

Enherbement des sols :
quels effets possibles
sur le devenir environnemental des pesticides ?

P. Benoit¹

1 : INRA, UMR Environnement et Grandes Cultures, INRA-AgroParisTech, BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon ;
benoit@grignon.inra.fr

Résumé

Avec l'objectif de réduire la pression polluante des pesticides et en particulier la contamination des eaux, des pratiques introduisant la prairie ou l'herbe dans des systèmes de cultures sont susceptibles de jouer un rôle non négligeable. Elles permettent d'abord de réduire les quantités de pesticides utilisées à l'hectare. Par ailleurs, la mise en place de surface en herbe permet de réduire les transferts hors des parcelles agricoles en retardant le déclenchement du ruissellement et en favorisant l'infiltration et la rétention des contaminants. Ce travail fait le point sur les effets du changement de couverture végétale sur le fonctionnement des sols et le devenir des pesticides. Les conséquences attendues de l'enherbement des sols sur le transfert des pesticides sont analogues à celles que l'on connaît dans le cas d'aménagements de types bandes enherbées en aval de parcelles agricoles. Cette pratique permet de réduire significativement les transferts vers les eaux de surface. Le risque pour les eaux souterraines peut également être réduit selon l'efficacité des processus de rétention et de biodégradation des pesticides qui interviennent principalement dans les horizons de surface. Cette efficacité dépendra en premier lieu des vitesses de transfert à travers les sols enherbés et en particulier du temps de contact avec les horizons superficiels lors de l'infiltration de l'eau dans le sol. D'un point de vue environnemental, des questions portant sur les conséquences à moyen terme sur le devenir des résidus stabilisés, sur l'évolution des fonctions de dégradation et sur le passage des pesticides dans la végétation herbacée sont encore relativement peu abordées.

Introduction

L'enherbement consiste à implanter une couverture végétale herbacée dans des parcelles supportant d'autres cultures pérennes (viticulture, arboriculture) ou dans des rotations associant prairies temporaires et cultures annuelles (contexte de polyculture élevage). Par extension, on peut inclure dans cette pratique l'implantation de dispositifs enherbés en bordure de parcelles cultivées.

Dans tous les cas, il s'agit de l'implantation de prairies sur des sols préalablement cultivés, mais le déterminisme de ces changements d'occupation des sols est foncièrement différent. Dans le cas d'aménagements de zones tampon enherbées, le choix est principalement motivé par des critères environnementaux liés à la lutte contre l'érosion et le ruissellement, et à la protection des eaux de surface vis-à-vis de pollutions diffuses (produits phytosanitaires mais aussi azote, phosphore). On cherche à limiter les transferts sans remettre en question les modes de production et sans nécessairement réduire l'usage des pesticides dans les systèmes de cultures.

L'enherbement de parcelles de vignes ou de cultures fruitières, comme la présence de prairies temporaires dans des rotations culturales longues, relève au contraire de décisions visant à modifier les itinéraires techniques, voire les systèmes de cultures. Ces décisions sont en premier lieu motivées par des raisons agronomiques (qualité des récoltes, durabilité de systèmes de production). Mais ces changements de pratiques peuvent également produire des effets positifs pour l'environnement. Au premier rang des effets bénéfiques, on trouve la diminution des quantités de pesticides utilisés à l'hectare en raison d'une surface à traiter réduite et de fréquences des traitements souvent diminuées. En lien avec les objectifs du plan ECOPHYTO 2018 (réduction de 50% de l'utilisation des pesticides), l'introduction de couverts herbacés dans différents systèmes de cultures peut être intégrée dans un raisonnement agronomique et constituer un moyen de réduire l'usage de produits phytosanitaires.

L'autre avantage des pratiques d'enherbement est la réduction des transferts de phytosanitaires par ruissellement et érosion hors des parcelles agricoles. A l'échelle d'une parcelle, l'enherbement permet de retarder le déclenchement du ruissellement en modifiant le partage entre ruissellement et infiltration. A l'échelle d'un versant, une parcelle enherbée pourra, en fonction de sa position topographique, constituer une zone de rupture des transferts au même titre que des aménagements interparcellaires de type dispositifs enherbés. L'efficacité de ces aménagements a d'abord été démontrée à l'échelle parcellaire (PATTY *et al.*, 1997 ; RÉAL, 1998) puis confirmée à l'échelle de petits bassins versants agricoles (CORPEN, 1997 ; LECOMTE, 1999 ; GRIL *et al.*, 2004 ; CORPEN, 2007). Cette efficacité dans la réduction des transferts sous-entend une interception des substances, 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 des produits interceptés (biodégradation, relargage, passage dans la plante). Dans cet article, nous proposons de faire le point sur l'état des connaissances actuelles sur le devenir de pesticides dans des sols enherbés.

