
Les déterminants agricoles du ruissellement et de l'érosion

De la parcelle au bassin versant

Bruno Ludwig

Les activités agricoles influencent de façon très importante l'ensemble des processus qui interviennent dans les phénomènes de ruissellement et d'érosion (Auzet, 1987, Auzet *et al.*, 1990). Dans le cas de l'érosion hydrique, l'érosion des sols résulte du transport de terre entre des zones d'arrachement et des zones de dépôt. Ce transport s'effectue en suspension dans le ruissellement, et exige donc préalablement :

- la mobilisation de particules terreuses de taille suffisamment petite à la surface du sol ;
- la genèse d'un excès d'eau superficiel et sa mise en mouvement.

Le détachement des particules solides peut se faire sous l'action des gouttes de pluie, ou sous l'action du ruissellement lui-même. La quantité de particules solides mobilisées par les impacts de gouttes dépend principalement de l'énergie cinétique des gouttes atteignant le sol et de la résistance qu'oppose le sol à la désagrégation, qui est en relation avec la stabilité structurale des agrégats (Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Si les particules mobilisées sont prises en charge par un ruissellement diffus, elles peuvent alors être transportées sur de longues distances. Sinon, elles rejaillissent à courte distance sous l'impact des gouttes. Ce processus souvent appelé « splash » (Poesen, 1985) provoque le colmatage des pores et des interstices ouverts à la surface du sol et crée ainsi un mince horizon continu appelé croûte de battance. À partir de l'état initial fragmentaire créé par le dernier travail du sol, cette croûte de battance se développe selon deux stades d'évolution successifs : la croûte

structurale et la croûte sédimentaire (Bresson et Boiffin, 1990). Cette dégradation de l'état de surface du sol s'accompagne d'une réduction significative de la capacité d'infiltration et d'une diminution de la rugosité de la surface du sol, et donc de la capacité de stockage d'eau sous forme de flaques (Boiffin, 1984). Cette évolution tend à favoriser la genèse d'un ruissellement par « refus à l'infiltration ». Le ruissellement produit, qu'il soit diffus ou concentré, est susceptible d'arracher des particules solides et ainsi de former des incisions plus ou moins profondes appelées rigoles ou ravines, pour les plus grandes d'entre elles. Cette action est due à la force tractrice exercée par les écoulements (Govers, 1985), elle est liée à leur vitesse et l'épaisseur de la lame d'eau. Les écoulements dépendent eux-mêmes de la pente locale du terrain, de la rugosité de surface qui constitue un frein au ruissellement, de la quantité d'eau disponible et de la concentration du ruissellement. Le sol oppose à cette force une résistance à l'arrachement déterminée par sa cohésion globale, qui regroupe la résistance intra et inter agrégats et l'effet du développement racinaire (Foster, 1990).

Les facteurs agronomiques contrôlant l'évolution de l'état de surface du sol sous l'action des gouttes de pluie, donc la genèse du ruissellement, et ceux contrôlant la résistance du sol à l'arrachement de particules solides par les impacts des gouttes de pluie ou le ruissellement, sont à prendre en compte au niveau de la parcelle agricole. En revanche, les interactions spatiales entre les surfaces productrices d'un ruissellement et celles subissant une érosion, par l'intermédiaire du réseau de col-

Bruno Ludwig
INRA
Unité d'agronomie
de Laon-Péronne
Rue Fernand Christ
02007 Laon Cedex

lecte et de concentration du ruissellement, ne peuvent être appréhendées qu'à l'échelle du bassin versant agricole.

Influence de l'activité agricole au niveau de la parcelle

■ Effets liés à la couverture du sol

L'énergie cinétique des gouttes de pluie, qui agit sur la quantité des sédiments déplacés à très courte distance par le splash (au maximum de l'ordre de quelques dizaines de centimètre), est réduite par l'effet d'interception exercé par le couvert végétal et les résidus de récolte. Cet effet protecteur est d'autant plus important que le couvert est dense, et dépend donc de la nature de la culture présente, de son stade de développement et de sa densité de peuplement. À titre d'exemple, les mesures de la quantité de terre déplacée par le splash pour un sol limoneux effectuée par Bolline (1982) entre mars septembre 1974 donnent 50 t/ha pour le blé (culture totalement couvrante à cette période) contre 400 t/ha pour un sol nu et 200 t/ha pour la betterave sucrière (qui ne couvre entièrement le sol que pendant approximativement la moitié de cette période). Cette protection physique du sol par la couverture végétale de l'impact direct des gouttes de pluie ralentit la vitesse de formation des croûtes de battance, empêchant parfois la formation du stade ultime de dégradation qu'est la croûte sédimentaire. Ainsi, une capacité d'infiltration élevée est maintenue, limitant le risque de genèse d'un ruissellement même lors de pluies à fortes intensités.

Les organes des végétaux et les résidus en contacts avec le sol jouent également le rôle de frein sur le ruissellement, réduisant ainsi sa force tractrice, et donc sa capacité à arracher des particules solides. Les travaux de Meyer et Mannering (1967) montrent qu'entre un sol nu et un sol couvert par 2,5 t/ha de résidus, la réduction du ruissellement est de l'ordre de 40 %, alors que celle des pertes en terre atteint 90 % ; la vitesse du ruissellement et la concentration en sédiments de ce dernier étant fortement réduites.

L'effet protecteur du couvert végétal s'exerce de manière plus ou moins efficace et durable selon les modalités d'implantation des plantes, leur vitesse de croissance et la disposition du feuillage.

