

Maîtrise du ruissellement et modélisation des pratiques de production

Philippe Martin, François Papy,
Véronique Souchère, Alain Capillon

La société a des exigences de plus en plus marquées vis-à-vis de l'agriculture, par exemple la nécessité de respecter des cahiers des charges liés à la qualité de l'environnement. Dans le cas où la ressource à protéger est l'eau, on cherche à développer des pratiques qui réduisent le ruissellement, l'érosion, les pollutions par les nitrates, etc. De façon classique, face à ce genre de problème, les chercheurs commencent par analyser les processus biophysiques en cause, puis les modélisent et construisent des solutions novatrices dont ils testent *in fine* la faisabilité. À partir du cas d'une région sensible au ruissellement et à l'érosion, nous proposons que les innovations techniques soient conçues dès le départ en intégrant les marges de manœuvre des agriculteurs, déterminées par une modélisation des processus décisionnels. On peut ainsi identifier précocement les contradictions à résoudre et orienter en conséquence la recherche de solutions techniques. Pour la région d'étude, l'ampleur spatiale des phénomènes érosifs implique une gestion du territoire à l'échelle du petit bassin versant, souvent exploité par plusieurs agri-

culteurs. Dans le cadre de cet article, nous nous limiterons au cas le plus simple où le bassin versant n'est occupé que par une seule exploitation agricole.

La zone d'étude : une région touchée par le ruissellement et l'érosion

Le terrain d'étude est la bordure littorale du Pays de Caux (Seine-Maritime, France).

Un milieu physique sensible

Les sols sont limoneux, contenant rarement plus de 12 % d'argile, profonds, homogènes et très battants. À partir d'un « lit de semence », fragmentaire et filtrant, ils se dégradent en surface sous l'effet de pluies, même peu intenses. Ainsi se développe un faciès de croûte sédimentaire, à faible infiltrabilité, avant que le couvert végétal n'ait eu le temps de croître suffisamment pour protéger la surface de l'impact des gouttes [1]. Ces sols sont aptes à de nombreuses cultures et le ruissellement de sub-surface n'y est pas très développé. La morphologie est celle d'une bordure de plateau, en pente douce sur la majeure partie du territoire. Le réseau hydrographique est très peu développé, tandis qu'abondent, au

contraire, les talwegs avec écoulements intermittents alimentés par le ruissellement de surface (talwegs secs). Le climat est de type océanique : de janvier à fin septembre, les pluies médianes sont toujours inférieures à 20 mm par décennie, tandis qu'en octobre, novembre et décembre, il tombe, une fois sur deux, plus de 20 mm par décennie (figure 1).

Des systèmes de culture à risques

Les systèmes de production sont tournés vers la grande culture [2]. Les prairies permanentes n'occupent plus que 10 % du territoire. Sur l'ensemble des surfaces labourées, 40 % sont occupées par des cultures d'hiver (par ordre d'importance : blé, escourgeon et colza), 55 % par des cultures de printemps (betterave sucrière, lin, pomme de terre, pois et un peu de maïs ensilage), 5 % enfin sont réservés au gel de terre.

Les cultures les plus rentables sont :

- la betterave, culture contingentée donnant lieu à des quotas correspondant en moyenne à 1/5 de la surface de l'exploitation, les plus élevés atteignant 1/3 ;
 - la pomme de terre (plant et consommation), qui n'est pratiquée que par quelques exploitants bien équipés en matériel de stockage ; elle constitue une culture spéculative en augmentation au cours des dernières années ;
 - le lin, culture traditionnelle, au revenu fluctuant mais potentiellement élevé.
- Les cultures d'hiver (blé, colza, escourgeon) sont d'un moindre rapport et ont

Nous remercions Michel Tremblay pour sa collaboration technique.

P. Martin, A. Capillon : Département
AGER, INA Paris-Grignon ;
F. Papy, V. Souchère : Unité SAD, INRA
Île-de-France ;
16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris
cedex 05, France.

Tirés à part : P. Martin

régressé au cours de la dernière décennie, notamment au bénéfice du pois protéagineux et de la pomme de terre. Cette tendance s'est accentuée pour la pomme de terre depuis 1992, date de la mise en œuvre de la nouvelle politique agricole commune et du gel des terres. Pois et blé évoluent de façon antagoniste, au gré des fluctuations relatives des primes auxquelles ils donnent droit. Les successions de cultures annuelles rencontrées dans cette région donnent lieu à des successions d'interventions culturales dont certaines confèrent, par fragmentation, une forte infiltrabilité à la surface du sol. À partir de ces états, le sol soumis aux pluies acquiert rapidement une forte aptitude à ruisseler. Ainsi, existe une variation cyclique des risques de ruissellement, liée aux pratiques culturales [3-5]. Sur un pas de temps annuel et pour l'ensemble du territoire d'étude, le maximum de surfaces nues est atteint entre septembre et février, pendant la période la plus arrosée (figure 1). C'est la conjonction d'un climat pluvieux en automne et en hiver, de sols battants et de cultures annuelles dominantes qui confère au territoire agricole une forte aptitude à ruisseler dès le mois de décembre, lorsque beaucoup de surfaces dégradées par les pluies présentent des croûtes de battance de type sédimentaire.

Un mécanisme dominant : l'érosion de talweg

Plusieurs systèmes érosifs se manifestent dans ces situations selon l'état de surface, l'intensité des pluies et la morphologie des sols [6, 7]. Un sol ameubli soumis à une pluie intense donne de l'érosion diffuse [8]. Un sol déjà battu émet un ruissellement peu chargé qui produit de l'érosion linéaire. Sur les versants de pente supérieure à 5 %, elle prend la forme de rigoles parallèles [9], mais surtout – la morphologie de rebord de plateau s'y prêtant – la forme de rigoles profondes et de ravines dans les talwegs secs [3, 10]. C'est ce dernier processus qui déplace le plus de terre en dehors du territoire agricole. L'unité élémentaire de fonctionnement de ce système érosif est le bassin versant élémentaire, dans lequel se distinguent deux zones fonctionnelles : l'impluvium, ensemble de surfaces susceptibles d'émettre du ruissellement, et le réseau de chemins possibles pour l'eau, qui convergent vers le talweg et le long duquel peuvent se mettre en place des

rigoles ou ravines quand la vitesse de l'eau dépasse un certain seuil. Une lutte directement ciblée sur l'érosion est, dans ce système particulier, localisée dans le talweg (bande tassée, enherbée, fossé). Cependant, si l'on veut prendre le processus à son origine, c'est le ruissellement susceptible de provenir de l'ensemble du territoire agricole qu'il faut réduire, tout en notant qu'il possède d'autant plus d'énergie cinétique (et de danger) qu'il est émis plus en amont. Aussi notre étude sera-t-elle consacrée à la maîtrise du ruissellement.

