

Systemes de culture et érosion¹

L'état de surface du sol, indicateur des risques d'érosion liés aux systemes de culture

Dominique HERVÉ *

INTRODUCTION

Lorsqu'à partir de très grands impluviums, le ruissellement est concentré dans des zones préférentielles : les traces de roues d'engins agricoles canalisent l'eau de ruissellement dans les talwegs transversaux, il n'est pas nécessaire que l'intensité des pluies ou que la pente soient fortes pour qu'on observe localement des signes d'érosion intense.

Tel est le cas de régions de grande culture du nord-ouest de la France, à climat océanique, où les pluies sont abondantes mais peu intenses et les pentes sont faibles mais longues du fait d'un substrat crayeux à modelé légèrement ondulé et d'une évolution qui date de ces vingt dernières années caractérisée par le remembrement du parcellaire et le retournement des prairies (MONNIER *et al.*, 1986). Cette évolution collective entraîne des dégâts de coulées boueuses dans les villages de fond de talweg, facilitées par l'absence de fossés de drainage au bord des routes. Il est demandé aux agriculteurs d'y remédier individuellement, par une meilleure gestion de leurs parcelles de culture. Dans le cas étudié, l'état des surfaces cultivées joue un rôle considérable sur les processus érosifs puisqu'il commande les modalités d'apparition et de concentration du ruissellement. Or, la conduite des systèmes de culture détermine une succession dans le temps de perturbations de l'état de surface, par fragmentation sous l'effet du travail du sol, par compactage par les engins agricoles et par dégradation structurale sous pluies (battance) ; cette dernière étant influencée par la couverture végétale.

Dans l'équation de WISCHMEIER et SMITH (1965), l'influence des systèmes de culture est exprimée par l'intermédiaire du facteur K, l'érodibilité qui prend en compte la teneur en matière organique du sol, ses caractéristiques physiques et celles du profil, et du facteur C dont les variations sont essentiellement déterminées par le calendrier de recouvrement du sol, la quantité et le mode de gestion des résidus de récolte (WISCHMEIER, 1960). Dans ces travaux, l'état de surface du sol n'est pas explicitement pris en compte et l'on distingue mal les

1. Le travail de terrain, réalisé durant la campagne 84-85, fait partie de la recherche menée par l'INAPG dans le pays de Caux, sous la direction de J. BOIFFIN.

* Mission ORSTOM en Bolivie, Casilla postal 8714, La Paz, Bolivie.

processus déterminant respectivement la naissance du ruissellement, les modalités de concentration et l'érosivité des écoulements concentrés (BOIFFIN *et al.*, 1986). De plus, notre but n'est pas d'évaluer des pertes en terre, mais plutôt de prévoir le démarrage du ruissellement. J. BOIFFIN (1984) a mis en évidence une corrélation entre la diminution de l'infiltrabilité et les processus de transformation morphologique des couches superficielles de sols limoneux, sous pluies. Ceux-ci se réalisent suivant des phases successives de dégradation correspondant au colmatage de la surface par la terre transférée et à l'extension de plaques continues, que l'on peut dater grâce à des critères simples de description morphologique des états de surface. En pays de Caux, l'importance des cultures fourragères et la succession céréales d'hiver, cultures de printemps (lin, betterave sucrière, pomme de terre, maïs, pois) offrent une grande diversité de couverts végétaux et de périodes de recouvrement. Dix exploitations y ont été choisies, qui ont fait l'objet d'une étude de variabilité de leur fonctionnement afin de réaliser un échantillonnage des parcelles sur lesquelles les risques d'érosion sont appréciés par un suivi des états de surface au printemps et à l'automne.

1. PRINCIPE DE LA DÉMARCHE

1.1. États de surface et érosion

Les pertes en terre sont le résultat d'un système continu de détachement, transport et dépôt. Pour en comprendre l'origine, il nous faut analyser l'influence des états de surface sous un triple aspect :

— l'apparition d'excès d'eau en surface lorsque l'intensité de l'épisode pluvieux (I) est supérieure à l'infiltrabilité du sol (i) ;

— le début du ruissellement, lorsqu'est dépassée la capacité de stockage de l'eau en surface, dans la microrugosité, les empreintes de roues et le couvert végétal :

$$(I - i) T > D$$

Avec : i = infiltrabilité (mm.h⁻¹)

T = durée (en heure) de l'épisode pluvieux d'intensité I

D = détention superficielle (mm).

— les modalités de circulation des écoulements concentrés selon la disposition des talwegs, la pente et la longueur de la pente.

Les pluies du pays de Caux n'ont pas l'intensité et la durée suffisante pour saturer les cinq premiers centimètres correspondant au lit de semence, même aux périodes à risques (MONNIER *et al.*, 1986). L'infiltrabilité est essentiellement gouvernée par la structure de la proche surface (5-10 mm) et son état hydrique.

L'infiltrabilité augmente brutalement après fragmentation par les outils de travail du sol (BURWELL et LARSON, 1969) ou après des phases successives d'humectation dessiccation qui fissurent la croûte superficielle. Par contre, la compaction par les engins agricoles accroît la densité et diminue la porosité totale, ce qui accélère la vitesse de dégradation structurale sous pluies. L'excès d'eau apparaîtra plus rapidement sur les traces de roues qui serviront de canaux d'écoulement du ruissellement (YOUNG, VOORHEES, 1982). Sous l'effet de la battance, l'infiltrabilité diminue rapidement de 30-40 mmh⁻¹ à 5-15 mmh⁻¹, lorsque se forme une croûte structurale constituée des particules

provenant du splash² (phase I) puis plus lentement jusqu'à 1 mmh^{-1} , phase II caractérisée par une croûte sédimentaire provenant du tri des particules en suspension. Les résultats obtenus dans le pays de Caux montrent qu'un excès d'eau d'environ 5 mm est nécessaire au déclenchement de la phase II. Selon la rugosité et l'infiltrabilité, il pourra être atteint par des épisodes pluvieux différents (intensité, hauteur d'eau) (cf. annexe 1).

1.2. Étapes de la démarche

Nous observons sous pluies des parcelles dont l'état de surface est connu pour dater et chronométrer le début de l'apparition de flaques, qui traduit un excès d'eau et le début du ruissellement. En confrontant ces données avec les relevés du pluviographe, hauteur d'eau et intensité des événements pluvieux en fonction du temps, nous en déduisons des références sur les relations entre état de surface et infiltrabilité, qui nous permettent de classer les états de surface selon les risques d'excès d'eau.

