

Facteurs d'érodibilité des sols limoneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux

Micheline EIMBERCK

INRA-SESCPF-Orléans

RÉSUMÉ

D'après les observations menées en Pays de Caux (plateau limoneux à pentes faibles et conditions climatiques modérées), l'érosion chronique est principalement linéaire, localisée dans les talwegs et étroitement liée à la concentration du ruissellement diffus formé sur l'ensemble du bassin-versant, et ce, avec des pluies très faibles.

— Dans l'impluvium, la formation du ruissellement est due à la diminution de l'infiltrabilité du sol et de la détention superficielle, diminution liée à la dégradation structurale de surface sous l'action des pluies et/ou au compactage par les engins agricoles.

Cette dégradation est fonction des caractéristiques intrinsèques des matériaux et de facteurs contingents : état et histoire hydriques, taille initiale des agrégats, statut organique de la couche labourée. Nos suivis de terrain montrent qu'il existe une interaction de ces différents paramètres et qu'il est difficile de traduire la sensibilité du sol à la battance par un indice unique.

— Dans la zone de concentration du ruissellement, les risques d'érosion dépendent, au contraire, de la résistance du sol à l'arrachement par un écoulement concentré, fonction essentiellement de sa compacité, et de la présence ou non d'un couvert végétal.

En conclusion, il apparaît donc, d'une part une disjonction spatiale et fonctionnelle des phénomènes de ruissellement et d'érosion dans les bassins-versants, et, d'autre part, une variabilité des déterminants de chacun des phénomènes. La complexité du système rend donc difficile l'utilisation d'un indice unique pour prévoir l'érodibilité de nos sols limoneux.

MOTS-CLÉS : Dégradation structurale — Erosion concentrée — Infiltrabilité — Texture — Histoire hydrique — Statut organique — Calibre initial — Croûte de battance — Détention superficielle — Compacité du sol.

ABSTRACT

ERODIBILITY FACTORS FOR LOAMY SOILS : REFLEXION ABOUT THE CASE OF PAYS DE CAUX

In Pays de Caux (loamy plateau between Seine and Somme rivers, characterized by gentle slopes and moderate climatic conditions), in a context of intensive agriculture, frequent erosion is of "ephemeral gully" type and mainly occurs in thalwegs, it results of run-off concentration from the whole watershed, even with very weak rainfall. — In the catchment, the generation of a non erosive overland-flow is to the soil infiltrability and surface storage decreases related to soil crusting and/or wheel-tracked compactness.

Structural rainfall degradation of the soil surface is depending on soil constitution properties and others parameters such as moisture evolution, organic matter content, initial size of agregates, soil moisture conditions during tillage. Data show interaction between all these parameters and the difficulty to define the degradation sensibility of soil surface with just one index.

— On the contrary, *in the concentration run-off area*, erosion risks depend on the soil resistance to critical tractive force mainly related to the compaction's degree, and to the occurrence of vegetation.

In conclusion, it appears, on the hand, that a spatial and functional distinction exists between non erosive overland flow and gully erosion in water-sheds ; and on the other hand, we observe an important variability of parameters for each phenomenon. So, because of the complexity of the system, it seems difficult to predict erodibility of our loamy soils with a single index.

KEY WORDS : Structural rainfall degradation — Gully erosion — Infiltrability — Texture — Moisture evolution — Organic matter content — Initial fragments' size — Soil crusting — Surface storage — Compactness.

RESUMEN

LOS FACTORES RELATIVOS A LA ERODIBILIDAD DE LOS SUELOS LIMOSOS : REFLEXIONES BASADAS EN EL CASO DE LA REGIÓN DE CAUX

Según las observaciones hechas en la región de Caux (llanura limosa con pendientes suaves y condiciones climáticas moderadas), la erosión crónica es principalmente lineal, se localiza en los talwegs y está estrechamente ligada con la concentración del escurrimiento difusa observada en el conjunto de la cuenca hidrográfica con precipitaciones muy bajas.

— En la cuenca hidrográfica, la formación del escurrimiento se debe a la disminución de la infiltrabilidad del suelo y de la almacenamiento superficial que está ligada con la degradación estructural de la superficie bajo la acción de las lluvias y/o con la compactación por la maquinaria agrícola.

Esa degradación depende de las características intrínsecas de los materiales y de los factores contingentes : estado y histórica hídricos, la tamaño inicial de los agregados, el contenido de materia orgánica de la capa labrada. Nuestras observaciones de suelos muestran que hay una interacción de esos diferentes parámetros y que es difícil de evaluar la sensibilidad del suelo a formar una costra superficial por un índice único.

— En la zona de concentración del escurrimiento, los riesgos de erosión dependen, por lo contrario, de la resistencia del suelo al arranque por el escurrimiento concentrada que depende esencialmente de su compacidad y de la presencia o no de una cobertura vegetal.

En conclusión, se observan, por una parte, una disyunción espacial y funcional de los fenómenos de escorrentía y de erosión en las cuencas hidrográficas y, por otra parte, una variabilidad de los determinantes de cada uno de los fenómenos. Por consiguiente, la complejidad del sistema hace difícil de utilizar un índice único para prever la capacidad de erosión de nuestros suelos limosos.

PALABRAS CLAVES : Degradación de estructura — Erosión concentrada — Infiltrabilidad — Textura — Histórica hídrica — Contenido de materia orgánica — Calibre inicial — Coraza de disgregación — Almacenamiento superficial — Compacidad del suelo.

Devant l'importance des problèmes liés à l'augmentation du ruissellement et à l'érosion des terres cultivées (BOLLINE, 1982 ; AUZET, 1987 ; LILIN et PAULET, 1987), une « action-pilote » — destinée à mettre au point et diffuser des mesures de protection des sols — a été engagée, fin 1984, à la demande des instances de la région Haute-Normandie, par les ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, en concertation avec les organisations professionnelles.

Les résultats présentés dans cet article sont tirés de l'étude scientifique confiée à l'INRA dans le cadre de cette opération (1).

INTRODUCTION - DÉFINITION DU PROBLÈME

Le Pays de Caux appartient au système des grands plateaux crayeux à couverture limoneuse du nord-ouest de la France. Les principales caractéristiques sont :

— *Un relief peu accentué* : des plateaux mollement ondulés, avec des pentes longues et faibles à modérées (1 à 4 % sur les sommets, 8 à 10 % sur les versants).
— *Une couverture pédologique* à dominance de sols limoneux bruns faiblement lessivés, sains, légèrement acides. L'horizon de surface de texture limoneuse (A :

(1) Les résultats exposés sont extraits du rapport de J. BOIFFIN et son équipe (1986) et de nos propres travaux effectués en collaboration à partir du printemps 1986.

11,5/14 ‰ ; L : 60/62 ‰ ; S : 25/28 ‰) est très instable ($\text{Log } 10 S \approx 1,9$).

— *Un parcellaire* de grandes dimensions, à forte continuité entre les parcelles.

— *Des systèmes de production* à base de cultures céréalières et industrielles, et/ou d'élevage intensif.

— *Sur le plan climatique*, un régime de pluies abondantes (750 à 1 100 mm/an), surtout en automne et en hiver, mais de faible intensité (PINGUET, 1985) puisque le temps de retour d'une pluie journalière de 40 mm est de 5 à 10 ans. Il en résulte que les indices d'érosivité climatique (terme R de l'USLE) sont parmi les plus faibles de France (PIHAN, 1979).