Méthode d'approche des marges de manœuvre des agriculteurs

Dans le Pays de Caux, les méfaits des processus érosifs sur l'activité agricole sont limités dans l'espace et dans le temps. Très localement, la sédimentation peut enterrer les jeunes plantules. Dans les talwegs, les ravines qui se forment sous l'effet du ruissellement des surfaces d'amont gênent temporairement le trafic, mais sont facilement rebouchées. En l'absence de contrainte légale visant à réduire le ruissellement, nous apprécierons les marges de manœuvre sans remettre en cause le choix des productions et sans accepter des pratiques qui compromettraient les espérances de rendement.

Hypothèse simplificatrice sur l'occupation du territoire

La parcelle est l'unité spatiale élémentaire de mise en œuvre des pratiques. Pour caractériser le ruissellement de façon pertinente par rapport à l'érosion de talweg, on doit repérer la parcelle au sein du bassin versant élémentaire alors que, en ce qui concerne les pratiques réalisées, il faut la considérer comme une portion du territoire de l'exploitation agricole. Les deux découpages spatiaux (selon que l'on s'intéresse aux processus physiques ou à la gestion de l'entreprise agricole) ne se superposent généralement pas. Nous nous limiterons ici à un raisonnement sur un cas simple pour lequel le territoire de l'exploitation agricole et celui du bassin versant élémentaire sont confondus.

Les deux niveaux d'étude : la parcelle et l'exploitation

La parcelle et l'exploitation représentent deux niveaux de décisions techniques permettant d'analyser les marges de manœuvre. À l'échelle de la parcelle, nous raisonnerons sur les systèmes de culture. Considérant les enchaînements d'interventions et de périodes de culture et d'interculture comme résultant d'une logique de production, nous identifierons celles que l'on trouve dans la région d'étude et nous les classerons du point de vue des possibilités qu'elles offrent de maîtriser le ruissellement. Cependant, l'agriculteur ne gère pas une somme de

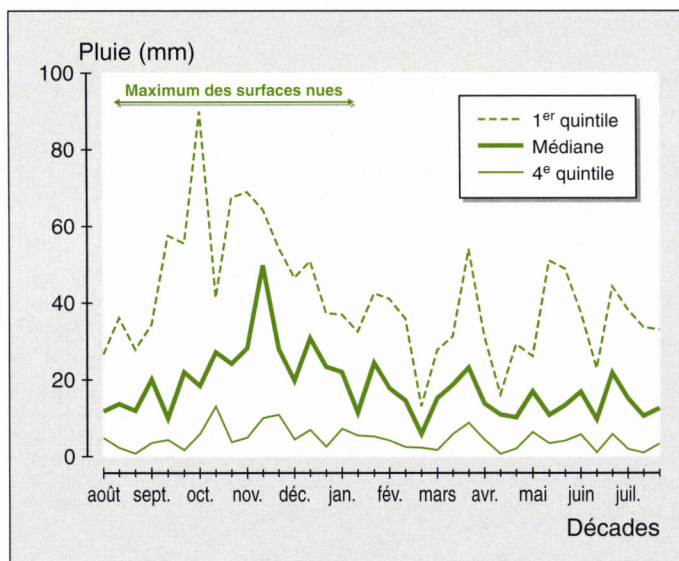


Figure 1. Précipitations en Pays de Caux. Station de St Valéry-en-Caux, étude fréquentielle sur 22 ans (1970-1972 et 1974-1991). Position relative des intercultures.

Figure 1. Rainfall in the Caux area. St Valéry en Caux station. 22-year rainfall frequency study (1970-72 and 1974-91). Relative timing of inter-crop periods.

parcelles indépendamment les unes des autres. À l'échelle de l'exploitation, nous traiterons de la gestion de production en analysant la mise en cohérence des décisions d'orientation générale de l'entreprise (choix de productions et de moyens en équipement et en main-d'œuvre) et des décisions de localisation spatiale des successions de culture et de conduite technique de chaque culture.

L'effet des pratiques culturales sur le ruissellement étant fonction de leur positionnement dans l'espace et dans le temps, nous utiliserons deux modèles de processus décisionnels, employés dans des exploitations de grande culture. Le premier porte sur les décisions d'assolement [11]; il relie décisions de production et localisation des cultures ainsi que de leur succession sur le territoire de l'exploitation agricole. Il s'agit d'établir si une localisation des successions de cultures favorables à une bonne maîtrise du ruissellement est compatible avec une localisation découlant d'une logique de production marchande. Le second modélise l'organisation du travail [12, 13]; il relie, d'une part, les choix de cultures, de niveaux d'équipement et de main-d'œuvre et, d'autre part, la réalisation des interventions sur l'ensemble des parcelles à des dates et pour des conditions données. La question traitée peut alors s'énoncer comme suit : est-il possible de réaliser des interventions à des dates et dans des conditions qui permettent la maîtrise du ruissellement, tout en étant compatibles avec une conduite des cul-

tures relevant d'une logique de production marchande ?

L'ensemble de la démarche est résumé dans la *figure 2*. L'étude portera sur un cas simplifié, fictif, mais représentatif des exploitations de grande culture du versant littoral du Pays de Caux.

Application à un cas fictif représentatif des exploitations de grande culture du Pays de Caux

Les principales caractéristiques de l'exploitation fictive sont données dans l'*encadré 1*. Nous utiliserons ces caractéristiques pour raisonner les solutions à l'échelle de l'exploitation agricole et à l'échelle de la parcelle.

Recherche de solutions à la parcelle

Il s'agit du cas A de la *figure 2*. La réduction du ruissellement par les interventions culturales s'obtient de trois manières : par fragmentation quand le sol est battu ou tassé (son effet est d'autant plus durable que l'opération est faite en

Encadré 1

Caractéristiques de l'exploitation fictive

Structure de l'exploitation

- SAU de 100 ha de terre labourable en limon profond homogène.

La SAU est confondue avec le territoire d'un petit bassin versant élémentaire.

- 1,5 UTH (agriculteur + stagiaire lors des moissons et des semis).

- Équipement de culture complet sauf pour l'arrachage de la betterave et l'écapsulage du lin réalisés par l'entreprise.

- Bâtiments de stockage pour la pomme de terre correspondant à un maximum de 20 ha.

- Quota de betterave sucrière correspondant à 12,5 ha.

Cultures présentes et délais de retour souhaités sur une même parcelle

- Lin tous les 6 ans.

