

Influence de la distance sur le transfert par ruissellement de quelques substances phytosanitaires

Influence of distance on transport of some pesticides by runoff

M. Clément, R. Seux et L. Orhon

Volume 13, numéro 1, 2000

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705381ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705381ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Clément, M., Seux, R. & Orhon, L. (2000). Influence de la distance sur le transfert par ruissellement de quelques substances phytosanitaires. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 13(1), 55–73. <https://doi.org/10.7202/705381ar>

Résumé de l'article

Les travaux présentés dans cet article ont pour objet l'étude de l'influence de la distance parcourue par les écoulements de surface sur l'intensité des transferts par ruissellement des produits phytosanitaires. Une première série d'essais réalisée sur des parcelles expérimentales labourées mais non cultivées montre une rapide décroissance des quantités exportées avec l'augmentation de la distance de transfert. La quantité cumulée de matières transférées peut alors être décrite par une fonction exponentielle décroissante de la distance. Une seconde série d'expérimentations sur des parcelles cultivées en blé en hiver puis au printemps en maïs montre que l'intensité de cette réduction dépend pour une large part de la pénétration des molécules dans le sol, qui les soustrait aux entraînements de surface. Cette migration verticale est favorisée par la faible affinité des matières avec les composants du sol en particulier la matière organique. Elle est également plus forte quand la réserve en eau du sol est élevée, ce qui augmente la migration par diffusion des composés et la descente lors des pluies des tranches d'eau les plus contaminées. Par ailleurs des pratiques culturales laissant peu de sol nu limitent le ruissellement au profit de l'infiltration. Ces divers mécanismes expliquent que l'effet distance est moins sensible pour une molécule peu mobile comme le lindane que pour l'atrazine, dont la mobilité conduit à des exportations élevées lors des premières pluies qui suivent les traitements.

Influence de la distance sur le transfert par ruissellement de quelques substances phytosanitaires

Influence of distance on transport of some pesticides by runoff

M. CLEMENT, R. SEUX *, L. ORHON

Reçu le 23 juin 1998, accepté le 3 janvier 2000**

SUMMARY

The aim of this study was to investigate how the distance covered by runoff water containing pesticides influenced the resulting quantity of pesticides liable to enter neighbouring waters courses. We carried out primary experiments on a bare soil, equipped with runoff water collection equipment placed at the following distances from the area to which the pesticide was applied: 1.5 m, 5 m, 9 m and 13 m. Each 10 m² test surface was treated with several pesticides: atrazine, simazine, cyanazine, 2,4-D and 2,4-DB. Results show that the pesticide quantities found in the water collectors decreased exponentially with distance. Under the experimental conditions, a distance of about 4 m led to a 10-fold reduction in pesticide runoff transfer rates.

Further similar experiments were carried out on soil cultivated with wheat and with maize. Two different pesticides, atrazine and lindane, exhibiting different behaviour in soil and different chemical and physical properties, were chosen. Observed results were similar and the total pesticide quantity was again found to be a decreasing exponential function of the distance from the treated plot. Reduction in the amount transferred, as a function of runoff distance, depends mainly on vertical migration, which in turn reduces the quantity of surface pesticide available. This vertical migration is favoured by a low affinity between pesticide and soil. This phenomenon is amplified with increasing soil water reserve. It is due to both pesticide diffusion and vertical displacement of water. The state of the surface due to arable farming practices and vegetation also plays a determining role in the vertical and horizontal displacement of water, and consequently affects pesticide transfer by runoff. Therefore the distance factor was less prominent in spring for soils cultivated with maize than in winter for the same soil cultivated with wheat. However, in all

Laboratoire d'étude et recherche en environnement et santé, École nationale de la santé publique, avenue du Pr. Léon Bernard, 35043 Rennes cedex, France.

* Correspondance. E-mail : rseux@ensp.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 15 février 2001.

cases, the influence of runoff distance upon the quantities of pesticide transferred to surface waters remains crucial.

Key-words: *pesticides, soil-water transport, transfer by runoff.*

RÉSUMÉ

Les travaux présentés dans cet article ont pour objet l'étude de l'influence de la distance parcourue par les écoulements de surface sur l'intensité des transferts par ruissellement des produits phytosanitaires. Une première série d'essais réalisée sur des parcelles expérimentales labourées mais non cultivées montre une rapide décroissance des quantités exportées avec l'augmentation de la distance de transfert. La quantité cumulée de matières transférées peut alors être décrite par une fonction exponentielle décroissante de la distance. Une seconde série d'expérimentations sur des parcelles cultivées en blé en hiver puis au printemps en maïs montre que l'intensité de cette réduction dépend pour une large part de la pénétration des molécules dans le sol, qui les soustrait aux entraînements de surface. Cette migration verticale est favorisée par la faible affinité des matières avec les composants du sol en particulier la matière organique. Elle est également plus forte quand la réserve en eau du sol est élevée, ce qui augmente la migration par diffusion des composés et la descente lors des pluies des tranches d'eau les plus contaminées. Par ailleurs des pratiques culturales laissant peu de sol nu limitent le ruissellement au profit de l'infiltration. Ces divers mécanismes expliquent que l'effet distance est moins sensible pour une molécule peu mobile comme le lindane que pour l'atrazine, dont la mobilité conduit à des exportations élevées lors des premières pluies qui suivent les traitements.

Mots clés : *transfert sol-eau, phytosanitaires, ruissellement, effet distance.*

1 - INTRODUCTION

Les deux dernières décennies ont vu une intensification rapide de l'agriculture notamment dans les régions où les productions animales et plus particulièrement des élevages hors sol se sont développés. Cette intensification de l'élevage a été accompagnée par une extension des productions végétales (maïs, céréales) et une utilisation importante de produits phytosanitaires qui classe la France au second rang mondial. Avec près de 4 000 tonnes de matières actives utilisées chaque année, la Bretagne est confrontée à un problème parfois aigu de contamination des eaux de surface.

Une politique de prévention des pollutions et de reconquête de la qualité des eaux ne peut pas être élaborée sans une connaissance des mécanismes des transferts sol-eau des phytosanitaires. Une première étude réalisée sur le bassin versant de la Cantache (GILLET *et al.*, 1995) nous avait montré qu'à surfaces traitées identiques, les eaux de deux sous-bassins versants étaient d'autant plus contaminées que le linéaire emblavé en maïs était important. Par ailleurs, l'étude de quelques crues dans les périodes qui suivent les épandages nous a montré le poids dominant de ces événements dans les flux de transfert.

Cela nous a conduit à mettre en place un ensemble d'expérimentations sur parcelles pour quantifier l'effet de la distance au ruisseau de la zone traitée sur

l'intensité des transferts des produits phytosanitaires. Des essais préliminaires ont été conduits sur un sol nu en période hivernale, suivis d'une expérimentation sur des sols cultivés en blé et en maïs pour apprécier l'influence des pratiques culturales sur ces transferts. Les résultats acquis par la présente étude font actuellement l'objet d'une validation à l'échelle de petits sous-bassins versants.

2 – MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Description des sites et calendrier des essais

Les sites expérimentaux sont choisis au sein du domaine de l'Institut national de recherche agronomique (Inra) situé dans la partie ouest du bassin de Rennes, au Rheu pour les essais sur sol nu et au lieu-dit Champ Noël pour le sol cultivé. Les données météorologiques sont acquises par une station de l'Inra distante de 500 m du premier site et de 3 km du second. Les sols sont essentiellement limoneux, avec des teneurs en matières organiques plus élevées sur le site de Champ Noël (*tableau 1*).

