

Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion
en nappe de divers types texturaux de sols cultivés
ou non cultivés du territoire français.
Expérimentation au champ sous pluies simulées.

F. LELONG (1)
E. ROOSE (2)
R. DARTHOUT (3)
D. TREVISAN (4)

Avec la collaboration de
D. BOUDJEMLINE (5)
S. BOUREGHDA (6)
M.A. RAHELIARISOA (7)

RESUME

L'étude des phénomènes de ruissellement et de transports solides a été menée par méthode expérimentale au champ pour différents types de sols français à texture contrastée. Elle a fait l'objet de quatre thèses successives (TREVISAN 1986, RAHELIARISOA 1986, BOUDJEMLINE 1987, BOUREGDHA 1988), réalisées en collaboration entre l'université d'Orléans, le centre INRA d'Orléans, l'ORSTOM, le CEMAGREF et diverses Chambres d'Agriculture. Leur objectif commun était de préciser la capacité d'infiltration et la stabilité des agrégats, selon les caractéristiques physiques des sols, leur état de surface (présence et nature de la végétation, rugosité de la surface, pierrosité, existence d'une croûte de battance...), les conditions initiales d'humidité et leur situation au cours du cycle cultural.

La méthode employée consiste à provoquer du ruissellement sur des parcelles de sol de 1 m² par aspersion, à l'aide d'un simulateur de pluie de type ORSTOM (ASSELIN et VALENTIN, 1978). Les mesures de l'intensité du ruissellement et des transports solides ainsi provoqués, correspondent à différentes intensités d'averses, comprises entre 30 et 100 mm h⁻¹. Les sols étudiés sont les suivants :

- sols bruns ocreux gravelo-sableux humifères, sur arènes granitiques, sous différents couverts de végétation (Mont Lozère) ;
- sols sableux ou limono-sableux sur alluvions du Val de Loire (près d'Orléans) ;
- sols limoneux sur argiles à silex du Maine et du Faux Perche (Bassin de Paris) ;
- sols argilo-limoneux sur molasse calcaire du Lauragais (près de Toulouse).

Dans chaque site, le plan expérimental prévoit des répétitions pour tester la variabilité intra-site et étudier l'influence des facteurs de variabilité suivants: nature du couvert végétal, pierrosité, rugosité du sol, pente...

Les résultats les plus significatifs concernent :

- 1) les valeurs de l'infiltrabilité minimum obtenues après un certain temps d'averse quand le plateau de ruissellement maximum est atteint ;

(1) Centre des Sciences de la Terre, URA CNRS 157, Université de Bourgogne, 6 Bd Gabriel, 21000 DIJON.

(2) ORSTOM, Réseau Erosion, BP 5045, 34032 Montpellier

(3) INRA, SESCPF, Ardon, 45160 Olivet.

(4) INRA, GIS Alpes du Nord, 75 avenue de Corzent, BP11F 74203 Thonon les bains.

(5) Université de Constantine.

(6) Université d'Annaba.

(7) Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Madagascar.

2) les valeurs moyennes des concentrations de matières solides (en g.l⁻¹) dans les eaux ruisselées ;

3) les flux de transports solides (en g. m⁻²h⁻¹) exportés des parcelles expérimentales pour une averse donnée.

Il apparaît une très grande variabilité des valeurs caractéristiques obtenues sur chaque site, tant pour l'infiltrabilité minimale (entre 0 et 100 mm.h⁻¹) que pour l'intensité des transports solides (turbidité variant de 0 à 12 g.l⁻¹). Il existe par ailleurs un important recouvrement des comportements hydrodynamiques et mécaniques des sols testés, pourtant très contrastés texturalement. Les principaux facteurs contrôlant la variabilité intra-site changent d'un site à l'autre : dans les sols de milieux naturels de Lozère, c'est le degré de protection par le couvert végétal (ou par une litière) ; dans les sols cultivés du Val de Loire, c'est la situation du sol au cours du cycle cultural (infiltrabilité décroissant de 20 - 40 mm.h⁻¹ dans un sol fraîchement cultivé à 5 - 10 mm.h⁻¹ après la récolte) ; dans les sols cultivés limoneux, c'est la rugosité du sol et la teneur initiale en eau ; dans les sols argileux cultivés du Lauragais, l'intensité du ruissellement dépend surtout du mode de travail du sol (taille des mottes, degré de tassement) et celle des transports solides de la pente. En définitive les comportements hydrodynamiques et mécaniques des sols testés dépendent essentiellement de leur état de surface.

Mots-clés : simulation de pluie - érosion en nappe - ruissellement - dégradation structurale - croûte de battance.

OVERLAND FLOW AND SHEET EROSION SUSCEPTIBILITY OF TEXTURE
CONTRASTED EITHER TILLED OR UNTILLED SOILS OF FRANCE.
FIELD EXPERIMENTS UNDER SIMULATED RAINFALLS.

Processes of overland flow and related solid transport were experimented in field for several texture-contrasted soil types (TREVISAN, 1986 ; RAHELIARISOA, 1986 ; BOUDJEMLINE, 1987 ; BOUREGHDA, 1988). The goal was to determine the hydraulic conductivity and the aggregate stability of the soils in relation to their physical characteristics and particularly to the surface ones (vegetation cover, surface roughness, clod size, sealing crust...).

Overland flow was generated by a rainfall simulator (ASSELIN and VALENTIN, 1978), sprinkling soil plots of 1 m². With this field device, variations of water and solid discharge corresponding to different rainfall intensities were measured, for the following soil types :

- humic ochrous brown coarse textured soils, lying on granitic arena of Mont-Lozère (Cevennes mountains) ;*
- sandy and silt sandy soils lying on alluvium deposits of the river Loire near Orléans ;*
- silty soils upon silex clays and cretaceous chalk of Maine and Faux-Perche districts (Paris basin) ;*
- silt clayey soils of Lauragais, lying on Cenozoïc calcareous sandstones and marls (near Toulouse).*

In each site the variability of the measured discharges was interpreted according to the soil surface characteristics (clod size, apparent density, initial soil moisture).

Main results concern the range of values for minimal infiltrability after soil saturation, for discharge of exported solids and for mean solid concentrations C (g.l⁻¹) in runoff water, as a function of the soil surface characteristics. For each textural soil type, experiments exhibit a very large variability of the runoff and erosion values and a large overlapping of these values from one site and from one soil type to another.

The principal parameters which govern the intra-site variability are different according to the site : in the Mont-Lozère site it is the rate of vegetation cover and / or of humic materials in the top soil horizon ; in the tilled soils of Val de Loire, it is the intensity of the top soil compaction and of the aggregate breakdown during the tillage cycling ; in the silty soils of the Paris basin, they are the roughness of the soil surface, the initial soil moisture and the occurrence of crop residues. In the silt clayey soils of Lauragais, the runoff intensity depends mainly on the clod size and on the seed bed depth, related to the tillage practices, and the sheet erosion intensity depends mainly on the soil slope. Briefly, the hydrodynamical and mechanical behaviour of the tested soils results principally from the soil surface and top horizon characteristics, in relation to the vegetation cover and the tillage practices.

Keywords : rainfall simulation - sheet erosion - overland flow - structural degradation soil surface crusting.

INTRODUCTION

Souvent très spectaculaires, voire catastrophiques et toujours très dommageables pour les potentialités agricoles dans les pays chauds exposés à des conditions climatiques agressives (HEUSCH, 1970 ; HUDSON, 1973 ; ROOSE, 1973), les phénomènes de ruissellement et d'érosion hydrique du sol sont beaucoup plus discrets dans les pays tempérés où l'agressivité climatique est moindre (PIHAN, 1978) et où la protection du sol par la végétation est souvent meilleure.

Néanmoins leurs effets cumulatifs ne sont pas négligeables et ils se manifestent par des nuisances variées (GRIL et LEYNAUD, 1986 ; AUZET, 1987) :

- pertes et transferts latéraux de terre (colluvionnement) à l'amont sur les interfluves et sur les versants entraînant l'appauvrissement du patrimoine et des dégâts aux cultures ;

- crues et inondations à l'aval, provoquant de nombreux dommages aux voiries et agglomérations, dégradations du réseau hydrographique ;

- creusement de ravines et de rigoles entre l'amont et l'aval, qui se propagent par érosion régressive vers l'amont, même si elles sont souvent masquées par les travaux agricoles (SAVAT et DE PLOEY, 1982 ; GOVERS, 1987) ;

- pollution physico-chimique (matières en suspension, phosphates, pesticides...) des eaux de surface et même des eaux souterraines en régions de karst.

Plus insidieusement, le ruissellement diffus et l'érosion en nappe sont liés à des modifications de l'état structural de la pellicule superficielle du sol, -désagrégation, érosion sélective, formation de croûte de battance (ROOSE, 1980 ; BOIFFIN, 1984)-, qui perturbent les échanges d'eau et de gaz entre l'atmosphère et le sol et peuvent entraîner des baisses de production agricole (COULON, 1985).

Une série d'expérimentation au champ a été menée par les auteurs de 1983 à 1987 grâce à une coopération entre l'Université d'Orléans, l'INRA, l'ORSTOM, le CEMAGREF, l'ITCF et les chambres d'agriculture du Loiret et de Haute Garonne afin de mieux comprendre le rôle respectif des agents (agressivité climatique, énergie de la lame ruisselante) et des facteurs interactifs (nature et propriétés du sol, couverture végétale) sur les phénomènes de *ruissellement diffus et d'érosion en nappe*

(phénomènes amont). Les expérimentations consistent à mesurer sur des parcelles de sol standards de 1 m² les volumes d'eau ruisselée et de terres érodées sous l'influence d'averses générées par un simulateur de pluies ; elles ont été réalisées sur cinq sites du territoire français, caractérisés par des sols de texture et de roche mère contrastées. Sur chaque site, l'expérimentation comportait la comparaison de divers types de couvert végétal ou de pratiques agricoles pour tester la variabilité "intra-site" des réponses hydrodynamiques et mécaniques du sol, en fonction de l'utilisation de celui-ci.

I - METHODES

Outre la caractérisation par les méthodes pédologiques classiques de la nature des sols étudiés, la démarche a comporté :

- la mesure de l'intensité du ruissellement et des transports solides provoqués par des épisodes d'averses successifs à intensité contrôlée ;
- la mesure *in situ* de paramètres descriptifs des propriétés physiques du sol, avant, pendant et après les averses simulées : densité apparente obtenue par méthode gravitaire ou à l'aide d'une sonde gammamétrique, profils hydriques établis par mesures neutroniques, rugosité de la surface du sol déterminée avec un aspérimètre à aiguilles (RAHELIARISOA, 1986), taux et nature du couvert végétal, granulométrie des mottes et des agrégats, pierrosité...

Les averses artificielles ont été mises en oeuvre à l'aide d'un dispositif d'aspersion, appelé minisimulateur de pluies, réalisé selon le modèle conçu par ASSELINE et VALENTIN (1978) et représenté sur la figure 1. Cet infiltromètre à aspersion permet de simuler des pluies d'intensité contrôlables sur une placette de mesure délimitée par un cadre métallique de 1 m² et munie à l'aval d'une gouttière collectant les eaux de ruissellement et leur charge solide. D'après les travaux de VALENTIN (1981), les énergies cinétiques des pluies simulées d'intensité allant de 30 à 130 mm. h⁻¹, pour ce type d'asperseur, sont du même ordre de grandeur (15 à 30 J. mm⁻¹. m⁻²) que celles des pluies naturelles (VIANI, 1986). Pour supprimer l'influence du vent provoquant des variations d'intensité des pluies simulées, les expériences ont dû souvent être menées à l'abri d'une toile de parachute posée sur le bâti du simulateur et fiché au sol autour de la placette (surface protégée = 6 m²).

II - TERRAIN ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

1. Les sites et les "états de surface" du sol

Les six sites étudiés, localisés sur la figure 2, se distinguent fortement par la texture des sols : texture grossière (sablo-graveleuse) en Lozère, texture sableuse dans le Loiret, texture limoneuse dans la Sarthe, l'Eure et Loire et dans la Marne, texture fine (argilo-limoneuse) dans la Haute Garonne.

