

# Fonctions environnementales des dispositifs enherbés en vue de la gestion et de la maîtrise des impacts d'origine agricole.

## Cas des pesticides

P. Benoit<sup>(1)</sup>, C. Souiller<sup>(2)</sup>, I. Madrigal<sup>(1)</sup>, V. Pot<sup>(1)</sup>, B. Réal<sup>(3)</sup>, Y. Coquet<sup>(1)</sup>, C. Margoum<sup>(2)</sup>,  
B. Laillet<sup>(2)</sup>, A. Dutertre<sup>(3)</sup>, J.J. Gril<sup>(2)</sup> et E. Barriuso<sup>(1)</sup>

- (1) UMR INRA/INAPG Environnement et Grandes Cultures, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon  
 (2) Cemagref, Unité de Recherche Qualité de l'Eau et Prévention des Pollutions, Groupement de Lyon,  
 34 Bis Quai Chauveau, 69336 Lyon Cédex 09  
 (3) ARVALIS - Institut du Végétal, Service Techniques de Production, 80200 Estrées-Mons  
 Ferme expérimentale de La jaillière 44370 La Chapelle-Saint-Sauveur

### RÉSUMÉ

Les dispositifs enherbés peuvent réduire de façon efficace les pertes en pesticides par ruissellement et érosion hors des parcelles agricoles. Ils sont largement utilisés dans des projets d'aménagements visant à préserver les ressources en eau à l'échelle de petits bassins versants agricoles. Leur mode de fonctionnement en tant que système épurateur vis-à-vis des pesticides véhiculés par ruissellement et érosion repose sur différents phénomènes d'origine physique, chimique et biologique. A relativement court terme, certaines propriétés des sols vont se trouver modifiées suite au changement d'occupation du sol, un sol cultivé de façon intensive se retrouvant enherbé pour plusieurs années. Certaines modifications vont jouer un rôle déterminant sur le devenir des pesticides interceptés par ces dispositifs : infiltration et transfert vertical des produits solubles dans l'eau, affectés par des changements de structure et de porosité, rétention des pesticides accrue en raison des changements de la composition organique des horizons superficiels et stimulation des biotransformations et de la stabilisation des résidus en relation avec un accroissement de l'activité de la microflore du sol. Combinant différentes approches expérimentales, les effets de ces changements sur le comportement de différents herbicides sont étudiés pour des dispositifs enherbés ayant différents âges d'implantation et installés dans différents contextes pédologiques (Brunisols et Calcisols).

### Mots clés

Pesticides, dispositifs enherbés, infiltration, sorption, matières organiques

### SUMMARY

#### **ENVIRONMENTAL FUNCTIONS OF GRASSED BUFFER STRIPS FOR THE CONTROL OF WATER CONTAMINATION BY RUNOFF : the case of pesticides**

*Grassed strips can reduce efficiently the pesticides losses by run off from cropped fields. They have been used in several projects in order to protect water resources in small rural watersheds in France. Their functioning as depolluting systems for pesticides transported by run-off is due to several soil phenomena, of physical, chemical and biological origins. At relatively short terms (years), some soil properties*

are modified by the change in land-use consecutively to the implantation of grassed filter strips: a soil intensively cropped turning to permanent grassland. Some of these modifications will play a determinant role in the fate of the pesticides trapped within the filter strips: infiltration and vertical transfer of soluble molecules due to change in soil structure and porosity, increased sorption of pesticides related to change in organic matter of the superficial horizons, and stimulation of pesticide biotransformations and residue stabilisation related to increased microbial activities in litter and root zones. We have combined several experimental approaches, on site and at laboratory scale, to study the effects of these several changes in soil properties on the behaviour of different herbicides in grassed strips differing by the soil types (Calcareous soil or Brown soils) and the age of grass implantation.

**Key-words**

Pesticides, grassed strips, infiltration, sorption, soil organic matter

**RESUMEN****FUNCIONES MEDIOAMBIENTALES DE LOS DISPOSITIVOS CON HIERBAS EN LA GESTIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE ORIGEN AGRÍCOLA: caso de los plaguicidas**

Los dispositivos con hierbas pueden reducir eficazmente las pérdidas de plaguicidas fuera de las parcelas originadas por las escorrentías y la erosión. Estos dispositivos son ampliamente utilizados en proyectos de planeación orientados a proteger los recursos hídricos a nivel de pequeñas cuencas agrícolas. Su modo de funcionamiento como sistemas purificadores de plaguicidas transportados por las escorrentías y la erosión, se basa en diferentes fenómenos de origen físico, químico y biológico. En un tiempo relativamente corto, ciertas propiedades del suelo se modificarán debido a sus cambios de ocupación: un suelo cultivado de manera intensiva se encontrará con hierbas durante muchos años. Ciertas de estas modificaciones tendrán un papel determinante en la transformación de los plaguicidas interceptados por los dispositivos con hierbas: la infiltración y la transferencia vertical de los productos solubles en agua, -dichos fenómenos son afectados por los cambios de estructura y porosidad del suelo; la retención de plaguicidas incrementada por los cambios de la composición orgánica de los horizontes superficiales, la estimulación de las biotransformaciones y la estabilización de los residuos relacionados con el crecimiento de la actividad de la microflora del suelo. Combinando diferentes enfoques experimentales, los efectos de estos cambios sobre el comportamiento de varios herbicidas son estudiados en diferentes dispositivos con hierbas, dispositivos de distintas edades de implantación e instalados en diversos contextos edafológicos (Brunisols y Calcisols).

**Palabras clave**

Plaguicidas, dispositivos con hierba, infiltración, sorción, materias orgánicas

Depuis quelques années, l'utilisation de zones tampons fait partie intégrante de projets d'aménagement visant à préserver les ressources en eau à l'échelle des petits bassins versants agricoles (CORPEN, 1997). Parmi ces aménagements, les dispositifs enherbés implantés en aval de parcelles cultivées se sont largement développés, à la fois dans un objectif de lutte contre l'érosion hydrique des sols, mais aussi pour réduire les transferts de nitrates, phosphates et pesticides (Asmussen *et al.*, 1977; Dilhala *et al.*, 1989; Arora *et al.*, 1996; Patty *et al.*, 1997; Mersie *et al.*, 1999a). Leur efficacité en termes de réduction des flux de pesticides quittant les parcelles par ruissellement et érosion a d'abord été démontrée sur le plan technique à l'échelle de dispositifs expérimentaux de plein-champ (Webster et Shaw, 1996; Gril *et al.*, 1996; Réal *et al.*, 1997; Patty, 1997; Schmitt *et al.*, 1999). Cette efficacité a été confirmée à l'échelle de petits bassins versants agricoles (Lecomte, 1999). Ces différents acquis ont justifié la recommandation de l'implantation des dispositifs enherbés (CORPEN, 1997). Ces aménagements opérant comme zones de rupture des transferts au niveau du versant peuvent en effet compléter efficacement la mise en place de pratiques culturales visant à retarder le déclenchement du ruissellement à l'échelle des parcelles agricoles (Baker *et al.*, 1995; Lennartz *et al.*, 1997; Louchart *et al.*, 2001).

Les principaux phénomènes en cause dans la réduction des flux de ruissellement par les dispositifs enherbés sont bien identifiés (*figure 1*). Le premier effet est le ralentissement des écoulements des eaux de ruissellement provoqué en partie par l'augmentation de la rugosité hydraulique due au couvert herbacé et aux débris végétaux qui en sont issus. Ceci provoque la sédimentation des particules solides contenues dans le ruissellement sur lesquelles sont adsorbés des produits phytosanitaires (Patty, 1997; Schmitt *et al.*, 1999). A cet effet de filtration est associée une augmentation de l'infiltration en liaison avec les modifications de la structure des horizons de surface, de telle sorte qu'une partie plus ou moins importante du ruissellement s'infiltré au niveau du dispositif enherbé (Arora *et al.*, 1996; Schmitt *et al.*, 1999; Souiller *et al.*, 2002). Selon ce schéma, on conçoit que l'infiltration puisse entraîner dans le profil les substances contenues dans la solution de ruissellement (Delphin et Chapot, 2001). L'efficacité des dispositifs enherbés sous-entend une interception des substances par les dispositifs, en premier lieu via des phénomènes de rétention à la surface du sol enherbé en contact avec le ruissellement et dans le sol au cours de l'infiltration. Il y a cependant peu de renseignements quantitatifs sur cette rétention, ni sur le devenir de produits interceptés. Même si les quantités quittant les parcelles représentent de faibles proportions des quantités appliquées (Réal, 1998; Louchart *et al.*, 2001), le rôle de l'infiltration dans le fonctionnement des dispositifs pose la question des risques de contamination par les eaux d'infiltration.

