

Érosion hydrique et transfert de produits phytosanitaires dans les eaux de ruissellement

Véronique Lecomte, Yves Le Bissonnais, Bernard Renaux, Alain Couturier, Laurence Ligneau

L'érosion hydrique est à l'origine d'importants problèmes d'environnement pour les milieux naturels récepteurs des eaux de ruissellement, chargées notamment de matières en suspension (MES), de nutriments et de produits phytosanitaires. Les cours d'eau, les aquifères et le littoral sont concernés. Dans le Pays de Caux (Haute-Normandie, France), les sols limoneux, très sensibles à la battance, entraînent un fort risque de ruissellement et d'érosion lors des longues pluies d'hiver ou de violents orages [1]. L'évolution de l'occupation du sol, du paysage et des pratiques culturales ainsi que l'absence de gestion cohérente des écoulements à l'échelle du bassin versant semblent à l'origine de l'aggravation des manifestations de l'érosion et de la multiplication des inondations boueuses [2]. Afin de rechercher des méthodes pour lutter contre le transfert des polluants et préserver les hydrosystèmes, il est nécessaire d'étudier la variabilité – dans le temps et dans l'espace – de la qualité des eaux de ruissellement agricole pour appréhender la gravité de cette pollution ainsi que ses causes. Dans le domaine des produits phytosanitaires, d'impor-

tantes recherches sont effectuées, d'une part, en laboratoire pour déterminer les caractéristiques chimiques de matières actives et, d'autre part, au niveau des cours d'eau ou des nappes, pour en mesurer le taux de pollution. À un niveau intermédiaire, la contamination des eaux de ruissellement d'origine agricole est liée au délai entre traitement et première pluie [3, 4] ainsi qu'à l'impact bénéfique des zones enherbées [5].

Il semble indispensable d'approfondir la recherche à ces niveaux d'organisations intermédiaires, allant de la parcelle au bassin versant, pour faire le lien entre les propriétés des produits utilisés, le fonctionnement des systèmes agricoles et hydrologiques et les pollutions observées. Il est également important de mieux définir la signification, les limites de validité et les possibilités d'extrapolation spatiale des mesures réalisées à une échelle donnée.

Cet article a pour objet de mesurer, *in situ*, le flux de MES et de produits phytosanitaires véhiculé par les eaux de ruissellement, aux échelles de 1 m² et 10 m², sous pluies simulées, et de 500 m² jusqu'au bassin versant élémentaire sous pluies naturelles. Le dispositif mis en place nous permet, d'une part, d'étudier la mobilisation des produits phytosanitaires au niveau d'une parcelle agricole et, d'autre part, d'analyser les modalités de leurs transferts depuis une parcelle jusqu'à l'exutoire d'un bassin versant. Nous avons choisi de traiter les placettes expérimentales à l'isoproturon (IPU), herbicide des céréales très utilisé dans le Pays de Caux du fait de sa forte solubilité et de sa faible adsorption par les particules du sol, ce qui laisse présumer une mobilité élevée.

Présentation de la zone d'étude

Les sols du Pays de Caux sont développés sur des formations loessiques reposant sur le plateau calcaire crayeux du nord-ouest de la France. Ils ont une teneur élevée en limons (environ 60 %), faible en argile (13 à 17 %) et s'enrichissent en sables fins à proximité du littoral. Le taux de matière organique est généralement faible (environ 1,5 %), le pH est neutre et la teneur en calcaire total est nulle. La pluviométrie augmente du littoral vers l'intérieur des terres, de 700 à 1 000 mm/an, pour décroître de nouveau à l'approche de la Seine. Quelques rivières côtières entaillent le plateau et de nombreuses vallées sèches se localisent le long de la Manche ou débouchent sur les vallées à cours d'eau pérennes. Les cultures sont diversifiées (blé d'hiver, escourgeon, betteraves sucrières et fourragères, pois, colza, lin, pomme de terre, maïs ensilage et quelques légumes), les céréales représentant 47 % des terres labourées et 29 % de la SAU (surface agricole utile) [6].

Phénomènes de ruissellement et d'érosion

À cause de la faible stabilité structurale de ses sols, le Pays de Caux est particulièrement touché par les problèmes de ruissellement et d'érosion [7]. Sous l'effet des pluies, les mottes de terre se désagrè-

V. Lecomte, Y. Le Bissonnais, B. Renaux, A. Couturier : Institut national de la recherche agronomique, Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France, Centre de recherche d'Orléans, 45160 Olivet, France.

L. Ligneau : Association régionale pour l'étude et l'amélioration des sols, 2, av. Foch, 76460 Saint-Valery-en-Caux, France.

Tirés à part : V. Lecomte

gent et les particules sont dispersées. La surface du sol se ferme par soudure des particules entre elles et le microrelief s'estompe avec la disparition des mottes, ce qui conduit à la formation d'une croûte de battance. Le sol perd alors sa capacité d'infiltration et de rétention superficielle de l'eau, de sorte que les parcelles constituent des surfaces potentiellement ruisselantes. Le ruissellement peut entraîner les particules de terre disponibles ou mises en suspension par l'impact des gouttes de pluie. Le réseau de collecte du ruissellement, constitué par les fourrières, les microtalwegs et autres points bas, permet à ce ruissellement de se concentrer et de creuser rigoles et ravines. Cette érosion linéaire est très spectaculaire, avec un départ de terre localisé, alors que l'érosion diffuse, moins visible, concerne l'ensemble des bassins versants sur lesquels sont épanchés engrais et produits phytosanitaires [8]. Cette érosion diffuse est responsable de teneurs en MES très élevées dans les eaux de ruissellement issues de parcelles cultivées (50 g/l pour des pluies de fortes intensités) [9, 10].

Entraînement des produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion

Les produits phytosanitaires apportés sur les cultures vont, d'une part, être dégradés en métabolites secondaires et, d'autre part, se disperser dans les divers compartiments de l'environnement : air (volatilisation), eau (dissolution), sol (adsorption), vivant (bioaccumulation).