On peut distinguer, par exemple la couverture végétale très dense et permanente des prairies. À l'inverse, les parcelles qui reçoivent des cultures annuelles sarclées (maïs, betterave sucrière), semées au printemps et à faible densité, sont caractérisées par deux périodes à hauts risques de ruissellement et d'érosion : lors de l'automne et de l'hiver précédant l'implantation de la culture en l'absence d'une couverture du sol, et au printemps, avec un couvert végétal en général peu dense associé, sous les climats tempérés européens, à un risque d'orage relativement élevé.

Après la récolte, la présence de résidus à la surface du sol (mulch) assure également une protection, qui peut être utilisée comme technique de lutte contre l'érosion des sols. L'efficacité de cette protection dépend de la nature des résidus et de leur taux de recouvrement du sol, qui dépend lui-même de la masse des résidus et du degré d'incorporation résultant des travaux culturaux. À titre d'exemple, le taux de couverture du sol par les résidus d'une culture précédente de blé lors d'un semis de maïs peut varier de 5 % à 90 % :

- 5 % suite à un labour accompagné de deux façons superficielles ;
- 90 % pour un semis direct sans labour préalable.

Ces valeurs sont respectivement de 2 et 60 % avec un précédent soja (Griffith *et al.*, 1986).

Parallèlement à la protection physique de la surface du sol, assurée par le couvert végétal, la présence d'une culture s'accompagne également d'une augmentation de la résistance du sol à l'arrachement grâce à l'armature assurée par les racines. Son efficacité dépend étroitement de la densité racinaire de la plante ; celle des graminées étant particulièrement forte.

L'implantation d'herbe sur une zone sensible à l'érosion assure une protection du sol particulièrement efficace à l'impact des gouttes de pluie, oppose un frein au ruissellement et accroît la cohésion du sol. Il est cependant évident que l'ensemble des terres agricoles ne peuvent faire l'objet de l'implantation d'une prairie. En automne, une implantation précoce des cultures d'hiver (blé, orge, colza) permet un développement efficace d'un couvert végétal protecteur. Les parcelles en interculture, destinées aux cultures de printemps, peuvent faire l'objet de l'implantation d'une cul-

ture intermédiaire destinée à protéger le sol de l'impact des gouttes de pluie, comme la moutarde (Martin, 1999). Au printemps, une forte couverture végétale sur les parcelles en culture d'hiver est généralement acquise et suffisante pour assurer une protection du sol. En revanche, seul un semis direct dans un mulch ou une culture intermédiaire peut être mise en œuvre pour limiter le risque d'érosion dès l'implantation des cultures de printemps. Cette technique présente néanmoins un risque sanitaire pour les cultures implantées car les résidus maintenus à la surface du sol, durant tout l'hiver assurent un abri aux parasites et forment un foyer de maladies.

■ Effets résultant des actions d'ameublissement du sol

Tout travail du sol par un outil a pour effet d'ameublir le sol en individualisant des fragments dont la distribution des tailles est déterminée par le type d'outil, la vitesse de travail et la cohésion du sol. Cette dernière dépend elle-même de l'humidité du sol, de son état de compacité, des conditions du compactage qui en est à l'origine, du taux d'argile, du taux de matière organique, et de l'armature racinaire. L'ameublissement augmente la sensibilité du sol à l'arrachement de particules solides par le ruissellement, du fait de l'annulation de la cohésion inter-agrégat. À l'inverse, cet ameublissement réduit fortement le risque de ruissellement puisqu'il s'accompagne d'une très forte augmentation de la macro-porosité, et donc de la capacité d'infiltration (de l'ordre de plusieurs dizaines de mm/h).

Le travail du sol a également pour effet de modifier la rugosité de la surface du sol. On distingue

une rugosité aléatoire résultant de la distribution des tailles d'agregat à la surface du sol et une rugosité orientée suivant le sens de travail du sol, correspondant par exemple aux sillons et billons d'un labour.

La rugosité aléatoire agit doublement sur le risque d'érosion par le ruissellement. D'une part, elle détermine la capacité de stockage d'eau à la surface du sol (Kamphorst *et al.*, 2000), et donc le retard dans le démarrage du ruissellement. D'autre part, elle forme un frein au ruissellement réduisant sa vitesse, et par conséquent sa « force tractrice ». La gamme des valeurs de rugosité obtenues selon quelques grands types d'opérations culturales est indiquée dans le tableau 1. On note une très grande variabilité de la quantité d'eau stockable à la surface du sol selon le type d'opération envisagée. Pour une même situation culturale, les écarts peuvent être importants, par exemple du simple au double entre un semis dans un lit fin et un semis dans un lit grossier.

La rugosité orientée modifie le cheminement du ruissellement par rapport à la direction imposée par la plus grande pente. La pente locale se trouve ainsi réduite, d'où une réduction de la vitesse d'écoulement et de sa force tractrice. Dans le cas où la direction du travail du sol est strictement perpendiculaire à la direction de la plus grande pente, la rugosité orientée peut contribuer à stocker un important volume d'eau. Cependant, cette technique d'un travail du sol suivant les courbes de niveau, souvent préconisée, est extrêmement difficile à mettre en œuvre dans des parcelles de forme rectangulaire allongée (côté étroit dans le sens des lignes de niveau). De plus, la moindre ondulation topographique crée une accumulation

Opérations de travail du sol	Ecart-type des cotes de surface (cm)	* Capacité de stockage d'eau à la surface du sol (mm)**	
		a	b
Labour seul	≥ 3	≥ 6	7
Chisel seul	2,3	4	5
Semis grossier (ex. blé)	1,8	3	3
Semis fin (ex. betterave)	1,2	1,5	1
Semis direct	0,7	0,7	non estimée

* : d'après Zobeck et Onstad (1987) et Boiffin (1984).