Cet article fait le point sur les connaissances acquises sur le mode d'action de dispositifs enherbés dans la réduction des transferts de pesticide par ruissellement et érosion. Il revient dans un premier temps sur les acquis des essais de plein-champ démontrant l'efficacité de dispositifs enherbés situés dans différents contextes pédoclima-

tiques. Ensuite nous présentons comment des modifications de propriétés du sol induites par l'enherbement peuvent expliquer le mode d'action des dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires présents dans le ruissellement. Nous présentons tout d'abord des données sur le fonctionnement hydraulique des sols enherbés, obtenus *in situ* au cours d'expérimentations de simulation de ruissellement. Nous abordons ensuite le fonctionnement des sols enherbés en termes de potentialités de rétention des substances interceptées et leurs possibilités de biotransformations. Nous discutons également de la manière dont ces différentes fonctions liées au stockage et à l'épuration des polluants organiques sont susceptibles de varier en fonction des facteurs pédologiques, en comparant plusieurs sites représentant différents milieux pédoclimatiques.

## EFFICACITÉ DES DISPOSITIFS ENHERBÉS

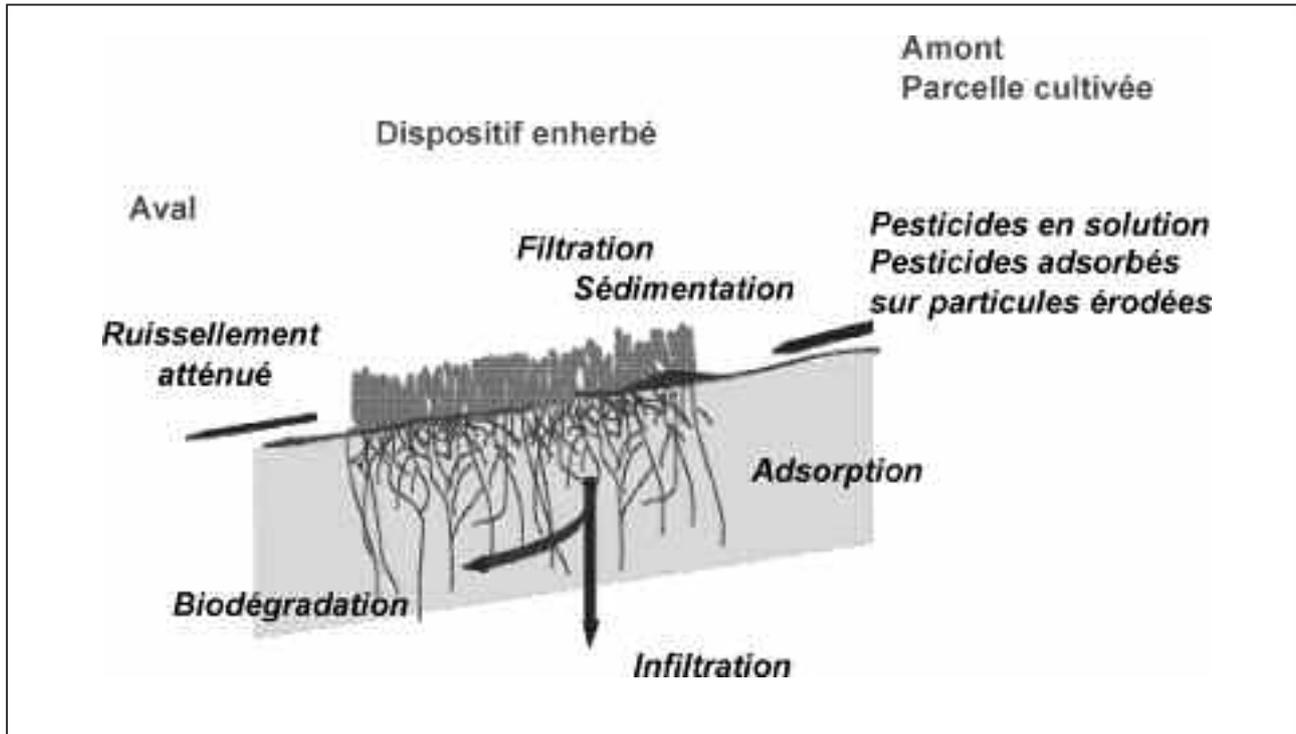
Depuis près de dix ans en France, différents essais d'implantation de dispositifs enherbés ont été mis en place pour évaluer leur efficacité vis-à-vis du transport de pesticides. Ces essais ont été installés dans différentes conditions agro-pédo-climatiques dans le cadre des mesures agri-environnementales ou pour d'autres objectifs d'aménagement: Grand-Ouest, Picardie, Alsace (par ARVALIS), Pays de Caux (par l'AREAS), Sud-Est en vigne (par la chambre d'Agriculture du Vaucluse) et Sud-Ouest (par le SRPV Midi-Pyrénées). Au sein du CORPEN, un groupe de travail "dispositifs enherbés" a été créé et on pourra trouver un résumé de l'utilisation de ces dispositifs avec les principaux résultats obtenus dans le document édité en 1997 (CORPEN, 1997).

Des dispositifs expérimentaux de conception simple comme ceux mis en place lors des travaux ARVALIS-CEMAGREF effectués dans l'Ouest de la France (Patty, 1997; Réal, 1998) ont permis de recueillir un grand nombre de données sur l'efficacité des dispositifs en fonction des conditions locales de milieu et d'occupation du sol. Constituées de parcelles cultivées de 250 m<sup>2</sup> (5 x 50 m), hydrauliquement isolées, en aval desquelles se trouve une bande enherbée de 18 m de longueur, les parcelles expérimentales se distinguent par la position du système de collecte du ruissellement (tôle galvanisée) situé respectivement à 0, 6, 12 et 18 m dans la bande. Le ruissellement est récupéré dans des cuves de stockage, via des barrages en tôle galvanisée et les tuyaux en PVC. La mesure des volumes exportés et des concentrations permet un suivi des flux d'eau et de polluants et de quantifier la réduction des flux exportés dans les systèmes enherbés par rapport au témoin sans bande enherbée.

Une synthèse des résultats obtenus au cours de campagnes de suivi du ruissellement entre 1993 et 1996 sur différents sites du Grand-Ouest, montre que la moyenne des efficacités mesurées avec les bandes de 6 m a été de 71 % sur les volumes collectés. Celles des bandes de 12 et 18 m ont été respectivement de 85 et 80 %. Les bandes enherbées filtrent le ruissellement et retiennent les matières en suspension: 89 % des matières en suspension ont été retenues

**Figure 1** - Principaux phénomènes en cause dans le fonctionnement d'un dispositif enherbé (d'après Patty, 1997).

**Figure 1** - Main processes involved in the functioning of grassed buffer strips (d'après Patty, 1997).



avec 6 m de bande, 84 % avec 12 m et 99 % avec 18 m (Réal, 1998).

Sur ces mêmes sites, les quantités de produits transférées par ruissellement hors des parcelles cultivées sont faibles, atteignant des valeurs maximales de 1.2 % pour l'isoproturon à 1.8 % pour le DFF (Réal, 1998). Les bandes enherbées réduisent les concentrations en produits phytosanitaires dans les ruissellements qu'elles reçoivent (*figure 2*). Cette réduction atteint une moyenne inter-annuelle de 71 % pour 6 m, 84 % pour 12 m et 91 % pour 18 m de bandes enherbées (Réal, 1998). En termes de flux de produits phytosanitaires, les bandes de 12 m ont enregistré une efficacité de près de 90 % et celles de 18 m, une efficacité supérieure à 96 %. Celles de 6 m ont retenu plus de 80 % des quantités de produits reçues, à l'exception de quelques épisodes.

## PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE

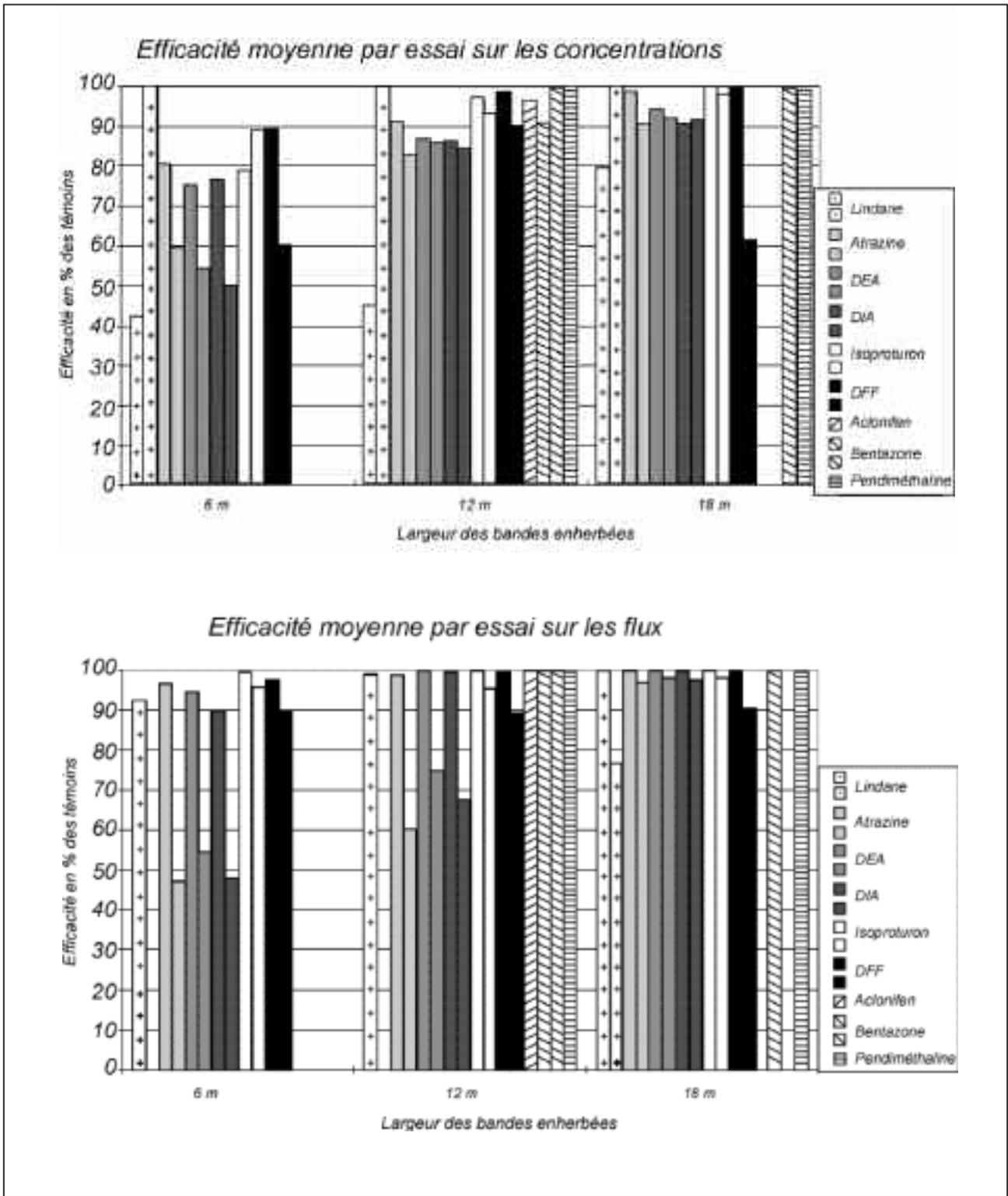
### Modifications des propriétés physiques du sol suite à l'enherbement

La majorité des sols concernés par l'implantation de dispositifs enherbés sont des sols qui ont été cultivés antérieurement

de manière intensive. L'implantation d'une couverture herbacée permanente induit la restauration progressive du stock de matière organique des horizons superficiels avec le développement de proportions importantes de matières organiques d'origine racinaire et de débris végétaux en cours de décomposition (Whitehead *et al.*, 1979; Davenport et Thomas, 1988), avec une augmentation concomitante de l'activité biologique (Merckx *et al.*, 1985; Haynes et Francis, 1993). Une conséquence directe est l'augmentation de la cohésion entre les particules minérales des sols et donc l'apparition d'une structure caractérisée par la présence d'agrégats stables (Greacen, 1958; Tisdall et Oades, 1979; Jastrow *et al.*, 1998). Par ailleurs, l'implantation d'une prairie s'accompagne généralement d'une augmentation de l'activité de la macrofaune, liée à l'absence de travail du sol et à l'apport de substrats organiques facilement assimilables. Cette modification de structure peut être observée en lames minces de sol échantillonné sous culture et sous bande enherbée sur le site ARVALIS de la Jaillière - 44 (*figure 3*). Des mesures de masses volumiques apparentes (*tableau 1*) confirment les modifications importantes de la porosité du sol en surface suite à l'enherbement. L'ensemble de ces modifications peut être à l'origine des changements des caractéristiques de circulation de l'eau au niveau de la zone enherbée.

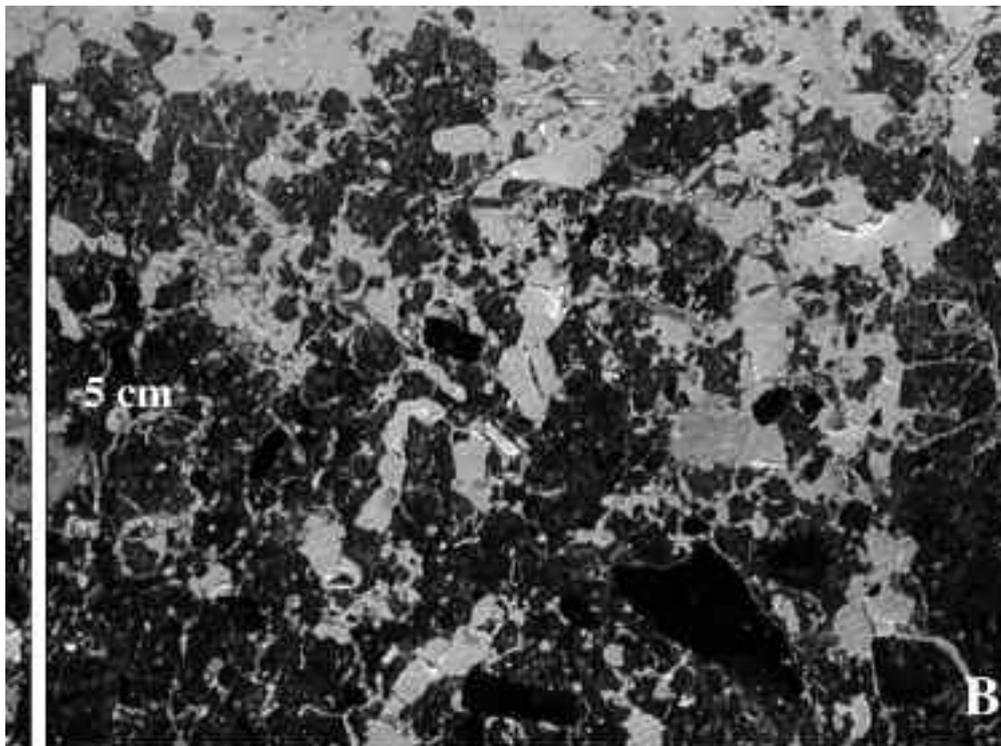
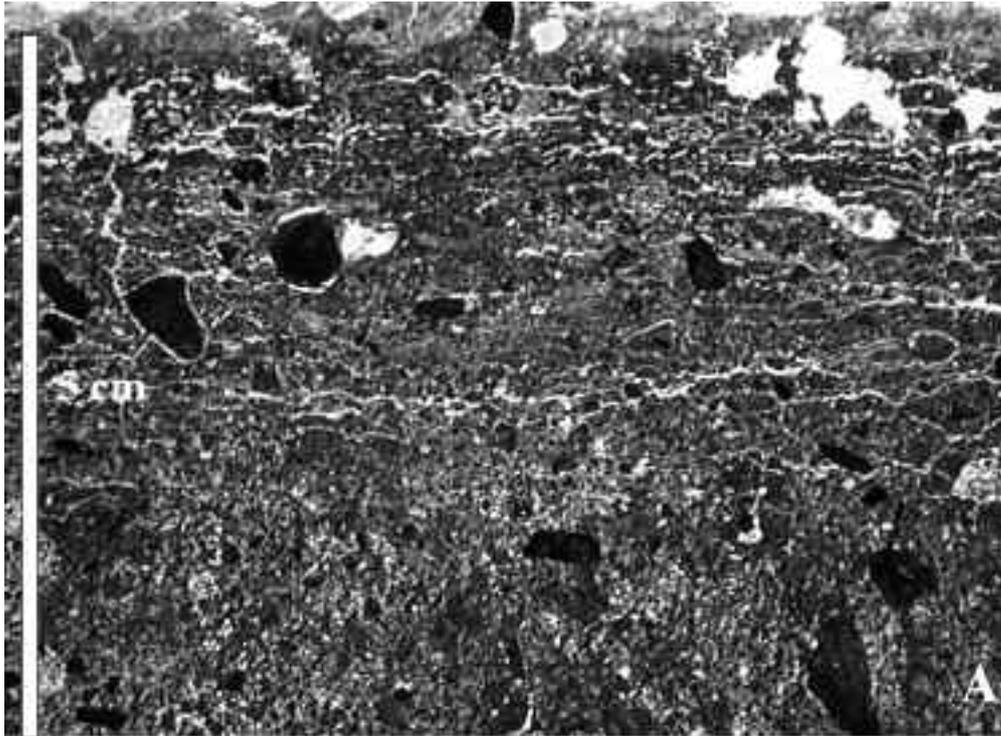
**Figure 2 -** Dispositifs enherbés : efficacités moyennes annuelles par essai sur les concentrations et les flux de différents pesticides suivis par ARVALIS (d'après Réal, 1998)

**Figure 2 -** Grassed buffer strips : mean percentages of reduction of concentrations and fluxes for different pesticides monitored by ARVALIS (after Réal, 1998)



**Figure 3** - Structure et organisation des 5 premiers centimètres du sol à la Jaillière. A. Sol Cultivé - Structure continue fissurale. B. Sol enherbé - Structure agrégée lâche.