Pour chaque site, les mesures de ruissellement et de transports solides ont été réalisées en parallèle sur plusieurs séries de parcelles, les unes semblables (même végétation, ou même "état de surface" du sol), pour tester l'homogénéité des réponses, les autres contrastées (végétation ou traitement différent) pour comparer le comportement de mêmes sols présentant des "états de surface" distincts.

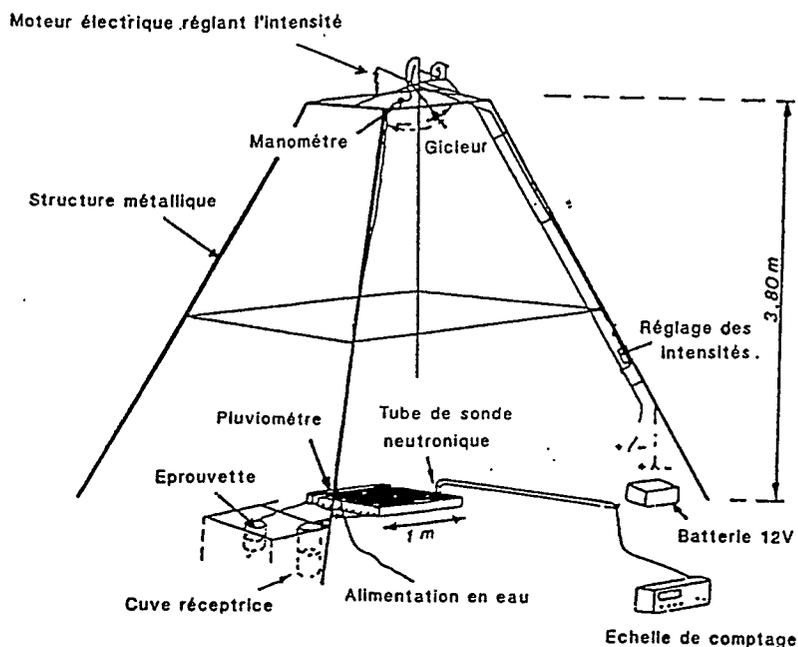


Figure 1 : Vue du dispositif d'aspersion.
The rainfall simulation device.

Par "état de surface", on désigne ici l'ensemble des caractéristiques de la surface du sol et de la végétation qu'il porte, celles aussi qui sont liées au travail du sol (taille des mottes et des agrégats, rugosité, pellicule de battance) ainsi que les propriétés mécaniques et hydriques de l'horizon superficiel (densité apparente, porosité, perméabilité...) qui en résultent.

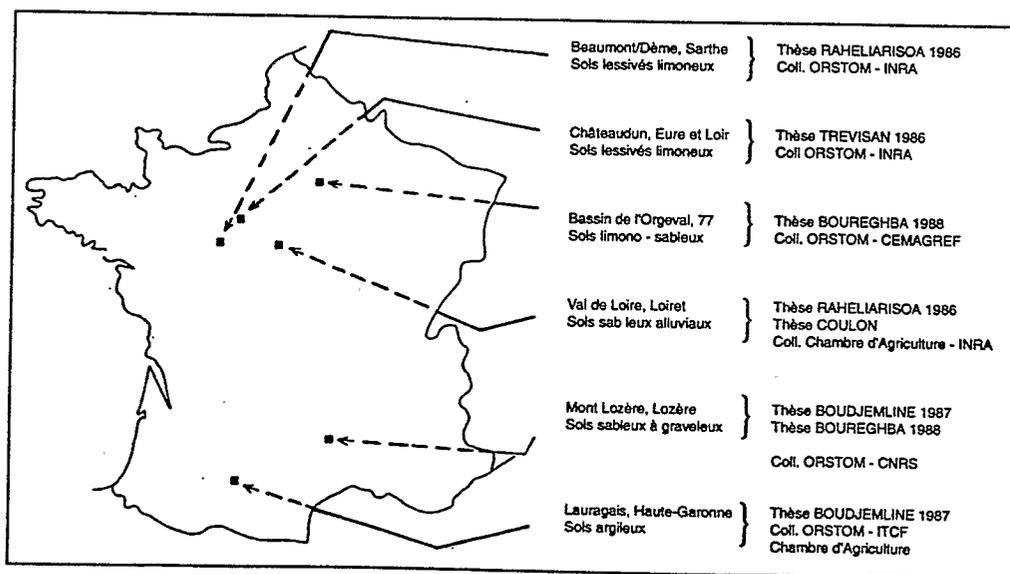


Figure 2 : Localisation géographique des sites étudiés, références et collaborations.
Location of the study sites.

2. Les plans d'expérience et les protocoles expérimentaux

Les plans d'expérience (nombre d'états de surface testés et nombre de répétitions par état de surface) ainsi que les protocoles expérimentaux d'aspersion n'ont malheureusement pas pu être standardisés par suite de la spécificité des objectifs poursuivis sur chaque site.

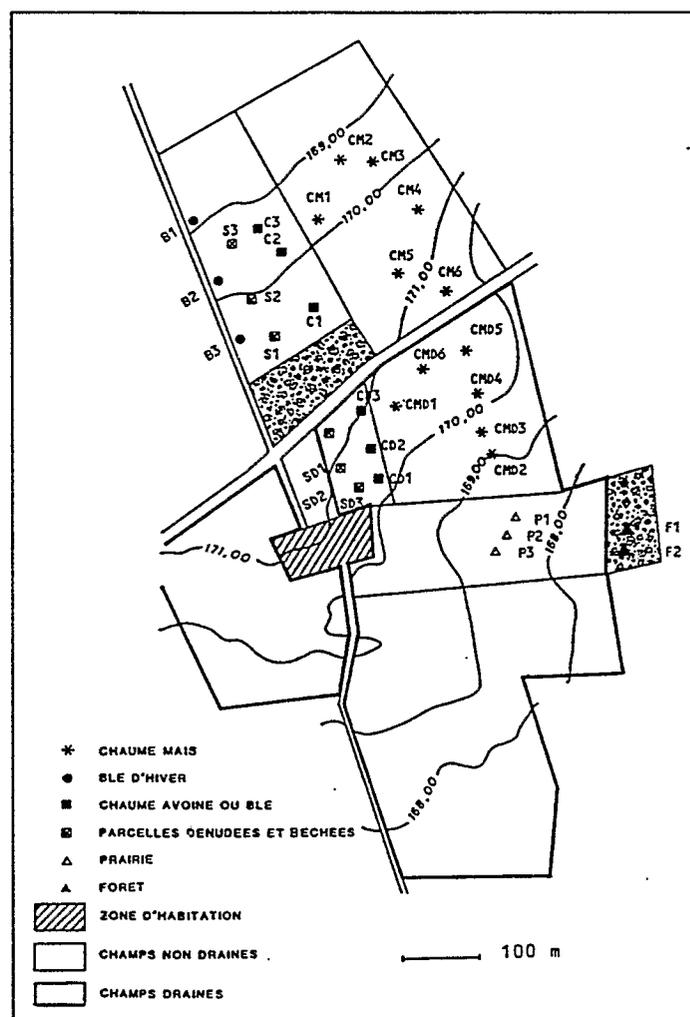


Figure 3 : Plan d'expérience des essais d'aspersion sur le site du Faux-Perche, au lieu dit "La Salmondière" (d'après TRÉVISAN, 1986).

Location of the sprinkling plots in the experiment site of La Salmondière, Faux Perche (TREVISAN, 1986).

En Lozère il s'agissait de comprendre la genèse du ruissellement et la part de celui-ci dans les crues cévenoles (collaboration avec C. COSANDEY, CNRS). Sur les sites de sols limoneux du Bassin Parisien, on cherchait à prévenir les risques de pertes de terre liés à l'utilisation agricole intensive de ces sols (collaboration avec M. GRIL,

CEMAGREF et avec l'ITCF) ou à optimiser la levée des lits de semence. Sur les sites des sols sableux du Val de Loire, on voulait tenter d'expliquer l'existence de chutes de fertilité constatées en zones à cultures légumières intensives et imputables à la dégradation de certaines propriétés de ces sols légers (collaboration avec M. DE SOUMAGNAT, Chambre d'Agriculture du Loiret). Sur le site des sols argilo-limoneux du Lauragais, on cherchait à définir le mode de préparation des lits de semence résistant le mieux au ruissellement et à l'érosion (collaboration ITCF et Chambre d'Agriculture de la Haute Garonne).

Dans ces contextes très différents de sols "naturels" ou cultivés, les descripteurs du type d'occupation du sol ou d'état de surface du sol variaient nécessairement d'un site à l'autre, de même que les protocoles expérimentaux d'aspersion (intensité, durée et nombre d'averses successives) et les plans d'expérience. La figure 3 donne à titre d'exemple le plan d'expérience utilisé au lieu-dit la Salmondière dans le Faux Perche sur sol limoneux (TREVISAN, 1986).

3. Les descripteurs "d'état de surface"

Les caractéristiques pédologiques, les modes d'occupation ou d'utilisation du sol ainsi que les descripteurs de l'état de surface du sol doivent donc être analysés séparément site par site.

3.1 Sur le site du Mont-Lozère (TRÉVISAN, 1982 ; BOUDJEMLINE, 1987 ; DUPRAZ, 1984 ; DURAND, 1989), à substrat granitique, portant des sols généralement peu épais (rankers à sols bruns ocreux acides humifères) très désaturés, à texture gravelo-sableuse (cf. tableau I) et à forte pierrosité, trois modes d'occupation du sol ont été étudiés :

- sols couverts d'une strate végétale herbacée (*Nardus stricta* dominant) partiellement envahie par des genêts et plus ou moins dégradée par le pâturage extensif et par le feu (destruction périodique des genêts);

- sols couverts d'un humus forestier de même type pédologique que les précédents, mais sous couvert de hêtres (*Fagus sylvatica*) ou d'épicéas (*Picea excelsa*);

- surface de sols dénudés, travaillés à la bêche.

Les descripteurs de ces états de surface étaient la nature et le degré de recouvrement de la végétation (ou de la litière forestière), la pierrosité, la rugosité de surface et la pente du sol souvent marquée (5 à 34%) en ce site de montagne. S'agissant de sols très filtrants, on a dû utiliser des intensités de pluies très fortes (séquence d'averses à intensité croissante 90 - 110 - 130 mm.h⁻¹) pendant de longues durées (jusqu'à 7 heures) pour obtenir des réponses de ruissellement significatives. Ces gammes d'intensité sont nettement au delà des intensités moyennes habituellement observées dans cette région pourtant très arrosée : l'intensité moyenne sur 30 minutes de fréquence annuelle ne dépasse guère 50 mm.h⁻¹.

3.2. Le site du Val d'Orléans est un site de plaine alluviale très plate où se développent des sols légers, sableux à sablo-limoneux (tableau I), à complexe d'échange saturé mais pauvres en matière organique. Pour ces deux groupes de texture, on a testé le comportement de différentes parcelles de sols correspondant à plusieurs "traitements" de la surface du sol (surface labourée, surface non labourée ou jachère,

Tableau I : Caractéristiques analytiques des sols étudiés.

(1) d'après TREVISAN, 1982 ; BOUDJEMLINE, 1987 et DURAND, 1989

(2) d'après RAHLIARISOA, 1986

(3) d'après TREVISAN, 1986.

Analytical characteristics of the study soils.

