

Résultats de 10 campagnes d'expérimentation

Les transferts de produit les eaux varient selon les

Pour adapter les itinéraires de protection des cultures à la préservation de la qualité des eaux, mieux comprendre les mécanismes qui conduisent aux transferts de produits phytosanitaires hors des parcelles agricoles et adapter les itinéraires de protection des cultures, ARVALIS-Institut du végétal conduit depuis 1994 des expérimentations sur quatre sites très différents. Le sol et le climat influencent largement l'importance des transferts : les solutions seront donc régionales.



Lexique

♦ **La demi-vie** exprime, en nombre de jours, le temps qu'il faut pour que 50 % de la matière active arrivée sur le sol soit dégradée.

♦ **Koc** : le coefficient de partage carboné organique-eau, noté Koc, représente l'affinité d'une substance active à se fixer sur le complexe argilo-humique.

De la campagne 1993-94 à la campagne 2002-03, plus de 7000 recherches analytiques de matières actives ont été réalisées sur les parcelles de quatre stations expérimentales : La Jaillière (44), Parisot (81), Le Magneraud (17) et Geispitzen (68). Situés aux quatre coins de l'Hexagone, chacun de ces sites recèle des sols typiques pour leur région : limons hydromorphes, boubènes profondes, argilo-calcaires superficiels et limons battants.

Chaque parcelle a été isolée hydrauliquement et instrumentée pour étudier les transferts par drainage et/ou ruissellement. Au Magneraud, c'est la percolation qui est étudiée, à l'aide de cases lysimétriques.

Les détections ont concerné 27 herbicides (atrazine, DEA, DIA, isoproturon, diflufenicanil, aclonifen, alachlore, métolachlore, acétochlore, méta-zachlore, trifluraline, pendiméthaline, napropamide, linuron, bromoxynil, flufénacet, isoxaflutole, prosulfocar-

be, bentazone, diméthénamid, metsulfuron, sulfosulfuron, iodosulfuron, sulcotrione, mésotriane, nicosulfuron, prosulfuron), 8 fongicides (chlorothalonil, flusilazole, époxiconazole, azoxystrobine, krésoxim-méthyl, difénoconazole, prochloraze, cypro-

Matières actives non détectées - La Jaillière (tab.1)

Matières actives	Nombre de situations étudiées
tau-fluvalinate	14
prochloraze	4
isoxaflutole	6
deltaméthrine	2
bromoxynil	2
flufénacet	2
nicosulfuron	3
sulcotriane	4
mésotriane	3
méthiocarbe	4

Pour chaque tableau, une situation correspond à un mode de transfert (drainage ou ruissellement) pendant une campagne agricole.

dinil), 3 insecticides (lindane, tau-fluvalinate, deltaméthrine) et un molluscicide (méthiocarbe).

Certaines matières actives ont été étudiées sur une modalité (parcelle ou case lysimétrique) pendant une campagne et d'autres sur 2, 3, 4, 5 ou 6 parcelles sur des périodes allant de une campagne à neuf campagnes.

Les résultats obtenus permettent de classer les matières actives en fonction de leur capacité ou non à être transférées par ruissellement, par drainage ou par percolation au cours de leur campagne d'application, voire au cours de la campagne suivante et sur leur fréquence de transfert dans différents milieux.

Benoît Réal

b.real@arvalisinstitutduvegetal.fr

Alain Dutertre

a.dutertre@arvalisinstitutduvegetal.fr

Gilles Eschenbrenner

g.eschenbrenner@arvalisinstitutduvegetal.fr

Jean-Pierre Bonnifet

jp.bonnifet@arvalisinstitutduvegetal.fr

Didier Lasserre

d.lasserre@arvalisinstitutduvegetal.fr

ARVALIS – Institut du végétal

s phytosanitaires vers types de sol



L'étude réalisée à La Jaillière montre que 10 matières actives appliquées n'ont jamais été détectées. Pour 15 matières actives, la fréquence de détection est faible.

L'étude réalisée à la Jaillière (44) a porté à la fois sur le drainage et le ruissellement. Elle révèle qu'un certain nombre de substances actives n'ont pas été détectées et que d'autres présentent des risques de transfert faibles. Ainsi, trois groupes ont pu être constitués : les matières actives « non détectées ou très peu détectées », les matières actives « à transfert modéré » et les matières actives « à risque de transfert plus important ».