- Pomme de terre tous les 4 ans

- Betterave sucrière tous les 4 ans.

- Pois tous les 6 ans.

- Blé tous les 2 ans.

- Jachère libre selon le taux annuel

Specifications of the theoretical farm

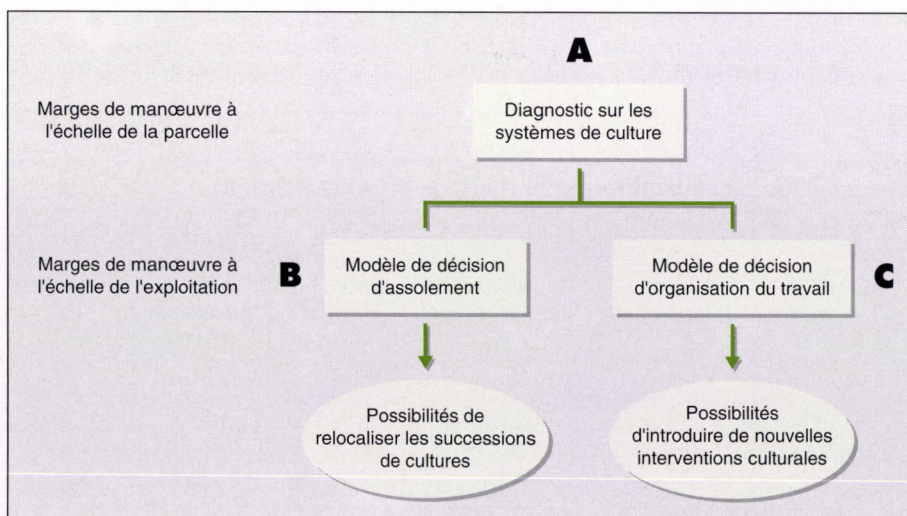


Figure 2. Démarche pour la maîtrise du ruissellement.

Figure 2. Research approach to runoff control.

conditions sèches); par création de rugosité en surface (son effet sur la détention superficielle est d'autant plus efficace qu'elle est perpendiculaire au sens de l'écoulement); par semis d'une culture intermédiaire entre deux cultures principales (la réussite de l'opération est liée à la précocité du semis en été, de sorte que la protection de la surface par la croissance du couvert précède sa dégradation par les pluies). Les possibilités de modifier ou d'introduire dans un système de culture de telles interventions ne sont pas les mêmes selon que l'on se situe en période de culture ou d'interculture.

Périodes de culture

La nécessité de réaliser des lits de semence à éléments structuraux fins pour favoriser les levées est antagoniste du maintien, pendant longtemps, d'une bonne infiltrabilité. Cependant, les exigences d'affinement diffèrent selon les espèces :

Encadré 2

Maîtrise du ruissellement en interculture : typologie des couples précédent-suivant

(d'après Martin [14])

L'énoncé d'un couple précédent-suivant cultural renseigne sur :

- la position de l'interculture dans l'année climatique qui détermine les possibilités d'intervention en conditions bien ressuyées (gage d'une bonne résistance à la dégradation structurale par les pluies) ;
- le laps de temps pendant lequel on peut réaliser des interventions culturales ;
- la quantité de résidus végétaux laissés par le précédent, qui freinent le ruissellement et facilitent l'infiltration ;
- la proportion des traces de roues en surface après récolte, qui limitent l'infiltration et facilitent la concentration du ruissellement.

Sur la base de ces critères nous proposons quatre types d'intercultures :

- le type A comporte des précédents à récolte précoce avec résidus végétaux, laissant peu de traces de roues (blé, escourgeon, colza, pois) et des cultures d'hiver comme suivants (colza, blé, escourgeon) ;
- le type B correspond à des cultures dont les chantiers de récolte, réalisés tardivement, laissent sur le sol de nombreuses traces de roues et peu de résidus végétaux (lin, pomme de terre, maïs ensilage, betterave), suivies de cultures d'hiver (blé, escourgeon) ;
- le type C où se succèdent des cultures à récoltes précoces avec des résidus végétaux et peu de traces de roues (blé, escourgeon, colza, pois) et des cultures semées au printemps (pois, lin, betterave, pomme de terre, maïs ensilage) ;
- le type D qui comporte des précédents à récoltes tardives avec peu de résidus végétaux et beaucoup de traces de roues (lin, pomme de terre, maïs ensilage, betterave) suivis de cultures semées au printemps (pois, lin, betterave, pomme de terre, maïs ensilage).

Runoff control in the intercropping period : typology of the previous-next crop combinations

les céréales semées à l'automne (blé, escourgeon) peuvent accepter des lits de semence relativement grossiers. Avec d'autres espèces, que ce soit en raison de la petite taille des semences, de leur difficulté à s'imbiber ou d'époques de semis plus exposées au risque de sécheresse, la marge de manœuvre sur l'état d'affinement des lits de semence est sans doute

moindre. Dans les cultures à grand écartement, il est possible d'envisager de faire des affinements différenciés sur le rang et l'interrang. Une telle option ne peut être prise, cependant, indépendamment des choix faits en matière de désherbage et d'équipement ; l'efficacité de certains produits nécessite, en effet, une structure de terre fine en surface. En

cours de culture, dans le contexte agricole actuel (réduction du désherbage mécanique, trop long à réaliser, au profit du désherbage chimique), aucune intervention après semis - ou presque - n'est susceptible de fragmenter la croûte sédimentaire qui s'est formée. Dans la culture du maïs, le désherbage chimique est la règle. Dans la culture de la betterave, le désherbage mécanique n'est pratiqué que là où les surfaces sont suffisamment réduites pour que le temps de binage soit court, ce qui n'affecte au mieux qu'une très faible partie du territoire.

Périodes d'interculture

Les possibilités de maîtrise du ruissellement sont plus élevées pendant les périodes d'interculture. Elles sont déterminées par les caractéristiques des couples culture précédente-culture suivante [2, 14] (encadré 2).

