

IMPACT DE PRATIQUES CULTURALES DE CONSERVATION SUR LES CONCENTRATIONS EN HERBICIDES DRAINÉES SOUS CULTURE DE MAÏS

Pierre Lafrance, Pierre Gagné et Olivier Banton

Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau, Université du Québec,
2800 rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1V 4C7

RÉSUMÉ

L'identification des pratiques culturales qui minimisent les risques de contamination des eaux nécessite d'évaluer l'importance des voies de transport des herbicides, notamment par le drainage agricole. L'étude des pertes d'atrazine et de métolachlore par drainage a été réalisée sur six champs cultivés en maïs et soumis à différents travaux du sol et modes d'application des herbicides. Les deux premières pluies d'importance suivant l'application génèrent des concentrations en herbicides dans l'eau de drainage qui peuvent être importantes ($> 50 \mu\text{g/L}$) et qui sont notamment fonction de la hauteur d'eau de précipitation, du délai entre l'événement pluvial et l'application, ainsi que de la texture du sol. Ces conditions, qui varient d'un champ à un autre, rendent difficile l'évaluation de l'impact du seul mode d'application des herbicides sur la grandeur de l'exportation. Cependant, l'application d'herbicides en bandes sur les rangs conduit à des pertes inférieures à celles obtenues avec l'application en surface totale. La fraction de la quantité d'herbicides appliquée qui est exportée par drainage est faible et inférieure à 0,04% pour le métolachlore et à 0,09% pour l'atrazine. Durant la saison de croissance, la faible pluviométrie a peu contribué à l'exportation des herbicides.

Mots clés: eau, contamination, herbicides, drainage, pratiques culturales, conservation

ABSTRACT

In order to minimize the contamination of surface waters due to agricultural practices, one may evaluate the contribution of the transport paths of pesticides, *e.g.* by drainage. In the present study, the losses of atrazine and metolachlor by drainage was monitored under field conditions from six agricultural sites grown with corn. The sites were managed with various tillage and herbicide application. Herbicides concentrations in drainage water reached more than $50 \mu\text{g/L}$ during the two first important rainfall events that occurred after application. The concentration levels appeared to be related to the rainfall (depth of water), to the delay between the application and the rainfall, and to the soil texture. These conditions varied between the six sites studied and this made difficult to evaluate the effect of herbicide application on the losses by drainage. However, banded application over the seeded rows showed a decreased in herbicide losses as compared to the application over the entire surface. The mass losses were low, *i.e.* $< 0.04\%$ and $< 0.09\%$ of the mass applied for metolachlor and atrazine, respectively. The subsequent low rainfall events that occurred during the growing season produced only little loss of herbicides by drainage.

Key words: water, contamination, drainage, agricultural practices, conservation

INTRODUCTION

L'identification des pratiques culturales qui minimisent les risques de contamination des eaux nécessite d'évaluer l'importance des voies de transport des herbicides vers les cours d'eau. Les concentrations en atrazine et en métolachlore, les deux herbicides les plus fréquemment détectés en régions de culture du maïs, peuvent dépasser le critère pour la qualité de vie aquatique, soit respectivement 2 µg/L et 8 µg/L, ou la recommandation canadienne de 5 µg/L pour la somme de l'atrazine et de ses sous-produits dans l'eau potable (Berryman et Giroux, 1994). Parmi les pratiques culturales visant la protection de la qualité des eaux, les travaux de conservation du sol sont reconnus pour limiter, dans plusieurs cas, la quantité d'herbicides exportée par ruissellement (Fawcett *et al.*, 1994). La diminution du ruissellement induit une infiltration d'eau plus importante dans le sol (Flury, 1996). Par ailleurs, l'application d'herbicides en bandes sur le rang de maïs peut réduire la concentration en atrazine dans l'eau de ruissellement ou de drainage (Kay et Baker, 1989; Gaynor *et al.*, 1995a). De plus, les conditions pédo-climatiques affectent les quantités d'herbicide exportées (Flury, 1996; Lafrance et Banton, 1996). Les pertes saisonnières d'herbicides par drainage, qui ont fait l'objet de peu d'études, représentent généralement < 0,1% à 1% de la quantité appliquée (Flury, 1996). Gaynor *et al.* (1995b) ont montré que les pertes d'atrazine par drainage ont été semblables ou supérieures à celles par ruissellement, selon les conditions climatiques de l'année d'étude.