Matières actives à faibles transferts* - La Jaillière (tab. 2)						
Matières actives	Situations étudiées	Situations avec détections	CMP** drainage (µg/l)	Flux drainage (mg/ha)	CMP** ruissellement (µg/l)	Flux ruissellement (mg/ha)
chlorothalonil	22	4	0,02	58	1,08	457,42
krésoxym-méthyl	22	5	0,10	35	0,35	25
difénoconazole	4	2	0,26	416	0,00	2
métazachlore	2	2	0,00	2,60	0,28	2,74
alachlore	4	3	0,00	0	0,00	5
métolachlore	3	3	0,01	26	0,02	4
acétochlore	9	1	0,04	3,34	0,00	0
trifluraline	6	4	0,01	51	0,04	31
pendiméthaline	6	4	0,01	45	0,08	11
metsulfuron	4	3	0,13	36,03	0,03	2
diméthénamid	4	3	0,00	9,28	0,02	47,35
flupyrsulfuron	1	1	0,18	48,50		
linuron	2	2	0,04	62	0,04	5
napropamide	2	2	0,06	104	0,25	20

* les CMP et les flux indiqués correspondent aux transferts les plus importants - ** Concentration Moyenne Pondérée.

Matières actives non détectées ou très peu détectées

Le premier groupe comprend 10 matières actives (tableau 1). Appliquées pendant des périodes d'écoulement important en hiver ou avant de faibles écoulements de printemps, elles n'ont jamais été détectées dans les eaux. Pour les produits appliqués au printemps, les détections sur les échantillons de reprise des écoulements en automne se sont avérées négatives. Figurent également dans ce groupe (tableau 2), 15 matières actives dont la fréquence de détection est faible (cas du chlorothalonil et du krésoxim-méthyl) et dont les transferts sont souvent provoqués par des orages importants juste après leur application. D'autres,

comme la trifluraline, la pendiméthaline, la napropamide, le linuron ou le métazachlore sont appliqués longtemps avant que le sol ne soit saturé en eau. Ils ont le temps de s'adsorber au complexe argilo-humique, voire de se dégrader avant la période d'écoulement intense. Les sulfonyles présentent une certaine mobilité, mais leur dose d'utilisation très faible limite très fortement leur transfert. Enfin, les herbicides appliqués sur maïs subissent rarement des écoulements importants au printemps. Ils ne sont donc détectés qu'à très faible concentration lors de la reprise du drainage et du ruissellement en automne.

Matières actives à transfert modéré

Le groupe « matières actives à transfert modéré » regroupe

4 fongicides et 2 herbicides (tableau 3). Ces substances sont faiblement transférées au printemps à la suite d'orages importants, mais sont très souvent retrouvées dans les écoulements de l'automne qui suit leur application. Ces transferts peuvent être insignifiants, mais ils peuvent aussi provoquer des flux de l'ordre de la centaine de mg/ha, voire plus, et leur fréquence de détection est souvent élevée.

Par exemple, appliqué sur protéagineux de printemps, l'acilonifène est régulièrement détecté au printemps comme à l'automne. Par contre, appliqué sur maïs, il est rarement détecté et les transferts sont très faibles. Cette substance active est plutôt transférée par ruissellement, du fait de son Koc élevé.

En revanche, la bentazone, dont le Koc est plus faible, est plutôt transférée par drainage. Cette substance appliquée sur maïs est décelée dans les écoulements de l'automne qui suit son application.

Des matières actives à risque de transfert plus important

Les matières actives « à risque de transfert plus important » sont l'atrazine, l'isoproturon, le diflufenicanil, le prosulfocarbe et l'aclonifen quand ce dernier est appliqué en automne (tableau 4). Les comportements de ces herbicides sont cependant très différents les uns des autres et méritent d'être détaillés.

Bien que l'**atrazine** soit maintenant retirée du marché, il est intéressant de comprendre son mode de transfert. Appliquée sur maïs fin avril à début mai, période où les épisodes de drainage ou de ruissellement ne se produisent qu'à la suite d'orages aussi rares que violents, son transfert se produit essentiellement au cours de l'hiver qui suit son application : 91 à 99 % des transferts par drainage et plus de 90 % des transferts par ruissellement en parcelle non drainée.



Au Magneraud, la présence de cases lysimétriques a permis d'étudier les transferts par percolation.