** a : évalué en appliquant le modèle de Onstad (1984) pour une pente de 2 %.

** b : d'après Kamphorst et al (2000) pour une pente nulle.

◀ Tableau 1. – Rugosité et capacité de stockage superficiel en fonction des opérations de travail du sol réalisées.

d'eau en une série de points bas, où la rupture brutale des levées formées par les billons peut être responsable d'une importante érosion.

■ *Effets résultant des actions de compactage*

Le passage d'engins agricoles dans les parcelles imprime à la surface du sol des traces de roue. Si ce passage n'est pas immédiatement suivi par un outil de travail du sol, les traces ainsi formées présentent des motifs linéaires en dépression plus ou moins marqués et un fort degré de compactage du sol. L'ampleur de ce double effet varie selon le type de sol, la charge appliquée, l'humidité du sol lors du compactage et l'état de compacité préalable (Guérif, 1990). Le compactage du sol a pour effet d'augmenter significativement la cohésion du sol qui s'oppose à la force tractrice exercée par le ruissellement, réduisant aussi le risque d'érosion. Cependant, la diminution de la conductivité hydraulique de la couche compactée a pour effet d'accélérer l'apparition d'un ruissellement, ce qui inversement augmente le risque d'érosion. Enfin, un des effets principaux des traces de roue est de canaliser le ruissellement : elles permettent une collecte efficace du ruissellement diffus produit par l'ensemble de la parcelle et contribuent ainsi à l'aggravation de l'érosion en aval.

La densité de traces de roue à la surface du sol varie en fonction de l'opération culturale effectuée : de 0 % dans le cas d'un travail du sol (ex. labour) à 80 % pour les chantiers de récolte de

betterave sucrière par exemple (tableau 2). Mais, une même opération culturale peut s'accompagner d'une forte variabilité de densité des traces de roue. À titre d'exemple, le tableau 2 présente les valeurs extrêmes rencontrées pour un semis de céréales. Dans ce cas précis, l'intensification des pratiques agricoles réduit la densité des traces de roue.

Il est généralement conseillé d'éliminer les zones compactées par un travail du sol pour augmenter la capacité d'infiltration, et ainsi réduire le risque de genèse d'un ruissellement. Cependant, le long des axes de concentration du ruissellement, en particulier le long du thalweg, il est au contraire préférable de ne pas travailler le sol. Un sol compacté permet de maintenir une forte résistance à l'arrachement, réduisant ainsi le risque d'érosion par ruissellement concentré. Pour de très petits bassins versant de moins de 10 ha, le tassement du sol le long de l'axe de concentration du ruissellement après un travail du sol est parfois proposé pour limiter le risque d'érosion. Le choix de l'ameublissement ou du maintien d'un sol compacté dépend de la position de la parcelle au sein du bassin versant. Ce point est discuté au titre portant sur la structure hydrographique d'un bassin versant agricole.

■ *Évolution chronologique des risques de ruissellement et d'érosion*

On peut considérer que les opérations culturales, en modifiant les caractéristiques physiques du sol

► Tableau 2. – Densité de traces de roue laissées à la surface du sol selon les situations culturales.

Opérations culturales	Densité de traces de roue en surface (%)
Labour *	0 %
Semis de betterave et maïs *	15 à 35 %
Chantier de récolte de betterave sucrière *	70 à 80 %
Semis de céréales et traitement herbicide **	
· Préparation « traditionnelle » et pulvérisateur de 12 m (1)	32 %
· Outils combinés et pulvérisateur de 18 m (2)	10 %
· Outils combinés avec roues du semoir effacées et pulvérisateur de 36 m (3)	2 %

* : d'après Papy et Boiffin (1988)

** : Ouvry (1989-90)

1. Préparation du lit de semence avant le semis, d'où la persistance des traces de roue du tracteur attelé au semoir.

2. Préparation du lit de semence et semis en un passage avec un outil à dents intercalé entre le tracteur et le semoir effaçant les empreintes de roue du tracteur.

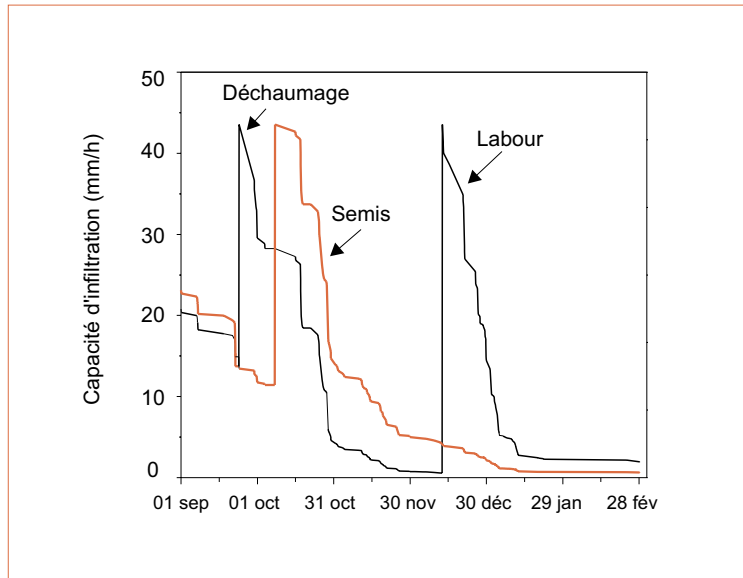
3. Idem 2, plus des griffes effaçant les traces de roue du semoir.

qui régissent les processus du ruissellement et de l'érosion, ont un effet instantané. Par la suite, l'état du terrain évolue progressivement à partir de cet état initial sous l'action du climat. Un des aspects les plus importants de cette évolution est la dégradation structurale du terrain, qui se traduit par une décroissance progressive et forte de la capacité d'infiltration, et donc une forte augmentation du risque de ruissellement, correspondant à la formation de la croûte de battance. La vitesse de formation de cette croûte de battance dépend du taux d'argile et de matière organique, mais également de l'humidité des agrégats lors de la pluie et de l'histoire hydrique des agrégats. Une longue période d'alternance entre dessiccation et humectation diminue la mouillabilité des agrégats, entraînant une augmentation de leur stabilité structurale (Boiffin, 1976). Le Bissonnais et Le Souder (1995) proposent une méthode de classement à la sensibilité à la battance des sols à partir de tests effectués en laboratoire.