Selon la méthode américaine de diagnostic et de prévision (WISCHMEIER et SMITH, 1965), on pourrait penser que la région étudiée se caractérise par des risques faibles (pluies peu érosives, pentes faibles). Or, si l'on en juge par la gêne apportée aux opérations culturales et aux dégâts d'aval (zones d'habitation), *l'érosion existe et peut même devenir préoccupante*.

L'érosion en Pays de Caux présente les caractéristiques suivantes (J.F. OUVRY, 1982 ; BDPA, 1984 ; IGN, 1985...) :

— l'essentiel des pertes en terre est lié au fonctionnement temporaire mais chronique d'un réseau de rigoles de grandes dimensions, très espacées les unes des autres, et localisées dans les talwegs ;

— l'apparition de toutes les figures d'érosion, y compris les plus petites, est plutôt liée à la collecte du ruissellement dans l'impluvium, qu'à des seuils topographiques précis ;

— la variabilité interannuelle des figures d'érosion porte sur la chronologie de la formation et sur les dimensions des rigoles, mais non sur leur localisation qui apparaît prédéterminée par le modelé du terrain.

Par ailleurs, toutes les zones de dépôts sont raccordées aux zones d'incision linéaire.

Il ressort de ces observations que *l'essentiel du détachement de matière solide est le fait du ruissellement concentré* et que l'effet du *splash* est limité dans l'érosion proprement dite. Les inter-rigoles sont larges et de pente faible, ce qui accroît les chances de resédimentation de la matière ainsi arrachée. Selon GOVERS (*communication orale*), plus la longueur des pentes augmente, moins la contribution du splash aux pertes en terre est importante.

Aussi, le problème de l'érosion et donc de l'érodibilité des sols doit-il — dans le type de contexte étudié

— être analysé de façon spécifique et différente de celle que tend l'équation universelle des pertes en terre (USLE).

Choix des principes de base de l'étude

Sur le tableau I nous avons figuré les paramètres intervenant dans la formation, la concentration et l'effet érosif du ruissellement au sein des trois grandes zones fonctionnelles d'un bassin-versant (fig. 1).

La production de ruissellement peut avoir lieu même pour des pluies d'intensité très faible et des hauteurs totales inférieures à 10 mm (tabl. II). Ce ruissellement reste non érosif tant que les pentes sont inférieures à un certain seuil (3 à 5 ‰ pour les sols limoneux d'après SAVAT et DE PLOEY, 1982).

Notre hypothèse de travail a reposé sur l'existence d'une étroite relation entre la dégradation structurale des couches de surface du sol et l'érosion.

Nous avons donc mesuré la vitesse de dégradation superficielle en fonction de différents paramètres, sous pluies naturelles et dans diverses situations culturales et climatiques (saisons) et avec des états initiaux variés (1).

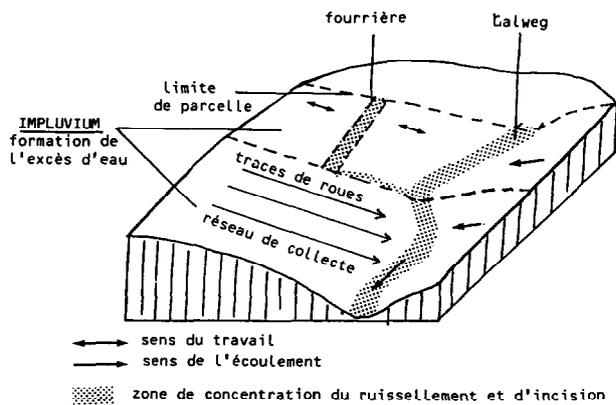


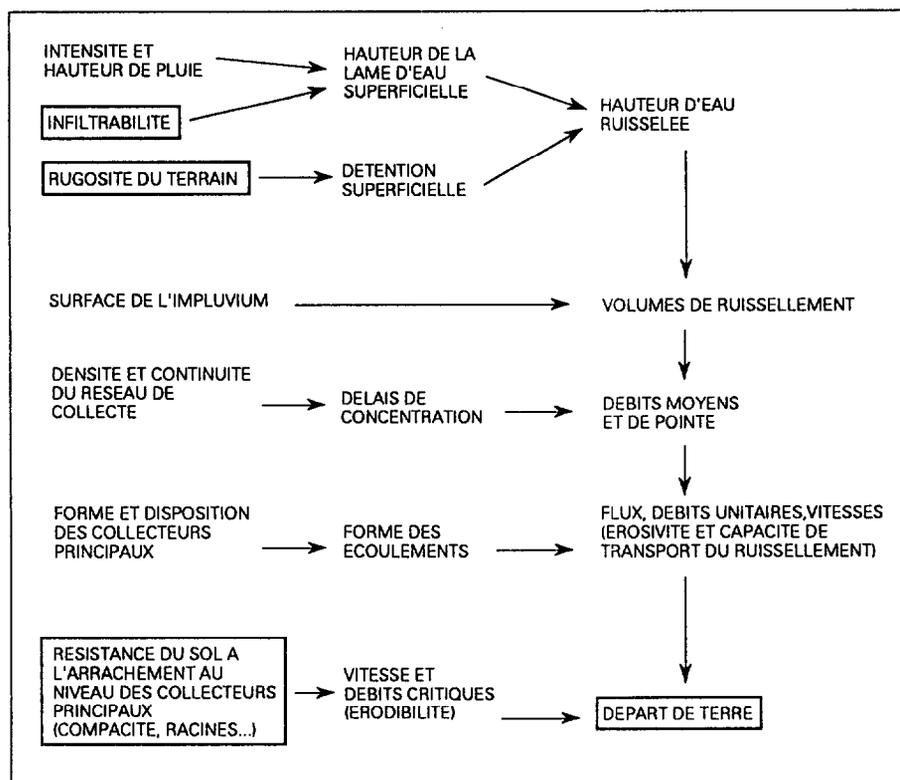
FIG. 1. — Décomposition spatiale et fonctionnelle d'un bassin-versant élémentaire (d'après J.F. OUVRY).
Spatial and functional analysis of elementary watershed.

Puis nous avons cherché à la relier à l'apparition des symptômes d'érosion (suivi de sites de surveillance).

Les 7 bassins-versants qui ont fait l'objet de plusieurs campagnes de suivis, sont représentatifs du Caux maritime et regroupés dans le secteur Pointe-du-Havre. Ils ont été choisis avec un *maximum d'homogénéité au plan pédologique et topographique*, et les stations d'observation placées en excluant les zones de forte pente, d'écoulement ou de stagnation d'eau.

(1) L'état initial ou état zéro est l'état fragmentaire au moment du semis.

TABLEAU I
Facteurs intervenant dans la formation et la collecte du ruissellement et dans l'érosion linéaire
Factors influencing runoff formation, gathering and linear erosion



Le rôle des systèmes de culture et des techniques culturales étant développé par ailleurs (J.F. OUVRY, voir p. 157), nous nous limiterons plus spécifiquement à ce qui concerne le rôle de paramètres en rapport avec l'état du sol.

FACTEURS DE SENSIBILITÉ DES SOLS À L'ÉROSION

Formation de l'excès d'eau

A un instant T, la répartition de la pluie entre infiltration et excès d'eau superficiel dépend de l'intensité pluviométrique et du fonctionnement hydrodynamique du sol, fonction de son état physique et hydrique (MONNIER *et al.*, 1986). On a donc excès d'eau si I_s (infiltrabilité du sol) < I_p (intensité pluviale).