Les transferts par ruissellement au printemps en parcelle drainée sont très dépendants de la violence des orages. Selon les campagnes, on observe plus de transferts au printemps qu'au cours de l'hiver suivant. Mais ces transferts restent faibles par rapport aux transferts par drainage : à l'exception d'une campagne à très faible transfert, les flux par ruissellement ont varié de 0 à 16 % du total des transferts. En milieu drainé, les solutions passent par le choix de substances peu mobile et à demi-vie* courte et la mise en place de zones tampons.

Les résultats obtenus au Parisot expriment des transferts d'atrazine par drainage beaucoup plus faibles. Ils varient de 184 à 505 mg/ha par campagne. A noter : dans une parcelle où les herbicides étaient appliqués sur le rang, avec binage de l'inter rang, les flux ont varié de 68 à 277 mg/ha. En non labour, ils ont varié de 107 à 497 mg/ha.

L'**isoproturon** a un comportement très différent : il est uniquement transféré au cours des 10 à 20 semaines qui suivent son application. Les concentrations du premier écoulement sont générale-

ment élevées et décroissent rapidement au cours des événements suivants.

Les flux d'isoproturon sont très variables selon les campagnes de mesure. Ils ont varié de 181 à 31829 mg/ha en drainage et de 31 à 10806 mg/ha en ruissellement. Cette variation des flux est essentiellement due au positionnement de cet herbicide par rapport aux écoulements et à la dose d'application. Les transferts sont importants quand l'isoproturon est appliqué au début ou pendant la saison de drainage ou juste avant ou pendant des épisodes de ruissellement. Quand il est appliqué une à quelques semaines avant la saison de drainage ou lors de périodes éloignées d'épisodes de ruissellement, les transferts sont faibles à très faibles. Ainsi, appliqué avant la saison de drainage, ses flux ont varié de 316 à 2005 mg/ha alors qu'ils ont fluctué de 6837 à 31829 mg/ha pour des applications réalisées pendant la période de drainage. Ce flux exceptionnel correspond à une application début février lors de la campagne très pluvieuse de 1999-2000.

Le choix de la période d'application et de la dose consti-

Matières actives à transferts modérés - La Jaillière (tab. 3)

Matières actives	Situations étudiées	Situations avec détections	CMP* drainage (µg/l)		Flux drainage (mg/ha)		CMP* ruissellement (µg/l)		Flux ruissellement (mg/ha)	
			mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi
flusilazole	41	32	0,00	0,12	0,01	270,18	0,00	0,99	2,55	327,29**
azoxystrobine	22	12	0,00	1,16	8	203	0,03	5,85	8	458
époxyzonazole	33	15	0,00	0,49	24	203,39	0,00	0,73	1	1194,52**
bentazone	8	6	0,05	0,21	32,37	415	0,01	0,05	0,56	24,75
aclonifen***	22	14	0,01	0,59	18,80	79,24	0,07	1,90	1,20	860,62

* Concentration Moyenne Pondérée - ** parcelle non drainée - *** appliqué au printemps.

Matières actives à risque de transfert plus important - La Jaillière (tab. 4)

Matières actives	Situations étudiées	Situations avec détections	CMP* drainage (µg/l)		Flux drainage (mg/ha)		CMP* ruissellement (µg/l)		Flux ruissellement (mg/ha)	
			mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi
atrazine	38	36	0,04	1,87	7,32	4684,12	0,04	3,50	3,28	3143,05
isoproturon	41	41	0,17	24,74	181,09	31829,29	0,23	26,21	31	10806
diflufenicanil	57	52	0,00	0,88	65,56	1969,88	0,00	1,95	0,08	1815,31
prosulfocarbe	12	12	0,01	4,09	17	10587	0,02	8,53	8	3571
aclonifen**	2	2	0,59		3247		0,61		140	

* Concentration Moyenne Pondérée - ** appliqué en automne.

tue une solution efficace pour limiter le transfert de ce type de produit. Quand ce n'est pas possible, il faut s'orienter vers la substitution de la matière active par une autre.

Appliqué quelques semaines avant la saison de drainage, à raison de 156 g/ha, les flux de **diflufénicanil** étaient compris entre 66 et 131 mg/ha. En périodes de drainage, la même dose a généré des flux de 405 à 1970 mg/ha. Dans le cas de ruissellements, on ne note pas de différence significative entre applications réalisées à des périodes proches ou éloignées des écoulements. Cela tient certainement à la demi-vie de cette matière active qui est beaucoup plus longue que celle de l'isoproturon. De plus, le diflufénicanil reste localisé à la surface du sol du fait de son Koc élevé. Les transferts de diflufénicanil par drainage sont beaucoup plus faibles que les transferts d'isoproturon.