Ces surfaces dont l'état évolue au cours du temps, sont gérées par des centres de décision différents, les parcelles cultivées d'un bassin versant n'appartenant pas nécessairement à la même exploitation. C'est pourtant à l'échelle du bassin versant que l'on évaluera des risques d'érosion.

Nous caractérisons l'état de surface, résultat à un moment donné de la mise en œuvre d'un système de culture dans une parcelle, par des paramètres descriptifs qui conditionnent l'infiltrabilité et la détention superficielle (cf. 1.4). Pour couvrir la gamme de variation existante, dans le temps et l'espace, la voie d'enquête est privilégiée : après un inventaire des surfaces le plus exhaustif possible, les observations sont concentrées sur un cycle cultural, rapides mais nombreuses et répétées dans le temps.

Des systèmes de culture variés peuvent produire des états de surface similaires, regroupés en types d'états de surface que l'on classe par rapport aux risques d'érosion.

1.3. Choix des situations et méthodes d'observation

Nous avons choisi dix exploitations de taille variable (SAU de 26 à 140 ha) présentant des systèmes de production contrastés vis-à-vis de l'érosion. Leur variabilité porte sur la STH (surface toujours en herbe), la présence ou non d'élevage, le pourcentage de cultures de printemps dans l'assolement, la gestion des intercultures : culture de printemps — culture de printemps et culture d'hiver — culture de printemps. L'échantillon biaisé vers les grandes surfaces, n'est pas statistiquement représentatif mais permet un inventaire exhaustif des états de surface.

Du fait de leur proximité relative, les parcelles ont été regroupées pour l'analyse en deux sites localisés dans la pointe du Havre, dont l'un au nord couvrirait la plus grande partie d'une commune, avec une pluviosité légèrement supérieure à celle du sud. La diversité intra-site est essentiellement imputable à des choix techniques et non à des hétérogénéités du sol ou du climat.

Afin de recenser le plus grand nombre possible d'états de surface dans le temps le plus court possible, les dates d'inventaire et de suivi sont choisies de

2. Détachement de particules élémentaires sous l'impact des gouttes de pluie et projection à une distance centimétrique à métrique.

manière à encadrer (avant, pendant, après) les phases importantes de transformation de ces états par des successions d'opérations culturales, soit : en fin d'hiver (mars 85) avant l'installation des cultures de printemps et, en fin d'été (octobre 85) avant les semis de blé.

Au printemps, un échantillon de 35 parcelles types a été constitué à partir d'une enquête portant sur la succession de culture, l'itinéraire technique prévu, l'intensité de la dégradation structurale en hiver, suite aux chantiers de récolte, le régime d'entretien organique, autant de facteurs probables de variation des conditions de démarrage du ruissellement. Des comparaisons sont possibles entre parcelles variant par un paramètre du système de culture.

À l'automne, le suivi a porté sur un échantillon de 20 parcelles semées en blé à des dates échelonnées dans le temps. L'inventaire des états de surface et des observations après chaque opération culturale jusqu'au semis sont réalisés à l'échelle de la parcelle. Une fois exclus les bordures, les talwegs et les zones de dépôt de matériel érodé, des zones homogènes sont identifiées, perpendiculaires à l'orientation des trains de roues superficielles et des modelés créés par les outils. Elles correspondent à la largeur de travail de l'outil lorsque l'opération culturale est récente (bandes de labour, cannelures des outils à dent) ou à des états de dégradation structurale différenciés sous l'influence des événements pluvieux.

Ces zones homogènes font l'objet d'observations rapides à l'échelle du champ visuel soit 1 m par 1,50 m environ avec 3 répétitions par zone. A partir du semis, deux à trois placettes sont installées sur un nombre limité de parcelles types et observées tous les 10 mm de pluies environ, visuellement et par photographie à la verticale, afin de dater la dégradation de l'état de surface. Les clichés permettent des mesures de superficies de recouvrement plus précises. Lorsque les variations entre opérateurs sont réduites par la confrontation systématique des résultats, l'observation visuelle permet d'obtenir une précision de l'ordre de 10 %, suffisante pour mettre en évidence des différences entre les grands types d'état de surface. Une précision de 5 % exige une certaine expérience.

1.4. Protocole de description des surfaces

1.4.1. VARIABLES LIÉES AU COMPORTEMENT SOUS PLUIES

Les observations portent sur trois grandes rubriques :

— *Le recouvrement du sol* par les cailloux, les adventices, les résidus de récolte et la culture en place. La couverture du sol joue un rôle protecteur en limitant le détachement des particules sous l'impact des gouttes de pluies mais surtout en divisant la lame ruisselée, ce qui ralentit la circulation de l'excès d'eau et augmente la largeur d'écoulement (LAFLEN et COLVIN, 1981). La tendance à surévaluer le recouvrement exprimé en pourcentage de la surface totale est corrigée lorsqu'on estime aussi le pourcentage de sol nu.

— *Le stade d'évolution de la battance* que nous caractérisons par la phase de dégradation de l'état de surface. A l'état fragmentaire (phase 0) on relève le taux de recouvrement par différents calibres de mottes (les modalités sont les suivantes : moins de 2 mm, moins de 1 cm, moins de 3 cm, plus de 5 cm et plus de 10 cm) puis par des plaques continues (phase I). Pour la phase II, on relève le pourcentage de zones de départ et de dépôt. À chaque phase correspond une fourchette d'infiltrabilité (cf. 1.1.).