— En Pays de Caux, I_p peut varier de 1 à 40 mm/h (ou plus, en cas d'orage violent avec un temps de retour ≥ 10 ans). Toutefois, plus de 65 % des pluies tombent avec des intensités inférieures à 5 mm/h.

— L'infiltration initiale I_s dans ces sols limoneux est élevée : 30 à 50 mm/h. Elle diminue avec la fermeture de la porosité, qui est liée dans les situations étudiées à deux causes principales :

- la destruction des mottes et la formation de croûtes de battance sous l'action mécanique et physique des pluies même de faible intensité selon le schéma proposé par J. BOIFFIN (1984) ;
- le compactage sous l'action des pièces mécaniques et des pneumatiques (cas des traces de roues).

La figure 2 schématise la cinétique de diminution de l'infiltrabilité lors de la transformation des couches superficielles de sols limoneux du Pays de Caux. On voit qu'elle suit les deux grandes phases d'évolution de la surface :

1. Elle passe très rapidement de 50 mm/h à 5 mm/h du début de la formation des croûtes structurales à l'apparition ponctuelle de croûtes sédimentaires, (passage phase F1/phase F2), pour des pluies cumulées de 50 à 70 mm.

TABLEAU II
Epouville — Printemps 1987 automne/hiver 1987/88 — Caractéristiques de pluies ayant provoqué des ruissellements
Salient features of rainfalls causing runoffs

Période de mesure	Caractéristique des précipitations			Culture ou interculture	Faciès de surface	Absence ou présence de ruissellement
	Hauteur totale Pmm	Pmm l < 5 mm/h	Pmm l > 5 mm/h			
30-03-87 au 2-04-87	11	11	-	blé	F2	++
2 au 6-04-87	18,2	17,8	0,4	blé	F2	++
6 au 7-04-87	4,8	4,2	0,6	id.	id.	+
7 au 13-04-87	3,9	3,9	-	id.	id.	(+)
6 au 12-11-87	14,3	10	4,3	déch.	F1/F2	+
12 au 16-11-87	61,5	52,7	8,8	id.	F1/F2	+
16 au 19-11-87	26,8	-	-	id.	F2	+
31-12-87 au 5-01-88	30,5	23,7	6,8	id.	F2 généralisé	++
5 au 6-01-88	18,1	14,5	3,6	id.	id.	+++
6 au 7-01-88	3,4	-	-	id.	id.	+
7 au 11-01-88	24,9	21,7	3,2	id.	id.	++

Cependant la somme des pluies cumulées nécessaire peut être multipliée par 2 à 4 et atteindre 150 mm (cf. fig. 4), si des périodes de dessiccation interviennent entre les différents épisodes pluvieux.

2. la diminution de I_s se poursuit ensuite très lentement au cours de l'épaississement des croûtes de dépôt (phase F2), pour se stabiliser vers 1 mm/h valeur plancher, inférieure aux pluies les plus habituelles.

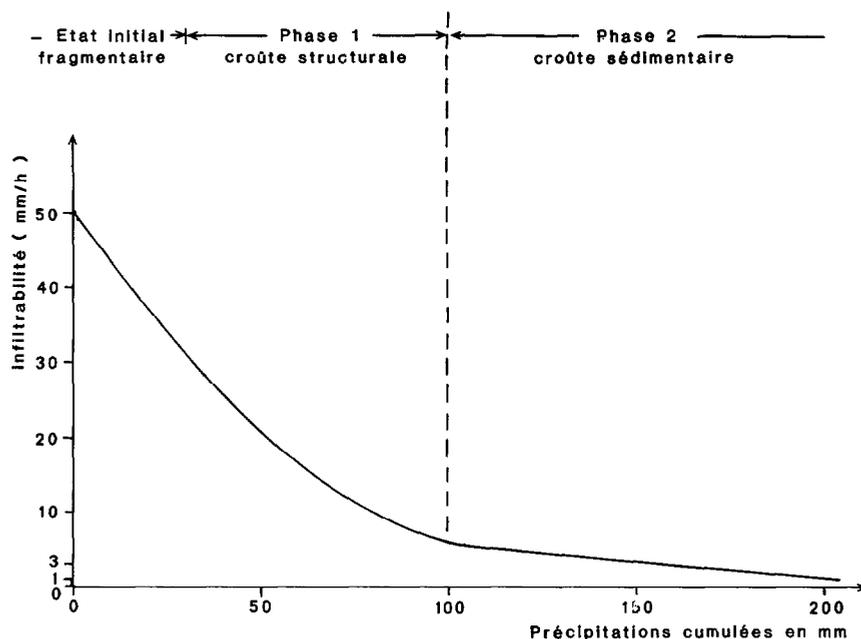


FIG. 2. — Cinétique de la diminution de l'infiltrabilité du sol (I_s) en fonction de l'extension d'une croûte de battance.
Kinetics of soil infiltrability decrease according to sealing crust extension.

Au niveau des zones compactées (traces de roues, etc.) les valeurs initiales d'infiltrabilité sont très faibles (3 à 5 mm/h) et atteignent rapidement la valeur plancher de 1 mm/h.

Des valeurs voisines ont été données pour d'autres régions limoneuses, notamment, dans le Faux-Perche (TREVISAN, 1986), en Lauragais (ROOSE et CAVALIE, 1988) sous pluie simulée. Cependant, les intensités des pluies obtenues dans ces conditions (> 40 mm/h) sont très supérieures à celles des pluies naturelles du Pays de Caux et rendent la comparaison difficile.

INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX SUR L'ÉVOLUTION DE L'INFILTRABILITÉ

Les travaux de J. BOIFFIN (1984) et ceux de Y. LE BISSONNAIS (1988) ont montré que trois processus principaux concourent à la destruction des agrégats : l'éclatement total, la microfissuration par éclatement partiel et la désagrégation mécanique sans éclatement à l'état saturé (tabl. III).

A. Influence des caractéristiques des matériaux

On sait que l'intensité de la dégradation structurale dépend en grande partie de la cohésion à l'état humide, de la porosité et de la mouillabilité des matériaux, caractéristiques directement liées aux propriétés de constitution :

— *Texture au sens large* : composition granulométrique, répartition des classes de tailles, arrangement des constituants (KHEYRABI et MONNIER, 1968 ; FIES, 1970 ; MONNIER et STENGEL, 1982). Sur la figure 3 on voit que les matériaux du Pays de Caux se situent au pôle le plus instable du triangle textural du GEPPA renseigné en classes de stabilité, soit des valeurs de log. 10_s de 2,6 à 3,0. Cette caractéristique de constitution est essentielle puisqu'elle détermine en grande partie la rétention en eau et la cohésion à l'état humide (LE BISSONNAIS, 1988).

— *Nature minéralogique des constituants* et en particulier de la phase argileuse (HENIN et BOSQUET, 1964 ; CUADRADO SANCHEZ, FIES et MONNIER, 1970 ; IMESON et JONGUERUS, 1976 ; MONNIER et STENGEL, 1982...) qui détermine principalement le potentiel de gonflement.

— *Etat ionique*, et notamment la présence de certains éléments comme le sodium échangeable.

B. Influence des facteurs contingents

Cette deuxième série de paramètres (plus spécialement étudiés) est variable dans la mesure où elle résulte de l'intervention de facteurs techniques liés aux systèmes de cultures (calendrier de travail, type de préparation de sol, etc.) et au climat.