Le but de cette étude est de quantifier, pour une saison de culture, les pertes par drainage de métolachlore, atrazine et dééthyl-atrazine sur six champs présentant des textures de sol et des pratiques culturales représentatives de la culture intensive de maïs-grain. Les pratiques sont: 1) labour et pulvérisation d'herbicides en surface totale ou en bandes, ou 2) semis direct et pulvérisation en surface totale. Les pertes sont évaluées lors des deux premiers événements pluviaux suivant l'application et durant la saison de croissance.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pratiques agronomiques et caractéristiques des sols et des champs

Six champs de culture intensive du maïs-grain ont été étudiés près de St-Hyacinthe (50 km à l'Est de Montréal). Les champs sont localisés dans les municipalités de: Varennes (**Champ 1**); St-Dominique (**Champ 2**); St-Antoine-sur-Richelieu (**Champs 3 et 4**) et St-Valérien-de-Milton (**Champs 5 et 6**). Les cours d'eau récepteurs du drainage sont: **Champ 1**: tributaire du St-Laurent; **Champ 2**: ruisseau des Aulnages; **Champs 3 et 4**: tributaire de la rivière Richelieu; **Champ 5**: ruisseau des Aulnages; **Champ 6**: rivière Noire. Le tableau 1 indique les conditions pédologiques et agronomiques des champs. L'atrazine n'a pas été utilisée en 1994. En 1995, les agriculteurs ont utilisé un mélange de métolachlore et d'atrazine en proportion 2:1 (330 g/L: 162 g/L). Chaque champ est entièrement et exclusivement drainé par un seul drain (profondeur: 1,0-1,3 m).

Pluviométrie et échantillonnage

Le tableau 1 indique la pluviométrie et les périodes de prélèvement de l'eau de drainage.

Tableau 1. Conditions pédologiques (0-20 cm), agronomiques, pluviométriques et périodes d'échantillonnage en 1995

| Sol | Champ agricole | | | | | |
|---|--------------------------|--------------|---------------------|-------------------------|------------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| pH à l'eau | 6,9 | 6,3 | 6,1 | 6,3 | 6,0 | 5,4 |
| Matières organiques (%) | 2,8 | 2,4 | 3,7 | 4,5 | 4,2 | 7,3 |
| Sable/Limon/Argile (%) | 24/24/52 | 12/54/34 | 38/36/26 | 32/40/28 | 36/46/18 | 16/56/28 |
| Texture ^a | A | LLiA | L | LA | L | LLiA |
| Champ | | | | | | |
| Superficie (ha) | 1,2 | 6,0 | 4,0 | 4,0 | 9,0 | 8,0 |
| Pente (%) | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 | 1-3 | 1-3 |
| Pratiques culturales | | | | | | |
| Travail du sol | Semis direct | Semis direct | Labour ^b | Labour | Labour | Labour |
| Application des herbicides | 7 juin (T ^c) | 23 mai (T) | 13 mai (T) | 9 mai (B ^c) | 8 mai (B) | 26 mai (T) |
| Atrazine ^d | 1,21 kg/ha | 1,13 kg/ha | 1,21 kg/ha | 1,10 kg/ha | 1,21 kg/ha | 1,19 kg/ha |
| Métolachlore ^d | 2,47 kg/ha | 2,31 kg/ha | 2,47 kg/ha | 2,24 kg/ha | 2,47 kg/ha | 2,31 kg/ha |
| Eau précipitée durant les deux premiers événements pluviaux (mm) | | | | | | |
| Événement 1/2 : Total | 8/9 : 17 | 20/33 : 53 | 21/16 : 37 | 21/16 : 37 | 21/13 : 34 | 16/30 : 46 |
| Échantillonnage ^e | | | | | | |
| Événement 1 | 30 - 31 | 6 - 7 | 1 - 2 | 6 - 7 | 7 - 8 | 3 - 4 |
| Événement 2 | 37 - 38 | 10 - 12 | 3 - 4 | 8 - 9 | 9 - 10 | 8 - 9 |
| Durant la saison | 39 - 101 | 13 - 116 | 5 - 125 | 10 - 130 | 11 - 131 | 10 - 113 |

^a A: argile, série St-Urbain; LA: loam argileux, série Boucherville; LLiA: loam limono-argileux, série Yamaska; L: loam.

Textures: classification du C.E.P.P.A.C. (1987). Séries de sol: Cann *et al.* (1947) et Lamontagne et Nolin (1990).

^b Le labour a été réalisé à l'automne 1994. Un hersage a eu lieu en 1995 pour la préparation du lit de semence.

^c T: application en surface totale; B: application en bandes (38 cm) avec sarclage mécanique en début juin.

^d Taux d'application de matières actives.

^e Jours après l'application des herbicides. Le drainage a été suivi durant la saison après les deux premiers événements.