Or, l'infiltrabilité du sol humide est corrélée directement à une variable

TABLEAU I
TYPOLOGIE DES ÉTATS DE SURFACE

culture en place : présence/absence travail du sol récent oui/non nature de l'interculture engrais vert : oui/non	culture en place		Intercultures sans travail du sol récent				Intercultures avec travail du sol récent					
			culture d'hiver culture de printemps		engrais vert		culture de printemps culture de printemps		culture de printemps culture de printemps			
classes de surface	A		B		C		D		E		F	
	observat. fin hiver	observat. fin été	observat. fin hiver	observat. fin été	obs. fin hiver	obs. fin été	observat. fin hiver	observat. fin été	observat. fin hiver	observat. fin été	observat. fin hiver	observat. fin été
Pourcentage de recouvrement par la culture et/ou les résidus de récolte, en % de surface totale	blé hiver (colza)	betterave sucrière p.de t.	blé non déchaumés (fin inter culture)	blé non déchaumés (début inter culture)	RGI TI navette avant BS, Pdt	engrais vert sur lin ou blé	cultures de print. non déchaum. (fin inter culture)	cultures de print. non déchaum. (début inter culture)	déchauma. blés tardif	déchauma. blés post récolte	déchauma. cultures de print.	déchauma. cultures de print.
Phase de dégradation structurale												
PHASE DE DEGRADATION 0	0					1						2 L
	0.20							1 Pdt récolte		1		
	+ 20									1		
PHASE DE DEGRADATION 1	0									1	1 BS	
	0.20								2	2	3 L	2 L
	20 50								2	1		
	+ 50		billon couvert BS				1					
PHASE DE DEGRADATION II	0						2 M, Pdt				1 M	
	0.20	9					1 BS	3 L			2 M	
	20 50	5					1 Pdt					
	50 80	1	1 BS		1	4						
	+ 80		5 BS		1	1						
nb total des parcelles observées	15	6	0	2	5	2	4	4	4	6	7	4
empreintes de roues superficielles en % surface totale	6	20			11		62	45	3	0	4	0

NOTE : Est indiqué dans chaque case le nombre de parcelles observées présentant l'état de surface correspondant.
Les cases hachurées correspondent à des cas de figure impossibles
Les cases blanches, à des cas possibles, non rencontrés.

M : Maïs, L : Lin, BS : Betterave sucrière, Pdt : Pomme de terre.

mesurable au champ, le plus petit diamètre des fragments les plus fins, non encore incorporés dans des plaques continues ou D_{min} , comme l'a défini J. BOIFFIN dans sa thèse (1984). Sa détermination précise le stade de dégradation.

La densité et la nature des orifices jouent, même quand le sol est croûté, un rôle complémentaire sur l'infiltration dont nous évaluons l'importance par des observations quantitatives : maille et largeur des fissures de rétraction, par dessiccation ou gel, nature et diamètre modal des orifices d'origine structurale (interstices entre agrégats) ou d'origine biologique (galeriers de vers de terre). Leur densité sera estimée sur une surface élémentaire de 100 cm^2 (classe 0 : 0 orifice, classe 1 : 1 à 10, classe 2 : 10 à 40, classe 3 : plus de 40).

— *la rugosité superficielle*, estimée par le pourcentage et la taille des mottes, nous renseigne sur la détention superficielle. Mais celle-ci dépend également de l'orientation et du modelé de la rugosité qui conditionnent les possibilités de connexion entre micro-bassins versants élémentaires et du rôle de canalisation que peuvent jouer les empreintes de roues superficielles (MONTEITH, 1974).

1.4.2. VARIABLES LIÉES AU SYSTÈME DE CULTURE ET AU CALENDRIER CULTURAL

On relève pour chaque parcelle, par observation directe et/ou enquête auprès de l'agriculteur des variables indiquant l'origine des états de surface précédemment décrits :

- précédent cultural,
- culture en place et date de semis,
- nature des opérations culturales précédant l'observation : travail du sol, épandage, traitement,
- orientation du travail, donc des modelés créés par les outils, par rapport à la plus grande pente et à la plus grande longueur de la parcelle,
- largeur de travail et largeur des pneus à partir desquels on calcule le pourcentage de la surface affectée par des traces de roues superficielles,
- état de surface des fourrières.

2. INVENTAIRE ET TRANSFORMATION DANS LE TEMPS DES ÉTATS DE SURFACE

2.1. Inventaire et typologie des états de surface en fin d'hiver et fin d'été

2.1.1. INVENTAIRE DES TYPES

La reconnaissance des parcelles montre qu'il existe des invariants des états de surface qui dépendent avant tout des critères suivants :

- présence ou absence de culture en place,
- travail du sol récent,
- nature de l'interculture,
- présence ou non d'engrais vert.

À partir de ces critères, nous distinguons six classes de surfaces correspondant à des portions de systèmes de culture (entrées des colonnes du tableau I), pour lesquelles est calculé le pourcentage de la surface affectée par les traces de roues superficielles.

De la description des états de surface au cours des deux inventaires, en mars pour la fin d'hiver et en octobre pour la fin d'été, nous dégagons deux caractères discriminants : la phase de dégradation structurale et le pourcentage de recouvrement du sol pour constituer des classes d'états de surface (lignes horizontales du tableau I). La lecture du tableau croisé types de surfaces, états de surfaces oppose :

— des surfaces battues, en phase II, à croûte sédimentaire et faible infiltrabilité (types A, B, C, D),

— des surfaces résultant d'une opération culturale récente (déchaumage, reprise après récolte), plus ou moins dégradées selon la somme des pluies reçues, en général sans traces de roues sauf en cas d'épandage après déchaumage (types E, F).

Ces deux types de surface jouent un rôle très différent vis-à-vis de l'émission et de la concentration du ruissellement donc, vis-à-vis des risques d'érosion. Il suffira en effet d'une pluie de faible intensité pour que les premières (en phase II) ruissellent, quelque soit leur couverture végétale :

— variable de 10 à 70 % selon la croissance du blé en sortie d'hiver et plus élevée en fin de végétation de betterave sucrière et pomme de terre pour le type A,

— très couvrante pour les blés non déchaumés (type B) et les engrais verts (type C),

— faible ou inexistante dans le type D.

La couverture végétale, installée plus lentement que ne se dégrade la surface, freine les écoulements sans empêcher le passage en phase II. Une autre variable discrimine les types A à D, le pourcentage de la surface affectée par les traces de roues superficielles, qui détermine les modalités de concentration du ruissellement.

Les traces de roues sont peu abondantes sur blé (type A) car les épandages d'azote et les traitements phytosanitaires se font roues dans roues. Elles sont plus nombreuses sur engrais vert (type C) ; les épandages d'effluents organiques, lorsqu'ils existent, bénéficient de l'amélioration de la portance.

Le type D se distingue par un sol très tassé héritant des conditions de récolte de la culture de printemps.

2.1.2. VARIABILITÉ INTRA-TYPES

Type A : culture en place

On observe en fonction de la date de semis du blé le pourcentage de recouvrement par la végétation en fin d'hiver et la dégradation structurale de la surface, mesurée par l'indice D_{min} (fig. 1).

Les blés précoces semés en octobre sont les plus couvrants, ce qui n'empêche pas la surface d'être dégradée (D_{min} élevé, faible rugosité) si bien que la période d'émission du ruissellement est en définitive plus longue que pour un blé tardif. Les semis tardifs de blé derrière betterave sucrière, en novembre et en début décembre comportent également des risques d'érosion. La récolte de betterave laisse en effet une surface dégradée, à une époque où les pluies agressives sont fréquentes.