**Figure 3** - Soil structure in the first 5 centimeters at la Jaillière. A. Cropped soil with continuous structure with small cracks. B. Grassed soil with loose aggregated structure.



## Flux d'eau infiltrés et ruisselés évalués par simulation de ruissellement

Le comportement hydrodynamique des dispositifs enherbés peut être précisé au moyen d'expérimentations de simulation de ruissellement en plein champ (Gril *et al.*, 1996). Ces expériences permettent d'évaluer les paramètres hydrauliques qui caractérisent l'écoulement sur une surface en herbe (vitesse moyenne d'infiltration, coefficient de rugosité et vitesse moyenne d'écoulement) et aussi de diagnostiquer des circulations hypodermiques et donc des risques de conditions favorables aux transferts directs de polluants sous les dispositifs enherbés. Actuellement, les valeurs de ce type de paramètres pour la caractérisation du comportement de différents milieux (types de sol et de végétation, pentes, conditions d'humidité) font défaut. Développer des tests de diagnostic du fonctionnement et de l'évolution de ces dispositifs pour aboutir à la caractérisation fonctionnelle de leur comportement hydraulique et à la définition de débits limites d'efficacité a été l'objectif des travaux récents du Cemagref (Souiller *et al.*, 2002).

Les expérimentations de simulation de ruissellement permettent en outre de préciser la part des produits phytosanitaires qui se sont infiltrés et ceux qui ont été retenus à la surface en mesurant précisément le flux entrant et le flux sortant d'une surface enherbée et en suivant la concentration en produits phytosanitaires dans chacun des flux au cours du temps et en évitant toute influence extérieure, notamment la dilution par l'eau de pluie. Cet outil expérimental léger et mobile peut se révéler un complément intéressant des dispositifs fixes, puisqu'il permet de réaliser des campagnes expérimentales à différents moments de l'année, notamment de comparer le fonctionnement des dispositifs enherbés selon l'état hydrique des sols entre périodes estivale et hivernale (Souiller *et al.*, 2002).

Les résultats obtenus en conditions estivales et hivernales montrent le rôle prépondérant de l'infiltration dans la dissipation des produits phytosanitaires au sein de dispositifs enherbés (*tableau 2*). Les débits utilisés au cours des expérimentations correspondent à des débits élevés par rapport aux conditions naturelles (Patty, 1997). De même, la stabilisation des régimes d'écoulement recherchée pour les simulations de ruissellement est rarement observée *in situ* où les épisodes de ruissellement correspondent à des régimes plus transitoires. Les conditions des simulations représentent donc des conditions limites qui maximisent les flux ruisselés (Souiller *et al.*, 2002). Malgré cela, on constate en conditions estivales que des débits entrant de 0,35 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> s'infiltrent presque complètement dans le dispositif enherbé à la Jaillière. En conditions naturelles, la proportion infiltrée est donc *a fortiori* plus importante.

## Infiltrabilité des sols enherbés

Des données complémentaires sur l'infiltrabilité des sols enherbés peuvent être obtenues *in situ* par des mesures de conductivités hydrauliques. Ceci a été par exemple réalisé sur le dispositif enherbé de la Jaillière à partir des cinétiques d'infiltration par la méthode multipotentiels utilisant l'infiltromètre à disque (Reynolds

et Elrick, 1991 ; Coquet *et al.*, 2000). Ce type de caractérisation a permis de montrer que l'horizon de surface de la bande enherbée correspondant au mat racinaire de la prairie a une conductivité supérieure à celle de l'horizon sous-jacent se trouvant à - 5 cm (Souiller *et al.*, 2002). La faible conductivité à 5 cm de profondeur est à mettre en relation avec une porosité totale plus faible comme le suggèrent les données de masses volumiques mesurées sur le site de la Jaillière (*tableau 1*). Au printemps comme en hiver, la capacité d'infiltration verticale de la bande enherbée en conditions proches de la saturation est conditionnée par les propriétés du sol à partir de 5 cm de profondeur. Souiller *et al.* (2002) observent également des variations saisonnières importantes entre printemps et hiver avec un accroissement de la conductivité hydraulique à saturation de l'horizon de surface en période de végétation (printemps). Ces résultats concordent avec des observations de Bouma et Hole (1971) dans des sols sous prairie. La forte discontinuité hydraulique observée entre la surface de la bande, constituée principalement du mat racinaire, et le sol sous-jacent pourrait entraîner, surtout au printemps et en été, un écoulement latéral superficiel au sein de la surface de la bande enherbée.

## RÉTENTION DES PESTICIDES À LA SURFACE ET DANS LES SOLS ENHERBÉS

### Evaluation de la rétention *in situ* par simulation de ruissellement

Les résultats obtenus par simulation de ruissellement (Souiller *et al.*, 2002) fournissent des données complémentaires aux essais sur dispositifs de plein-champ en confirmant que l'élimination des produits phytosanitaires transportés par ruissellement se fait majoritairement via la réinfiltration au sein des dispositifs enherbés (Arora *et al.*, 1996 ; Mersie *et al.*, 1999a). La capacité de rétention des molé-

**Tableau 1** - Masses volumiques des horizons superficiels enherbés et cultivés à la Jaillière.

**Table 1** - Soil bulk densities of the soil superficial layers of grassed strips and cropped plots at the la Jaillière site.

Profondeur	Masse volumique (kg dm <sup>-3</sup> )
<b>Parcelle cultivée (maïs/blé, mabour)</b>	
0-2,5 cm	1,3 ± 0,1
5-7,5 cm	1,2 ± 0,1
<b>Bande enherbée</b>	
0-2,5 cm	0,8 ± 0,1
5-7,5 cm	1,4 ± 0,2

**Tableau 2** - Débits moyens infiltrés et répartition du flux de produits phytosanitaires lors des expériences de simulation de ruissellement *in situ* (d'après Souiller *et al.*, 2002).

**Table 2** - Average infiltration flow and pesticide distribution measured during *in situ* run-off simulations (after Souiller *et al.*, 2002).

Expérience	Débits moyens (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )			Diflufenicanil (% flux d'entrée)			Isoproturon (% flux d'entrée)		
	Entrée	Sortie	Infiltré	Infiltré	Retenu en surface	Infiltré	Non retenu	Retenu en surface	Infiltré
<b>Été 1999</b>									
Exp A	0,38	0,027	0,35	2 %	5 %	93 %	n.d.	n.d.	n.d.
Exp B	0,55	0,18	0,37	8 %	24 %	68 %	28 %	4 %	68 %
<b>Hiver 2000</b>									
Exp C	0,36	0,11	0,25	16 %	14 %	70 %	21 %	9 %	70 %
Exp D	0,55	0,25	0,30	39 %	6 %	55 %	39 %	5 %	55 %

cules à la surface de la bande herbeuse est très variable en fonction des propriétés physico-chimiques des molécules. Les produits à faible  $K_{oc}$  comme l'atrazine ou l'isoproturon sont très peu retenus à la surface du dispositif (tableau 2). Au contraire, pour des pesticides ayant un fort pouvoir d'adsorption comme le diflufenicanil, les concentrations dans le ruissellement sont réduites de l'ordre de 70 % y compris au cours d'expérimentations utilisant de forts débits de ruissellement (Souiller *et al.*, 2002).

Des questions restent posées sur le devenir exact du flux polluant qui s'infiltré et concernent majoritairement des produits faiblement retenus à la surface du sol. Différentes situations pédologiques et hydrologiques à risques peuvent se présenter pour des sols à capacité d'infiltration rapide via des écoulements préférentiels. Des résultats récents (Delphin et Chapot, 2001) montrent lors d'un suivi de l'infiltration sous bande enherbée l'existence de transferts préférentiels d'atrazine et de déséthylatrazine en conditions naturelles.

## Mobilité verticale dans les horizons superficiels

Des premières études de la mobilité de l'isoproturon en colonnes de sol non remanié apportent des éléments complémentaires (Benoit *et al.*, 2000a; Raharinosy, 2001). Dans des conditions proches de la saturation du sol, celles qui existent en conditions de ruissellement hivernal ou printanier sur un site comme la Jaillière, les résultats obtenus montrent l'existence de transfert rapide de l'isoproturon à travers les 15 premiers centimètres du sol. La comparaison des courbes d'élution du pesticide et d'un traceur non

réactif comme le bromure (figure 4a) montre un léger décalage des pics d'élution. Le retard de l'herbicide, par rapport au traceur, calculé à partir des bilans de récupération des solutés (figure 4b) permet d'estimer un coefficient de rétention  $K_d$  apparent\* de 1,3 (L.kg<sup>-1</sup>). Cette valeur est inférieure au  $K_d$  estimé en suspension avec le même sol (2,6 L.kg<sup>-1</sup>; Benoit *et al.*, 1999). Ces résultats peuvent être comparés avec ceux obtenus par Mersie *et al.*, (1999b) concernant l'atrazine, dont le  $K_{oc}$  est comparable à celui de l'isoproturon. Utilisant également des colonnes de sol, ces auteurs montrent que l'enherbement ne favorise pas forcément la rétention et peut accroître le transport préférentiel vertical. Des essais de traçage au Bleu Brillant dans des colonnes de sol enherbé suggèrent un rôle important des pores biologiques en particulier racinaires. Outre l'intérêt de visualiser les chemins de l'eau, ce traceur coloré offre l'avantage d'avoir des propriétés de rétention comparables à celles de molécules comme l'isoproturon (Flury et Flüher, 1995).