1. Pesticides et enherbement

– Cas de la viticulture

L'implantation de couverture herbacée entre les rangs de vignes concernait en 2006 plus d'un tiers de l'ensemble du vignoble français (AGRESTE, 2009). La pratique d'enherbement permanent est particulièrement développée dans les vignobles d'Alsace, du Bordelais et de Charentes où respectivement 85, 80 et 61% des surfaces de vignes sont concernées, mais elle se développe également dans d'autres régions (Val de Loire, Bourgogne). Les viticulteurs qui pratiquent cette technique recherchent au départ à concurrencer la vigne pour l'eau et les nutriments minéraux afin d'améliorer le potentiel qualitatif de la vendange et les qualités organoleptiques des vins. Cette réduction de vigueur de la vigne entraîne également une amélioration de son état sanitaire en particulier en limitant le développement du Botrytis. Dans les vignobles méditerranéens plus exposés à la sécheresse et où le Botrytis est peu présent, l'enherbement est moins pratiqué (18 et 15% des surfaces viticoles en Languedoc et Provence respectivement). C'est donc surtout dans les vignobles septentrionaux que l'enherbement de la vigne aura des conséquences intéressantes pour réduire les

traitements fongicides pour lutter contre ce champignon pathogène. La mise en place de couverts herbacés pérennes entre les rangs de vigne contribue également à créer des niches écologiques pour des auxiliaires utiles dans la lutte biologique. La limitation de l'utilisation d'herbicides est un autre avantage environnemental et économique de la technique d'enherbement. Sur des parcelles de vignes enherbées dans l'interrang, le désherbage est alors réduit à des applications uniquement sur les seuls rangs de vigne, ce qui permet aux viticulteurs de diviser par deux ou trois les quantités utilisées à l'hectare.

L'enherbement entre les rangs de vignes assure une protection de la surface du sol vis-à-vis de la pluie, et permet ainsi de limiter le ruissellement, les phénomènes d'érosion et les transferts de produits phytosanitaires. Certaines pratiques consistent à maîtriser l'enherbement naturel en le maintenant en période hivernale et en le détruisant au printemps *via* un travail du sol. Une étude récente menée par l'INRA de Montpellier a permis de comparer différentes modalités de conduites en vignoble languedocien (Tableau 1). Dans cet essai mené à l'échelle parcellaire, les rangs de vigne ont été désherbés chimiquement par application d'un mélange de pré-levée (diuron, terbuthylazine puis amitrole) et de post-levée (glyphosate). Quatre modalités d'entretien de l'interrang ont été comparées : désherbage chimique en plein, enherbement naturel maîtrisé par une application de glyphosate, enherbement naturel maîtrisé par le travail du sol et engazonnement permanent avec un mélange de ray-grass et de fétuque (ANDRIEUX *et al.*, 2007). Au cours de trois années culturales successives, les flux de glyphosate et de son métabolite AMPA exportés par ruissellement (phase liquide et phase particulaire *i.e.* associée aux matières en suspension) sont suivis ainsi que les teneurs de résidus présents dans le sol des parcelles (0-2 et 2-5 cm). Les pertes annuelles totales en herbicide glyphosate sont significativement réduites en cas d'enherbement maîtrisé par le travail du sol ou en cas d'engazonnement permanent (ANDRIEUX *et al.*, 2007). Dans le même temps, les transferts d'AMPA vers les eaux de surface sont fortement réduits par rapport à des conduites utilisant soit un désherbage chimique sur l'ensemble de la parcelle, soit en maîtrisant l'enherbement *via* l'usage de glyphosate.

TABLEAU 1 – Comparaison du ruissellement, des pertes en terre et des pertes en glyphosate et AMPA pour quatre conduites d'entretien de la vigne en région Languedoc – Valeurs moyennes annuelles calculées sur 3 années culturales successives (d'après ANDRIEUX *et al.*, 2007).

Ruissellement (mm)	Pertes en terre (t/ha)	Pertes en glyphosate (g/ha)			Pertes en AMPA (g/ha)		
		Solution	Particulaire	Total	Solution	Particulaire	Total
Désherbage chimique en plein							
219	9,4	30	13,8	43,8	7,7	4,4	12,1
Enherbement naturel maîtrisé avec glyphosate							
140	3,9	23,8	8,1	31,9	4,8	1,7	6,5
Enherbement naturel maîtrisé par travail du sol							
79	1,3	3,1	0,4	3,5	0,4	0,1	0,5
Engazonnement permanent							
104	1,5	1,9	0,4	2,3	0,7	0,2	0,9

