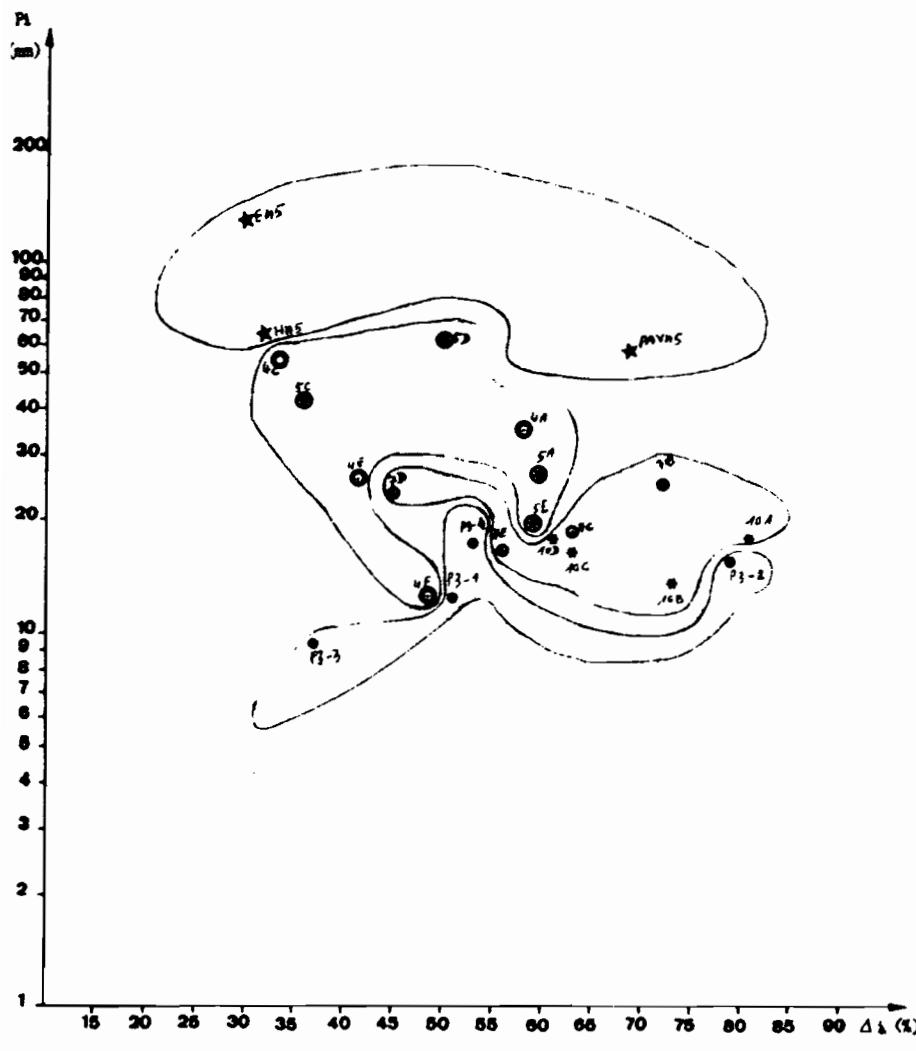


Fig. 1 : Evolution de la pluie d'imbibition en fonction du déficit de saturation de l'horizon de surface.

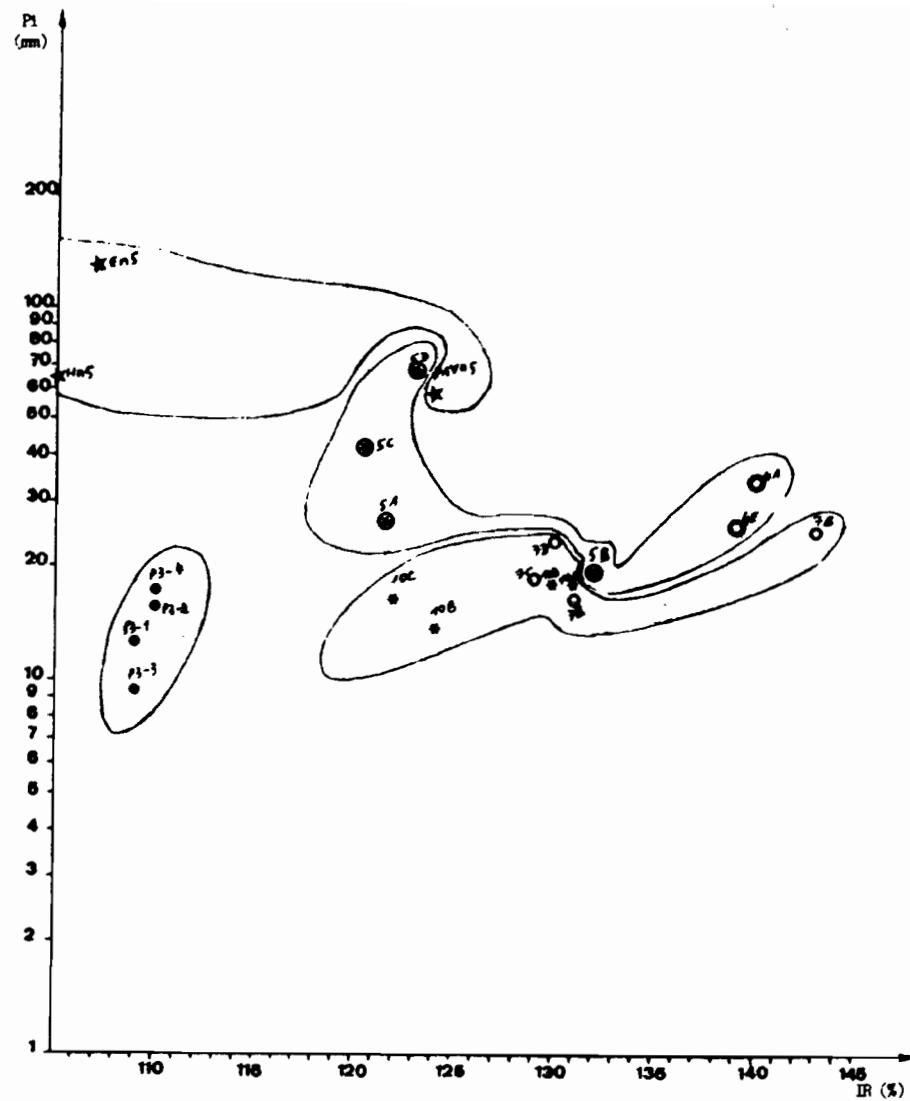


Fig. 2 : Evolution de la pluie d'imbibition en fonction de l'indice de rugosité.

4.1.1.2 - Influence de la rugosité du lit de semence :

Les sols limoneux labourés tardivement et à un degré moindre les sols argileux, montrent un accroissement de la hauteur de pluie d'imbibition avec la rugosité initiale de la surface du sol. En ce qui concerne les sols limoneux labourés précocement et les sols sableux, il n'y a aucune relation entre Pi et l'indice de rugosité IR (fig. 2).

4.1.1.3 - Discussion et conclusion :

Le déficit de saturation en eau du sol est le principal facteur explicatif des variations de Pi au Lauragais : Pi est d'autant plus importante que le sol est sec, ce qui concorde avec les observations de nombreux auteurs (LAFFORGUE, 1977 ; VALENTIN, 1981). TREVISAN (1986) a aussi observé sur des sols limoneux soumis à des averses successives, une diminution de Pi lorsque Δi diminue ; cette diminution de Pi est aussi la conséquence logique de la dégradation de la surface du sol par l'averse (ou les averses) précédente.

A Beaumont-sur-Dème, c'est surtout la date du labour et la rugosité de la surface du sol qui semblent déterminer Pi. L'absence de relation nette en l'existence parfois observée de relations négatives entre Pi et Δi dans le cas du sol labouré précocement est expliquée par RAHELIARISOA (1986) par un accroissement de la stabilité structurale des agrégats su sol lorsque l'humidité augmente (en se référant aux travaux de BOIFFIN, 1984).

Au Mont-Lozère, pour les parcelles dénudées, c'est la teneur en matière organique qui semble déterminer Pi : plus le taux de matière organique est élevé, plus le sol est stable et plus Pi est élevée.

Conclusion partielle :

On retiendra que dans la gamme large des Δi initiaux testés, le facteur qui semble contrôler le plus fortement Pi est la texture du sol (en ne comparant entre elles que des parcelles dénudées et travaillées dans des conditions assez variées, à la bêche ou avec des outils divers) : Pi est dix fois plus fort pour les sols sableux mis à nu du Mont-Lozère que pour les sols argileux cultivés du Lauragais. Sur les limons de la Sarthe, les valeurs de Pi sont intermédiaires et très dispersées.

La variabilité des valeurs de Pi trouvées peut s'expliquer soit par l'état d'humectation initiale - c'est le cas des sols argileux (du Lauragais) - soit par la stabilité structurale des mottes et agrégats, stabilité qui dépend des conditions climatiques lors du labour : ainsi le labour "précoce" des parcelles de Sarthe a été suivi d'une période sèche favorable à la consolidation de la structure et ce serait la raison pour laquelle les valeurs de Pi sont plus fortes que sur les labours "tardifs".

4.1.2 - Le ruissellement :

La figure 3 représentant l'évolution de la lame ruisselée cumulée en fonction de la hauteur de pluie cumulée dégage trois ensembles bien individualisés : le site argileux du Lauragais, le site limoneux de Beaumont-sur-Dème et le site sableux du Mont-Lozère. Cette figure met en évidence la plus forte susceptibilité au ruissellement des "terreforts" du lauragais. Le ruissellement augmente des argiles aux sables en passant par les limons. YAIR et LAVEE (1976) montrent que le ruissellement, indépendamment de l'état de la surface du sol, dépend de la texture de ce dernier et donc de la taille des grains : plus la texture du sol est fine, plus le ruissellement est abondant.

4.1.3 - L'intensité d'infiltration en régime permanent :

L'intensité d'infiltration finale (FN) est plus élevée sur les parcelles de sols sableux que sur les parcelles de sols limoneux ou argileux. Ceci semble lié à la texture du sol : plus les particules de sol sont fines, plus FN est faible. FN est très élevée sur les sols sableux de Lozère (58 à plus de 127 mm.h^{-1}) ; elle est moins élevée sur les sols limoneux de la Sarthe ($30 \text{ à } 70 \text{ mm.h}^{-1}$), et très faible sur les sols argileux du Lauragais ($4 \text{ à } 6 \text{ mm.h}^{-1}$).

Sur les sites argileux et limoneux, FN semble contrôlée par la formation de pellicules de battance qui seraient plus imperméables sur les sols du site argileux où on assiste parfois à un véritable glacage de la surface du sol. Nous allons voir en effet que pour ces trois types de textures, les caractéristiques de l'infiltration évoluent au cours du temps et de façon différente selon le type de sol.

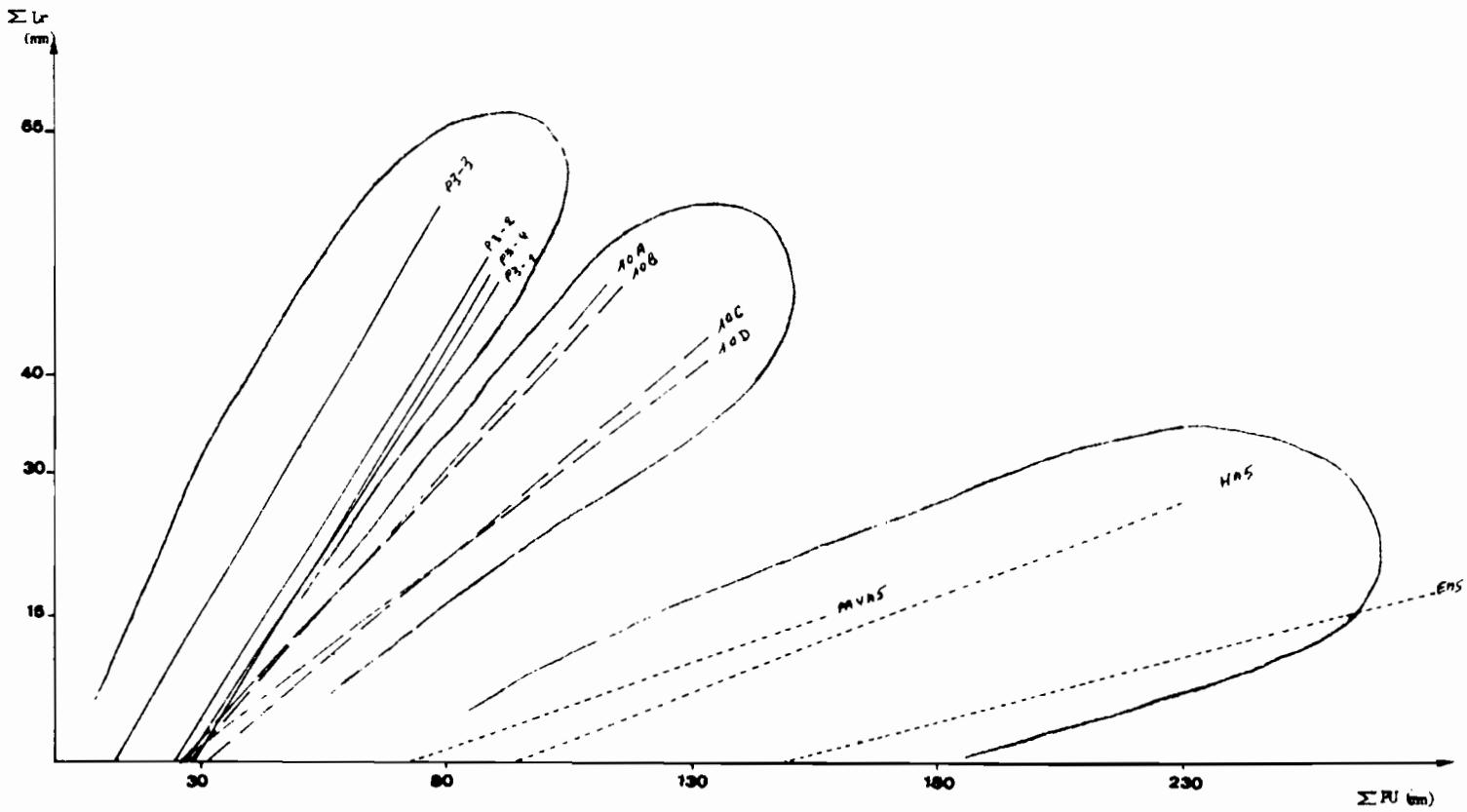


Fig. 3 : Evolution des lames ruisselées cumulées en fonction de la pluie cumulée sur les trois types de sols

4.1.3.1 - Influence de l'intensité de la pluie :

On admet généralement (LAFFORGUE, 1977 ; COLLINET et LAFFORGUE, 1979 ; VALENTIN, 1981) que la nature des relations $FN = f(I)$ permettent de caractériser l'état de surface du sol soumis aux averses.

- l'existence d'une relation $fn = f(I)$ positive, indique une surface rugueuse, à perméabilité hétérogène ; FN est d'autant plus forte que la hauteur de la lame d'eau stockée dans les dépressions est plus élevée.
- par contre, FN varie peu ou reste constante quand la surface du sol est lisse et homogène : l'augmentation de I se traduit alors par une augmentation de R (ruissellement).

Des travaux récents sur des parcelles de sols limoneux et sableux (TREVISAN, 1986 ; RAHELIARISOA, 1986), soumis à des pluies simulées à intensité variable, ont montré que la dégradation progressive de la structure de la surface du sol lors des averses successives, peut se manifester, lorsque les averses successives sont à intensité croissante, par une relation négative entre l'intensité de la pluie I et FN.

L'influence du protocole de simulation de pluies a été étudiée par RAHELIARISOA (1986) sur des sols sableux (terrasse de la Loire). L'évolution de FN en fonction de I pour un sol à surface dégradable, présente deux cas de figures selon l'ordre des intensités de pluies simulées (fig. 4).

- avec un train d'averses à intensité décroissante (AR1), FN est relativement élevée au départ puis décroît d'une averse à l'autre. Mais à la 4^e averse de 70 mm.h^{-1} , FN est très réduite : il s'est produit au cours des averses successives, une dégradation de la surface du sol et une diminution de l'infiltérabilité que l'on peut mesurer par la différence de FN entre la 1^e et la dernière averse.
- avec un train d'averses à intensité croissante (AR2), FN est au départ bien inférieure car I est plus faible. Mais dès la 2^e averse, la diminution de FN traduit une dégradation de la surface du sol et une baisse de l'infiltérabilité qui se poursuivent lors des averses suivantes.

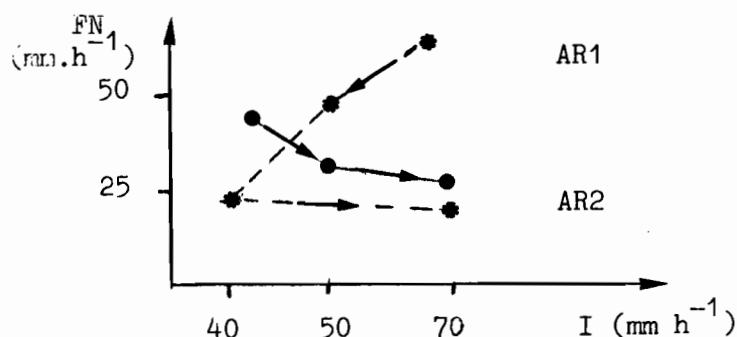


Fig 4 : Influence du protocole sur FN (d'après RAHELIARISOA, 1986)

Malgré la diversité des protocoles de simulation utilisés sur les trois sites comparés, les variations de FN en fonction de I traduisent dans tous les cas une diminution de la capacité d'infiltration suite à la dégradation de la structure de l'horizon de surface.

a/ sur les parcelles dénudées du Mont-Lozère, les simulations étaient à intensité croissante ; FN varie peu avec I (fig. 5). La rugosité des sols était peu marquée au départ, mais on ne peut interpréter ce comportement comme représentatif d'une surface lisse, homogène. En effet, FN tend plutôt à décroître (cf. PAVn5) ou, quand on redescend à une intensité plus faible, FN est nettement en dessous de sa valeur initiale (En5, Hn5). Cela ne peut s'expliquer que par la dégradation de la surface du sol (probablement un tassement).

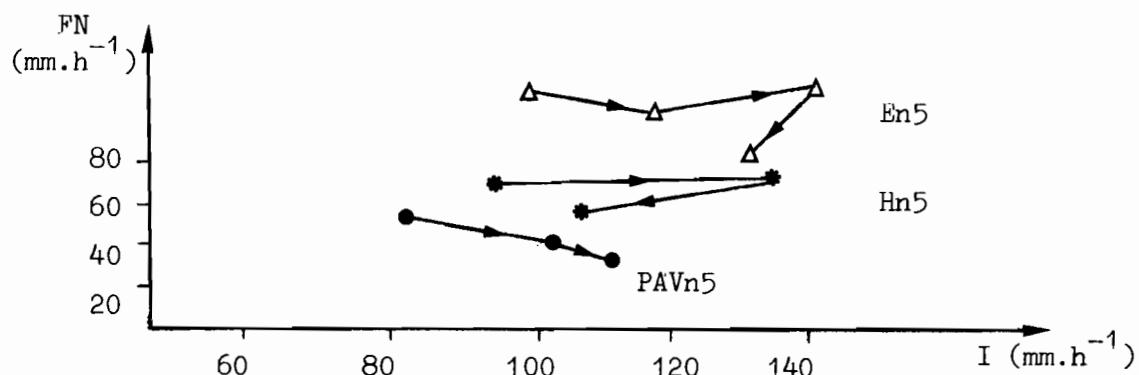
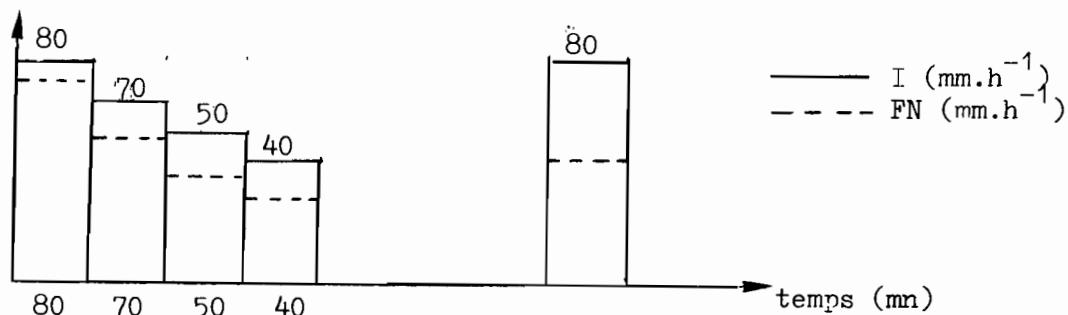


Fig. 5 : Evolution de FN en fonction de l'intensité de la pluie

b/ sur les parcelles de sols limoneux (Beaumont-sur-Dème) où le protocole était comme suit :



On observe lors de la 5^e averse une nette diminution de FN par rapport à la valeur obtenue à la 1^e averse. Il s'agit sûrement dans ce cas d'une diminution de l'infiltrabilité en surface, par formation d'une croûte de battance et non pas d'un engorgement plus profond (nappe perchée débordante). En effet la nappe qui se forme sur la semelle de labour après de fortes pluies, s'écoule latéralement très vite et l'engorgement ne remonte pas jusqu'à la surface (RAHELIARISOA, 1986).

c/ Sur le site du Lauragais, le protocole était encoe différent ; on ne procédait pas sur chaque parcelle avec un train d'averses à intensité variable mais avec une valeur de 40, 50 ou 80 mm.h⁻¹ selon les parcelles.

Cette façon de procéder permet de limiter le biais provoqué par la dégradation du sol lors des averses antérieures ; cependant, cela introduit une inconnue supplémentaire (la variabilité "intrinsèque du sol" antérieure aux essais et celà ne rend pas l'interprétation aisée. Cependant FN apparaît systématiquement plus faible sur les parcelles où l'intensité de la pluie a été plus élevée. On peut en conclure que là aussi, l'énergie cumulée de l'averse suffit à modifier l'état de surface et l'infiltrabilité de la couche superficielle. L'observation des parcelles après les essais montre qu'il s'est formée une pellicule de battance et que la surface du sol a, certaine fois, été glacée. La pellicule est peut-être moins épaisse que sur les sols limoneux de Sarthe (car la désagrégation est moins intense), mais sa texture est encore plus fine et son comportement plus imperméable.

Les mécanismes de dégradation – on le voit – varient selon la nature des sols mais aboutissent tous à une augmentation de Rx (ruisselement en régime permanent) et une diminution de FN. Les effets de nivellation et tassement sont prépondérants sur sols à texture assez grossière (sols sableux à sablo-limoneux). Les effets de désagrégation et libération des particules élémentaires et formation de crôute de battance sont dominants dans le cas des sols limoneux et semblent également se manifester dans le cas des sols argileux comme ceux du Lauragais : la détachabilité des particules constitutives des agrégats est moindre pourtant que sur les sols limoneux, mais les particules libérées sont très fines et constituent à la surface un voile fin relativement très imperméable.

4.1.3.2 - Influence de l'état d'humectation initial du sol :

L'infiltrabilité finale FN est théoriquement un paramètre caractéristique du sol, c'est donc une grandeur fixe. FN est déterminée en régime permanent et ne doit donc pas être influencée par l'état hydrique initial. Mais sur les sols dégradables, FN n'est plus stable mais évolue en fonction de la dégradation de la surface du sol (évolution qui se traduit pas une décroissance de FN).

Les relations positives entre FN et le déficit de saturation en eau du sol (Δ_i) observées au Lauragais, à Beaumont-sur-Dème et même au Val-de-Loire (RAHELIARISOA, 1986) s'expliquent par :

- au Lauragais, où le protocole comportait une seule averse, cette relation positive peut s'expliquer par l'existence d'un certain tassement lors du travail du sol et notamment le traitement tassé deux fois (N3). Ce tassement diminue la conductivité hydraulique de l'horizon de surface et donc la vitesse de ressuyage de cet horizon. FN et Δ_i paraissent positivement liés (cf fig. 6) ; en fait ils varient ensemble dans le même sens en fonction de l'intensité du tassement : plus les sols sont tassés, plus ils sont lents à se ressuyer et plus les Δ_i ont de fortes chances d'être faibles.

En Lozère, on n'observe pas de relation nette entre FN et Δ_i (cf matrice de corrélation au II). Mais on avait noté sur la parcelle PAVd3 que FN avait tendance à augmenter lorsque τ_a (temps de ressuyage) est grand (fig. 29 § II). En fait, FN diminue lorsque Δ_i diminue et cette diminution de FN n'est pas due exclusivement à la diminution de Δ_i , mais surtout à la dégradation de la surface du sol par l'averse précédente. TREVISAN (1986) a aussi observé dans la région du Faux-Perche, une diminution de FN avec Δ_i et il explique cette relation par l'effet conjugué de l'humidité initiale du sol et surtout la dégradation de l'état de surface du sol.

A Beaumont-sur-Dème, il semble que FN augmente avec l'humidité initiale. RAHELIARISOA (1986) explique ceci par une plus forte stabilité des agrégats lorsque l'humidité du sol augmente (en se référant aux travaux de BOIFFIN, 1984). Mais cette variabilité de FN peut être due à d'autres facteurs telle que la teneur en matière organique qui accroît la stabilité structurale de la surface du sol.