Les résultats sur colonnes non perturbées mettent également en évidence le rôle de l'accessibilité des sites de rétention par rapport aux voies d'écoulement de solutions infiltrées. Des observations en lame mince pour la bande enherbée montrent une abondance de matières organiques peu décomposées et leur grande accessibilité au niveau des premiers centimètres du sol (mat racinaire). Ces matières organiques particulières > 50 µm (MOP) constituent des surfaces potentielles pour la rétention des produits phytosanitaires présents dans le ruissellement. Ces MOP représentent plus de 30 % du carbone organique présent dans les deux premiers centimètres du sol et leur accessibilité présuppose une forte réactivité avec

\*

$$K_d [L/kg] = \frac{\text{Concentration de pesticide retenu par le sol (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Concentration pesticide en solution (mg l}^{-1}\text{)}}$$

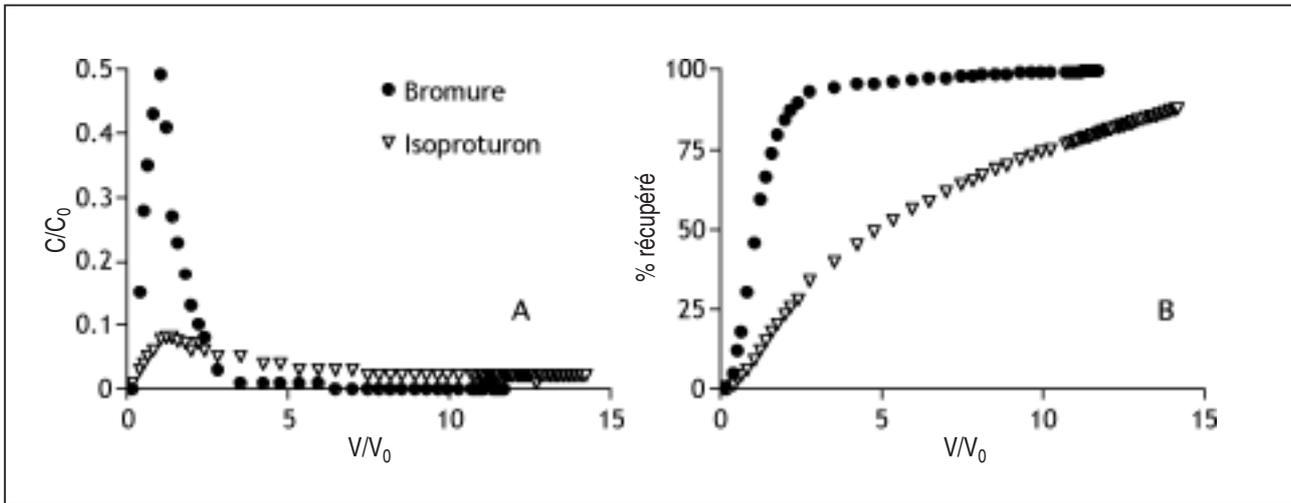
Si R est le coefficient de retard de l'isoproturon par rapport au bromure,  $K_d [l/kg] = \frac{(R-1)\theta}{\rho}$  avec  $\rho$  et  $\theta$  étant respectivement la masse volumique sèche et la teneur en eau volumique de la colonne.

**Figure 4** - Courbes d'élu­tion en conditions non saturées de bromure et d'isoproturon dans une colonne de sol enherbé (diamètre 5 cm par 15 cm de haut). Suction de -5 cm de hauteur d'eau en surface et en bas de colonne. (A).

Bilans de masse de l'élu­tion : les quantités de bromure et d'isoproturon lixiviées sont exprimées en pourcentage des quantités apportées sur la colonne (B). Dimension de colonnes

**Figure 4** - Elution curves in unsaturated conditions of non reactive tracer bromide and isoproturon in undisturbed soil cores (five 5 cm diameter by 15 cm height) from grassed strip soil at la Jaillière. Pressure head (-5 cm) at the top and bottom of soil columns. (A).

Mass balances : the amounts of leached bromide and isoproturon are expressed as percentage of total amounts applied during the pulse (B).



les produits phytosanitaires lors de circulation à travers le mat racinaire vers les horizons inférieurs (Benoit *et al.*, 2000a et b).

### Capacité de rétention des sols enherbés et rôle des matières organiques

Les pesticides ont un potentiel de rétention accru dans les horizons de surface des sols enherbés. Les capacités de rétention décroissent avec la profondeur selon un gradient de matières organiques très marqué dans les 30 premiers centimètres. L'apport de matières organiques non humifiées suite à l'implantation de dispositifs enherbés est observé même pour des dispositifs récents (3 ans d'implantation). Ce gradient naturel de différents états de matières organiques induit des différences de comportement dans la rétention et sa réversibilité entre la surface du sol (mat racinaire) et les horizons sous-jacents (Benoit *et al.*, 1999; Madrigal *et al.*, 2002). La comparaison des comportements de rétention de l'isoproturon et du diflufenicanil dans deux Brunisols et un Calcisol enherbés fait ressortir un facteur explicatif prépondérant : la teneur en matières organiques (Madrigal *et al.*, 2002).

L'étude des propriétés de rétention des différentes matières organiques isolées par fractionnement granulométrique montre que les MOP > 50  $\mu\text{m}$  ont des capacités de rétention particulièrement élevées vis-à-vis des produits phytosanitaires (Benoit *et al.*, 1999; Margoum *et al.*, 2001). La présence de certains constituants aromatiques (lignine) ou aliphatiques (cutines) expliquent les fortes

capacités d'adsorption des résidus végétaux peu décomposés observées pour des molécules organiques non ionisées et hydrophobes (Lickfeldt et Branham, 1995; Reddy *et al.*, 1997). Les cinétiques de rétention sur les MOP dans des systèmes maximisant leur accessibilité vis-à-vis des pesticides dissous dans l'eau sont rapides puisque la capacité de rétention est atteinte après quelques heures de contact.

Des différences importantes de comportement sont observées entre des molécules hydrophobes comme le diflufenicanil et une molécule plus soluble dans l'eau comme l'isoproturon (Madrigal *et al.*, 2002). Pour le diflufenicanil, les cinétiques de rétention sont plus rapides et les quantités adsorbées sur les différentes fractions organiques sont beaucoup plus élevées. La rétention est fortement réversible pour l'isoproturon. Elle est par contre très fortement irréversible pour le diflufenicanil (Madrigal *et al.*, 2002). Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus sur le terrain montrant une forte rétention de cette molécule à la surface des bandes enherbées (Souiller *et al.*, 2002). Si le risque de relargage après rétention dans les horizons superficiels des dispositifs enherbés semble minime pour le diflufenicanil, il est plus élevé pour l'isoproturon. L'étude de la désorption montre que l'isoproturon retenu par les horizons au-dessous de 30 cm est plus disponible, donc plus mobile par rapport à l'isoproturon retenu par les horizons superficiels, en particulier ceux des dispositifs enherbés.

Le temps de séjour d'un pesticide dans le sol est un facteur déter-

minant de la réversibilité de la rétention. Quel que soit le type de sol considéré, Madrigal *et al.*, (2002) observent une augmentation du coefficient de rétention  $K_d$  (isoproturon) avec le temps de contact. Cette augmentation de la rétention est beaucoup plus nette pour les horizons de surface 0-2 et 2-13 cm des sols enherbés que pour les horizons 30-60 cm. De telles variations de  $K_d$  ont été observées pour la molécule d'isoproturon dans d'autres sols (Gaillardon et Sabar, 1994; Cox et Walker, 1999) et traduisent une diminution de la disponibilité de l'herbicide au cours de son temps de séjour dans le sol. Ce phénomène est en partie expliqué par une cinétique de rétention lente, en partie contrôlée par les processus de diffusion, mais il est également dû à la diminution des concentrations d'herbicide en solution du sol suite à la dégradation en solution aqueuse (Cox et Walker, 1999).