Les transformations sont de plusieurs types. La dégradation biologique, notamment microbienne, serait prédominante dans les sols, les sédiments et à la surface des MES. Les produits phytosanitaires peuvent également être dégradés par photolyse, oxydation et, surtout, hydrolyse. La dégradation est généralement considérée comme une réaction du premier ordre, d'où une diminution exponentielle des concentrations dans les sols. Pour de nombreuses matières actives, les durées de demi-vie sont beaucoup plus longues dans les eaux que dans les sols [11]. Les

Tableau 1

Propriétés physicochimiques de l'isoproturon (d'après Patty et Guyot [15] et Gouy [16])

	Solubilité dans l'eau (mg/l)	Koc (cm ³ /g)
Isoproturon	65 à 22 °C	120
Pour comparaison :		
Lindane	1,3 à 25 °C	1 100
Simazine	3,5 à 20 °C	135-230

Koc : coefficient d'adsorption par rapport à la quantité de carbone organique présent dans le sol.

Physicochemical properties of isoproturon

transferts rapides vers l'hydrosphère qui court-circuitent le rôle épurateur du sol sont donc d'autant plus néfastes.

Les mécanismes de transfert font essentiellement intervenir : les fonctions d'absorption, d'exsudation et de rétention par les végétaux ; la diffusion gazeuse dans les pores du sol et l'atmosphère ; la dissolution et la diffusion dans la phase aqueuse du sol et l'eau de ruissellement ; l'adsorption et la désorption sur les particules du sol qui, elles-mêmes, peuvent être érodées.

Les proportions dans les différents compartiments de l'environnement dépendent des caractéristiques de chaque molécule et sont variables au cours du temps selon les conditions de milieu [12]. Le ruissellement peut ainsi transporter les produits phytosanitaires sous forme dissoute ou adsorbée sur les MES. Le Kd (coefficient de partage sol/eau, ou coefficient d'adsorption) est défini comme le rapport de la quantité de produit adsorbé sur la concentration en solution à l'équilibre. Le coefficient Koc rapporte ce ratio à la quantité de carbone organique présente dans le sol considéré. Il est souvent utilisé pour évaluer la mobilité d'une substance dans les sols [13].

L'IPU est un herbicide systémique sélectif, inhibant la photosynthèse, absorbé principalement par les racines de la plante. On l'utilise en prélevée ou postlevée sur céréales d'hiver et de printemps. Sa durée de demi-vie varie de douze à trente-deux jours en plein champ, selon les sources bibliographiques [13]. Sa solubilité dans l'eau est importante et son Koc est faible [13] (tableau 1). L'IPU est utilisé sur la quasi-totalité des parcelles en blé de la zone d'étude, à des doses allant de 1 200 g/ha (en association avec d'autres matières actives) à 3 000 g/ha. Les placettes expérimentales ont été traitées à la dose homologuée de 1 800 g/ha.

Matériel et méthode

Expérimentation au niveau de la parcelle agricole

Des placettes de 1 m² (photo 1) et de 10 m² permettent de réaliser des simulations de pluie en conditions contrôlées alors que des mesures sous pluies naturelles sont réalisées sur des placettes de 500 m², plus représentatives des parcelles agricoles de par leur longueur de plus de 60 mètres. Toutes ces placettes, installées sur une pente homogène d'environ 4 %, ont été semées en blé début novembre 1994. Elles sont isolées du reste de la parcelle par un talus de terre ou par un cadre métallique (placettes de 1 m²) et placées dans le sens de la pente qui est aussi celui du travail du sol. Dans le dispositif propre aux placettes de 500 m², le ruissellement recueilli dans une gouttière en bas de la pente est mesuré en continu par un système d'augets basculeurs, fractionné par un partiteur et conservé dans un fût totalisateur, pour 1/40^e du volume liquide et solide ruisselé. Lors des simulations de pluie, le ruissellement est directement recueilli dans des flacons en verre gradués.

Suivi des bassins versants

Nous avons suivi deux bassins distants de quelques kilomètres et représentatifs de deux grands types de paysages du Pays de Caux.

– Le bassin versant du Hanouard (270 ha), caractérisé par le maintien d'une forte proportion de bois et de prairies (près de 50 %) et dont la morphologie est typique des bassins versants de rebords de plateau. Le talweg princi-



Photo 1. Placette expérimentale de 1 m² semée en blé dans le sens de la pente, destinée aux simulations de pluie.

Photo 1. One m² plot, sown with winter wheat in a downslope orientation, for rainfall simulation purposes.

pal est encaissé et 80 % des pentes sont supérieures à 3 %. À l'exutoire, une buse de 1 mètre de diamètre rejette directement les eaux de ruissellement dans la Durdent (fleuve côtier).

– Le bassin versant de Blossenville (87 ha), presque entièrement labouré, présente des pentes faibles pouvant s'accroître localement. Il est typique des zones de plateau de la région et s'inscrit dans le bassin de la Veules (le plus petit fleuve côtier de France).

Aux exutoires des bassins versants, les débits de ruissellement sont enregistrés en continu par l'intermédiaire de seuils jaugeurs, de sondes de pression et d'enregistreurs. Un préleveur automatique d'échantillons asservi au débit est installé au Hanouard. À Blossenville, les prélèvements sont manuels. La pluviosité est mesurée sur les deux

bassins. Lors des tournées de terrain périodiques, on relève sur les deux bassins versants et pour chaque parcelle cultivée :

- l'état du sol (labour, semis, chantiers de récolte...);
- le sens de travail du sol;
- l'évaluation du faciès de la surface du sol (fragmentaire, premier stade de dégradation, deuxième stade de dégradation, stade sédimentaire) [14];
- l'évaluation de la rugosité parallèle et perpendiculaire au travail du sol en mesurant la dénivellation efficace;
- la culture en place;
- le taux de couvert végétal;
- les manifestations de l'érosion.

Des enquêtes menées auprès des agriculteurs permettent de connaître les doses de produits phytosanitaires appliquées et les dates des traitements.

Analyse de la qualité des eaux de ruissellement

Les teneurs en MES sont mesurées par séchage direct des échantillons à 105 °C dans des barquettes pesées vides et après passage à l'étuve jusqu'à ce que le poids reste stable. Les analyses d'IPU ont été réalisées au laboratoire INRA d'Arras. L'IPU est extrait des échantillons au toluène pestinorm. Puis l'extrait est purifié et concentré 200 fois avant d'être analysé par CLHP (chromatographie liquide haute performance).