Le tableau 1 récapitule les caractéristiques des types d'intercultures décrits dans l'encadré 2 et les classe de 1 à 4 quant aux possibilités qu'ils offrent à la maîtrise du ruissellement. Les conditions d'une bonne maîtrise du ruissellement sont les meilleures dans le type C, où la culture précédente laisse un état du sol favorable qu'on peut espérer travailler en conditions sèches. À l'autre extrême se situe le type B, constitué de récoltes tardives réalisées en conditions souvent humides (figure 1), et suivies de semis tardifs de céréales ; ces derniers sont généralement battus plus tôt que les semis, pourtant plus précoces, mais réalisés en conditions sèches que l'on rencontre dans le type A. Le classement des types B et C est donc aisé. En revanche, les types A et D ne peuvent pas être départagés *a priori*. En effet, si la période

Tableau 1

Classement des intercultures quant aux possibilités qu'elles offrent à la maîtrise du ruissellement

Type d'interculture	Exemple	Conditions hydriques		Possibilité		Résidus sur précédent cultural	Traces de roues sur précédent cultural	Classement (*)
		à la libération du précédent	au semis du suivant	de culture intermédiaire	d'intervention supplémentaire			
A	Blé-Esc	Sèches	Aléatoires	Non	Non	Fort	Faible	2
B	ME-Blé	Humides	Humides	Non	Non	Faible	Fort	4
C	Blé-Bett	Sèches	Aléatoires	Oui	Oui	Fort	Faible	1
D	ME-Bett	Humides	Aléatoires	Aléatoire	Oui	Faible	Fort	2

Bett : betterave ; Esc : escourgeon ; ME : maïs ensilage*

1 : bonne maîtrise du ruissellement ; 4 : mauvaise maîtrise du ruissellement.

Classification of inter-crop periods relative to their runoff-control potential

Tableau 2

Répartition (%) des types d'intercultures dans les sites de Blossesville et Fongueusemare (moyenne sur 930 ha pour la période 1989-1994)

Type A	Type B	Type C	Type D
Pois-Blé 8,3	Bett-Blé 11,5	Blé-Lin 13,0	Lin-Bett 9,7
Colza-Blé 3,2	Lin-Blé 2,6	Blé-Bett 5,3	Bett-Pois 6,5
Blé-Esc 3,1	PdT-Blé 2,5	Blé-Pois 3,5	Bett-PdT 2,3
Blé-Colza 2,5	ME-Blé 1,9	Pois-Bett 2,0	Lin-Pois 1,0
Pois-Colza 1,1	Divers 1,2	Esc-Bett 1,9	Divers 7,1
Divers 1,7		Blé-PdT 1,7	
		Colza-Bett 1,5	
		Divers 4,9	
Total 19,9	Total 19,7	Total 33,8	Total 26,6

Bett : betterave ; Esc : escourgeon ; ME : maïs ensilage ; PdT : pomme de terre.

Distribution (%) of inter-crop periods at the Blossesville and Fongueusemare sites (mean on 930 ha for the 1989-1994 period)

d'octobre à fin décembre est la plus régulièrement pluvieuse, ces dernières années ont été marquées par des automnes globalement secs. Les possibilités de maîtriser le ruissellement à cette période dans les types A et D sont très variables.

En définitive, puisque l'agriculteur dispose d'une faible marge de manœuvre

pendant les périodes de culture, les types d'intercultures, tels qu'ils ont été définis, sont de bons indicateurs des possibilités de maîtrise du ruissellement tout au long d'une succession. Ils renseignent non seulement sur ce qui est envisageable pendant l'interculture, mais aussi sur les conditions hydriques de réalisation des semis dont nous connaissons l'effet sur la

dégradation de surface. Ce classement sera utilisé par la suite. Le *tableau 2* donne la composition moyenne des types d'intercultures pour les sites de Blossesville et Fongueusemare, représentatifs de l'agriculture du littoral du Pays de Caux. La classe C, la plus favorable à la maîtrise du ruissellement, représente un tiers des terres labourables, la plus défavorable (B) 20 % ; sur le reste de la surface, la maîtrise recherchée est aléatoire.

Recherche de solutions à l'échelle de l'exploitation

Localisation des cultures dans l'espace

Il s'agit du cas B de la *figure 2*. L'*encadré 3* détaille la procédure générale de reconstruction des décisions d'assolement [11] appliquée à l'exploitation fic-

Encadré 3

Procédure de reconstruction des décisions d'assolement

1. L'agriculteur est supposé avoir choisi les productions qu'il veut faire en les hiérarchisant selon différents critères : marge brute, sécurité. Il importe donc d'évaluer ce qui détermine la surface maximale qui peut être consacrée à chaque culture. Sur 100 ha, l'agriculteur considéré pratique les cultures suivantes, ordonnées selon sa propre hiérarchie : pomme de terre de consommation, betterave sucrière, lin, blé, pois protéagineux en cherchant à faire le plus possible des trois premières. Cependant il ne peut pas cultiver plus de 20 ha de pomme de terre, par manque de lieu de stockage. Son quota de betterave le limite à 12,5 ha et il ne souhaite pas faire plus de 16,5 ha de lin pour respecter un délai de retour de 6 ans imposé par la maîtrise du parasitisme. Il ne se fixe pas de surface maximale pour les deux dernières cultures maïs, par contre, fait au minimum autant de blé que de lin, car il considère le premier comme un précédent obligatoire du second. La proportion pois/blé dépend du rapport des primes accordées à ces deux cultures. Enfin, une partie de la surface doit obligatoirement être gelée correspondant à un pourcentage, variable d'un an sur l'autre, de la surface consacrée au blé, au pois et au gel. Ce dernier peut être utilisé en partie à enherber les talwegs, quand la forme du parcellaire s'y prête, et en partie en jachère tournante, semée d'espèces non récoltées.

2. Dans une logique économique, l'agriculteur favorise les cultures les plus rentables. Cela se traduit, pour ces dernières, par le respect de règles de successions de cultures, comme des délais de retour de chaque culture sur elle-même et des choix de couples précédent-suivant à respecter. Ainsi, dans le cas présenté plus haut, l'agriculteur prévoit de respecter les délais de retour suivants pour les trois principales cultures : 4 ans pour les pommes de terre, 4 ans pour les betteraves et 6 ans pour le lin. Il faudrait sans doute respecter un délai de 6 ans pour le pois maïs, moins exigeant sur cette culture, l'agriculteur accepterait 4 ans. Le lin supportant mal les accidents structuraux et les excès d'azote, l'agriculteur souhaite impérativement le faire précéder par du blé. Il n'a pas d'autres règles strictes de couple précédent-suivant, si ce n'est qu'il préfère semer le blé derrière pois et pomme de terre plutôt que derrière betterave, dont la récolte est plus tardive.

3. La troisième étape de la procédure consiste à déterminer l'aptitude de chaque parcelle pour la culture de chaque espèce. Dans le secteur d'étude les sols sont homogènes et ont de bonnes aptitudes culturales. Les exclusions sont rares : quelques parcelles de rupture de pente sont caillouteuses et, pour cette raison, interdites à la pomme de terre et au pois ; certaines anciennes prairies, retournées de fraîche date, ne conviennent pas au lin. Pour simplifier, nous supposons que, dans le cas présent, toutes les parcelles sont aptes à recevoir toutes les cultures et que d'autres critères comme la forme, la taille et l'accessibilité des parcelles n'entrent pas en ligne de compte.