La capacité d'infiltration du sol humide, de l'ordre de la centaine de millimètres par heure pour un état initial fragmentaire (I_0), décroît progressivement sous l'action des pluies jusqu'à des valeurs de l'ordre du millimètre par heure. L'évolution de la capacité d'infiltration en conditions hivernales (I en mm/h) peut être décrite par une relation de la forme suivante (Boiffin, 1984) :

$$I = I_0 e^{-0,64 (a Ec_5 + b)} \quad \text{Équation 1}$$

Cette relation intègre l'effet de la structure du sol par l'intermédiaire du paramètre I_0 , de l'énergie des pluies traduite par la variable Ec_5 (énergie cinétique cumulée en joules des pluies d'intensité supérieure à 5 mm/h reçues depuis le dernier travail du sol par m² de terrain), de la stabilité des agrégats par l'intermédiaire des paramètres a et b , qui eux-mêmes dépendent de la texture du sol, ainsi que de l'état et l'histoire hydriques des agrégats. La figure 1 présente l'évolution au cours du temps de la capacité d'infiltration simulée sur la base de la relation précédente pour deux parcelles, les paramètres I_0 , a et b étant fixés aux valeurs proposées par Boiffin (1986) et Boiffin et Monnier (1986) pour un sol limoneux, soit respectivement 50 mm/h, 0,055 et 0,5. La première parcelle fait l'objet d'une implantation de blé dont le semis a été réalisé début octobre. La seconde est réservée pour l'implantation d'une culture de printemps et est occupée par une interculture tra-

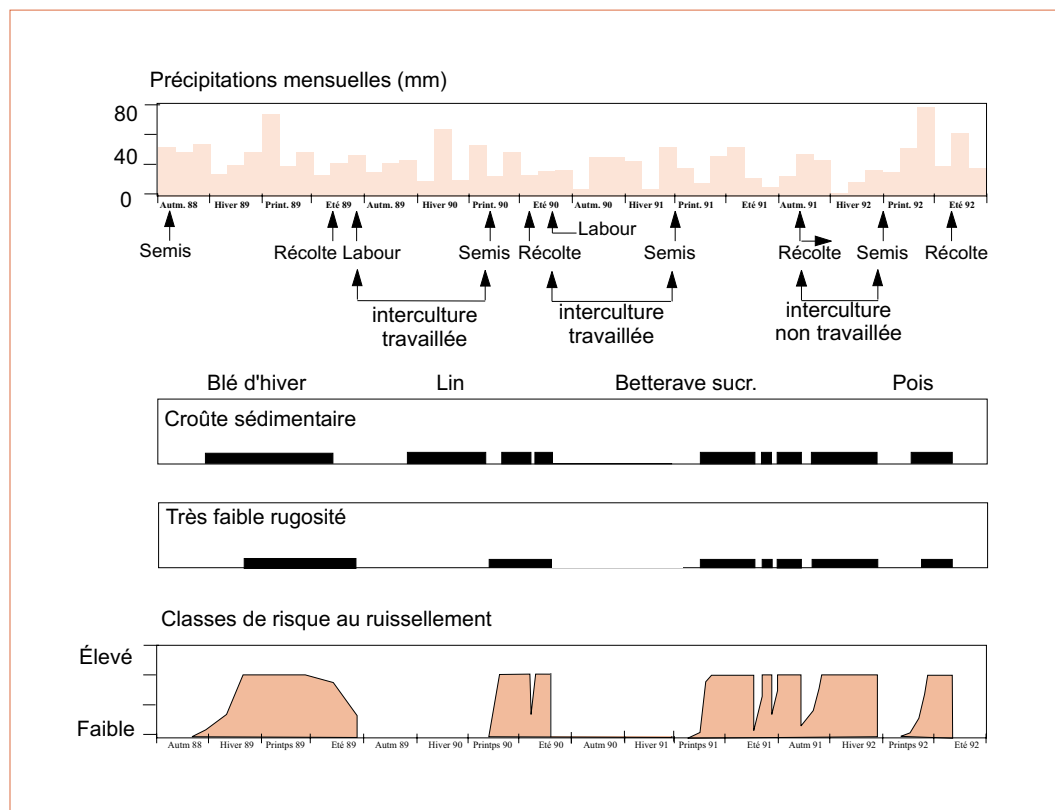


▲ Figure 1. – Estimation à partir de l'équation 1 de l'évolution de la capacité d'infiltration pour une parcelle en interculture travaillée (déchaumage et labour) et une parcelle avec un semis de blé.

vaillée (déchaumage et labour). Selon le calendrier des opérations de travail du sol, déterminé en grande partie par le choix des cultures, on observe une forte variation de la capacité d'infiltration au cours du temps pour une même parcelle et entre parcelles à un instant donné. Cette variation au cours du temps s'observe également pour la rugosité de surface.

Cette double évolution engendre, pour une parcelle donnée, une alternance de périodes au cours desquelles le terrain présente une très grande aptitude à produire un ruissellement, et de périodes sans risque de ruissellement (Monnier *et al.*, 1986; Papy et Boiffin, 1988). En combinant de façon conventionnelle les notations qualitatives sur l'état de surface du terrain (présence ou absence d'une part d'une croûte sédimentaire, d'autre part d'une faible rugosité), on peut établir des classes d'aptitudes au ruissellement et visualiser cette alternance (figure 2), liée au calendrier cultural.