TABLEAU III
Processus majeurs de désagrégation structurale
Major processes of structure physical weathering

PROCESSUS	Désagrégation par éclatement total	Désagrégation par éclatement partiel	Désagrégation sans éclatement
PRINCIPAUX AGENTS	Compression de l'atmosphère interne	Gonflement potentiel	Choc des gouttes
ETAT INITIAL	Sec	Humide non saturé	Saturé
1 / Principaux caractères intrinsèques	-Texture (composition granulométrique, nature et arrangement des constituants) - Mouillabilité		
		- Nature de la phase argileuse	- Etat ionique - Cohésion à l'état humide
2 / Principaux facteurs contingents	- Histoire hydrique - Statut organique (Calibre initial)		- Etat ionique

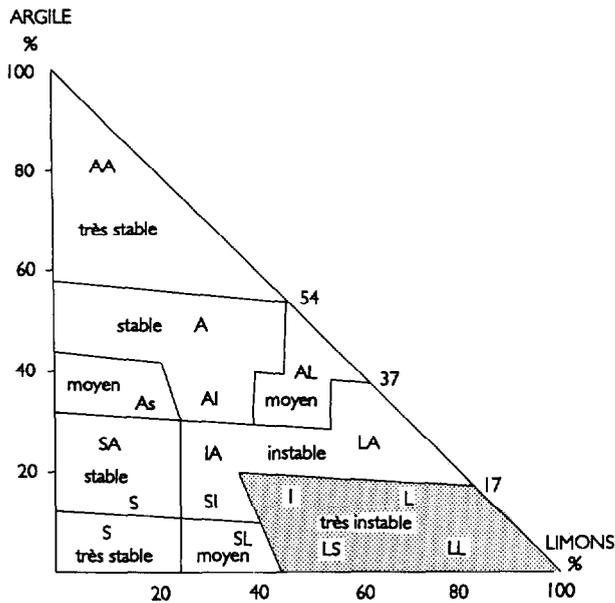


FIG. 3. — Triangle textural du GEPPA renseigné en classes de stabilité (d'après MONNIER et STENGEL, 1982).
 GEPPA textural triangle giving information about structure stability classes.

• Influence de l'histoire hydrique

Différents auteurs (dont MONNIER et KONAN, 1968 ; SEBILLOTTE, 1968) ont montré le rôle stabilisateur du séchage des mottes avant l'agression des pluies. Nos observations — tant d'hiver que de printemps — confirment cette influence sur le comportement d'une même gamme de matériaux.

Sur la figure 4, on a comparé l'évolution du critère D_{min} (diamètre minimum du plus petit fragment non incorporé à la croûte — cf. BOIFFIN, 1984) pour un même sol ayant subi deux histoires hydriques différentes :
 Courbe A : le sol travaillé à l'état humide pour un semis de blé d'hiver et soumis à des pluies quotidiennes a présenté une fermeture totale de sa surface après 75 mm de pluie.

Courbe B : le même sol, travaillé à l'état frais pour un semis de betteraves sucrières tardif et soumis à 20 jours de dessiccation, avant les premières pluies, a conservé un état fragmentaire au-delà de 130 mm de pluie, jusqu'à sa protection par les feuilles.

Remarque : Il faut souligner que l'état hydrique du sol au moment du travail était différent dans les deux cas ; cette variable peut fort bien interférer avec l'histoire hydrique dans le comportement du matériau.

La figure 5 illustre l'influence de la durée de séjour à l'état sec des fragments de surface sur leur sensibilité à la désagrégation.

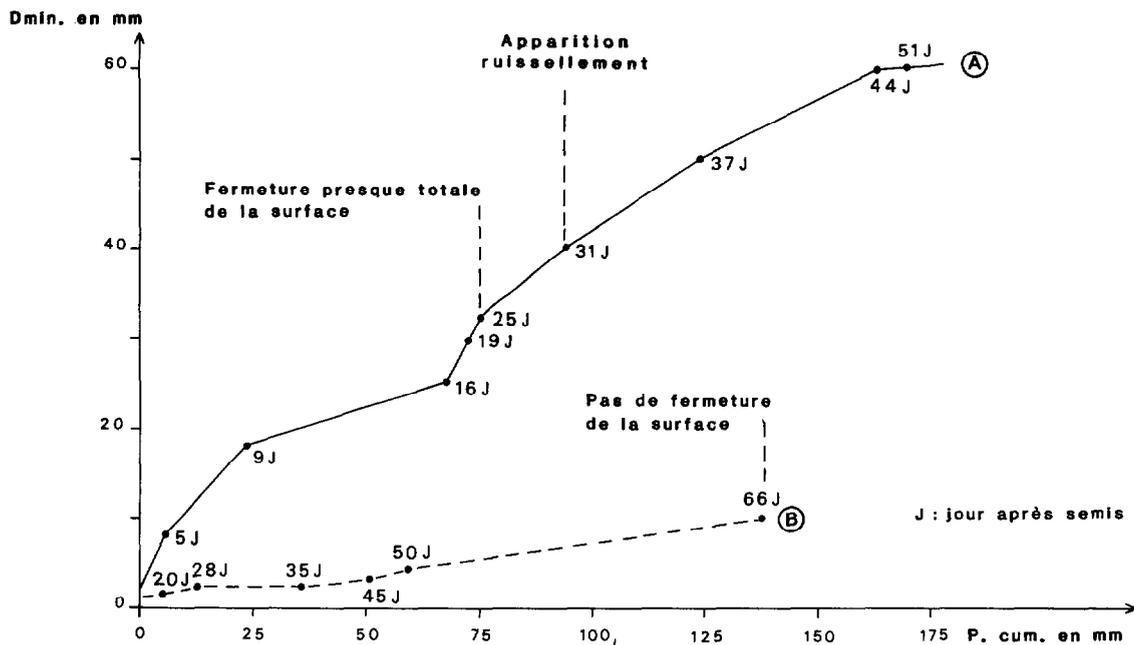


FIG. 4. — Influence de l'histoire hydrique sur la vitesse de désagrégation des fragments de surface.
 Moisture story effect upon physical weathering speed of surface fragment.

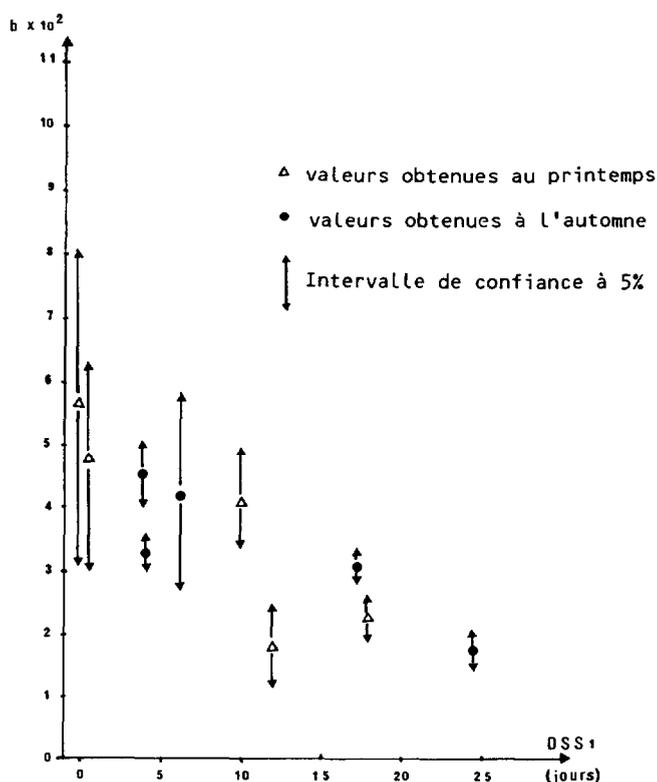


FIG. 5. — Influence du temps de séchage sur la sensibilité à la battance : $D_{min.} = a + b KE5$; b = valeur de la pente de la régression ; $D_{min.} = a + b KE5$; $KE5$ = énergie cinétique des pluies d'intensité ≥ 5 mm/h .
Drying time effect upon sensitiveness to sealing.