SITE	SOL	PROF (m)	pH		C%	C/N	Granulométrie (%)				CEC mé/100 g pH7				S/T (%)
			H ₂ O	HCl			SG	SF	L	A	T	Ca	Mg	K	
LOZERE	Ranker sous pelouse (1)	0-0,2	4,6	3,8	5,2	14,3	55	14	20	11	15	0,5	0,2	0,2	6
		0,2-0,5	5	4,3	1,2	15,9	60	16	18	6	9,6	0,3	0,1	0,1	5
	Brun ocreux sous pessière (1)	0-0,2	4,5	3,7	5,4	18,1	54	13	20	13	16	0,4	0,1	0,3	6
		0,2-0,5	4,5	4	3,2	23	58	13	17	12	15	0,2	0,1	0,1	3
		>0,5	5	4,4	1,2	16	67	12	13	8	9,2	0,3	0,05	0,07	5
VAL D'ORLÉANS	Sableux (2)	0-0,3	6,4		0,5	8	68	12	9	11	4	3,6	0,5	0,3	110
		0,3-0,4	6,4		0,5	9	68	12	10	9	4,5	4	1,5	0,4	130
		0,4-0,7	6,5		0,4	7	66	10	10	14	6,5	7	0,9	0,4	127
	Sablo- limoneux (2)	0-0,3	6,5		1	8	26	34	25	15	8	7	0,9	0,9	110
		0,3-0,4	6,8		0,9	9	28	36	22	14	7,7	7	1	0,8	114
		0,4-0,7	6,9		0,4	7	41	34	15	10	5,3	4,7	0,8	0,6	115
FAUX PERCHE	Limoneux sous forêt (3)	0-0,2			3,4	19	3	6	76	15	10	3	0,5	0,2	37
	Limoneux cultivé	0-0,3			1,2	9	5	9	73	16	9,4	6,1	0,4	0,2	71
MAINE	Limoneux cultivé (2)	0-0,3	7,8	7,2	0,9	10	4	9	73	14	6,3	13	0,4	0,5	217
		0,3-0,4	8	7	0,2	7,5	3	6	71	20	6	7	0,5	0,2	128
		0,4-0,6	7,9	6,6	0,2		2	6	63	29	10,2	11	1,2	0,2	121

surface soumise aux cultures légumières) et cela à deux stades distincts de l'itinéraire cultural, au printemps avant le semis et l'été après la récolte.

Les descripteurs des divers états de surface considérés étaient la rugosité de la surface du sol, la densité apparente et la teneur en eau des horizons de surface. Les intensités d'averses utilisées pour ces sols relativement moins filtrants que les précédents étaient plus faibles qu'en Lozère (séquences d'averses de 40, 50 et 60 mm.h⁻¹) et pendant des durées plus courtes (une heure pour la première averse, une demi-heure pour les suivantes). D'après les courbes intensités-durée-fréquence des pluies établies pour la région voisine de Tours, la valeur de 40 mm.h⁻¹ correspond à l'intensité moyenne observable pendant une demi-heure une fois tous les cinq ans.

3.3. Trois sites caractéristiques de sols limoneux ont été étudiés.

Sur les sites du Faux-Perche et du Maine, on trouve des sols de nature et d'origine très semblables: sols de culture limono-argileux lessivés, pauvres en matières organiques (1 à 2%) sur argiles à silex et craie avec un horizon Ap très sensible à la battance (% argiles + limons fins = 40 à 50 %, cf. tableau I). Sur le site de l'Orgeval (Marne), les sols limoneux lessivés dérivent du calcaire marneux de Brie et la texture de l'horizon Ap est un peu moins fine (% argiles + limons = 20 à 40%).

Pour le site du Faux-Perche (La Salmondière), 5 types d'occupation du sol ont été soumis aux essais d'aspersion (Fig.3) : litière forestière (2 répétitions), prairie temporaire drainée (3 répétitions), chaume de maïs drainé (6 répétitions) chaume de maïs non drainé (6 répétitions), blé d'hiver (3 répétitions). Les taux de recouvrement du sol par la litière ou la végétation étaient fort contrastés: 95% pour les parcelles forestières, 100% pour la prairie, 4 à 5 % pour les chaumes de maïs, 60 à 70 % pour le blé d'hiver. Le protocole d'aspersions comportait trois averses successives à intensité respectivement égale à 60 mm.h⁻¹ pendant 1 heure, 80 mm.h⁻¹ pendant 15 minutes et 45 mm.h⁻¹ pendant 30 minutes. Les descripteurs de l'état de surface du sol étaient, outre le taux de recouvrement du sol par la végétation, la rugosité, la densité apparente et la teneur en eau.

Pour le site du Maine (Beaumont sur Dême), les différentes parcelles de sol soumises aux essais d'aspersion correspondaient à plusieurs types de labour et de préparation de lits de semence : simple déchaumage sans retournement du sol, labour de printemps précoce, labour plus tardif soit rapide, donnant des mottes assez fines, soit lent donnant des mottes plus grossières. Toutes les parcelles étaient drainées. Les descripteurs d'état de surface du sol étaient outre le type et la date du labour, la taille des mottes, la rugosité de la surface du sol, la densité apparente et la teneur en eau des horizons superficiels. Le protocole d'aspersion consistait en une averse préalable (à 80 mm.h⁻¹ pendant 1h à 1h30 pour humecter le sol), suivie de 3 averses plus courtes à intensités décroissantes (60, 50 et 40 mm.h⁻¹) et après 30 minutes d'arrêt, une dernière averse de même intensité que l'intensité initiale (80 mm.h⁻¹).

Pour le site de l'Orgeval, le protocole était simplifié : une seule averse à 60 mm.h⁻¹ d'intensité pendant 45 minutes. Les descripteurs de l'état du sol étaient pour 17 parcelles de semis de blé et de maïs, distinctes par la date du semis et par l'humidité initiale du sol, la rugosité de surface du sol, la teneur en eau, la teneur en matières organiques et la pente du sol.

3.4. Dans le site du Lauragais, il s'agit de sols argilo-limoneux calcaires ou calciques développés sur des roches marno-calcaire tertiaires en position de plateau (pente comprise entre 2 et 5%) ou de versant (pente de 13 à 29%) et exploités pour des cultures céréalières. On y a testé le comportement de 60 parcelles différentes soit par la pente, soit par le mode de préparation des lits de semence (obtenus avec divers outils de culture), certaines parcelles correspondaient à des sols non labourés, avec des résidus de culture laissés en place. Toutes ces parcelles étaient soumises à une même averse de 40 mm.h^{-1} pendant 1 heure. Sur 10 parcelles situées en position de plateau et ayant subi un travail du sol identique, on a en outre testé l'effet d'averses à intensités contrastées ($40-50 \text{ mm.h}^{-1}$ ou $80-90 \text{ mm.h}^{-1}$) pour préciser l'influence de l'intensité des averses sur la susceptibilité au ruissellement et aux transports solides.

Le tableau II résume les caractéristiques des sols étudiés, pour chaque site, les divers types d'occupation du sol (végétation naturelle et /ou travail du sol) qui ont été comparés ainsi que les protocoles d'aspersion et les principaux descripteurs de l'état de surface du sol qui ont été suivis pendant les essais.

Compte tenu de la diversité des états de surface du sol pris en compte, il n'a pas été possible de réaliser pour chacun un nombre important de répétitions et de faire une analyse statistique de la variabilité des réponses inter et intra-sites imputables aux types de sols, ou aux types d'état de surface des sols, ou encore à l'hétérogénéité liée aux précédents cultureux. Cependant la comparaison des réponses obtenues sur 2 à 6 répétitions par type d'état de surface, a généralement permis de mettre en évidence, pour chaque type, des réponses relativement groupées. Ainsi on a pu tirer une interprétation globale des rôles respectifs des facteurs intrinsèques (nature et origine des sols) et des facteurs extrinsèques (mode d'occupation des sols et pratiques agricoles) dans le phénomène de ruissellement et d'érosion diffuse.

4. Les variables étudiées

Les variables décrivant le comportement hydrodynamique et mécanique de parcelles de sol au cours d'essais d'aspersion sont nombreuses (LAFFORGUE et NAAH, 1976 ; TRÉVISAN, 1986). Sur la figure 4, schématisant la forme théorique de l'hydrogramme de ruissellement et de la courbe de concentration des matières solides transportées, les principales variables quantifiables sont :

- t_i et P_i = temps d'imbibition et hauteur de la pluie d'imbibition nécessaire pour resaturer le sol et provoquer le début du ruissellement.

$P_i = I \times t_i$ (I intensité de l'averse) ;

- t_m = instant à partir duquel le ruissellement $R(t)$ est maximum et devient constant ;

- l'infiltration minimale FN durant la phase de régime permanent ($FN = I - R_{max}$) ;

- $C(t)$: concentration de matières solides (en suspension et tractées sur le fond) exportées à l'instant t de la parcelle.

- C_m : concentration moyenne de matières solides exportées pendant une averse simulée.

- E = flux de transports solides exportés de la parcelle pendant une durée Δt donnée :

$$E = \int_{\Delta t} C(t) R(t) dt$$

Tableau II : Comparaison des sites et des parcelles étudiées et des conditions opératoires.
Comparison of the study sites and plots, and of sprinkling procedures.

Sites	Texture des sols et roche-mère	Végétation et utilisation du sol	Descripteurs de l'état de surface	Protocole expérimentale d'aspersion	Référence
MONT-LOZÈRE	gravelo-sableux sur arène granitique	pelouse, forêt de hêtres, forêt d'épicéas, sol retourné à la bêche.	présence et nature de la végétation et/ou litière forestière pente du sol	90 - 110 - 130 - 90 mm.h ⁻¹ campagne de printemps	BOUDJEMLINE 1987 BOUREGHDA 1988
VAL D'ORLÉANS	sableux à sablo-limoneux sur alluvions de Loire	cultures légumières et jachères	rugosité de surface, densité apparente et teneur en eau	40-50-60 mm.h ⁻¹ campagne de printemps et d'été.	RAHELARISOA 1986
FAUX PERCHE	limono-argileux sur argile à silex	pelouse, forêt, chaume et semis de céréales drainés ou non drainés	nature et taux de couvert végétal, rugosité, teneur en eau	60 - 80 - 45 mm.h ⁻¹ campagne d'hiver	TREVISAN 1986
MAINE	limono-argileux sur argile de brie	labours et préparation de divers lits de semence	tailles des mottes, rugosité, densité apparente, teneur en eau	80 - 60 - 50 - 60 80 mm.h ⁻¹ campagne de printemps	RAHELARISOA 1986
BRIE	limoneux sur calcaires de Brie	semis de maïs et de blé	rugosité de surface, pente du sol, taux de M.O. teneur en eau initiale	60 mm.h ⁻¹	BOUREGHDA 1988
LAURAGAIS	argilo-limoneux sur calcaire	labours et préparation de lits de semence	taille des mottes, rugosité, densité apparente, pente du sol	40 mm.h ⁻¹ ou 80 mm.h ⁻¹	BOUDJEMLINE 1988

Compte tenu de la variabilité des états d'humidité initiale du sol introduite volontairement ou non dans le protocole des essais expérimentaux, on ne développera pas ici les résultats relatifs à la phase d'imbibition et à celle de montée du ruissellement, leur interprétation serait très longue et ne permettrait guère une comparaison globale des réponses obtenues. On se contentera d'une part d'exposer les résultats relatifs à FN et à E et d'étudier les relations entre ces variables et les intensités de pluies simulées, d'autre part de rechercher les relations entre ces variables et les paramètres descriptifs de l'état de surface du sol (rugosité, végétation, teneur en eau, etc...).

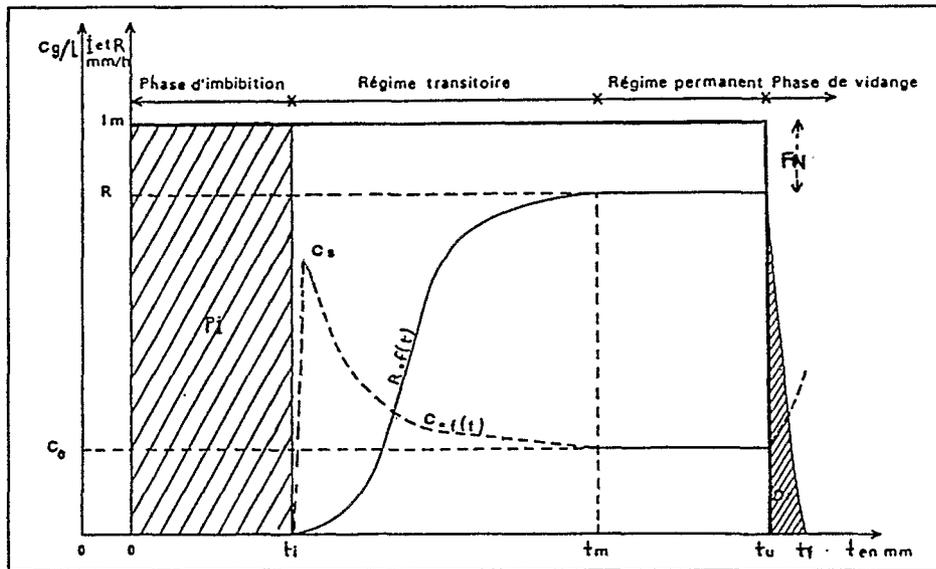


Figure 4 : Hydrogramme théorique de ruissellement $R(t)$ et turbidigramme pour une averse d'intensité constante.