Dans un premier temps, l'échantillonnage de l'eau de drainage a été réalisé durant les deux premiers événements pluviaux d'importance (près de 10 mm ou plus) suivant l'application des herbicides. La hauteur d'eau de précipitation a été mesurée à l'aide d'un pluviomètre lors de chaque échantillonnage. Dans un deuxième temps, un suivi de 3,5 à 4,5 mois (selon les dates d'application des herbicides) a été fait tous les dix jours jusqu'à la mi-juillet, puis tous les quinze jours jusqu'à la mi-septembre. Après la mi-juin, les drains n'ont pas généré d'eau dans 55% des cas (faible pluviométrie). L'eau a été recueillie en flacons de 1 L en polyéthylène haute densité (PEHD), matériel très peu adsorbant pour les herbicides étudiés (Topp et Smith, 1992). Pour les drains non submergés, le débit a été estimé lors des prélèvements (flacon de 1 L). Pour les drains partiellement submergés, une méthode par succion a permis de prélever l'eau à l'intérieur du drain. Une extrémité d'un tuyau en cuivre était placée de 30 cm à 60 cm à l'intérieur du drain tandis que l'autre extrémité était reliée à un flacon de 1 L (PEHD): une pompe reliée au flacon a permis d'aspirer l'eau du drain dans celui-ci. Un total de 124 échantillons a été obtenu. Les sédiments ont été éliminés par filtration sur microfibrilles de verre (1,5 µm) puis sur nylon-66 (0,45 µm) et l'eau a été entreposée à -20°C.

Extraction et dosage des composés herbicides

Le métolachlore, l'atrazine et le dééthyl-atrazine (DEA), un sous-produit majeur de l'atrazine, ont été dosés. Le rapport des concentrations DEA/atrazine (RDA) constitue un indicateur de la vitesse de dégradation et de transfert de l'atrazine dans la zone non saturée du sol (Thurman *et al.*, 1992). Les composés ont été adsorbés sur cartouche C-18 (Sep-pak Plus, Environ. Cartridge) puis élués avec de l'acétate d'éthyle saturé en eau. L'extrait a été concentré (250 fois) sous jet d'azote. Le dosage a été fait à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse (Varian, modèle 3400) avec deux détecteurs NPD. Les colonnes d'analyse et de confirmation sont DB5 et DB1701 (J&W Sci., 30 m x 0,25 mm d.i., film 0,25 µm). Un contrôle de qualité (blancs de méthode, échantillons de contrôle et fortifiés, duplicata) a été réalisé. Chaque échantillon a reçu un étalon d'extraction (propoxure ou terbutryne) et d'injection (amétryne). La limite de quantification (plus faible concentration dans l'eau qui est toujours détectée et correctement quantifiée) a été de 0,4 µg/L pour le métolachlore, de 0,1 µg/L pour l'atrazine et de 0,5 µg/L pour le DEA. Les rendements d'extraction sont > 90% pour l'atrazine et le métolachlore et > 60% pour le DEA. Les résultats ont été corrigés pour ces rendements.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Concentrations en composés herbicides

Un échantillonnage par champ a été réalisé avant l'application des herbicides (4 mai 1995). Les concentrations obtenues ont été pour la majorité inférieures à la limite de quantification de la méthode. Les figures présentées ci-après concernent les champs pour lesquels un dépassement notable (fréquence et/ou concentration) de la norme de 5 µg/L pour l'atrazine et ses sous-produits a été observé pour l'eau de drainage.

Durant les deux premiers événements pluviaux, les concentrations obtenues pour le **Champ 1**

sont très faibles ($< 0,6 \mu\text{g/L}$). Ceci a été attribué à: 1) un délai de plus de un mois entre l'application des herbicides et les échantillonnages; 2) de faibles hauteurs d'eau de précipitation, et: 3) un drainage limité pour ce sol argileux durant une période de faible pluviométrie. Pour le **Champ 2** (Fig. 1), une remontée des concentrations est observée durant chacun des deux événements. Pour le premier événement, cette augmentation atteint $16 \mu\text{g/L}$, $14 \mu\text{g/L}$ et $1,7 \mu\text{g/L}$ respectivement pour le métolachlore, l'atrazine et le DEA. Durant le second événement, l'augmentation atteint $38 \mu\text{g/L}$ et $8 \mu\text{g/L}$ respectivement pour les composés-parents et le DEA. Ceci serait dû à: 1) une importante hauteur d'eau de précipitation (principalement pour le second événement); 2) un délai relativement court entre l'application et les événements, et: 3) un drainage relativement efficace pour ce loam limono-argileux sous semis direct, i.e. sans travail du sol (possible infiltration préférentielle au travers de la macroporosité du sol ou des biopores causés par les vers de terre). Lors de l'apparition du pic de concentration en atrazine durant un événement, le RDA est faible (0,12 et 0,21). Le RDA augmente cependant à la fin des événements (0,57 et 0,45) en présence de faibles concentrations en atrazine ($\approx 1 \mu\text{g/L}$). Pour les **Champs 3** et **4** qui sont adjacents, le délai entre l'application et les échantillonnages est court et les hauteurs d'eau de précipitation sont identiques. La quasi-totalité des concentrations a été inférieure à $1-2 \mu\text{g/L}$ pour ces deux champs. Les concentrations maximales en métolachlore et en atrazine pour le **Champ 3** (Fig. 2) sont respectivement de $6,4 \mu\text{g/L}$ et $4,2 \mu\text{g/L}$. Ces concentrations obtenues sous application en surface totale sont très légèrement plus élevées que celles observées au **Champ 4** qui est soumis à une application en bandes (concentrations respectives de $4 \mu\text{g/L}$ et de $2 \mu\text{g/L}$).