Résultats et discussion

Mobilisation de l'isoproturon à l'échelle intraparcellaire (de 1 m² à 500 m²)

Le *tableau 2* regroupe les résultats des analyses d'IPU effectuées sur les eaux brutes des placettes de différentes tailles au sein de la même parcelle agricole. Il montre que, pour un délai entre traitement et pluie et pour une pluie cumulée donnés, les concentrations en IPU sont du même ordre de grandeur entre les placettes de 500 m² soumises aux pluies naturelles et les placettes de 1 et de 10 m² soumises à des pluies simulées.

Tableau 2

Analyses d'isoproturon effectuées sur eaux brutes à l'échelle intraparcellaire sous pluies naturelles (500 m²) ou simulées (1 et 10 m²)

Surface (m ²)	Concentration (µg/l)	Délais (heures)	Pluie cumulée (mm)	Coeff. de ruissellement (%)	Coeff. de perte (%)	Érosion (g/m ²)
1	7 701	1	6,7	68	19,7	11,3
1	5 942	1	8,3	80	26,6	13,9
1	5 467	24	2,5	36	2,7	2,4
1	4 023	24	5,0	42	4,3	4,2
10	10 950	1	3,5	53	11,3	8,7
10	1 530	1	13,0	64	16,7	38,8
10	5 195	24	3,5	41	4,2	8,7
10	1 260	24	13,0	65	9,1	50,6
500	5 252	20	5,2	8	1,3	1,2
500	3 364	20	11,2	20	4,7	5,8
500	15,5	1 512	160,0	8	0,1	50,8

Isoproturon analysis of runoff on a field scale with natural rainfall (500 m²) or simulated rainfall (1 and 10 m²)

Tableau 3

Normes de potabilité et référence toxicologique pour resituer les niveaux de contamination de l'eau (d'après Schiavon [12] et Gouy [16])

	Norme CEE (µg/l)	Norme OMS (µg/l)	CL50 carpe à 96 h* (mg/l)
Isoproturon		9	193
Pour comparaison :	0,1		
Lindane		3	0,09
Simazine		17	180

* Concentration létale pour 50 % des individus dans un lot (ici, la carpe) en 96 heures.

Drinking water standards and toxicological references for water contamination levels

Ces concentrations en IPU sont très élevées, en particulier quand la pluie survient juste après un traitement : de plus de 10 000 µg/l dans les premières eaux de ruissellement, à 1 500 µg/l après 13 millimètres de pluie cumulée. Pour un délai entre traitement et première pluie de vingt-quatre heures, la concentration varie de près de 5 500 µg/l dans les premières eaux de ruissellement à plus de 1 200 µg/l après 13 millimètres de pluie cumulée. De plus, même quand le premier ruissellement survient près de deux mois après le traitement (cas d'une placette de 500 m² sous pluie naturelle), la concentration en IPU reste relativement forte (15,5 µg/l) si on la compare à des références de toxicité ou à des normes de potabilité (tableau 3).

Les coefficients de pertes en IPU sont également très élevés, notamment en comparaison des valeurs se rapportant à d'autres produits et d'autres sols cités dans la bibliographie [16]. Ils peuvent, ici, atteindre 26 % de la quantité épanchée après 8,3 millimètres d'une pluie survenue une heure après traitement. Cette très grande mobilité de l'IPU dans

les eaux de ruissellement s'explique par sa solubilité importante (tableau 1) et par les coefficients de ruissellement très élevés dans le contexte de notre étude (ils peuvent atteindre 80 %).

Les estimations des pertes en terre survenues après les traitements phytosanitaires (tableau 2) atteignent 0,4 à 0,5 tonne par hectare après 13 millimètres de pluie cumulée, dans le cas des mesures effectuées sur 10 m² (pluie simulée à 30 mm/h). Elles sont plus faibles pour les mesures sur 1 m² et très difficilement comparables avec les mesures sur 500 m², étant donné la différence d'intensité entre les pluies simulées (30 mm/h correspondant à un fort orage) et la faible pluie naturelle étudiée sur les 500 m² (tableau 4). En effet, les quarante-cinq jours (15 mars-29 avril 1995 : 71 mm) qui ont suivi les dates de traitements (8 au 15 mars) ont été peu pluvieux, la probabilité de retour de pluies plus importantes durant cette période étant de 0,7 – calcul effectué avec les données de Saint-Valery-en-Caux, de 1971 à 1994, et les données du site (à 6 km de Saint-Valery) pour la période d'étude.

Tableau 4

Caractéristiques de l'événement pluvieux survenu à Blosseville le 29 avril 1995

Date	Durée pluie (min)	Hauteur pluie (mm)	EC (J/m ²)	Intensité moyenne (mm/h)	CR (%)	Débit max. (l/s)
29 avril 1995	310	12,8	196	2,4	0,7	9

EC : énergie cinétique ; CR : coefficient de ruissellement.

Characteristics of a rainfall event that occurred on 29 April 1995 at Blosseville

• Évolution de la concentration en isoproturon dans le ruissellement et importance du délai entre traitement et première pluie

Les concentrations en IPU dans les eaux de ruissellement diminuent très vite au cours d'une pluie (figure 1), mais nos données ne permettent pas d'en décrire la cinétique avec précision. La concentration en herbicide dans le ruissellement est très corrélée (négativement) avec la hauteur de pluie cumulée, en particulier quand celle-ci intervient juste après traitement. Pour un délai de vingt-quatre heures entre application et pluie, la corrélation est moins bonne mais reste significative à 1 %. Les corrélations entre concentration en IPU et lame d'eau ruisselée ou charge exportée sont moins bonnes.

La concentration en IPU, notamment dans les premières eaux de ruissellement, est également très fortement liée au délai entre traitement et première pluie (figures 1 et 2) [4]. Sur les placettes de 10 m², dans des conditions de pluie identiques, la concentration du premier ruissellement émis est réduite de moitié quand le délai passe de une heure à vingt-quatre heures entre traitement et première pluie (figure 3), ce qui traduit des phénomènes de dégradation ou d'immobilisation. Ainsi, plusieurs processus interviennent à des échelles de temps différentes (l'événement pluvieux et le délai entre traitement et pluie) dans la détermination du stock d'IPU disponible pour le ruissellement.