Tableau 1 Caractéristiques de l'horizon labouré des sols.

Table 1 *Soil properties (0-30 cm).*

Caractéristiques	Site du Rheu	Site de Champ Noël
Sable	10-15 %	19 %
Limon	70-75 %	64 %
Argiles	10-15 %	17,4 %
pH (eau)	6,1	6,4
Matières organiques	2,4 %	4,4 %

Données fournies par l'Unité de recherche de science du sol et de bioclimatologie de l'Inra de Rennes.

Sur le site du Rheu, les expérimentations ont été conduites de novembre à janvier sur un sol nu. Avant les essais, le sol est préparé début novembre par un labour sur 30 cm de profondeur et les parcelles expérimentales sont situées dans un champ dont la pente est de 2,8 %. Sur celui de Champ Noël, les essais eurent lieu sur deux périodes, de décembre à avril et de mai à juillet de cette même année. Du maïs a été cultivé pendant l'été précédent, avec une application d'atrazine à 1,5 kg/ha de matière active. Après la récolte de septembre, le terrain a reçu, après un labour, un blé d'hiver jusqu'à un nouvel emblavement en maïs au printemps suivant. Dans tous les cas, les labours ont été réalisés dans le sens de la pente qui est de 4,4 % au niveau des parcelles d'essai.

2.2 Dispositifs expérimentaux

Sur le site du Rheu, quatre parcelles de 10 m^2 ($2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$) placées respectivement à 1,5 m, 5 m, 9 m et 13 m de dispositifs de collecte des eaux de ruissellement reçoivent un traitement. Un cinquième dispositif qui recueille les eaux d'une zone témoin non traitée nous a permis de vérifier l'absence de résidu à des concentrations détectables consécutifs à des traitements antérieurs. Une barrière d'arrêt située 30 mètres en amont de la zone de collecte limite le trajet total du ruissellement. La *figure 1* montre la configuration des dispositifs installés.

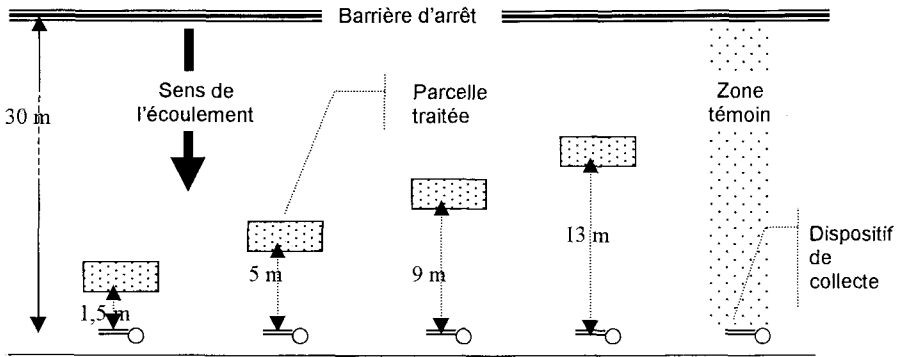


Figure 1 Dispositif expérimental.
Experimental setup.

Un dispositif comprenant trois parcelles traitées distantes de 1,5 m, 5 m et 9 m du système de collecte des eaux est repris sur le site de Champ Noël. La barrière d'arrêt est alors placée à 25 m en amont des gouttières de collecte.

2.3 Recueil des eaux de ruissellement

Pour limiter le volume des eaux de ruissellement recueillies après chaque pluie, leur collecte se fait sur une largeur de deux mètres à l'aide d'une gouttière centrée par rapport à la parcelle traitée. Une plaque de Plexiglas placée à 5 cm de profondeur devant la gouttière permet de recueillir l'écoulement subsuperficiel. L'eau est collectée dans un bidon de 30 L en polyéthylène protégé de l'intrusion des eaux de pluies. La *figure 2* montre ce dispositif. Les eaux qui ruissellent étant guidées par les raies du labour, on admettra dans ces conditions que la surface active du ruissellement collecté est de 60 m^2 ($2 \text{ m} \times 30 \text{ m}$) au Rheu et de 50 m^2 ($2 \text{ m} \times 25 \text{ m}$) à Champ Noël ; alors que la surface contributive des parcelles à la contamination de ces eaux est de 4 m^2 ($2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) pour les deux sites. Dans ces conditions, les flux de pesticides sortant des parcelles traitées sont dilués de façon équivalente par les eaux de ruissellement.

2.4 Matières actives retenues pour les essais

Le comportement des substances dans le sol est très dépendant de la demi-vie et du Koc (MALLAWATANTRI et MULLA, 1992). Ce dernier décrit à l'équi-

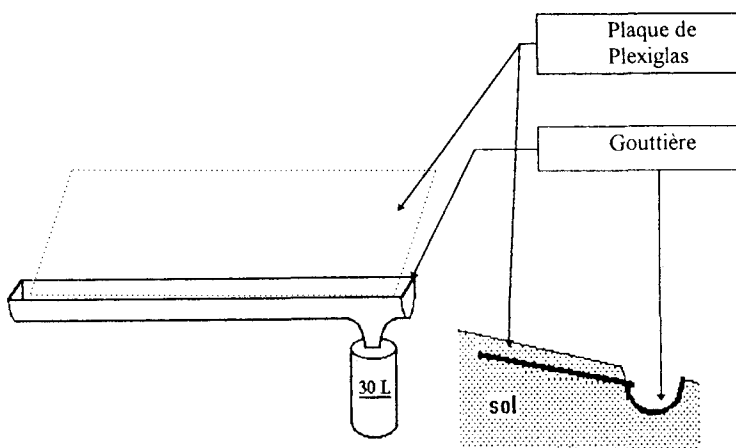


Figure 2 Dispositif de collecte des eaux de ruissellement.
Apparatus for collecting water runoff.

libre la répartition d'une substance entre la fraction organique du sol et l'eau selon les relations suivantes :

$$\text{Concentration dans le sol} / \text{Concentration dans l'eau} = K_d$$

$$K_d = K_{oc} \cdot \text{fraction en carbone organique du sol}$$

Nous avons retenu pour nos essais des substances qui se différencient nettement au travers de ces deux paramètres et pour lesquelles on dispose de méthodes de dosage éprouvées. Leur K_{oc} varie de 1 300 cm^3/g pour le lindane à 20 cm^3/g pour le 2,4-D et le 2,4-DB en passant par des valeurs médianes (100 cm^3/g à 190 cm^3/g) pour les triazines sélectionnées. Le *tableau 2* donne les principales caractéristiques de ces molécules.

Tableau 2 Principales caractéristiques des composés retenus.

Table 2 *Miscellaneous properties of the target compounds.*

	Lindane	Atrazine	Simazine	Cyanazine	2,4-D sel d'amines	2,4-DB sel de K, Na
Masse molaire	290,9	215,7	201,5	240,7	221	249
Solubilité à 20 °C $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	7,30	33	6,2	170	4 400	> 200
Pression de vapeur Pa	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	
K_{oc} cm^3/g	1 300	100	130	190	60	20
Demi-vie (sol) jour	300	60	60	14	7	10

Données extraites de "Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organics" Donald Mackay, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.