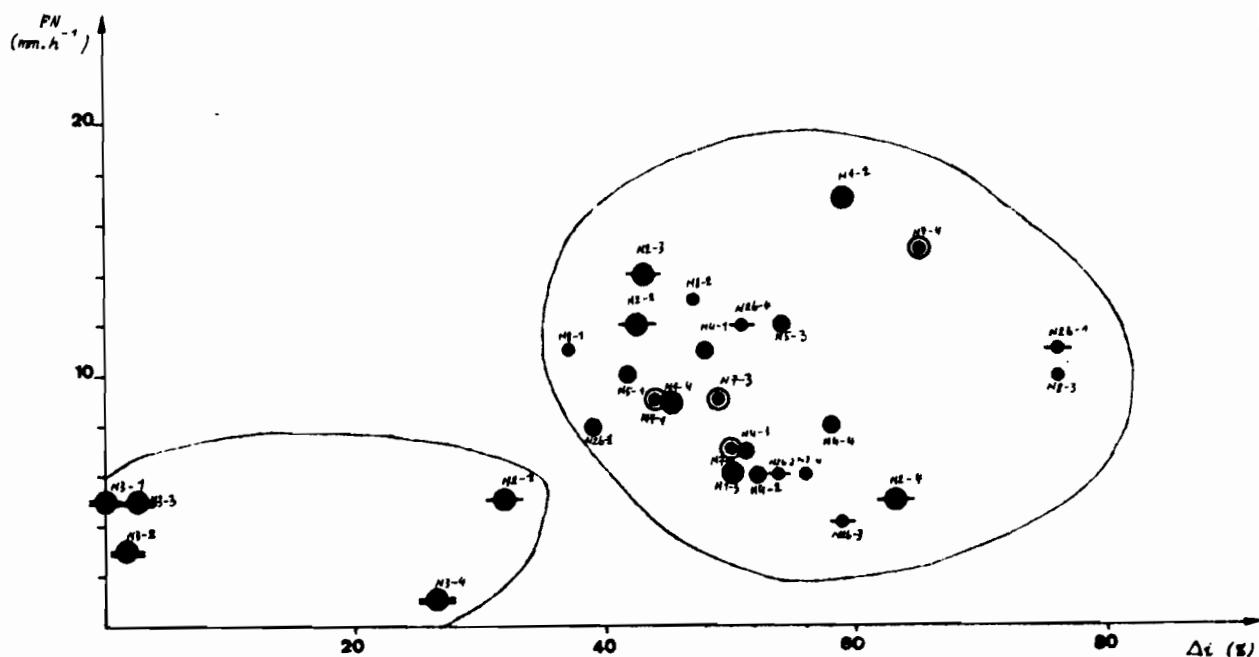


Fig. 6 : Evolution de FN en fonction du déficit de saturation

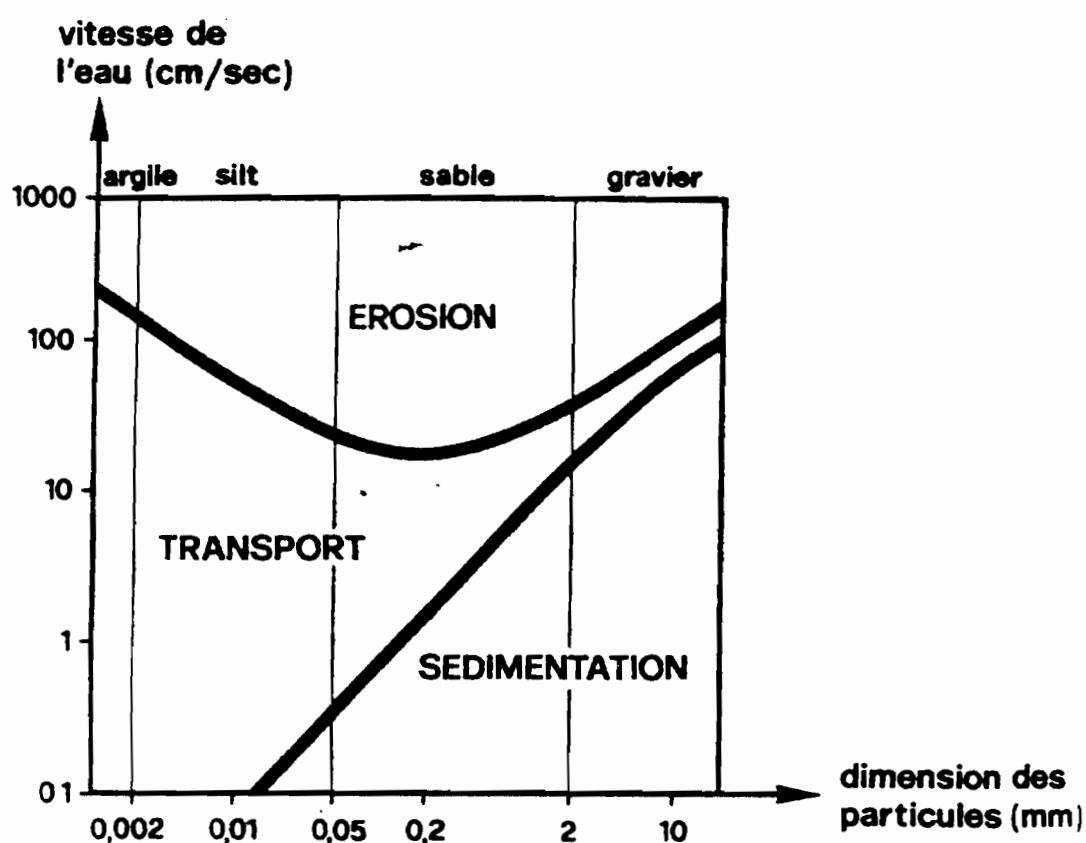


Fig 7: Vitesses critiques des eaux de surface en fonction de l'érosion, du transport et de la déposition des particules de différentes tailles (d'après Hjulström, 1935)

4.1.4 - Conclusion partielle :

Indépendamment de l'état de la surface du sol, le ruissellement et l'infiltration semblent déterminés par la taille des particules du sol : plus ces dernières sont fines, plus le ruissellement est important et l'infiltration faible. Sur les trois types de sols, l'infiltration en régime permanent n'est pas stable, mais évolue d'une averse à une autre en fonction de la vitesse de dégradation de la surface du sol. Cette dégradation se manifeste par un probable tassement des sols sableux de Lozère et par la formation d'une pellicule de battance sur les sols limoneux et les sols argileux. Cette dernière serait plus "nourrie" et plus épaisse, mais formée d'éléments moins fins sur sols limoneux que sur sols argileux, de sorte que l'infiltrabilité minimale en régime permanent reste après dégradation plus élevée sur les sols limoneux que sur les sols argileux. On observe dans tous les cas, une évolution rapide de l'état de surface au cours des averses, sous l'influence de l'énergie cinétique des pluies. Mais cette évolution prend une forme différente selon le type textural de sol : il se produit un niveling et probablement un tassement sur les sols sableux de Lozère ; sur les sols limoneux de Sarthe et argileux du Lauragais, on assiste à la formation de pellicule de battance suite à une désagrégation et une libération des particules fines. La croûte de battance formée sur sols limoneux est sans doute moins imperméable que celle formée sur sols argileux, d'où une plus forte infiltrabilité finale sur les sols limoneux.

4.2 - L'exportation des matières solides :

4.2.1 - Généralités :

L'érosion hydrique considérée comme l'action de la pluie sur le sol dépend d'un ensemble de facteurs pouvant être regroupés en deux termes : l'érosivité et l'érodabilité.

A. - L'érosivité, facteur climatique, est définie comme la faculté d'une pluie à causer de l'érosion (HUDSON, 1963). Elle exprime l'agressivité d'un évènement pluvieux par rapport à un autre ; elle est fonction des caractéristiques physiques de l'averse (dimension et vitesse des gouttes) et des différentes intensités qui la composent.

B. - L'érodabilité exprime la sensibilité d'un sol à l'action agressive du climat. Elle permet de comparer la sensibilité ou la résistance de différents types de sols aux actions érosives de la pluie et du ruissellement. L'érodabilité peut être divisée en 3 principaux facteurs (VIANI, 1986).

* le 1°, l'érodibilité, dépend des caractéristiques physico-chimiques du sol (granulométrie, teneur en matières organiques etc...)

* le 2°, exprime l'influence des conditions topographiques (pente et longueur de pente)

* le 3°, est lié à l'aménagement du sol, aux pratiques culturales et principalement à la couverture végétale.

1°. - le facteur sol : la résistance d'un sol à la dégradation dépend de sa texture, de sa structure, de sa teneur en matière organique, de l'humidité initiale (BOIFFIN, 1984 ; RAHELIARISOA, 1986) et de l'activité biologique. Les propriétés physiques qui en découlent (stabilité structurale, sensibilité au tassemement) conditionnent l'aptitude du sol à résister aux agressions climatiques. Les sols riches en humus et en argile offrent une bonne résistance à l'érosion en raison de leur forte stabilité structurale. Les sols à texture grossière (sables) limitent leur érosion par une perméabilité très élevée (VIANI, 1986).

Lorsque l'intensité des précipitations devient supérieure à leur capacité d'infiltration, les sables sont alors très vulnérables car ils sont peu structurés et ne possèdent pas une cohésion suffisante. Les sols les plus sensibles à l'érosion sont les limons et les sables fins lorsqu'ils ont une teneur en matière organique et en argile assez faible.

2°. - le facteur topographique : la pente est le facteur topographique qui influe le plus souvent sur l'intensité des processus érosifs. En augmentant le transport des particules par l'érosion de rejaillissement (splash) et en augmentant la vitesse du ruissellement, la pente conditionne la forme et l'intensité de l'érosion. La longueur de pente est aussi un paramètre d'importance puisqu'elle réduit ou accentue la vitesse du ruissellement.

3°. - le facteur agronomique : l'influence du travail du sol et du couvert végétal joue un rôle fondamental dans la définition de l'intensité et des formes de l'érosion. Les techniques culturales favorisent l'érosion lorsqu'elles émettent le sol ou qu'elles sont effectuées dans le sens de

la pente. Elles sont par contre un élément conservateur lorsqu'elles laissent le sol dans un état motteux qui favorise l'infiltration des précipitations. En fonction de sa densité, le couvert végétal contribue à la protection du sol car :

- il intercepte les gouttes de pluie, dissipe leur énergie cinétique et réduit l'érosion de rejaillissement
- il stabilise le sol par l'action mécanique de son système radiculaire
- il améliore la porosité du sol et diminue ainsi le taux de ruissellement ainsi que l'action érosive de ce dernier.

Pour une érosivité de pluie simulée donnée (même intensité de pluie et même énergie cinétique), c'est l'érodabilité qui va déterminer la susceptibilité des divers types de sols à l'érosion. Pour les essais considérés ici, le facteur topographique était lui aussi identique (pente = 2 % et longueur de pente = 1 m), c'est donc le facteur sol (texture, structure, teneur en matière organique...) et le facteur agronomique et plus particulièrement les techniques culturales qui vont déterminer la susceptibilité à l'érosion des trois types de sols.

On comparera essentiellement la charge solide moyenne Cm et le débit solide pour une hauteur de pluie donnée.

4.2.2 - La charge solide moyenne :

La charge solide moyenne Cm varie de 0 à $0,3 \text{ g.l}^{-1}$ sur le site sableux, de $2,1 \text{ à } 3 \text{ g.l}^{-1}$ sur le site argileux et de $2 \text{ à } 18 \text{ g.l}^{-1}$ sur le site limoneux (tableau 1).

Malgré sa plus forte rugosité, le site limoneux est plus sensible à la détachabilité que le site argileux, mieux structuré.

Les travaux de HJULSTROM (1935) concernant le comportement des particules dans le lit des rivières montre que (fig. 7) :

- en raison de leur cohésion, les particules fines (argiles) nécessitent des vitesses élevées d'eau de ruissellement pour être détachées mais elles sont transportées même pour des vitesses très faibles de débit liquide. Les particules les plus sensibles au détachement (limons et sables fin) nécessitent des vitesses encore faibles d'eau de ruissellement, de l'ordre de 20 cm/s et ce sont elles qui ont la plus grande probabilité d'être déplacées. Cette figure montre donc que le détachement par le ruissellement augmente des argiles aux sables fins et des cailloux aux sables fins (pour une même vitesse d'écoulement). Or, les vitesses de ruissellement mesurées sur des parcelles de 1 m² varient de 2 à 6 cm/s

(VALENTIN, 1981) et sont très loin de la vitesse minimale nécessaire pour détacher les sables fins : ainsi, dans nos conditions opératoires, les pentes et longueurs de pente sont trop faibles pour envisager une action érosive complète par les eaux superficielles. Par contre, ces dernières peuvent bien assurer le transport des particules fines détachées. Le ruissellement ne ferait donc qu'extérioriser par un déplacement, un détachement dont il ne serait pas responsable. L'effet érosif du ruissellement peut ne pas être nul dans les conditions de faible pente et longueur de pente si on considère la turbulence du ruissellement que peut entretenir l'impact des gouttes de pluie, mais cet effet est très faible.

Le détachement et la désagrégation des particules solides est la résultante de trois composantes (VALENTIN, 1981) :

a/ L'humidification favorise la dispersion des colloïdes argilo-humiques et par à-même la déstabilisation des agrégats. Cette désagrégation par dispersion des colloïdes est d'autant plus importante que la teneur en argile et en matière organique est faible. De ce côté-là, les sables puis les limons sont plus vulnérables que les argiles.

b/ lorsque la porosité interne des agrégats est remplie d'air lors de l'imbibition, il se produit un effet d'éclatement par suite de l'augmentation de la pression de l'air des capillaires. Une augmentation de la teneur en argile du sol entraîne à la fois un décalage de la courbe pF-humidité vers les humidités les plus élevées pour un potentiel donné et une diminution du volume potentiel d'air emprisonné au sein des fragments : les argiles sont donc moins exposées aux phénomènes d'éclatement que les limons et les sables.

c/ l'énergie cinétique des gouttes de pluie est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle de la lame d'eau ruisselante puisque les vitesses varient de 8 m/s (vitesse de chute des gouttes de pluie) à moins de 1m/s (vitesse de la lame d'eau qui ruisselle) (MIHARA, 1951 ; HUDSON, 1981). Il est universellement admis que l'impact des gouttes de pluie est prépondérant sur le ruissellement quant à la mobilisation des matières solides (KIRKBY, 1980). HUDSON (1957) a montré qu'il suffisait de tendre une toile de moustiquaire au dessus du sol pour réduire de 90 % les pertes en terre. Le détachement par les gouttes de pluie est d'autant plus faible que la cohésion du sol est forte (teneur en argile et/ou en matière organique élevée).

Les trois composantes de la désagrégation convergent vers une plus grande sensibilité au détachement ou à érosion par rejaillissement, des sols sableux puis limoneux par rapport aux sols argileux.

La figure 8 confirme que la turbidité est plus importante sur les sols limoneux que sur les sols argileux. Toutefois, les conditions dans lesquelles ont lieu les labouurs (humidité du sol ...) semblent influencer beaucoup la détachabilité. Les faibles valeurs de la turbidité des sols sableux de Lozère ne s'explique que par les faibles volumes ruisselés qui ne peuvent transporter toutes les particules détachées.

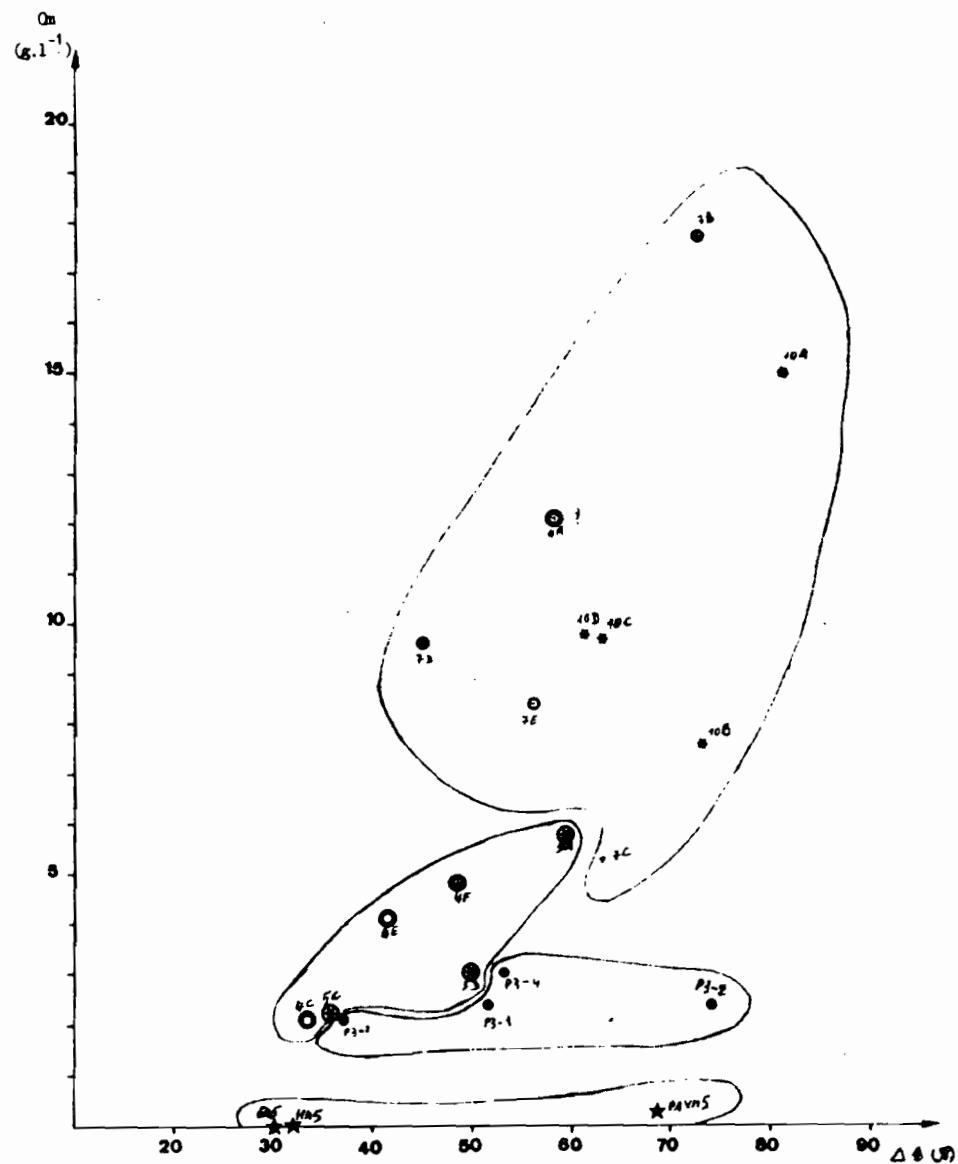
4.2.3 - Les débits solides :

Malgré la plus faible sensibilité au ruissellement des sols du site limoneux par rapport aux sols du site argileux, les débits solides pour une hauteur de pluie donnée sont plus importants pour les premiers ; l'effet multiplicatif de la charge solide est prépondérant sur celui du ruissellement. Les faibles valeurs mesurées sur le site sableux s'expliquent par les faibles volumes d'eau ruisselée et le faible transport des particules sableuses suite aux faibles vitesses du ruissellement (fig. 9).

4.2.4 - Les facteurs qui influencent la turbidité et les débits solides :

4.2.4.1 - La pente :

On a vu au Lauragais qu'en passant d'une pente de 2 % à une pente 13 %, le débit solide E60 passe de $0-27 \text{ g.m}^{-2}$ sur une pente de 2 % à $0-208 \text{ g.m}^{-2}$ sur une pente de 15 % et que les problèmes d'érosion au Lauragais sont essentiellement liés à l'utilisation des terres en pente (coteaux) et au parcellaire qui tend à augmenter la longueur de pente, favorisant ainsi l'énergie de ravinement du ruissellement. L'effet pente n'a pas fait d'objet d'étude à Beaumont-sur-Dème. Mais en Lozère, la pente augmente nettement les transports solides. L'influence de ce facteur est variable selon les sites, sur l'intensité du ruissellement, mais nettement positive sur les transports solides.

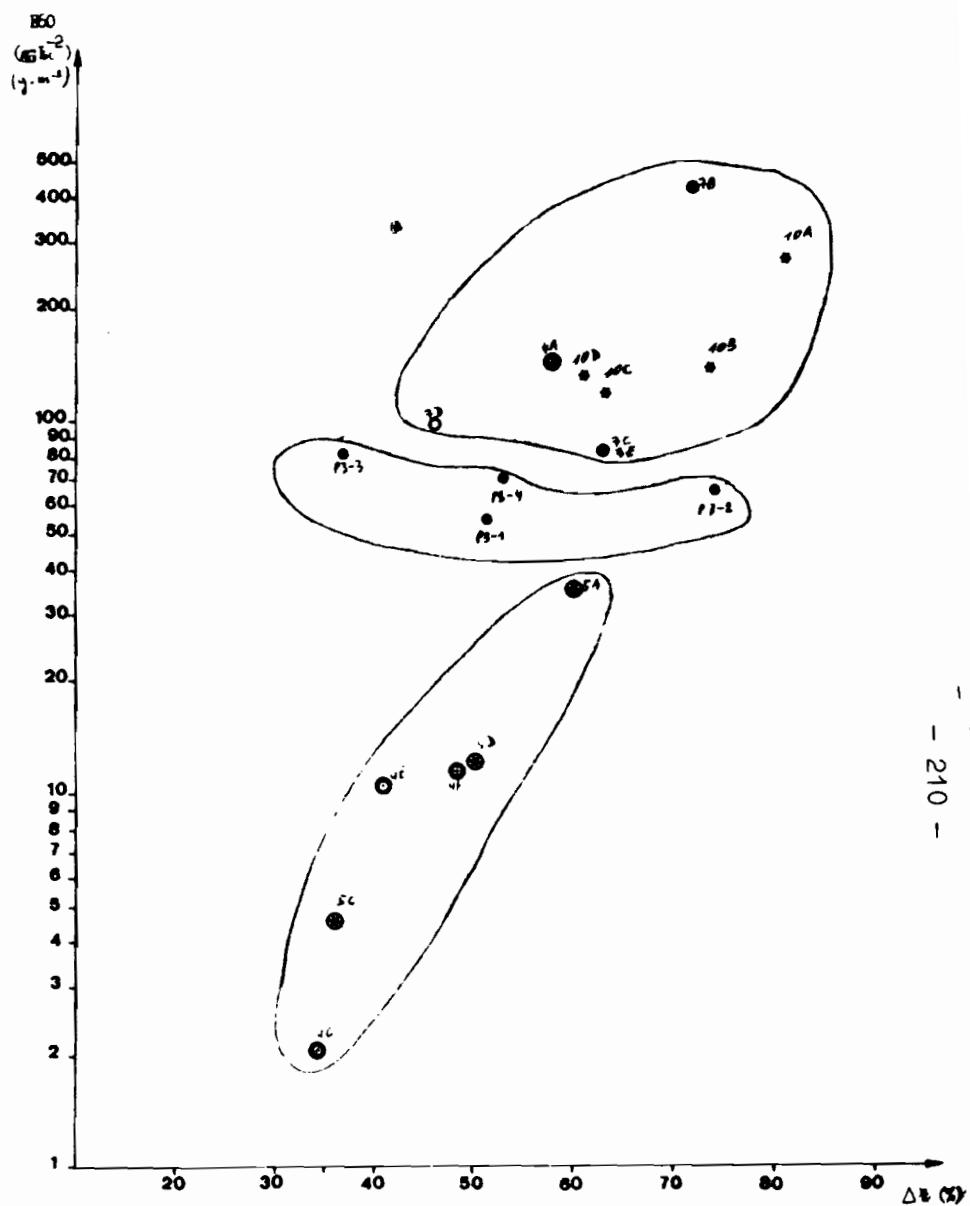


Sols limoneux de Beaumont-sur-Dême

- * labour tardif + lit de semence fin grossier
- - - + - - grossier
- - précoce + lit de semence fin
- - - + - - grossier

- Sois sableux du Mont-Lucére
sois dénudés et bêchés
- Sois argileux du Lauragais
sois dénudés, préparés au ratonau

Fig. 8 : Evolution de la charge solide moyenne en fonction du déficit de saturation



Sols limoneux de Beaumont-sur-Dême

- labour tardif + lit de semence fin
- - - + - - grossier
- - précoce + lit de semence fin
- - - + - - grossier

Sols argileux du Lauragais

Fig. 9 : Evolution du débit solide en fonction du déficit de saturation

4.2.4.2 - Le couvert végétal et les résidus de culture :

L'influence du couvert végétal et de la densité de surface qu'il occupe a été testée au Mont-Lozère. Le débit solide maximal E60 passe de $1-3 \text{ g.m}^{-2}$ sur les parcelles plus ou moins couvertes à 60 g.m^{-2} sur les parcelles dénudées et bêchées. DEUMIER et ROOSE (1985) ont montré que les chaumes de céréales restés à la surface du sol constituent une bonne protection contre les pertes en terre ; ils ont mesuré dans ces conditions des turbidités de 0,1 à 0,6 g.l^{-1} sur des pentes supérieures à 13 %, soit au minimum 10 fois moins que pour les mêmes sols mais non protégés.

4.2.4.3 - L'état structural et l'humidité initiale :

La surface du sol subit sous l'action des agents naturels et des pratiques culturales une évolution structurale (nivellation, tassement, formation de pellicule de battance) dont l'intensité et la cinétique dépendent pour un type de sol donné de la préparation du lit de semence et de l'humidité initiale du sol : ainsi, aussi bien sur le site limoneux que sur le site argileux, la turbidité et les débits solides sont d'autant plus importants que le lit de semence est constitué d'éléments structuraux fins. En retardant l'apparition du ruissellement, un sol sec de Lozère ou du Lauragais limitera les pertes en terre, ce qui ne semble pas être le cas pour les sols limoneux de Sarthe.

Conclusion :

Les différences de comportement hydrodynamique et mécanique des trois types de sol semblent bien liées à la texture du sol. Les sols du site limoneux, quoique moins susceptibles au ruissellement que les sols du site argileux, sont par contre plus sensibles aux pertes en terre. Les sols du site sableux sont les moins susceptibles aussi bien au ruissellement qu'aux pertes en terre (pour des conditions données).

L'amélioration des propriétés mécaniques du site limoneux pourrait se réaliser en améliorant la stabilité structurale des agrégats, les labours précoces sont de ce point de vue conseillés. Par contre, l'amélioration des propriétés hydrodynamiques du site argileux ne peut se réaliser que par une préparation adéquate du lit de semence en évitant son émiettement et son tassement et en le protégeant de la battance des pluies par l'intermédiaire de plantes de couverture ou de résidus de culture, au printemps.

C O N C L U S I O N G E N E R A L E

Ce travail visait l'étude comparative, sous pluies simulées, des comportements hydrodynamiques et mécanique (détachabilité) de sols à texture contrastée : sols bruns acides sablo-graveleux de Lozère et sols bruns calciques argilo-limoneux du Lauragais. Pour chaque type textural, on a étudié la variabilité des réponses selon les états de surface du sol. L'état de surface est défini par les différents composants occupant la surface du sol : nature et densité du couvert végétal, cailloux, résidus de culture, mottes selon différentes classes de diamètre, croûte de battance, rugosité...)

Pour ce faire, on mesure au champ sur des parcelles de 1 m² la naissance du ruissellement et de sa charge solide provoqués par des averses artificielles à intensité donnée (infiltromètre à aspersion, type ORSTOM), sur deux sites comparés :

1°/ Sur le site de sols sableux de montagne (Mont-Lozère), on a testé six états de surface distincts : pelouse saine, pelouse dégradée, humus et litière forestière de hêtraie, litière et humus de pessière, lande à genêts, sol nu pioché ; ce dernier sert de référence pour la comparaison avec les sols argileux et les sols limoneux.