Theoretical hydrogram $R(t)$ and turbidigram $C(t)$ for a constant rainfall intensity.

RESULTATS

1. Variabilité inter-site des relations $FN = F(I)$

Les valeurs de FN, infiltrabilité minimale (en mm.h^{-1}), mesurées sur les différents sites pour les diverses intensités de pluie simulées, sont reportées sur les figures 5 pour les sols gravo-sableux de Lozère, 6 pour les sols sableux et sablo-limoneux du Val d'Orléans, 7 pour les sols limoneux du Faux Perche et du Maine et 8 pour les sols argileux du Lauragais.

On admet classiquement (LAFFORGUE et NAAH, 1976) que FN croît avec l'intensité de la pluie I pour des surfaces de sol rugueuses, à perméabilité hétérogène (perméabilité minimale dans les creux et maximale sur les bosses), compte tenu du fait que l'épaisseur de la lame d'eau ruisselante augmente avec I et que les microsites les plus perméables sont ainsi graduellement de plus en plus sollicités (Fig. 9). Par contre FN doit être constant ou peu variable quelle que soit la valeur de I pour des parcelles lisses, à perméabilité homogène. Plus récemment, en faisant des essais similaires sur

des sols cultivés (COULON, 1985 ; RAHELIARISOA, 1986), on a pu mettre en évidence des relations $FN = f(I)$ décroissantes, qui ont été interprétées comme étant dues à la dégradation de la structure du sol au cours des essais de pluies simulées, qu'il s'agisse d'un tassement du sol entraînant une diminution de la porosité structurale du sol (COULON, 1988) ou d'une désagrégation accompagnée de la formation d'une croûte de battance (LE BISSONNAIS, 1988).

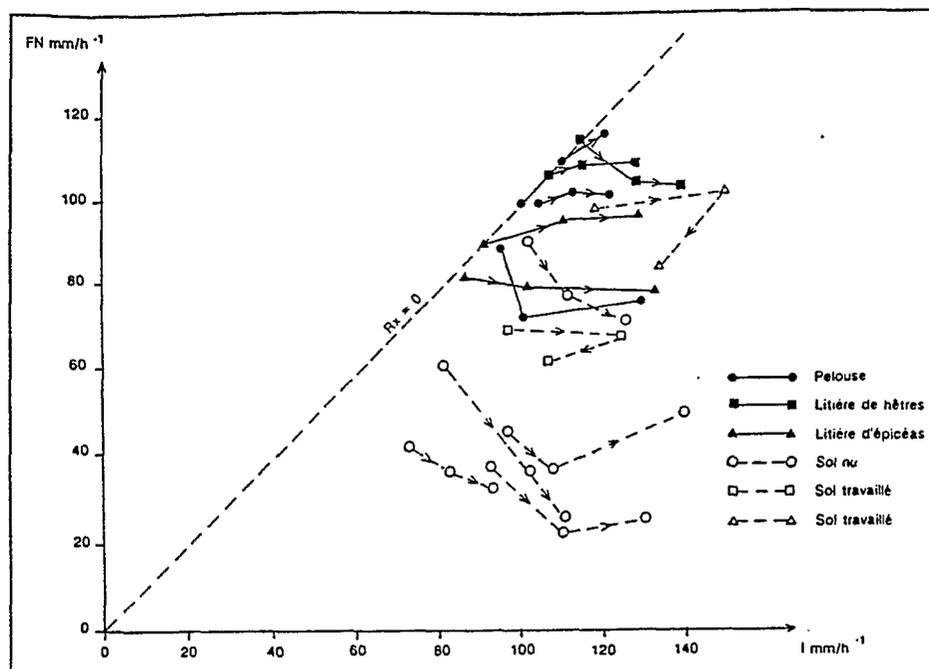


Figure 5 : Relations $FN = f(I)$ pour divers végétations ou états de surface de sols du site du Mont-Lozère (d'après BOUDJEMLINE 1987 ET BOUREGHDA, 1988, simplifié).

FN values versus I values for several vegetation covers and soils surface characteristics in the site of Mont-Lozere (from BOUDJEMLINE 1987 et BOUREGHDA, 1988).

Or l'examen des figures 5 à 8 montre que les relations $FN = f(I)$ sont tantôt croissantes, tantôt constantes, tantôt décroissantes. Seul le site du Maine (Fig. 7) donne toujours des relations $FN = f(I)$ régulièrement croissantes ; mais il a été montré que le type de réponse dépend de l'ordre dans lequel les différentes intensités d'averses successives sont produites : quand il s'agit d'averses à intensités successives décroissantes, comme c'est ici le cas, l'éventuelle fermeture des voies de percolation de l'eau dans le sol par la dégradation des agrégats (BOIFFIN, 1984) et la diminution de l'épaisseur de la lame ruisselante conjugent leurs effets et les valeurs de FN ne peuvent que diminuer (RAHELIARISOA, 1986). Seuls les protocoles d'aspersion à intensités d'averses successives croissantes comme ceux réalisés sur les sites de Lozère et du Val d'Orléans ou à intensité constante (TREVISAN et LELONG, 1992) permettent de mettre en évidence la dynamique évolutive de la surface infiltrante.

L'étude des figures 5 à 8 révèle la grande variabilité des valeurs de FN pour chaque site étudié : à un type textural de sol donné correspond une plage de valeurs

d'infiltrabilité minimum très large : par exemple pour $I = 60$ à 100 mm.h^{-1} , on a :

- $FN = 30$ à 100 mm.h^{-1} pour les sols de Lozère ;
- $FN = 5$ à 50 mm.h^{-1} pour les sols du Val d'Orléans ;
- $FN = 20$ à 40 mm.h^{-1} pour les sols limoneux drainés du Faux Perche et du Maine et 5 à 20 mm.h^{-1} pour les mêmes sols non drainés ;
- $FN = 4$ à 10 mm.h^{-1} pour les sols argileux du Lauragais.

Les plages des valeurs de FN se recouvrent d'un type de sol à l'autre, surtout si l'on considère dans chaque site le cas de sols nus ou cultivés en fin de cycle cultural pour lesquels les valeurs de FN convergent souvent vers des valeurs assez basses de l'ordre de 5 à 20 mm.h^{-1} .

Par définition les valeurs de FN correspondent à l'infiltrabilité minimale des sols, dans un état de quasi saturation; elles sont en principe indépendantes de l'état d'humidité initiale du sol : il s'agit de vitesse d'infiltration sous gradient de charge hydraulique unitaire assimilable à la conductivité hydraulique ou coefficient de Darcy en sol saturé (HILLEL, 1974).

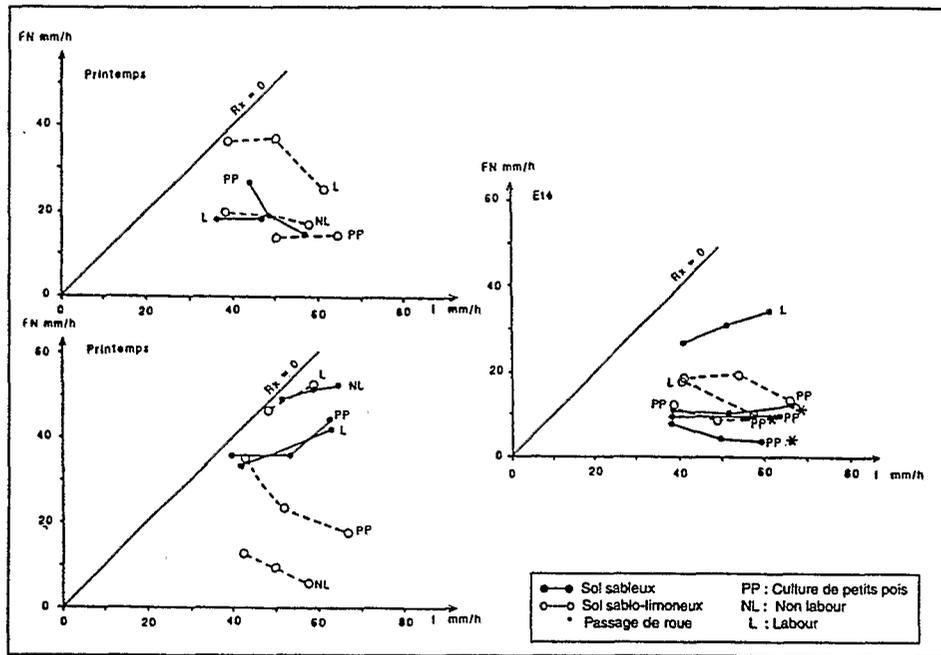


Figure 6 : Relations $FN = f(I)$ pour deux campagnes de mesure et pour différents états de surface de sols du site du Val d'Orléans (d'après RAHELIARISOA, 1986).

Spring and summer FN values versus I values for several soil surface characteristics in tilled soils of the Val d'Orléans site (from RAHELIARISOA, 1986).

Il en résulte que les fortes différences de porosité texturale existant d'un type de sol à l'autre ne suffisent pas à séparer le comportement hydrodynamique en conditions saturées de chacun d'eux. La perméabilité intrinsèque de la colonne de sol ne paraît pas à priori être le facteur le plus déterminant de ce comportement.

2. Variabilité intra-site, selon les états de surface, des relations $FN = f(I)$.

L'étude de la variabilité des réponses hydrodynamiques aux averses simulées peut être menée site par site en comparant les courbes $FN = f(I)$, obtenues sur des parcelles à végétation ou états de surface contrastés.

- Pour le site de Lozère (Fig. 5), il apparaît que les parcelles recouvertes de pelouse ou d'humus forestier, donnent des valeurs très élevées et assez stables de FN, quelle que soit I. Ces parcelles se comportent comme des surfaces peu rugueuses et à perméabilité homogène, sans doute par suite des très fortes intensités de pluies simulées. Par contre les parcelles de sol dénudé ou retourné par un travail à la bêche donnent des valeurs de FN nettement plus basses et souvent décroissantes quand I augmente. Les sols de ces parcelles semblent avoir subi dès la première averse, une certaine dégradation qui s'accroît ensuite ou non, selon les remaniements provoqués par le ruissellement. Ainsi la présence d'un couvert végétal en bon état ou d'un humus bien développé sont des facteurs primordiaux favorisant la forte perméabilité du sol et la stabilité de cette propriété. On retrouve donc pour ces écosystèmes de montagne, le rôle prépondérant du facteur couvert végétal ou des litières au ras du sol comme frein à la susceptibilité des sols au ruissellement et à l'érosion, rôle déjà mis en évidence dans des milieux très différents de l'Afrique de l'Ouest (ROOSE et LELONG, 1976). Les autres paramètres considérés comme susceptibles d'influencer le ruissellement (pente du sol, humidité initiale, densité apparente de l'horizon de surface...) ne permettent pas d'expliquer les différences de comportement observées d'une parcelle à l'autre (COSANDEY *et al.*, 1990).

En conclusion, pour ce site à végétation naturelle sur matériau grossier et filtrant, la capacité d'infiltration reste en toutes circonstances extrêmement forte, plus élevée que les intensités maximales de pluies observables (70 à 100 mm.h^{-1} pendant 1 heure) lors des plus fortes averses cévenoles, sauf lorsque le sol est mis à nu ou cultivé et rendu dégradé, comme cela se produit dans les ravines ou sur des surfaces surpâturées, ou bien encore dans le cas de stations aval mal drainées et saturées. En dehors de ces zones, il est probable qu'aucun ruissellement de type hortonien ne se produise et que par conséquent les écoulements rapides parfois spectaculaires (crues cévenoles) observables même pour des bassins bien végétalisés ne s'expliquent pas par ce type d'écoulement.