– Cas des prairies temporaires en rotation de grandes cultures

L'introduction de prairies dans des rotations céréalières permet d'allonger le cycle des rotations et à ce titre de réduire la pression parasitaire. Une telle pratique provoque une augmentation des entrées de carbone organique dans des sols cultivés et peut avoir des impacts importants sur le renouvellement quantitatif et qualitatif des ressources en eau, la séquestration de C vers les horizons profonds *via* le transfert de matière organique dissoute. De tels changements peuvent potentiellement modifier la mobilisation/immobilisation des pesticides utilisés en période de culture. Cette problématique est abordée par des recherches menées actuellement à l'INRA de Lusignan, dans le cadre de l'ORE ACBB (Observatoire de recherche en environnement, Agroécosystème, Cycles

Biogéochimiques et Biodiversité). Dans cet ORE sont introduits des cycles de 3 ou 6 ans de prairies temporaires dans des systèmes céréaliers classiques (maïs - blé - orge). La démarche est de considérer les perturbations des trajectoires de variables d'état intéressant la mobilité et la persistance des pesticides (réactivité des constituants organiques influençant la rétention des pesticides, expression des fonctions de dégradation des pesticides, propriétés physiques liées à la structure des sols) et d'évaluer les flux de ces substances associés aux variations d'état pour faire une évaluation des impacts environnementaux. Deux types de perturbation sont considérés : i) l'effet de l'introduction d'une prairie sur la dégradation, la stabilisation et la lixiviation potentielle des résidus des pesticides appliqués sur la culture précédente ; et ii) les conséquences du retournement de la prairie sur le devenir des pesticides utilisés sur la culture suivante.

Concernant le premier point, des premiers résultats de suivi dans les eaux de lixiviation recueillies à 1,20 m de profondeur ont été obtenus de 2007 à 2009 sur le dispositif de Lusignan. Sur les produits recherchés et récemment utilisés sur les trois cultures (maïs, blé, orge), on observe une quasi-absence de résidus de pesticides les deux premières années après reconversion en prairies (Tableau 2). La seule exception concerne des résidus d'atrazine qui contribuent à un niveau de contamination à des niveaux de concentrations peu variables dans le temps et relativement bas (bruit de fond en hydroxyatrazine autour de 0,05 µg/l). Bien que l'atrazine ne soit plus employée sur le site depuis 2003, la remobilisation de ce dérivé est observée sous prairie comme sous cultures.

TABLEAU 2 – Concentrations (minimum et maximum, en µg/l) **pour différents pesticides recherchés dans la solution du sol à 1,20 m de profondeur sous cultures annuelles et sous prairies temporaires, années 1 et 2 après installation d'un mélange fétuque - dactyle** (Données ORE ACBB Lusignan, collaboration A. CHABBI, X. CHARRIER, UEFE INRA Lusignan).

Substance	Rotation : Maïs - Blé - Orge			Cycle Culture - Prairie temporaire (N et fauche)	
	2006-2007 (orge)	2007-2008 (maïs)	2008-2009* (blé)	2007-2008 (prairie)	2008-2009 (prairie)
Isoproturon	[0,03-20]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
MD-Isoproturon	[0,05-0,18]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
DD-Isoproturon	[0,05-0,07]	0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Diflufenican	< 0,05	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Alachlor	n.r.	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Acetochlore	n.r.	[0,06-15,0]	[0,1-0,2]	< 0,03	< 0,03
Imidaclopride	n.r.	< 0,03	n.r.	< 0,03	n.r.
Atrazine	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
OH-Atrazine	[0,05-0,12]	[0,03-0,09]	[0,04-0,06]	[0,03-0,06]	[0,02-0,07]

n.r. Non recherché ; * eaux collectées en début d'hiver avant application d'herbicides sur blé (isoproturon)

Ces premiers résultats suggèrent que l'introduction de prairies (ici d'un mélange de graminées) provoque une diminution de la mobilité des résidus de pesticides utilisés les années précédentes. Ceci peut être dû à l'augmentation de la rétention des pesticides, voire de leur dégradation comme cela a pu être montré dans des sols récemment enherbés, en liaison avec l'augmentation de la teneur en matière organique des sols. L'introduction d'un système herbacé modifie considérablement la nature et la quantité des matières organiques du sol avec des conséquences directes ou indirectes sur la rétention/stabilisation des pesticides, sur les activités microbiennes responsables de leurs cinétiques de dégradation et finalement sur les transferts par lixiviation (BENOIT *et al.*, 2003 ; VINCENT *et al.*, 2007). L'importance relative de ces processus dépend des conditions hydrodynamiques qui contrôleront *in fine* les temps de résidence des produits dans les horizons superficiels où les capacités de rétention et de dégradation sont les plus élevées. Il conviendra de vérifier lors du retournement et de la remise en culture des prairies s'il n'y aura pas une remise en circulation des produits préalablement immobilisés.