Le risque d'érosion d'une parcelle n'est pas la résultante directe du risque de production de ruissellement, puisqu'il intègre la sensibilité du sol à l'arrachement, et dépend en outre de la position de la parcelle dans l'espace. Ainsi, une parcelle, située en position aval au sein d'un bassin versant, peut être réceptrice d'un ruissellement pro-



► Figure 2. – Variabilité du risque de ruissellement pour une parcelle au cours de quatre années consécutives.

duit en amont sans être elle-même émettrice de ruissellement. Dans ce cas, le risque d'érosion dépend du degré d'ameublissement du sol, de la quantité et de la concentration du ruissellement produit en amont. Il est donc indispensable de tenir compte de la localisation de la parcelle et des facteurs contrôlant la genèse d'un ruissellement de surface et sa circulation en amont de cette même parcelle.

Structure hydrographique d'un bassin versant et pratiques agricoles

La structure hydrographique d'un bassin versant est déterminée par la distribution spatiale des surfaces émettrices de ruissellement, la forme du réseau des collecteurs de ruissellement, et les connexions qui mettent en relation les surfaces avec les collecteurs (Ludwig, 1992 ; Ludwig *et al.*, 1995 et 1996 a). L'aptitude à la production d'un ruissellement et la sensibilité du sol à l'érosion de chaque parcelle au sein d'un bassin versant dépen-

dent du choix de la culture, donc de la succession des opérations culturales, et ceci indépendamment des parcelles voisines. Par contre à un instant donné, le niveau de risque de formation d'un ruissellement et de sédiments à l'exutoire d'un bassin versant agricole dépend étroitement de la distribution des surfaces émettrices de ruissellement par rapport au réseau des collecteurs et de la sensibilité du sol à l'érosion le long de ces collecteurs. Le réseau de collecteurs fixe la longueur sur laquelle peut se constituer une rigole : toutes choses égales par ailleurs, plus la surface émettrice est en amont, plus la longueur incisée en aval pourra être grande, à condition que la surface émettrice soit hydrologiquement connectée aux collecteurs et que ces derniers se caractérisent par des sols à cohésion suffisamment faible pour être incisés.

Le réseau des collecteurs se compose des lignes topographiques en dépression correspondant aux lignes de convergence des plus grandes pentes. Le parcours suivi par le ruissellement diffus et concentré au sein d'un petit bassin versant agricole

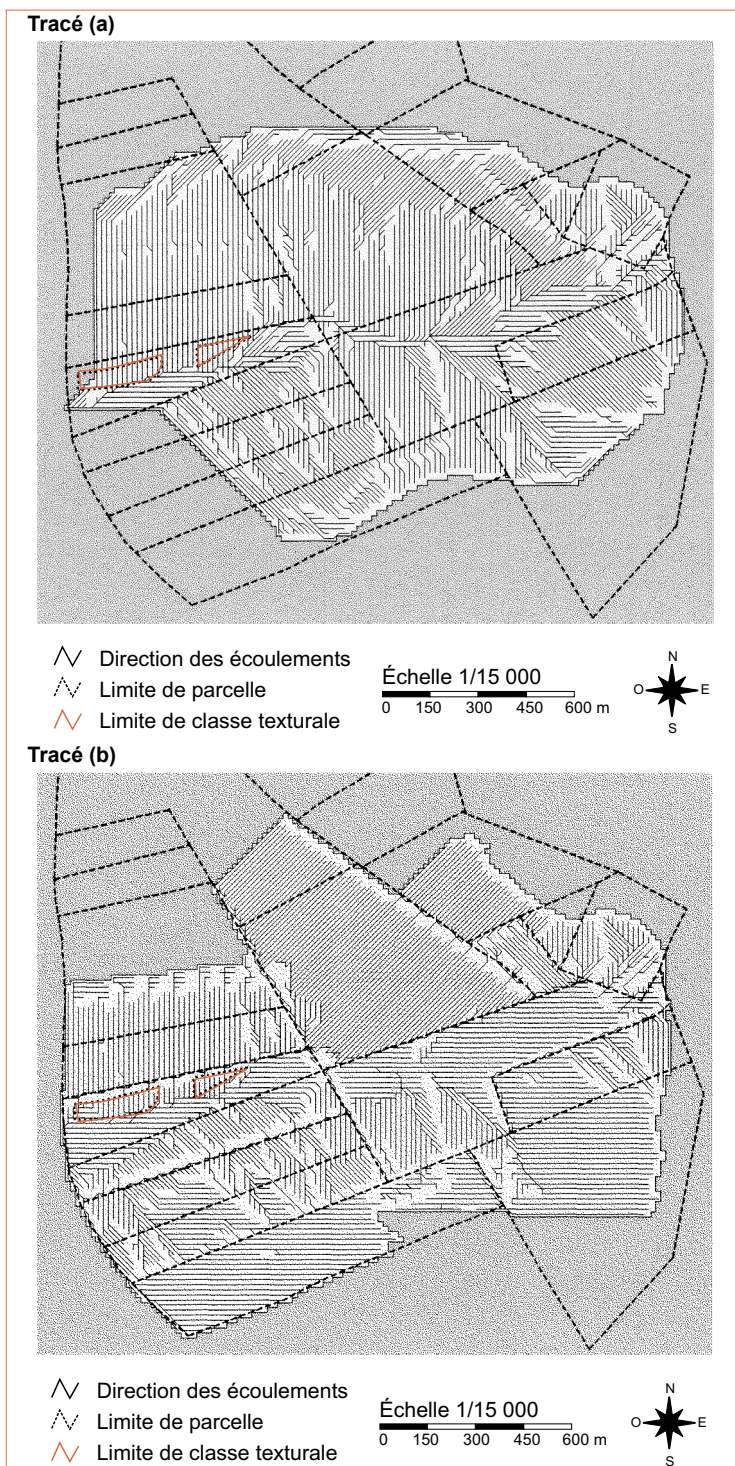
de 65 ha, localisé dans la commune de Fonguesemare (Seine-Maritime, carte IGN® série bleue 1810 Ouest « Bolbec », longitude 00°18'22", latitude 19°40'45"), peut être construit grâce à un modèle numérique de terrain (MNT) en utilisant un système d'information géographique (SIG). L'exemple illustré par la figure 3 a été obtenu sous Arc-Info®. Cependant, au sein des bassins versants agricoles, il existe également des motifs linéaires d'origine agraire susceptibles de modifier la direction prise par le ruissellement (figure 4). Les motifs agraires les plus fréquents sont les traces de roue imprimées à la surface du sol avec une périodicité spatiale déterminée par la nature de l'opération culturale et le type d'outil utilisé. Aux deux extrémités de la parcelle, l'agriculteur fait demi-tour en relevant les outils ou en interrompant leur fonctionnement. Ces deux zones en bout de parcelle, appelées fourrières, sont travaillées perpendiculairement au reste de la parcelle en fin d'opération. De ce fait, les traces de roue de la fourrière aval forment des collecteurs du ruissellement très efficaces, susceptibles de concentrer le ruissellement produit par l'ensemble de la parcelle. Il existe un dernier type de motif linéaire d'origine agraire créé lors du labour : la dérayure. Lors du labour, la charrue retourne et déplace latéralement la terre : le dernier sillon en limite de parcelle, ne pouvant être comblé, à l'aspect d'un petit fossé temporaire que l'on appelle dérayure.