Pour les **Champs 5** et **6**, le délai entre l'application et les échantillonnages a été court. Dans le cas du **Champ 5**, les concentrations en composés-parents ont été inférieures à $4,4 \mu\text{g/L}$ durant le premier événement. Durant le second événement, les concentrations en métolachlore et en atrazine ont atteint respectivement $5,3$ et $6,7 \mu\text{g/L}$. Les RDA ont été de 0,27 et de 0,22 lors de l'apparition du pic de concentration en atrazine durant les deux événements. Pour la fin du premier événement qui a présenté une faible concentration en atrazine ($1,8 \mu\text{g/L}$) supérieure à la limite de détection, le RDA a augmenté à 0,33. Dans le cas du **Champ 6** (Fig. 3), la remontée des concentrations durant le premier événement atteint $54 \mu\text{g/L}$, $44 \mu\text{g/L}$ et $5,0 \mu\text{g/L}$, respectivement pour le métolachlore, l'atrazine et le DEA. Durant le second événement, ces concentrations maximales ont été respectivement de $42 \mu\text{g/L}$, $45 \mu\text{g/L}$ et $14,2 \mu\text{g/L}$. Pour ces deux champs qui sont soumis au labour, les concentrations les plus élevées sont obtenues pour le **Champ 6**, sous application en surface totale, comparativement au **Champ 5**, sous application en bandes. Ce résultat est obtenu malgré le fait que le sol du **Champ 6** contient une teneur en matières organiques plus élevée que celle du **Champ 5**, et qu'il est donc davantage susceptible d'adsorber les herbicides. L'application en bandes paraît ainsi s'accompagner d'une nette diminution des concentrations drainées en composés herbicides. Toutefois, la pluviométrie plus importante au **Champ 6** (application en surface totale) a pu contribuer à l'infiltration des composés herbicides.