2°/ Sur le site de sols argilo-limoneux (Lauragais), on a testé plusieurs préparations de lits de semence pour mettre en évidence l'effet de la granulométrie des mottes en surface, des tassements et de l'épaisseur du lit de semence.

Les résultats obtenus permettent :

1°/ de comparer les caractéristiques de comportement des sols selon les textures :

Les résultats obtenus sur ces deux types sont confrontés aux résultats acquis précédemment sur le site de sols limoneux de Sarthe (BOUDJEMLINE, 1984 ; RAHELIARISOA, 1986), pour dégager l'influence de différents facteurs explicatifs de la variabilité inter-sites (texture) et intra-site (différence d'état de surface (tableau ci-après).

Paramètres et variables hydrodynamiques et mécaniques	SOL ARGILEUX (LAURAGAIS)	SOL LIMONEUX (SARTHE)	SOL SABLEUX (MONT-LOZÈRE)
P _i (mm)	9 à 17	13 à 65	58 à 100
F _N (mm.h ⁻¹)	4 à 6	30 à 75	60 à 100
C _m (g.l ⁻¹)	2,1 à 3	2 à 18	0 à 0,3
E (g.m ⁻²) pour 60 mm de pluie tombée	54 à 82	2 à 400	0 à 0,8

La hauteur de pluie d'imbibition, dans une fourchette de déficit de saturation en eau donnée, augmente des sols argileux ($P_i = 9 \text{ à } 17 \text{ mm}$) aux sols limoneux ($P_i = 13 \text{ à } 65 \text{ mm}$) puis aux sols sableux ($P_i = 58 \text{ à } \text{plus de } 100 \text{ mm}$), de même l'infiltérabilité en régime permanent croît des sols argileux ($F_N = 4 \text{ à } 6 \text{ mm.h}^{-1}$) aux sols limoneux ($F_N = 30 \text{ à } 75 \text{ mm.h}^{-1}$) et aux sols sableux ($F_N + 60 \text{ à } \text{plus de } 100 \text{ mm.h}^{-1}$).

Dans tous les cas, la diminution de l'infiltérabilité au cours du temps n'est pas due uniquement à la diminution des gradients de succion dans le sol ; c'est surtout les modifications structurales de la couche superficielle du sol qui déterminent le régime d'infiltation. Sur le site de sols sableux de Lozère, c'est sans doute le tassement du sol par les gouttes de pluie qui est à l'origine de la diminution de l'infiltérabilité. Sur les sols limoneux et argileux, c'est la formation à la surface du sol de pellicule dense, peu épaisse, de conductivité hydraulique très réduite, qui est à l'origine de la décroissance de l'infiltérabilité. Cette pellicule de battance constituée d'éléments plus grossiers sur le site de sols limoneux serait moins imperméable que celle formée sur le site de sols argileux. Ces phénomènes de dégradation naturels sont accentués par les phénomènes de compaction dûs aux passages des engins dans les champs cultivés.

Les caractéristiques de détachabilité et de débits solides transportés varient de façon différente : le maximum de détachabilité et de débit solide transporté est obtenu sur le site de sols limoneux et les plus faibles valeurs sur le site de sols sableux à cause sans doute de leur plus forte perméabilité.

2°/ de comprendre les causes de la variabilité des comportements dans un type textural de sol donné :

La variabilité des réponses hydrodynamiques pour un type textural de sol dépend de causes multiples : densité de couvert végétal et/ou taux d'humus sont les facteurs explicatifs dominants de la variabilité des réponses pour le site de sols sableux de Lozère : la taille des mottes et l'humidité initiale sont les facteurs explicatifs essentiels pour les sols argileux et limoneux. La variabilité de la turbidité et des débits solides transportés dépend des mêmes facteurs auxquels il faut ajouter le facteur pente topographique, qui est essentiel.

3°/ de préciser les risques de ruissellement et d'érosion :

Il semble, au Mont-Lozère, qu'à l'échelle du bassin versant, le ruissellement naîsse d'abord dans les zones topographiques basses où le sol est engorgé d'eau (tourbières...), puis, là où le sol est tassé ou surpatûré et enfin de façon presque généralisée mais extrêmement rare, sur les sols couverts (pelouse saine, forêts de hêtres et d'épicéas) par débordement des eaux souterraines lors d'averses exceptionnelles, ce qui recoupe la théorie partial contributing area (COSANDEY, 1983). La bonne protection des sols par le couvert végétal et par son humus explique les très fortes valeurs de l'infiltrabilité en régime permanent observées pour les sols sableux de Lozère.

Sur les sites argilo-limoneux et limono-argileux, les sols étaient nus et fraîchement préparés lors des semis de printemps et donc exposés aux aléas climatiques. La naissance du ruissellement constitue le stade critique de la dégradation. En transportant les particules fines en suspension, le ruissellement favorise la formation, l'extension et l'épaississement des croûtes structurales superficielles (pellicules de battance responsables de la décroissance de l'infiltrabilité).

Pour éviter ce stade critique, il faut retarder autant que possible le déclenchement du ruissellement. Pour cela, il convient de :

- favoriser le ressuyage des horizons de surface en évitant les tassements par les engins culturaux
- éviter l'émiètement du lit de semence car ce sont surtout les éléments structuraux fins qui sont sensibles aux phénomènes de désagrégation (1^o étape de la dégradation structurale). Par conséquent l'utilisation d'outils animés est déconseillée. Par contre l'utilisation d'une herse plate est conseillée.
- éviter les rouleaux qui tassent le sol et pulvérissent les mottes.

- éviter la désagrégation des mottes en limitant le contact surface du sol-gouttes de pluie. Pour cela, il suffit de couvrir le sol en saison des pluies en utilisant soit des plantes de couverture (engrais verts), soit en laissant les résidus de culture en surface.

La réduction de la turbidité et des transports solides doit passer inéluctablement par l'utilisation de terres ne dépassant pas un certain seuil d'intensité de pente.

Pour établir les relations $FN = f(I)$ et voir l'effet de l'état de surface sur cette relation, il convient dans le cas de sols dégradables d'éviter des protocoles à train d'averses successives sur la même parcelle. On préférera donc le protocole adopté dans le Lauragais mais on fera remarquer que ce protocole suppose l'homogénéité des caractéristiques intrinsèques du sol et dont l'incertitude exige beaucoup de répliques.

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

AHUJA (L.R), 1973. - A numerical and simularity analysis of infiltration into crusted soils. - Water. resout. Res., 9 : 987 - 994

AHUJA (L.R), DANNER (E.W), EL SWAIFY (S.A), 1976. - Predicting run-off initiation time under field condition in tropical soils (Hawaï). - soil sci. soc. Amer. jour., 40(5) : 777 -779

ALBERGEL (J), CASENAVE (A), VALENTIN (C), 1985; - Modélisation du ruissellement en zone soudano-sahélienne. Simulation de pluie et cartographie des états de surface. - Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier 17-18 sept., 15 p.

ALBERGEL (J), RIBSTEIN (P), VALENTIN (C), 1985. - L'infiltration : quels facteurs explicatifs ?. - Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 24 p.

ASSELIN (J), VALENTIN (C), 1978. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. - Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 15 (4) : 321 - 350

AUDRY (P), COMBEAU (A), HUMBLE (F.X), ROOSE (E), VIZIER (J.F), 1973. - Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. - In : "Bulletin de groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols, n° 2".

BENNET (H.H), 1939. - "Elements of soil conservation". - 2nd Edi.
New York. MC GRAW-HILL

BERTRAND (A.R), PARR (J.F), 1960. - Development of a portable sprinkling infiltrometer. - Tr. of the With. Int. Congr. of soil sci., MADISON., 6 (4) : 433 - 440.

BOIFFIN (J), 1984. - La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. - Thèse de Doct-Ing. I.N.A.P.G., 297 p

BOUDJEMLINE (D), ROOSE (E), 1986. - Influence des litières du Mont-Lozère (France) sur la naissance du ruissellement et de sa charge solide. Etude expérimentale au simulateur de pluie. - Comm. Journée Réseau Erosion., Bulletin. 6. réseau Erosion : 18 - 19

BOUROCHE (JM), SAPORTA (G), 1983. - L'analyse des données. - Ed. Que sais-je ?, P.U.F., 124 p

- BRYAN (R.B.), 1974. - Water erosion by splash and wash and the erodibility of Albertan soils. - *Geographica annaler.*, 56 (A) : 159 - 181
- BRYAN (R.B), 1976. - Considerations on soil erodibility indices and sheetwash. - *CATENA.*, 3 : 99 - 111
- BURWELL (R.E), LARSON (W.E), 1969. - Infiltration as influenced by tillage - Induced random roughness and pore-space. - *Soil sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 (3) : 449 - 452
- CASENAVE (A), GUIGUEN (N), SIMON (J.M), 1982. - Simulation de pluie sur bassins versants représentatifs. - *Cah. ORSTOM. sér. Hydrol.*, 14 (4) : 207 - 297
- CASTILLON (J), 1984. - Inventaire des sols de NARBONS. - Rapp. I.T.C.F., 25 p
- CHEVALLIER (P), 1983. - L'indice des précipitations antérieures. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. - *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, 20 (3-4) : 179 - 191
- COLLINET (J), LAFFORGUE (A), 1979. - Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. - Rapport ORSTOM., 129 p
- COLLINET (J), VALENTIN (C), 1979. - Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives Applications agronomiques. - *Cah. ORSTOM. sér. Pédo.*, 17 (4) : 285 - 328
- COSANDEY (C), GRIL (J.J), CANLER (J.P), JARRY (F), MUXART (T), NORMAND (M), BILLARD (A), FLEURY (A), 1985. - Simulation de pluie et ruissellement sur des sols érodés dans le massif du Lingas (Sud des Cévennes - France). *Bulletin du G.F.H.N.*, 18 p
- DEUMIER (J.M), ROOSE (E), 1985. - Etude de la dynamique du ruissellement sur terrefort du Lauragais. Influence des techniques culturales. - Rapport, 27 p
- DRESSAYRE (E), 1986. - L'érosion dans les coteaux du Lauragais. - Rapport de stage. ENSA Toulouse., 103 p
- DUC (P), 1984. - Essai de quantification des pertes minérales par érosion solide sur le bassin versant des Cloutasses (Mont-Lozère - France). Rapp. de stage. Univ. d'Orléans, 22 p

- DULEY (F.L), 1939. - Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. - Soil sci. soc. Amer. Proc., 4 : 60 - 64
- DUPRAZ (C), 1984. - Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins versants comparatifs à végétation contrastée (Mont-Lozère - France). - Thèse de Doc-Ing. Univ. d'Orléans, 360 p
- EDWARDS (W.M), LARSON (W.E), 1969. - Infiltration of water into soils as influenced by surface scal developments. - Tr. of the A.S.A.E., 12 (4) : 463 - 465
- ELLISON (W.D), 1944. - Studies of raindrop erosion. - Agr. eng., 25 : 131 - 181
- EPSTEIN (E), GRANT (W.J), STRUCHTMAYER (R.A), 1966. - Effects of stones on run-off erosion and soil moisture. - Soil sci. Soc. Amer. Proc., 30 (5) : 638 - 640
- ESCADAFAL (R), MITIMET (A), ASSELINE (J), 1986. - Etude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride (Bir. Lahmar - Tunisie). Résultats des campagnes de mesures sous pluies simulées. - Rapp. ORSTOM, 31 p
- FALAYI (O), BOUMA (J), 1975. - Relationship between the hydraulic conductance of surface crusts and soil management in a typic Hapludalf. - Soil sci. Soc. Amer. Proc., 39 (5) : 957 - 963
- FARRES (P), 1980. - Some observations of the stability of soil aggregates to raindrop impact. - CATENA., 7(3) : 243 - 254
- FEODOROFF (A), 1965. - Mécanismes de l'érosion par la pluie. - Rev. de Geogr. Phys. et de Géol. Dyn., 7 (2) : 149 - 165
- FOURNIER (F), 1967. - La recherche en érosion et conservation des sols dans le continent africain. - Sols africains., 12 (1) : 5 - 53
- GARDNER (W.R), 1970. - Field measurement of soil water diffusivity. - Soil sci. Soc. Amer. Proc., 34 : 832 - 833
- GOUBE (I.B), 198 . - Techniques culturales et érosion dans le Lauragais. Rapp. CNEARC. Montpellier., 70 p
- GREEN (W.H), AMPT (G.A), 1911. - Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils. - Jour. Agr. sci., 4 : 1 - 24
- HENIN (S), MONNIER (G), 1956. - Evaluation de la stabilité de la structure du sol. - In : C.R. VI. Congr. Int. Sci. du sol. Paris., 8 : 49 : 52

- HILLEL (D), 1974. - L'eau et le sol. Principes et processus physiques.
- Vander (édit). Leuven. Paris. Bruxelles., 288 p
- HORTON (R.E), 1940. - An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. - Soil sci. Soc. Amer. Proc., 5 : 399 - 417
- HUDSON (N.W), 1963. - Rainfall intensity and erosivity. Advisory Notes - Federal Department of conservation and extension., 45, 6 p
- HUDSON (N.W), 1973. - Soil conservation. - BATSFORD (edit). LONDON., 320 p
- KIRKBY (M.J), MORGAN (R.P.C), 1980. - Soil erosion. - A publication of the British Geomorphological Research. Group., 312 p
- LAFFORGUE (A), NAAH (E), 1976. - Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. - Cah. ORSTOM. Sér. Hydrol., 13 (3) / 180 - 195
- LAFFORGUE (A), 1977. - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodologique des données obtenues sous pluies simulées - Cah. ORSTOM. Sér. Hydrol., 14(4) : 299 - 343
- LAL (L), 1975. - Soil management systems and erosion control. - I.I.T.A Ibadan., 7 p
- MANNERING (J.V), MEYER (L.D), JOHNSON (C.B), 1966. - Infiltration and erosion as affected by minimum tillage for corn (*Zea mays. L.*). - soil sci. Soc. Amer. Proc., 30 (1) : 101 - 105
- MEROT (P), 1982. - Etude des transferts de l'eau et des solutés, au champ. - ENSA Rennes., 21 p
- MEYER (LD), MC CUNE (D.L), 1958. - Rainfall simulator for runoff plot.
- Agr. Eng., 39 (10) : 644 - 648
- MEYER (L.D), MANNERING (J.V), 1967. - Tillage and land modification for water erosion control. - Reprint from : tillage for greater crop production (conference proceedings) : 58 - 62
- MOLDENHAUER (W.C), LONG (D.C), 1964. - Influence of rainfall energy on soil loss and infiltration rates. - soil sci. Soc. Amer. Proc., 28 (6) : 813 - 817

MOLDENHAUER (W.C), KEMPER (W.D), 1969. - Interdependance of water drop energy and clod size on infiltration and clod stability. - Soil sci. Soc. Amer. Proc., 33 (2) : 297 - 301

MOLDENHAUER (W.C), LOVELY (W.G), SWANSON (N.P), CURRENCE (H.D), 1971. - Effect of row grades and tillage systems on soil and water losses. - Journal of soil and water conservation., 26 (5) : 1 - 3

MOORE (I.D), 1981. - Effect of surface sealing on infiltration. - Tr. of the A.S.A.E. : 1546 - 1552

MORIN (J), BENYAMINI (Y), 1977. - Rainfall infiltration into bare soils. - Water. res., 13 (5) : 813 - 817

MUTCHLER (C.K), MOLDENHAUER (W.C), 1963. - Application for laboratory rainfall simulator. - Tr. of the A.S.A.E., 6 (3) : 220 - 222

MUTCHLER (C.K), LARSON (C.L), 1971. - Splash amounts from waterdrop impact on a smooth surface. - Water. Res., 7 (1) : 195 - 200

NASSIF (S.H), WILSON (E.W), 1975. - The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. - Bull sci. Hydrol., 20 (4) : 539 - 553

PALMER (R.S), 1962. - An apparatus for forming waterdrops - New. Hampshire - Agr. Exp. st. Res. Report., 63 : 1 - 28

POESEN (J), SAVAT (J), 1981. - Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Detachability and transportability measurements. - CATENA., 8 (1)

POESEN (J), 1984. - The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian Overland flow volume. - CATENA.

RAHELIARISOA (M.A), 1986. - Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux. - Thèse de Doct. 3^e cycle. Univ. Orléans., 186 p

RIOU (C), 1966. - Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration, obtenues en laboratoire sur des échantillons initialement secs. - Cah. ORSTOM. Sér. Hydrol., 1 (5) : 31 - 48

ROOSE (E), 1973. - Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu inter-tropical. - Thèse de Doct. Ing. Fac. sci. Abidjan.

ROOSE (E), ASSELINE (J), 1978. - Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé. - Cah. ORSTOM.

Sér. Pédo., 16 (1) : 43 - 72

ROOSE (E), 1980. - Dynamique actuelle des sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. - Série Travaux et Documents n° 130. Thèse Doct. Etat. Univ. Orléans., 586 p

ROSE (C.W), 1962. - Some aspects of rainfall, radiant drying and soil factors on infiltration under rainfall into soils. - The Journal of soil sci., 13 : 286 - 298

SABET (Y), 1986. - Recherches sur la capacité d'infiltration des sols cultivés en "dry farming" dans les conditions climatiques de la Syrie DU N-W, région d'Alep. Utilisation d'un infiltromètre à aspersion.

- Thèse de Doct. Ing. INA P-G., 203 p

SAHORES (F), 1986. - Essai de caractérisation en laboratoire de l'évolution structurale de matériaux limoneux sous pluies simulées.

- Mémoire INRA Orléans., 56 p

SHARMA (D.P), AGRAWAL (R.P), 1980. - Physico-chemical properties of soil and their relationship with the modulus of rupture in alluvial soils - J. Indian. Soc. Soil sci., 28 (1) : 119 - 121

SWANSON (N.P), 1965. - Rotation boom rainfall simulator. - Tr. of the A.S.A.E., 8 (1) : 71 - 72

SWANSON (N.P), DEDRICK (A.R), WEAKLEY (H.E), 1965. - Soil particles and aggregates transported in runoff from simulated rainfall. - The Tr. of the A.S.A.E. St Joseph (MICHIGAN)., 8 (3) : 437 - 440

TREVISAN (D), 1986. - Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion de sols limoneux cultivés. Etude expérimentale au champ sous pluies simulées. - Thèse de Doct. 3^e cycle. Univ. Orléans., 171 p

TRICKER (A.S), 1979. - The design of a portable rainfall simulator infiltrometer. - Journal of Hydrology., 41 : 143 - 147

VALENTIN (C), 1981. - Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région susdésertique (Agadez-Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. - Thèse Doct. 3^e cycle Paris VII., 230 p

VIANI (J.P), 1986. - Contribution à l'étude expérimentale de l'érosion hydrique. - Thèse de Doct. es-sciences techniques. Ecole Polytechniques Fédérale de Lausanne, 221 p

WISCHMEIER (W.H), SMITH (D.D), 1958. - Rainfall energy and its relationship to soil loss. - Tr.Amer.Geo. Un., 39 (2) : 285 - 291

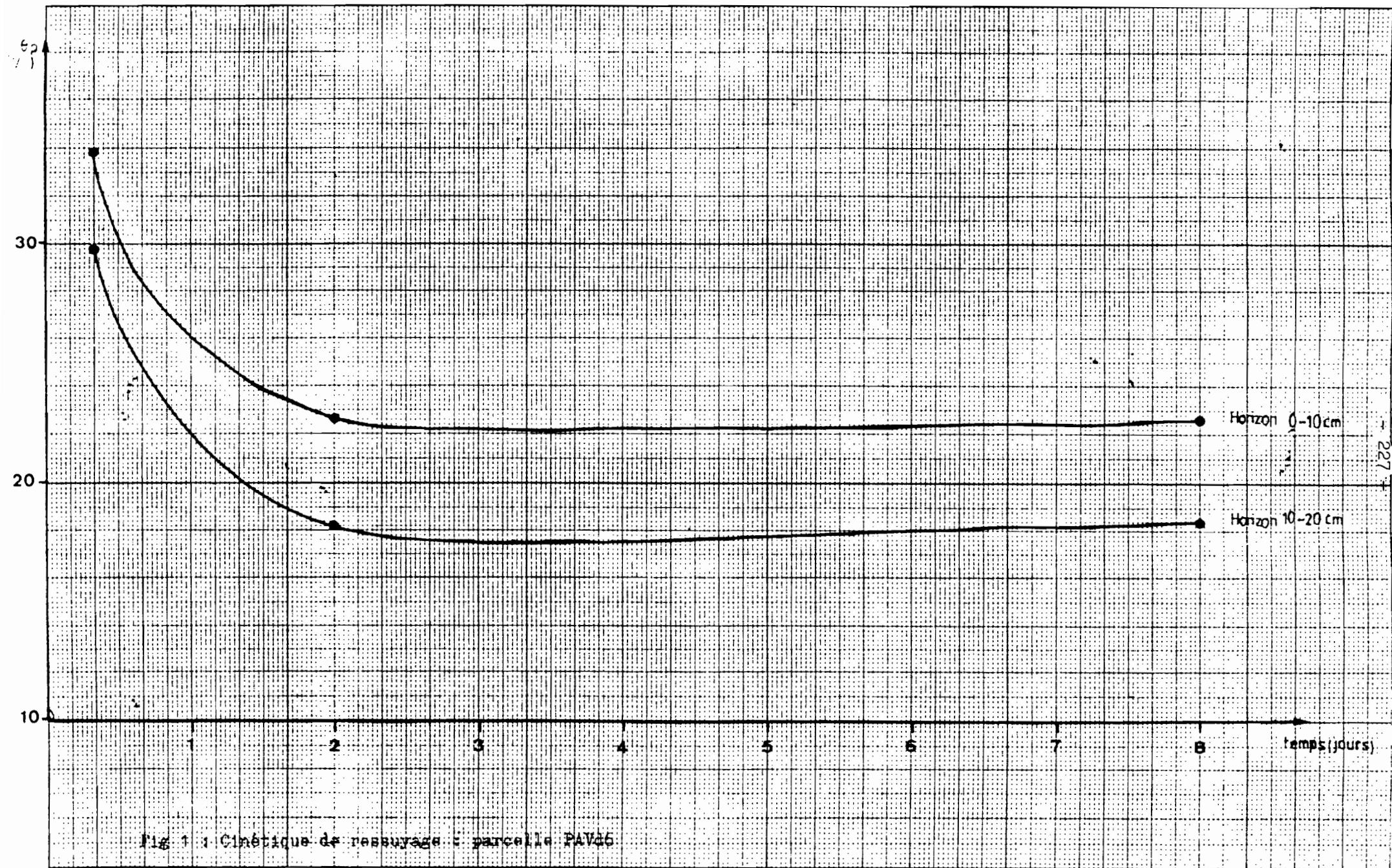
WISCHMEIER (W.H); SMITH (D.D), 1960. - An universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. - In : Proc. of the VII Th. int. Congr. Soil. sci. MADISON., 1 : 418 - 425

YAIR (A), KLEIN (M), 1973. - The influence of surface properties on flow and erosion processes on debris covered slopes in an arid ares. - CATENA., 1 (1) : 1 - 18

YAIR (A), LAVEE (H), BRYAN (R.B), ADAR (E), 1980. - Runoff and erosion processes and rates in the Zin Valley Bedland Nothern. Niger. - Earth surface. processes., 5 : 205 - 225

ZINGG (A.W), 1940. - Degree and lenght of land slope as it affect soil loss and runoff. - Agr. Eng., 21 : 59 - 64.