2. Modifications des propriétés du sol suite à l'enherbement : conséquences sur la dynamique des pesticides

– Propriétés physiques et fonctionnement hydrodynamique

La majorité des sols concernés par l'enherbement sont des sols qui ont été cultivés antérieurement et souvent 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, avec une augmentation concomitante de l'activité biologique (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 (TISDALL et OADES, 1979). 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 (exsudats racinaires, litières). Ceci favorise la formation de macropores et leur interconnexion. Ces modifications de structure peuvent être observées en lames minces de sol en comparant des échantillons prélevés sous culture et sous sol enherbé. Des mesures de masses volumiques apparentes confirment les modifications importantes de la porosité du sol en surface suite à l'enherbement (BENOIT *et al.*, 2003). 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.

Le comportement hydrodynamique des sols enherbés peut être précisé au moyen d'expérimentations de simulation de ruissellement en plein champ à l'aide de traceurs (bromures, traceurs colorés et certains produits phytosanitaires ; PATTY *et al.*, 1997 ; SOUILLER *et al.*, 2002 ; LACAS, 2005). 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). Elles permettent aussi de diagnostiquer des circulations hypodermiques et donc des risques de conditions favorables aux transferts directs de polluants sous les sols enherbés. Elles permettent en outre de préciser la part des produits phytosanitaires qui s'est infiltrée et ceux qui ont été retenus à la surface (LACAS, 2005). 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 estivales et hivernales (Tableau 3).

TABLEAU 3 – Débits moyens infiltrés et répartition du flux de produits phytosanitaires lors des expériences de simulation de ruissellement *in situ* sur les bandes enherbées de La Jaillière (n.d. non déterminé) (SOUILLER *et al.*, 2002).

Expérience	Débits moyens (mm/h)			Diflufénicanil (% flux d'entrée)			Isoproturon (% flux d'entrée)		
	Entrée	Sortie	Infiltré	Non retenu	Retenu en surface	Infiltré	Non retenu	Retenu en surface	Infiltré
Eté 1999									
Exp A	127	9	117	2%	5%	93%	n.d.	n.d.	n.d.
Exp B	183	60	123	8%	24%	68%	28%	4%	68%
Hiver 2000									
Exp C	120	37	83	16%	14%	70%	21%	9%	70%
Exp D	183	83	100	39%	6%	55%	39%	5%	55%

Une analyse détaillée de la littérature disponible met en évidence que la capacité d'infiltration de dispositifs enherbés est un paramètre très variable (LACAS *et al.*, 2005). La capacité d'infiltration va dépendre de la surface de la zone d'infiltration, des conditions d'humidité du sol, de la charge créée par la lame ruisselante et des propriétés hydrodynamiques du sol enherbé (LACAS *et al.*, 2005). Des mesures de conductivités hydrauliques réalisées sur les dispositifs enherbés de La Jaillière ont montré que l'horizon de surface de la bande enherbée correspondant au mat racinaire de la prairie avait 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 a été mise en relation avec une plus faible porosité. 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. 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.

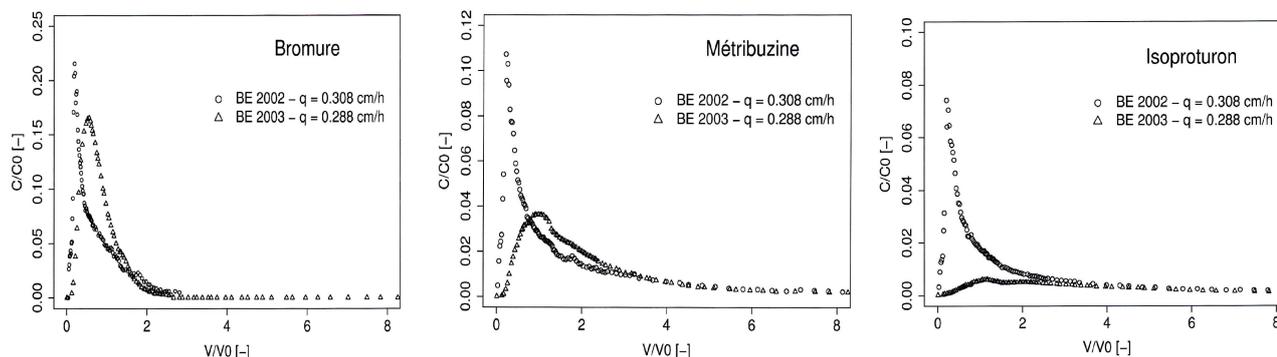
- Rétention des pesticides à la surface et dans les sols enherbés