Pour faciliter le suivi analytique de ces composés, les doses appliquées ont été augmentées par rapport aux pratiques agricoles habituelles (1,35 kg·ha⁻¹ pour le lindane, 1,5 kg·ha⁻¹ pour les triazines, 0,6 kg·ha⁻¹ pour le 2,4-D et de 2,1 à 2,7 kg·ha⁻¹ pour le 2,4-DB). Sur le site du Rheu où seules les eaux de ruissellement sont analysées, elles sont portées à 5 kg·ha⁻¹ pour chaque triazine et respectivement à 2,4 kg·ha⁻¹ et 6 kg·ha⁻¹ pour le 2,4-D et 2,4-DB. Sur le site de Champ Noël où la migration dans le sol a également été examinée lors d'essais complémentaires dont nous rendrons compte ultérieurement, les doses appliquées sont de 9 kg·ha⁻¹ pour l'atrazine et 7,8 kg·ha⁻¹ pour le lindane en raison de la moindre sensibilité des dosages dans le sol. Après dilution dans l'eau, les préparations commerciales sont épandues à l'aide d'un pulvérisateur à main.

2.5 Méthodes d'analyse

Toutes les analyses sont réalisées sur des échantillons décantés pendant 12 heures pour les débarrasser de la fraction solide la plus grossière.

Les triazines sont extraites d'un litre d'échantillon par deux fois 50 mL de CH₂Cl₂. L'extrait est séché par congélation, concentré sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif, puis sous jet d'azote jusqu'à obtenir un facteur de concentration de 1 000. Des ajouts calibrés de méthoprotrine et de trichloro-nitro-benzène sont utilisés respectivement comme étalon interne d'extraction et d'injection. L'extrait est chromatographié en phase gazeuse (Injecteur automatique AS-550 et chromatographe HRGC-Méga de Fisons) sur deux colonnes capillaires (DB 1701 et DB WAX) pour garantir l'identité des composés détectés par voie thermo-ionique. La quantification se fait par rapport à une gamme étalon dans l'eau soumise au même protocole. Le seuil de quantification est dans ces conditions de 0,05 µg·L⁻¹.

Le lindane est extrait d'un litre d'échantillon par deux fois 50 mL d'hexane. L'extrait est traité comme précédemment pour obtenir un facteur de concentration de 1 000. Des ajouts calibrés de pentachlorobenzène et de trichlorobenzène sont utilisés respectivement comme étalon interne d'extraction et d'injection. L'extrait est chromatographié en phase gazeuse (Injecteur automatique HP-7673 et chromatographe HP-5890 de Hewlett Packard) sur deux colonnes capillaires (DB 5 et DB 8) pour garantir l'identité du composé détecté par capture d'électron. La quantification se fait par rapport à une gamme étalon dans l'eau soumise au même protocole. Le seuil de quantification est de 0,005 µg·L⁻¹.

Après ajout d'un étalon interne (2-(4-chlorophenoxy)-2 méthylpropionique acide), les acides phénoxy-carboxyliques sont extraits de la prise d'essai (1 litre) par filtration sur une cartouche de silice greffée par des groupements C18. Ils sont élués par 2 mL de méthanol, puis estérifiés en milieu sulfurique concentré. Les esters formés, extraits par l'hexane, sont chromatographiés en phase gazeuse (Injecteur automatique AS-550 et chromatographe Véga 6000 de Fisons) sur une colonne capillaire (SE 54), avec une détection par capture d'électrons. La quantification se fait par rapport à une gamme étalon dans l'eau qui suit le même protocole. Le seuil de quantification est de 0,3 µg·L⁻¹.

3 – RÉSULTATS

3.1 Ruissellement sur un sol nu

3.1.1 Conditions des essais

Les matières actives, atrazine, simazine, cyanazine, 2,4-D et 2,4-DB, ont été appliquées le 24 novembre sur les parcelles du site du Rheu, alors que la pluviométrie a été de 73 mm depuis le début novembre. Le sol est saturé en eau et la croûte de battance est formée. Ces conditions sont très favorables au ruissellement, bien que l'intensité des précipitations automnales reste faible comme le montre la figure 3.

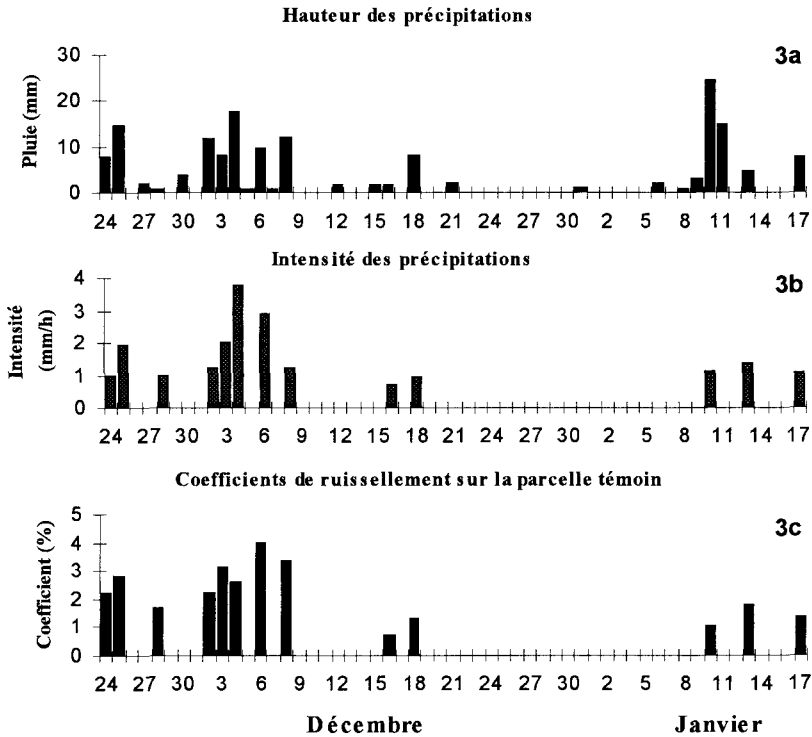


Figure 3 Pluviométrie et coefficient de ruissellement observés sur la parcelle témoin du 24 novembre 1992 au 17 janvier 1993.

Precipitation characteristics and runoff coefficient for the reference plot between 24 november 1992 and 17 january 1993.

Après chaque pluie qui génère un ruissellement, le contenu des bidons est collecté pour déterminer le volume des eaux recueillies et leur teneur en pesticides. Le coefficient de ruissellement C du sol peut alors être calculé par la relation suivante :

$$C = 100 \times \text{Volume d'eau recueillie (L)} / [\text{Précipitation (mm)} \times \text{Surface active (m}^2\text{)}]$$

Les valeurs obtenues varient de 0,7 % à 4 %, ce qui montre une forte aptitude au ruissellement du sol. La figure 3c résume l'ensemble de ces données.

3.1.2 Concentration en produits phytosanitaires dans les eaux de ruissellement

La concentration des eaux de ruissellement en produits phytosanitaires a été suivie jusqu'à ce qu'elle soit inférieure au seuil de quantification analytique ($0,05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ pour les triazines et $0,3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ pour les 2,4-D et 2,4-DB). Dans ces conditions, le suivi a été arrêté à la fin janvier. La figure 4 présente à titre d'exemple les résultats obtenus pour l'atrazine et le 2,4-D après chaque événement pluvial ayant provoqué un ruissellement.