Rotation-decision reconstruction procedure

Summary

Surface runoff control and modelling cropping practices

P. Martin, F. Papy, V. Souchère, A. Capillon

To guide research on methods for reducing erosive surface runoff, while avoiding unfeasible solutions, it was of interest to assess how much leeway farmers have in this regard. The study was conducted in the Caux area (Seine-Maritime, France, which is susceptible to surface runoff and erosion – the soils slake down readily, the landforms are gentle and rainfall is high between October and the end of December (Figure 1). On the edges of the plateau, farmland is essentially used for growing annual crops like sugar beets, potatoes, flax, wheat, rape and winter barley, and erosion in this area mainly involves gullying.

We investigated the possibility of moving crop rotations around the farm to avoid growing crops most susceptible to runoff at the uphill end. We also assessed the possibility of introducing new options that reduce surface runoff into the farming calendar. These questions were first dealt with in separate fields using a rotation decision model, and then a work-planning decision model was used to assess the farm as a whole (Figure 2).

In terms of individual fields, the extent of a farmer's leeway depends on whether the field is being cropped or is between crops. There is more potential for controlling surface runoff between crops. Four types of inter-crop conditions were distinguished (labelled A, B, C and D) based on the time of year when the inter-crop gap occurs, the amount of residue left by the previous crop and the proportion of ground affected by wheel tracks. Table 1 shows how these inter-crop periods can be classified in terms of their potential for surface runoff control. Table 2 shows the distribution of these types of inter-crop periods in the region concerned.

At the farm level, we present a stylised case to highlight factors that determine whether a crop sequence meets the agronomic conditions for reproducing the system. We also show that it is impossible to divide the farm into two separate rotation blocks, one upslope with less surface runoff risk, and a second downslope. If the farmer cultivates according to this scheme, there will not be a sufficient time gap between two flax crops – and flax must be grown under suitable conditions as it is a high-profit crop.

Figure 3 shows a theoretical schedule of operations in late summer and autumn under the four types of inter-crop conditions noted on a typical farm. It was drawn up using a set of decision rules on dates and conditions for all field operations. The period considered is divided into two phases with different priority rules (Figure 3). This work-planning model indicates that it should be possible to introduce an intermediate crop, but only on one-sixth of the overall area. It is also possible to plough the fields after wheat and flax crops, i.e. on half of the total area. But these operations are obviously not a priority, and they cannot be carried out in the wettest years when they would be most needed – their effectiveness will thus vary.

The ultimate solutions should involve cultivation procedures that do not disrupt the farmer's work-planning model, and operational strategies that make runoff control compatible with productive farming. Research to this end is currently under way.

Cahiers Agricultures 1998 ; 7 : 111-9.

tive décrite dans l'encadré 1. Muni de ces informations, on construit progressivement la ou les successions de cultures en commençant par la culture dont la sole souhaitée est le quotient de sa zone cultivable par le délai de retour souhaité (dans le cas présent, le lin). Compte tenu que ce dernier doit être précédé du blé et qu'il est préférable de faire précéder le blé par du pois et de la pomme de terre, on est conduit à la succession : blé, lin, betterave (et jachère), pomme de terre,

blé, pois, qui répond le mieux à la logique productive. Reste à juger les possibilités qu'elle offre de maîtriser le ruissellement.

Sur les six intercultures, deux (blé-lin et blé-pois), soit 1/3 de la surface, sont de type C et permettent une bonne maîtrise du ruissellement ; une (pomme de terre-blé), soit 1/6 de la surface, est du type B et n'est pas favorable à la maîtrise du phénomène ; trois (lin-betterave, betterave-pomme de terre, pois-blé), soit 1/2 de

la surface, sont des types D et A, qui correspondent à des possibilités aléatoires de maîtrise du ruissellement. On pourrait envisager, pour les parcelles les plus en amont, une succession plus favorable à la limitation du ruissellement : blé, pomme de terre, blé, pois. Les délais de retour y sont corrects (même si celui du pois correspond à la valeur minimale), mais sur le reste du territoire le lin ne peut plus tourner tous les six ans, ce qu'il faut à tout prix éviter. On ne peut donc proposer une autre localisation des successions de cultures sans compromettre gravement la rentabilité et la pérennité du système. Bien que simplifié, ce cas illustre l'absence de marge de manœuvre que l'on rencontre dans les systèmes de grande culture du Pays de Caux où se cultive le lin, ce qui est un cas fréquent.

Organisation du travail et modification des techniques culturales

Il s'agit du cas C de la figure 2. La procédure d'analyse de l'organisation du travail [12, 13] consiste, pour un assolement, des équipements et une main-d'œuvre donnés, à formaliser les règles de décisions sur les dates et conditions de toutes les interventions à faire aux champs. Nous retiendrons, pour cette analyse, la période d'août à décembre qui conditionne les possibilités de maîtrise du ruissellement en déterminant la conduite de toutes les intercultures (encadré 4). Reste à examiner les possibilités d'introduire des façons culturales (cultures intermédiaires et travail du sol) en vue de réduire le ruissellement.

En phase 1, les années où les travaux prévus sont finis avant le 10 septembre, il est possible d'implanter une culture intermédiaire dans de bonnes conditions. Cela ne se justifie que pour les intercultures longues (blé-lin et blé-pois). On doit cependant exclure l'interculture blé-lin où la présence d'une culture intermédiaire compliquerait la maîtrise de la nutrition azotée du lin. Seize hectares et demi seulement peuvent être ainsi semés, soit 1/6 de la surface cultivée. Les surfaces récoltées où ne peuvent être semées des cultures intermédiaires (blé-lin et pois-blé) peuvent faire l'objet d'un déchaumage précoce, déjà prévu par l'agriculteur pour l'interculture blé-lin, car il permet d'activer la décomposition des chaumes de blé. Pour l'interculture

Analyse de l'organisation du travail sur l'exploitation fictive

1. Sur la période choisie, on regroupe ensemble toutes les parcelles qui doivent subir le même enchaînement d'interventions culturales. Ainsi, sur la *figure 2*, nous avons disposé en ligne les différentes intercultures, regroupées par type. Sur l'axe du temps, pour chacune des interventions prévues, on repère les périodes de réalisation souhaitables.

2. Pour chaque intervention culturale, l'agriculteur mobilise un chantier, ensemble des personnels et matériels nécessaires pour la réaliser. À partir de la valeur moyenne des performances (nombre d'hectares/jour) et de la surface à faire on détermine le nombre de jours nécessaires.