Les résultats obtenus par simulation de ruissellement 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.*, 1999 ; KRUTZ *et al.*, 2005). La capacité de rétention des molécules 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. Au contraire, pour des pesticides ayant un fort pouvoir d'adsorption comme le diflufénicanil, 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 infiltré. Différentes situations pédologiques et hydrologiques à risques peuvent se présenter pour des sols à capacité d'infiltration rapide *via* des écoulements préférentiels. Les travaux réalisés par le Cemagref de Lyon sur le site de la Morcille (contexte viticole du Beaujolais, prairie située en aval d'une parcelle viticole) ont permis d'évaluer des bilans en mesurant la part du flux de diuron susceptible de percoler sous la zone racinaire de la zone enherbée au moyen de lysimètres installés à - 50 cm de profondeur (LACAS, 2005). A l'exception de cas extrêmes observés en simulation de ruissellement (fort débit imposé proche de 370 mm/h et durée totale proche de 3 h) où près de 25% du flux entrant ressort sous la zone racinaire, les résultats enregistrés sur ce dispositif montrent que le diuron infiltré reste majoritairement retenu dans la zone racinaire (4% du flux percole pour un événement naturel). Ces conclusions suggèrent que la percolation des flux de pesticides à travers les horizons racinaires est rendue possible par la contribution de la macroporosité caractérisée par des vitesses de transport élevées et peu favorables à la rétention par le sol. Ces résultats rejoignent d'autres travaux ayant montré l'existence de transferts préférentiels de certaines molécules comme l'atrazine dans des sols enherbés en conditions naturelles (DELPHIN et CHAPOT, 2001).

Des études de la mobilité de pesticides en colonnes de sol non remanié apportent des éléments complémentaires à cette question (BENOIT *et al.*, 2000 ; POT *et al.*, 2005 ; VINCENT *et al.*, 2007). Dans des conditions proches de la saturation du sol, celles qui existent en conditions de ruissellement hivernal ou printanier, les résultats obtenus montrent l'existence de transferts rapides à travers les 15-30 premiers centimètres du sol (Figure 1). Ces transferts rapides sont plus ou moins importants selon la saison de prélèvement, illustrant à nouveau la variabilité saisonnière de l'infiltration dans les sols enherbés. L'hétérogénéité du transport, déduite des courbes d'éluion d'un traceur non réactif comme le bromure est dépendante des conditions de flux et du niveau de saturation de la porosité (POT *et al.*, 2005). L'utilisation de modèles de transport de solutés, prenant en compte des domaines à perméabilité/porosité multiples, permet de décrire les différentes courbes d'éluion obtenues et d'estimer des paramètres de rétention et de dégradation. Les coefficients de rétention obtenus par inversion montrent une moindre rétention des herbicides pour les vitesses d'écoulement les plus élevées (POT *et al.*, 2005).

FIGURE 1 – Courbes d'élution de bromure, de metribuzine et d'isoproturon dans deux colonnes de sol enherbé. Colonnes prélevées (diamètre 14 cm) dans l'horizon 0-30 cm en juin 2002 et mars 2003, sur le site de La Jaillière (44).



De tels résultats suggèrent que l'accessibilité des sites de rétention par rapport aux voies d'écoulement de solutions infiltrées est un paramètre clef. Des observations en lame mince du sol enherbé 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 les produits phytosanitaires lors de leur circulation à travers le mat racinaire vers les horizons inférieurs (BENOIT *et al.*, 2003). Les capacités de rétention sont maximales dans les premiers centimètres sous la surface et 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 prairies à base de graminées (ray-grass, fétuque) est observé même pour des enherbements récents (3 ans). 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 lorsqu'on l'étudie dans des expérimentations en batch (MADRIGAL *et al.*, 2002 ; BENOIT *et al.*, 2008). La présence de certains constituants aromatiques (lignine) ou aliphatiques (cutines) explique les fortes capacités d'adsorption des résidus végétaux peu décomposés pour des pesticides hydrophobes (LICKFELDT et BRANHAM, 1995).

Des différences importantes de comportement sont observées entre des molécules hydrophobes comme le diflufénicanil et une molécule plus soluble dans l'eau comme l'isoproturon (MADRIGAL *et al.*, 2002). Pour le diflufénicanil, 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 comme pour le diuron (LACAS, 2005). Elle est en revanche très fortement irréversible pour le diflufénicanil (BENOIT *et al.*, 2008). 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 (SOULLIER *et al.*, 2002). Si le risque de relargage après rétention dans les horizons superficiels des dispositifs enherbés semble minime pour des molécules hydrophobes, il est plus élevé pour des composés modérément solubles dans l'eau, comme l'isoproturon ou le diuron par exemple.