Pour toutes les molécules (à l'exception des acides phénoxy-carboxyliques à la distance de 9 m) les concentrations dans les eaux de ruissellement sont maximales lors du premier écoulement. Les niveaux mesurés sont cependant très différents selon la distance parcourue au-delà de la zone de traitement. Pour l'atrazine par exemple, ces teneurs sont respectivement lors du premier prélèvement de $2\,700 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $74 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $14 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ et $2,9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ pour des distances de 1,5 m, 5 m, 9 m et 13 m. Cette décroissance rapide en fonction de la distance est analogue pour l'ensemble des composés suivis.

3.1.3 Influence de la distance sur les quantités exportées

Pour préciser l'influence de la distance de la limite de la zone traitée au point de collecte de l'eau sur l'intensité du transfert, les quantités exportées par chaque parcelle lors des différents épisodes pluviaux sont cumulées. Les valeurs obtenues et le pourcentage qu'elles représentent au regard des quantités appliquées sur la surface contributive (4 m^2) des parcelles traitées sont données dans le tableau 3.

Tableau 3 Quantité cumulée des pesticides exportés par ruissellement pour chaque parcelle.

Table 3 Cumulative amount of pesticide transferred by runoff for each parcel.

Distance	Atrazine		Simazine		Cyanazine		2,4-D		2,4 D-B	
	Quantité exportée μg	% par rapport à l'apport	Quantité exportée μg	% par rapport à l'apport	Quantité exportée μg	% par rapport à l'apport	Quantité exportée μg	% par rapport à l'apport	Quantité exportée μg	% par rapport à l'apport
13 m	60	0,0031	48	0,0024	40	0,0020				
9 m	480	0,024	440	0,022	440	0,022	252	0,026	520	0,022
5 m	3 320	0,17	2 960	0,15	3 480	0,17	1 360	0,14	2 200	0,09
1,5 m	92 000	4,6	26 800	1,3	68 000	4,4	29 200	3,0	45 200	1,9

Ces résultats montrent que pour la période étudiée, la variation de la masse cumulée de pesticides exportés par ruissellement en fonction de la distance de la zone traitée au point de collecte de l'eau peut être décrite par une fonction exponentielle décroissante. La figure 5 illustre à titre d'exemple cette relation pour l'atrazine et le 2,4-D.

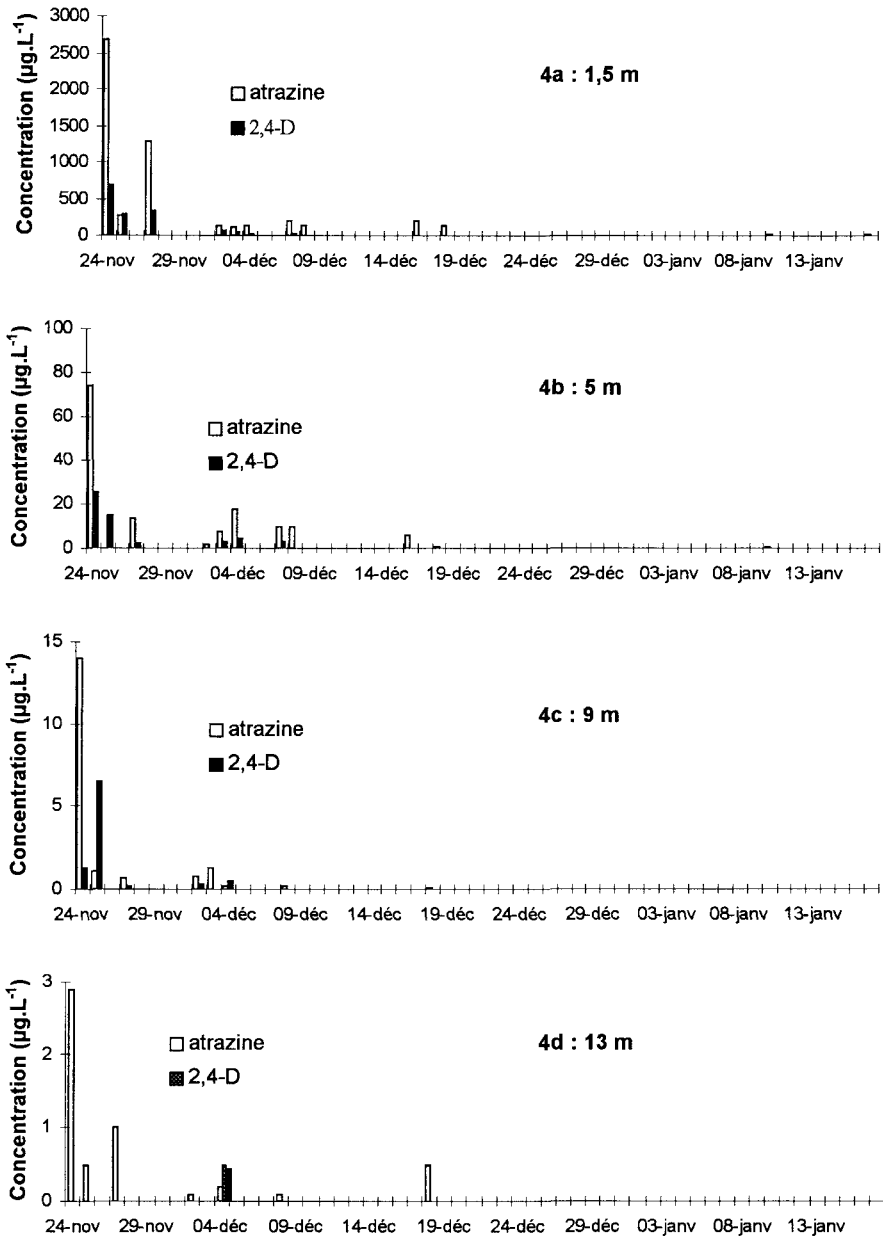


Figure 4 Teneur en atrazine et 2,4-D des eaux de ruissellement collectées après chaque pluie, à 1,5 m, 5 m, 9 m et 13 m des parcelles traitées.
Atrazine and 2,4-D concentrations in the runoff waters collected after each rain event 1.5 m, 5 m, 9 m and 13 m away from the treated plots.

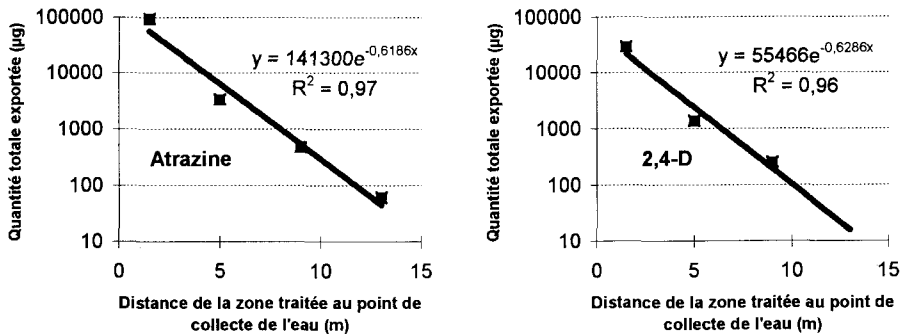


Figure 5 Quantité cumulée d'atrazine et de 2,4-D exportée en fonction de la distance.
Cumulative amount of atrazine and 2,4-D transferred by runoff as a function of distance.