• Part relative du transfert sous forme soluble et forme adsorbée aux matières en suspension (MES)

Sur l'échantillon des placettes de 500 m² prélevé au cours d'une pluie intervenue vingt heures après traitement, nous avons séparé la phase solide (particules supérieures à 0,062 µm) de la phase soluble par centrifugation en continu des eaux brutes. La concentration en IPU passe de 5 252,5 µg/l dans les eaux brutes à 4 534 µg/l dans les eaux issues de la séparation, pour une concentration en MES de 3,5 g/l pour cet échantillon. Ainsi, pour l'événement étudié, 86 % du transfert aurait lieu sous forme dissoute (ou adsorbée sur des particules inférieures à 0,062 µm) contre 14 % sous forme particulaire, avec une concentration sur les MES de 205 µg/g (K_d = 45 cm³/g et K_{oc} = 4 500 cm³/g). Ces valeurs, très élevées en comparaison des données de la bibliographie, confirmeraient que le K_d de sys-

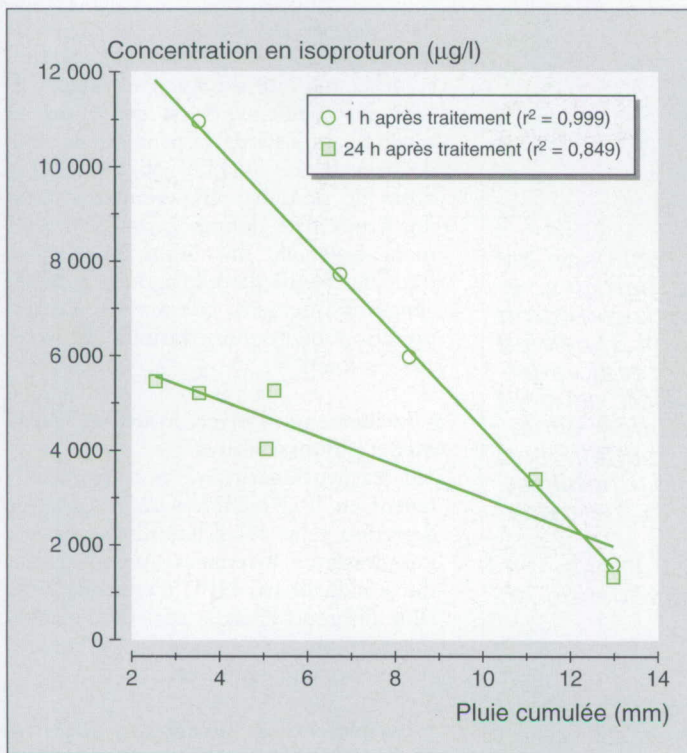


Figure 1. Diminution de la concentration en isoproturon au cours de la pluie et influence du délai entre traitement et première pluie (simulation de pluie sur 1 et 10 m² ; pluie naturelle sur 500 m²). À noter, la très forte diminution d'isoproturon dans les premières eaux de ruissellement quand le délai entre traitement et première pluie augmente.

Figure 1. Decreased isoproturon concentration during rainfall and the influence of the time between treatment and the first rain (rainfall simulation on 1 and 10 m² plots ; natural rain on the 500 m² plot). Note the marked decrease in the isoproturon concentration in the first runoff when the treatment-first rain time was higher.

tèmes dilués (ruissellement) est très supérieur au Kd de systèmes concentrés (sol). En revanche, les quantités totales de produits adsorbés et exportés seraient plus faibles lorsque la teneur en MES est faible, du fait de la moindre masse d'adsorbant [16]. Les concentrations en MES dans les eaux de ruissellement issues

des placettes de 500 m² pouvant atteindre 50 g/l dans le cas d'événements très érosifs, la proportion du transfert liée au MES pourrait alors être plus importante pour ces événements. D'autres analyses seraient nécessaires pour établir la part des deux modes de transport en fonction du caractère plus ou moins érosif des événements pluvieux et du temps (depuis le traitement et au cours de l'événement) qui n'a pas été pris en compte ici.

• **Extrapolation spatiale des mesures effectuées**

Nos résultats montrent que, pour des hauteurs de pluies cumulées proches, les concentrations en IPU ne sont pas significativement différentes quand on passe de 1 à 10 ou 500 m² (tableau 2). La réponse est donc très homogène sur l'ensemble de la parcelle agricole pour une surface très dégradée comme l'était le semis de blé dans nos conditions expérimentales. Cependant, les coefficients de ruissellement sont, eux, surestimés lors de mesures sur 1 ou 10 m² par rapport à 500 m² [9], parce que l'évaluation des quantités ruisselées nécessite des placettes de taille suffisante pour intégrer les mécanismes de réinfiltration se développant au sein de la parcelle agricole. Par ailleurs, la teneur en MES est sous-estimée à l'échelle de 1 m² du fait de la trop faible vitesse acquise par le ruissellement

à cette échelle [9]. Donc, dans le cas de produits phytosanitaires liés aux MES, il semble nécessaire d'effectuer les mesures sur des surfaces d'au moins 5 mètres de long pour avoir une bonne évaluation de la quantité mobilisée par la phase solide.

Transfert de produits phytosanitaires à l'échelle du bassin versant

Contrairement à la parcelle agricole, le bassin versant est une unité définie par des critères essentiellement topographiques (bien que pouvant être modifiés par l'activité humaine). Il est hétérogène tant du point de vue des états de surface que des traitements phytosanitaires effectués. Une procédure d'intégration spatiale – développée avec un système d'information géographique – permet de déterminer les surfaces ruisselantes pour une

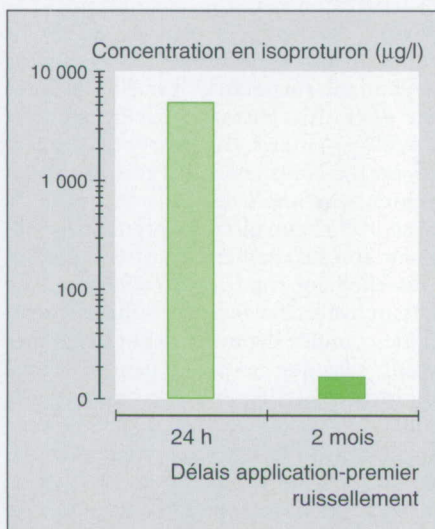


Figure 2. Influence du délai entre traitement et première pluie sur la concentration en isoproturon (pluie naturelle sur 500 m²).