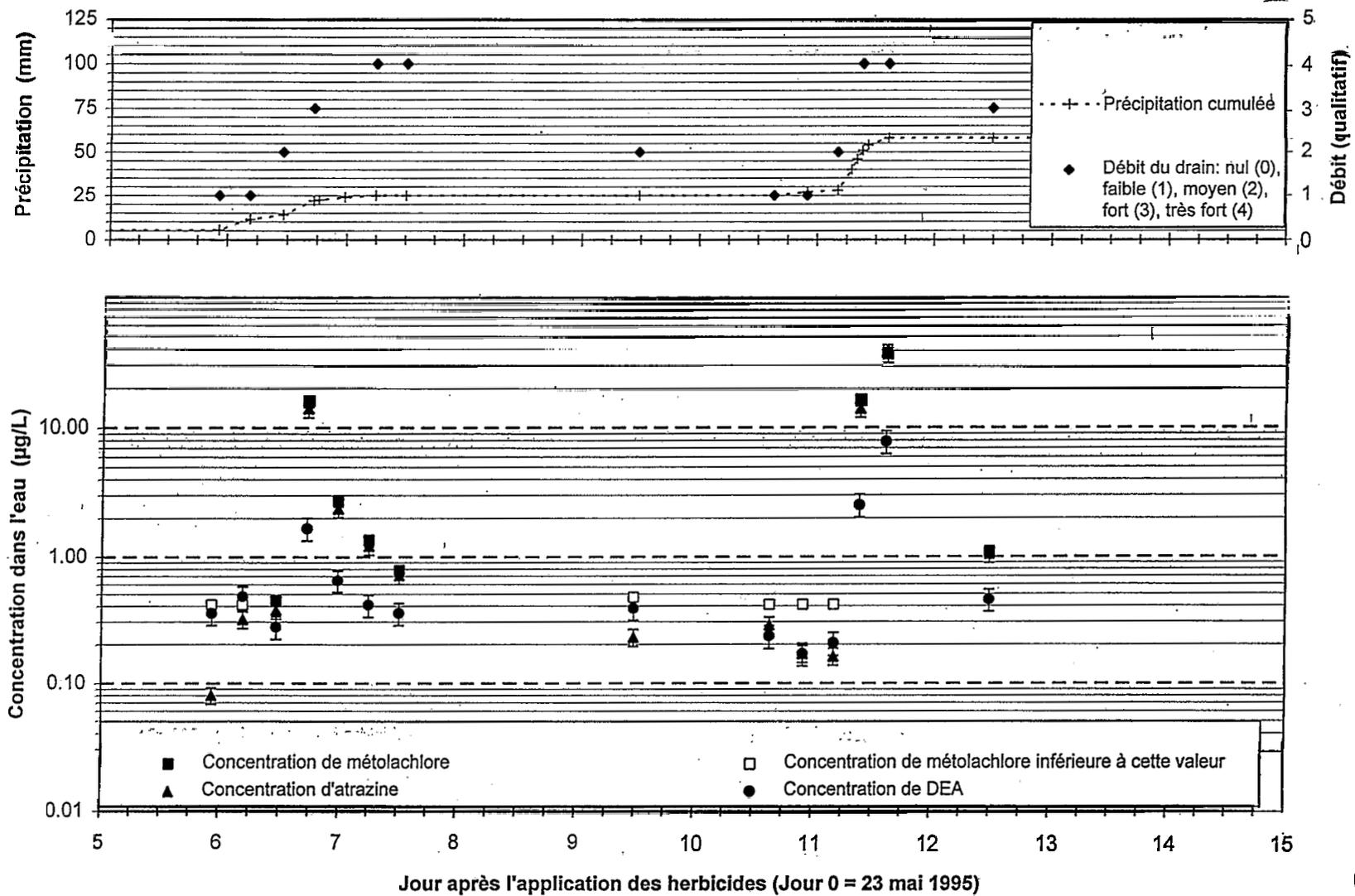


Figure 1. Précipitations, débit du drain et concentrations des composés herbicides dans l'eau