- Dans le cas des sols sableux du Val d'Orléans, les comportements hydrodynamiques ont été testés successivement au cours de deux campagnes de printemps et d'été, lors de la préparation des lits de semence et après la récolte, et les parcelles cultivées ont été comparées à des parcelles témoin non labourées. On voit sur la figure 6 que : (1) les valeurs de FN décroissent souvent quand I augmente, notamment pour les sols sablo-limoneux ; (2) que les valeurs dépendent principalement de la période d'observation au cours du cycle cultural : FN semble être maximum pour les parcelles fraîchement labourées et diminuer au cours de ce cycle, le minimum étant atteint pour les parcelles après la récolte, surtout à l'emplacement des passages de roues d'engins qui tassent le sol. Le modèle proposé par TRÉVISAN *et al.*, (1992) pour des sols limoneux, donnant la variation de FN en fonction de la dégradation graduelle dans le temps de la structure de l'horizon Ap, semble pouvoir s'appliquer aussi aux sols sableux.

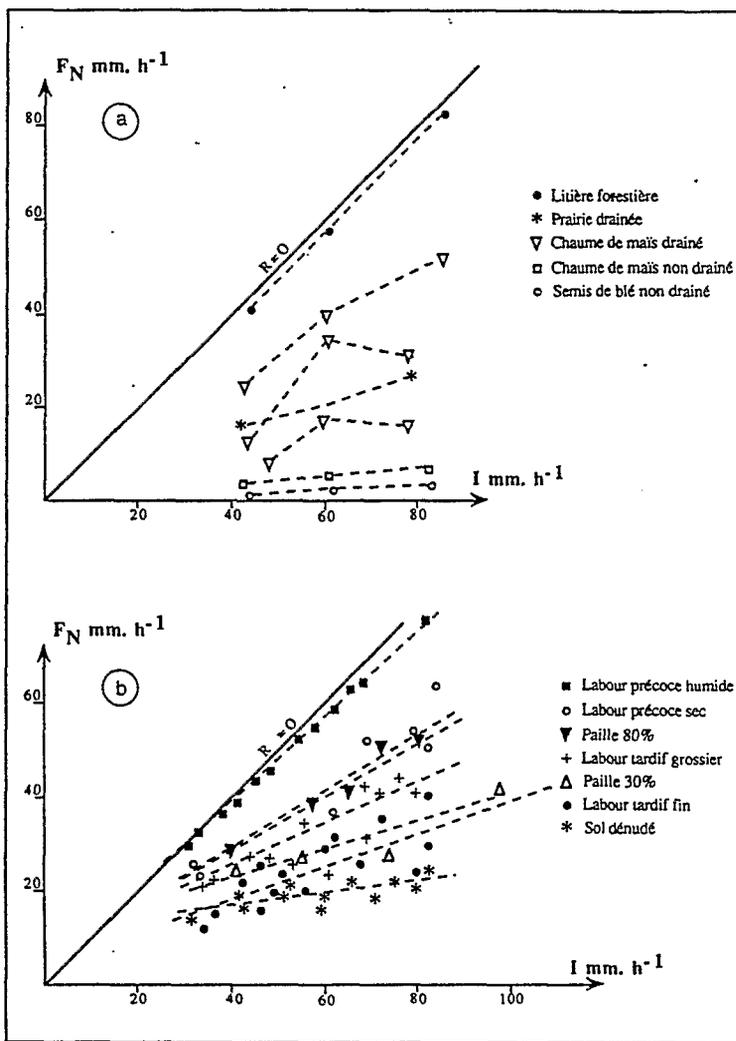


Figure 7 : Relations $F_N = f(I)$ pour différents états de surface des sols du site du Faux-Perche, (a. d'après TRÉVISAN 1986, simplifié) et du Maine (b. d'après RAHELIARISOA, 1986).
FN values versus I values for several soils surface characteristics in the site of Faux-Perche (a, from TRÉVISAN, 1986) and Maine (b, from RAHELIARISOA, 1986).

- Pour les sols limoneux, les résultats présentés ici concernent deux des sites étudiés (fig. 7). L'influence du drainage ressort très clairement sur le premier site (fig. 7a) ainsi que celle de la présence d'un couvert végétal ou d'un humus (sol forestier) qui maintient une forte infiltrabilité du sol. Sur le second site (fig. 7b) - étudié rappelons le, avec un protocole d'averses à intensités décroissantes ne permettant pas de mettre en évidence la dégradation des propriétés hydrodynamiques du sol - l'infiltrabilité est minimale sur les parcelles de sol dénudé, non cultivé, plus ou moins battu, et est maximale sur les parcelles ayant subi un labour précoce dans de bonnes conditions climatiques; quant aux parcelles non travaillées mais encore partiellement couvertes de

paille et aux parcelles labourées plus tardivement (probablement dans de moins bonnes conditions) elles ont un comportement intermédiaire. Le dépouillement statistique de ces résultats et la recherche de corrélation entre la pente de la droite $FN = f(I)$ et divers descripteurs de l'état de surface des sols ont abouti à la conclusion que les facteurs qui contrôlent la variabilité d'un traitement à l'autre sont essentiellement (RAHELIARISOA, 1986) :

- La rugosité de la surface du sol ;
- La teneur en eau initiale du sol : dans la gamme des teneurs en eau testées (teneur initiale généralement inférieure à la capacité au champ), la pente de la droite $FN = f(I)$ croît avec l'humidité initiale pondérale, ce qui paraît s'opposer avec l'idée communément admise que la capacité d'infiltration diminue quand la teneur en eau initiale (eau d'imbibition) augmente. On verra ultérieurement comment on peut expliquer ce résultat.

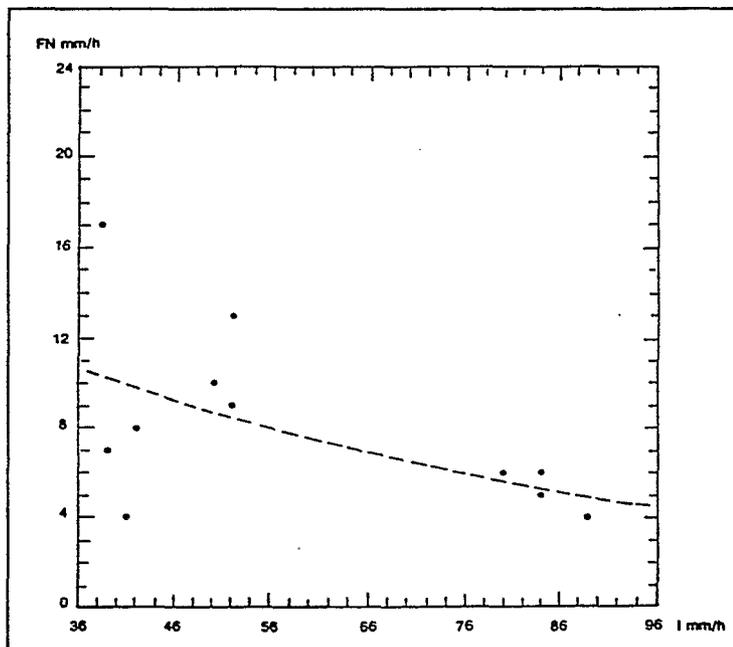


Figure 8 : Relations $FN = F(I)$, pour 11 parcelles de sol de faible pente (<5%) à surface ratissée, site du Lauragais (d'après BOUDJEMLINE, 1987).

FN values versus I values for 11 plots of low slope (<5 %) tilled soils in the site of Lauragais (from BOUDJEMLINE, 1987).

- Dans le cas des sols du Lauragais, (Fig. 8), la forte dispersion des valeurs de FN pour les faibles intensités d'averse ($38 < I < 48 \text{ mm.h}^{-1}$) peut être interprétée au moins partiellement par les différences de granulométrie des mottes, de densité apparente de l'horizon Ap et de rugosité de la surface du sol: en effet FN décroît assez régulièrement pour des valeurs croissantes de densité apparente et pour des valeurs décroissantes de l'indice de rugosité (BOUDJEMLINE, 1987). La tendance à la diminution de FN et à la

convergence de ses valeurs autour de 4 à 5 mm.h⁻¹ pour I = 80 mm.h⁻¹ traduit semble-t-il comme pour les sols limoneux l'effet de dégradation de la structure du sol (désagrégation, libération et sédimentation des particules fines) croissant avec l'intensité des averses. En effet, c'est sur des parcelles témoins non labourées, avec des résidus de culture laissés en place, que l'on a noté les ruissellements les plus faibles.

Au total, on voit à travers les divers exemples que dans tous les cas, pour un type textural donné de sol, l'infiltrabilité en régime permanent, assimilable à la conductivité hydraulique saturée, varie fortement selon l'utilisation du sol et/ou selon les pratiques agricoles utilisées. Les facteurs responsables de cette variabilité concernent l'horizon de surface (densité apparente, taille des mottes, teneur en eau initiale...) ou même l'interface sol-atmosphère (rugosité, débris ou couverts végétaux). En outre, cette infiltrabilité s'avère fluctuante dans le temps: ainsi au cours du cycle cultural, les fortes infiltrabilités (FN = 20 à 100 mm.h⁻¹) observées sur sols à forte couverture végétale ou ameublés par labour, cèdent la place à des valeurs aussi basses que 1 à 10 mm.h⁻¹ lorsqu'ils ont été mis à nu ou qu'ils sont en fin de cycle cultural. L'état de surface du sol, variable avec les pratiques agricoles, apparaît ici être une cause plus déterminante de sa susceptibilité au ruissellement que sa texture. L'étude des transports solides va permettre de préciser ce point.

3. Détachabilité des particules du sol et transports solides.

Les débits solides mesurés à l'aval des parcelles expérimentales de sol au cours des averses simulées montrent aussi une grande variabilité dans chaque site étudié.

Sur les sols à texture grossière de Lozère, les exportations solides restent très faibles, au maximum de l'ordre de quelques grammes par m² et par heure, en dépit des intensités de pluies simulées très fortes, par suite à la fois du faible débit ruisselé et de la charge solide basse (moins de 0,03 g.l⁻¹), sauf pour les parcelles dénudées, où l'exportation peut atteindre 50 g.m⁻².h⁻¹ et la charge solide 5 g.l⁻¹.

Sur les sols sableux du Val d'Orléans (Fig. 10), on observe des exportations relativement faibles (inférieures à 20 g.m⁻².h⁻¹) sur les parcelles non labourées. Les exportations sont par contre rapidement croissantes avec l'intensité des pluies sur les parcelles labourées et cultivées, surtout sur les parcelles fraîchement travaillées (campagne de printemps) et pour les textures sablo-limoneuses. La détachabilité des particules solides semble diminuer au cours du cycle cultural, malgré la susceptibilité accrue au ruissellement (Fig. 6), ce qui traduit une certaine augmentation de la cohésion de la surface du sol lors de sa dégradation.

Dans le cas des sols limoneux, l'exemple présenté ici (Fig. 11) illustre l'influence du mode de préparation du lit de semences sur la stabilité structurale de l'horizon Ap : l'exportation de solides, toujours régulièrement croissante avec l'intensité des averses, est maximum pour les labours frais, d'autant plus que les mottes sont petites, et minimum pour les labours les plus anciens et pour les parcelles simplement déchaumées et partiellement protégées par un mulch de paille. Les différents modes de préparation de lits de semences notés 1 à 6 peuvent être classés du point de vue de leur susceptibilité aux transports solides selon un ordre presque semblable au classement des susceptibilités au ruissellement (Fig. 7) : les forts ruissellements observés sur les

RUISSELLEMENT ET ÉROSION EN NAPPE

labours tardifs s'accompagnent de charges solides très élevées (5 à 10 g.l⁻¹), plus élevées que pour les labours précoces dont les surfaces sont plus ou moins stabilisées (2 à 5 g.l⁻¹); les parcelles simplement déchaumées et protégées par un mulch résiduel de paille donnent très peu d'exportation solides. Enfin l'exportation solide est plus faible, toutes choses égales par ailleurs, quand le déficit d'humidité initiale du sol n'est pas trop fort (RAHELIARISOA, 1986).