Figure 2. Effect of the treatment-first rain time on the isoproturon concentration (natural rainfall on the 500 m² plot).

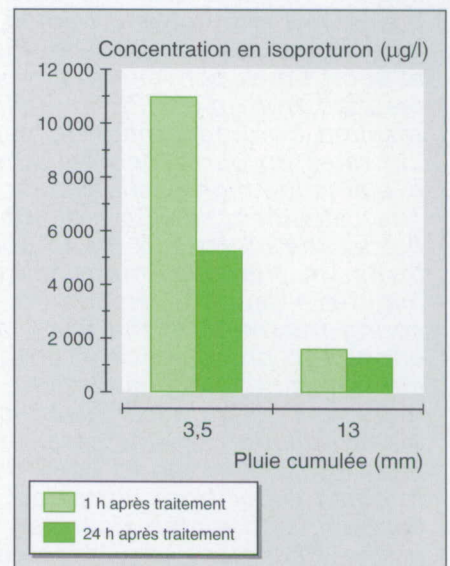


Figure 3. Influence du délai entre traitement et première pluie sur les concentrations en isoproturon (simulation de pluie sur 10 m²).

Figure 3. Effect of the treatment-first rain time on isoproturon concentration loss (rainfall simulation on the 10 m² plot).

Summary

Water erosion and pesticide uptake in catchment runoff

V. Lecomte, Y. Le Bissonnais, B. Renaux, A. Couturier, L. Ligneau

Water erosion of cultivated soils promotes water pollution by pesticides in solution or adsorbed into suspended particles. In this study, we measured fluxes of sediments and isoproturon (IPU: herbicide used in cereal cropfields – Tables 1 and 3) carried by runoff in small agricultural catchments. Spatiotemporal variations in sediment and herbicide transfer were studied on field and catchment scales. The experimental site included winter wheat plots of 1 m² (Photo 1), 10 m² (simulated rainfall) and 500 m² (natural rainfall) that were set up to assess IPU mobilization. The extent of pollutant transfer from the field to the catchment was investigated by:

- on-farm studies (to determine inputs and treatment dates);
- direct observation (to characterize soil surface degradation on all agricultural plots);
- flow measurements;
- water sampling at the catchment outlet.

The field results (Table 2) showed a very high IPU concentration in runoff (above 10,000 µg/l in the first flow when rains fell immediately after treatment). When accumulated rainfall and time between treatment and rainfall were constant, there were no significant differences between IPU concentrations for the different-sized plots (1, 10 and 500 m²). However, 10 m² was found to be the minimum plot size for estimating suspended sediment rates, i.e. runoff had enough velocity and transport capacity to carry sediment particles. During a rain, there was a close correlation between the IPU concentration and accumulated rainfall (Figure 1), otherwise the concentration decreased as the time between treatment and rainfall increased, especially for the first flow (Figures 2 and 3). The IPU loss coefficient was above 25% at short times between treatment and rainfall. This high mobility resulted from high IPU solubility, but 14% of the pesticide flux resulted from adsorption to particles. The high runoff and erosion rates on our experimental site, as compared to other areas, explains the high pesticide flux.

The catchment results highlighted the influence of land use on flux at the outlet and the importance of stream distribution patterns. In the catchment featuring pastures and woodlands (Figures 4 and 5 – Hanouard), the moderate rainfall after the spring treatment in the study area (Table 4) was not substantial enough to produce runoff at the outlet. Conversely, in the other entirely cultivated catchment (Figures 4 and 5 – Blosseville), there was a high pesticide concentration in the runoff, leading to water pollution. In this case, the IPU concentration at the catchment outlet seemed to have been due to the fact that uncontaminated water from untreated fields mixed with and diluted the contaminated water. However, the runoff coefficient was lower in the catchment as compared to the plots, and the pesticide loss coefficient was also lower.

Our results highlight the risk of pollution resulting from IPU treatment prior to rainfall. They also show the importance of the extent and distribution of cropland in the farming landscape.

Cahiers Agricultures 1997 ; 6 : 175-83.

date donnée en fonction du degré de développement des croûtes de battance et de la rugosité du sol. Par ailleurs, le sens des écoulements est déterminé en fonction du sens de la pente et de celui du travail du sol [17] (figure 4). Les doses de produits phytosanitaires épanchés à une date donnée (figure 5) constituent également une information spécifique de chaque parcelle agricole localisée géographiquement, permettant l'interprétation des concentrations mesurées aux exutoires.

• Événements d'hiver, avant les traitements phytosanitaires

Sur les deux bassins versants étudiés, la teneur en IPU est inférieure au seuil de détection dans les échantillons prélevés lors des crues hivernales. Aucune pollution résiduelle par l'IPU n'est donc décelable dix mois après la période de traitement, ce qui est en accord avec la faible rémanence de ce produit.

• Événements de printemps, après les traitements phytosanitaires

Les parcelles ruisselantes sur les deux bassins sont représentées figure 4. Les traitements ont essentiellement eu lieu entre le 8 et le 15 mars 1995, aux doses indiquées sur la figure 5.

Bassin versant de Blosseville

Sur Blosseville, le couvert végétal s'était développé depuis l'hiver et les parcelles cultivées en céréales étaient presque toutes couvertes à plus de 80 % au moment des traitements. Elles étaient cependant ruisselantes car elles avaient été dégradées durant l'hiver, avant le développement du couvert végétal (figure 4). Nous avons effectué des prélèvements manuels des eaux brutes le 29 avril 1995, au cours du premier événement après traitement ayant entraîné un ruissellement significatif (tableau 4). Le bassin avait déjà reçu 95 millimètres de pluie cumulée depuis le début des traitements sans que ces pluies aient provoqué de forts ruissellements. Le court événement du 29 avril a provoqué peu de ruissellement du fait que les intensités instantanées n'ont jamais atteint des valeurs élevées. Les teneurs en MES mesurées au cours de l'événement sont faibles, avec un maximum de 4 g/l qui est lié aux faibles débits mesurés à l'exutoire (inférieurs à 9 l/s). La perte en terre du bassin versant au cours de l'événement est d'environ 0,16 tonne, soit 1,8 kg/ha : dix fois plus que pour un événement d'éner-