On constate une bonne correspondance entre les variations de b (indice de sensibilité à la battance) et le type d'histoire hydrique : valeurs de b faible, pour une dessiccation prolongée, élevée pour une histoire hydrique humide.

Sur le terrain on constate, en effet, que les semis les plus précoces au printemps, les plus tardifs à l'automne, se dégradent plus vite que les semis tardifs de printemps et précoces d'automne qui bénéficient plus souvent d'une dessiccation prolongée après travail (BOIFFIN *et al.*, 1986).

• Influence du statut organique

Agissant essentiellement sur la mouillabilité du sol (surtout en début d'humectation) les matières organiques ont une influence positive sur la stabilité structurale (MONNIER, 1965 ; MONNIER et STENGEL, 1982) ; cette influence est liée à la fois à la quantité, à la nature (GUERIF, 1982) et à la localisation des matières organiques à la périphérie des agrégats (BOIFFIN et FLEURY, 1974).

Toutefois, l'effet de la matière organique sur la stabilité structurale ne devient sensible que pour des teneurs très élevées, 3 à 4 %, très supérieures aux teneurs habituelles de 1,5 à 1,8 %.

La figure 6 compare les courbes d'évolution du paramètre D_{min} pour des stations sous cultures de printemps (lin, betterave sucrière) et d'hiver (blé) présentant des statuts organiques différents :

— On constate que l'effet de la matière organique sur la vitesse de formation des croûtes n'est sensible que pour les teneurs très élevées (B2, BS) correspondant à

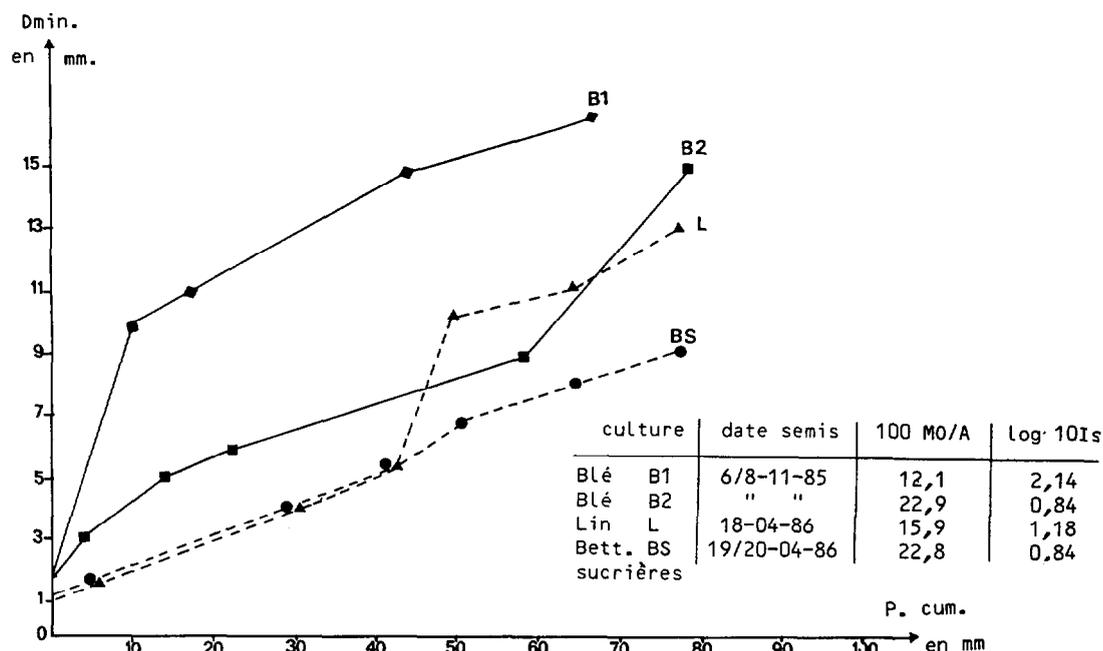


FIG. 6. — Evolution du critère D_{min} . en fonction du statut organique.
 D_{min} . criterion evolution according to organic state.

TABLEAU IV

Exemples d'interaction texture × matière organique sur la stabilité structurale (d'après MONNIER et STENGEL, 1982)

(Les sols du Pays de Caux correspondent aux sols n° 1 et n° 2)

Effect of texture × organic matter interaction upon structure stability

Sol	Argile %	Teneur seuil en M. O	Stabilité d'origine texturale	Stabilité en présence de Matières organiques			
				1 %	2 %	3 %	4 %
Sol n° 1 sable limoneux	8	0.6	2.5 très instable	1.15 stable	0.9 très stable	très stable	
Sol n° 2 limon	15	1.05	2.5 très instable	2.5 très instable	2.10 très instable	1.85 instable	1.55 passable
Sol n° 3 limon argileux	25	1.75	1.9 instable	1.9 instable	1.75 instable	1.6 passable	1.4 passable
Sol n° 4 argile	50	3.5	1.2 stable	1.2 stable	1.2 stable	1.2 stable	0.75 très stable

des retournements récents de prairies pour lesquelles le rapport $MO/A \times 100 > 20$. Ceci concorde avec les résultats obtenus expérimentalement par MONNIER et STENGEL, 1982 (tabl. IV).

— On remarque également que l'effet est plus sensible sous culture d'hiver que sous culture de printemps. On peut expliquer ceci peut-être par le fait qu'une dessiccation plus importante au printemps masque le rôle de la matière organique.

Au total, il semble que dans nos sols cultivés, l'effet « statut organique » ne soit pas significatif en deçà de seuils très élevés.

Ceci confirme les conclusions obtenues antérieurement par J. BOIFFIN (1984) et suggère que l'indice de stabilité structurale issu du test d'analyse d'agrégats a tendance à exagérer le rôle bénéfique des matières organiques.

• Influence du calibre initial des fragments

Cette variable est définie par la distribution dimensionnelle des mottes et résulte à la fois de facteurs techniques et de la constitution intrinsèque du matériau, une même préparation de sol donnant des résultats différents selon la texture du sol (voir J.F. OUVRY p. 157).

Ce paramètre a très peu d'influence sur la vitesse de fragmentation des agrégats (fig. 7). En revanche, il est déterminant pour l'extension des plaques structurales formant la croûte comme le montrent nos mesures : tous les agrégats < 10 mm sont soudés après 50 à 70 mm de pluies cumulées ; l'intégration des mottes plus

grosses (10-30 mm) nécessite au contraire 100 à 200 mm supplémentaires.

Ces résultats sont illustrés (fig. 8) par les courbes d'évolution du pourcentage de surface couverte par les plaques structurales en fonction des pluies cumulées. La courbe 1 correspond à une préparation très affinée et la courbe 2 à une préparation motteuse.