De plus, le désherbage à l'automne des blés précoces laisse des empreintes de roues (4 à 12 % de la surface) pouvant concentrer les ruissellements émis la

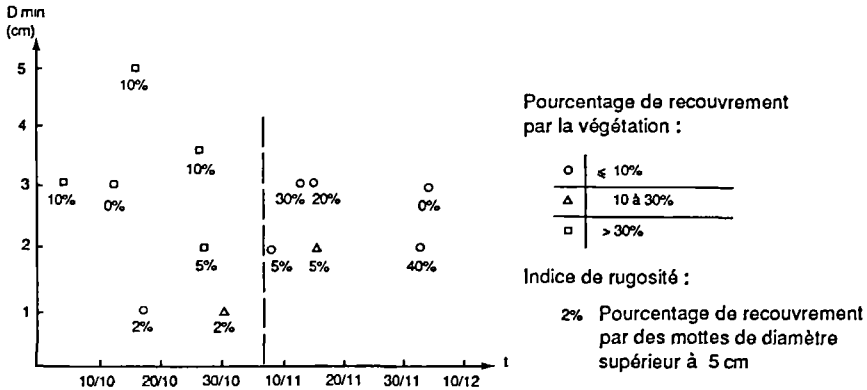


FIG. 1. — Diamètre minimum des éléments structuraux, en fonction de la date de semis du blé

dernière décade de novembre, environ trois mois avant les blés tardifs, qui ne seront désherbés qu'en mars. S'il est difficile d'augmenter la vitesse d'établissement du couvert végétal (qualité du lit de semence, fertilisation), il est toujours possible d'effacer les traces de roues superficielles en montant des dents derrière les roues de tracteur ou de les éviter en réalisant le désherbage de prélevée, avant le semis.

En fin d'été, par contre, les forts recouvrements (+ de 50 %) par les betteraves sucrières ou pommes de terre maintiennent en phase I des portions de surface sous végétation qui ont été binées ou billonnées.

L'effet protecteur de la couverture végétale ne s'exteriorise que lorsqu'un recouvrement de l'ordre de 50 % est obtenu avant la phase de croûte sédimentaire (phase II). Il dépendra du type de sol et des caractéristiques des événements pluvieux.

Type B : interculture hiver-printemps non déchaumé

À la récolte du blé, la paille est soit enlevée s'il existe un élevage, soit broyée. Sur les surfaces non déchaumées, les pailles droites et couchées retardent la circulation du ruissellement diffus et stockent superficiellement l'eau en excès.

Type C : engrais vert

À la mi-mars (14 à 20/03) les parcelles en engrais vert semé sur blé ou lin ont un taux de recouvrement similaire au blé récolté (cf. tableau II).

Le recouvrement du sol est maximum lorsque :

TABLEAU II

Interculture	outil de déchaumage	Engrais vert	date de semis engrais vert	% recouvrement du sol			% surface affectée par roues superficielles
				culture adventices	résidus récolte		
Blé - BS	Rotovator	Trèfle Incarnat	fin 09	60	0	-10	0
Blé - pdt	Soc	Trèfle Incarnat	fin 09	60	5	10	6
Lin - pdt	Soc	Trèfle Incarnat	30/10	40	35	0	29
Lin - BS + succession la plus fréquente	Dent	Ray Grass italien	avant le 15/09	90	2	0	20

— des résidus de récolte (chaumes de blé) sont laissés en surface, ce qui est de toute façon assuré lorsqu'on déchaume au rotovator ou bien lorsque les repousses de lin et les adventices sont abondants.

— l'espèce fourragère choisie a une vitesse d'installation rapide dont les exigences thermiques sont en accord avec les dates de semis et de retournement déterminées par la succession. Le ray grass italien assure à la même date une couverture du sol supérieure au trèfle incarnat, ce qui semble limiter le développement des adventices.

La variabilité des fréquences d'empreintes de roues dépend des épandages de fumier ou d'engrais. Les canaux d'écoulement préférentiel ainsi créés sont en général peu profonds et tapissés par la végétation, ce qui réduit les risques de détachement de terre.

Type D : interculture printemps-printemps non déchaumé

La variabilité dans ce type provient de la nature du précédent qui définit en grande partie la quantité de résidus de récolte (pois > maïs > lin > betterave sucrière > pomme de terre) et l'importance des empreintes de roues superficielles (cf. tableau III).

TABLEAU III

date d'observation	culture	Précédent	% recouvrement par résidus et adventices	Surface affectée par les % roues superficielles avant reprise
21.02	Pdt	BS	25 (lisier épais)	65
20.03	BS	Pdt	5	70
2.04	Maïs	Maïs	0	48
2.10	BS	Lin	10	32

Ces surfaces, pratiquement sans couverture végétale, sont en fin d'hiver les plus dégradées du fait du tassement par les engins agricoles. Les chantiers de récolte tels que le passage des arracheuses et des remorques et l'ensilage du maïs en conditions hydriques défavorables ont pour conséquence de diminuer la porosité et la rugosité superficielle. Les épandages de lisier ont un rôle additionnel catastrophique en accroissant le nombre de traces de roues et en amorçant dans certains cas le ruissellement. La date d'épandage de lisier selon qu'elle se situe avant ou après le déchaumage, conditionne les risques de concentration du ruissellement. Les surfaces récoltées en cultures de printemps se classent par rapport à ces risques dans l'ordre suivant :

Pomme de terre = Betterave sucrière >> Maïs > Lin > surface déchaumée.

Les observations de fin d'été confirment les faibles recouvrements par les résidus de récolte (moins de 20 %). À cette époque, les parcelles récoltées en lin sont déjà dégradées.

Type E : blés déchaumés

D'après le tableau I, nous constatons que les surfaces déchaumées début septembre, observées en octobre après avoir reçu 56 mm de pluie cumulée et celles qui, déchaumées tardivement, début février, ont été observées en fin d'hiver après 70 mm de pluie cumulée, sont au plus en phase I. La modalité de déchaumage, sans influencer sur la phase de dégradation, peut faire varier deux types de critères : la rugosité superficielle et le pourcentage de recouvrement par les résidus de récolte (cf. tableau IV), qui différencieront les états de surfaces vis-à-vis de l'érosion.