– Dégradation et devenir des pesticides à moyen terme

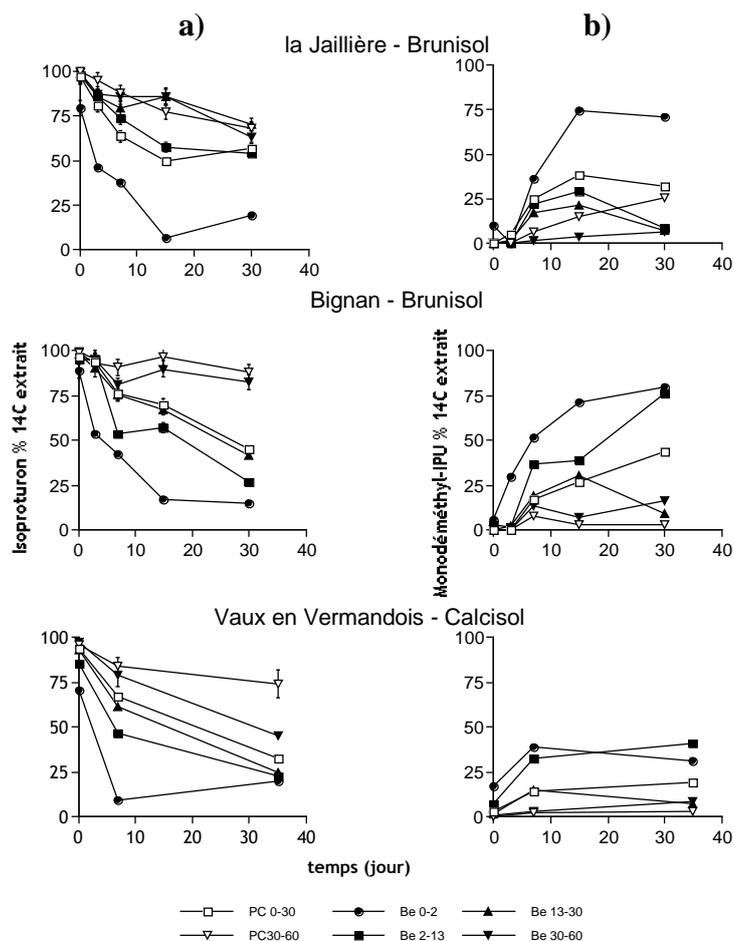
Le pouvoir épurateur des sols enherbés est associé à l'activité biologique intense liée à l'implantation du couvert herbacé et au développement d'une dense rhizosphère. Cette activité biologique peut être responsable de l'augmentation des phénomènes de dégradation biologique des pesticides dans les horizons superficiels de sols enherbés (BENOIT *et al.*, 1999, 2000 ; MERSIE *et al.*, 1999 ; KRUTZ *et al.*, 2005). Des comparaisons entre bandes enherbées et parcelles adjacentes ont montré une augmentation de la dégradation de l'isoproturon dans les horizons superficiels des sols

enherbés dans différents types de sol, calcisols et brunisols (BENOIT *et al.*, 2003) Cette potentialité de dégradation 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. Une augmentation de la minéralisation de composés comme l'atrazine a été reportée dans des sols rhizosphériques de différentes plantes alors qu'aucun effet de la rhizosphère n'a pu être observé pour d'autres produits (ANDERSON et COATS, 1995).

Pour des molécules comme l'isoproturon, la dégradation modifie rapidement la disponibilité des résidus comme l'a montré la stimulation de la formation de résidus très peu disponibles. 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 2). Cette dégradation est observée au travers de la diminution de la proportion d'isoproturon et de l'apparition de métabolites, en particulier le monodéméthyl-isoproturon. Parallèlement à la dégradation de l'isoproturon, la formation de résidus non extractibles, très peu disponibles, est particulièrement importante dans les horizons où la dégradation est élevée. Cette relation entre dégradation et formation de résidus non extractibles est relevée par différents auteurs pour l'isoproturon (PERRIN-GANIER *et al.*, 1995 ; SCHEUNERT *et al.*, 2000).

Il existe actuellement peu de données disponibles sur le passage vers les plantes de produits initialement retenus à la surface de sols enherbés, mais des travaux consacrés à la phytoremédiation de sols contaminés ont montré que certains pesticides comme la trifluraline et le lindane pouvaient être prélevés par des espèces comme le ray-grass (LI *et al.*, 2002).

FIGURE 2 – Proportions a) d'isoproturon et b) de monodéméthyl-isoproturon retrouvés dans différents horizons cultivés et enherbés (d'après BENOIT *et al.*, 2003).