Une des caractéristiques du diflufénicanil est qu'il ne présente pas réellement de pic de concentration. A la différence de l'isoproturon ou de l'atrazine, les concentrations de diflufénicanil mesurées lors des premiers écoulements sont généralement faibles, de l'ordre du µg/l. Sa demi-vie longue fait qu'on peut mesurer des concentrations en diflufénicanil au cours de toute une campagne, voire au cours de la campagne suivante, mais à des concentrations proches

ou plus faibles que celle du dixième de µg/l.

Appliquée dans une formulation antidicotylédones à la dose de 20 g/ha, cette substance n'a pas été détectée dans les écoulements intervenus six semaines après son application. L'emploi de ce type d'herbicide en substitution de spécialités commerciales anti-graminées limiterait les transferts. Pour les spécialités anti-graminées à base de diflufénicanil, des applications très précoces avant la saturation en eau des sols constituent aussi une solution à retenir, de même que la mise en place de bandes enherbées.

Les risques de transfert dans les groies moyennes sont plus faibles que dans les parcelles drainées de l'Ouest, notamment pour les applications d'hiver. Cela pourrait signifier qu'en sols argilo-calcaires, la principale cause de contamination des eaux pourrait être d'origine ponctuelle.

Le **prosulfocarbe** a été appliqué à la dose de 2000 g/ha en 1999 et de 800 g/ha en 2001. Il n'a provoqué que de très faibles flux en drainage (17 et 31 mg/ha) ainsi qu'en ruissellement (9 et 8 mg/ha), alors que les écoulements sont intervenus une et six semaines après la pulvérisation. En février 2001, pleine période de drainage et de ruissellement, la dose de 3200 g/ha a généré des flux de 3502 mg/ha en drainage et de 1840 mg/ha en ruissellement. Toujours en février 2001, la dose de 1600 g/ha a provoqué un transfert de 2510 mg/ha en drainage et de 733 mg/ha en ruissellement. En décembre 2002, une application début décembre (après avoir enregistré des lames d'eau de drainage de plus de 80 mm) a occasionné des transferts de 10587 mg/ha pour la dose de 3200 g/ha et de 4310 mg/ha pour la dose de 1600 g/ha. En ruissellement, la



En Alsace (Geispitzen), la pluviométrie importante en mai et juin provoque fréquemment du ruissellement.

dose élevée a entraîné un transfert de 3571 mg/ha et la dose réduite un transfert de 401 mg/ha.

Le comportement de cet herbicide confirme l'importance du positionnement du produit par rapport au statut hydrique du sol au moment de l'application. Il confirme également l'effet de la dose de matière active sur l'importance des transferts. Les solutions pour limiter ses transferts sont du même type que celle proposées pour l'isoproturon et le diflufénicanil.

L'**aclonifen** appliqué sur pois d'hiver en novembre a présenté des transferts non négligeables alors qu'en désherbage des pois de printemps, les transferts ont été plus faibles. Là encore, c'est la proximité des écoulements

qui reste la cause de l'importance des transferts.

Les transferts d'**alachlore** mesurés au Parisot ont été très faibles : de 25 à 161 mg/ha en labour, de 11 à 12 mg/ha en non labour et de 10 à 14 mg/ha en désherbage sur le rang.

Effet du milieu sur les transferts

Si les résultats obtenus à La Jaillièrre permettent de mieux comprendre les transferts de produits phytosanitaires, les résultats du Magneraud rappellent combien il faut se garder de les généraliser à des milieux très différents.

Les risques de transferts dans les sols argilo-calcaire (du type de ceux du Magneraud) semblent beaucoup plus faibles que dans les limons hydromorphes de l'Ouest. Le ty-



Les risques de transferts sont plus faibles dans les groies moyennes que dans les parcelles drainées de l'Ouest.



Les cinq matières actives classées à risque de transfert plus important ont des comportements très différents.

pe de sol et du climat influencent l'importance des transferts et plaide pour la recherche de solutions régionales.

Ainsi, au Magneraud, le cumul des lames d'eau post-application observées en 2001-02 et 2002-03 (de 100 mm et 180 mm) n'a pas provoqué de transfert de diflufenicanil (appliqué à la dose de 156 g/ha). Par contre, un transfert de 140 mg/ha d'isoproturon (appliqué à 1250 g/ha) a été relevé.