de drainage au Champ 2 (deux premières pluies)

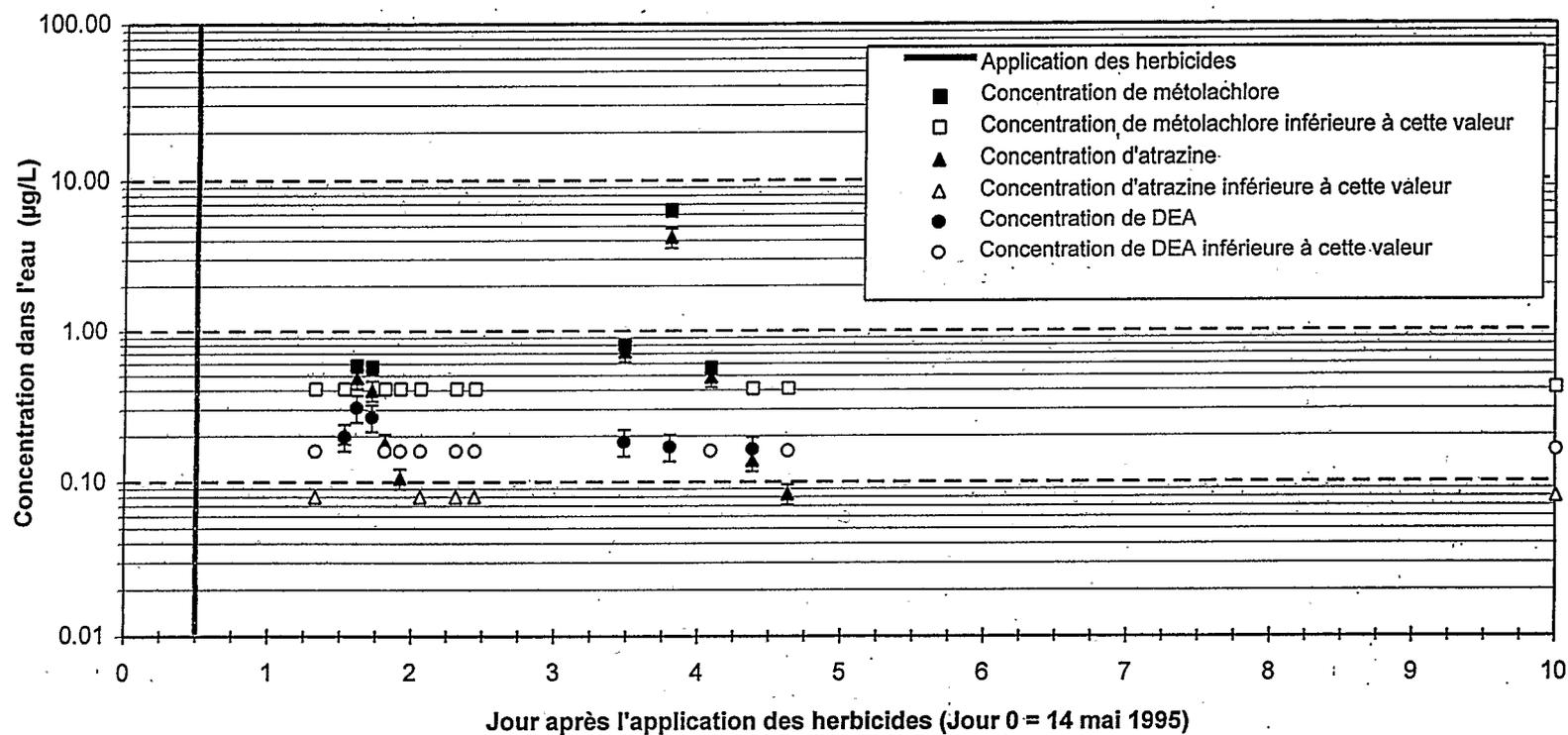
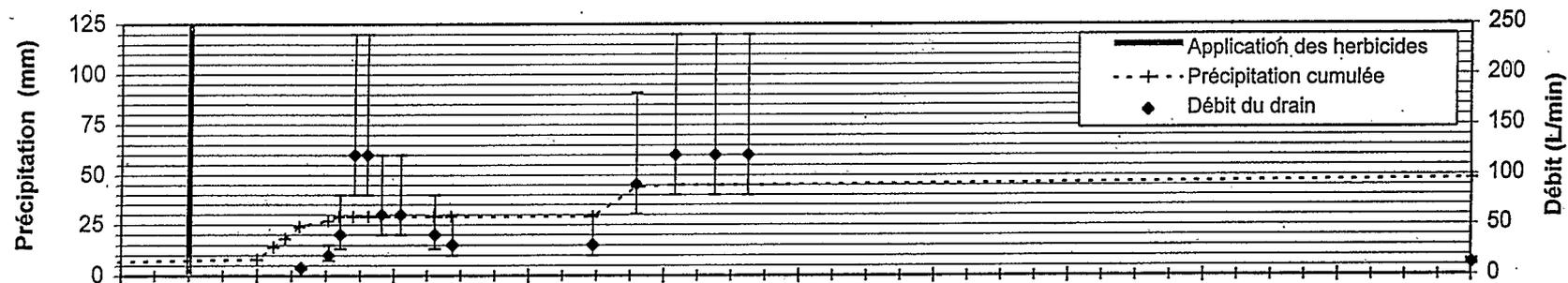