La prise en compte de l'effet de ces motifs agraires au sein d'un bassin versant agricole se traduit par des modifications :

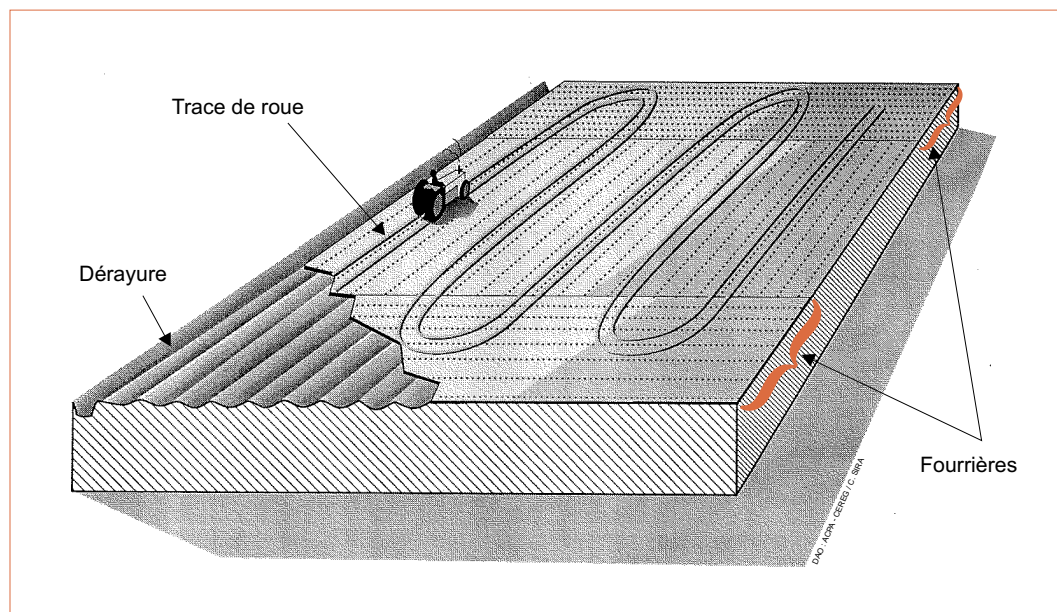
- de la forme du bassin versant (déplacement des lignes de partage des eaux) ;
- des directions prises par le ruissellement diffus ;
- du tracé du réseau des collecteurs du ruissellement concentré.

Ces modifications, que nous avons reproduites automatiquement sous Arc-Info® (Ludwig *et al.*, 1996 b), sont illustrées par la figure 3 (b), pour le même bassin versant que celui présenté figure 3 (a).

À partir de cette carte des écoulements de surface modifiés par les pratiques agricoles, la structure hydrographique du bassin versant agricole peut être extraite de manière semi-automatique sous