A N N E X E M O N T - L O Z E R E



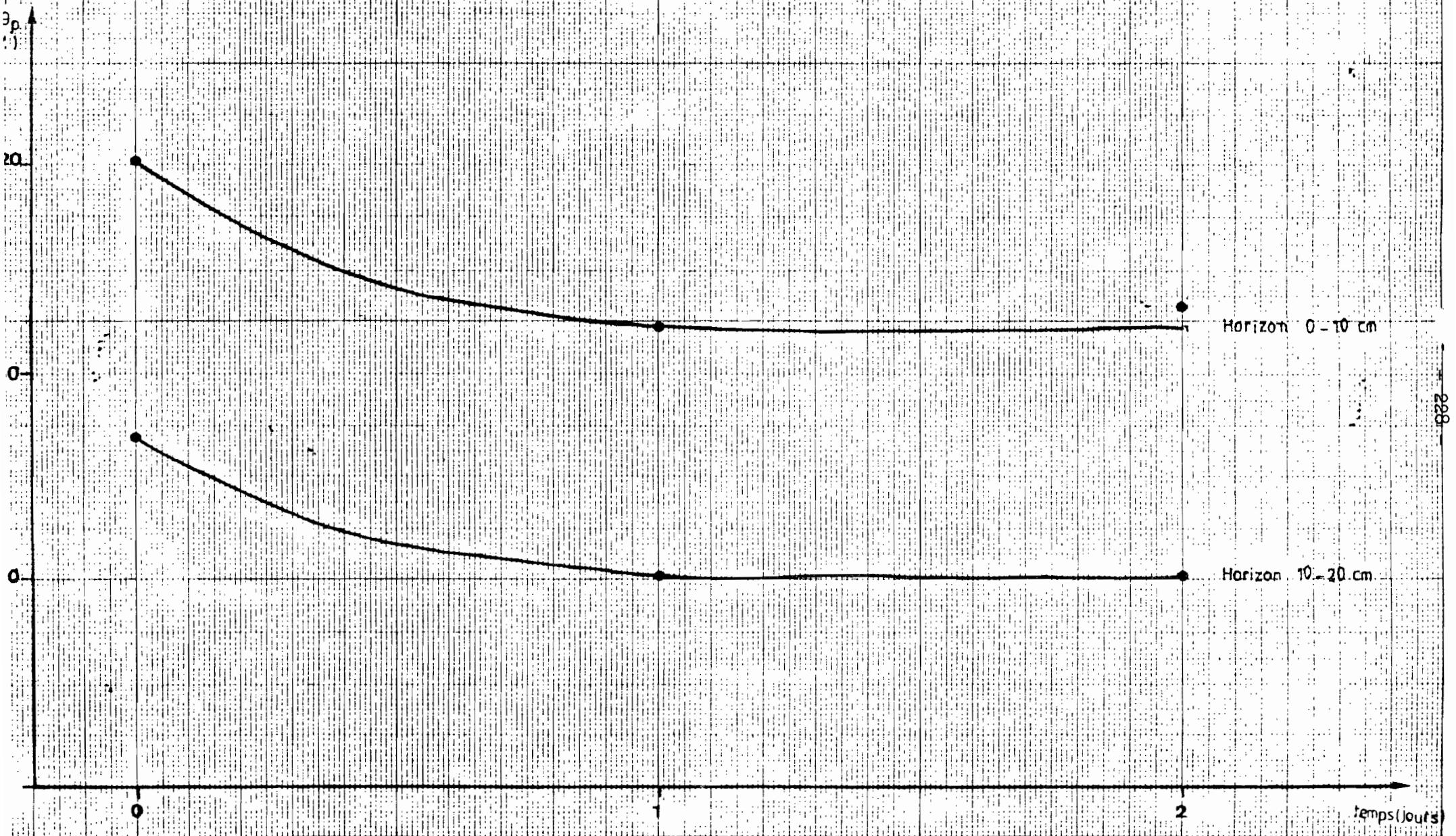
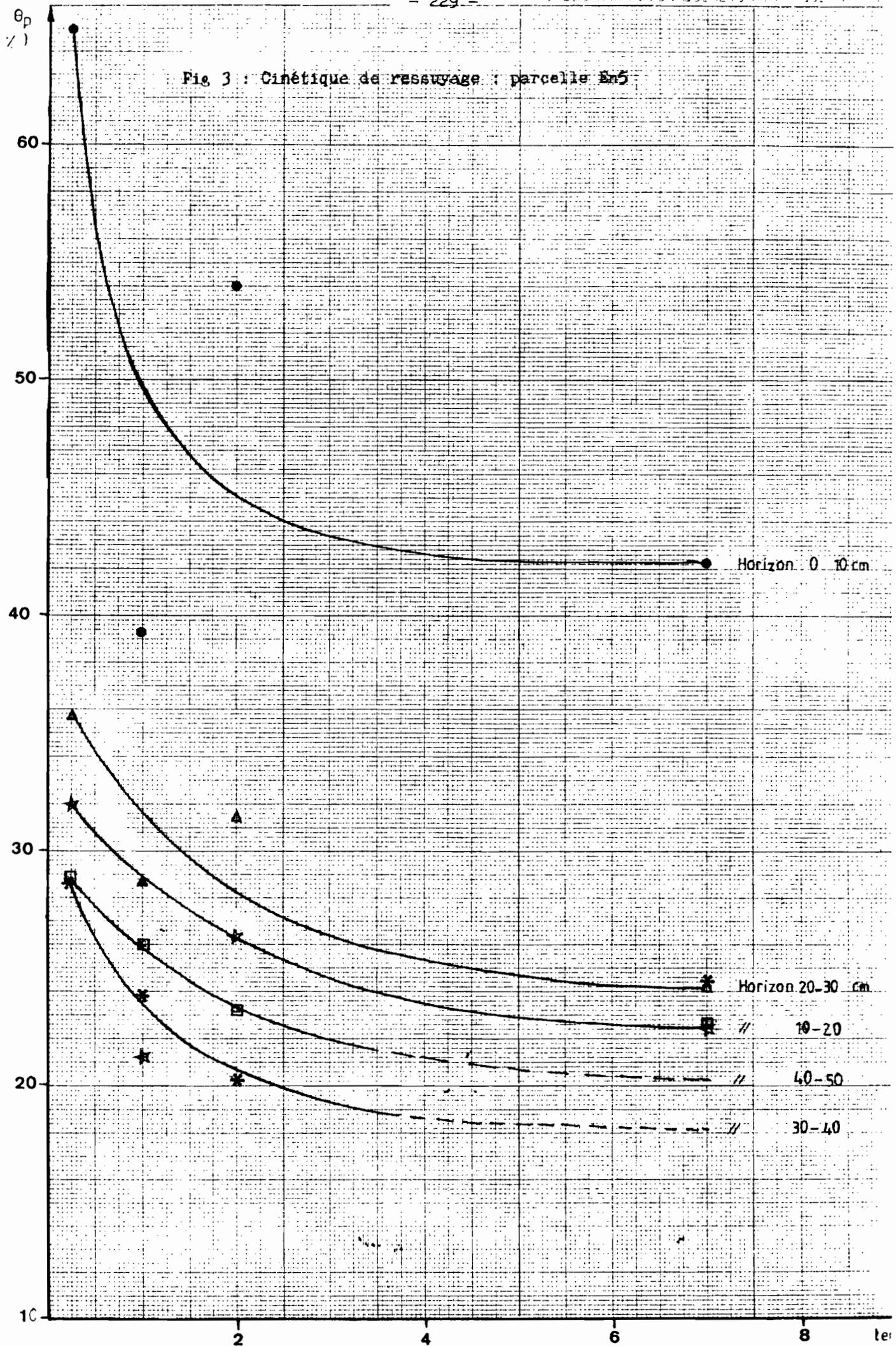


Fig 2 : Cinétique de ressuyage : parcelle E1

Fig 3 : Cinétique de ressuyage : parcelle E5



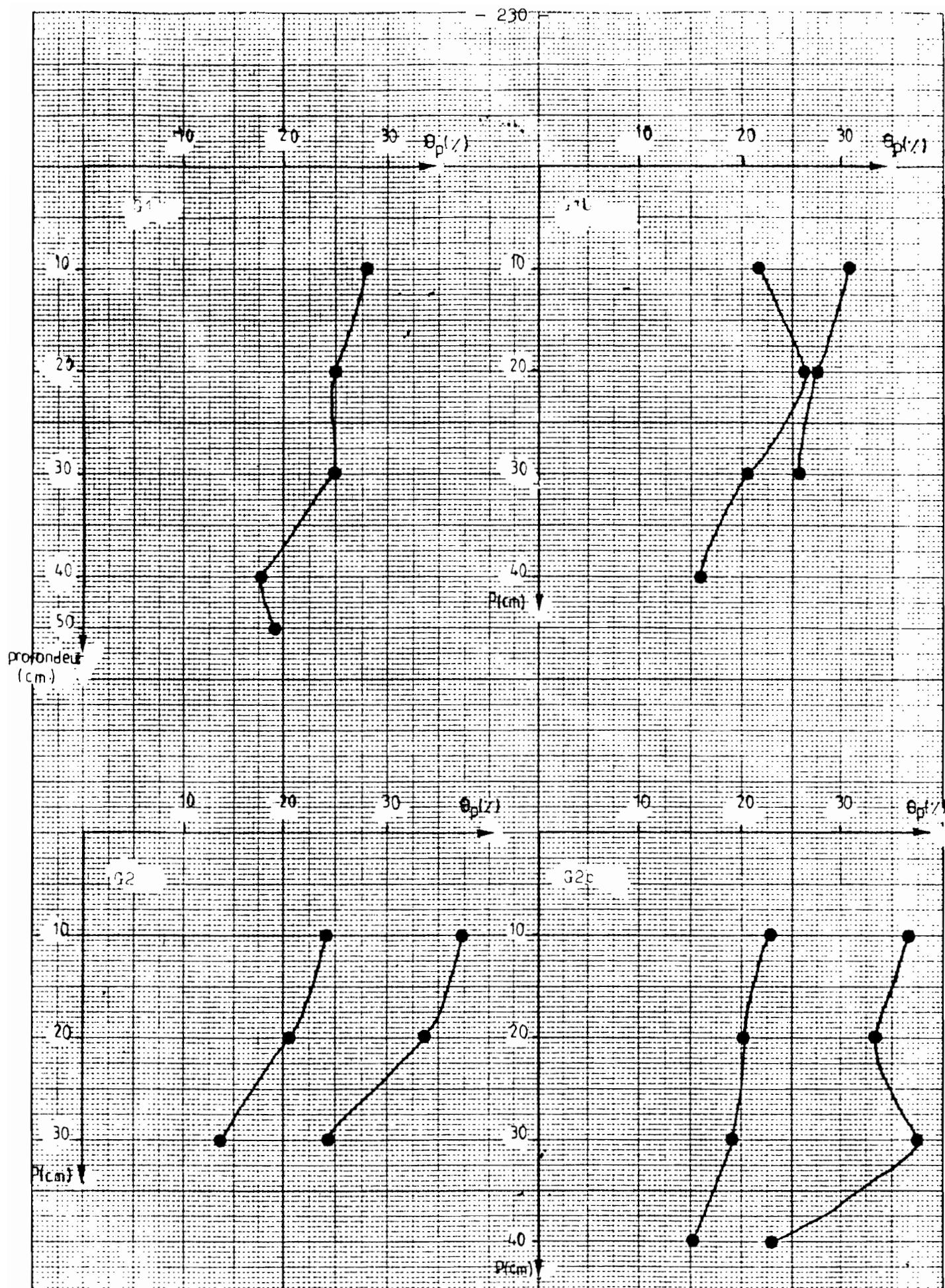


Fig 4.: Profils hydriques avant et après la pluie

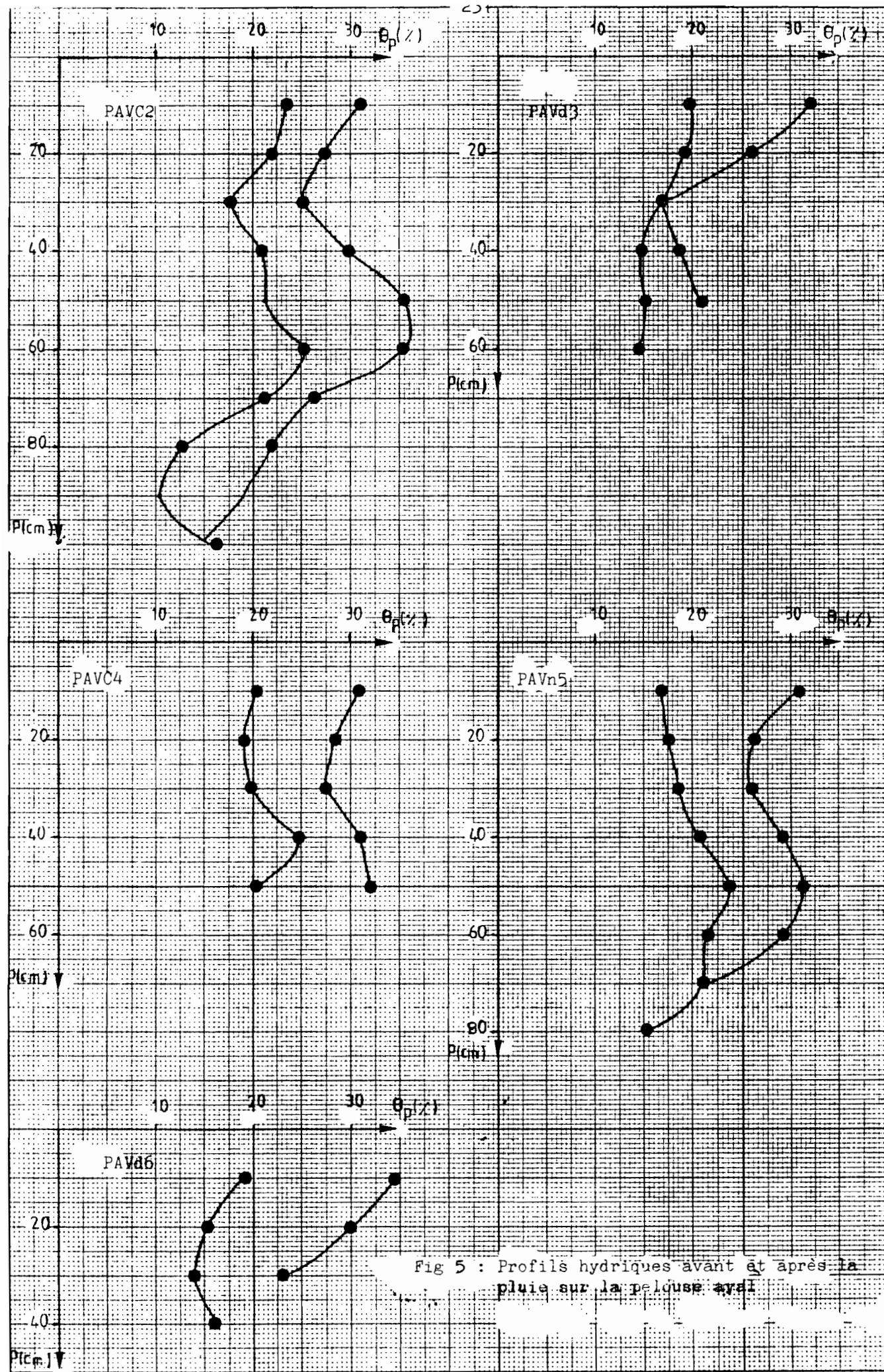
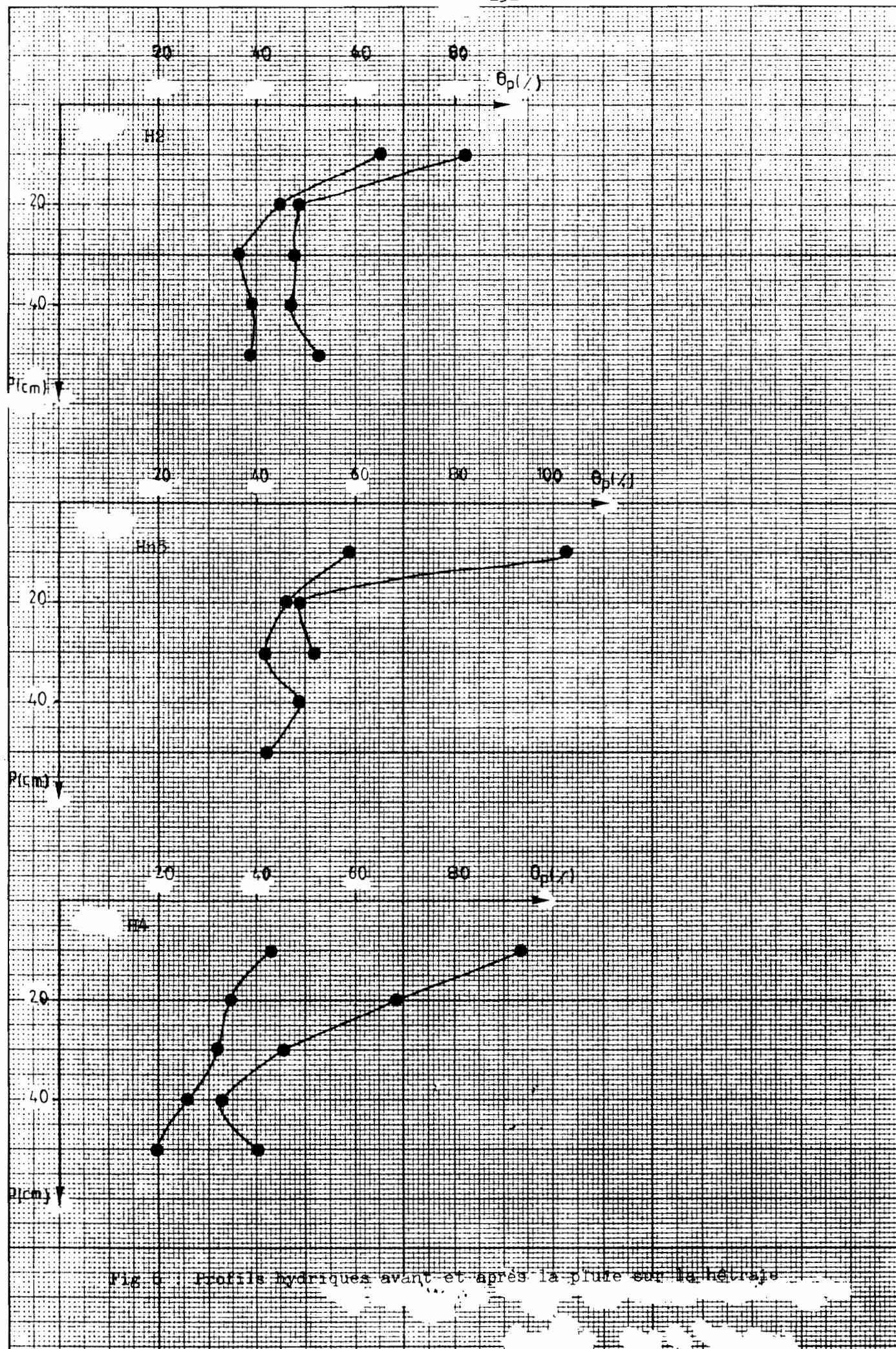
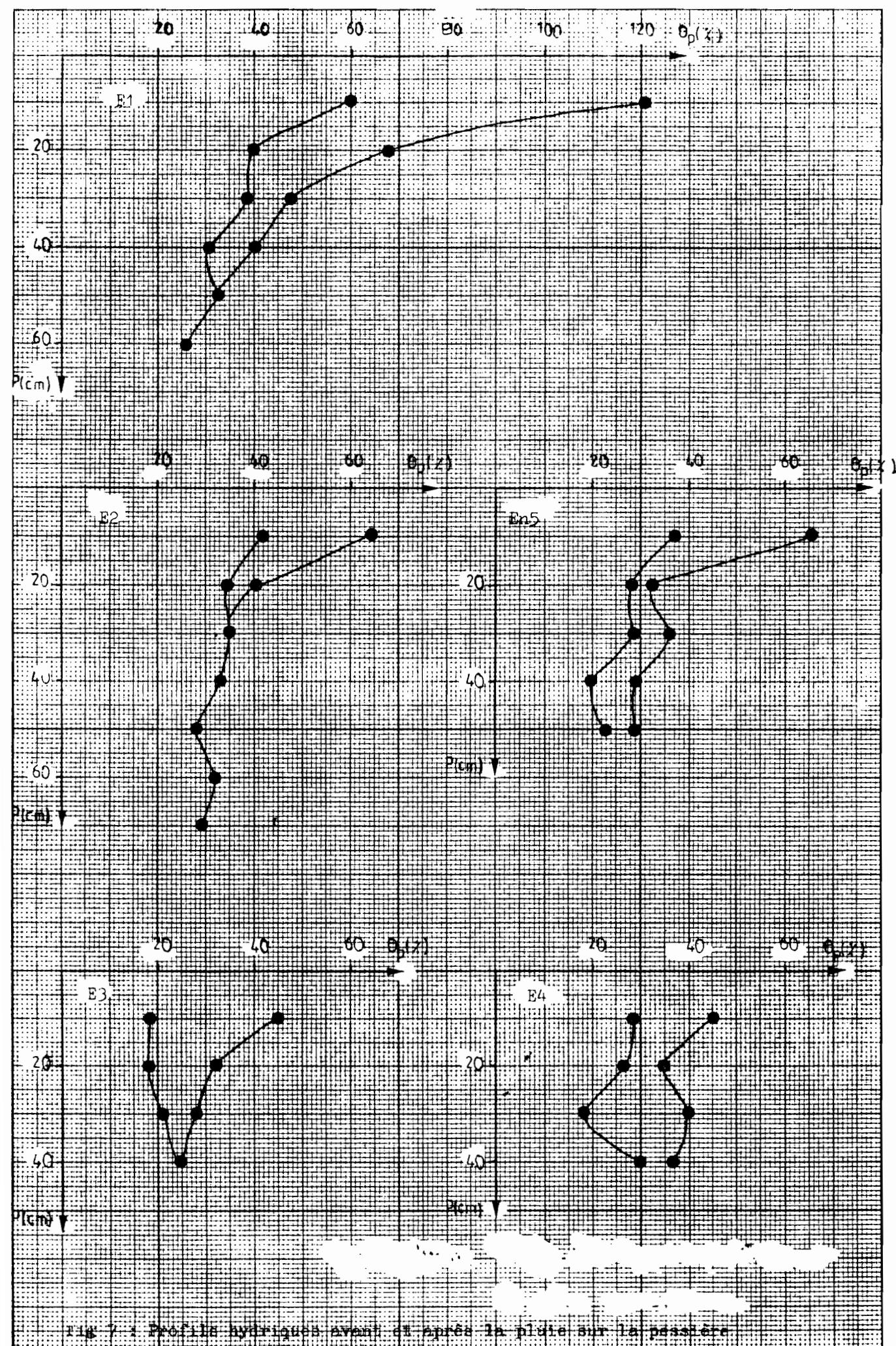
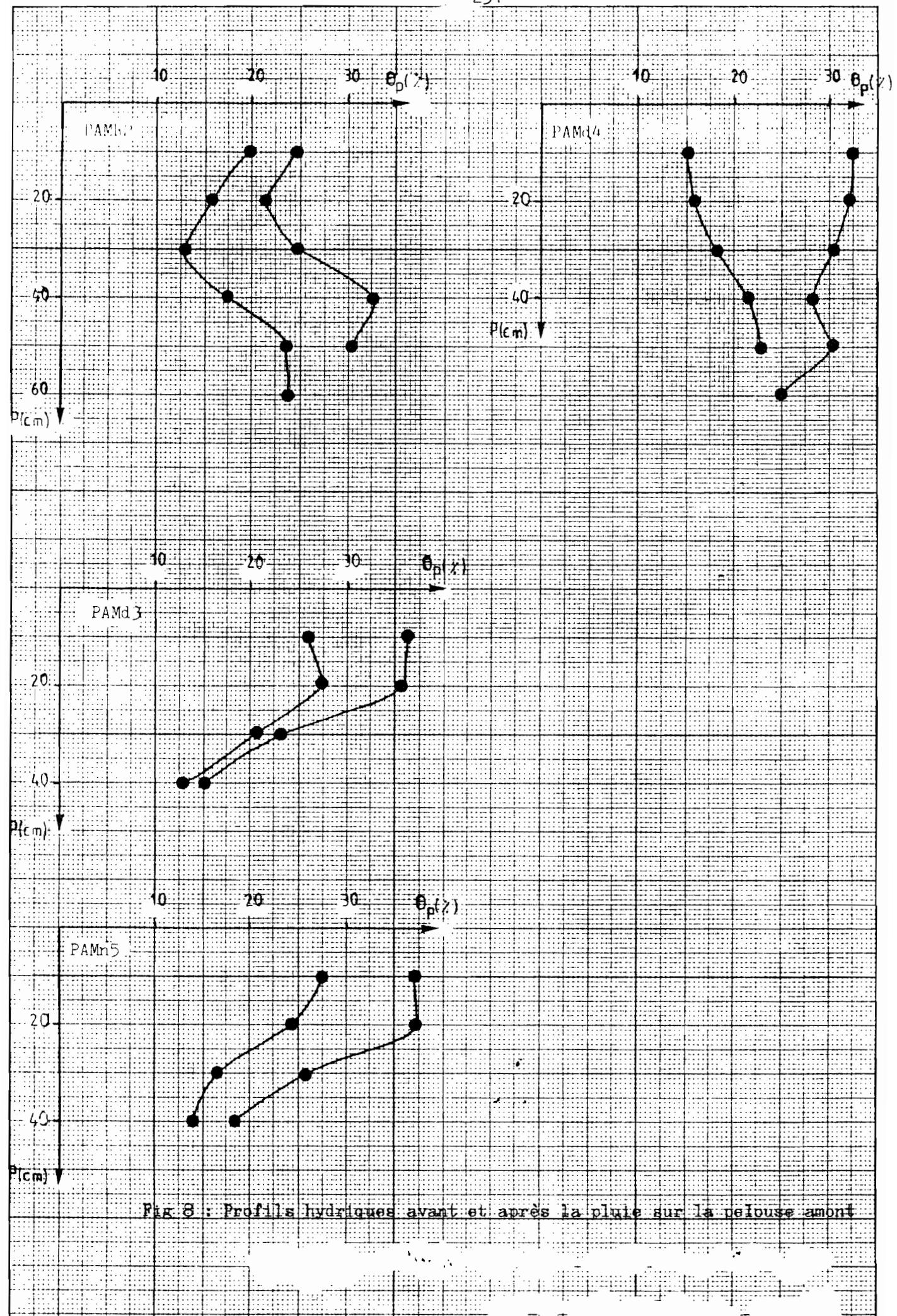


Fig 5 : Profils hydriques avant et après la pluie sur la pelouse avai







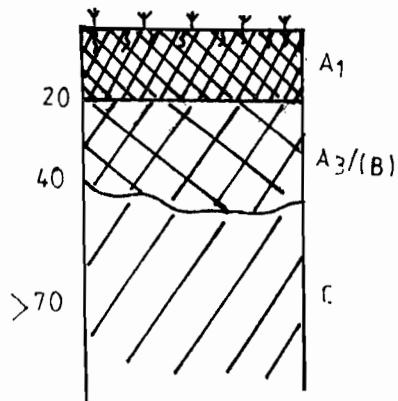
a/ Parcelle PAVd1 (pelouse aval, dégradée n° 1) :

C'est une zone supaturée, cultivée pendant plus d'un siècle jusqu'en 1963. C'est un acien champ représentant un glacis de raccordement d'une croupe de boules granitiques à une terrasse reçue par la rivière (la Cloutasse).

Le recouvrement de la parcelle est constitué par de l'herbe (51 %), de la litière (racines pourries, lichen ...) (24 %), 1% de sol nu et 25 % de cailloux. Notons l'absence d'organisations pelliculaires superficielles.

Horizon 0-20 cm : couleur gris-brun foncé
en humide - grossièrement sableux à graveleux (- 15 % d'argile) - chevelu racinaire très dense donnant une certaine cohésion à l'horizon
Porosité très forte - structure en partie grumeleuse, boulant - peu compact - limite nette (fond de labour)

A1



Horizon 20 - 40 cm : Horizon tacheté - couleur brun jaune texture sableuse plus grossière - structure particulaire porosité moins importante - moins de racines - plus compact - limite progressive

A3/(B)

Horizon > 70 cm : Horizon beige : arène granitique - très peu de matière organique - texture sableuse à sable grossier avec moins de graviers - structure particulaire - pas de racines - moins compact que A3/(B) - Facilement érodé par la rivière - Boulant.

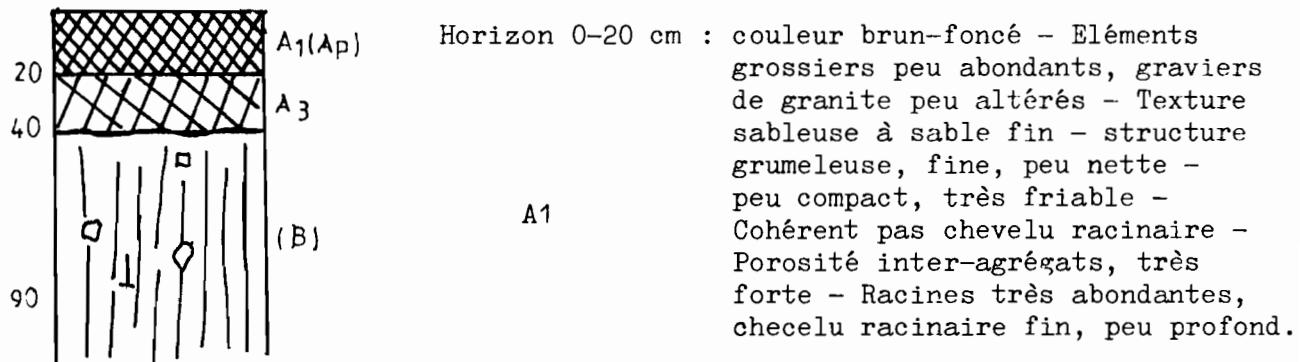
C

Conclusion : c'est un sol brun humifère, colluvial (d'après la classification CPCS)

horizon	profondeur en cm	pH eau	GRANULOMETRIE					M.O. %	C/N	C %	BASES ECHANGEABLES			F me %	S/T %
			SG	SF	LG	IF	A				Ca	Mg	K		
A1	0-20							8	5-8	13-9	0.32	0.15	0.18	13.3	4.8
A3(B)	20-40							3.3	5	5.7	0.04	0.05	0.09	11.2	1.6

b/ Parcelle PAVn5 (pelouse aval, n° 5) :

L'état de surface de cette parcelle est constitué de 92 % de sol nu et 8 % de cailloux. Le couvert végétal ayant été éliminé en retournant le sol.