3. Ensuite, dans une vision synchrone, on examine les interventions à réaliser simultanément. La connaissance du personnel et des équipements mobilisés par chantier renseigne sur la possibilité de réaliser plusieurs chantiers en même temps. Ces renseignements, ainsi que la durée nécessaire à la réalisation de chaque chantier, permettent d'identifier les périodes les plus chargées. Dans le cas présenté, seuls les chantiers de déchaumage et d'écapsulage n'utilisent qu'une personne sur les deux disponibles. Tous les autres, nécessitant deux personnes, ne peuvent pas être simultanés. La période la plus chargée commence au 10 septembre, quand il faut récolter les pommes de terre et enrrouler le lin.

4. On peut alors établir un corps de règles qui permet de reproduire le déroulement des travaux sous différents scénarios climatiques. La période est découpée en phases au sein de chacune desquelles est définie une même règle de priorité, lorsque plusieurs activités sont souhaitées et possibles et qu'il faut arbitrer entre elles. Ainsi, dans notre cas d'étude, nous distinguons deux phases.

– Pour la **phase 1**, de début août au début des récoltes de pomme de terre et de lin (10/09), l'ordre de priorité s'établit comme suit :

(1) Récolte au cours des mêmes journées du pois et du blé (pois à partir du milieu de la matinée, blé l'après-midi) si les maturités le permettent, sinon, dès que possible dans l'ordre des maturités. Un broyeur de paille équipe la moissonneuse batteuse. Il est utilisé pour les fanes de pois ainsi que pour la paille des blés qui seront suivis d'un pois. Il est débrayé pour les blés qui seront suivis d'un lin. (2) Écapsulage (récolte des semences) et retournement du lin (pour faciliter le rouissage). (3) Enroulage et exportation de la paille sur les parcelles de blé suivies d'un lin. L'exportation des pailles répond à un souci de gestion optimale de la nutrition azotée du lin, très sensible à la fois aux carences et aux excès d'azote dans le sol. Avant un pois, moins sensible à la nutrition azotée, les pailles sont enfouies pour maintenir les teneurs en matières organiques du sol. (4) Déchaumage de l'ensemble des parcelles de blé.

– Pour la **phase 2**, qui débute dès l'enroulage du lin et la récolte des pommes de terre, l'ordre s'établit ainsi : (1) Enroulage du lin ; récolte des pommes de terre. (2) Semis du blé. (3) Déchaumage s'il y a eu report de la phase précédente. (4) Récolte des betteraves.

C'est par cette organisation que l'agriculteur cherche à optimiser l'ensemble des conduites dans une logique productive.

Work-planning analysis for the theoretical farm

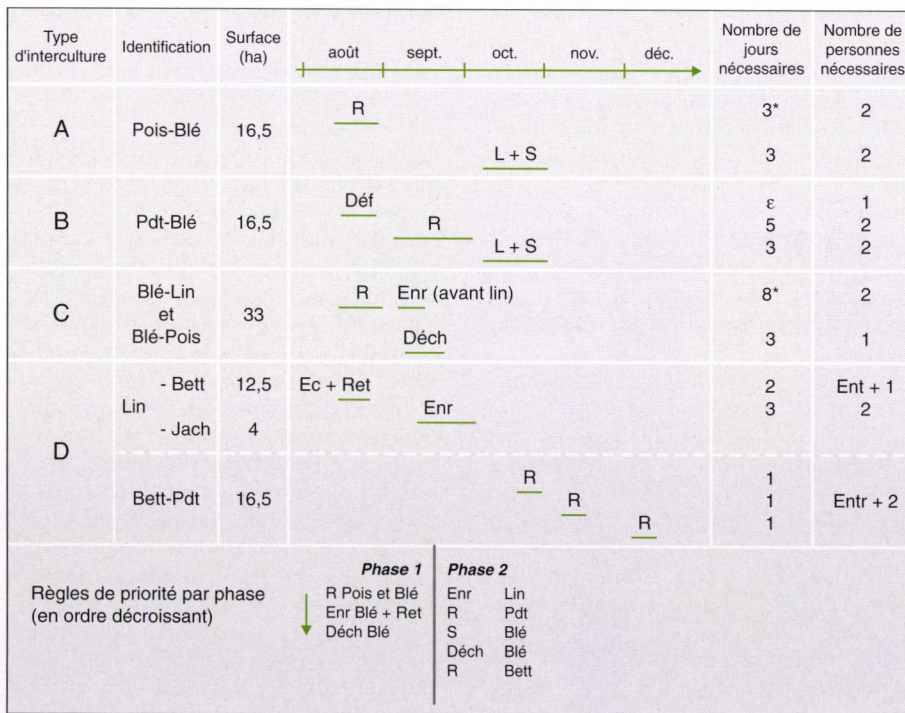


Figure 3. Calendrier prévisionnel des interventions pendant les intercultures.
R : récolte du précédent ; L + S : labour + semis de la culture suivante ; Déf : défanage ; Enr : enroulement ; Déch : déchaumage ; Ec + Ret : écapsulage + retournement ; Entr : entreprise. * : les 3 jours nécessaires à la récolte du pois sont inclus dans les 8 jours nécessaires à la récolte du blé.

pois-blé, le déchaumage serait une innovation car non prévu dans le programme initial de l'agriculteur (les fanes de pois broyées se décomposent aisément sans nécessiter d'incorporation préalable avant le labour).

En phase 2, les récoltes sont prioritaires. L'installation d'une culture intermédiaire efficace contre le ruissellement devient aléatoire car trop tardive (pas avant la dernière décade de septembre). À cette période, un travail grossier peut être envisagé derrière le lin, avant betterave et jachère, ainsi que sur les intercultures longues qui n'ont pas pu être travaillées plus tôt (blé-lin, blé-pois). Le total de ces interculture équivaut à la moitié de la surface. Les interventions seront d'autant plus efficaces qu'elles seront réalisées en conditions peu humides. Mais on comprend aisément que de telles conditions, quand elles surviennent en automne, sont avant tout mises à profit pour les récoltes et les semis de blé. Une intervention aussi tardive sur les intercultures courtes (pois-blé, pomme de terre-blé) présente, *a priori*, peu d'intérêt car elle sera suivie quelques jours plus tard par l'implantation de blé.