Figure 2. Précipitations, débit du drain et concentrations des composés herbicides dans l'eau de drainage au Champ 3 (deux premières pluies)

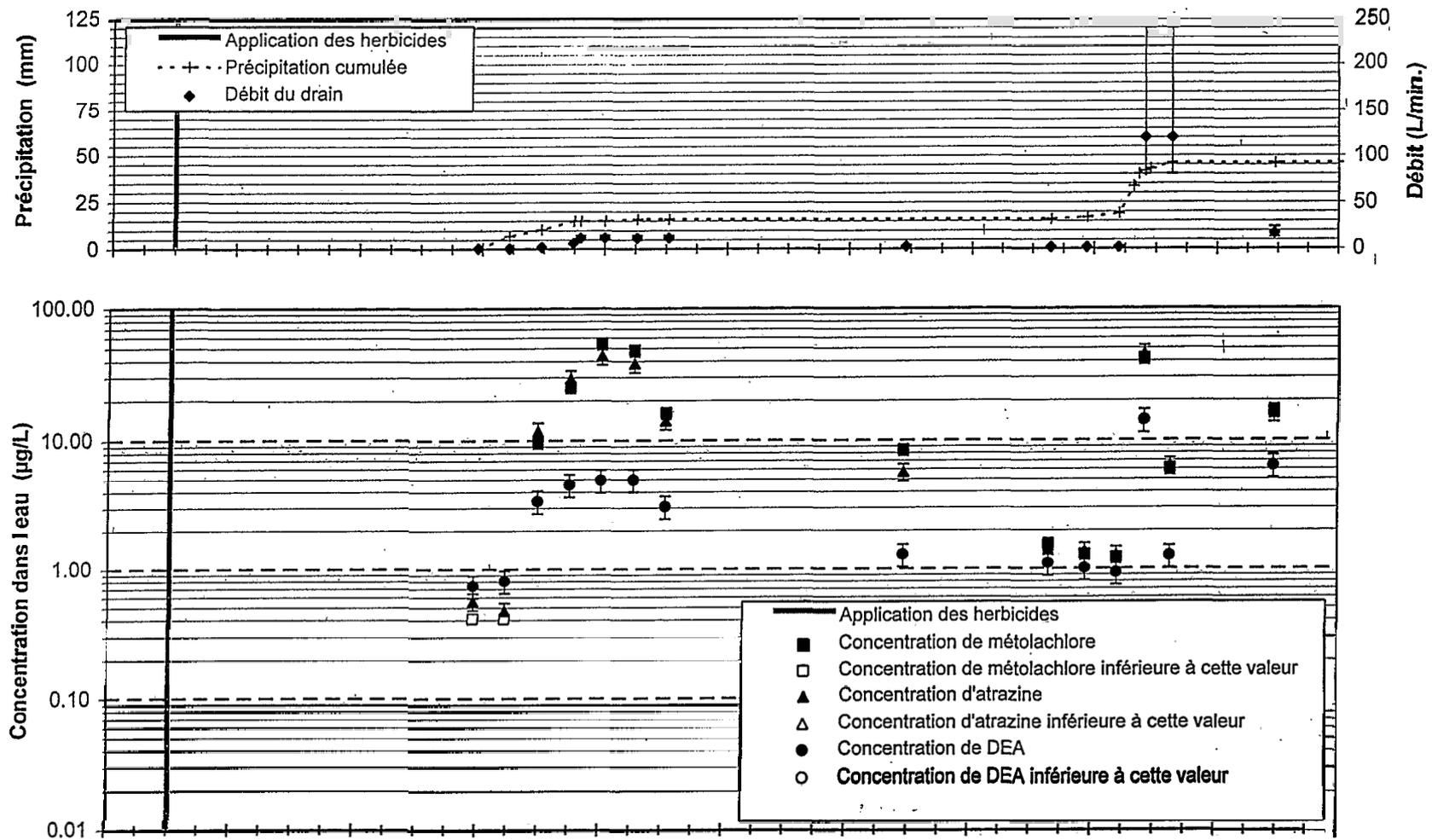


Figure 3. Précipitations, débit du drain et concentrations des composés herbicides dans l'eau de drainage au Champ 6 (deux premières pluies)

Dans le cas du **Champ 6** et tel qu'observé pour les **Champs 2 et 5**, on note une relation inverse entre le RDA et la concentration en atrazine. Les augmentations de la concentration en atrazine (pics) durant chacun des deux événements ont été de 88 et de 35 fois, alors que ces augmentations pour le DEA n'ont été respectivement que de 6 et de 16 fois. L'augmentation plus importante de la concentration en atrazine lors de l'atteinte d'un pic se traduit donc par une faible valeur du RDA (0,11 et 0,31). Inversement, les valeurs maximales du RDA sont obtenues à la fin des deux événements (0,70 et 0,94), en présence de faibles concentrations en atrazine (1,3 µg/L et 1,6 µg/L) qui sont alors voisines de celles en DEA (0,9 µg/L et 1,5 µg/L). Entre les pics de concentration des premier et second événements, le RDA a augmenté de près de trois fois, montrant ainsi une déalkylation notable de l'atrazine durant un délai de 4,4 jours. L'augmentation du RDA au cours du temps traduit généralement la durée du séjour de l'atrazine en zone non saturée, et donc l'importance de la dégradation de ce composé-parent. Par ailleurs, les résultats obtenus ont montré que le RDA varie grandement durant un événement pluvial. Pour ces courts intervalles de temps (e.g. un ou deux jours) survenant peu de temps (moins de 10 jours) après l'application de l'atrazine, le RDA dans l'eau de drainage traduirait alors davantage: 1) la mobilité relative de l'atrazine et du DEA, et: 2) l'arrivée de concentrations élevées en atrazine non encore dégradée, concomittante avec celles relativement stables en DEA (dégradation peu importante de l'atrazine en DEA durant ces courts intervalles de temps).

Après les deux premiers événements d'importance et durant la saison de croissance (voir tableau 1 pour les périodes suivies), les **Champs 1 à 4** ont montré des concentrations inférieures à 0,7 µg/L. Le **Champ 5** a présenté au jour 24 des concentrations en métolachlore, en atrazine et en DEA respectivement de 5,3 µg/L, 6,7 µg/L et 1,5 µg/L. Pour les autres jours, les concentrations ont été inférieures à 2 µg/L. Le **Champ 6** a montré des concentrations en composés herbicides inférieures à 10 µg/L (jour 13) et à 3 µg/L (autres jours). Les concentrations observées durant cette période sont faibles. Compte tenu du très faible débit de drainage observé, les charges en composés exportées par drainage durant la saison sont considérées comme minimales. Dans le cas du **Champ 6** et 16 jours après les deux événements, le RDA a été de 0,94 puis est demeuré relativement stable (0,85) durant 42 jours. Cette valeur de RDA traduit l'importante dégradation de l'atrazine lors de son lent transfert en zone non saturée.