## DÉGRADATION ET DEVENIR DES PRODUITS INTERCEPTÉS

Le pouvoir épurateur de ces dispositifs est associé à l'activité biologique intense reliée à l'implantation du couvert herbacé et au développement d'une dense rhizosphère. Cette activité biologique peut être responsable de l'augmentation des phénomènes de dégradation biologique des pesticides dans les horizons superficiels des sols enherbés (Hurto *et al.*, 1979; Benoit *et al.*, 1999).

C'est le cas notamment de l'isoproturon dont la minéralisation est particulièrement élevée dans les horizons superficiels des dispositifs enherbés. En conditions contrôlées d'incubation (humidité équivalente à la capacité au champ, température 18 °C), cette minéralisation peut atteindre jusqu'à 20 % de l'isoproturon appliqué après 30 jours. Une analyse de ces résultats indique qu'il y a une relation générale entre l'activité de la microflore totale et la minéralisation de l'isoproturon. Pour cet herbicide, ce type de relation a déjà été observé par d'autres auteurs (Lehr *et al.*, 1996; 2001). Pour les sols enherbés, ceci se traduit par un plus fort potentiel de minéralisation de l'isoproturon dans les premiers centimètres sous la surface. Ceci se traduit aussi par une diminution de la minéralisation de l'isoproturon avec la profondeur, de la même façon que décroît la minéralisation du carbone organique total (Benoit *et al.*, 1999).

Des résultats concernant l'identification des produits de dégradation intermédiaires mettent en évidence une dégradation rapide de l'isoproturon dans les couches superficielles des dispositifs tampon (*figure 5*). Cette dégradation est observée au travers de la diminution de la proportion d'isoproturon et l'apparition de métabolites en particulier le monodéméthyl-isoproturon.

Parallèlement à cette dégradation, la formation de résidus non extractibles, donc très peu disponibles, est particulièrement importante dans les horizons où la dégradation est la plus importante. Cette relation entre dégradation et formation de résidus non extractibles est relevée par différents auteurs pour l'isoproturon (Gaillardon et Sabar, 1994; Perrin-Ganier *et al.*, 1995; Lehr *et al.*, 1996; 2001). Une hypothèse forte est que les métabolites formés participent à la for-

mation de résidus non extractibles. En particulier, l'absence d'isopropylaniline après 2 semaines d'incubation dans les sols où la dégradation est la plus intense pourrait être expliquée par une rétention irréversible de ce métabolite au fur et à mesure qu'il est formé. Ce type de dérivé est très réactif vis-à-vis de la matière organique et peut former des liaisons covalentes irréversibles (Thorn *et al.*, 1996; Scheunert et Reuter, 2000).

L'augmentation de la dégradation de l'isoproturon dans les horizons superficiels des sols enherbés est constatée dans les différents types de sol, Calcisol et Brunisols. Cette potentialité accrue en surface et décroissant avec la profondeur est expliquée par l'augmentation de l'activité microbienne dans les horizons superficiels influencés directement par la végétation. Quel que soit le type de sol, l'enherbement entraîne une augmentation rapide de la proportion de matières organiques facilement décomposables qui stimule l'activité biologique. Pour l'isoproturon, cette dégradation modifie rapidement la disponibilité des résidus comme l'a montré la stimulation de la formation de résidus très peu disponibles liée à la dégradation observée dans les 2 Brunisols et dans le Calcisol enherbé (*figure 5*).

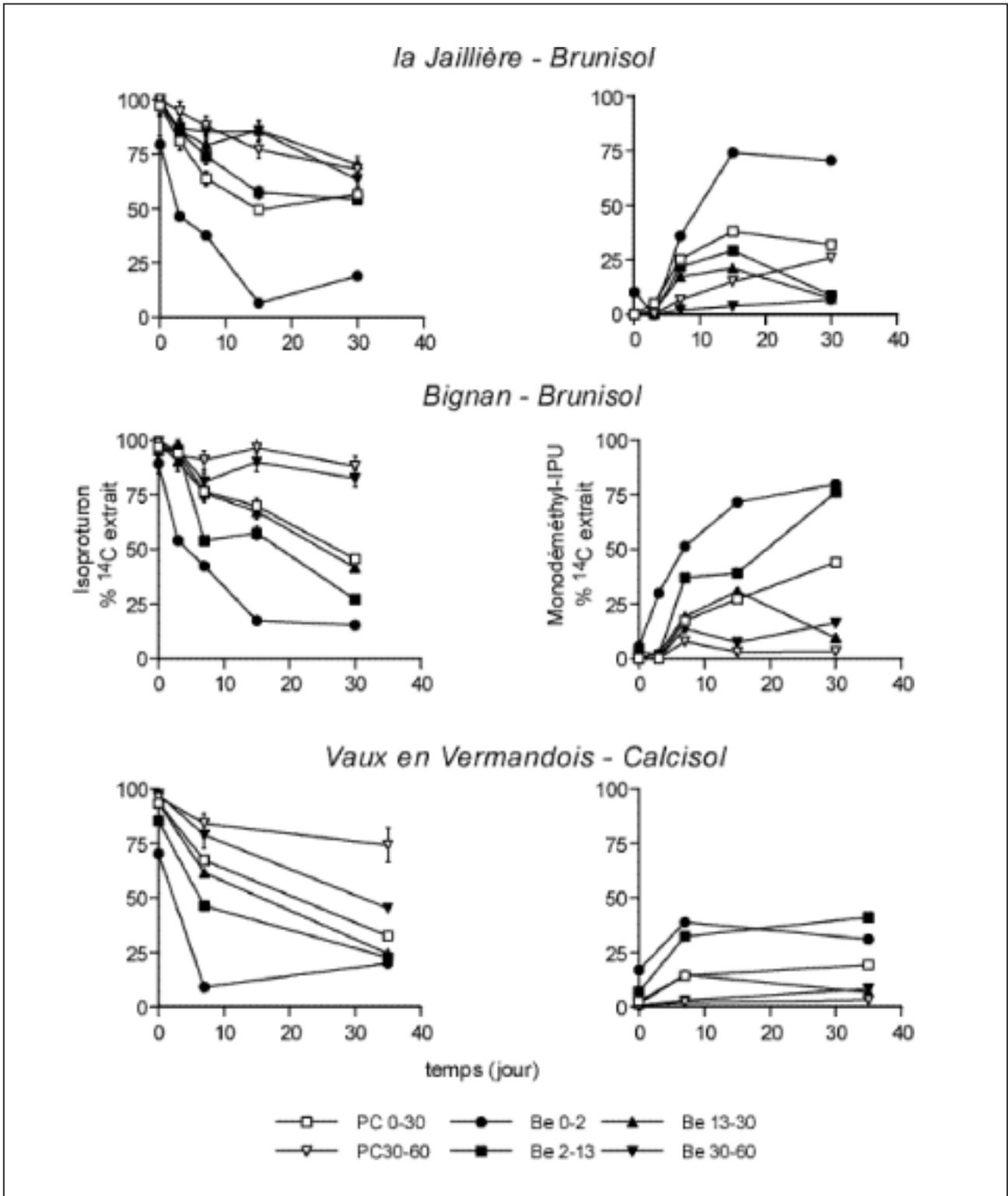
La prise en considération de la structure du sol dans l'étude de la dégradation aboutit à des conclusions très similaires sur le devenir de l'isoproturon. Ceci a été constaté par l'apparition rapide de résidus non extractibles selon des cinétiques comparables à celles observées dans des sols remaniés, incubés dans les mêmes conditions d'humidité et de température. Ces résultats sont à rapprocher de ceux d'études menées sur des colonnes de sol enherbé montrant qu'en l'absence de circulation d'eau, la dissipation aboutit à une dégradation partielle qui favorise une accumulation de résidus non extractibles dans les premiers centimètres du sol (Benoit *et al.*, 2000a). Ces résidus non extractibles correspondent à des formes très peu mobiles lors d'expérimentation de percolation survenant après incubation (*figure 6*). Par contre lorsque des solutions chargées en isoproturon peuvent s'infiltrer sans contact prolongé avec les horizons superficiels, une fraction importante de l'herbicide traverse rapidement ces horizons sans pouvoir subir des processus de transformation et de stabilisation (Benoit *et al.*, 2000a).