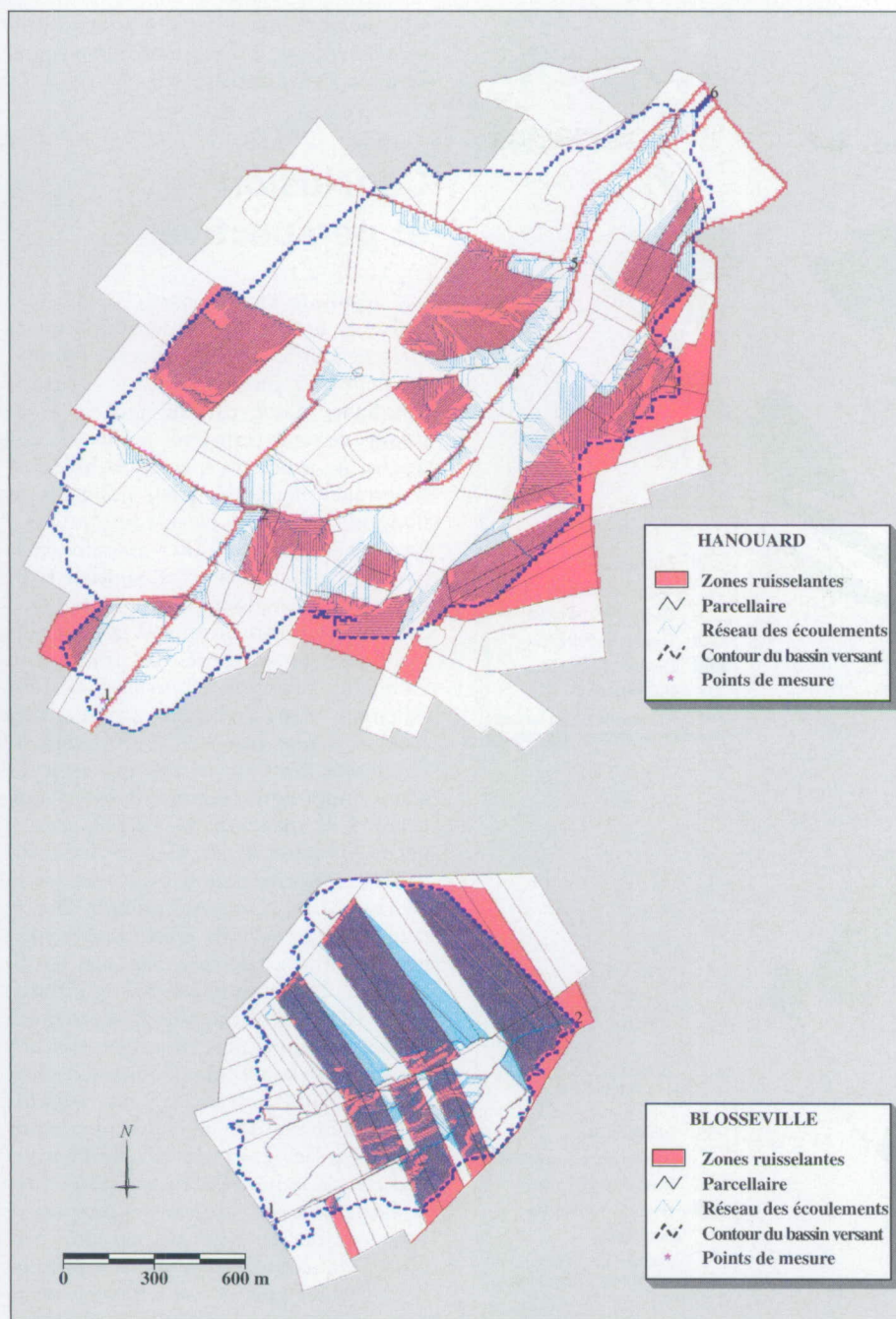


Figure 4. Carte des surfaces ruisselantes et du réseau des écoulements en avril 1995 sur les bassins versants du Hanouard et de Blosseville (INRA).

Figure 4. Map of runoff areas and stream patterns in April 1995 for the Hanouard and Blosseville catchments.

gie cinétique comparable sur le Hanouard (0,18 kg/ha le 28 décembre 1994), mais beaucoup moins que sur le même site lors des orages de printemps 1994 [10]. Sur le bassin topographique modifié par les sens de culture, dérayures et autres éléments anthropiques, 34 hectares étaient semés en blé ou en escour-

geon et environ 50 000 grammes d'IPU avaient été épanchés (figure 5). Une valeur moyenne de 7,3 µg d'IPU/l a été mesurée à l'exutoire du bassin pour l'événement du 29 avril, ce qui correspond à un coefficient de perte de moins de 0,01 % de la quantité apportée (une bonne partie de la matière active ayant

dû être dégradée étant donné les valeurs de demi-vie de cette molécule).

Bassin versant du Hanouard

Sur le bassin du Hanouard, le suivi réalisé au cours des tournées de terrain indique que, si le pourcentage des surfaces ruisselantes est passé de 19,9 à 26,4 % de la surface totale entre décembre et avril du fait de la dégradation de la surface du sol, la protection, grâce au couvert végétal, a au contraire augmenté (atteignant 63,21 % de surfaces couvertes à plus de 80 % en avril, contre 51,19 % en décembre). Environ 92 550 grammes d'IPU avaient été épanchés sur le bassin début mars. Les parcelles traitées, qui correspondent aux surfaces en céréales d'hiver, étaient toutes potentiellement ruisselantes en avril (figures 4 et 5) mais, lors des événements pluvieux, du fait d'obstacles intermédiaires, le ruissellement émis par les parcelles cultivées n'atteignait pas l'exutoire du bassin versant.