Si Q représente la quantité cumulée de matières actives exportées par ruissellement à D mètres de la zone traitée, on peut décrire le lien entre Q et D par une relation de la forme : $\log Q = \log Q_0 - aD$

où Q_0 est la quantité qui franchit la limite de la zone traitée.

Pour les cinq substances suivies, cette relation s'écrit :

Atrazine :	$\log Q = 5,156 - 0,269 D$	$R^2 = 0,97$
Simazine :	$\log Q = 4,737 - 0,236 D$	$R^2 = 0,99$
Cyanazine :	$\log Q = 5,203 - 0,283 D$	$R^2 = 0,98$
2,4-D :	$\log Q = 4,749 - 0,273 D$	$R^2 = 0,96$
2,4-DB :	$\log Q = 4,900 - 0,256 D$	$R^2 = 0,94$

Au travers des ordonnées à l'origine et des pentes de ces équations, nous observons que l'effet de la distance sur la réduction des quantités exportées par ruissellement est analogue pour les cinq substances suivies. Dans nos conditions expérimentales, une augmentation de la distance de l'ordre de 4 mètres réduit d'un facteur dix la quantité cumulée exportée au point considéré (de 3,7 m pour l'atrazine à 4,2 m pour la simazine).

3.2 Ruissellement sur un sol cultivé

L'influence des cultures sur les transferts a été examinée lors de deux expérimentations sur le site de Champ Noël. La première a été conduite sur un blé d'hiver au cours d'une période humide (sol saturé en eau). La seconde a eu lieu sur une culture de maïs en période sèche. Pour ces essais nous avons retenu le lindane et l'atrazine qui ont des Koc nettement différenciés. Leurs caractéristiques physicochimiques sont suffisamment discriminantes pour que ces substances puissent être considérées comme représentatives du comportement d'une classe particulière de matières actives.

3.2.1 Conditions des essais

Les parcelles cultivées en blé d'hiver ont été traitées le 6 décembre, journée suivie de trois jours de pluie de faible intensité. Le sol est saturé en eau et la réserve utile est maximale durant tout l'hiver. La *figure 6* rend compte de la pluviométrie pendant la période de l'étude. Le premier ruissellement notable apparaît le 17 décembre après une pluie de forte intensité. La pluviométrie de janvier et février est ensuite exceptionnelle, 240 mm d'eau tombent pendant ces deux mois contre 130 mm pour la moyenne des 16 années précédentes. Les événements pluviaux les plus intenses ont lieu du 16 au 23 janvier, la pluviométrie totale de cette période est de 100 mm avec une intensité maximale de 5,5 mm/h, comparable à celle d'un orage d'été. Les coefficients de ruissellement observés sur la parcelle témoin varient de 0,1 à 0,8 %. Ils sont, comparés à ceux précédemment observés sur le sol non cultivé du Rheu, finalement assez faible.

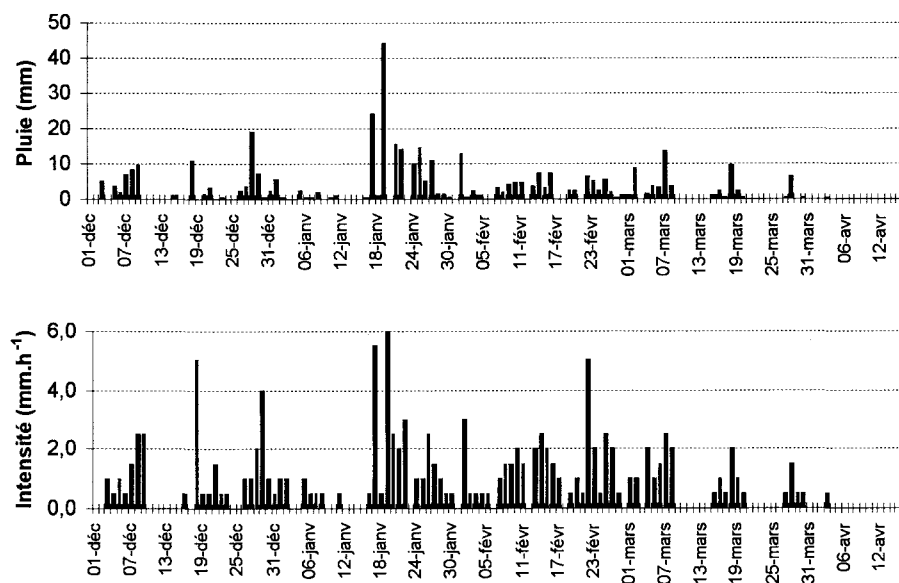


Figure 6 Pluviométrie pendant les essais d'hiver.
Daily variation of rainfall during the winter experiments.

L'application des matières actives sur la culture de maïs a été effectuée le 15 mai, soit dix jours après le semis. À ce moment et pendant la durée de l'étude la réserve en eau du sol n'a jamais atteint la saturation. Un événement pluvial est survenu le 16 mai, juste après le traitement (*figure 7*). La pluviométrie est restée ensuite faible avec un total des précipitations du 15 mai au 31 juillet de 98 mm, à l'exception des précipitations du 16 mai et du 3 juillet (20 mm chacune, intensité > 5 mm/h). Dans ces conditions, le ruissellement n'est observé qu'à l'occasion de ces deux épisodes avec une persistance du 6 au 13 juillet pour le second.

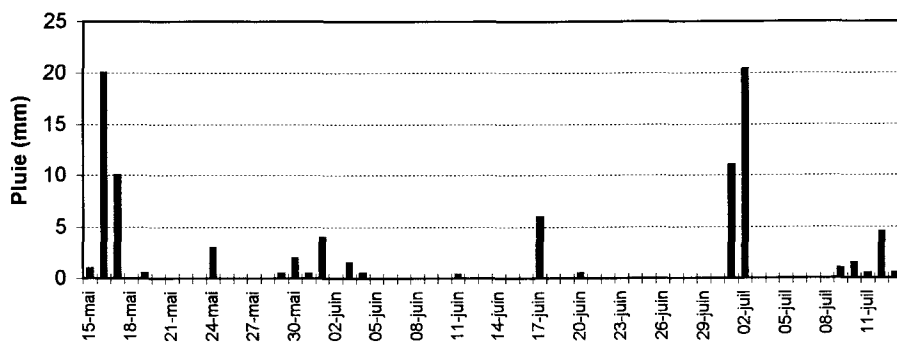


Figure 7 Pluviométrie pendant les essais de printemps.
Daily variation of rainfall during the spring experiments.