Dans les cas des sols de Lauragais, les exportations varient largement, pour $I = 40$ mm.h⁻¹, de 13 à 250 g.m⁻².h⁻¹ pour les parcelles de pente 15% et de 0 à 29 g.m⁻².h⁻¹

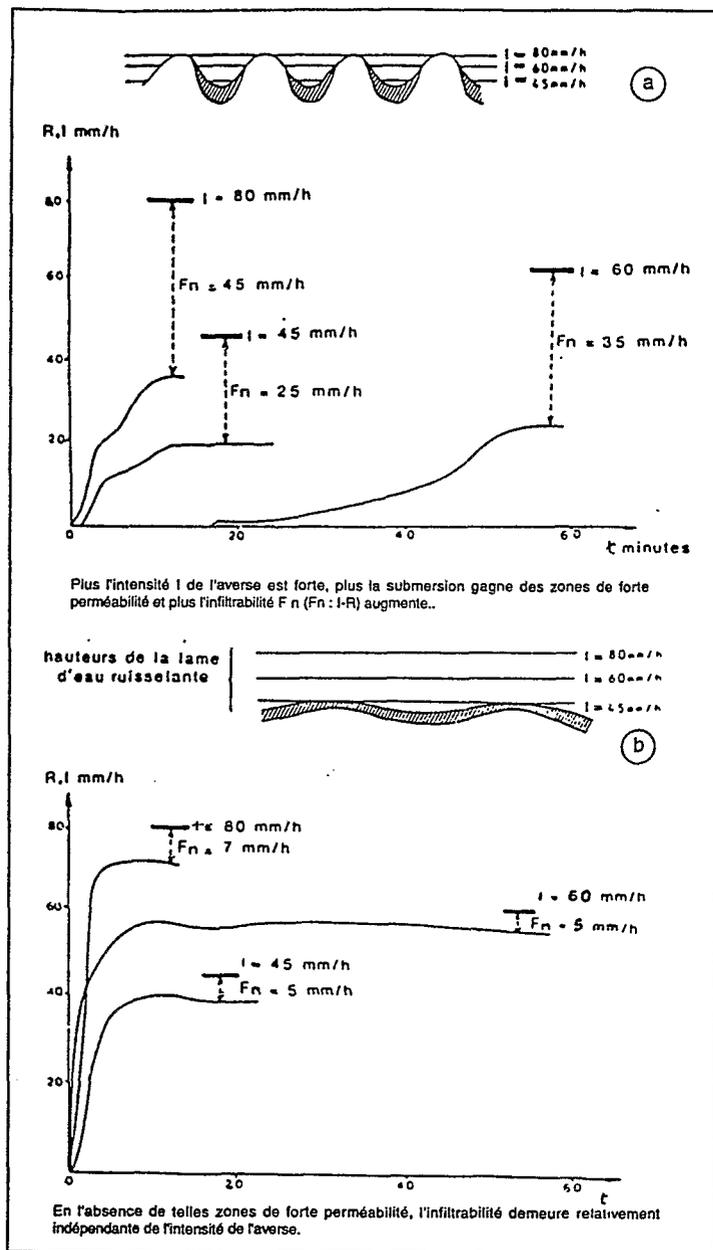


Figure 9 : Hydrogrammes de ruissellement pour 3 intensités d'averses simulées sur 2 parcelles de sol à états de surface contrastés (a) surface rugueuse, (b) surface lisse, homogène. (d'après TREVISAN, 1986).

Overland hydrogram resulting from 3 rainfall intensities for 2 contrasted soil surfaces.

pour celles de pente inférieure à 5%; pour une pente donnée, elles augmentent avec l'affinement des mottes et avec le tassement du sol par les roues d'engins agricoles. En effet la désagrégation superficielle semble se développer plus précocement sur les lits de semence fins; en outre l'énergie du ruissellement croît avec la pente et les dépressions tassées sont des voies où le ruissellement se con-centre et exerce des forces de cisaillement maximum sur le sol.

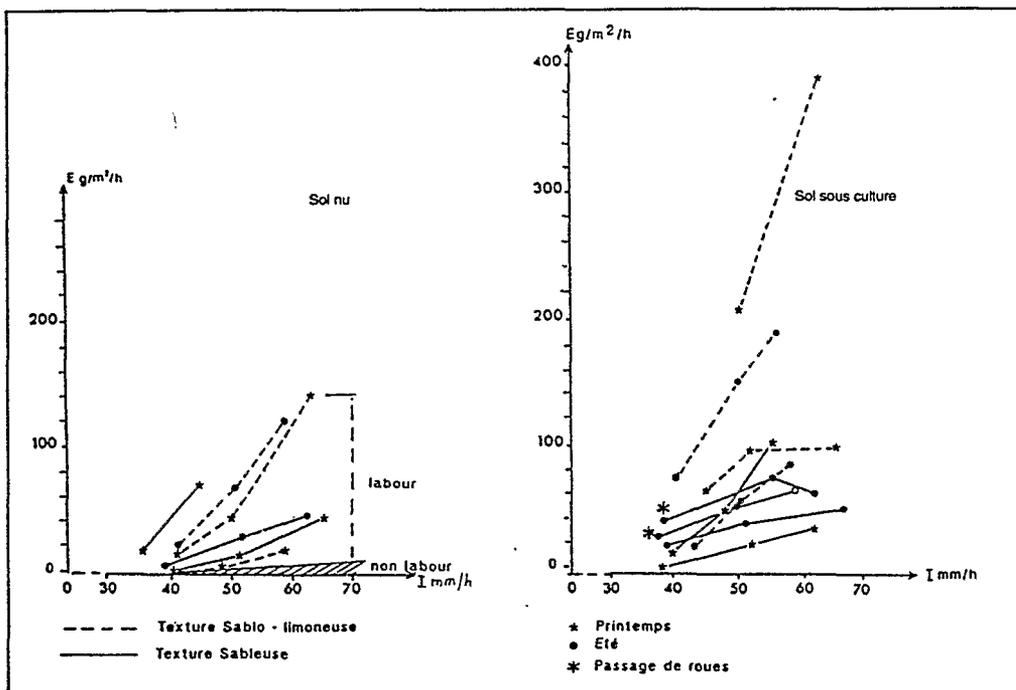


Figure 10 : Variations du débit solide exporté E (en $g.m^{-2}.h^{-1}$) en fonction de l'intensité des averses pour deux textures de sol et pour deux stades du cycle cultural, sur le site du Val d'Orléans (d'après RAHELARISOA)

Solid transports versus rainfall intensities for sandy and silty-sandy soils in spring and summer conditions, site of Val d'Orléans.

Au total, la variabilité des flux solides exportés mise en évidence dans chaque site selon l'état de surface du sol et/ou selon les pratiques agricoles est très forte et masque la variabilité inter-site imputable à la texture ou aux caractéristiques pédologiques intrinsèques des colonnes de sol. En Lozère, c'est surtout le critère présence/absence de couvert végétal (ou d'un humus forestier) qui explique la variabilité observée ; dans le Val d'Orléans, c'est le travail du sol et l'évolution de la surface de celui-ci au cours du cycle cultural ; sur les sites limoneux du Faux Perche et du Maine, c'est la nature des cultures, le degré de couverture des semis ou des résidus de culture et le mode de préparation des lits de semence (outre bien sûr l'influence du réseau de drainage) ; dans le Lauragais c'est l'affinement des lits de semence, la présence de résidus de culture à la surface du sol et la pente du sol. On met ainsi en évidence une *variabilité spatiale*, liée à la nature de l'interface sol - atmosphère (sol nu ou couvert) et au travail du sol (taille des mottes...) et une *variabilité temporelle* due à l'évolution de l'état de surface

du sol au cours du cycle cultural : forte susceptibilité à la dégradation des labours frais et stabilisation mécanique graduelle des parcelles aplanies, battues ou tassées par les agents atmosphériques et les passages d'engins agricoles.

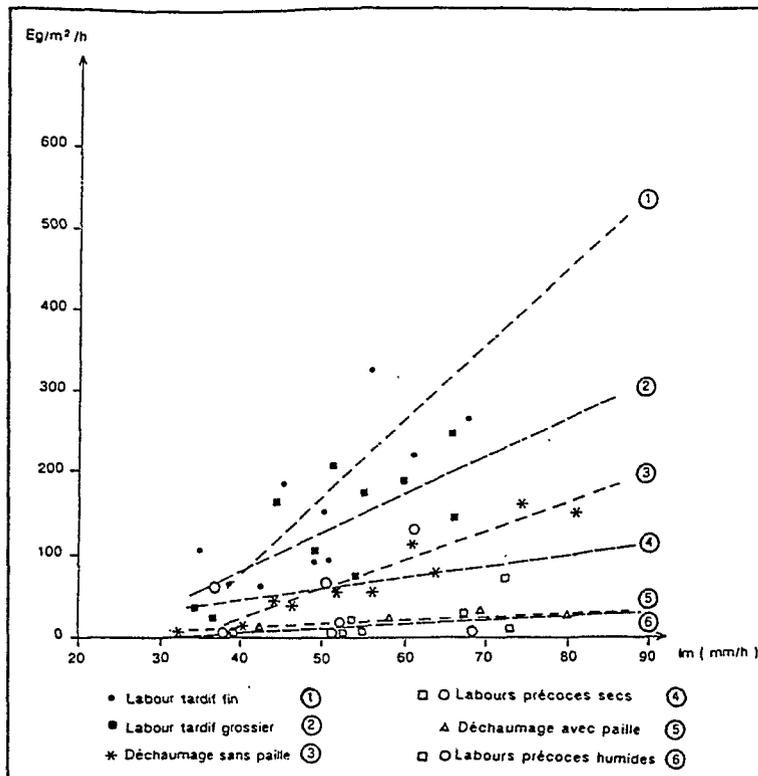


Figure 11 : Variations du débit solide exporté E (en g.m-2.h-1) en fonction de l'intensité des averses pour des parcelles représentatives de six types de lits de semence, sur le site du Maine (d'après RAHELARISOA, 1986). Solid transports versus rainfall intensities for six seed bed types in the site of Maine (from RAHELARISOA, 1986).

IV - DISCUSSION

1. Facteurs de variabilité de l'infiltrabilité et des transports solides

Le tableau III récapitule les principaux résultats hydrodynamiques et de transports solides obtenus avec les différents protocoles mis en oeuvre sur les sites testés. Le report de ces résultats sous forme de figures indiquant les domaines de variabilité des réponses observées selon les types texturaux de sols (Fig. 12 et 13) illustre bien le fort recouvrement des comportements d'un type textural à l'autre. Seuls les sols gravelo-sableux très filtrants de Lozère se distinguent par des infiltrabilités FN très élevées et pour des transports solides presque nuls, du moins tant que ces sols sont couverts de végétation ; et sur l'autre pôle textural, les sols argilo-limoneux du Lauragais montrent toujours des valeurs de FN basses et des valeurs de transports solides très étalées (minimum observé pour des parcelles témoins non labourées où 80% de la surface du sol est couverte par des résidus de culture ; maximum observé pour les parcelles labourées et traitées au rouleau qui provoque l'éclatement des mottes (ROOSE et CAVALIE, 1988)).

Pour les autres types texturaux de sols, les différences de comportement inter-sites

semblent relativement mineures devant les variations intra-sites, liées au mode de travail du sol, au drainage ou à l'humidité initiale de celui-ci et à la saison (labour, récolte, jachère...) : dans tous les sites testés, on observe des infiltrabilités minimales FN aussi basses que celles obtenues pour les sols argileux du Lauragais ($0-10 \text{ mm.h}^{-1}$) - quand le sol mis à nu et travaillé a subi une dégradation de sa structure superficielle - et des exportations solides E aussi ou plus élevées ($> 200 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$). Les principaux facteurs de variation des variables FN et E sont la rugosité, la taille des mottes et l'humidité initiale du sol; pour augmenter FN et diminuer E, il faut éviter l'affinement trop poussé des lits de semence et maintenir sur le sol des résidus de culture capables d'absorber une partie de l'énergie cinétique des pluies. Le facteur humidité initiale du sol intervient de façon très complexe : il s'agit d'une variable d'état liée aux conditions climatiques antérieures, influençant la stabilité structurale du sol et par conséquent l'infiltrabilité (BOIFFIN, 1984). Il semble bien établi, dans les sols limoneux testés, que la diminution de l'humidité initiale du sol entraîne la baisse de l'infiltrabilité minimale FN par suite de la fragilité accrue des agrégats lors de l'humectation par les pluies et par suite de la production de fractions fines plus abondante lors de la fragmentation d'agrégats de sols relativement secs (LE BISSONNAIS, 1988). La stabilité des agrégats, faible lorsque le sol est sec - par suite de l'éclatement de ceux-ci par compression de l'air inclus dans les pores lors de l'humectation - augmente jusqu'à un maximum pour une teneur en eau voisine de la capacité au champ, au delà de laquelle les agrégats tendent à se fragiliser par liquéfaction. Le comportement mécanique du sol commande donc son comportement hydrodynamique. Ce point oppose nettement l'érosion en nappe à l'érosion en rigoles où la concentration du ruissellement et l'énergie hydraulique de celui-ci commande l'érosion linéaire (SAVAT et DE PLOEY, 1982).