• De la parcelle au bassin versant

Lors de l'événement du 29 avril, des prélèvements ont été effectués simultanément au niveau des 500 m² (tableau 2) et à l'exutoire du bassin de Blosseville. On s'aperçoit, en calculant le rapport de la concentration sur le pourcentage de surface ruisselante traitée, que la simple dilution lors du mélange des ruissellements des parcelles traitées et non traitées pourrait expliquer la différence de concentration en IPU dans les eaux issues de la placette de 500 m² et dans les eaux de ruissellement à l'exutoire du bassin de Blosseville. Aucun repiégeage spécifique de l'IPU n'aurait donc eu lieu lors de son parcours au sein du ruissellement en nappe, puis dans les chemins d'eau de ce bassin entièrement cultivé. Cependant, la forte diminution des coefficients de ruissellement lors du passage de 500 m² au bassin versant témoigne de réinfiltrations qui doivent toucher à la fois les eaux chargées en produits phytosanitaires et celles non chargées et sont responsables de la diminution du coefficient de perte. D'autres analyses sont nécessaires pour valider cette hypothèse.

• Spécificité des bassins versants

La différence de comportement entre les deux bassins paraît liée, d'une part, à la forte proportion de surfaces non ruisselantes sur le bassin du Hanouard (notamment grâce au maintien de zones

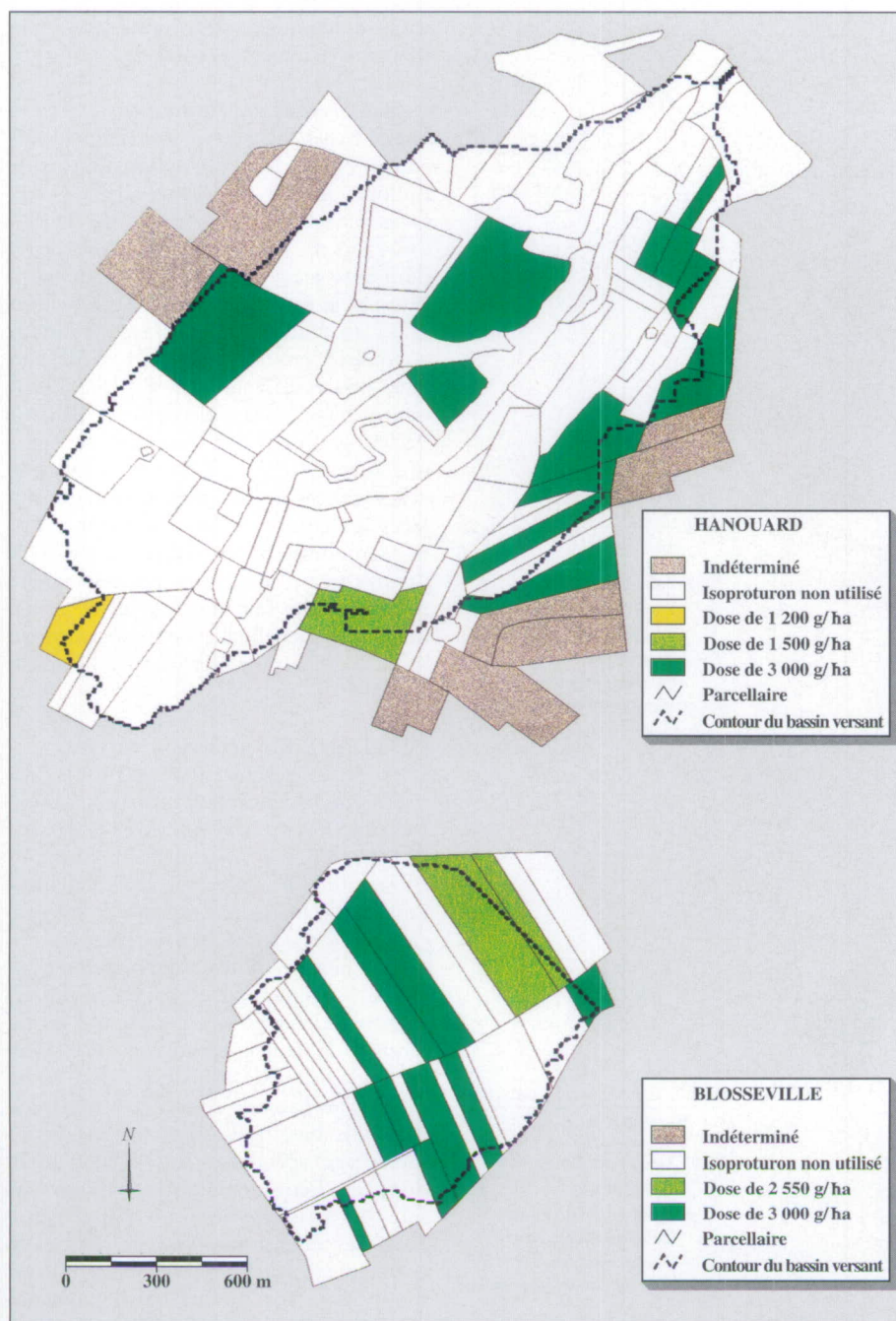


Figure 5. Carte des traitements à l'isoproturon effectués sur les bassins versants du Hanouard et de Blosseville pour la saison culturale 1994-1995 (INRA).

Figure 5. Map of isoproturon treatments carried out in the Hanouard and Blosseville catchments during the 1994-1995 crop season.

tampans telles que bois et prairies et à la forte proportion de jachères implantées depuis plus d'un an) et, d'autre part, à la disposition des parcelles ruisselantes traitées au sein des bassins versants qui, dans le cas du Hanouard, se situent essentiellement en périphérie. Le ruissellement généré sur ces parcelles est donc

réinfiltré ou piégé lors de son trajet jusqu'à l'exutoire et seuls des événements exceptionnels peuvent conduire à un transfert vers les milieux en aval (ce qui a été le cas durant l'hiver 1994-1995 pour les MES et des produits plus rémanents que l'IPU ou épanchés à d'autres époques) alors que, sur Blosse-

ville, aucun obstacle ne s'oppose au ruissellement jusqu'à l'exutoire, même pour de petits événements.

Conclusion et perspectives

Les résultats encore partiels présentés dans cet article constituent une étude intégrée à différentes échelles du transfert de produits phytosanitaires. L'étude simultanée d'une parcelle agricole et de bassins versants contrastés permet de distinguer les processus spécifiques à l'échelle intraparcéliaire des effets liés à l'organisation spatiale des bassins versants.