Conclusion

Introduire l'enherbement dans les systèmes de cultures constitue un moyen pour les rendre moins dépendants des pesticides. C'est typiquement le cas de situations où l'enherbement et la gestion qui en découle font partie intégrante des itinéraires techniques (viticulture, arboriculture) ou de rotations culturales (céréaliculture, polyculture). En modifiant la structure et l'organisation spatiale et temporelle des couverts végétaux, cette pratique crée des conditions moins favorables aux bioagresseurs et permet de réduire les risques sanitaires. Elle permet également de maintenir des niches pour des auxiliaires qui limitent le développement de ravageurs. En arboriculture et viticulture, l'enherbement permet la suppression du désherbage chimique des interrangs et suppose un entretien de l'enherbement spontané ou implanté. Dans le cas de prairies dans des rotations céréalières, les traitements pesticides sont en général réduits. Dans ces deux cas, enherber durablement des parcelles cultivées relève du choix de modes de production et dépend de critères socio-économiques, agronomiques et environnementaux.

C'est au niveau de la réduction des transferts aux échelles supraparcellaires que des pratiques introduisant la prairie ou l'herbe dans des systèmes de cultures moins consommateurs de phytosanitaires et des aménagements de types bandes enherbées peuvent se rejoindre et contribuer à réduire la pression polluante sur les eaux de surface ou les eaux souterraines. Dans tous les cas, les conséquences attendues de ce changement de couverture végétale sur le fonctionnement des sols sont analogues. L'infiltration des pesticides présents initialement dans le ruissellement est quantitativement le phénomène majeur expliquant l'efficacité des surfaces enherbées dans la réduction des transferts vers les eaux de surface. L'étude du fonctionnement hydraulique de ces sols au moyen d'outils comme la simulation complète les suivis en conditions naturelles en fournissant des jeux de données sur les flux de produits phytosanitaires dans des conditions permettant de tester l'efficacité d'interception et leurs limites : débits élevés, durées prolongées des épisodes de ruissellement. La variabilité saisonnière des capacités d'infiltration dépend de l'état hydrique du sol. Des conditions plus saturées en hiver limitent les quantités infiltrées et diminuent la dissipation au travers du sol enherbé.

Des questions restent posées en ce qui concerne le devenir exact du flux de produits phytosanitaires infiltrés. L'enherbement d'un sol crée des conditions favorables à la rétention et à la dégradation des pesticides interceptés, et l'établissement de ces conditions est directement lié aux modifications de la composition organique des horizons superficiels. Le potentiel de dissipation dépend cependant des caractéristiques des pesticides présents dans le ruissellement. Des produits faiblement retenus conservent une mobilité potentielle importante, une large part pouvant être mobilisable par désorption. En cas de présence prolongée dans les horizons superficiels, la stabilisation de résidus sous formes de résidus non extractibles, donc très peu disponibles, peut être importante en liaison avec la biodégradation. 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. Des indicateurs du fonctionnement de la macroporosité du sol sont particulièrement intéressants pour une estimation du risque de transfert rapide au travers des sols enherbés.

D'un point de vue environnemental, la question qui reste posée concerne les conséquences à moyen et long terme sur le devenir des résidus stabilisés et sur l'évolution des fonctions de dégradation des pesticides avec les problèmes de compétition entre populations microbiennes spécialisées (dégradation métabolique des pesticides) et "génériques" (favorisées dans la rhizosphère). Ces questions sont fondamentales pour définir la persistance (présence et effets) des pesticides dans les sols, base pour l'évaluation des flux de pesticides à moyen terme suite à ce type de changements d'occupation du sol. De telles connaissances doivent servir à évaluer les performances d'aménagements mais aussi de la mise en œuvre de systèmes de cultures moins dépendants des pesticides pour la restauration de la qualité des eaux de surface ou des eaux souterraines à l'échelle de bassins versants agricoles.

Références bibliographiques

- AGRESTE (2009) "Pratiques culturales Viticulture en 2006", *Chiffres et Données, Série Agriculture, n°204, mars 2009*.
- ANDERSON T.A., COATS J.R. (1995) : "Screening rhizosphere soil samples for the ability to mineralize elevated concentrations of atrazine and metolachlor", *J. Environ. Sci. Health B*, 30, 473-484.
- ANDRIEUX P., LOUCHART X., NEGRO S., CAMBON B., VOTLZ M. (2007) : "Influence des pratiques d'entretien du sol viticole sur les transferts de glyphosate et d'AMPA par ruissellement. Trois années d'expérimentation", AFPP-Columa, Journées Internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. 7p.
- 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.
- 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. (2000) : "Isoproturon movement and dissipation in undisturbed soil cores from a grassed buffer strip". *Agronomie*, 20, 297-307.