Ce paramètre intervient donc indirectement sur la cinétique de la diminution de l'infiltrabilité. Son influence peut être accrue s'il est associé à une compaction entraînant un obstacle au ressuyage à la base du lit de semence (fig. 8, courbe 3 : semis de lin roulé).

INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX SUR LA VALEUR PLANCHER DE L'INFILTRABILITÉ

Lorsque les croûtes sédimentaires sont généralisées, l'infiltrabilité se stabilise à des valeurs très faibles de l'ordre de 5 à 1 mm/h en moyenne.

L'analyse micromorphologique et les mesures de densité sur fragments de croûtes (BOIFFIN, 1984 ; BOIFFIN et BRESSON, 1987 ; VALENTIN, 1981) ont montré qu'il s'agissait de fines couches à organisation plus ou moins compacte, dépourvues de porosité structurale dans le cas des croûtes sédimentaires les plus évoluées.

La structure de ces croûtes et leur infiltration semblent liées à :

— La cinétique de formation (LE BISSONNAIS, BRUAND, JAMAGNE, à paraître). Si la croûte se forme lentement, l'infiltrabilité reste relativement élevée.

— A leur densité sèche, liée aux différences texturales des matériaux (FIES et STENGEL, 1981). Pour un même

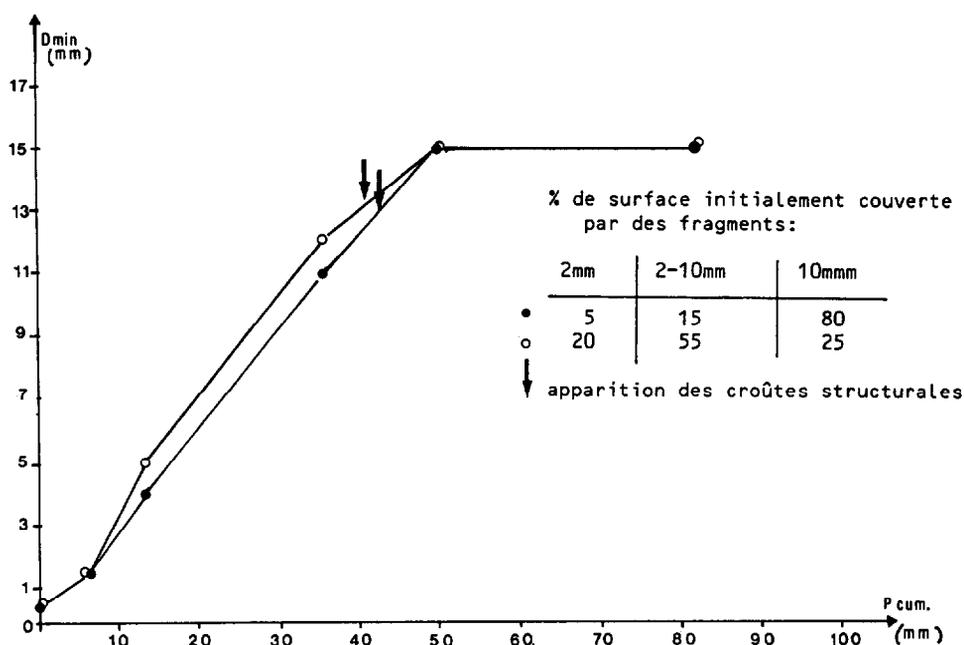


FIG. 7. — Evolution du critère D_{min} . en fonction du calibre initial des fragments.
 D_{min} . criterion evolution according to fragments initial size.

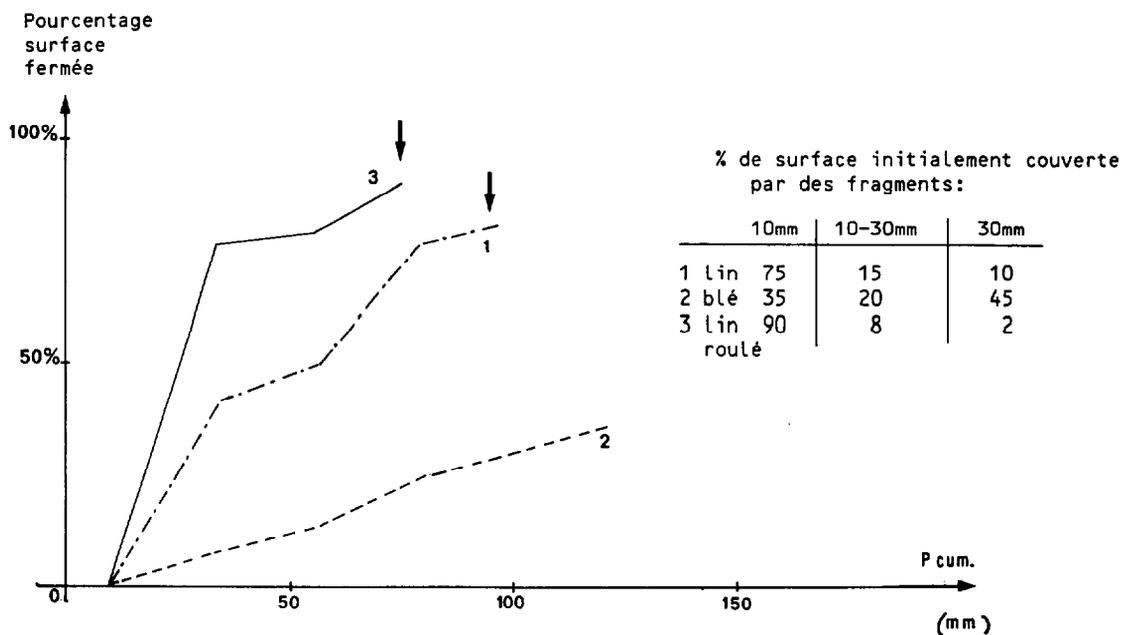


FIG. 8. — Influence du calibre initial des fragments sur la vitesse d'extension des croûtes.
Effect of fragments initial size upon crusts stretching speed.

TABLEAU V
Notes de rugosité et estimation de la détention superficielle équivalente
Rugosity marks and estimation of equivalent surface retention

Classe de rugosité 1	Ecart type des côtes de surface en cm 2	Détention superficielle en mm 3	Etat de surface	Infiltrabilité en mm/h	Type de dynamique	Situation correspondante
0	0 - 0,5	> 1	F2 généralisé	1	Ruissellement	Chantiers de récolte empruntes de roues
1	0,5 - 1,2	1 - 1,5	id.	1 - 2	Ruissellement (flaquage)	semis très battus ou rouleau Préparations très affinées
2	1,2 - 2,0	1,5 - 3	F1/F2	2 - 5	flaquage	Semis battus déchaum. dents battus en long déch. ss résidus
3	2,0 - 3,0	3 - 6	F1	5 - 30	flaquage temporaire + infiltration	Semis motteux déchaumages non altérés
4	> 3,0	> 6	F0	30 - 50	infiltration	Labours initiaux déchaumages non altérés

1 - Note donnée d'après observations

2 - Mesures faites par aspérimètre à aiguilles (BOIFFIN, 1984)

3 - Evaluation à partir du modèle de ONSTAD (1984) pour une pente de 2 %

stade de fermeture (100 % de croûte structurale), J. BOIFFIN (1984) a observé des différences importantes de valeurs de l'infiltrabilité calculée dans le cas d'un sol limono-argileux ($A = 20 \%$, $I_s = 0,6 \text{ mm/h}$) et dans celui d'un sol limoneux ($A = 10 \%$, $I_s = 6,6 \text{ mm/h}$) dont les densités étaient respectivement 1,75 et 1,58.