TABLEAU IV

date d'observation	outil de déchaumage	% mottes diamètre			% recouvre- ment résidus + adventices	culture suivante	% surface affectée par des roues superficielles
		<1cm	<3cm	>5cm			
Mi-mars	rotovator	15	50	20	25	LIN	0
	dent	40	50	10	17	LIN	0
	dent	0	15	10	45	BS	13
	soc				2	BS	18
PHASE I début oct.	soc	20	50	35	2	-	0
PHASE 0	chisel	50	65	20	15	-	0
PHASE II témoin	0 déchaumage				50		

Les observations de la mi-mars nous montrent qu'un outil à dent laisse en surface des pailles dressées et couchées, avec un niveau de recouvrement (15 à 45 %) et une quantité de terre fine très variables. L'enfouissement partiel de pailles couvrant plus de 20 % de la surface est plus efficace qu'un mulch (JOHNSON, MOLDENHAUER, 1979). Pourtant, ce déchaumage à dents a pour effet d'aligner les mottes de surface en billons en créant des canaux préférentiels de concentration du ruissellement dans les interbillons. Le déchaumage à soc enfouit les résidus et fabrique des mottes grossières (> 5 cm) peu orientées dans le sens du travail, qui ralentiront la circulation du ruissellement. Le déchaumage tardif au rotovator donne un résultat intermédiaire. L'optimum serait de pouvoir conserver des résidus en surface sous forme de bouchons de paille par exemple, qui favoriseraient la percolation, mais le non déchaumage peut également entraîner des accumulations de paille dans le profil, préjudiciables à la culture suivante. L'épandage d'écume et d'engrais de fond pour la betterave, lorsqu'il est réalisé après le déchaumage, laisse des empreintes de roues (15 % en moyenne) qui risquent de collecter le ruissellement si les surfaces se dégradent en phase II avant le labour.

La variabilité des états de surface résultant des déchaumages démontre qu'il existe dans la gestion de l'interculture une marge d'intervention importante pour l'agriculteur.

Type F : cultures de printemps déchaumées

En l'absence de résidus de récolte à enfouir (recouvrement inférieur à 5 %) la technique de déchaumage choisie pour la reprise des chantiers de récolte en

février sera la plus rapide, en général avec un outil à dent (cf. tableau I dernière colonne).

La période de déchaumage varie selon la date de récolte, échelonnée pour les différentes cultures de printemps de septembre à décembre. À cette époque, la pluviométrie est à la fois importante et très variable (10 à 60 mm mensuels, cf. annexe 2). Ces deux facteurs expliquent les différences de dégradation observées.

2.2. Transformations dans le temps des états de surface

Les risques d'érosion dépendent de la somme des pluies cumulées, reçues par des surfaces de sol en état de ruisseler, caractérisées par une faible infiltrabilité du fait de la structure superficielle dégradée et par une faible détention superficielle. Un travail du sol, par son effet de fragmentation, remet le système à zéro en augmentant brutalement l'infiltrabilité.

L'évolution chronologique de l'infiltrabilité dépend donc de la succession de cultures et du calendrier cultural, variables selon les agriculteurs, et de la répartition des pluies. Elle traduit la dynamique de transformation des états de surface en fonction du temps. La représentation graphique que nous en faisons (fig. 2 et 3) se base sur quelques données d'infiltrabilité obtenues par l'observation du flaquage sous pluies (cf. 1.2) et par la méthode plus précise des tâches saturées (BOIFFIN, 1984). Ces courbes, qu'il serait possible d'affiner, donnent un ordre de grandeur des variations d'infiltrabilité.

2.2.1. ÉVOLUTION DE L'INFILTRABILITÉ AU COURS DE DEUX CYCLES CULTURAUX

Le graphe de la figure 2 nous indique l'allure de variation de l'infiltrabilité en fonction du temps pour une succession blé-betterave. L'infiltrabilité augmente instantanément et uniformément après chaque opération de travail du sol, déchaumage, labour, semis, binage. Elle diminue ensuite rapidement puis lentement du fait de la battance, jusqu'à une valeur très faible (1 mmh^{-1}) si l'état structural n'est pas fragmenté ultérieurement.

Les deux mois d'installation de la culture de betterave, correspondant à une succession d'opérations culturales rapprochées, comportent de ce fait peu de risques d'érosion à moins d'un labour très précoce. Les empreintes de roues laissées par le semoir et par les épandeurs (azote, pesticides) après semis, sont des lieux privilégiés de concentration du ruissellement, d'infiltrabilité diminuée (indiquée par les pointillés sur le graphe). Il existe pour la betterave une possibilité de remise de la surface à l'état fragmentaire à l'occasion des binages comme pour la pomme de terre, à l'occasion des buttages. La croissance et le développement de la couverture végétale au printemps, l'enracinement, la fissuration par dessiccation de la croûte structurale et l'activité biologique augmentent l'infiltrabilité dans des proportions moindres.

Quelles sont les phases critiques de cette succession blé-betterave ?

1 — Les surfaces en blé ruissellent tôt et longtemps entre décembre et mai car l'état de surface est dégradé par les pluies alors que les blés sont peu couvrants en début d'hiver (HORNER, 1960).

2 — Les risques d'érosion liés aux périodes d'intercultures dépendent de deux séries de facteurs :

- la date des interventions culturales : déchaumage juste après la récolte en septembre ou tardif en février-mars, les dates respectives des déchaumages et épandages (fumier, lisier, engrais) enfin, la date de labour.