2. Diversité des mécanismes de dégradation structurale.

Le tableau III montre dans presque tous les cas l'existence de relations $FN = f(I,t)$ négatives pour les sols mis à nu ou retournés ou encore labourés et travaillés (préparation des lits de semence); le comportement distinct de ceux prévus par la théorie (LAFFORGUE et NAAH, 1976) est observable à condition que le protocole d'aspersion consiste en des averses d'intensité croissante (RAHELIARISOA, 1986) ou constante (TREVISAN et LELONG, 1992) : il manifeste l'instabilité des propriétés mécaniques et hydrodynamiques dans le temps, notamment au cours du cycle cultural.

La diminution de FN pour I croissant est alors presque générale pour les divers types texturaux de sols étudiés ; elle résulte de la dégradation graduelle de ces propriétés sous l'effet des agents météoriques et anthropiques; mais les mécanismes de la dégradation semblent différents d'un type de sol à l'autre.

- Dans le cas des sols limoneux, la dégradation s'explique d'une part par le rejaillissement des particules détachées sous l'effet "splash" des pluies (BOLLINNE, 1975; POESEN, 1985) et par la fermeture de la porosité structurale - c'est la première phase du processus de dégradation analysée par BOIFFIN (1984) - et d'autre part par la redistribution des particules fines entraînées dans le flot de ruissellement et par leur sédimentation sous forme d'une pellicule dite de battance - c'est la seconde phase du processus. L'infiltrabilité minimum diminue ainsi graduellement de quelques dizaines

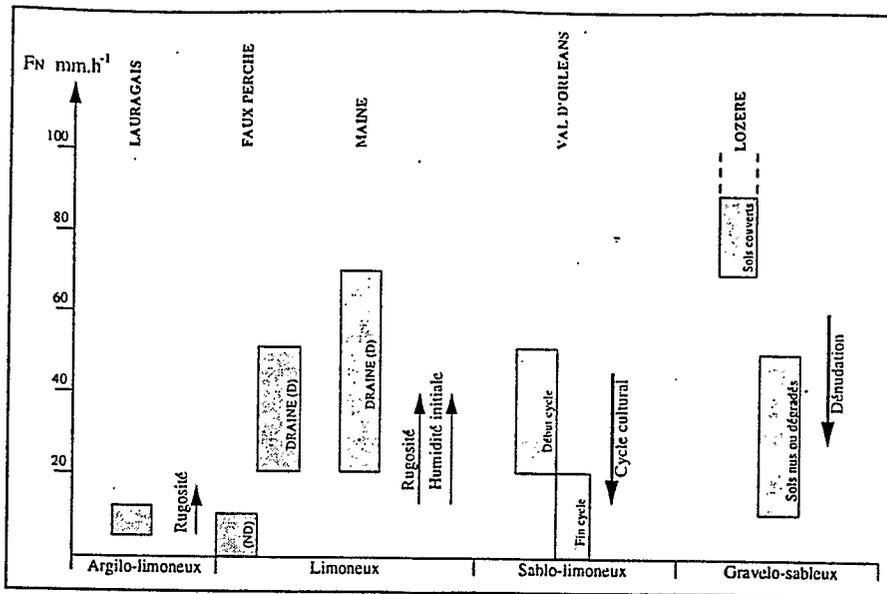


Figure 12 : Plages des valeurs d'infiltrabilité minimales FN (en mm.h⁻¹) pour les divers types texturaux de sols considérés (pour I = 70 mm.h⁻¹). NB : les flèches ascendantes (ou descendantes) indiquent l'existence d'une relation positive (ou négative) entre FN et le facteur considéré.

FN ranges (in mm.h⁻¹) for several texture contrasted soils (for I = 70 mm.h⁻¹). Ascending (or descending) arrows show a positive (or a negative) relationship between FN and the considered factor.

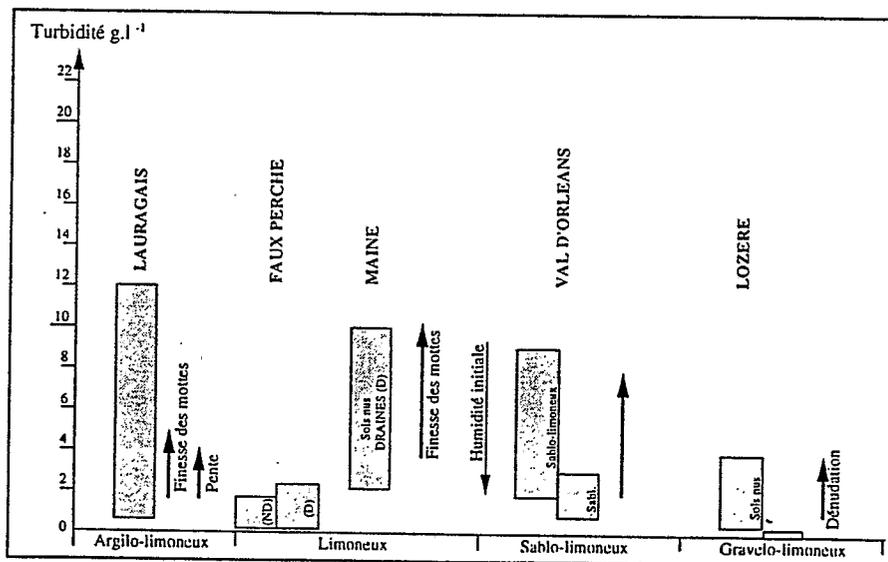


Figure 13 : Plages des valeurs de turbidité (en g.l⁻¹) dans les eaux de ruissellement pour les divers types texturaux de sols considérés (pour I = 70mm.h⁻¹). NB : les flèches ascendantes (ou descendantes) indiquent l'existence d'une relation positive (ou négative) entre FN et le facteur considéré.

Turbidity ranges (in g.l⁻¹) in overland flow for several texture contrasted soils (for I = 70 mm.h⁻¹). Ascending (or descending) arrows show a positive (or negative) relationship between the turbidity and the considered factor.

Tableau III : Tableau récapitulatif des réponses hydrodynamiques et mécaniques des sols testés aux averses simulées.
Summary of the hydrodynamical and mechanical results for the simulated showers.

I	II	III	IV	V	VI
Site et Texture	Protocole d'aspersion (I mm.h ⁻¹)	Relation FN = f(I)	FN mm.h ⁻¹ pour I = 70 mm h ⁻¹	Transports solides (g.m ⁻² h ⁻¹) pour I = 70 mm.h ⁻¹	Turbidité Moyennes (g.l ⁻¹)
LOZERE sablo-argileux humifère	90 - 110 130 - 90	constante ou faiblement <0	70 (a) 50 (b)	0 a 3 0 a 50	0,01 à 0,03 0,2 a 5
VAL D'ORLÉANS sableux à sablo limoneux (s, sl)	40 - 40 50 - 60	>0 ou constante	20 à 50 (c) 0 à 15 (d)	15 à 90 (s) 20 à 400 (s.l.)	1 à 3 (s) 2 à 9 (s.l.)
FAUX-PERCHE limoneux	60 - 80 - 45	croissante ou en cloche	1 à 10 (e) 20 à 50 (f)	10 à 100 1 à 70	0,1 à 1,5 0,4 à 2,4
MAINE limoneux sur argiles à silex (drainé)	80 - 60 - 50 40 - 80	<0	50 (g) 30 (h)	10 à 100 150 à 300	2 à 5 5 à 10
LAURAGAIS argilo-limoneux sur molasse	40 (31 parcelles)	<0	4 à 12	13 à 250 (i) 0 à 29 (j)	0,4 à 12

* Sauf Lauragais où I = 40 mm.h⁻¹

Colonne IV : (c) sols cultivés (début de cycle) - (d) sols cultivés (fin de cycle)

(a) sols couverts de végétation ou avec litière forestière - (b) sols nus ou dégradés - (e) semis de blé ou maïs non drainés

(f) semis de blé ou maïs drainés - (g) labour précoce - (h) labour tardif

Colonne V : (s) texture sableuse - (s.l.) texture sablo-limoneuse - (i) sols de pente 5 à 15% (j) sols de pente <5%

- Dans le cas des sols sableux et à fortiori gravelo-sableux, l'intensité du rejaillissement et la redistribution spatiale des particules libérées décroissent mais leur remaniement sur place s'accompagne d'un tassement relatif de l'horizon Ap. Par exemple dans les sols sableux du Val d'Orléans (fractions argileuses comprises entre 10 et 15%), la densité apparente de l'horizon superficiel, mesurée au champ augmente au cours de l'itinéraire cultural de 1,3 - 1,5 à 1,7, soit une baisse de porosité totale d'environ 10%, correspondant surtout à l'effondrement de la porosité structurale (COULON, 1985) ; la compacité atteinte après la récolte égale ou même dépasse celle de la semelle de labour sous-jacente, notamment à l'emplacement des passages de roues d'engins agricoles. La conductivité hydraulique à saturation diminue alors considérablement, conformément au modèle de FIES (1984) ; elle tend vers des valeurs très faibles de 0 à quelques mm.h^{-1} quand la densité apparente atteint 1,8, valeurs aussi faibles que celles obtenues pour les sols limoneux battants.

La sensibilité des sols à la battance et au tassement dépend non seulement de leur texture, mais aussi de leur teneur en matière organique et de l'humidité de l'horizon de surface, ces deux derniers facteurs étant fortement dépendants de l'utilisation du sol et des pratiques agricoles. On sait que la stabilité des agrégats du sol, frein à la battance, suppose une teneur seuil en matières organiques, d'autant plus forte que la fraction argileuse est plus abondante ; le seuil est de l'ordre de 2 % pour les sols sablo-limoneux et de 4 % pour les sols argileux (MONNIER et STENGEL, 1982).

Concernant la sensibilité au tassement des sols sableux, on connaît le rôle de l'étalement granulométrique des particules du squelette du sol (GRABA, 1986), celui de la teneur en argile et de la teneur en eau (GUERIF, 1982 ; COULON, 1988) : pour les sols humides (à pF 1), la sensibilité au tassement augmente avec le taux d'argile ; par contre, pour les sols secs (à pF 4,2), la présence d'argile favorise la stabilité. Mais le domaine de faible humidité, pour lequel ces matériaux sableux résistent mieux au tassement, paraît plus restreint que celui des matériaux limono-argileux.

Les mécanismes de dégradation structurale du sol apparaissent donc très complexes et les facteurs de sensibilité des sols vis-à-vis de ces mécanismes sont très nuancés.

3. L'état de surface du sol, carrefour des interactions entre agents météorologiques, substrat pédologique et utilisation du sol

Les mesures au champ du ruissellement en nappe et de transports solides sous pluies simulées rendent compte des interactions très complexes entre trois groupes de variables ou paramètres impliqués dans les phénomènes :

- variables météorologiques : intensité et durée des pluies, commandant leur énergie cinétique, l'effet splash et les débits ruisselés ;

- paramètres pédologiques : nature du sol et particulièrement caractéristiques de l'horizon de surface et état d'humidité de celui-ci, conditionnant la sensibilité aux dégradations structurales ;

- variables biologiques et agronomiques : nature et densité de la végétation, présence de litière ou de résidus de culture, taille des mottes et rugosité de surface qui contrôlent l'infiltrabilité, la stabilité structurale ou au contraire la vitesse et l'intensité des dégradations.