L'analyse de l'organisation du travail montre, pour une année médiane, que 1/6

Figure 3. Theoretical schedule of operations during inter-crop periods.

de la SAU (interculture blé-pois) pourrait recevoir une culture intermédiaire et qu'une surface équivalente (interculture pois-blé) pourrait être déchaumée précocement. Les travaux du sol sur les intercultures lin-betterave réalisés en conditions peu humides apparaissent, quant à eux, plus difficiles à obtenir. Pour un automne très pluvieux comme celui de 1993, les blés n'étaient pas mûrs à la mi-août. Commencée le 25 août, la moisson s'est achevée le 20 septembre. L'enroulage du lin a débuté aux premiers jours d'octobre et une partie de la récolte a été perdue. Les semis de blé ont débuté à la date prévue, mais se sont poursuivis jusqu'au 25 novembre et rien de spécifique n'a pu être entrepris pour limiter le ruissellement. Une année pluvieuse conduit donc non seulement à une dégradation plus rapide des états de surface [14], mais aussi à une moindre probabilité de réaliser les travaux culturaux qui permettraient de lutter contre le ruissellement. De fait, en 1993, le Pays de Caux a subi de nombreuses inondations boueuses. Cet exemple montre qu'une modification des pratiques culturales « en fréquence » ne permet pas de lutter, directement, contre les inondations boueuses catastrophiques car, en ce cas, la réduction des jours disponibles pour les travaux culturaux fait que les interventions spécifiquement mises en œuvre pour lutter contre le ruissellement sont délaissées au profit des travaux de récolte et de semis, vitaux pour la reproductibilité de l'exploitation. Indirectement, la modification des pratiques culturales constitue cependant un moyen de lutte efficace, car elle permet de retarder la dégradation du réseau hydraulique de protection des agglomérations (buses, bassins de rétention) en limitant l'apport régulier de sédiments par les eaux de ruissellement.

Discussion : **imaginer** **des innovations** **possibles en gérant** **les complémentarités**

Partant d'une exploitation agricole fictive, représentative de l'agriculture du Pays de Caux, exploitant dans sa totalité un unique bassin versant, nous montrons qu'on dispose d'une très faible marge de

manœuvre pour localiser dans l'espace les successions de cultures autrement que ce qui convient le mieux aux objectifs de production. Les possibilités d'introduction de façons culturales supplémentaires sont plus importantes, quoique réservées à certaines surfaces de l'exploitation. Cette solution reste, de plus, aléatoire, car dépendante du nombre de jours disponibles pour les travaux culturaux d'août à décembre. Malgré leur caractère aléatoire, ces modifications de pratiques sont très utiles, car elles permettent de limiter les départs de terre chroniques qui colmatent progressivement les bassins de protection des agglomérations. Le non-colmatage de ces bassins est le gage du maintien de leur efficacité lors des périodes de fort ruissellement.

Les résultats obtenus restent liés à nos hypothèses de base, notamment le choix d'une exploitation productrice de lin, culture à forte contrainte agronomique, très répandue dans cette région. Les marges de manœuvre seraient vraisemblablement plus élevées pour des exploitations avec moins de contraintes quant aux délais de retour des cultures sur la même parcelle. Nous avons aussi choisi un cas où le bassin versant et le territoire de l'exploitation sont confondus, situation que l'on peut rencontrer dans les zones de parcellaire groupé (Fongueusemare), mais qui est plus rare dans les zones de parcellaire dispersé (Blosseville). Dans ce dernier cas, non traité dans cet article, on peut faire l'hypothèse que les marges de manœuvre seraient plus importantes, car on pourrait utiliser les complémentarités entre les différents systèmes de production pour éviter de concentrer trop de surfaces ruisselantes en amont et trop de surfaces érodables en aval.

L'exemple de l'automne 1993 montre que l'aléa climatique joue un rôle primordial dans les possibilités de maîtrise du ruissellement par les pratiques culturales. Une meilleure définition de cet aléa constitue un passage obligé de la validation des propositions d'innovations techniques. Des outils informatiques tels que OTELO [15] sont très utiles en ce domaine. Dans la même région d'étude, His [2] l'utilise pour discuter avec les agriculteurs des conséquences sur l'organisation du travail d'une modification des pratiques culturales en interculture visant à réduire le ruissellement. Notre travail montre que les interventions supplémentaires, non prioritaires pour l'exploitation (déchaumage, culture

intermédiaire), ne sont pas mises en œuvre quand les jours disponibles sont trop peu nombreux. En ce cas, sans introduire de travaux supplémentaires, on peut envisager de modifier les modalités d'intervention pour les pratiques actuelles ; modifications qui doivent rendre compatibles la maîtrise du ruissellement et l'élaboration du rendement. Les objectifs agricole et environnemental convergent si l'on considère qu'un dessèchement limité de la surface d'un semis, fraîchement réalisé, ralentit la formation des croûtes, nuisibles à la fois à l'émergence des plantules et à l'infiltration. Mais les deux objectifs peuvent être contradictoires, notamment quand on considère le calibre des mottes d'un lit de semence. Des mottes de gros calibre permettent de maintenir une forte rugosité de surface mais peuvent aussi gêner la levée des plantes. Les références agronomiques doivent donner les différents termes des arbitrages à faire. Sur céréales d'hiver, en faisant un lit de semence plus grossier, Ouvry [16] a montré qu'on pouvait diviser par 2 à 4 les coefficients de ruissellement et retenir en surface 1 mm de hauteur d'eau ; toutefois on manque encore de références sur les résultats de levée et de démarrage de la culture qu'implique un lit de semence plus grossier que de coutume.

La complexité des situations rend de plus en plus difficile l'acquisition expérimentale de références exhaustives sur l'effet des techniques culturales, d'autant plus que cet effet est largement contingent du climat de l'année. On doit donc, de plus en plus, orienter la recherche vers la modélisation de l'effet des techniques sous différents scénarios climatiques [14]. Ces modèles agrotechniques pourront ensuite être introduits dans le modèle de règles de décision d'organisation du travail, cité plus haut. C'est ainsi que l'on pourra évaluer le caractère aléatoire de l'efficacité des mesures proposées.

Enfin, il ne faut pas oublier que la modification des pratiques culturales nécessite une hiérarchisation préalable des risques environnementaux dans la zone d'action. Des travaux récents [14], portant sur la conduite des intercultures, montrent des contradictions possibles entre la réduction du ruissellement et la réduction de l'érosion diffuse. En effet, une intervention visant à fragmenter la surface du sol favorise tout autant l'infiltration que le détachement des particules de terre. Il s'ensuit que le choix des interventions en intercultures dépen-

dra du risque prioritaire dans le territoire concerné (dépôt de terre sur les routes ou inondation des agglomérations). Des contradictions peuvent aussi apparaître entre la maîtrise du ruissellement et celle du lessivage des nitrates en profondeur. Après une récolte de pois protéagineux de printemps, on a relativement peu de résidus qui ralentissent le ruissellement. On est alors tenté de réaliser un travail du sol pour restaurer la rugosité de surface, or ce travail du sol va aussi activer la minéralisation de l'azote du sol et faciliter le drainage vertical, d'où un accroissement des risques de pollution diffuse par les nitrates. Comme précédemment, le choix technique dépendra du risque majeur dans la zone concernée, sans oublier que certaines pratiques, certes plus coûteuses (implantation d'une culture intermédiaire), permettent de lutter simultanément contre le ruissellement et la pollution diffuse par les nitrates.