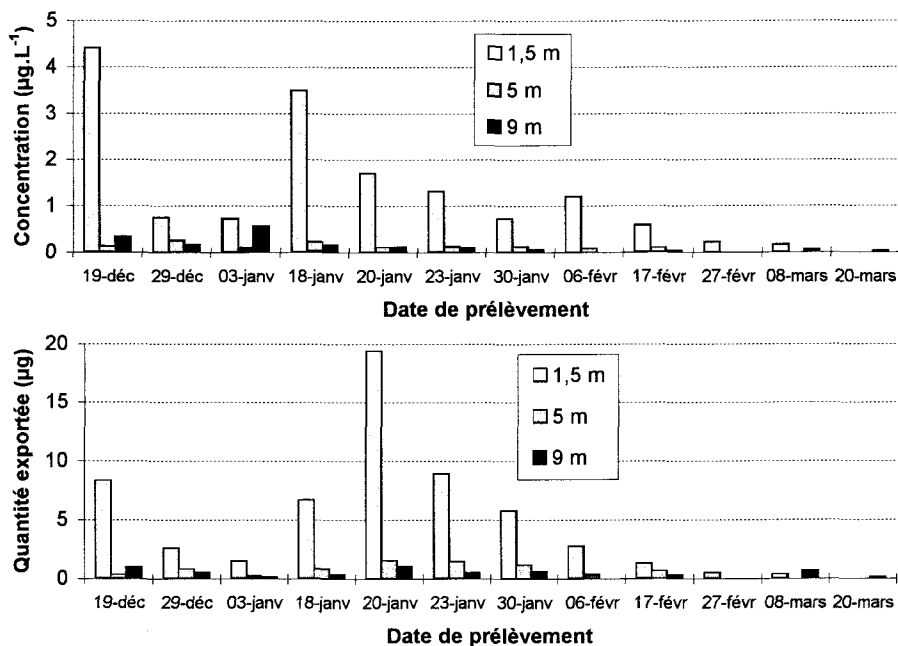


Figure 8 Exportation du lindane par ruissellement à 1,5 m, 5 m et 9 m de la zone traitée.
Lindane transport by runoff 1.5 m, 5 m and 9 m away from the treated area.

3.2.2 Transfert des substances par ruissellement

Expérience d'hiver

La figure 8 présente les données relatives à l'exportation du lindane après chaque épisode pluvial générant du ruissellement. Les concentrations maxi-

males apparaissent le 19 décembre, avec la première pluie importante qui suit le traitement. La décroissance des concentrations du 19 décembre au 3 janvier est associée à la diminution des hauteurs d'eau des précipitations. Les fortes pluies du 18 janvier provoquent à nouveau des concentrations importantes, proches de celles du premier épisode pluvial. Lors de l'examen des quantités transférées on constate que les valeurs maximales ne sont pas associées aux pointes de concentration. Pour un trajet de ruissellement de 1,5 m le transfert maximal est observé le 20 janvier, à la suite des fortes pluies des jours précédents. Pour des distances plus longues, ces maxima apparaissent plus tardivement, le 23 janvier pour 5 m et le 30 janvier pour 9 m. On observe ainsi un déphasage qui s'accroît avec la distance. Ce phénomène est probablement dû à la forte adsorption du lindane sur le sol (LOCKE, 1992).

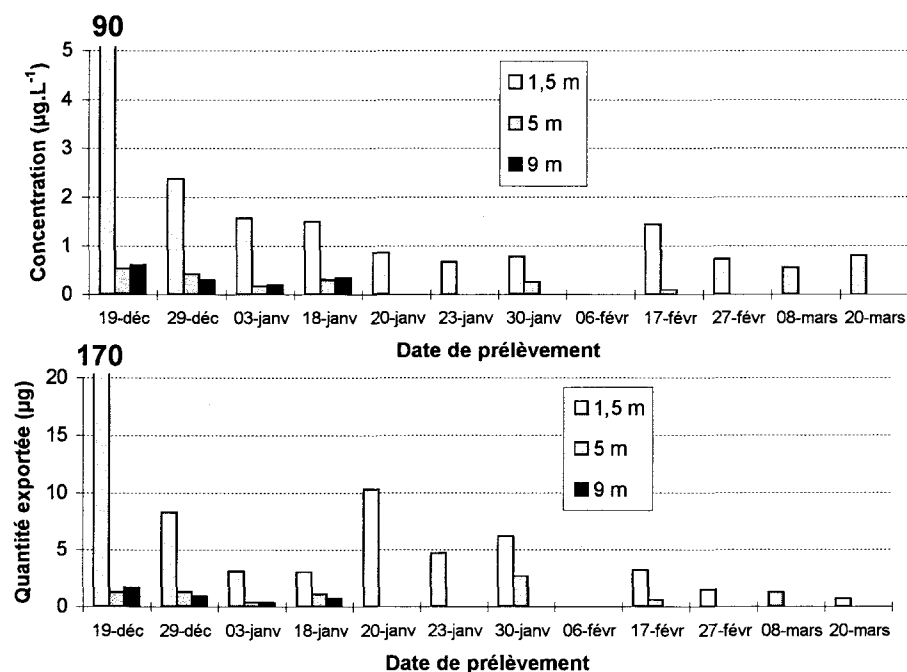


Figure 9 Exportation de l'atrazine par ruissellement à 1,5 m, 5 m et 9 m de la zone traitée.

Atrazine transport by runoff 1.5 m, 5 m and 9 m away from the treated area.

Les données relatives au ruissellement de l'atrazine, résumées par la figure 9, sont très différentes de celles obtenues pour le lindane. La première pluie qui suit le traitement provoque une forte contamination des eaux de ruissellement. Le niveau de concentration atteint est très supérieur à ceux des épisodes pluviaux suivants. Pour un trajet de 1,5 m, il est de $90 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ le 19 décembre et ne dépassera pas ensuite $2,5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Pour le lindane, la valeur mesurée dans les mêmes conditions n'est que de $4,4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Ce phénomène

est confirmé par l'examen des quantités transférées. Sur une distance de 1,5 m, la première pluie du 19 décembre exporte 170 μg de matière active, ce qui représente 80 % du total transféré à cette distance et 43 μg par m^2 de surface contributive. L'ensemble de ces résultats traduit une mobilité de l'atrazine très supérieure à celle du lindane qui est davantage retenu par le sol. L'exportation de celui-ci est plus faible et s'étale dans le temps alors que les premières pluies transfèrent brutalement la majeure partie de l'atrazine qui sera exportée.

Expérience de printemps

Les données relatives au transfert par ruissellement des matières actives sont résumées par la *figure 10*. On observe que la concentration en lindane dans les eaux de ruissellement recueillies à 1,5 m de la zone traitée deux mois après l'application est aussi élevée que la première observée le 17 mai. Avec $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ on obtient des concentrations deux fois plus élevées que lors de l'expérience d'hiver. Une observation identique peut être faite avec l'atrazine, pour laquelle les écarts relatifs aux flux sont encore plus marqués. Ainsi, à 1,5 m la concentration atrazine dans les eaux atteint $220 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ lors de l'épisode pluvieux survenu deux mois après l'application contre un maximum de $90 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en hiver alors que la quantité exportée sur cette distance passe dans les mêmes conditions de 170 μg à 650 μg .