## CONCLUSION

La confrontation des expérimentations de simulation de ruissellement avec les études menées sur ces mêmes sites sur des dispositifs fixes (Réal, 1998) confirme que l'infiltration des pesticides présents initialement dans le ruissellement est quantitativement le phénomène majeur expliquant l'efficacité des dispositifs enherbés. L'étude du fonctionnement hydraulique de ces dispositifs indique pour le site de la Jaillière des capacités d'infiltration élevées dans les conditions expérimentales des simulations de ruissellement. Cet outil a fourni des jeux de données sur les flux d'eau et de produits phytosanitaires dans des conditions permettant de tester l'efficacité d'interception des dispositifs dans leurs limites : débits élevés, durées des épisodes de ruissellement prolongés. En outre ces expéri-

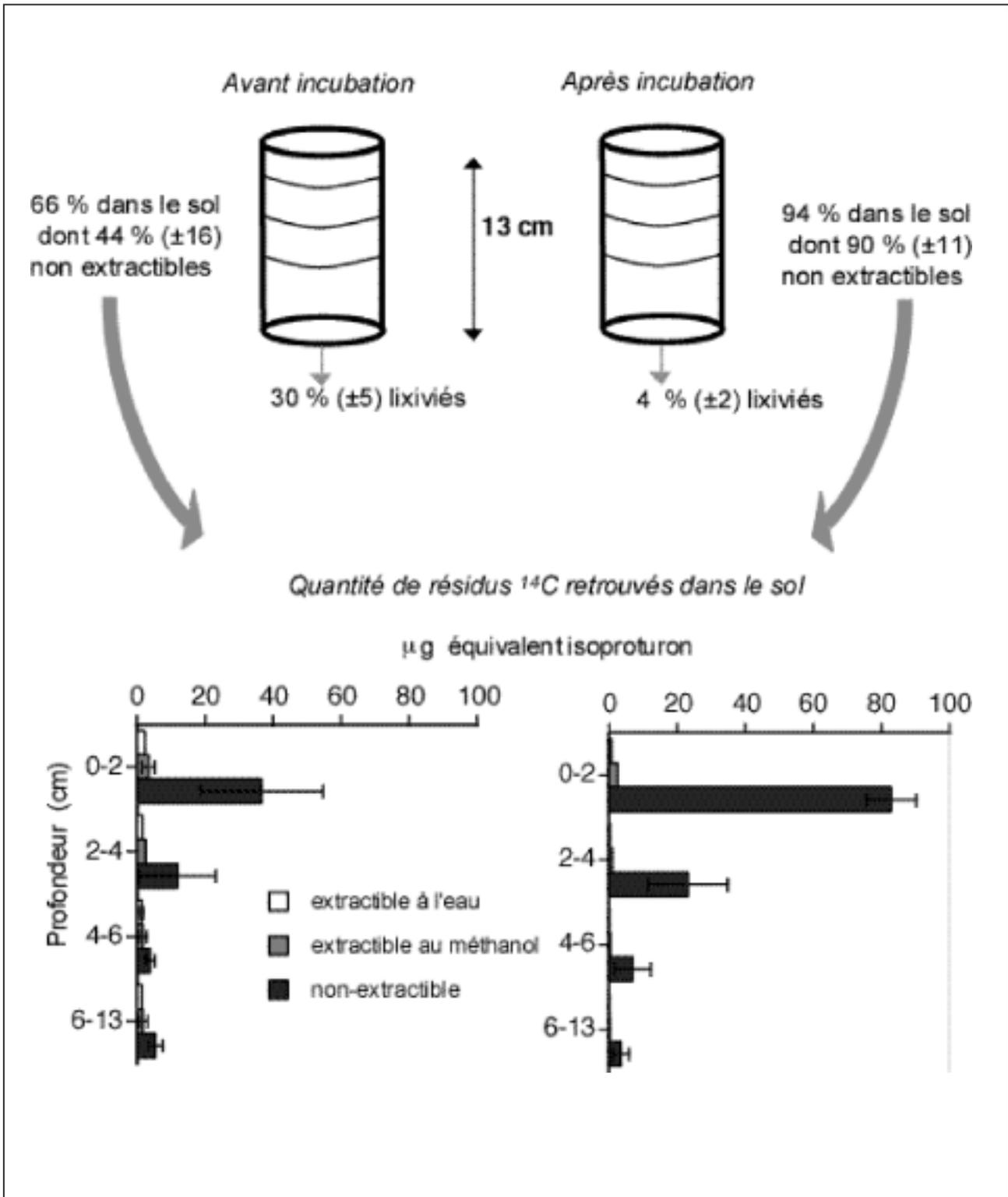
**Figure 5** - Proportions d'isoproturon et de monodéméthyl-isoproturon extractibles au cours d'incubation de différents horizons cultivés et enherbés.

**Figure 5** - Isoproturon and main metabolite monodéméthyl-isoproturon in soils extracts during incubation of soils sampled from cropped and grassed strip soils



**Figure 6** - Mobilité et disponibilité des résidus d'isoproturon dans des colonnes de sol non remanié prélevées sous dispositif enherbé (d'après Benoit et al., 2000a).

**Figure 6** - Mobility and availability of isoproturon residues in undisturbed soil columns from grassed buffer strips (after Benoit et al., 2000a).



mentations ont permis de mettre en évidence une variabilité saisonnière des capacités d'infiltration dépendant essentiellement de l'état hydrique du sol. Des conditions plus saturées en hiver limitent les quantités infiltrées et diminuent la dissipation au travers du dispositif.

Concernant le devenir exact du flux de produits phytosanitaires infiltrés, un potentiel de rétention accru est observé dans les horizons de surface des sols enherbés. Ce potentiel de rétention dépend cependant des propriétés physico-chimiques des pesticides présents dans le ruissellement (Souiller *et al.*, 2002; Madrigal *et al.*, 2002). Des produits faiblement retenus comme l'isoproturon conservent une mobilité potentielle importante puisqu'une large part est mobilisable par désorption. En surface du sol, l'abondance des matières organiques particulières et leur accessibilité est un facteur déterminant de la rétention pour les produits phytosanitaires présents dans le ruissellement. L'efficacité de la rétention dépend en premier lieu des vitesses de transfert à travers les sols enherbés et en particulier du temps de contact avec les horizons superficiels (Benoit *et al.*, 2000a). La possibilité d'écoulements préférentiels verticaux est suggérée par des premiers résultats d'infiltration au voisinage de la saturation. Des indicateurs du fonctionnement de la macroporosité du sol seraient particulièrement intéressants pour une estimation du risque de transfert rapide au travers des sols enherbés. Ce transfert peut être vertical, mais aussi latéral via des écoulements hypodermiques. Une perspective immédiate de ces travaux est de suivre *in situ* les concentrations dans la solution du sol suite à l'infiltration au travers de dispositifs enherbés.

Concernant la recherche d'indicateurs de la dissipation des produits retenus dans les sols des dispositifs enherbés, les résultats du programme montrent une augmentation de la dégradation de l'isoproturon dans les horizons superficiels. Ces potentialités de dégradation décroissent avec la profondeur. La stabilisation de résidus sous formes de résidus non extractibles, donc très peu disponibles, est particulièrement importante dans les horizons où la dégradation est la plus importante. Cette relation entre dégradation et formation de résidus non extractibles d'isoproturon peut être expliquée par l'apparition de métabolites dont la rétention est beaucoup plus intense et très irréversible. Ce point reste limité à la dégradation de l'isoproturon et à des molécules au comportement similaire, en particulier d'autres urées substituées, la dégradation d'autres micropolluants organiques n'ayant pas été abordée dans ce programme.

L'étude des processus de rétention et de dégradation des pesticides dans des sols enherbés correspondant à différentes situations pédologiques (Brunisols, Calcisols) montre que l'enherbement d'un sol crée des conditions favorables à la rétention et à la dégradation des pesticides interceptés et que l'établissement de ces conditions est directement lié aux modifications de la composition organique des horizons superficiels. Il conviendrait d'étendre ces conclusions à une plus grande variété de situations pédologiques, et de comparer également le fonctionnement hydrodynamique.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le programme GESSOL du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Les auteurs remercient Louis-Marie Bresson pour les observations sur lames minces, Christophe Labat et Pierre Vachier pour leur participation aux mesures de conductivité hydraulique et Véronique Etiévant pour son soutien technique au cours des études de dégradation en laboratoire. Les travaux effectués sur le site de la Jaillière font partie des recherches réalisées dans le cadre du GIS "Pratiques Culturelles et Qualité des Eaux", regroupant ARVALIS, l'INRA, le Cemagref, le CETIOM, l'ESA d'Angers, le GIRPA et l'ENSA Toulouse.