Conclusion

Notre conclusion générale pourrait s'appliquer à des recherches finalisées par la mise au point de solutions novatrices. Il paraît utile de faire intervenir très rapidement dans le déroulement de la recherche une analyse des contradictions auxquelles on aura à faire face sur la base d'une analyse des processus de décision et de gestion des acteurs.

Deux écueils sont à éviter : concevoir l'innovation comme un processus linéaire (on conçoit des solutions techniques, aux praticiens à les mettre en œuvre !) et admettre, sans réserve, que les praticiens « ont de bonnes raisons de faire ce qu'ils font ». Aucune innovation ne peut sortir de l'une comme de l'autre attitude. En revanche, en simulant des processus décisionnels, on peut d'avance identifier les contradictions à résoudre et orienter la recherche de solutions acceptables. Cette simulation implique la conception de modèles agrotechniques permettant de raisonner le caractère aléatoire de l'effet des pratiques culturales sur le milieu ■

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet intitulé « Recherche sur les processus physiques et la maîtrise de l'érosion hydrique à l'échelle d'un territoire agricole », financé par l'action incitative de l'INRA : « Valorisation et protection de la ressource en eau ».

Références

- Boiffin J, Bresson LM. Dynamique de formation des croûtes superficielles : apport de l'analyse microscopique. In : Fedoroff N, Bresson LM, Courty MA, eds. *Soil micro-morphology*. AFES, 1987 : 393-9.
- His M. *Possibilités d'insertion de pratiques de lutte contre le ruissellement dans le calendrier de travail des exploitations agricoles du Pays de Caux*. Mémoire de fin d'études de l'ISA de Beauvais, 1996 ; 61 p + annexes.
- Boiffin J, Papy F, Eimberck M. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie* 1988 ; 8 : 663-73.
- Papy F, Boiffin J. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II. Évaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie* 1989 ; 8 : 29-38.
- Auzet AV, Boiffin J, Ludwig B. Concentrated flux erosion in cultivated catchments : influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms* 1995 ; 20 : 759-67.
- De Ploey J. Erosional systems and perspectives for erosion control in European loess areas. In : Schwertmann U, Rickson RJ, Auerswald K, eds. *Soil erosion protection measures in Europe* (coll Soil technology series 1), 1989 : 93-102.
- Auzet AV, Boiffin J, Papy F, Maucorps J, Ouvry JO. An approach to the assessment of erosion forms and erosion risks on agricultural land in Northern Paris Basin (France). In : Bordman J, Forster IDL, Dearing JA, eds. *Erosion on agricultural land*. London : Wiley, 1990 : 383-400.
- Le Bissonnais Y, Benkhadra H, Gallien E, et al. Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse des sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m² au bassin-versant élémentaire agricole. *Géomorphologie, relief, processus, environnement* 1996 ; 3 : 51-64.
- Fullen MA, Reed AH. Rill erosion on arable loamy sands in the West Midlands of England. In : Bryan RB, ed. *Rill Erosion* (coll Catena suppl. 8), 1987 : 85-96.
- Poesen J, Govers G. Gully erosion in the loamy belt of Belgium : typology and control measures. In : Boardman J, Forster IDL, Dearing JA, eds. *Soil erosion on agricultural land*. London : Wiley, 1990 : 515-30.
- Maxime F, Mollet JM, Papy F. Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture. *Cahiers Agricultures* 1995 ; 4 : 351-62.
- Chatelin MH, Mousset J, Papy F. Taking Account of decision-making behaviour in giving advice. In : Jacobsen BH, Pedersen DE, Christensen J, Rasmussen S, eds. *Farmers' decision making ; a descriptive approach*. Proc. from the 38th EAAE Seminar, 1994 : 369-81.
- Attonaty JM, Chatelin MC, Poussin JC, Soler LG. OTELO : un simulateur à base de connaissance pour raisonner équipement et organisation du travail. Agropolis, Montpellier, 16-19 janvier 1990. *Cahiers des chambres d'agricultures, (sér. Organisation, méthode informatique)* 1994 ; 66 : 37-48.
- Martin P. *Pratiques culturales, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du Nord-Ouest de l'Europe. Application aux intercultures du Pays de Caux*. Thèse de doctorat de l'INA-PG, 1997 : 186 p., + annexes.
- Attonaty JM, Chatelin MH, Poussin JC, Soler LG. *Advice and decision support systems in agriculture : new issues*. Bruges : IFORS, SPC1, Decision Support Systems, 1991 ; 10 p.
- Ouvry JF. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par le ruissellement concentré : expérience du Pays de Caux. *Cahiers ORSTOM, Sér. Pédol.* 1989/90 ; XXV (1-2) : 157-69.

Résumé

Pour mieux orienter la recherche de solutions techniques qui limitent le ruissellement et l'érosion, les auteurs utilisent des modèles de décision dans les exploitations agricoles. En appréciant les marges de manœuvre des agriculteurs, on évite de proposer des solutions non réalisables. Dans une région très sensible au ruissellement et à l'érosion, après enquête auprès d'agriculteurs, on a modélisé les décisions d'assolement et d'organisation du travail. On teste ainsi s'il est possible de localiser autrement les successions de cultures sur le territoire de l'exploitation, de façon à réduire le ruissellement des zones où il est le plus nocif et s'il est envisageable d'introduire dans l'organisation du travail de nouvelles techniques. Il ressort, de l'application de ces modèles, qu'il est impossible de reconsidérer la localisation des cultures. En revanche, on peut introduire de nouvelles techniques pendant les périodes de culture et surtout d'interculture, avec un résultat qui reste aléatoire. Les techniques qui n'ont d'autres finalités que de réduire le ruissellement ne sont évidemment pas prioritaires aux yeux de l'agriculteur lorsque leur réalisation entre en concurrence avec les objectifs de production. Plutôt que d'introduire de nouvelles techniques, il faut donc plutôt rechercher des modalités d'intervention qui rendent compatibles maîtrise du ruissellement et élaboration du rendement.