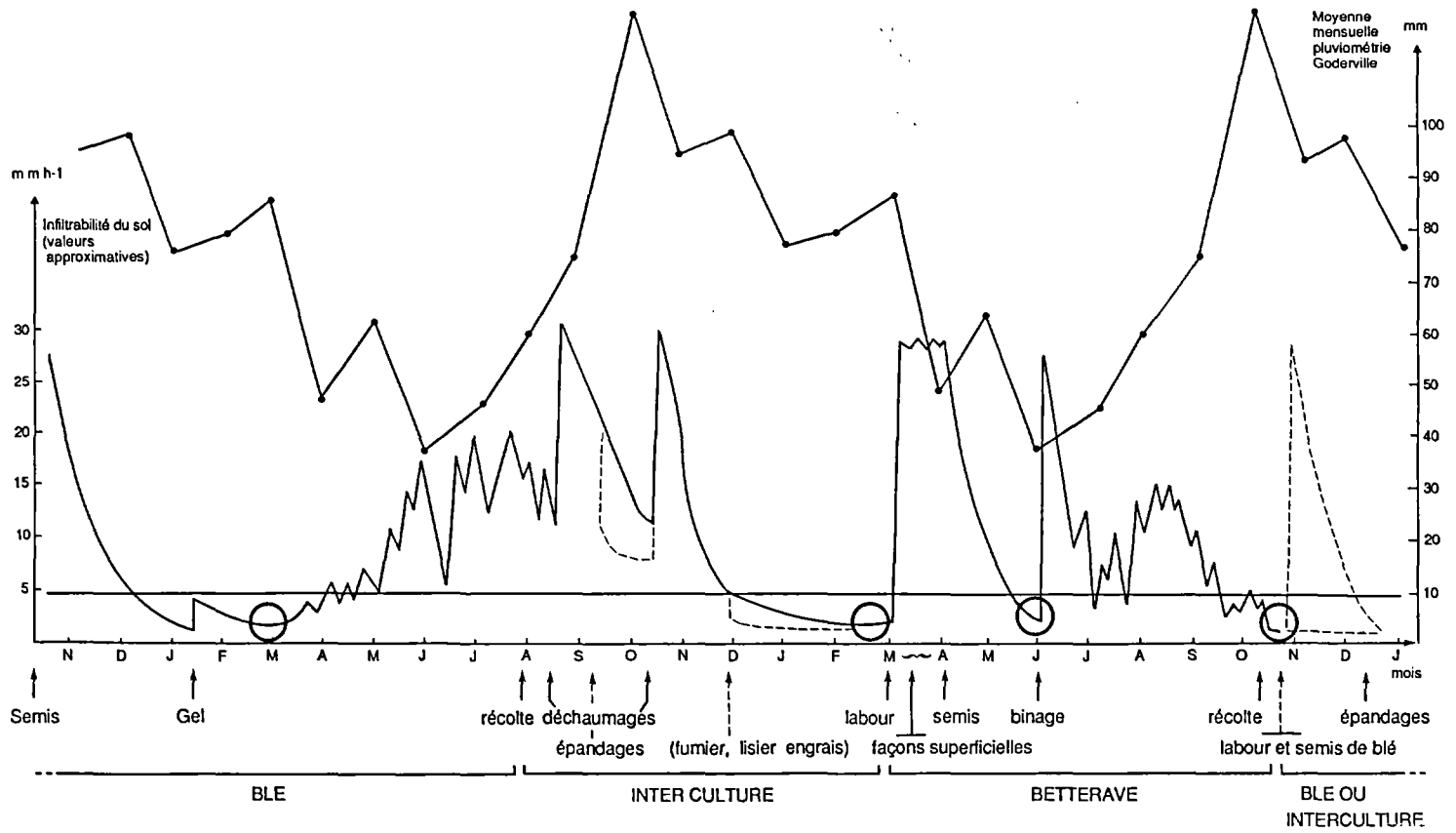


FIG. 2. — Allure de la variation de l'infiltrabilité. Succession blé-betterave

- les caractéristiques des événements pluvieux entre octobre et mars (cf. annexe 2), ce qui milite en faveur d'un choix raisonné de la date de déchaumage.

3 — On a notamment intérêt à labourer et semer le blé de betterave le plus rapidement possible après la récolte. L'infiltrabilité est à cette époque minimum et le sol dénudé. Il est probable que dès octobre, le couvert végétal n'assure plus de rôle protecteur alors que les empreintes de roues laissées par les traitements en végétation collectent le ruissellement.

4 — En absence de binage, le ruissellement serait érosif dès le mois de mai, et en particulier en octobre. Il semble que les risques d'érosion justifient le maintien de l'opération culturale, juste avant le démarrage de la période de végétation active de la betterave sucrière. Le raisonnement est identique pour le buttage de la pomme de terre.

2.2.2. VARIATION DUE À LA SUCCESSION DE CULTURE

Ces observations sont-elles généralisables à tous les intercultures et cycles culturaux ? Quelle est l'influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion ? Ceux-ci sont-ils plus élevés au printemps ou à l'automne ?

Selon le même principe que précédemment, à partir du graphique d'évolution chronologique de l'infiltrabilité, nous comparons deux successions de cultures de printemps (fig. 3). La pomme de terre et la betterave sucrière ont des profils d'évolution de l'infiltrabilité similaires. Leur succession délimite un interculture long d'octobre à mars, à hauts risques d'érosion puisque la surface après récolte est couverte de traces de roues, très tassées en cas de mauvaises conditions climatiques (excès d'eau).

En comparant les figures 2 et 3, on comprend que la succession de deux cultures de printemps permette de mieux contrôler l'érosion en sortie d'hiver que celle qui inclut une culture de blé, sans aucun effet protecteur jusqu'au printemps, à condition que l'interculture soit géré correctement (BOIFFIN *et al.*, 1986). Le tableau V nous montre que la diversité des cultures de printemps permet de limiter l'érosion. Les semis sont échelonnés sur deux mois et les empreintes de roues, qui joueront progressivement et selon leur orientation, un rôle de concentration du ruissellement, affectent selon les cultures une proportion variable de la surface cultivée.

TABLEAU V

Date de semis	ordre de classement			
	Pois Précoce	Betterave + lin	Pomme de terre	Maïs Tardif
Surface affectée par les empreintes de roues	Maïs	Betterave	Pomme de terre	Lin- Pois
Marge brute des cultures	↑ Maïs fourrage prioritaire si élevage Pomme de terre > Lin > Betterave > Pois > Céréales			

Source : Goëtgheluck, Lairis, Thiollière, 1985.

Seuls les intercultures longs de 5 à 6 mois tels que blé-culture de printemps ou lin-betterave (fig. 3) ou pomme de terre offrent la possibilité d'implanter un