## BIBLIOGRAPHIE

- Asmussen L.E., White A.W., Hauser E.W., Sheridan J.M., 1977 - Reduction of 2,4-D load in surface runoff down a grassed waterway. *J. Environ. Qual.*, 6, 159-162.
- Arora, K., Mickelson S.K., Baker J.L., Tierney D.P., Peters C. J., 1996 - Herbicide retention by vegetative buffer strips from runoff under natural rainfall. *Trans. ASAE*, 39, 2155-2162.
- Baker J.L., Mickelson S.K., Hatfield J.L., Fawcett R.S., Hoffman D.W., Franti T.G., Tierney D.P., 1995 - Reducing herbicide runoff: role of best management practices. *British Crop Prot. Conf. - Weeds - BCPC Publications*, Farnham, 479-487.
- Benoit P., Barriuso E., Vidon P., Réal B., 1999 - Isoproturon sorption and degradation in a soil from grassed buffer strip. *J. Env. Qual.*, 28, 121-129.
- Benoit P., Barriuso E., Vidon P., Réal B., 2000a - Isoproturon movement and dissipation in undisturbed soil cores from a grassed buffer strip. *Agronomie*, 20, 297-307.
- Benoit P., Barriuso E., Bergheud V., Etiévant, V. 2000b - Binding capacities of different soil size fractions in the formation of bound residues of the herbicides atrazine and isoproturon. *Agronomie*, 20, 505-512.
- Bouma J., Hole F.D., 1971 - Soil structure and hydraulic conductivity of adjacent virgin and cultivated pedons at two sites: a Typic Argiudoll (silt loam) and a Typic Eutrochrept (clay). *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35, 316-319.
- Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates, les phosphates et les produits phytosanitaires provenant des activités agricoles (CORPEN), 1997 - Produits phytosanitaires et dispositifs enherbés. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 87 pp.
- Coquet Y., Boucher A., Labat C., Vachier P., Roger-Estrade J., 2000 - Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques: aspects théoriques et pratiques. *Etude et Gestion des Sols*, 7(1), 7-24.
- Cox L., Walker, A., 1999 - Studies of time-dependent sorption of linuron and isoproturon in soils. *Chemosphere*, 38, 2707-2718.
- Davenport, J.R., Thomas R.L., 1988 - Carbon partitioning and rhizodeposition in corn and bromegrass. *Can. J. Soil Sci.* 68: 693-701.
- Delphin J.E., Chapot J.Y., 2001 - Leaching of atrazine and deethylatrazine under vegetative filter strip. *Agronomie*, 21, 461-470.
- Dillaha T.A., Reneau R.B., Mostaghimi S., Lee D. 1989 - Vegetative filter strips for agricultural non point source pollution control. *Trans. ASAE*, 32, 513-519.
- Flury M., Flüher H., 1995 - Tracer characteristics of Brilliant Blue FCF. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 22-27.
- Gaillardon P., Sabar M., 1994 - Changes in the concentration of isoproturon and its degradation products in soil and soil solution during incubation at two temperatures. *Weed Res.*, 34, 243-250.

- Greacen E.L., 1958 - The soil structure profile under pasture. *Aust. J. Agric. Res.*, 9, 129-137.
- Gril J.J., Badel E., Patty L., Dutertre A., Mocoquet M., 1996 - Caractérisation et dimensionnement des dispositifs enherbés - Mise au point d'une méthode d'évaluation: La simulation de ruissellement avec utilisation d'un traceur coloré. Cemagref - ARVALIS, 24 p + annexes.
- Haynes, R.J., Francis, G.S., 1993 - Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *J. Soil Sci.*, 44, 665-675.
- Hurto K.A., A.J. Turgeon et M.A. Cole. 1979 - Degradation of benfenin and DCPA in thatch and soil from Kentucky Bluegrass (*Poa pratensis*) turf. *Weed Sci.*, 27: 154-157.
- Jastrow, J.D., Miller, R.M., Lussenhop, J. 1998 - Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biol. Biochem.* 30, 7, 905-916
- Lecomte V., 1999 - Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant. Processus, déterminisme et modélisation spatiale. Thèse de Doctorat de l'ENGREF. 212 p.
- Lehr, S., W. E. Gläbgen, H. Jr. Sandermann, F. Beese, and I. Scheunert., 1996 - Metabolism of isotoproturon in soils originating from different agricultural management systems and in culture of isolated soil bacteria. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 62: 231-243.
- Lehr, S., Del Pilar Castillo, M., Tostensson, L., Scheunert, I., 2001 - Degradation of isotoproturon in biobeds. *Biol. Fert. Soils.*, 33, 535-540.
- Lennartz B., Louchart X., Voltz M., Andrieux P., 1997 - Diuron and simazine losses to runoff water in mediterranean vineyards as related to agricultural practices. *J. Env. Qual.*, 26, 1493-1502.
- Lickfeldt D.W., Branham B.E., 1995 - Sorption of nonionic organic compounds by Kentucky bluegrass leaves and thatch. *J. Environ. Qual.*, 24: 980-985.
- Louchart X., Voltz M., Andrieux P., Moussa R., 2001 - Herbicide transport to surface waters at field and watershed scales in a Mediterranean vineyard area. *J. Env. Qual.*, 30, 982-991.
- Madrigal I., Benoit P., Barriuso E., Etiévant V., Souiller C., Réal B., Dutertre A., 2002 - Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires Deuxième partie: Propriétés de rétention de deux herbicides, l'isoproturon et le diflufenicanil dans différents sols de bandes enherbées, *Etude et Gestion des Sols*, 9 (4), 287-302.
- Margoum C., Gouy V., Madrigal I., Benoit P., Smith J., Johnson A., Williams R.J. 2001 - Sorption properties of isotoproturon and diflufenicanil on ditch bed sediments and organic matter rich materials from ditches, grassed strip and forest soils. Symposium Pesticide Behaviour in Soils and Water - British Crop Prot. Conf. - Weeds - BCPC Symposium Proceedings, 183-188.
- Merckx R., Den Hartog A., Van Veen J.A., 1985 - Turnover of root-derived material and related biomass formation in soils of different texture. *Soil Biol. Biochem.* 17: 565-569.
- Mersie W., Seybold C.A., Mc Namee C., Huang, J., 1999a - Effectiveness of switch grass filter strips in removing dissolved atrazine and metolachlor from runoff. *J. Env. Qual.*, 28, 816-821.
- Mersie W., Seybold C.A., Tsegaye T. 1999b - Movement, adsorption and mineralization of atrazine in two soils with and without switchgrass (*Panicum virgatum*) roots. *Eur. J. Soil Sci.*, 50, 343-349.
- Mudd P.J., Hance R.J., Wright S.J.L., 1983 - The persistence and metabolism of isotoproturon in soil, *Weed Res.*, 23, 239-246.
- Patty L., 1997 - Limitation du transfert par ruissellement vers les eaux superficielles de deux herbicides (isoproturon et diflufenicanil). Méthodologie analytique et étude de l'efficacité des bandes enherbées. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph-Fourier Grenoble. 217 pp.
- Patty L., Réal B., Gril J.J., 1997 - The use of grassed buffer strips to remove pesticides, nitrate and soluble phosphorus compounds from runoff water. *Pesticide Sci.*, 49, 243-251.
- Perrin-Ganier C., Schiavon M., Portal J.M., Babut M., 1995 - Degradation de l'isoproturon et disponibilité de ses résidus dans le sol, *Weed Res.*, 35, 257-263.
- Raharinosy S., 2001 - Modalités de transfert d'eau et d'isoproturon dans des colonnes de sols sous bandes enherbées: études sur des colonnes de sol non perturbé, Mémoire de DESS Sciences de l'Environnement, Univ. Louis Pasteur. INRA Grignon, 54p. + annexes.
- Réal B., Patty L., Masson E., 1997 - Bandes enherbées: Un frein au ruissellement des produits phytos. *Perspectives Agricoles*, 221, 40-43.
- Réal B., 1998 - Etude de l'efficacité des dispositifs enherbés. ARVALIS-Agence de l'EAU. Campagnes 1993-94, 1994-95, 1995-96. Septembre 1998.
- Reddy K.N., Locke M. A, Gaston L.A., 1997 - Tillage and cover crop effects on cyanazine adsorption and desorption kinetics. *Soil Sci.* 162: 501-509.
- Reynolds W.D., Elrick D.E., 1991 - Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 633-639.
- Scheunert, I., Reuter S., 2000 - Formation and release of residues of the <sup>14</sup>C-labelled herbicide isotoproturon and its metabolites bound in model polymers and in soil. *Environmental Pollution*, 108: 61-68.
- Souiller C., Coquet Y., Pot V., Benoit P., Réal B., Margoum C., Laillet B., Labat C., Vachier P., Dutertre A., 2001 - Dissipation des produits phytosanitaires à travers un dispositif enherbé: mise en évidence des processus mis en jeu par simulation de ruissellement et infiltrométrie. (Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires. Partie. 1). *Etude et Gestion des Sols*, 9 (4), 269-285.
- Schmitt T.J., Dosskey, M.G., Hoagland, K.D., 1999 - Filter strip performance and processes for different vegetation, widths, and contaminants. *J. Env. Qual.*, 28, 1479-1489.
- Thorn, K. A., Pettigrew P. J., Goldenberg W. S., 1996 - Covalent binding of aniline to humic substances .2. N-15 NMR studies of nucleophilic addition reactions. *Environmental Science & Technology* 30: 2764-2775.
- Tisdall J.M., Oades J.M., 1979 - Stabilization of soil aggregates by the root system of rye-grass, *Aust. J. Soil. Res.*, 17, 429-441.
- Webster, E.P., Shaw D.R., 1996 - Impact of vegetative filter strips on herbicide loss in runoff from soybean (*Glycine max*). *Weed Sci.*, 44, 662-671.
- Whitehead, D.C., Buchan H., Hartley R.D., 1979 - Composition and decomposition of roots of ryegrass and red clover. *Soil Biol. Biochem.* 11:619-628.