— De plus, la question reste posée du rôle de la matière organique sur la cohésion des croûtes et sur leur perméabilité.

Quoi qu'il en soit, ces valeurs plancher très faibles suffisent à provoquer, dès le début des pluies d'intensité très faible, l'apparition d'un excès d'eau superficiel (tabl. II).

CONCLUSIONS

Les résultats que nous venons de présenter montrent donc que la dégradation superficielle des couches de surface sous l'action de la pluie est liée à la combinaison de deux types de facteurs :

- de facteurs de *constitution* qui ont un poids différent, selon le processus de désagrégation considéré ;
- de facteurs *contingents* qui peuvent selon les situations devenir déterminants.

Tous nos suivis font ressortir une *très nette interaction entre ces différents* paramètres, le poids respectif de chacun étant difficile à bien évaluer, dans le cas d'expérimentation en conditions naturelles. Ils montrent que la corrélation négative entre érodibilité et stabilité structurale n'est ni étroite ni systématique.

Tout ceci suggère que l'indice d'instabilité structurale issu des tests d'analyse d'agrégats (qui privilégient trop le processus d'éclatement) ne permet pas de traduire les comportements structuraux variés observés sur le terrain et, de ce fait, de prévoir la vitesse de formation des croûtes et leur variabilité. Dans le contexte sols limoneux en région de grande culture, les meilleurs indicateurs de la sensibilité des matériaux à la battance semblent devoir être tirés du suivi morphologique de la formation des croûtes *in situ*.

Facteurs liés au sol intervenant dans la concentration du ruissellement et son érosivité

Pour que l'excès d'eau se transforme en ruissellement, deux conditions doivent être remplies :

- que l'eau non infiltrée soit supérieure à la capacité de stockage du microrelief (rugosité),
- qu'elle soit évacuée par un réseau continu de collecte.

TRANSFORMATION DE L'EXCÈS D'EAU EN RUISSELLEMENT

Influence de la rugosité de surface (microrelief)

• La capacité de stockage du microrelief ou *détention superficielle* (Ds) dépend :

- de la *rugosité initiale* (hauteurs, formes du microrelief) de la parcelle, liée aux façons culturales (voir J.F. OUVRY p. 157) ;
- de l'*abaissement de ce microrelief* sous l'effet de la pluie ;
- de la *pente* et de la *disposition des motifs* par rapport à la pente.

La caractérisation de la rugosité initiale et son évolution ont été étudiées au moyen de relevés aspérimétriques effectués périodiquement dans le sens du travail et perpendiculairement à ce sens : cette double mesure permet de caractériser la hauteur des motifs mais aussi leur continuité.

Le tableau V donne des valeurs de détention superficielle pour chacune des classes de rugosité établies pour les situations les plus couramment rencontrées sur le terrain.

Il ressort de nos observations que :

- l'infiltration est probablement influencée par les orifices de grande taille conservés dans certains types de modelés de surface comme les déchaumages par exemple ;
- la détention superficielle peut décroître vers des valeurs nulles, même s'il subsiste un modelé important, lorsque les zones en dépression sont lisses et communiquent entre elles (continuité).

Autrement dit, si la rugosité initiale est très fortement influencée par le mode de travail du sol (facteur technique), son évolution, en revanche, est étroitement liée aux caractéristiques de résistance des matériaux à l'action dégradante des pluies. On retrouve donc les notions de stabilité structurale et de caractéristiques intrinsèques des sols décrites précédemment.

• Une fois la capacité de stockage dépassée, le *ruissellement circule de façon plus ou moins complète et rapide selon le modelé* : plus celui-ci est orienté (empreintes de roues, traits de charrue...), plus la circulation est continue et linéaire (métrique à décimétrique).

L'efficacité de la collecte du ruissellement et sa concentration dépendent alors directement du réseau dont les caractéristiques (densité, longueur et largeur des éléments) sont déterminées par les systèmes culturaux

et les caractéristiques topographiques des bassins-versants élémentaires.

FACTEURS DE L'ÉROSION LINEAIRE DANS LES ZONES DE CONCENTRATION

Notre objectif étant limité à l'évaluation des risques d'érosion, nous n'avons pas étudié les pertes en terre proprement dites dont l'analyse a fait l'objet de nombreux travaux (cf. bibliographie). Nous avons simplement noté l'apparition, la localisation et l'évolution des incisions en relation avec l'état du sol et du couvert végétal dans la zone de concentration.

A. *Remarques générales*

— Dans tous les cas étudiés, la localisation privilégiée des incisions dans les talwegs et fourrières confirme que les *possibilités de concentration de l'eau sont plus déterminantes que la forme et la pente des versants*.

— *L'échantillonnage des sites a été suffisamment varié pour faire apparaître le caractère invariant des relations entre états de surface et apparition des rigoles*. Pour un site donné, l'apparition de rigoles est systématiquement consécutive à celles des croûtes sédimentaires, avec un décalage d'autant plus bref que le réseau de collecte est plus efficace.

B. *Principaux résultats*

Dans les zones de concentration maximale, la résistance du sol à la contrainte de cisaillement exercée par un écoulement concentré est déterminée par sa compacité et sa cohésion à l'état humide (caractères de constitution), et la présence ou l'absence d'un couvert végétal.

a) *Caractères de constitution*

La résistance du sol croît avec l'augmentation de sa cohésion à l'état humide (GOVERS *et al.*, 1987), sa teneur en argile, sa compacité (LYLE, SMERDON, 1965). Dans nos bassins-versants, l'incision est freinée pour deux types principaux d'horizons compactés (1) :

- les horizons travaillés, compactés par le passage d'engins,
- les horizons Bt argilo-limoneux des sols lessivés tronqués (texture et arrangement d'origine pédologique), rapidement mis à jour lorsque l'horizon travaillé et ameubli est dégagé.

b) *Existence d'un couvert végétal ou de résidus*

Sans pouvoir caractériser les effets de consolidation du couvert ou de résidus quantitativement, nous avons pu vérifier de façon qualitative leur rôle :

(1) Lorsque ces niveaux compacts sont entamés on observe alors une accélération de l'incision verticale.

- rôle d'écran protecteur si le recouvrement est suffisant, par division du flux (effet variable selon la morphologie du couvert selon DE PLOEY, 1982) ;
- rôle d'armature joué par les racines qui accroissent ainsi la résistance du sol au cisaillement (WEAVER, 1937).

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

En résumé, les résultats présentés montrent que les risques d'érosion (rigoles et ravines) dans les collecteurs principaux sont étroitement liés aux risques de ruissellement dans les impluviums.

1. L'apparition de l'excès d'eau, sa mise en circulation et sa concentration résultent de trois facteurs essentiels étroitement liés :

- une capacité d'infiltration du sol inférieure aux intensités pluviales,
- une détention superficielle inférieure à l'excès d'eau, non infiltrée,
- l'existence d'un réseau de collecte suffisamment dense et raccordé aux collecteurs principaux.

Dans tous les cas, on a affaire à des surfaces imperméabilisées, soit par une croûte de battance formée au cours de pluies successives, soit directement, par le compactage dû au passage d'engins.