Horizon 20 - 40 cm : couleur brun foncé - Eléments grossiers abondants dont 30 à 40 % de graviers et 10 % de cailloux - Texture sableuse à sables non triés - structure grumeleuse moyenne peu nette - Compact, fragile - Porosité inter-agrégats, forte - chevelu racinaire fin et peu profond - limite nette, ondulée.

Horizon 40- 100 cm : couleur brune - Eléments grossiers très abondants dont 50 % de graviers, 10 % de cailloux et 5 % de pierres. Texture sableuse à sables non triés - Structure massive à éclats argileux, localement à sous-structure grumeleuse horizon compact et fragile - Porosité interparticulaire bonne.

Conclusion : c'est un sol brun humifère, sableux et colluvial bien drainé.

horizon	profondeur en cm	pH eau	GRANULOMETRIE					M.O %	C %	C/N	BASES ÉCHANGEABLES			T %	S/T %			
											Ca	Mg	K					
			SG	SF	LG	IM	A											
A1	0-20							9.0	15.6	5.0	0.05	0.27	0.41	12.4	5.9			
A3	20-40							4.2	8.5	4.0	0.06	0.12	0.23	10.4	4			

Tableau 2

1.6.1.2 - Cas de la hêtraie :

Un profil pédologique a été décrit sur la parcelle H2 (hêtraie n° 2). La surface de la parcelle est recouverte à 100 % de litière (feuilles de hêtres récentes et anciennes).

Il est à noter que les hêtres servaient de refuge aux moutons dans les zones de boules de granite inaptes aux pelouses.

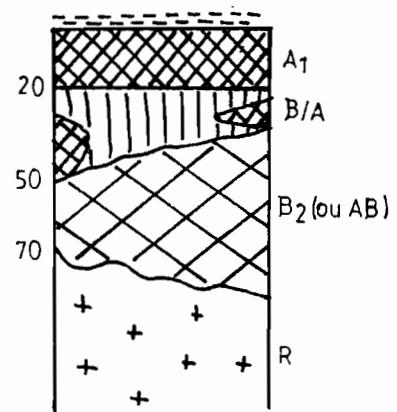
Horizon 5-0 cm : litière composée de feuilles de hêtres récentes, anciennes et décomposées - couches L, F, H

A1 Horizon 0-20 cm : couleur brun rouge foncé - matière organique très abondante - éléments grossiers, 10 à 20 % de graviers de granite peu altérés - Texture sablo-limoneuse - structure grumeleuse fine, peu nette - horizon compact, plastique très fragile - horizon poreux - Racines abondantes et profondes - Limite nette et régulière

B/A Horizon 20-50 cm : Matrice : brun jaune et tâches brun-rouge foncé irrégulières très contrastées, à limites nettes, couvrant environ 50 % de la surface - Eléments grossiers constitués de graviers peu altérés (40 %) - Texture sablo-limoneuse - structure massive à sous-structure grumeleuse fine - horizon peu compact, très fragile - Porosité forte à pores très nombreux et très fins Racines abondantes - Limite irrégulière, peu nette.

Horizon 50-70 cm : couleur brun foncé - Eléments grossiers : environ 40 % de graviers - texture sableuse - structure grumeleuse fine, nette - horizon peu compact, très fragile - Poreux à porosité inter-agrégats - racines peu nombreuses, souvent mortes - Limite irrégulière, peu nette.

Conclusion : c'est un sol brun-humifère, polyphasé.



Horizon	Profondeur en cm	Ph	GRANULOMETRIE					M.O %	C %	C/S	BASES ECHANGEABLES			S/T %	%
			SG	SF	IG	LF	A				Ca	Mg	K		
A1	0-20							15.6	27	6.8	0.05	0.29	0.24	13.7	4.1
B/A	20-50							5.8	10.2	5.3	0.04	0.20	0.09	13.7	2.3

Tableau 3

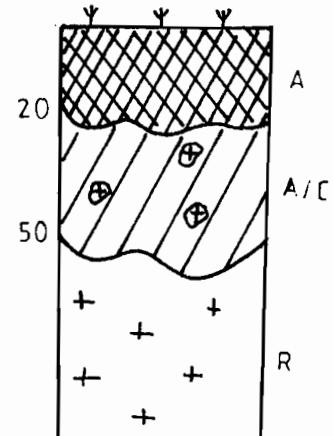
1.6.1.3 - Cas de la pelouse amont :

Un profil pédologique a été décrit sur la parcelle PAMd3 (pelouse amont, dégradée, n° 3)

Le recouvrement de la parcelle est constitué de 37 % d'herbe et 57 % de litière (racines pourries, brindilles, lichen ...)

Horizon 0-20 cm : Couleur brun-foncé - Eléments grossiers : 50 % de graviers et cailloux peu altérés - Texture sableuse à sable fin et grossier - structure grumeleuse (matrice) - horizon peu compact, très fragile - Porosité inter-agrégats, très forte et interparticulaire - racines très nombreuses, chevelu racinaire fin - limite nette, ondulée.

A



Horizon 20-50 cm : - Mélange de A et de cailloux et pierres plus ou moins arénisées (gris), représentant 50 % de l'horizon.
- Mêmes caractéristiques que A, à part une teneur en éléments grossiers très supérieure (75 % environ) et horizon plus compact - limite irrégulière avec granite plus ou moins altéré.

Conclusion : C'est un sol jeune, peu profond et peu évolué classé d'après CPCs comme Ranker modal.

horizon	profondeur en cm	PH eau	GRANULOMETRIE					M.O.	% C	N	BASES ECHANGEABLES			Tme	Si/T
			SG	SF	LG	LF	A				Ca	Mg	K		
A	0-20	4.5	50.4	14.2	4.0	15.5	8.5	7.5	13.0	4.6	0.05	0.08	0.14	12.0	2.2
A/C	20-50	4.4	59.5	16.6	5.0	14.0	2.0	1.5	2.6	1.7	0.04	0.05	0.09	10.0	1.8

Tableau 4

1.6.1.4 - Cas de la pessière :

Ce profil a été décrit sur la parcelle En5 (épicéa, nue, n° 5).

La surface de la parcelle est recouverte à 100 % de litière (aiguilles d'épicéa).

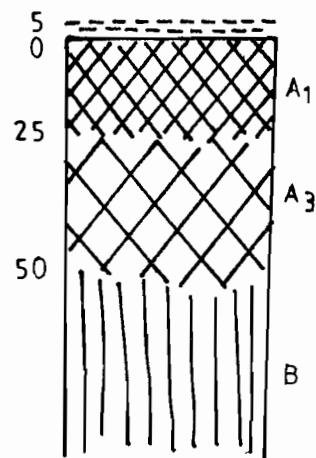
Horizon 5 0 cm : Couche L : 1 cm
 Couche F : 2 à 3 cm
 Couche H : 1 cm, avec grains
 de quartz lavés

Horizon 0-25 cm : Couleur brun-foncé - Matière organique abondante - texture sableuse à sable fin - structure micro-grumeleuse peu nette - peu compact, très fragile Porosité inter-agrégats, forte Racines importantes, surtout horizontales - limite peu nette

Horizon 25-50 cm : Couleur : brun foncé (un peu plus clair) - Matière organique relativement importante - Mêmes caractéristiques que l'horizon A1 sauf la structure qui est polyédrique sub-anguleuse, fine, peu nette, à sous-structure micro-grumeleuse - limite peu nette

Horizon 50-70 cm : - Couleur brun ocre - Eléments grossiers : 40 % de graviers, 10 % de cailloux et de pierres.
 - Texture sableuse à sables fins - structure massive à sous-structure micro-grumeleuse
 - Peu compact, très fragile - porosité assez forte, très fine - racines peu nombreuses
 - limite peu nette

Conclusion : c'est un sol colluvial.

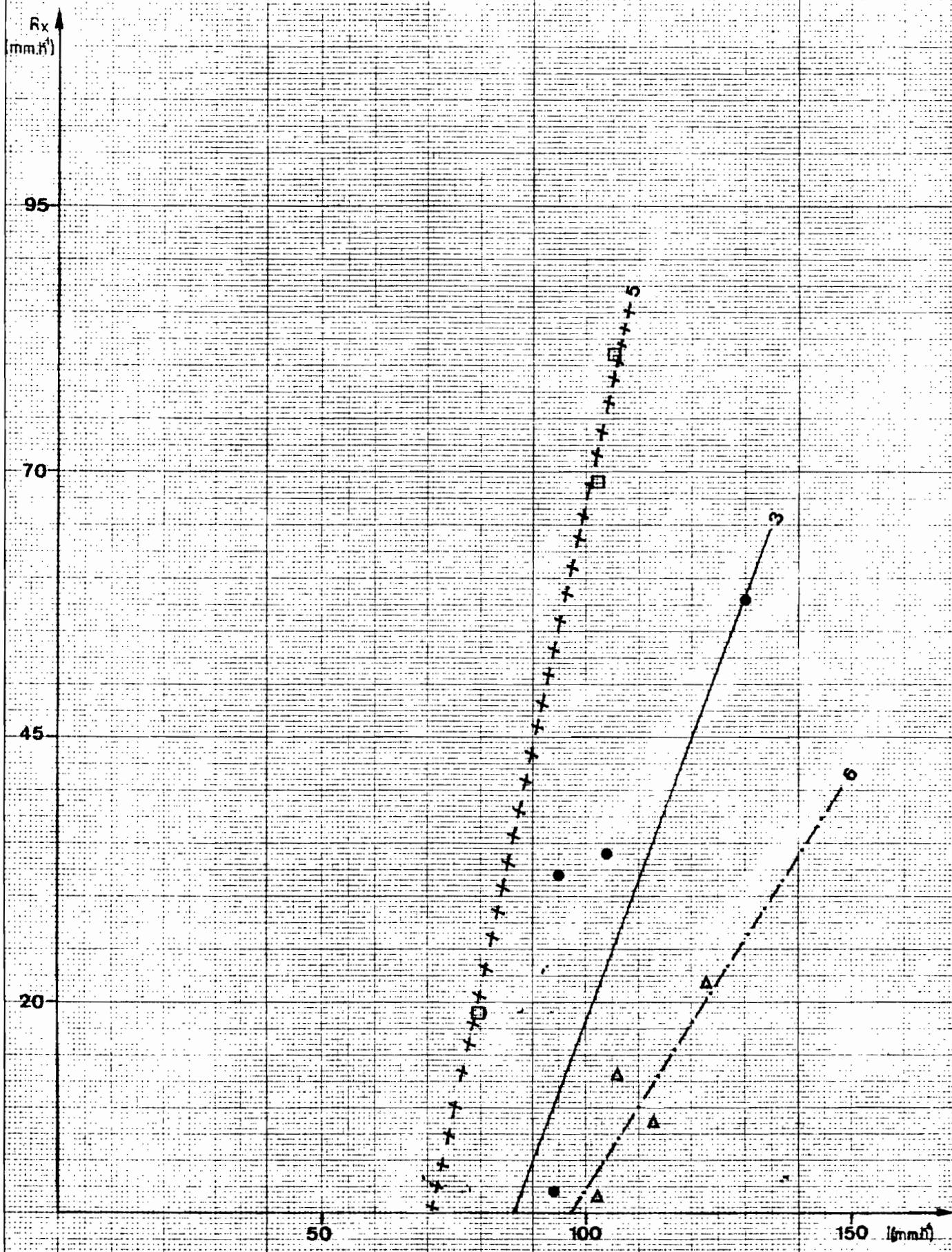


horizon	profondeur en cm	pH eau	GRANULOMETRIE					M.O. %	C %	C/N	BASES ECHANGEABLES			T %	S/T %
			SG	SF	LG	LF	A				Ca	Mg	K		
A1	0-25	4.1	48.4	12.5	3.0	11.5	12.0	10.5	18	5.9	0.04	0.17	0.16	11.2	3.3
A3	25-50	4.3	49.3	12.8	5.0	12.5	9.3	9	15.6	6.8	0.04	0.09	0.10	10.8	2.0
B	50-70	4.3	47.6	12.5	5.0	13.5	14.0	4	7	4.3	0.04	0.07	0.08	11.2	1.6

Tableau 5

Conclusion : Ce sont des sols humifères, riches en matière organique, notamment les horizons de surface. Ils sont très désaturés et très acides.

Fig 9 : Evolution de Rx en fonction de l'intensité de la pluie :
pelouse aval



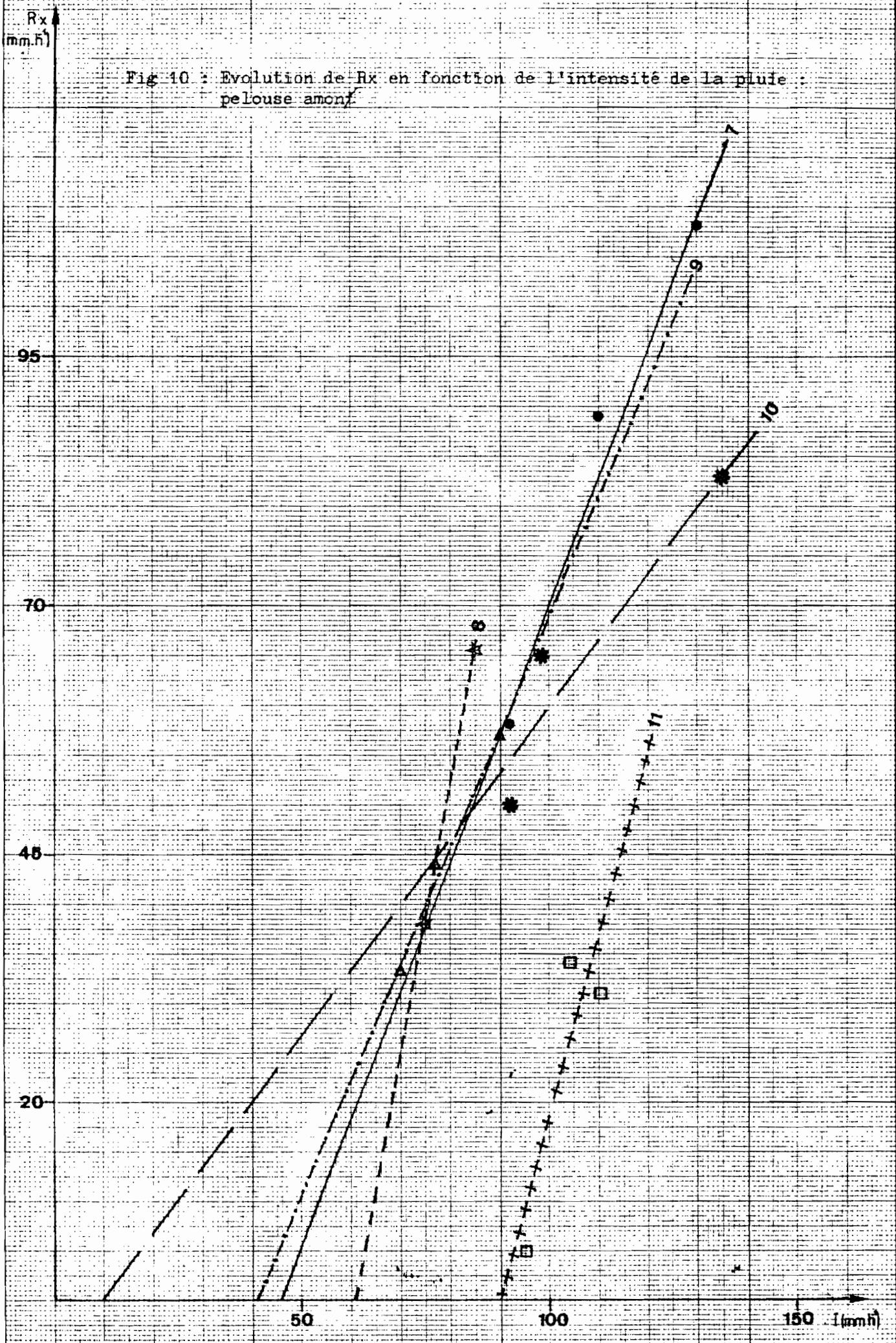


Fig 11 : Evolution de Rx en fonction de l'intensité de la pluie :
Hêtre aciculaire

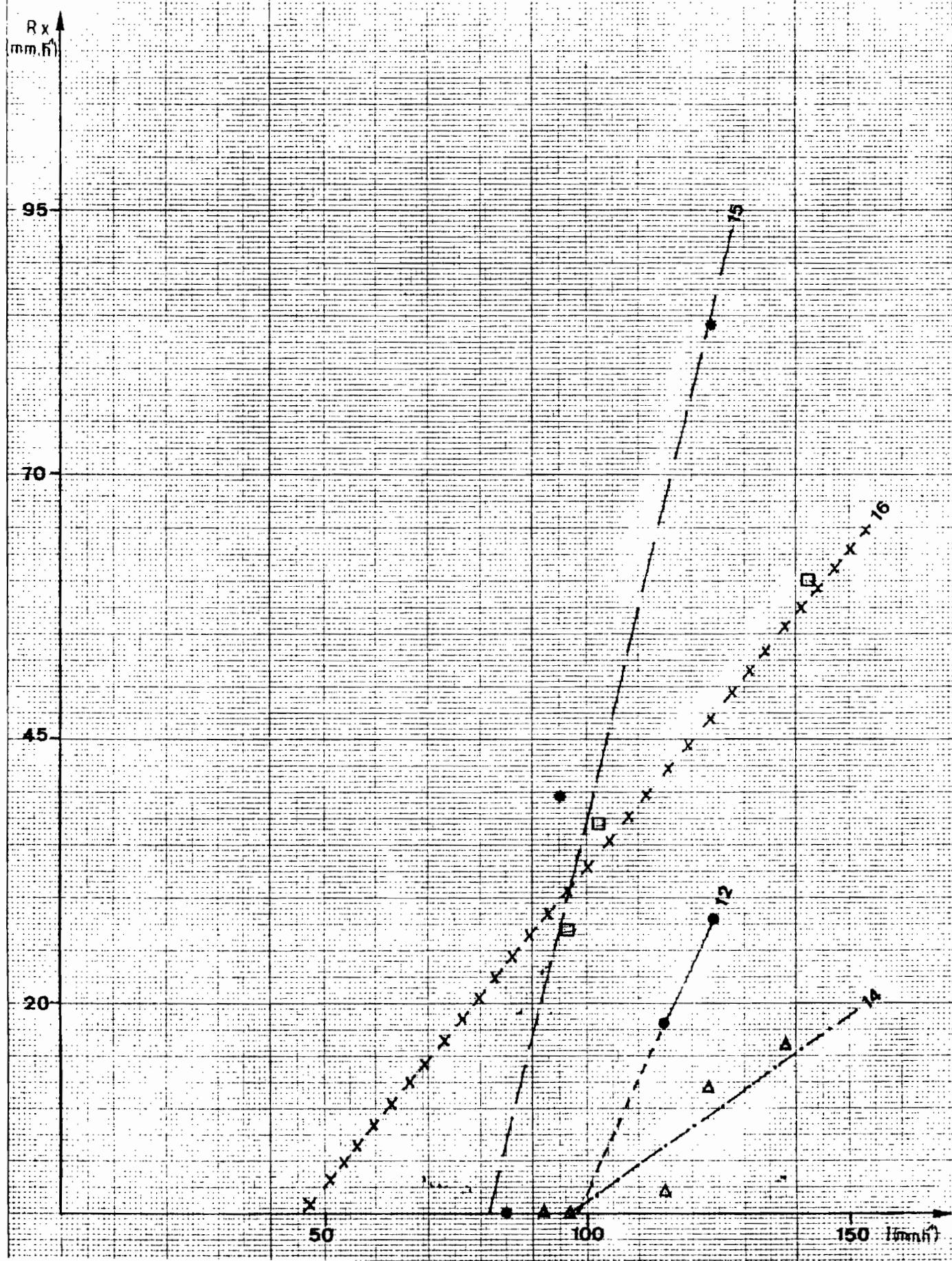
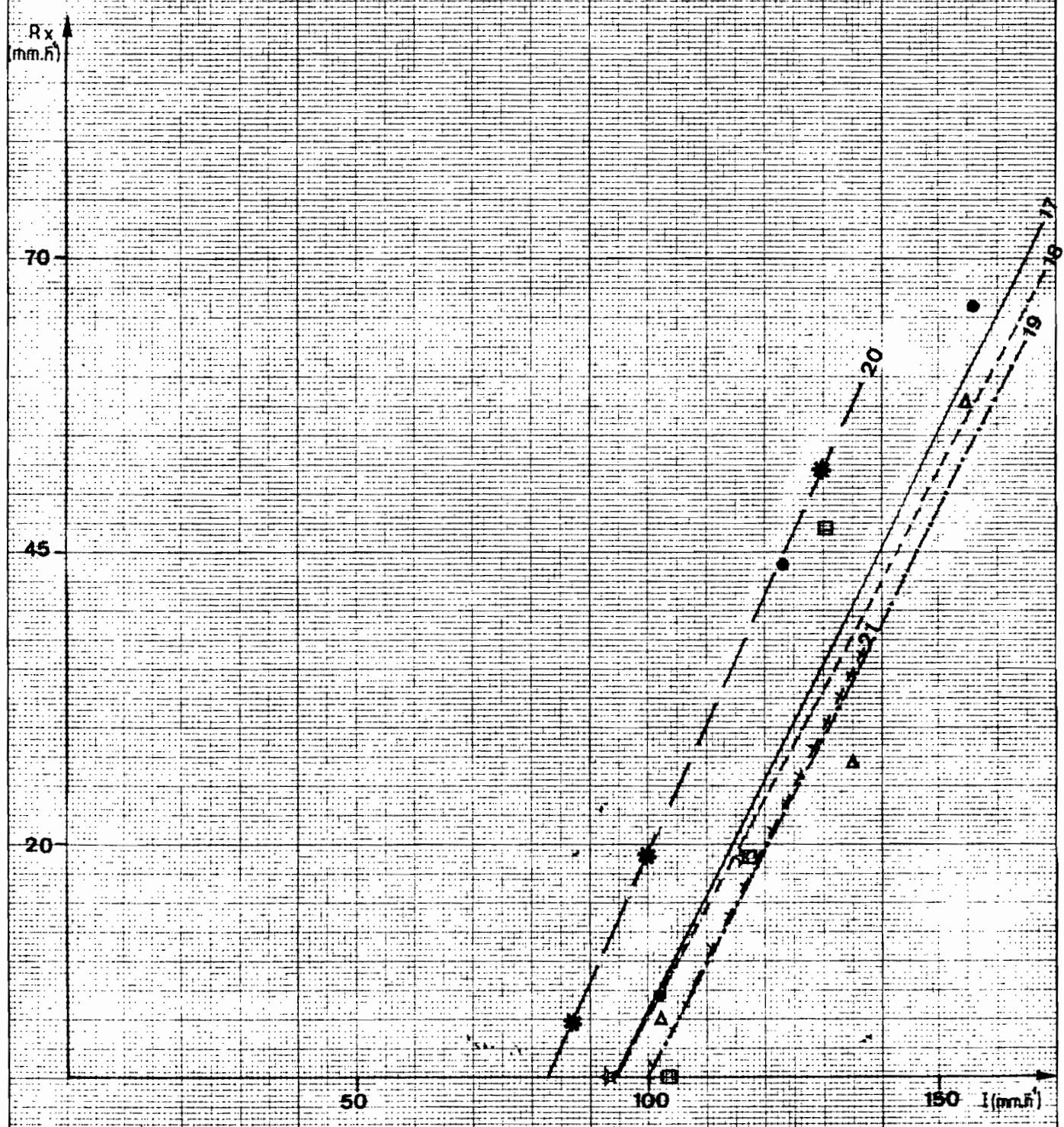


Fig. 12 : Evolution de Rx en fonction de l'intensité de la pluie :
Pessière



A N N E X E L A U R A G A I S

Tableau 1: Conditions hydriques finales

code parcelle	porosité totale en % Pt			Teneur en eau à saturation θs en %			Macroporosité ouverte en %		
	0-10 cm	10-30 cm	30 cm	0-10 cm	10-30 cm	30 cm	0-10 cm	10-30 cm	30 cm
N1-1	56,5	49,1	36,9	30,5	47,9	36,9	26,0	1,2	0,0
N1-2	56,9	48,2	36,5	27,3	32,9	36,5	29,6	15,3	0,0
N1-3	51,7	46,9	36,9	30,2	32,2	35,4	21,5	14,7	1,5
N1-4	50,8	43,0	32,1	31,7	36,4	32,1	19,1	6,6	0,0
N5-1	49,1	40,8	30,8	31,8	33,7	30,8	17,3	7,1	0,0
N5-2	49,1	40,8	30,8	31,2	35,3	30,8	17,9	5,5	0,0
N5-3	49,1	40,8	30,8	31,8	38,0	30,8	17,3	2,8	0,0
N2-1	43,9	35,2	33,4	37,7	35,2	33,4	6,2	0,0	0,0
N2-2	52,6	40,0	36,5	31,9	37,0	36,5	20,7	3,0	0,0
N2-3	43,9	40,0	36,5	37,7	35,9	36,5	6,2	4,1	0,0
N2-4	43,9	40,0	36,5	38,2	34,3	32,5	5,7	5,7	4,0
N3-1	36,5	33,0	32,6	36,5	33,0	32,6	0,0	0,0	0,0
N3-2	39,1	35,6	33,0	39,1	35,6	33,0	0,0	0,0	0,0
N3-3	39,1	36,0	33,0	39,1	36,0	33,0	1,3	0,0	0,0
N3-4	39,1	36,0	33,0	39,1	33,7	30,6	0,0	2,3	0,0
N4-1	54,3	50,0	37,3	30,8	31,3	37,3	23,5	18,7	0,0
N4-2	55,6	54,3	39,5	27,7	27,7	36,3	27,9	26,6	3,2
N4-3	55,6	54,3	39,5	29,5	29,2	34,2	26,1	25,1	5,5
N4-4	53,4	49,5	37,3	28,9	31,7	37,1	24,5	17,8	0,2
N7-1	50,8	45,6	30,8	32,2	33,6	30,8	18,6	12,0	0,0
N7-2	50,8	45,6	30,8	30,0	30,9	30,8	20,8	14,7	0,0
N7-3	50,8	45,6	30,8	30,4	32,3	30,8	20,4	13,3	0,0
N7-4	50,8	45,6	30,8	27,1	22,3	30,8	23,7	23,3	0,9
N8-1	48,2	31,7	31,7	28,9	31,7	31,2	19,3	0,0	0,5
N8-2	50,8	45,6	30,8	28,6	22,5	30,8	22,2	23,1	0,0
N8-3	50,8	45,6	30,8	29,2	36,5	30,8	21,6	9,1	0,0
N8-4	50,8	45,6	30,8	29,8	40,5	30,8	21,0	5,1	0,0
N2b-1	52,6	40,0	36,5	30,9	33,8	36,5	21,7	6,2	0,0
N2b-2	52,6	40,0	36,5	33,5	33,0	31,6	19,1	7,0	4,9
N2b-3	52,6	40,0	36,5	29,2	16,6	26,7	23,4	6,5	9,8
N2b-4	52,6	40,0	36,5	33,0	34,6	33,1	19,6	5,4	3,4