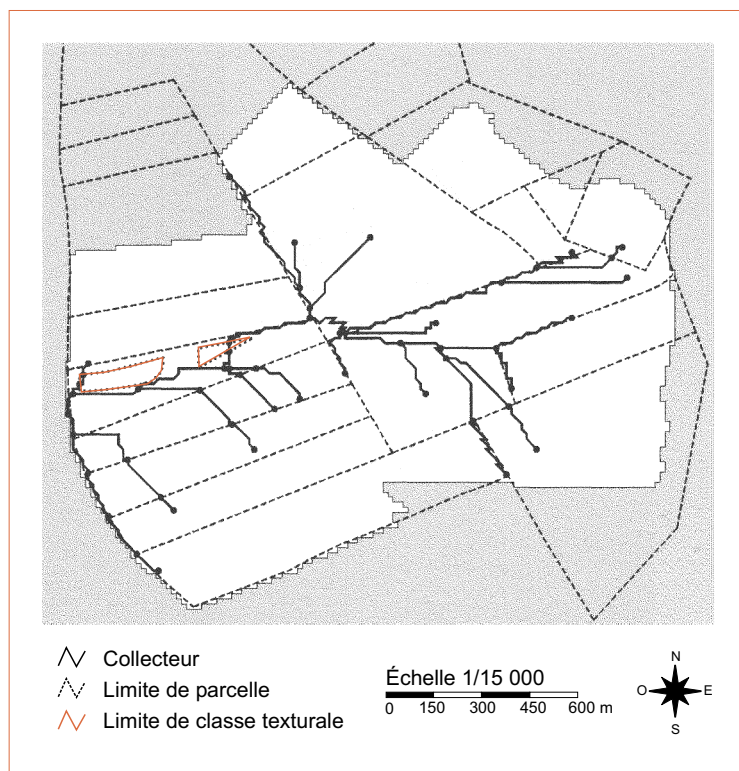


▲ Figure 3. - Tracés des écoulements de surface :
 (a) - d'après la topographie, tracé obtenu automatiquement avec un modèle numérique de Terrain sous Arc-Info® ;
 (b) - tracé modifié par les effets agraires, obtenu automatiquement sous Arc-Info®.



► Figure 4. – Motifs d'origine agraire en dépression susceptibles de guider le ruissellement de surface.

▼ Figure 5. – Réseau des collecteurs du ruissellement concentré incluant les motifs topographiques et agraires, extrait semi-automatiquement sous Arc-Info® à partir du tracé des écoulements de surface modifié par les pratiques agraires (voir figure 3 (b)).



Arc-Info®, permettant d'identifier le réseau des collecteurs du ruissellement concentré (figure 5) et les surfaces contributives au ruissellement connectées à chaque branche du réseau des collecteurs.

Conclusion

Par la multiplicité des processus qu'elle concerne, l'influence des pratiques agricoles sur le ruissellement et l'érosion est non seulement importante, mais également extrêmement complexe. Cette influence est aussi en interaction avec les caractéristiques climatiques, la morphologie du bassin versant et la distribution des sols. Il en résulte que si l'on veut évaluer l'effet des pratiques culturales sur le ruissellement et l'érosion, de nombreuses expérimentations sur un grand ensemble de sites et sur plusieurs années sont nécessaires. Techniquement, cette solution est quasi-impossible à mettre en œuvre. La solution tient en une combinaison d'expérimentations en plein champ et d'expérimentations numériques à l'aide de modèles d'érosion. Encore faut-il que ces modèles soient aptes à rendre compte l'effet des pratiques agricoles et en particulier de toutes les modifications temporelles qu'introduisent ces pratiques.

Du point de vue pratique, la solution repose sur la conception d'un modèle capable de prendre en

compte les effets des pratiques agricoles sur l'ensemble des processus physiques en jeu. Les pratiques agricoles doivent être prises en compte, non pas comme une caractéristique qualitative, mais comme un indicateur des modifications apportées aux paramètres des processus physiques modélisés. Sans quoi, à chaque modification d'une pratique agricole, du climat et/ou du sol, une nouvelle campagne d'expérimentations s'impose. Cette étape de prise en compte des effets des pratiques agricoles sur la modélisation du ruissellement et de l'érosion est en cours de mise en œuvre à l'INRA pour deux modèles, l'un à base physique : LISEM (De Roo et Jetten, 1999, Jetten *et al.*, 1996), l'autre à base sto-

chastique : STREAM (Cerdan *et al.*, 2000). Les premiers essais réalisés à l'aide de ces deux modèles montrent qu'une technique de lutte anti-érosive ne donne pas le même résultat suivant le bassin versant. Il en ressort une forte sensibilité au bassin versant étudié, à son état agraire et à l'événement pluvieux retenu. L'outil « modèle » est cependant un précieux outil d'aide à la décision, seul capable d'intégrer les interactions complexes, parfois ambivalentes, entre les techniques de lutte susceptibles d'être mises en œuvre et les processus physiques en jeu. Les solutions retenues pour un site lui sont propres et ne peuvent, sans contrôle préalable, être proposées pour un autre site. □

Résumé

Après une rapide synthèse des processus contrôlant le ruissellement et l'érosion, l'influence des pratiques agricoles est présentée à deux échelles : la parcelle agricole et le bassin versant.

Au niveau de la parcelle, les pratiques agricoles déterminent la nature et la densité du couvert végétal ou des résidus de récolte protégeant le sol de l'impact des gouttes de pluie et ralentissant la vitesse du ruissellement. Parallèlement, ces pratiques déterminent une succession d'actions mécaniques sur le sol conduisant soit à un ameublissement ou soit à un compactage du sol. L'ameublissement favorise l'infiltration, mais également l'érosion, tandis que le compactage favorise le ruissellement, mais limite l'érosion.

Au niveau du bassin versant, les pratiques agricoles mises en œuvre à l'échelle de la parcelle fixent la distribution spatiale de surfaces émettrices d'un ruissellement et de surfaces ayant un sol à faible cohésion. Leur position relative le long d'un réseau de collecteurs permet d'expliquer la localisation et l'intensité de l'érosion. Cette structure hydrographique du bassin versant évolue au cours du temps sous l'action du climat et des pratiques agricoles. L'étude des effets des pratiques agricoles à l'échelle du bassin versant impose le recours à la simulation numérique à l'aide de modèles d'érosion adaptés.

Abstract

We first review the processes controlling runoff and erosion and then examine the influence of agricultural practices on these phenomena on the scale of the agricultural field and the cultivated catchment.

Agricultural practices determine the kind and density of plant and mulch cover in a given field. The cover protects the topsoil from rainfall and reduces the runoff speed. At the same time, agricultural practices are associated with a succession of mechanical actions on the soil that can cause fragmentation and compaction. These actions have opposite effects. Fragmentation increases the infiltration rate, but also the risk of erosion, while compaction increases the runoff rate, but reduces the risk of erosion.