La mobilisation de l'IPU au sein de la parcelle agricole met en évidence de fortes concentrations dans les premières eaux de ruissellement quand la pluie survient rapidement après un traitement. Conjugué aux forts coefficients de ruissellement dans la région étudiée, cela conduit à une très forte exportation de l'herbicide hors de la parcelle agricole. Cette importante mobilité de l'IPU dans les eaux de ruissellement s'explique aussi par sa solubilité élevée. L'étude de la part du transfert effectuée sous forme adsorbée aux MES reste à approfondir dans ce contexte régional très érosif, notamment pour d'autres matières actives, aux coefficients d'adsorption plus élevés. L'influence du délai entre traitement et première pluie, qui apparaît comme primordial, devrait également faire l'objet d'investigations plus poussées, pour prévoir l'entraînement des produits phytosanitaires par les eaux de ruissellement à l'échelle de la parcelle. En ce qui concerne l'extrapolation spatiale des mesures, si l'observation de 1 m² permet une première évaluation des concentrations en IPU dans les eaux de ruissellement issues de parcelles très battues, l'étude de la charge en MES et du transfert de produits phytosanitaires liés aux particules doit cependant être réalisée sur des placettes d'au moins 5 mètres de long – distance nécessaire pour que le ruissellement atteigne une vitesse et une capacité de transport des particules suffisantes.

L'étude des bassins versants met en évidence l'importance des zones tampons telles que bois et prairies, ainsi que celle de leur disposition dans la mosaïque du paysage. D'autres études sur le suivi du transfert des produits phytosanitaires sur ces bassins versants et d'autres expéri-

mentations *in situ* sur l'effet de dispositifs enherbés permettront de vérifier cette hypothèse. L'utilisation d'un système d'information géographique (permettant de croiser, d'une part, des données spatiales relatives à la naissance et au cheminement des écoulements et, d'autre part, des données relatives à la disponibilité des matières actives) devrait conduire à une modélisation du transfert des produits phytosanitaires et, donc, à une meilleure évaluation des risques de contamination des milieux récepteurs du ruissellement ■

Références

1. Papy F, Douyer C. Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. *Agronomie* 1991 ; 11 : 201-15.
2. Ouvry JF. L'évolution de la grande culture et l'érosion dans le Pays de Caux. *Bull Assoc Geogr Franç* 1992 ; 2 : 107-13.
3. Barriuso E, Calvet R, Cure B. *Incidence de la simplification du travail du sol sur le comportement des produits phytosanitaires : conséquences sur les risques de pollution*. Les Colloques, INRA, Colloque INRA-ITCF-CEMAGREF 16/05/1991, 1994 ; 65 : 105-24.
4. Grill JJ, Mailloux-Jaskulke E, Fouchon N. *Ruissellement et transfert dans les bassins versants*. Versailles : Colloque phyt'eau eau-produits phytosanitaires-usages agricoles et connexes : recueil des communications orales, octobre 1992 : 95-121.
5. Patty L, Grill JJ, Réal B, Masson E, Dabene E. Des possibilités pour préserver la qualité des eaux superficielles. *Perspectives Agricoles* 1994 ; 196 : 90-5.
6. Ministère de l'agriculture et de la forêt. *Recensement agricole 1988 - cantons et régions agricoles de Seine-Maritime* ; 151 p.
7. Le Bissonnais Y, Le Souder C. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etudes et Gestion des Sols* 1995 ; 2-1 : 43-56.
8. Le Bissonnais Y, Gascuel C. L'érosion hydrique des sols cultivés. *Sols interfaces fragiles*. Paris : Nathan-INRA (à paraître).
9. Le Bissonnais Y, 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. Actes du colloque « Crues, versants et lits fluviaux », Paris, mars 1995. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement* 1996 ; n° 4.
10. Gallien E, et al. Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Cahiers Agricultures* 1995 ; 4 : 171-83.
11. Chabrol L, et al. Qualité des eaux et pratiques phytosanitaires : exemple du verger limousin. Club Protection raisonnée, Rhône-Poulenc, France. *Adalia Bull Inf Tech* 1994 ; 26 : 26-9.
12. Schiavon M. Données actuelles sur les transferts d'atrazine dans l'environnement. *Agronomie* 1992 ; 12 : 129-39.
13. Dabene E, Marie F. *Caractéristiques utiles pour l'évaluation du comportement de quelques matières actives dans l'environnement*. Ministère de l'agriculture et de la pêche, sept. 1993, France.
14. Bresson LM, Boiffin J. Morphological characterisation of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma* 1990 ; 47 : 301-25.
15. Patty L, Guyot C. Analytical methods for the determination of isoproturon and diflufenican residues in runoff and soil. *Bull Environ Contam Toxicol* 1995 ; 55 : 802-9.
16. Gouy V. *Contribution de la modélisation à la simulation du transfert des produits phytosanitaires de la parcelle agricole vers les eaux superficielles*. Thèse de l'université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1993 ; 349 p.
17. Souchere V. *Modélisation spatiale du ruissellement à des fins d'aménagement contre l'érosion de talweg*. Thèse de l'INA-PG, 1995 ; 200 p.

Résumé

L'érosion hydrique des terres cultivées est à l'origine d'une pollution des eaux par entraînement de produits phytosanitaires en solution ou liés aux matières en suspension. Une étude sur l'isoproturon (IPU) a été réalisée simultanément à l'échelle intraparcellaire (au moyen de placettes expérimentales) et sur deux bassins versants différenciés du point de vue de leur occupation du sol, pour rechercher les facteurs de variation dans l'espace et le temps de la qualité de l'eau de ruissellement. À l'échelle intraparcellaire, la forte mobilité de l'IPU est étroitement dépendante du délai entre traitement et première pluie, le transport s'effectuant essentiellement sous forme soluble. L'étude des bassins versants révèle l'influence des bois et prairies sur le ruissellement et le transfert de produits phytosanitaires. Suite aux faibles pluies survenues après les traitements phytosanitaires, le bassin à l'occupation du sol diversifiée n'a pas émis de ruissellements atteignant l'exutoire, contrairement au bassin entièrement cultivé. Pour ce dernier, la concentration en IPU semble résulter de la dilution des eaux issues des parcelles traitées par celles provenant des parcelles non traitées. Ces résultats confirment la nécessité de limiter les traitements à l'IPU en cas de prévision de pluie à court terme et mettent en évidence le rôle joué par la proportion et la répartition des surfaces cultivées dans le paysage.