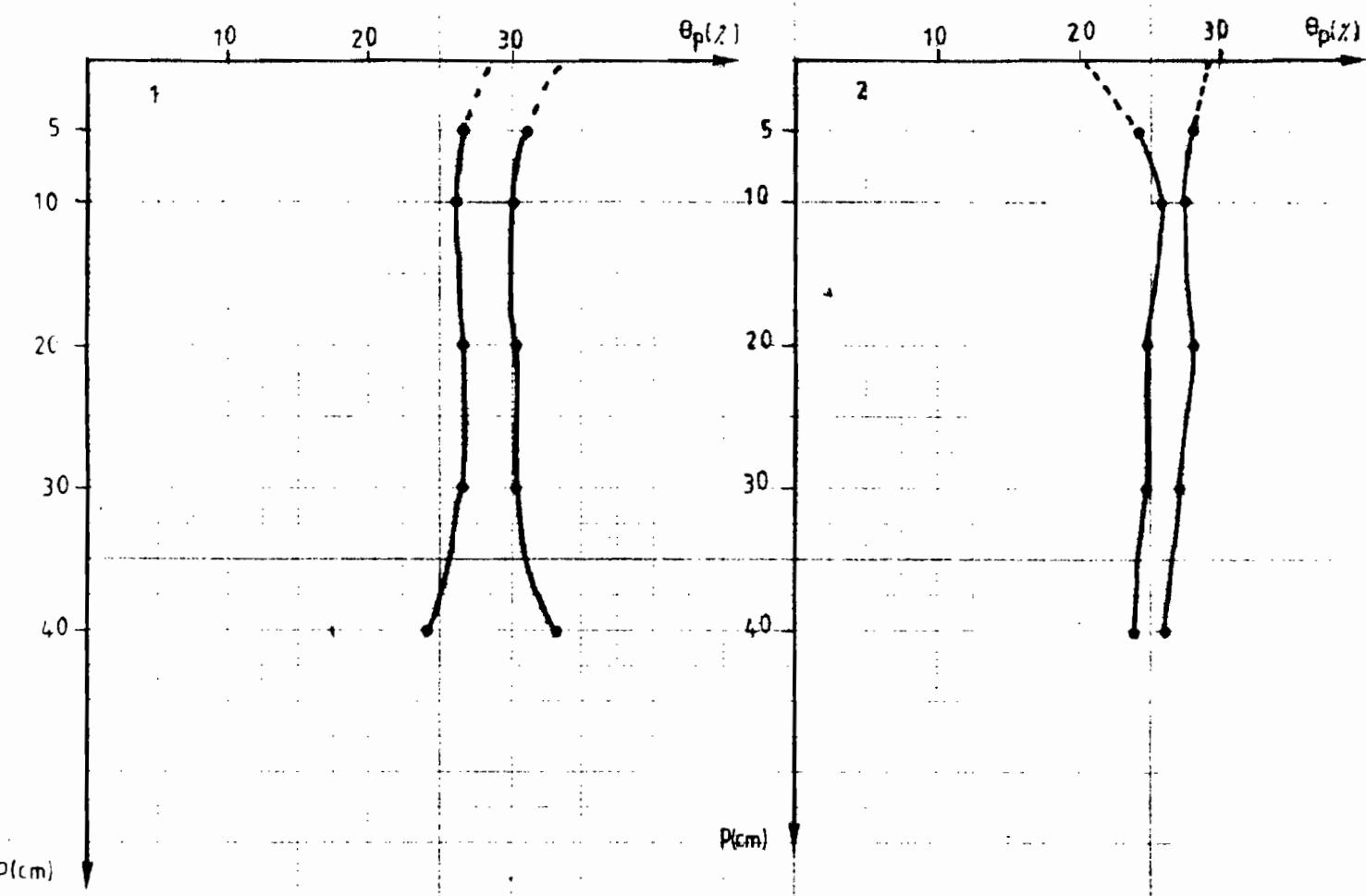
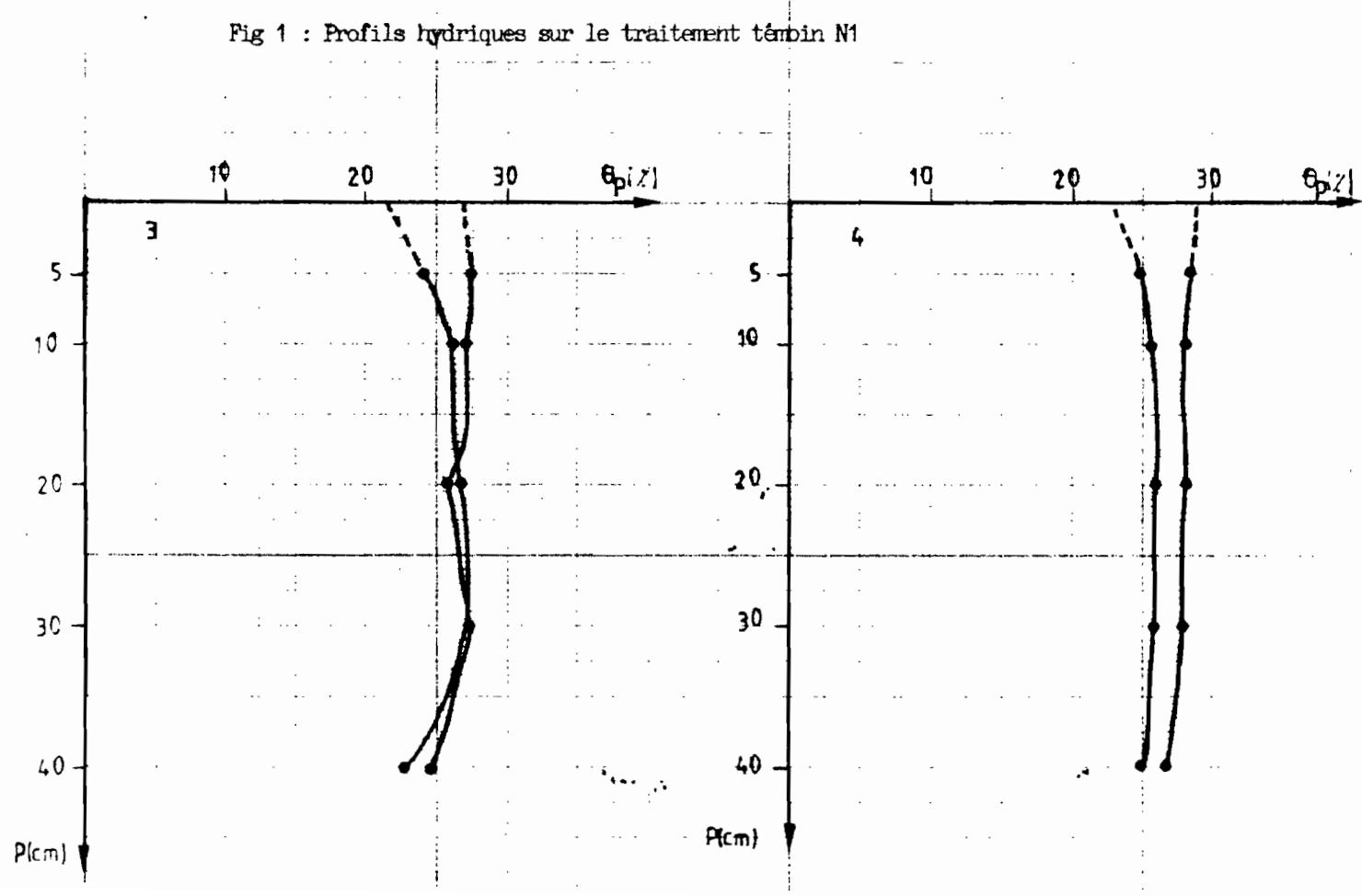


Fig 1 : Profils hydriques sur le traitement témoin N1



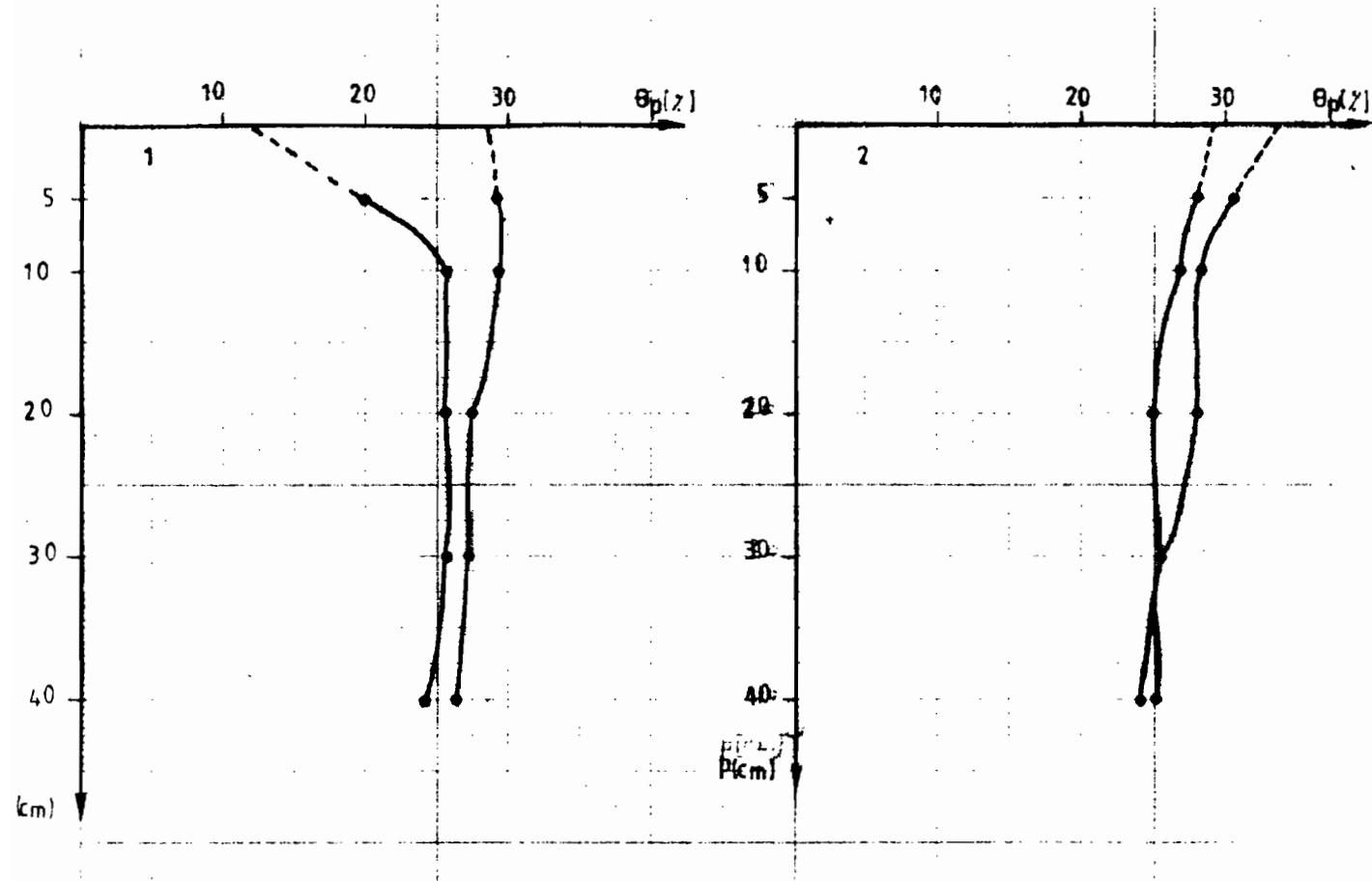
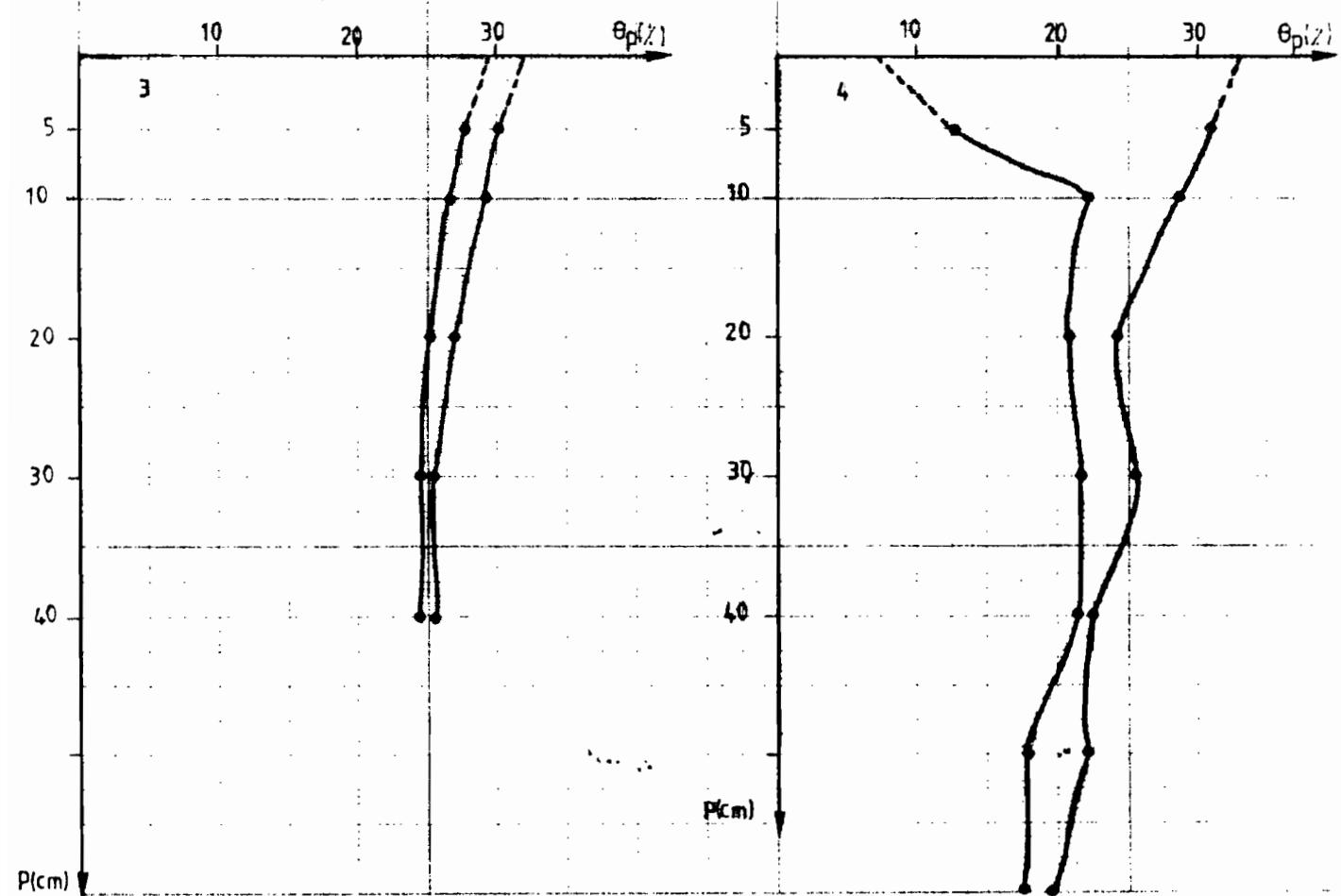


Fig 2 : Profils hydriques sur le traitement N2



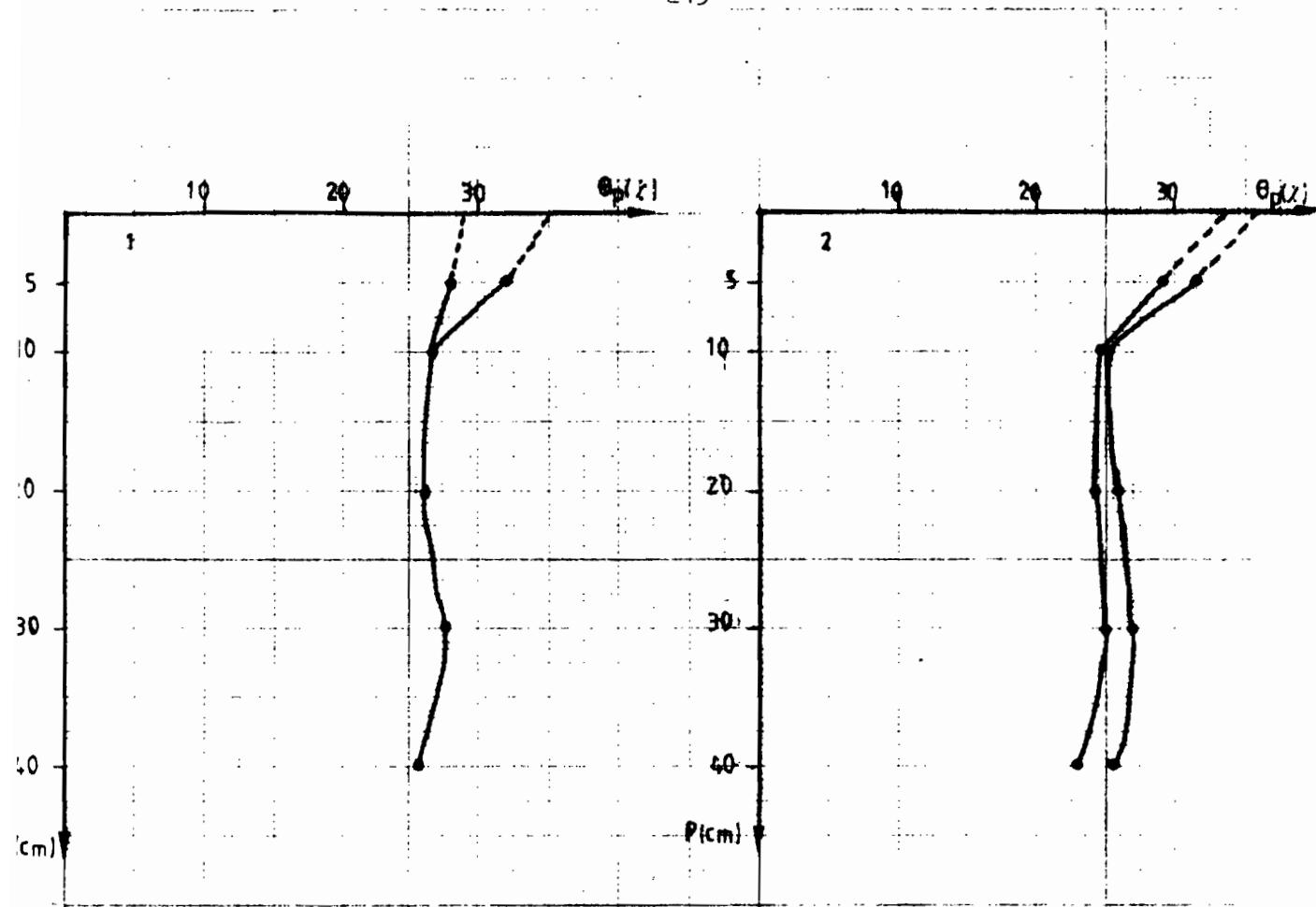
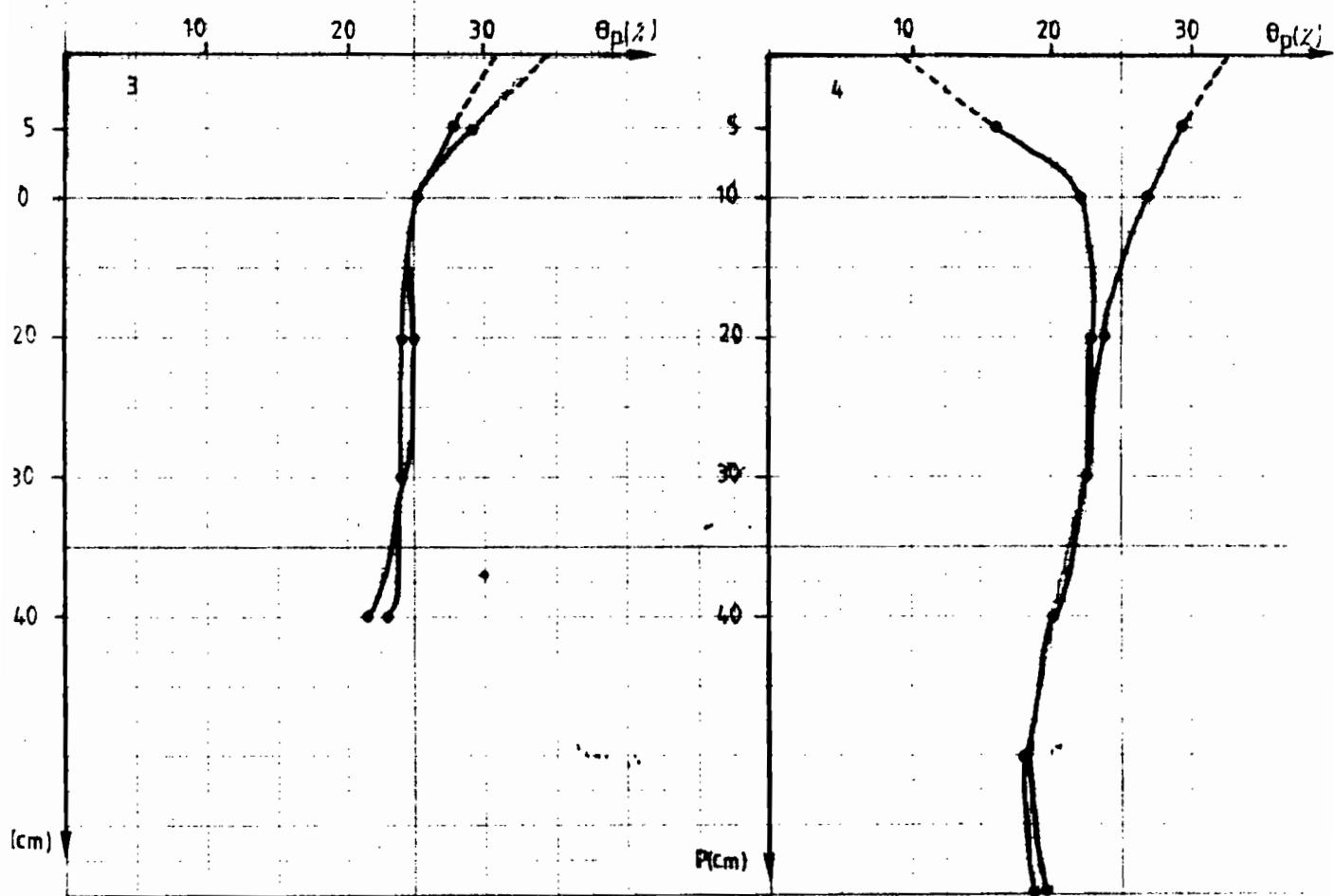