The agricultural practices used on each field determine the spatial distribution of areas able to produce runoff in a catchment area, and the areas susceptible to erosion. The relative position of an area along the runoff collector network determines the location and risk of erosion. This catchment hydrographic structure changes under the combined effects of climate and agricultural practices. Understanding the effects of agricultural practices on the catchment require the use of digital simulations with appropriate erosion models.

Bibliographie

- AUZET, A.V., 1987, *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques*, Min. Env./Min. Agri., CEREG-UA95 CNRS, 60 p.
- AUZET, A.V., BOIFFIN, J., PAPY, F., MAUCORP, J. et OUVRY, J.F., 1990, An approach to the assessment of Erosion Forms and Erosion Risk on Agricultural Land in the Northern Paris Basin, France. In: J. Boardman, D.L. Foster and J.A. Dearing (Ed.), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, p. 383-400.
- BOIFFIN, J., 1976, Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre, *Annales agronomie*, 27, p. 447-463.
- BOIFFIN, J., 1984, *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*, Thèse Doc. Ing. INA Paris-Grignon, 320 p.
- BOIFFIN, J., 1986, Stages and time-dependency of soil crusting in situ, In: F. Callebaut, D. Gabriels and M. De Boodt (Editors), *Assessment of soil surface sealing and crusting, Proceeding of the Symposium held in Ghent, Belgium*, 1985, p. 91-98.
- BOIFFIN, J., MONNIER, G., 1986, Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall, In F. Callebaut, D. Gabriels et M. De Boodt (eds), *Assessment of soil surface sealing and crusting*, Department of Soil Physics, State University of Ghent, Ghent, p. 210-217.
- BOLLINE, A., 1982, *Étude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en Moyenne Belgique*, Thèse Univ., Liège, 356 p.
- BRESSON, L.M. et BOIFFIN, J., 1990. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 47, p. 301-325.
- CERDAN O., SOUCHÈRE V., LECOMTE V., COUTURIER A. et LE BISSONNAIS Y., 2000. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff and erosion model: STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management), *Catena*.
- DE ROO, A. et JETTEN, V., 1999. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *Catena*, Special Issue «Soil erosion modelling at the catchment scale», A. DE ROO (edt), vol. 37, n°3-4, p. 477-493.
- FOSTER, G.R., 1990. Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In J. BOARDMAN, D.L. FOSTER et J.A. DEARING (eds), *Soil erosion on agricultural land*, John Wiley & Sons Ltd, p. 87-105.
- GOVERS, G., 1985. Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. *Catena*, 12, p. 35-49.
- GRIFFITH, D.R. , MANNERING, J.V. et BOX, J.E., 1986, Soil and moisture management with reduced tillage. In M.A. Sprague et G.B. Triplett (eds), *No tillage and Surface-tillage agriculture - The tillage revolution*, J.Wiley et Sons, New-York, p. 19-57.
- GUÉRIFF, J., 1990. Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. In J. Boiffin et A. Marin-Laflèche (eds), *La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur*, Les Colloques de l'INRA n°53, INRA, Paris, p. 71-89.
- JETTEN, V., BOIFFIN, J. et DE ROO, A., 1996. Defining monitoring strategies for runoff and erosion studies in agricultural catchments : a simulation approach. *European Journal of Soil Science*, 47, p. 579-592.
- KAMPHORST, E., JETTEN, V., GUÉRIFF, J., PITKÄNEN, J., IVERSEN, B.V., DOUGLAS, J.T., PAZ, A., 2000. Predicting depression storage from soil surface roughness. *Soil Science Society of America Journal*.
- LE BISSONNAIS, Y. et LE SOUDER, C., 1995. Mesure de la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 1, p. 43-56.
- LUDWIG, B., 1992, *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire*, Thèse doctorat d'université, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 201 p.

LUDWIG, B., BOIFFIN, J., CHADCEUF, J. et AUZET, A.V., 1995. Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchment. *Catena*, 25, p. 227-252.

LUDWIG, B., AUZET, A.V., BOIFFIN, J., PAPY, F., KING, D. et CHADCEUF, 1996 a. États de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Étude et Gestion des Sols*, 3, 1, p. 53-70.

LUDWIG, B., DAROUSSIN, J., KING, D. et SOUCHÈRE, V., 1996 b, Using GIS to predict concentrated flow erosion in cultivated catchments, In K. Kovar et H.P. Nachtnebel (eds), *Application of Geographic Information Systems in hydrology and water resources management*, Proceedings of the HydroGIS'96 conference, Vienna A (16 au 19/04/96), IAHS press, Series of Proceedings and Reports, 25, p. 429-436.

MARTIN, Ph., 1999. Reducing flood risk from sediment-laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern France. *Soil & Tillage Research*, 52, p. 233-245.

MEYER, L.D. et MANNERING, J.V., 1967, Tillage and land modification for water erosion control, In *Tillage for greater crop production*, Conference proceedings, ASAE, St Joseph, p. 58-62.

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 en l'Europe de l'Ouest. *Cab. ORSTOM*, sér. Pédol. 22, 2, p. 123-131.

ONSTAD, C.A., 1984. Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the ASAE*, 27, p. 729-732.

OUVRY, J.F., 1989-90. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré. Expérimentation du Pays de Caux (France). *Cab. ORSTOM*, Série Pédologie, XXV, 1-2, p. 157-169.

PAPY, F. et BOIFFIN, J., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II, Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie*, 8, 9, p. 745-756.

POESEN, J., 1985. An improved splash transport model, *Z. Geomorph. N. F.*, 29, 2, 193-211.

ZOBECK, T.M. et ONSTAD, C.A., 1987. Tillage and rainfall effects on random roughness : a review. *Soil & Tillage research*, 9, p. 1-20.