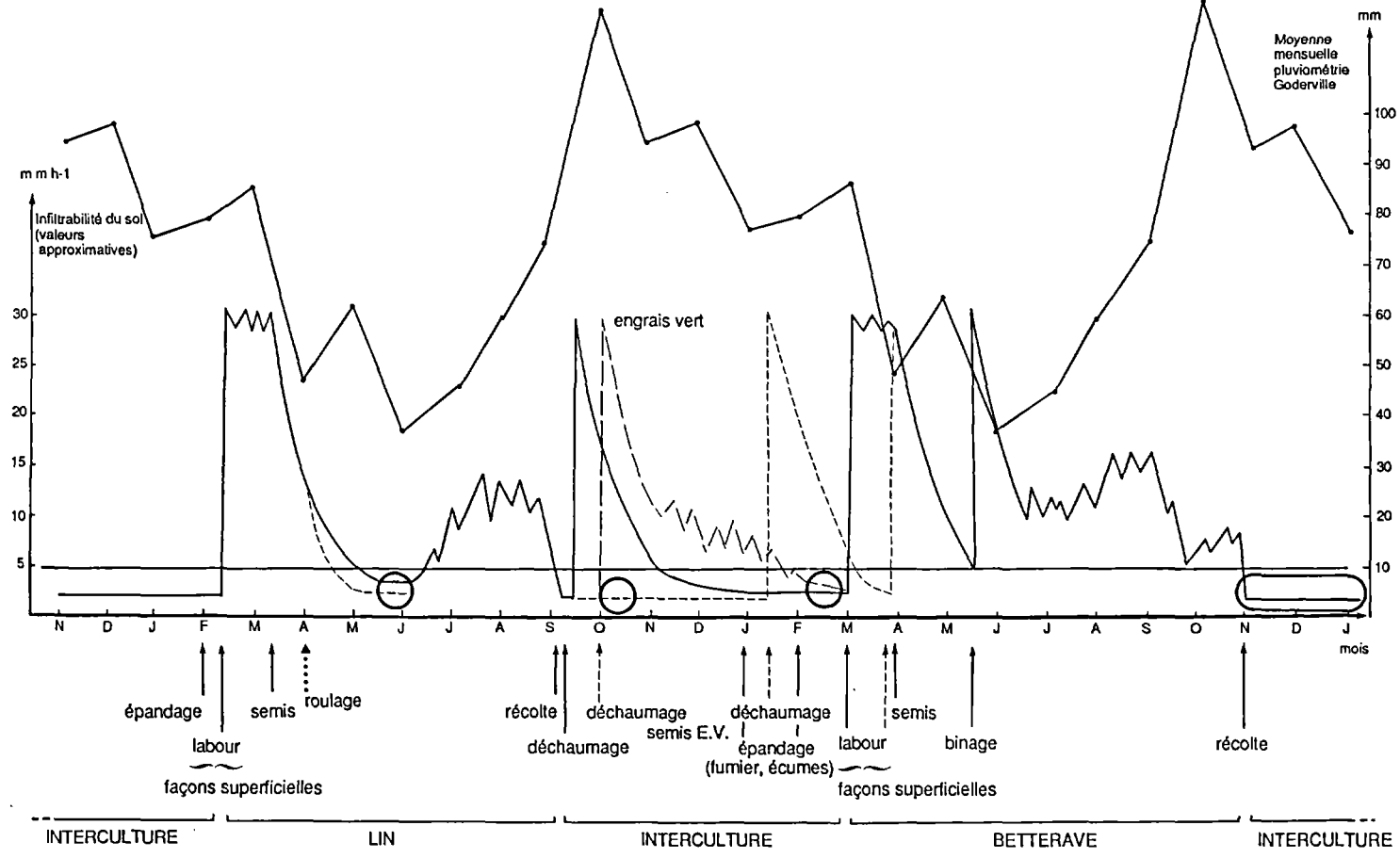


FIG. 3. — Allure de la variation de l'infiltrabilité. Succession lin-betterave

engrais vert qui ne sera efficace que s'il est rapidement couvrant, avant que la surface ne se dégrade en phase II. L'effet protecteur d'un engrais vert dépendra à la fois de la date de récolte du précédent, des conditions d'implantation en septembre, de la somme de température et de la vitesse de croissance de l'espèce fourragère. Le semis d'engrais vert reste pour cette raison une technique aléatoire pour laquelle il manque des références.

2.2.3. VARIATION EN FONCTION DES ITINÉRAIRES TECHNIQUES

Quel est l'effet des techniques culturales sur les risques d'érosion ? Peut-on par un itinéraire technique approprié les réduire de manière significative ? Les conditions du passage en phase II font apparaître un effet date de semis. Les parcelles semées précocement, avant le 10 avril, sont en début de phase II par une énergie cinétique des pluies cumulées égale à 388 J. m^{-2} alors que les autres parcelles restent en phase I avec 800 J. m^{-2} (GOËTGHELICK, *et al.* 1985). Les conclusions des chapitres précédents orientent notre choix des critères de jugement des opérations culturales vis-à-vis des risques d'érosion, par ordre d'importance :

- la date de semis,
- l'utilisation des résidus de récolte, enlevés pour l'élevage ou broyés,
- la date et le type de déchaumage,
- la date de labour et l'intervalle de temps labour-première reprise, qui sont liés : un labour tardif est repris aussitôt.

L'état de surface au semis étant conditionné par le labour et la première reprise, le nombre de passages après labour n'est que secondaire. Dans le cas du lin derrière blé, pour lequel nous disposons d'observations en sortie d'hiver sur 18 parcelles, la combinaison de ces cinq critères aboutit à l'identification de trois itinéraires techniques différents vis-à-vis des risques d'érosion (cf. tableau VI).

TABLEAU VI
Itinéraires techniques de lin/blé

	1	2	3
. date de semis du lin	variable plutôt tardive	variable	variable plutôt précoce
. paille	enlevée	broyée	broyée
. déchaumage	à socs	à dents	pas de déchaumage ou rotovator
. date de déchaumage	après récolte	en sortie d'hiver	en sortie d'hiver
. labour reprise après labour	avant Pâques après plus de 8 jours	avant Pâques après plus de 8 jours	après Pâques immédiate (moins de 8 j)
nombre de cas	$\frac{10}{16}$	$\frac{2}{16}$	$\frac{4}{16}$

L'itinéraire 3 répond à une conduite des opérations culturales, parcelle par parcelle, dans des conditions météorologiques satisfaisantes. Une mobilisation de main-d'œuvre et de matériel importante est nécessaire pour achever le

chantier de labour-semis en un ou quelques jours. On minimise ainsi les risques de dégradation de la surface.

En conduisant les opérations culturales par culture ou par blocs, on risque de ne pas terminer une opération culturale dans la période climatique optimale. Cette stratégie est caractéristique des exploitations en GAEC ou CUMA dont l'accès au matériel, semoir en particulier, est limité et partagé. Une dégradation sur un labour précoce (itinéraire 1 et 2) ou sur une première reprise peut rendre plus difficiles les reprises suivantes et entraîner l'augmentation du nombre de passages.