Fig 3 : Profils hydriques sur le traitement N3



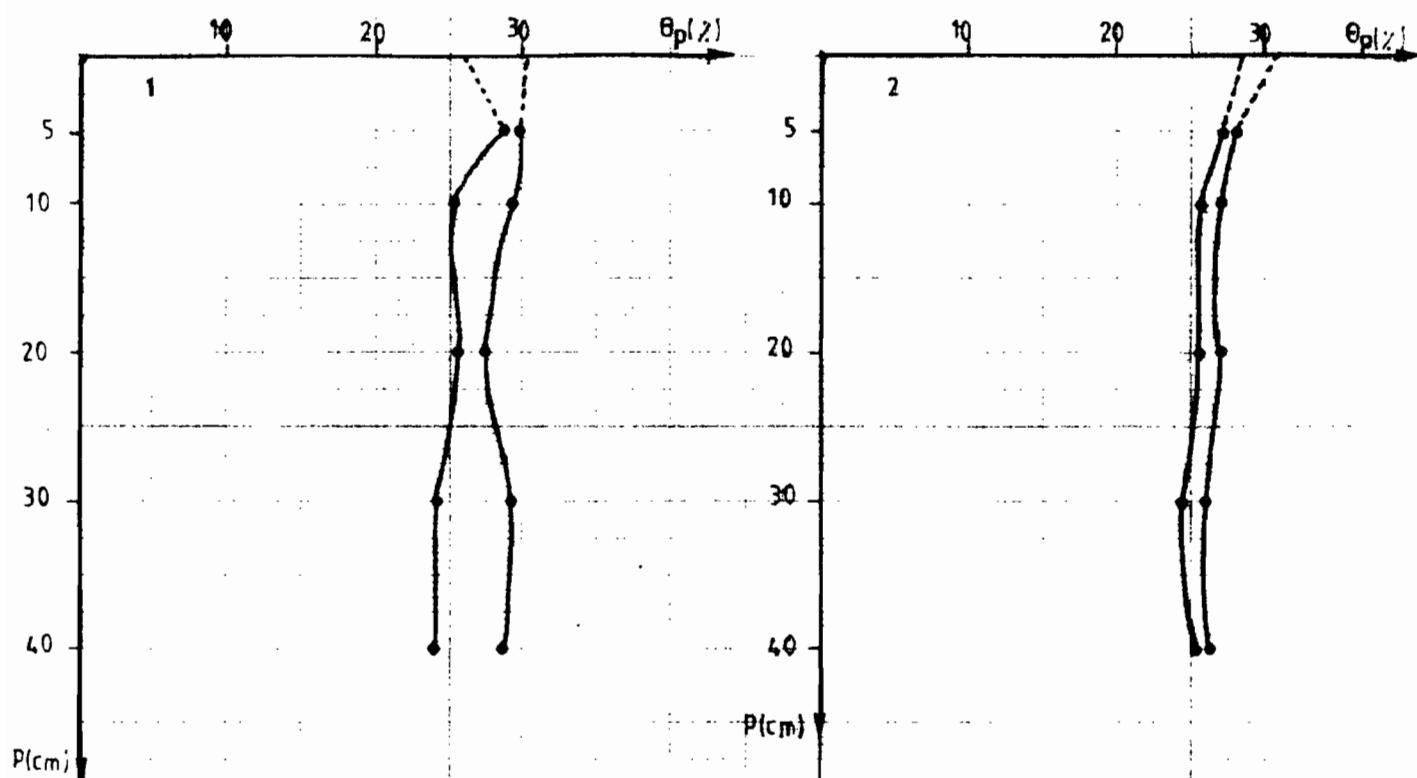
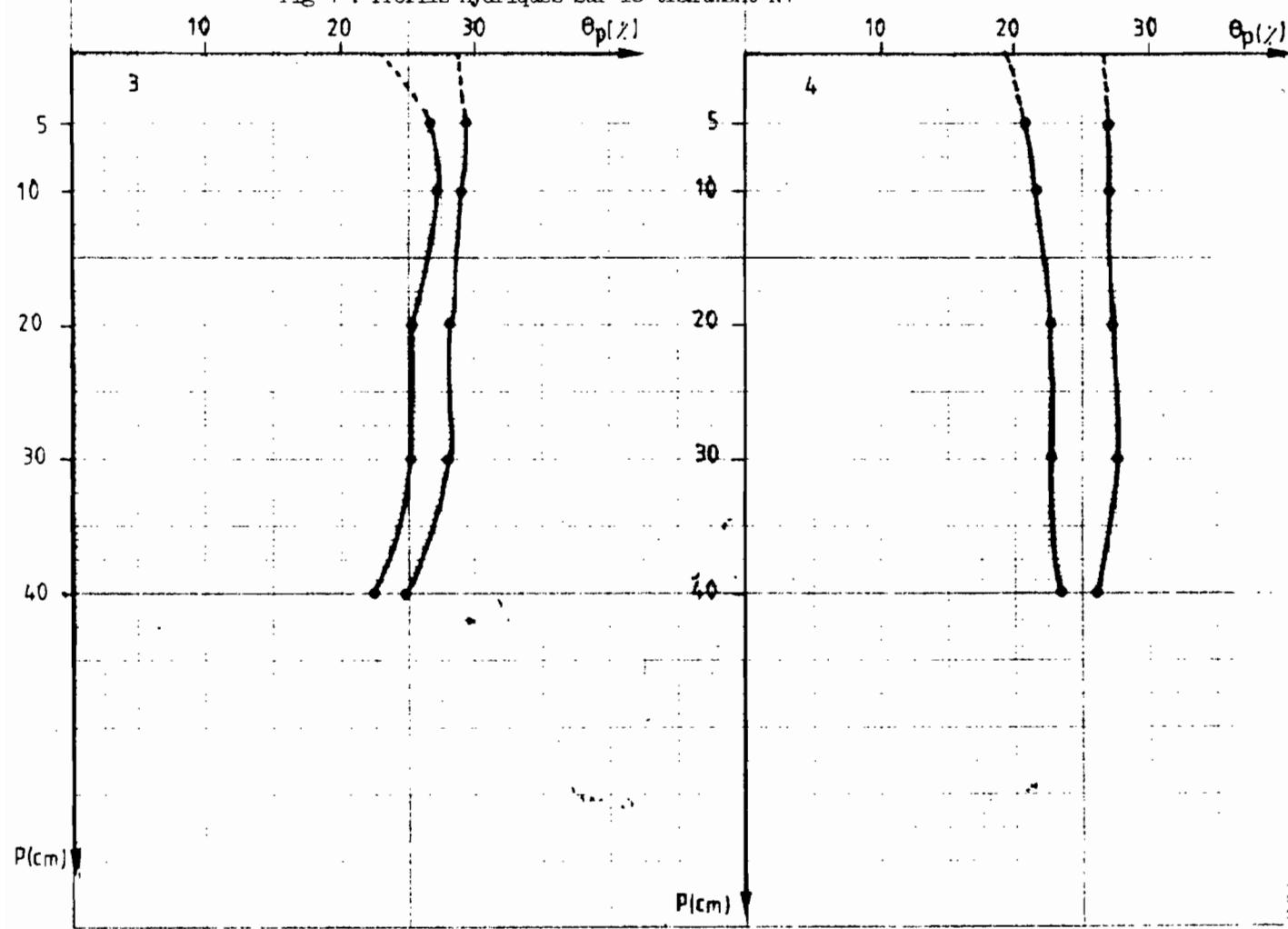


Fig 4 : Profils hydriques sur le traitement N°4



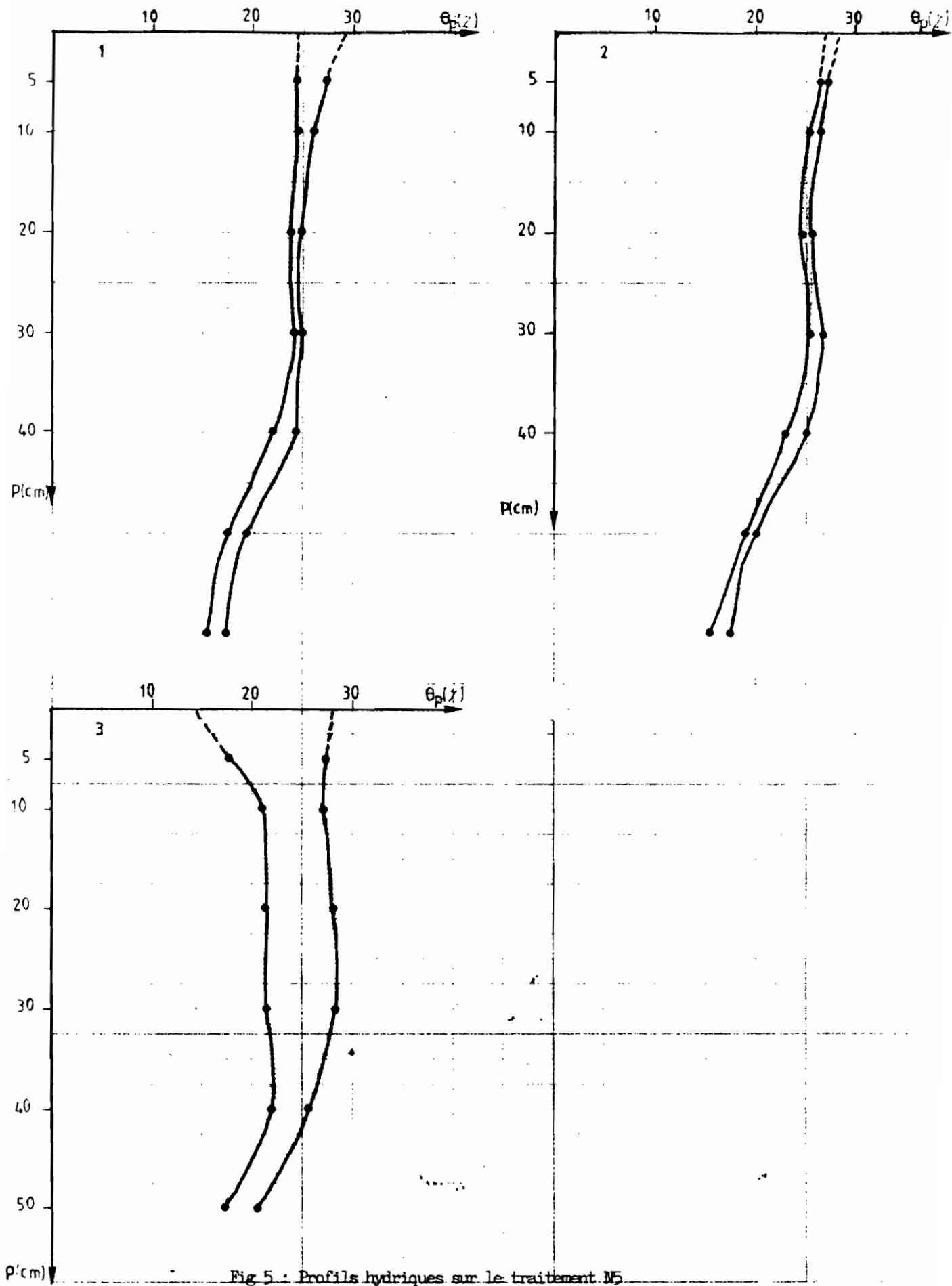


Fig 5 : Profils hydriques sur le traitement N5

Fig 6 : Profils hydriques sur le traitement N7 - 1

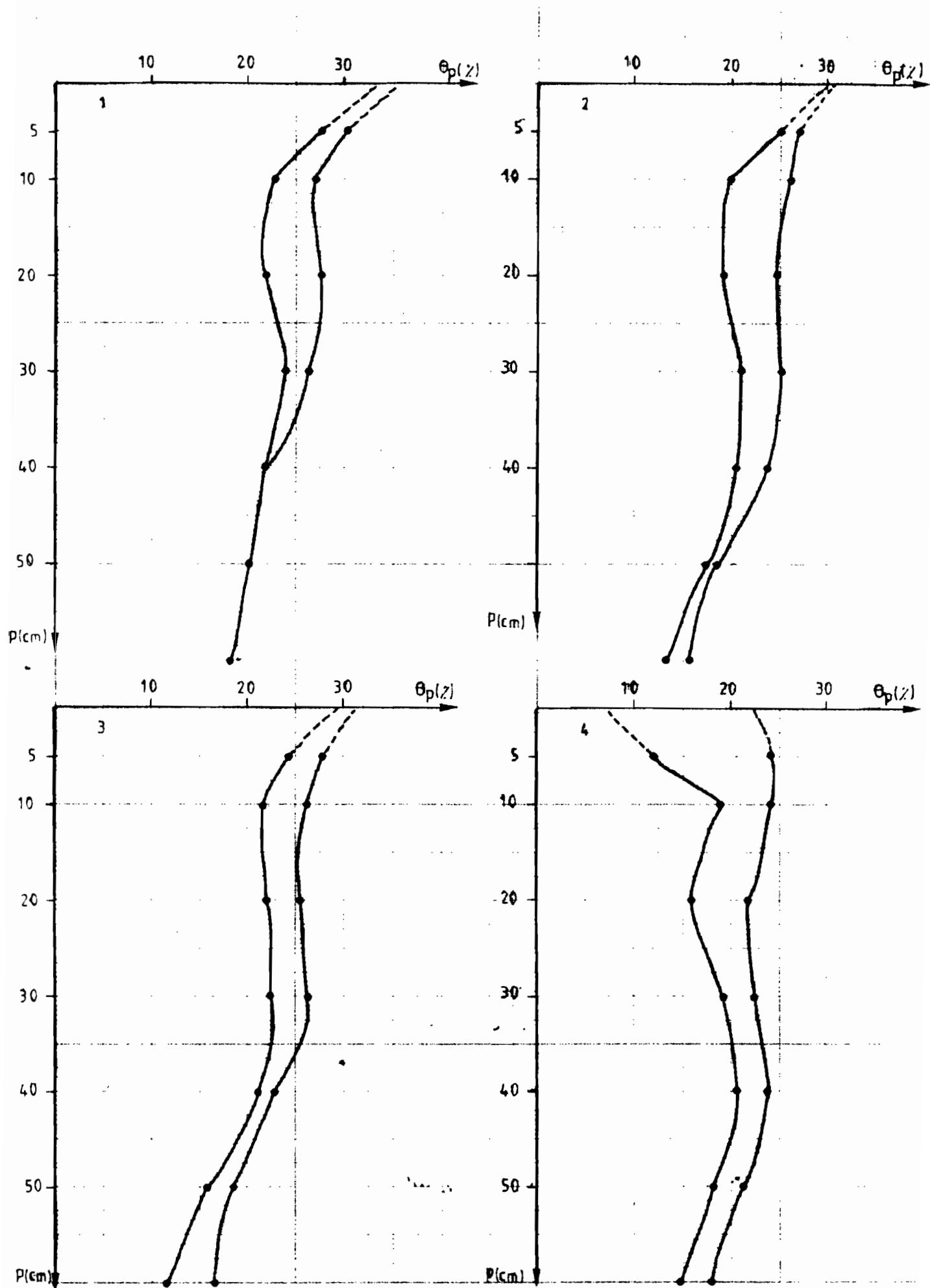
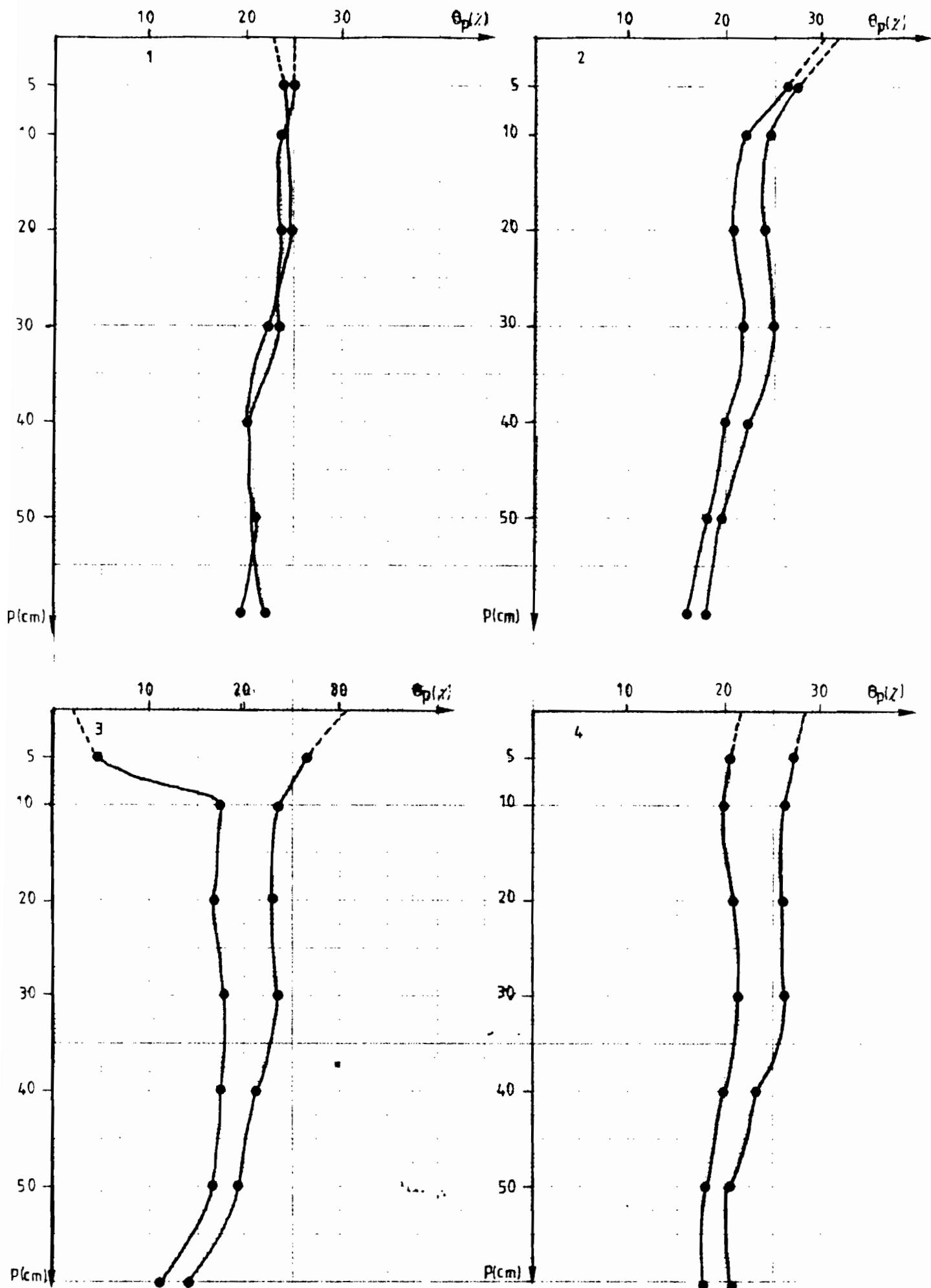


Fig 7 : Profils hydriques sur le traitement N8



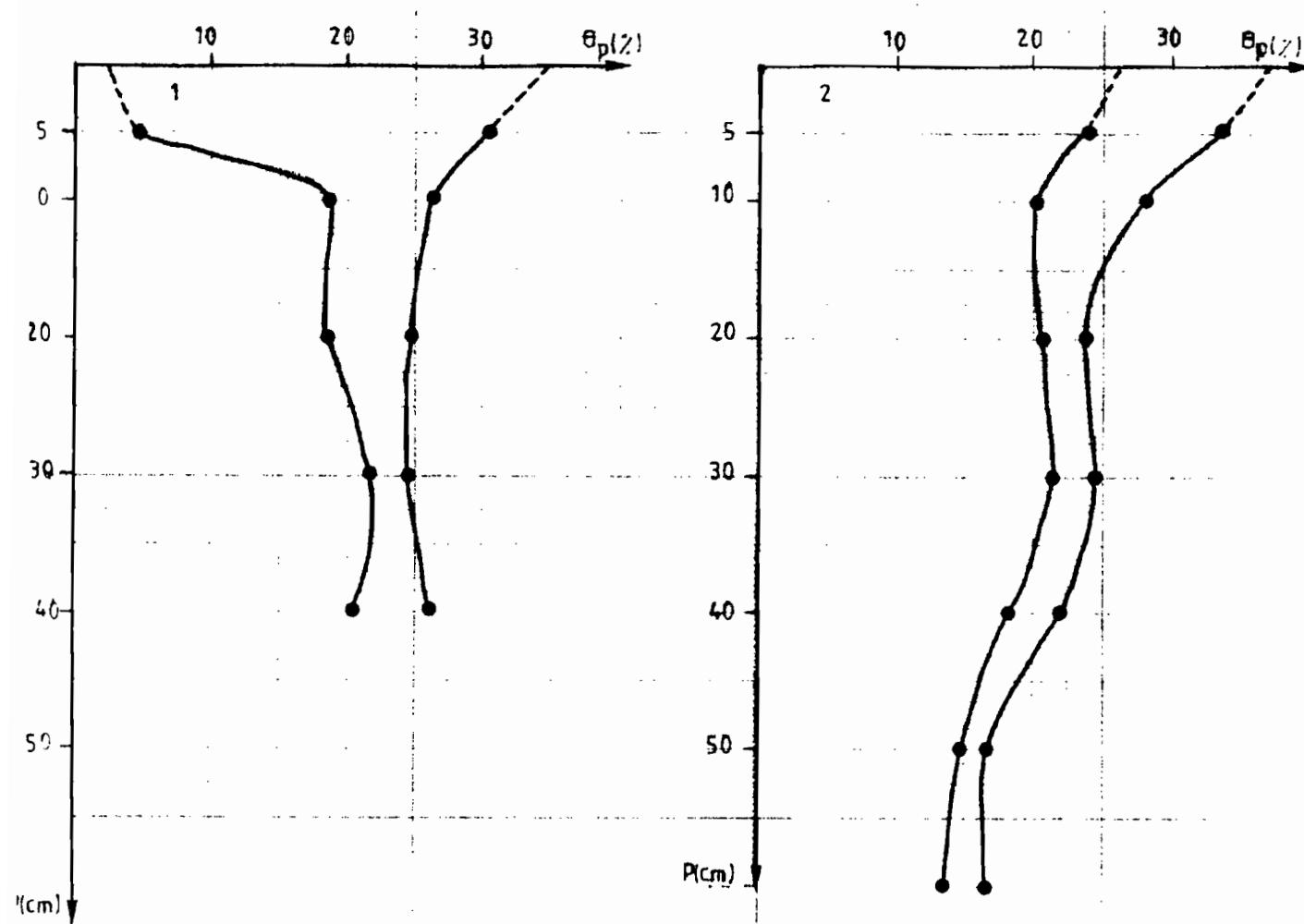
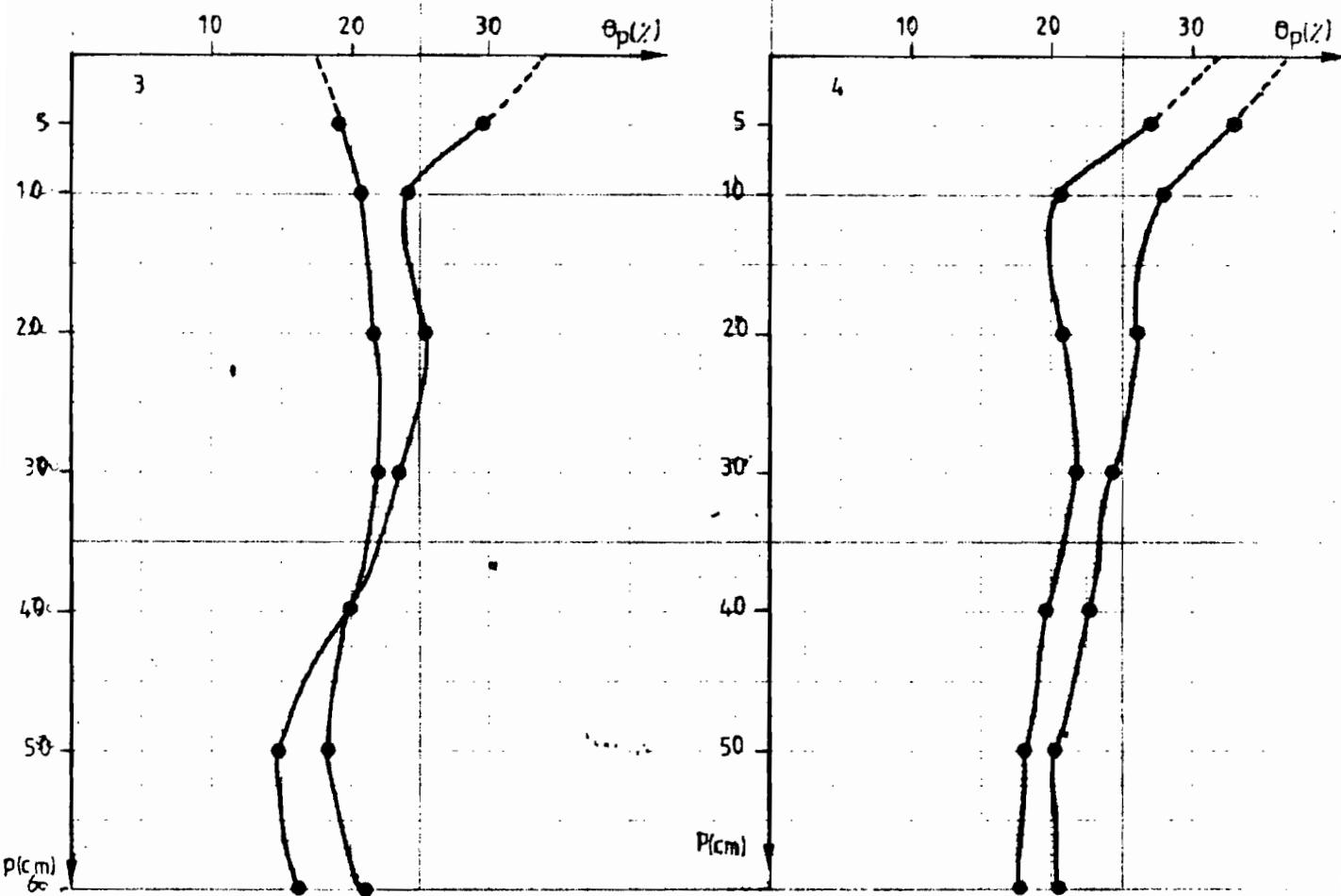