Pour l'iodosulfuron et le metsulfuron, aucun transfert n'a été relevé en sortie d'hiver, tout comme pour le nicosulfuron, le sulcotrione, l'aclonifen et l'isoxaflutole au début de l'été. Par contre, avec le métolachlore, deux flux ont été mesurés : l'un de 90 mg/ha (lame d'eau estivale post-application de 25 mm) et l'autre de 2 mg/ha (lame d'eau de 6 mm).

Ces herbicides ont ensuite été recherchés dans les premiers écoulements de l'automne suivant et n'ont pas été détectés. De même, une recherche systématique des fongicides de printemps appliqués sur blé (cyprodinil, époxiconazole, azoxystrobi-

ne, krésoxim-méthyl et prochloraze) n'a pas donné de résultats positifs.

Pourquoi si peu de transferts ? A un niveau de réserve utile comparable, la teneur en argile et en matières organiques des argilo-calcaires permet vraisemblablement des adsorptions très élevées. D'autre part, quand les produits phytosanitaires sont appliqués en automne et en hiver, des percolations ont déjà eu lieu. Le niveau de la réserve utile a été dépassé plusieurs fois et les argiles sont en situation de gonflement dans tout le profil : il n'y a plus de circuits préférentiels et la circulation verticale de l'eau s'apparente à celle des limons profonds.

Les données de Geispitzen (limons battants du Sundgau) confirment ceux de La Jaillièrre. Sur maïs, les ruissellements de 2001 (17,23 mm/ha) mesurés après l'application des herbicides ont provoqué un transfert de 185 mg/ha d'atrazine appliqué à 1000 g/ha et de 308 mg/ha d'alachlore appliqué à 2160 g/ha. En 2002, le ruissellement s'est avéré très variable selon les situations : de 4,69 mm (labour), à 3,64 mm (labour et bande en-

herbée de 12 m) et 2,10 mm (sans labour). En non labour, les flux par ruissellement ont été réduits de 80% par rapport à ceux de la parcelle labourée.

Dans la parcelle labourée, les flux mesurés en alachlore appliqué à 2160 g/ha ont été de 36,9 mg/ha. Ceux du bromoxynil appliqué à 300 g/ha ont été de 138,1 mg/ha et ceux du prosulfuron appliqué à 15 g/ha ont été de 14,9 mg/ha. Sur l'ensemble des flux de résidus d'herbicides, la bande enherbée a limité de 50 % le ruissellement hortonien.

Décaler la date d'application

La première conclusion est de constater qu'un certain nombre de substances actives n'ont pas été détectées et que d'autres présentent des risques de transfert faibles. La seconde conclusion est que les risques de transfert dans les groies moyennes sont plus faibles que dans les parcelles drainées de l'Ouest, notamment pour les applications d'hiver. Cela signifie que dans les régions où ce type d'argilo-calcaire est très présent, la principale cause de contamination des eaux pourrait être majoritairement d'origine ponctuelle.

La diversité des transferts mesurés, parfois pour les

mêmes substances sur des milieux différents, montre qu'il faut poursuivre ces études. Elles permettront d'acquérir les connaissances indispensables à de la préconisation pertinente à l'échelle régionale en fonction des types de sol et du climat sans oublier de s'intéresser aux produits de dégradation des substances actives. Les solutions évoquées précédemment pour limiter les transferts renvoient aux bonnes pratiques agricoles, au raisonnement des périodes d'application, à l'aménagement des parcelles et du paysage qui ont montré, sur le bassin versant de La Fontaine du Theil par exemple, leur efficacité à réduire rapidement la contamination des eaux. ■

Ces résultats sont issus des expérimentations réalisées sur les sites ARVALIS-Institut du végétal regroupés dans le Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) « Pratiques culturales et qualité des eaux » qui associe ARVALIS-Institut du végétal, le CETIOM, le Cemagref, l'INRA, l'ESA, l'Université d'Angers et la DGFAR du ministère de l'Agriculture. Les sites de La Jaillièrre (44), Parisot (81) et Le Magneraud (17) bénéficient de soutien de leur conseil régional. Geispitzen (68) fonctionne en collaboration avec l'ARAA et Syngenta. A La Jaillièrre, les expérimentations ont débuté en 1994, à Parisot en 1996, au Magneraud en 1998 et à Geispitzen en 2001.

La bande enherbée de Geispitzen a limité de 50 % le ruissellement.