2. En aval, au contraire, la sensibilité du terrain à l'érosion dans les collecteurs, dépend en premier lieu de son état de compacité.

Autrement dit, *pour une même variable* (état structural), *les critères de jugement vis-à-vis des risques d'érosion sont différents, voire opposés dans ce cas précis, selon la zone considérée* : impluvium ou zone de concentration.

Ceci confirme donc la nécessité de prendre en compte la spécificité des différentes zones du bassin-versant et, par conséquent, l'impossibilité de traduire par un indice unique la sensibilité d'un sol vis-à-vis des deux principaux processus : désagrégation sous l'action mécanique et physique des pluies et arrachement par un écoulement concentré.

Les résultats présentés sont essentiellement qualitatifs ; mais ils pourraient constituer le point de départ de mesures précises destinées à quantifier et à prédire, en fonction des épisodes climatiques et des systèmes de cultures, des comportements caractéristiques des sols limoneux de l'Europe du Nord-Ouest.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 23-10-1989.

BIBLIOGRAPHIE

- AUZET (V.), 1987. — L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. CEREG / ministère Environnement / ministère Agriculture. Octobre 1987.
- BDPA, 1984. — Carte départementale des terres agricoles Montivilliers - Le Havre (1/50 000). Carte de l'érosion, secteur de Montivilliers (1/25 000).
- BOIFFIN (J.), 1984. — La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Docteur Ingénieur INAPG.
- BOIFFIN (J.), FLEURY, 1974. — Quelques conséquences agronomiques du retournement des prairies permanentes. *Ann. Agron.*, 25 (4) : 555-573.
- BOIFFIN (J.), MONNIER (G.), 1982. — Etats, propriétés, comportements des sols : recherche et utilisation de critères de fertilité physique. *BTI* 370/372 : 401-407.
- BOIFFIN (J.), PAPY (F.), PEYRE (Y.), 1986. — Système de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le Pays de Caux. DIAME/INAPG/INRA, avril 86.
- BOIFFIN (J.), BRESSON (L.M.), 1987. — Dynamique de formation des croûtes superficielles : apport de l'analyse microscopique. *Soil micromorphology*. 393-399.
- BOIFFIN (J.), PAPY (F.), EIMBERCK (M.), 1988. — Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I : Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agron.* n° 8.
- BOLLINE (A.), 1982. — Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse Université Liège, 356 p.
- CUADRADO SANCHEZ (S.), FIES (J.C.), MONNIER (G.), 1971. — Influence de la nature minéralogique de la fraction limoneuse sur la stabilité structurale des sols. *Science du Sol* n° 2.
- DE PLOEY (J.), 1982. — A stem flow equation for grasses and simular vegetation. *Catena* 9. 139-152.
- FIES (J.C.), 1970. — Recherche de paramètres facilitant l'interprétation de l'analyse granulométrique en physique du sol. *Science du Sol* n° 2.

- FIES (J.C.), STENGEL (P.), 1981. — Densité texturale des sols naturels. Eléments d'interprétation. *Agronomie* 1 (8) : 659-666.
- GOVERS (G.), EVERAERT (W.), POESEN (J.), RAUWS (G.), DE PLOEY (J.), 1987. — Susceptibilité d'un sol limoneux à l'érosion par rigoles : essai dans le grand Canal de Caen. *Bull. 33 CNRS. Centre de Géomorphologie de Caen. Déc.* 87.
- GUERIF (J.), 1982. — La matière organique du sol et son évolution. *BTI* 370/372 : 443-449.
- HENIN (S.), BOSQUET (M.), 1964. — Relations entre le comportement des sols (effritement-fissuration) et leur texture. *C.R. Acad. Agri.* : 842-845.
- IGN, 1985. — Sites tests de la basse vallée de l'Yères et de Saint-Valéry-en-Caux. Cartographie des phénomènes d'érosion. CAUE.IGN (5 cartes à 1/10 000).
- IMESON (A.C.), JONGERIUS (P.D.), 1976. — Aggregate stability and colluviation in the Luxembourg Ardennes, an experimental and micromorphological study. *Earth surface processes* 1 : 259-271.
- KHEYRABI (D.), MONNIER (G.), 1968. — Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.* 19 (2).
- LE BISSONNAIS (Y.), 1988. — Analyse des mécanismes de mobilisation et de déplacement des particules à la surface du sol sous l'action des pluies. Thèse Doc. Univ. Orléans.
- LE BISSONNAIS (Y.), BRUAND (A.), JAMAGNE (M.), 1988. — Etude expérimentale sous pluies simulées de la formation des croûtes superficielles. Apport à la notion d'érodibilité des sols. 4th Benelux Colloquium/COMYAG meeting in Amsterdam n° spécial. *A paraître.*
- LILLIN (C.), PAULET (B.), 1987. — L'érosion des sols cultivés en France : développement actuel et actions entreprises. *BTI* 417 : 71-94.
- LYLE (W.M.), SMERDON (E.T.), 1965. — Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. *Trans. ASAE*, 8 (3) : 419-422.
- MONNIER (G.), 1965. — Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse Doct. Ing. Sc. Université de Paris.
- MONNIER (G.), KONAN (L.), 1968. — Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agro.*, 19 (5) : 541-551.
- MONNIER (G.), STENGEL (P.), GUERIF (J.), 1981. — Recherche de critères de la fertilité physique du sol et de son évolution en fonction du système de culture. *C.R. Coll. Agrimed CEE « Evolution du niveau de fertilité des sols » Bari 28-29/09/81.*
- MONNIER (G.), STENGEL, 1982. — La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. *BTI* 370/372 : 503-511.
- MONNIER (G.), BOIFFIN (J.), PAPY (F.), 1986. — Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, Vol. XXII n° 2 : 123-131.
- OUVRY (J.F.), 1982. — Etude des manifestations de l'érosion hydraulique des sols agricoles du bassin inférieur de l'Yères. Mémoire DAA ENSA Rennes/INRA, 72 p.
- PIHAN (J.), 1982. — Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France. Coll. sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Univ. Louis Pasteur de Strasbourg, INRA. 264 p.
- PINGUET (A.), 1985. — Aperçu sur la pluviométrie en Pays de Caux. Doc. interne Bioclimatologie, INRA/Avignon.
- ROOSE (E.), CAVALIE (J.), 1988. — Nouvelle stratégie de gestion conservatoire des eaux et des sols : GCES. Application en France et en Afrique Occidentale. Conférence internationale ISCO 5 : Bangkok. 18-29/01/88.
- SAVAT (J.), DE PLOEY (J.), 1982. — Sheetwash and rill development by surface flow. In : Badland geomorphology and piping, Bryan R. and Yair a. (eds), *Geobooks Norwich (Angleterre).*
- SEBILLOTTE (M.), 1968. — Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. *Ann. Agron.* 19 (4) : 403-414.
- TREVISAN (D.), 1986. — Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion des sols cultivés. Thèse de Doctorat 3^e cycle. Université d'Orléans. 171 p.
- VALENTIN (C.), 1981. — Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique. Thèse 3^e cycle. Univ. Paris VII.
- WEAVER, 1937. — Cité par Baver *et al.*, 1972. *Soil physics* 4th Ed. J. Wiley and Sons, New York, 498 p.
- WISHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1965. — Predicting rainfall Erosion Looses from Cropland east of Rocky Mountains. *Agric. Handbook* 282, USDA.