Fig 8 : Profils hydriques sur le traitement N2b



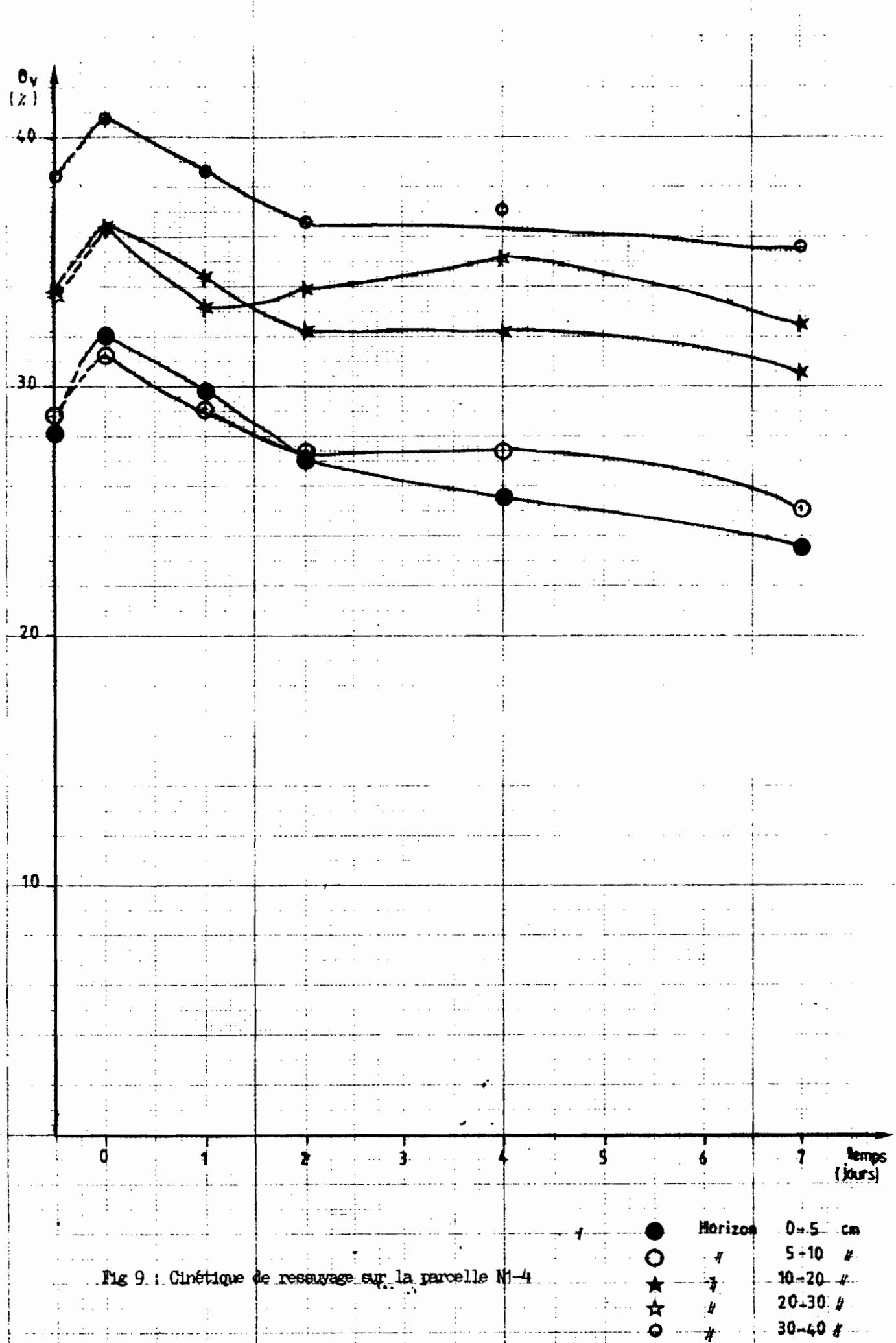


Fig 9 : Cinétique de ressauvage sur la parcelle M1-4

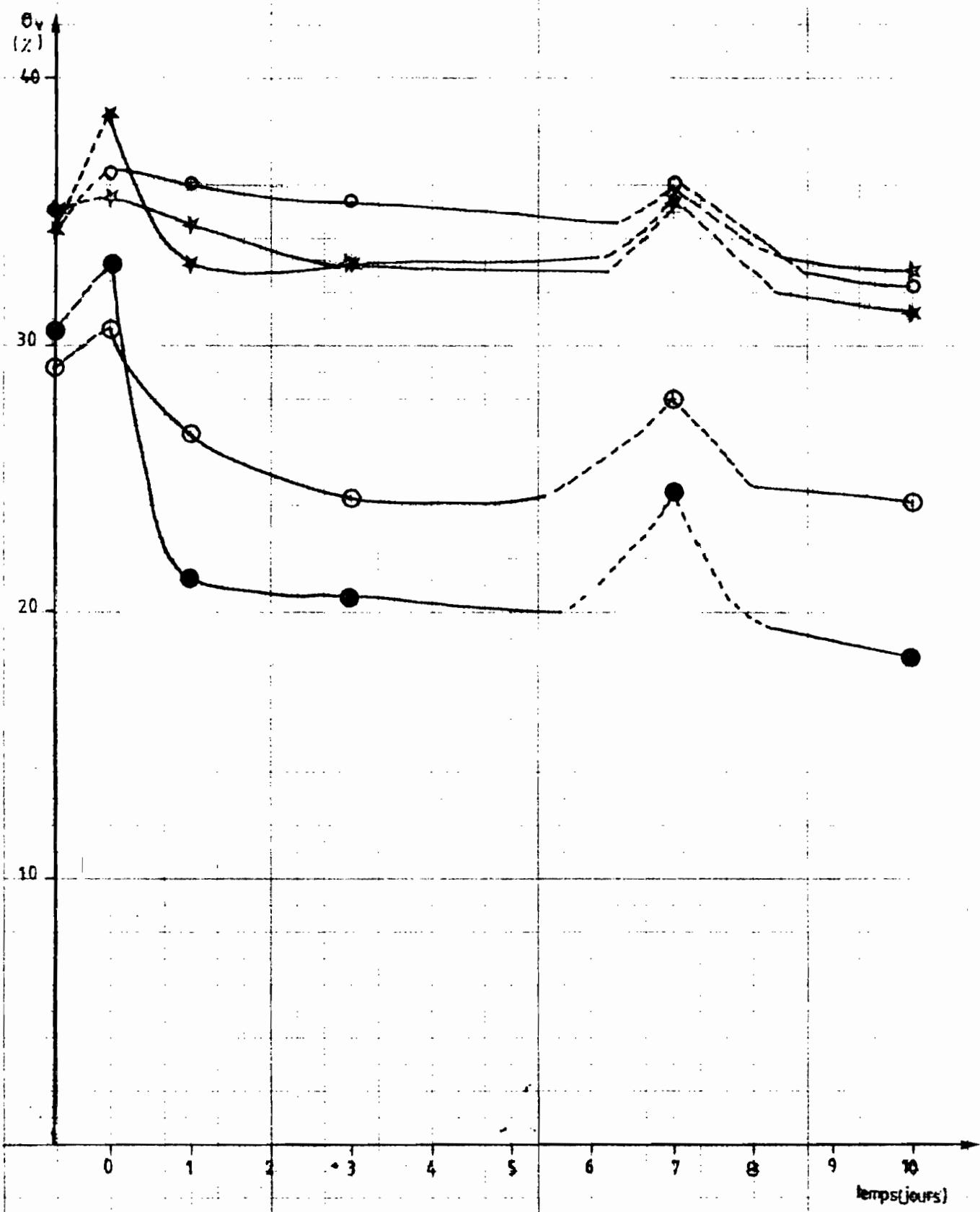


Fig 10 : Cinétique de ressuyage sur la parcelle N°2

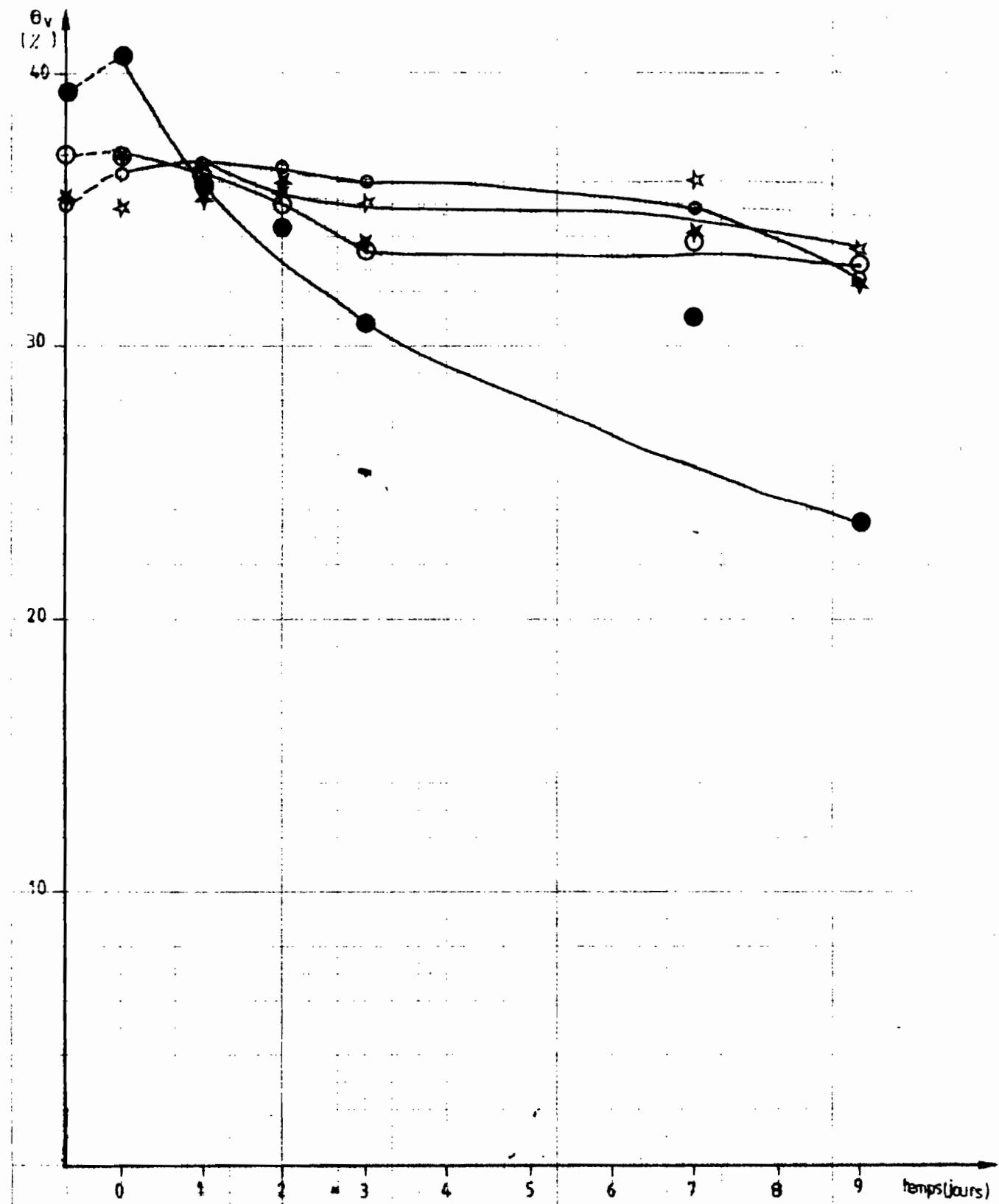


Fig 11 : Cinétique de dessuyage sur la parcelle N3-3

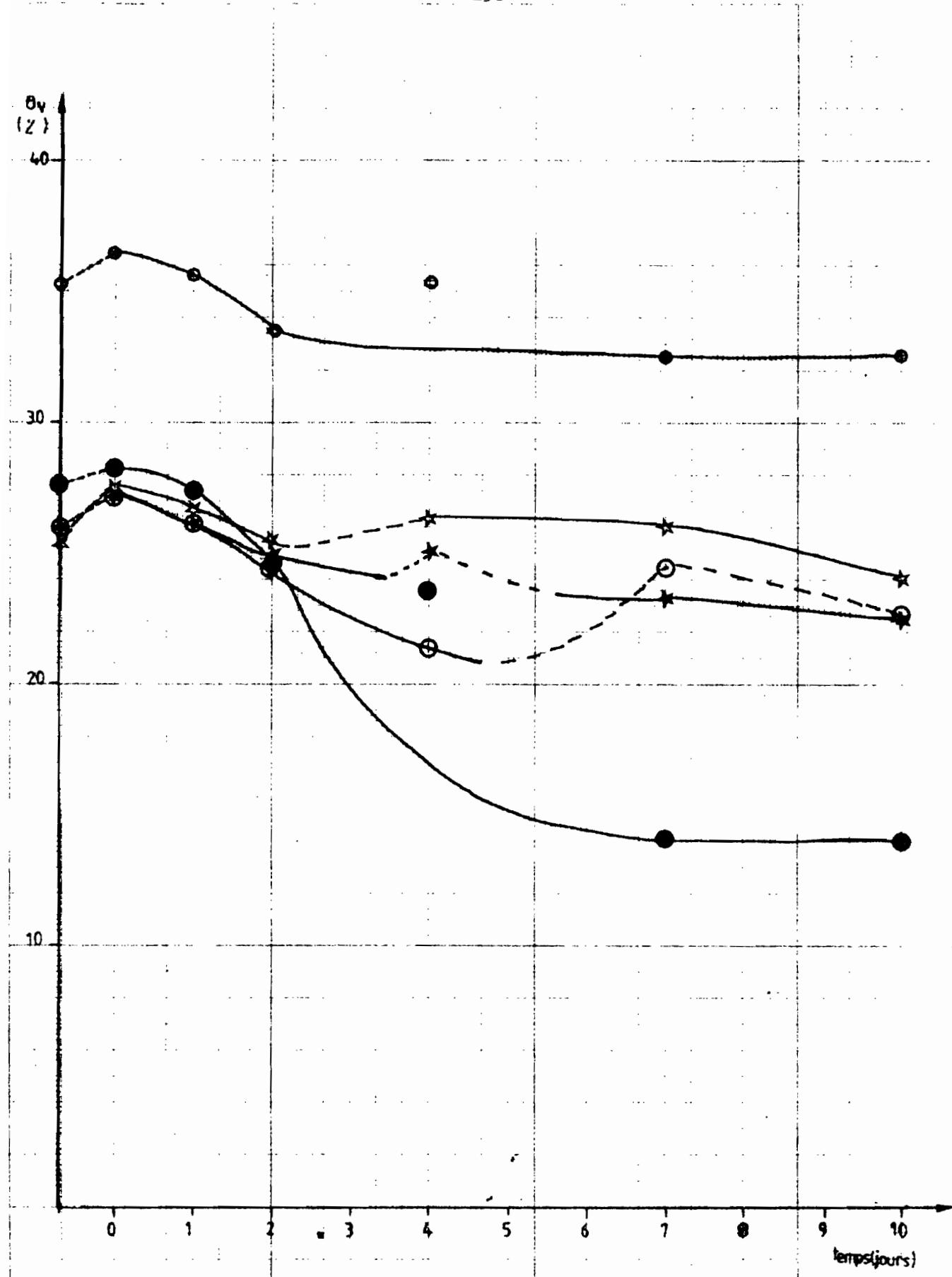


Fig 12 : Cinétique de dessèchement sur la parcelle N°2

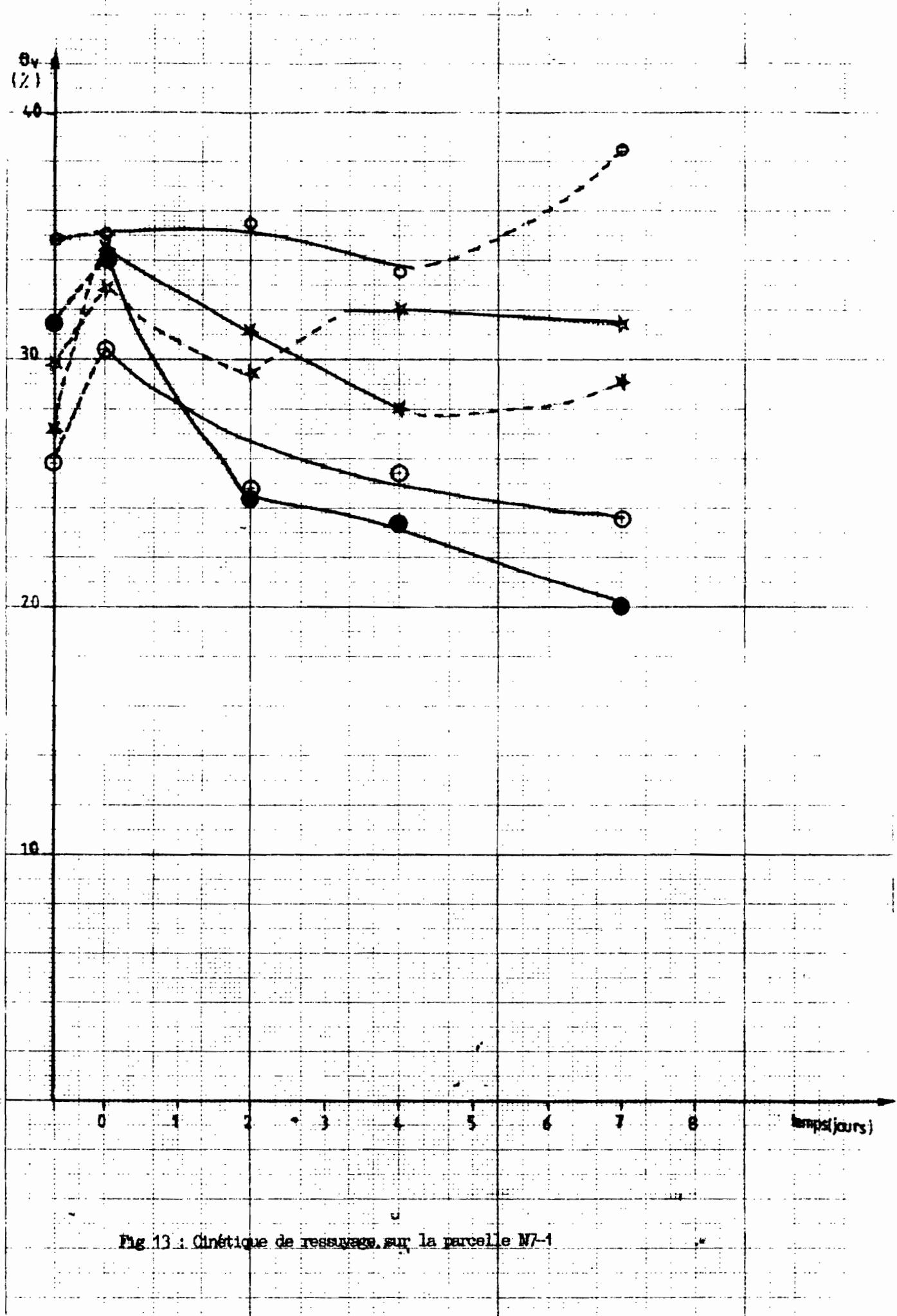


Fig. 13 : Cinétique de ressuyage sur la parcelle N7-1

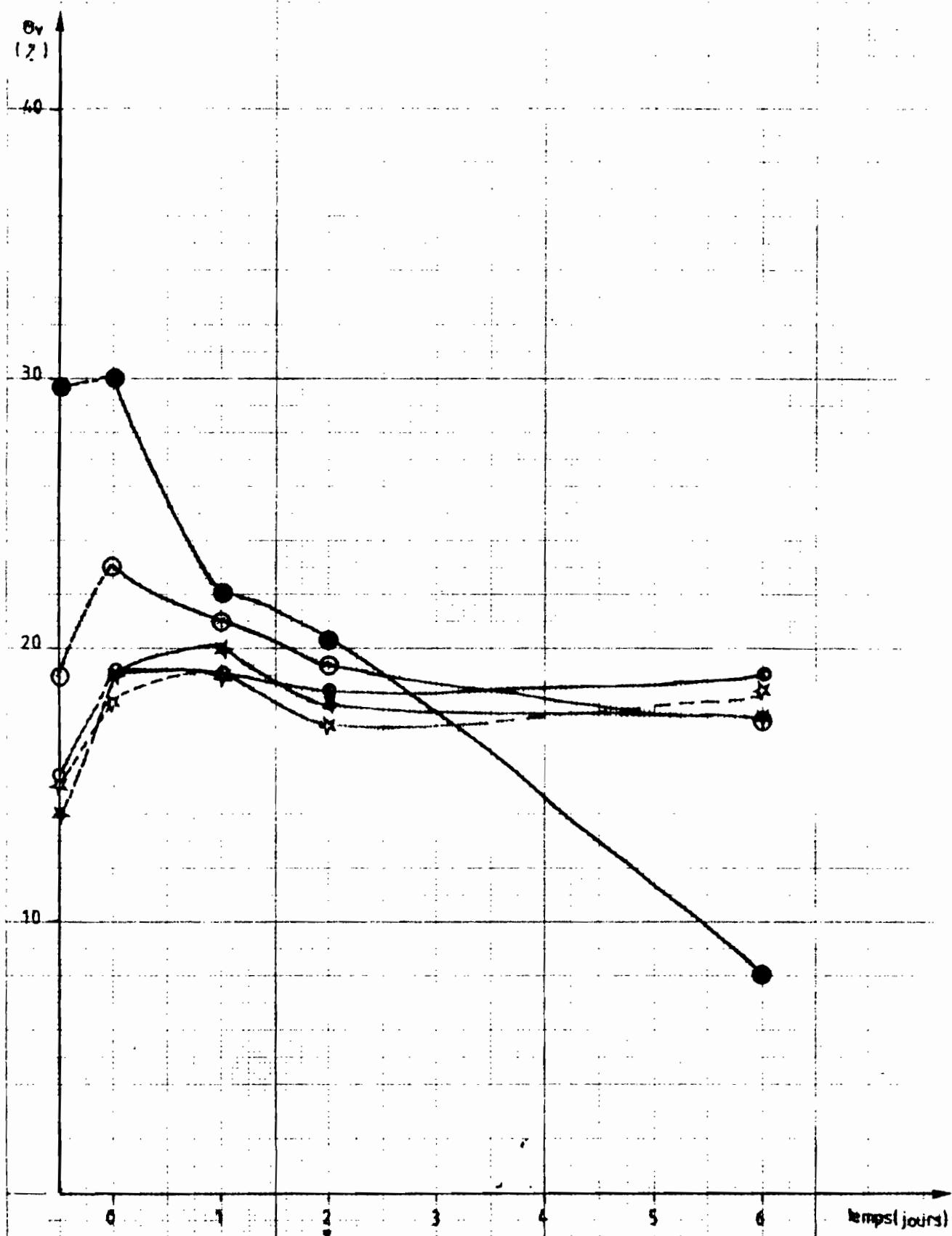


Fig 14 : Cinétique de ressuyage sur les sols de plateau (parcelle P2-1)

LISTE DES FIGURES : CHAPITRES I et II

Figure 1 : Situation géographique des trois terrains étudiés

2 : Comparaison de l'énergie cinétique des pluies naturelles et simulées

3 : Schéma de l'infiltromètre à aspersion

4 : Hydrogramme théorique de ruissellement

5 : Turbidigramme théorique

6 : Situation géographique des bassins du Mont-Lozère

7 : Recouvrement des bassins

8 : Les précipitations annuelles et moyennes mensuelles

9 : Emplacement des parcelles expérimentales

10 : Courbes I x D x F du Mont-Aigoual

11 : Cinétique rapide de l'eau

12 : Hydrogramme de ruissellement : parcelle PAVd3

13 : Hydrogramme de ruissellement : parcelle E4

14 : KR 60 = $f(FN, I)$

15 : FN = $f(I, Pi)$

16 = AFC : Répartition des variables sur le plan des axes 1 et 2

17 : AFC : variables et observations (axes 1 et 2)

18 : AFC : variables et observations (axes 1 et 3)

19 : Pi = $f(ta)$: pelouse aval

20 : Pi = $f(ta)$: pelouse amont

21 : Pi = $f(couvert végétal)$: pelouse amont

22 : $(B) = f(I)$

23 : Rx = $f(I)$

24 : $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$ (1° averse) }
 25 : $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$ (2° averse) } parcelles
 26 : $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$ (3° averse) } non labourées

27 : Evolution de l'infiltérabilité en fonction du temps

28 : FN = $f(I)$

29 : FN = $f(ta)$

30 : $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$: PAVn5

31 : $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$: Hn5

32 : $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$: En5

33 : $\Sigma E = f(\Sigma PU)$: parcelles non labourées

34 : $\Sigma E = f(\Sigma PU)$: parcelles labourées

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE III

- fig 1 : Situation du Lauragais par rapport aux régions agricoles de la Haute-Garonne
- fig 2 : Carte des sols - NARBONS
- fig 3 : Evolution du parcellaire dans le secteur de TARAVEL
- fig 4 : pluviosité annuelle
- fig 5 : pluviosité mensuelle
- fig 6 : probabilité du dépassement des précipitations mensuelles à Villefranche-de-Lauragais (période 50 ans : 1917 - 1956)
- fig 7 : hauteur des précipitations journalières à Villefranche-de-Lauragais : fréquence probable
- fig 8 : épisodes pluvieux à villefranche-de-Lauragais : probabilité de dépassement
- fig 9 : courbe intensité-durée à toulouse-Blagnac pour fréquence 1-5-10 ans
- fig 10 : emplacement des parcelles expérimentales
- fig 11 : profil hydrique : parcelle N4-2
- fig 12 et 13 : hyéogramme, hydrogramme et turbidigramme expérimentaux
- fig 14 : évolution de la hauteur de pluie d'imbibition en fonction du déficit de saturation de l'horizon de surface
- fig 15 : évolution de la hauteur de pluie d'imbibition en fonction du taux de mottes < 0,5 cm, du déficit de saturation du taux de résidus et de la pente
- fig 16 : évolution du coefficient de ruissellement KR40 en fonction du déficit de saturation et de la pente
- fig 17 : évolution de l'intensité d'infiltration minimale FN en fonction du taux de mottes < 0,5 cm, du déficit de saturation et de la pente
- fig 18 : évolution de la charge solide moyenne en fonction de la pente
- fig 19 : évolution du débit solide ER40 en fonction du taux de mottes > 8 cm, de la charge solide moyenne et du déficit de saturation
- fig 20 : évolution de Pi en fonction du temps de ressuyage ta
- fig 21 : évolution de Pi en fonction de la densité apparente de l'horizon 0-10 cm
- fig 22 : évolution de la pente de la fonction $\Sigma Lr = f(\Sigma PU)$ en fonction du taux de mottes < 0,5 cm

- fig 23 : évolution de la pente de la fonction $\zeta Lr = f(\zeta PU)$ en fonction de la densité apparente de l'horizon de surface
- fig 24 : évolution de la pente de la fonction $\zeta Lr = f(\zeta PU)$ en fonction de l'indice de rugosité
- fig 25 : influence de la pente sur la susceptibilité au ruissellement des différents traitements
- fig 26 : étude générale d'une courbe de compactage complète
- fig 27 : influence de la texture sur la compacité
- fig 28 : évolution de FN en fonction du taux de mottes < 0,5 cm
- fig 29 : - - - - de la densité apparente
- fig 30 : - - - - de l'indice de rugosité
- fig 31 : - - - - du déficit de saturation
- fig 32 : évolution de la hauteur de pluie d'imbibition en fonction de l'intensité de la pluie
- fig 33 : influence du déficit de saturation sur la hauteur de pluie d'imbibition
- fig 34 : influence de l'intensité de la pluie sur Rx
- fig 35 : comparaison de la susceptibilité au ruissellement de sols à pente de 15 % et de sols à pente de 2 %
- fig 36 : influence de l'intensité de la pluie sur l'intensité d'infiltration en régime permanent
- fig 37 : effet de l'intensité de la pluie sur l'infiltration
- fig 38 : décomposition de l'érosion hydrique selon le modèle de NEYER et WISCHMEIER
- fig 39 : évolution de la turbidité en fonction du déficit de saturation
- fig 40 : évolution de la turbidité en fonction du taux de mottes < 0,5 cm
- fig 41 : effet de la pente sur le débit solide
- fig 42 : influence du déficit de saturation sur le débit solide
- fig 43 : évolution du débit solide en fonction de l'intensité de la pluie
- fig 44 : évolution du débit solide en fonction de la susceptibilité du sol au ruissellement

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE IV

- fig 1 : Evolution de Π_i en fonction de Δ_i
- fig 2 : évolution de Π_i en fonction de l'indice de rugosité
- fig 3 : évolution des lames ruisselées cumulées en fonction de la pluie cumulée sur les trois types de sols
- fig 4 : influence du protocole sur FN
- fig 5 : évolution de FN en fonction de l'intensité de la pluie
- fig 6 : évolution de FN en fonction de Δ_i
- fig 7 : diagramme de Hjulström
- fig 8 : évolution de la charge solide moyenne en fonction de Δ_i
- fig 9 : évolution du débit solide en fonction de Δ_i .