Le classement de ces itinéraires techniques vis-à-vis de l'érosion dépend nécessairement de la répartition des pluies quantifiée par la somme des pluies cumulées (BURWELL, LARSON, 1969). En comparant l'intervalle de temps labour-semis à la somme des pluies cumulées nécessaires à la dégradation d'un état fragmentaire, on aboutit à la conclusion que les opérations culturales d'installation de ces cultures n'ont qu'une faible influence sur les quantités d'eau ruisselées. Seule une période sèche entre le semis et la première pluie diminue la vitesse de dégradation (BOIFFIN *et al.* 1986).

Par contre la succession culturale et le mode de gestion des intercultures : engrais vert, date et type de déchaumage(s), et d'épandage (s) conditionneront le ruissellement à une époque de l'année où les pluies sont les plus agressives (quantité et intensité). Le classement des itinéraires techniques auquel on aboutit : $3 \succ 1 > 2$ (tableau VI) est à confronter aux rendements espérés.

CONCLUSION

L'observation morphologique des états de surface en amont des rigoles et le suivi des événements pluvieux (intensité et durée) fournissent des indicateurs des risques d'émission du ruissellement à l'échelle de la parcelle. Ceux-ci sont gouvernés par trois variables : l'intensité des pluies, l'infiltrabilité et la détention superficielle. La taille de l'impluvium détermine la longueur de l'écoulement et la quantité d'eau ruisselée.

Pour estimer les risques de concentration du ruissellement, dans les chenaux préférentiels que sont les traces de roues et les talwegs, on prendra en compte la pente et sa longueur, l'orientation des modelés de surface et les réseaux de voies d'écoulement. Le détachement de terre dépendra, dans les zones de concentration, de la largeur de l'écoulement, de la rugosité et de la compacité du fond des chenaux.

En dehors de la pente, toutes ces variables évoluent dans le temps. Celles qui sont en rapport avec l'état de surface peuvent être modifiées par une conduite différenciée des systèmes de culture, visant à réduire la susceptibilité du terrain à l'érosion. L'importance et la diversité des cultures de printemps ne sont pas remises en cause. La mise en œuvre d'opérations culturales préventives, déterminante dans les intercultures, reste aléatoire et conditionnée par la nature du parc matériel et la disponibilité en main-d'œuvre de l'exploitation. De plus, les portions de bassins versants cultivées par chaque agriculteur sont rarement isolées hydrologiquement. Elles reçoivent des écoulements concentrés en amont et alimentent des rigoles en aval. Des solutions d'ensemble telles que le réaménagement parcellaire seraient à envisager.

Deux points de méthode nous paraissent applicables au diagnostic des risques d'érosion liés à la mise en œuvre des systèmes de culture : la décomposition des risques d'érosion en risques d'émission et de concentration

du ruissellement d'une part, la description des états de surface et de leurs transformations dans le temps, d'autre part.

La typologie des états de surface pourrait être valorisée à une autre échelle par la photointerprétation. Il suffirait que les prévisions de l'émission du ruissellement, établies à l'échelle de la parcelle soient extrapolées à des types de surface appréciés sur des espaces plus vastes, à partir de l'examen des photos aériennes ou des résultats de télédétection.

BIBLIOGRAPHIE

- BOIFFIN (J.), 1984. — La dégradation structurale des couches superficielles des sols sous l'action des pluies. Thèse Docteur-Ingénieur, INAPG, Paris, 320 p. + annexes 104 p.
- BOIFFIN (J.), PAPY (F.) et PEYRE (Y.), 1986. — Système de production, système de culture et risques d'érosion en Pays de Caux, INAPG-INRA-Ministère d'Agriculture, 04/86, 154 p. + annexes.
- BOLLINE (A.), 1982. — Étude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse Sciences Géographiques, Université de Liège, 356 p. + annexes.
- BURWELL (R. E.) et LARSON (W. E.), 1969. — Infiltration as influenced by tillage induced random roughness and pore space, *Soil Sc. Soc. of America Proceedings*, (33) : 449-452.
- GOETGHELUCK (F.), LAIRIS (V.), THIOLLIÈRE (B.), 1985. — Système de production, système de culture et risques d'érosion dans le pays de Caux, mémoire INAPG, Paris, 96 p. + annexes, 24 p.
- HERVÉ (D.), 1985. — Systèmes agraires et risques d'érosion, rapport intermédiaire, INAPG, Paris, juillet 1985, 11 p. + annexes 26 p.
- HUDSON (N.), 1981. — Soil conservation, Bastford Academy, 6^e ed., London : 209-223.
- HORNER (G. M.), 1960. — Effect of cropping systems on runoff, erosion, and wheat yields, *Agronomy Journal*, (52) : 342-344.
- JOHNSON (C. B.) et MOLDENHAUER (W. C.) 1979 — Effect of chisel versus moldboard plowing on soil erosion by water, *Soil Sc. Soc. of America Proceedings*, N° 13.
- LAFLÉN (J. M.) et COLVIN (T. S.), 1981. — Effect of crop residue on soil loss from continuous row cropping, *Transactions of the ASAE*, 24 (3) : 605-609.
- MONNIER (G.), BOIFFIN (J.) et 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.*, 22 (2) : 123-131.
- MONTEITH (N. H.), 1974. — The role of surface roughness in runoff, *Soil Conservation Journal* : 42-45.
- WISCHMEIER (W. H.), 1960. — Cropping management factors evaluation for a USLE, *Soil Sc. Soc. of America Proceeding* (24) : 322-326.
- WISCHMEIER (W. H.) et SMITH (D. D.), 1965. — Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains, *Agricultural Handbook* N° 282, USDA, 47 p.
- YOUNG (R. A.) et VOORHEES (W. B.), 1982. — Soil erosion and runoff from planting to canopy development as influenced by tractor wheel traffic, *Transactions of the ASAE*, 25 (3) : 708-712.

ANNEXE 1

Caractéristiques de événements pluvieux, en avril et mai 85, jusqu'au déclenchement du phénomène érosif au printemps

Date	Hauteur (mm)	Intensité (mmh)	Durée (mm)
11.04	6.5	2.6	150
11.04	1.5	3	30
11.04	1.5	6	15
11.04	1.5	6	15
12.04	2.5	10	15
13.04	6.5	6.5	60
2.05	0.9	6	9
2.05	0.7	3.7	11
12.05	7.6	4	2
13.05	0.6	7.6	5
14.05	4.7	2.5	113
20.05	7	35	12
20.05	3	2.6	69
20.05	6	36	10

ANNEXE 2

Analyse fréquentielle de la pluviométrie 1985, Gordeville