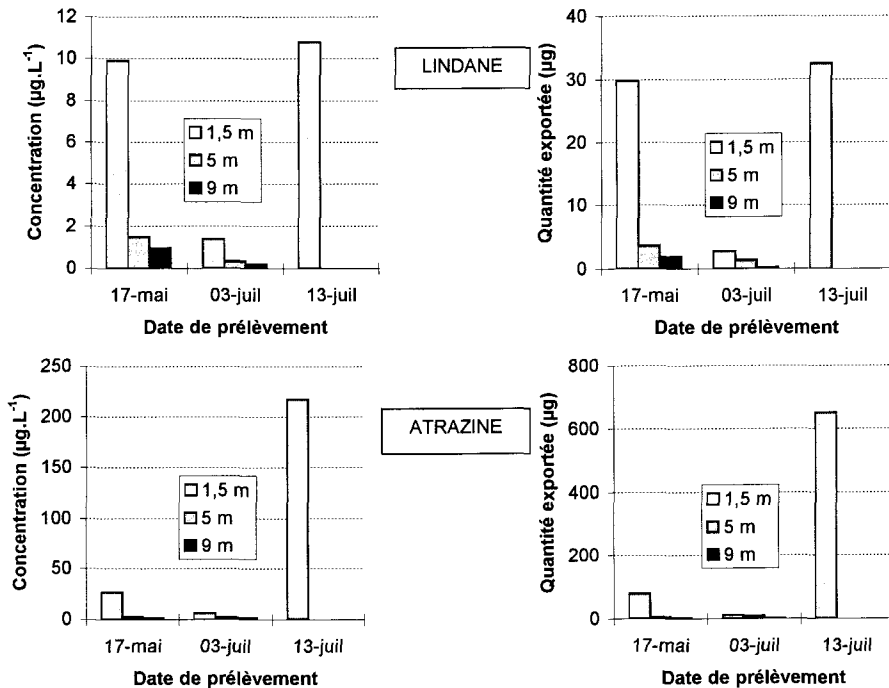


Figure 10 Transfert des matières actives par ruissellement à 1,5 m, 5 m et 9 m de la zone traitée.

Pesticide transport by runoff 1.5 m, 5 m and 9 m away from the treated area.

3.2.3 Influence de la distance sur les quantités exportées

Les coefficients de ruissellement étant très inférieurs à ceux observés sur un sol nu (site du Rheu), les masses exportées sont nettement plus faibles sur un sol cultivé. Cependant, l'effet de la distance de la zone de traitement au point de collecte des eaux sur les quantités exportées reste aussi important.

Pour la culture de blé d'hiver, les quantités totales de lindane transférées pendant la période d'observation sont respectivement de 56 µg, 7,4 µg et 2,2 µg pour des trajets de 1,5 m, 5 m et 9 m. Avec l'atrazine, les masses sont de 212 µg, 4,3 µg et 0,4 µg pour des trajets équivalents. Ces résultats illustrés par la *figure 11* montrent que la diminution des quantités exportées avec la distance peut également être décrite par une fonction exponentielle décroissante. Les relations entre la quantité totale transférée Q et la longueur D du ruissellement sont dans ce cas les suivantes :

$$\text{Atrazine} \quad \log Q = 2,72 - 0,361 D \quad R^2 = 0,97$$

$$\text{Lindane} \quad \log Q = 1,87 - 0,186 D \quad R^2 = 0,88$$

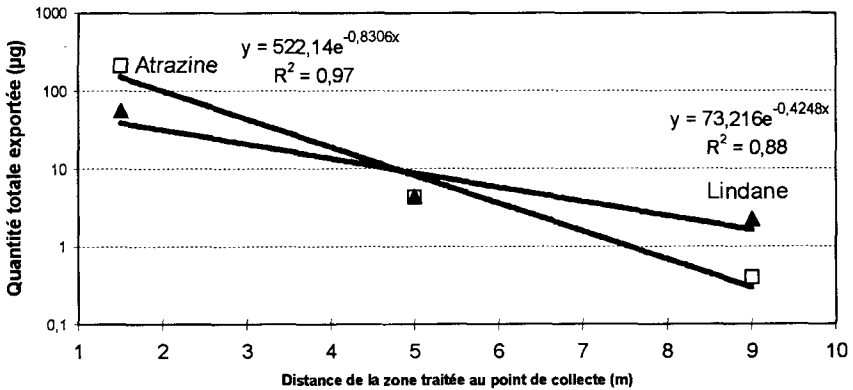


Figure 11 Quantité cumulée de lindane et d'atrazine exportée en fonction de la distance – Essai d'hiver sur blé.

Cumulative amounts of lindane and atrazine transferred by runoff in relation with distance – Winter experiment on wheat.

La fonction établie pour l'atrazine présente une pente sensiblement double de celle établie pour le lindane. Ainsi, pour diviser par dix la masse totale de pesticide transférée par ruissellement hors de la parcelle traitée, il faut un trajet sur le sol de 2,8 m pour l'atrazine alors que cette distance doit être portée à 5,4 m pour le lindane.

Sur la culture de maïs, la distance de ruissellement réduit aussi de façon considérable les quantités totales de produits phytosanitaires transférés pendant la période d'observation. Cependant, le nombre d'épisodes qui ont générés du ruissellement étant limité à trois, le transfert vers les goulottes de collecte n'est vraisemblablement pas total. Dans ces conditions la *figure 12* montre que la corrélation avec le modèle proposé est un peu moins bonne.

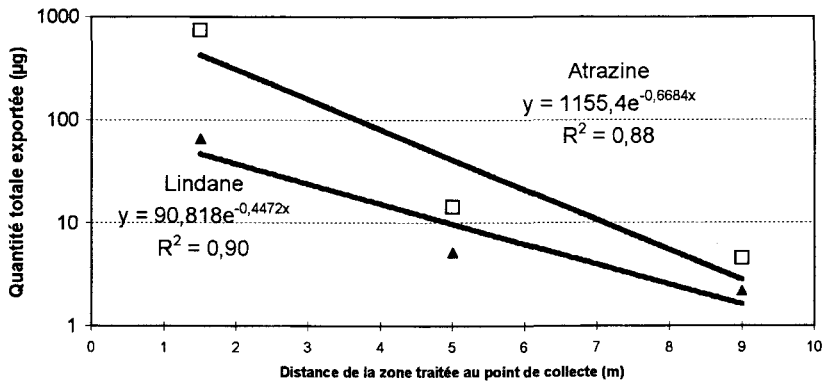


Figure 12 Quantité cumulée de lindane et d'atrazine exportée en fonction de la distance – Essai de printemps sur maïs.

Cumulative amounts of lindane and atrazine transferred by runoff in relation with distance – Spring experiment on maize.

Les relations qui décrivent ce phénomène sont alors :

$$\text{Atrazine : } \log Q = 3,07 - 0,291 D \quad R^2 = 0,88$$

$$\text{Lindane : } \log Q = 1,96 - 0,194 D \quad R^2 = 0,90$$

Elles montrent que l'influence de la distance sur la réduction des quantités transférées est toujours plus forte pour l'atrazine que pour le lindane. Un ruissellement sur une distance de 3,4 m réduit l'exportation de l'atrazine d'un facteur 10 alors que 5,4 m sont nécessaires pour le lindane.

4 – DISCUSSION

La décroissance des concentrations des matières actives au niveau de la zone traitée est la conséquence de plusieurs phénomènes tels que la dégradation, les départs atmosphériques, la migration vers les couches inférieures du sol, enfin le ruissellement (FLURY, 1996 ; WEED *et al.*, 1995). Ces deux derniers phénomènes, directement associés aux déplacements verticaux et horizontaux de l'eau issue des précipitations, apparaissent antagonistes (FLURY, 1996) car la fraction de matière qui s'infiltré est progressivement moins disponible pour le ruissellement. L'allongement des distances d'écoulement sur des surfaces non traitées, qui accroît à la fois le temps et la surface disponible pour l'infiltration réduit logiquement les masses exportées par les écoulements superficiels. Ceci est systématiquement observé lors de nos essais avec des intensités très différentes selon l'état du sol et sa teneur en eau, paramètres naturellement modulés par les propriétés physicochimiques des substances étudiées. En effet, tous les facteurs qui favorisent la pénétration des composés dans le sol devraient *a priori* accentuer l'effet de la distance.