- BENOIT P., SOULLER C., MADRIGAL I., POT V., RÉAL B., COQUET Y., MARGOUM C., LAILLET B., DUTERTRE A., GRIL J.J., BARRIUSO E. (2003) : "Fonctions environnementales des dispositifs enherbés en vue de la gestion et de la maîtrise des impacts d'origine agricole : cas des pesticides". *Etude et Gestion des Sols*, 10, 299-312.
- BENOIT P., MADRIGAL I., PRESTON C.M., CHENU C., BARRIUSO E. (2008) : "Sorption and desorption of non ionic herbicides onto particulate organic matter from surface soils under different land uses". *European Journal of Soil Science*, 59, 178-189.
- 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 p.
- CORPEN (2007) : "*Fonctions environnementales des zones tampons. Les bases scientifiques et techniques des fonctions de productions des eaux*, CORPEN, 176 p.
- DELPHIN J.E., CHAPOT J.Y. (2001) : "Leaching of atrazine and deethylatrazine under vegetative filter strip", *Agronomie*, 21, 461-470.
- GRIL J.J., LACAS J.G., E., RÉAL R., BENOIT P. (2004) : "Zones tampons et limitation du transfert des produits phytosanitaires : état actuel des connaissances et premières préconisations". Actes du colloque inter-régional "Pollution de l'eau et Dynamique de restauration de sa qualité en Milieu Rural", Vannes, Avril 2004, p 139.
- 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.
- KRUTZ L.J., SENSEMAN S.A., ZABLOTOWICZ R.M., MATOCHA M.A. (2005) : "Reducing herbicide runoff from agricultural fields with vegetative filter strips: a review", *Weed Science*, 53, 353-367.
- LACAS J-G. (2005) : "Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées. Thèse Doctorat Université Montpellier 2, 307p.
- LACAS J-G., VOLTZ M., GOUY V., CARLUER N., GRIL J-J. (2005) : "Using grassed strips to limit pesticide transfer to surface water: a review", *Agronomy for Sustainable Development*, 25, 253-266.
- 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.
- LI H, SHENG W., SHENG W., XU O. (2002) : "Uptake of trifluralin and lindane from water by ryegrass", *Chemosphere*, 48, 335-341.
- LICKFELDT D.W., BRANHAM B.E. (1995) : "Sorption of nonionic organic compounds by Kentucky bluegrass leaves and thatch", *J. Environ. Qual.*, 24:980-985.
- MADRIGAL I., BENOIT P., BARRIUSO E., ETIÉVANT V., SOULLER 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.
- MERSIE W., SEYBOLD C.A., MC NAMEE C., HUANG J. (1999) : "Effectiveness of switch grass filter strips in removing dissolved atrazine and metolachlor from runoff", *J. Env. Qual.*, 28, 816-821.
- 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 Science*, 49, 243-251.
- PERRIN-GANIER C., SCHIAVON M., PORTAL J.M., BABUT M. (1995) : "Dégradation de l'isoproturon et disponibilité de ses résidus dans le sol", *Weed Res.*, 35, 257-263.
- POT V., SIMUNEK J., BENOIT P., COQUET Y., YRA A., MARTINEZ-CONDON M.J. (2005) : "Impact of rainfall intensity on the transport of two herbicides in undisturbed grassed filter strip soil cores : evaluation of equilibrium and non equilibrium transport models", *Journal of Contaminant Hydrology*, 81, 63-68.
- RÉAL B. (1998) : "Etude de l'efficacité des dispositifs enherbés". ITCF-Agence de l'EAU. Campagnes 1993-94, 1994-95, 1995-96. Septembre 1998.
- SCHEUNERT I., REUTER S. (2000) : "Formation and release of residues of the 14C-labelled herbicide isoproturon and its metabolites bound in model polymers and in soil". *Environmental Pollution*, 108:61-68.
- SOULLER C., COQUET Y., POT V., BENOIT P., RÉAL B., MARGOUM C., LAILLET B., LABAT C., VACHIER P., DUTERTRE A. (2002) : "Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires. Première partie : Dissipation des produits phytosanitaires à travers un dispositif enherbé : mise en évidence des processus mis en jeu par simulation de ruissellement et infiltrométrie", *Etude et Gestion des Sols*, 9 (4), 269-285.
- 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.
- VINCENT A., BENOIT P., POT V., MADRIGAL I., DELGADO L., LABAT C. (2007) : "Impact of different land uses (cultivated plot, vegetative filter grass strip and woodland) on two herbicides migration in a silt loam soil: unsaturated soil column displacement studies", *European Journal of Soil Science*, 58, 320-328.