Ces interactions, en conditionnant dans le temps et dans l'espace l'évolution de la surface du sol, sont à l'origine de la diversité des comportements hydriques et des transports solides enregistrés. Ces interactions s'expriment à l'échelle du champ ou de la parcelle expérimentale, elles ne sont pas reproductibles *in vitro* et même très difficilement prédictibles à partir de tests de laboratoire sur échantillon de sols. Il a été signalé à plusieurs reprises (JARRY, 1987 ; BOUREGHDA, 1988) qu'il n'apparaît aucune corrélation entre les valeurs de ruissellement et de transports solides mesurées au champ sous pluies simulées et des indices de laboratoire tels l'indice de stabilité structurale (HENIN *et al*, 1969). L'étude des profils culturaux ou des relations entre les rendements et les techniques culturales n'apporte pas non plus d'éclairage suffisant pour la compréhension des mécanismes de l'infiltration (ROOSE et CAVALIE, 1988).

Malgré la lourdeur relative de leur mise en oeuvre, les mesures au champ sous pluies simulées restent irremplaçables pour saisir l'enchaînement des différents processus conduisant, à l'échelle de la parcelle, au ruissellement en nappe et à l'érosion diffuse. Dans tous les cas étudiés ici, le rôle déterminant de l'horizon sommital du sol et des caractéristiques évolutives dites "état de surface" (taille des mottes, rugosité de surface, présence de végétation ou de débris de culture, activité de la faune du sol...) a été souligné.

Soulignons que les phénomènes de ruissellement résultant d'une hydromorphie de bas fond ou de remontée de nappe, ne sont pas concernés par de tels processus. Nos résultats ne s'appliquent en effet qu'au ruissellement de type "hortonien", qui se manifeste dès que l'intensité d'infiltration de l'eau dans le sol est inférieure à celle de la pluie, et pour lequel la quantification des processus demande une modélisation du comportement de l'horizon sommital. TREVISAN et LELONG (1992) ont ébauché un tel modèle, pour des sols limoneux sensibles à la battance du Faux-Perche, permettant d'étudier la diminution de la capacité d'infiltration en fonction de la durée des averses.

La compréhension des phénomènes de ruissellement concentré et d'érosion linéaire le long de rigoles et de thalwegs nécessite une approche encore plus globale à l'échelle d'un versant ou d'un bassin de drainage, puisque le phénomène hydraulique de ruissellement et son pouvoir de cisaillement commande l'incision et que ce phénomène se développe de façon cumulative le long des pentes (DE PLOEY, 1983 ; GOVERS, 1987 ; POESEN, 1987).

CONCLUSIONS

Des mesures au champ de la susceptibilité des sols au ruissellement en nappe et à l'érosion diffuse ont été faites sur parcelles expérimentales de 1m² soumises à des pluies simulées, à intensité contrôlée. Elles ont porté sur des sols à caractéristiques physiques, physico-chimiques et biologiques très différentes : sol gravelo-sableux sur granite du Mont Lozère, sols alluviaux sableux cultivés du Val d'Orléans, sols limoneux lessivés sur argiles à silex du Faux-Perche et du Maine, sols argilo-limoneux du Lauragais.

Les résultats montrent que ce sont les propriétés structurales de l'horizon sommital et en particulier l'état de surface du sol (caractérisé par sa rugosité, son humidité initiale, la présence ou l'absence de végétation, de pierrosité,...etc.) qui déterminent

principalement cette susceptibilité. Le type de sol et de texture du sol apparaissent être des facteurs moins déterminants (sauf sans doute dans le cas de sols lessivés, à horizon B hydromorphe, non drainés où les phénomènes de ruissellement par remontée de nappe prennent de l'importance). La présence d'un couvert végétal, quelle que soit sa nature, ou d'une litière végétale ou même de résidus de culture diminue considérablement cette susceptibilité. En effet, ces éléments absorbent une grande partie de l'énergie cinétique des pluies et du ruissellement ; l'humus qu'ils génèrent favorise la stabilité des agrégats. Cet effet bénéfique de l'humus s'accompagne d'un effet améliorant sur la perméabilité du sol, ainsi que sur la résistance vis-à-vis du splash et du cisaillement par le ruissellement.

Dans le cas de sols cultivés, les essais sous pluies simulées ont permis de montrer l'évolution des propriétés mécaniques et hydrauliques de l'horizon de surface au cours du cycle cultural depuis le labour jusqu'à la récolte : diminution de l'infiltrabilité des sols au fur et à mesure de l'aplanissement de l'horizon labouré sous l'influence de la battance des pluies, du ruissellement et des passages d'engins agricoles, et augmentation de sa compacité rendant cet horizon mécaniquement plus stable.

Enfin, compte tenu de la complexité des facteurs interactifs qui interviennent dans les phénomènes de ruissellement et d'érosion diffuse, il apparaît jusqu'à présent impossible de prévoir et *a fortiori* de quantifier ces phénomènes à partir de simples tests de laboratoire sur des échantillons de sol : seule l'approche au champ permet de saisir l'articulation et l'intégration des agents météorologiques (intensité et durée des averses), du facteur sol (structure, texture) et des variables biologiques et agronomiques (végétation, pratiques agricoles) qui agissent inter-activement.

Reçu pour publication : août 1993

Accepté pour publication : décembre 1993

BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN J. et VALENTIN C., 1978 - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cahier ORSTOM*, Ser. Hydrol., Vol 15, n°4, 321-350.
- AUZET A.V., 1987 - L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture. Aspects agronomiques. Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Agriculture. 53 p.
- BOIFFIN J., 1984 - *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse Doc. Ing. INAPG, Paris, 320 p.
- BOLLINNE A., 1975 - La mesure de l'intensité du splash sur sol limoneux. Mise au point d'une technique de terrain et premier résultats. *Pédologie*, XXV, 3, 199-210.
- BOUDJEMLINE D., 1987 - *Susceptibilité au ruissellement et aux transports solides de sols à texture contrastée. Etude expérimentale au champ sous pluies simulées*. Thèse Doct. 3° cycle, Univ. d'Orléans, 264 p.

- BOUREGHDA S., 1988 - Influence des caractéristiques physiques (texture, état de surface) de divers sols à végétation naturelle ou cultivés sur leur susceptibilité au ruissellement et à l'érosion. Etude expérimentale au champ sous pluies simulées. Thèse Doct. 3^e cycle Univ. Orléans, 251 p.
- COSANDEY C., BOUDJEMLINE D., ROOSE E. et LELONG F, 1990 - Etude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozère. *Z. Geomorph.*, 34, 1, 61-73.
- COULON E., 1985 - *Contribution à l'étude de l'évolution de l'état structural et du comportement hydrique de sols sableux en contexte légumier du Val de Loire*. Rapport DEA RMM, Univ. Orléans, 79 p + annexes.
- COULON E., 1988 - *Conséquences du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Contribution à la connaissance des mécanismes de compactage*. Thèse Doct. Univ. Orléans, 242 p
- DE PLOEY J., 1983 - Runoff and rill generation on sandy and loamy topsoils. *Zeitschrift fur geomorphologie*, Suppl. Bd 46, pp 15-23.
- DUPRAZ C., 1984 - *Bilan des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins versants comparatifs à végétation contrastée (Mont Lozère, France)*. Thèse Doct. Ing. Univ. Orléans, 363 p.
- DURAND P., 1989 - *Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pelouse, hêtraie, pessière) de moyenne montagne granitique (Mont Lozère, France)*. Thèse Univ. Orléans, 193 p.
- FIES J.C., 1984 - Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile - squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral et les données fournies par la porosimétrie à mercure. *Agronomie*, 4 (9), 491-499.
- GOVERS G., 1987 - Spatial and temporal variability in rill development processes at the Huldenberg experimental site. *Catena Suppl.* 8, 17-34.
- GRABA L., 1986. *Sensibilité au tassement de sols sableux du Val de Loire. Etude au laboratoire et en plein champ*. Rapport DEA RMM. Univ. Orléans, 71 pages.
- GRIL J.J. et LEYNAUD G., 1986 - Ruissellement et érosion hydrique sur les terres cultivées: besoins et perspectives de recherche. Soc. Hydro. Techn. de France, *XIX^{èmes} journées de l'Hydraulique*. Question I, rapport 1-13, 5 p.
- GUERIF J., 1982 - Compactage d'un massif d'agrégat: effets de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 2 (3), 287-94.
- HEUSCH B., 1970 - L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré- Rif occidental. *Annales de Rech. forestière du Maroc*, n° spécial, Etudes sur l'érosion, Rabat, 9-176.
- HENIN S., GRAS R., et MONNIER G., 1969 - *Le profil cultural*. Ed. Masson, Paris, 332 p.
- HILLEL D., 1974 - *L'eau et le sol. Principes et processus physiques*. Trad. L.W. DE BACKER, Vander. Ed. Paris, 288 p.
- HUDSON N.W., 1973 - *Soil conservation*. Bastford, London, 320 p
- JARRY F., 1987 - *Le ruissellement sur les terres agricoles. Approche par simulation de pluies et par télédétection*. Thèse Doct. Univ. Paris 7, 276 p.
- LAFFORGUE A. et NAAH, 1976 - Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cahiers ORSTOM, Ser. Hydrol.* 13, 3, 115-237.
- LE BISSONNAIS Y., 1988 - *Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse Doct., Univ. Orléans 196 p. + annexes.

- MONNIER G., STENGEL P., 1982 - Structure et état physique du sol. 4. Genèse et évolution de la structure. 5. Correction des comportements structuraux. *Techniques Agricoles*, 12, 1-18.
- PIHAN J., 1978 - Annuaire des valeurs mensuelles de l'indice d'érosivité R de Wischmeier relatives aux stations officielles de la Météorologie Nationale française. Rapport INRA, Rennes, 112 p.
- POESEN J., 1985 - An improved splash transport model. *Zeitschrift für geomorphologie*, 29, 2, 373-382.
- POESEN J., 1987 - Transport of rock fragments by rill flow. A field study. *Catena supplement* 8, 35-54.
- RAHELIARISOA M.A., 1986 - *Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et sur la sensibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux*. Expérimentation au champ sous pluies simulées en Région Centre. Thèse Doct. Univ. Orléans, 297 p.
- ROOSE E.J., 1973 - *Dix sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de Basse Côte d'Ivoire*. Thèse doct. Ing. Fac. Sci. Abidjan, 125 p.
- ROOSE E.J., 1980 - *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques sous végétations naturelles ou cultivées*. Thèse Doct., Univ. Orléans, 587 p.
- ROOSE E.J. et LELONG F., 1976 - Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. Etude sur petites parcelles expérimentales. *Rev. Géog. physique et géol. dyn.*, 18, 4, 365-74.
- ROOSE E.J. & CAVALIE J., 1988 - New strategy of water management and soil conservation. Application in developed and developing countries. In : "land conservation for future generations" Proceedings Int. Conf. ISCO5, Bangkok. S. Rimwanich ed., 913-924.
- SAVAT J. & DE PLOEY J., 1982. Sheetwash and rill development by surface flow. In *Badlands, Geomorphology and Piping*, R. Bryar and A. Yair (Eds), Geo. Books, Univ. East Anglia, U.K., 113-126.
- TREVISAN D., 1982 - *Pédogenèse et typologie des sols de trois bassins versants du Mont Lozère*. DEA, Univ. Nancy, 84 p.
- TREVISAN D., 1986 - *Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion de sols limoneux cultivés. Etude expérimentale au champ sous pluies simulées*. Thèse Doct. 3^e cycle, Univ. Orléans, 244 p.
- TREVISAN D. et LELONG F., 1992. Influence de la dégradation structurale superficielle sur le ruissellement enregistré sous pluies simulées. *Sci. sol*, 30, 4, 249-261.
- VALENTIN C., 1981 - *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région sub-désertique. Dynamique de formation et conséquences sur l'économie de l'eau*. Thèse doct. 3^e cycle, Paris VII, 230 p.
- VIANI J.P., 1986 - *Contribution à l'étude expérimentale de l'érosion hydrique*. Thèse Doct. Ecole Polytech. Fédérale de Lausanne, 221 p.



SCIENCE DU SOL



1993 - VOL. 31 - N° 4
OCTOBRE - NOVEMBRE-DÉCEMBRE
ISSN 0767-2853

22 MARS 1995

ORSTOM Fonds Documentaire

N° 44.222.101

Cote B

11 P6