L'étape préalable aux divers mécanismes qui conduisent à cette migration est le partage des matières actives déposées en surface, dont rend compte le Koc, entre une fraction adsorbée sur les constituants du sol et une autre dissoute dans l'eau des couches supérieures (MOREAU et MOUVET, 1997 ; BOESTEN *et al.*, 1991), donc très mobile (SEUX *et al.*, 1984). Dans un sol humide, le gradient de concentration créé par ce phénomène entre l'eau des couches superficielles et celle des horizons plus profonds, provoque alors par diffusion la migration verticale des composés. Par ailleurs, l'eau qui s'infiltre, lors des précipitations, génère des chasses qui entraînent la descente des tranches d'eau les plus contaminées. Ce mécanisme est d'autant plus efficace que la perméabilité du sol est grande. Cependant lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol, l'excès d'eau entraîne par ruissellement, au-delà de la zone traitée, une fraction des substances présentes dans la couche supérieure du sol (CROS-CAYOT, 1996).

Ces éléments nous éclairent sur les causes probables des écarts observés entre les résultats de nos divers essais. Sur le site de Champ Noël, les différences entre les pentes des relations établies pour l'atrazine sur la culture hivernale du blé (- 0,361) et estivale du maïs (- 0,291) peuvent être attribuées pour une large part à l'abondante pluviométrie d'hiver, avec de nombreux événements provoquant des infiltrations sans générer de ruissellement, ce qui favorise également la migration par diffusion en dehors des précipitations.

Dans les mêmes conditions, les pentes des droites relatives aux exportations de lindane ne sont pas différenciées (- 0,186 pour le blé, - 0,194 pour le maïs) et sont très inférieures aux valeurs obtenues avec l'atrazine. Le Koc élevé (1 300 cm³/g) du lindane, qui traduit une plus faible proportion de substance en solution, limite l'influence de la teneur en eau du sol sur sa pénétration. Cet organochloré en restant plus en surface, est davantage disponible pour le ruissellement, mais sa faible mobilité conduit à des décalages temporels importants entre le moment de l'application et son arrivée dans les zones de collecte des eaux.

Enfin les ordonnées à l'origine ($\log Q_0$) des relations entre la masse cumulée exportée et la longueur du ruissellement permettent de déterminer les quantités de matières sortant de chaque parcelle traitée. Pour un même composé, on constate que les valeurs de $\log Q_0$ sont très différentes selon que le sol est nu ou cultivé (5,16 pour l'atrazine sur sol nu au Rheu contre 3,07 et 2,72 respectivement sur maïs et blé à Champ Noël). Ceci est à rapprocher des écarts importants entre la perméabilité d'un sol nu et battant dont le coefficient de ruissellement atteint 4 % et celles de parcelles cultivées où la valeur de ce coefficient ne dépasse pas 0,8 % (GUIBAUD *et al.*, 1999). Le couvert végétal ralentit l'écoulement superficiel, ce qui est favorable à l'infiltration dans un sol moins compact en raison du développement racinaire (PANTONE *et al.*, 1992). Ceci explique aussi, pour partie, la plus faible pente (- 0,269) de la droite qui rend compte du transfert de l'atrazine sur sol nu, comparée à celles obtenues pour la culture de maïs (- 0,291) et de blé (- 0,361).

5 – CONCLUSION

Ces travaux montrent que les transferts par ruissellement des produits phytosanitaires décroissent fortement avec l'augmentation de la distance entre les parcelles traitées et le point de collecte des eaux.

Pour l'ensemble de nos essais, la quantité cumulée exportée sur un cycle cultural complet en fonction de la distance peut être décrite par une fonction exponentielle décroissante.

Les facteurs qui favorisent l'infiltration des substances actives au détriment de leur déplacement de surface renforcent l'influence de la distance sur la réduction des masses transférées. Parmi ceux-ci, nos essais mettent en évidence :

- le poids important des pratiques culturales qui conditionnent l'état de surface du sol ;
- l'humidité du sol qui permet la descente de la fraction dissoute des composés ;
- l'importance des propriétés physicochimiques des molécules qui déterminent leur mobilité.

Ainsi par exemple dans nos conditions expérimentales, l'augmentation du trajet de ruissellement nécessaire pour diviser par dix la masse cumulée de composé exporté en un point donné, passe de 2,75 mètres pour de l'atrazine appliquée sur un blé d'hiver à 5,4 m pour du lindane sur une culture de maïs.

Ces résultats nous apparaissent fondamentaux pour la mise en place d'une politique de prévention de la contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires (AUROUSSEAU *et al.*, 1998), car ils montrent l'effet néfaste de la proximité des parcelles traitées du réseau hydrographique. L'augmentation du trajet du ruissellement pour atteindre le ruisseau permet une réduction importante du transfert des pesticides, alors qu'une prévention fondée sur une réduction des doses se heurte rapidement à un manque d'efficacité du traitement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUROUSSEAU P., GASCUEL-ODOUX C., SQUIVIDANT H., 1998. Éléments pour une méthode d'évaluation d'un risque parcellaire de contamination des eaux superficielles par les pesticides – Application au cas de la contamination par les herbicides utilisés sur culture de maïs sur les bassins versants armoricains, *Étude et gestion des sols*, 5(3), 143-156.
- BOESTEN J.J.T.I., VAN DER LINDEN A.M.A., 1991. Modeling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence, *J. Environ. Qual.*, 21, 425-435.
- CROS-CAYOT S., 1996. Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant - Contexte Armoricaïn. *Thèse de doctorat de l'ENSAR*, 218 p.
- FLURY M., 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soil – A review. *J. Environ. Qual.*, 25, 25-45.

- GILLET H., CLÉMENT M., CHOISY A.M., SEUX R., 1995. Évaluation du niveau de contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires. *Journal Européen d'Hydrologie*, 26, fasc 1, 57-82.
- GUIBAUD G., BAUDU M., AYELE J., 1999. Étude du transfert par ruissellement et par drainage de pesticides utilisés sur un verger de pommiers. *Journal Européen d'Hydrologie*, 29, fasc 2, 171-187.
- LOCKE M.A., 1992. Sorption-desorption kinetics of alachlor in surface soil from two soybean tillage systems. *J. Environ. Qual.*, 21, 258-266.
- MALLAWATANTRI A.P., MULLA D.J., 1992. Herbicide adsorption and organic carbon contents on adjacent low input conventional farms. *J. Environ. Qual.*, 21, 546-551.
- MOREAU C., MOUVET C., 1997. Sorption and desorption of atrazine, deethylatrazine, and hydroxyatrazine by soil and aquifer solids. *J. Environ. Qual.*, 26, 416-424.
- PANTONE D.J., YOUNG R.A., BUHLER D.D., EBERTLEIN C.V., KOSKINEN W.C., FORCELLA F., 1992. Water quality impacts associated with pre- and postemergence application of atrazine in maize. *J. Environ. Qual.*, 21, 567-573.
- SEUX R., CLEMENT M., QUINIO J., SAUVAGET G., 1984. Approche des facteurs influençant le transfert du lindane des zones d'épandages vers les eaux superficielles. *Actes du symposium international sur l'écologie terrestre*, Les Arcs, France.
- WEEED D.A.J., KANVAR R.S., STOLTENBERG D.E., PFEIFFER R.L., 1995. Dissipation and distribution of herbicides in the soil profile. *J. Environ. Qual.*, 24, 68-79.