Fraction de la quantité d'herbicides exportée par drainage

Dans le cas des **Champs 2 et 4**, la sortie du drain était fréquemment submergée dans l'eau du cours d'eau. Pour les autres champs, les masses exportées (en mg/ha) ont pu être évaluées à partir du débit et de la concentration en herbicides. La fraction de la quantité d'herbicides exportée par drainage (masse exportée/masse appliquée X 100, en %), pour l'ensemble des deux premiers événements pluviaux est la suivante:

| | Champ 1 | Champ 3 | Champ 5 | Champ 6 |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Métolachlore | 0,000-0,000 | 0,002-0,007 | 0,001-0,004 | 0,013-0,039 |
| Atrazine | 0,000-0,000 | 0,002-0,010 | 0,002-0,010 | 0,025-0,083 |

Les intervalles de valeurs représentent les erreurs liées aux mesures du débit et de la concentration (pour cette dernière: 10% pour le métolachlore et 15% pour l'atrazine). L'erreur sur la mesure du volume d'eau affecte les valeurs du débit et donc celles de la masse exportée. Elle a été de 10% et jusqu'à 50% pour des débits respectivement inférieurs et supérieurs à 6 L/min. Ces intervalles ont été calculés selon la méthode du développement limité en série de Taylor de la dérivée totale (Doebelin, 1983). La fraction exportée du métolachlore est inférieure à celle de l'atrazine: ceci est dû au fait que, bien que les masses exportées aient été voisines pour les deux herbicides (non montré), la masse de métolachlore appliquée a été deux fois supérieure à celle d'atrazine.

Le **Champ 1** présente des masses exportées très faibles pour les raisons précitées. Les **Champs 3 et 6** sont soumis au labour avec application d'herbicides en surface totale. La fraction appliquée d'herbicides qui est exportée par drainage est bien plus élevée pour le **Champ 6**. Ceci est attribué à l'importante hauteur d'eau de précipitation lors du second événement au **Champ 6**. Sous labour, la fraction de métolachlore exportée avec une application en bandes au **Champ 5** est inférieure à celle obtenue avec une application en surface totale au **Champ 3**. Un résultat semblable pour les deux herbicides a été obtenu avec le **Champ 5** (bandes) et le **Champ 6** (surface totale). La plus faible exportation pour le **Champ 5** (bandes) pourrait aussi être en partie attribuable au plus long délai entre l'application et les événements, comparativement aux **Champs 3 et 6** (surface totale). De plus, l'exportation plus élevée pour le **Champ 6** pourrait avoir été causée en partie par l'importante hauteur d'eau de précipitation lors du second événement. Après les deux événements, les pertes d'herbicides durant la saison de croissance ont été minimales suite à une faible pluviométrie et à l'assèchement des drains.

CONCLUSION

Pour un sol argileux présentant un faible drainage et des événements pluviaux survenant un mois après l'application, les pertes d'herbicides sont très faibles. Pour des sols dont la texture varie de loam argileux à loam, trois champs ont montré des concentrations généralement inférieures à 1-2 µg/L et atteignant quelques fois la norme pour la qualité de l'eau potable de 5 µg/L pour la somme de l'atrazine et de ses sous-produits. Deux champs ont présenté des concentrations en composés-parents atteignant quelques dizaines de µg/L. Ces concentrations sont bien supérieures aux normes ou critères pour la qualité de l'eau (vie aquatique ou eau potable). Les concentrations en herbicides dans l'eau de drainage seront toutefois diluées par la suite dans le cours d'eau récepteur. Pour les conditions pédo-climatiques rencontrées, l'application d'herbicides en bandes conduit à des pertes par drainage inférieures à celles obtenues avec l'application en surface totale. Toutefois, la texture du sol, le délai entre l'application et les événements pluviaux, ainsi que les hauteurs d'eau de précipitation peuvent varier d'un champ à l'autre, ce qui rend difficile l'évaluation de l'impact du seul mode d'application des herbicides sur la grandeur de l'exportation. La fraction de la quantité d'herbicides appliquée qui est exportée par drainage est faible et inférieure à 0,04% pour le métolachlore et à 0,09% pour l'atrazine. Le suivi des pertes d'herbicides durant d'autres saisons permettrait d'estimer la variabilité inter-annuelle des concentrations drainées sous culture intensive du maïs. Un tel suivi contribuerait à confirmer l'intérêt de l'application en bandes pour la diminution des pertes par drainage.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient MM Florian Bernard et Marc Trudelle (F. BERNARD Inc., St-Hyacinthe, Qué.) pour le choix des sites et le suivi des pratiques culturales. Ce projet a été financé par le programme FRDTE du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec et par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada.

BIBLIOGRAPHIE

- BERRYMAN D. et GIROUX I., 1994. La contamination des cours d'eau par les pesticides dans les régions de culture intensive du maïs au Québec. Campagnes d'échantillonnage de 1992 et 1993. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Québec, Envirodoq EN940594, rapport PES-4, 134 p.
- CANN D.B., LAJOIE P. et STOBBE P.C., 1947. Soil survey of Shefford, Brome and Missisquoi counties in the Province of Quebec. Experimental Farm Service. Dominion Department of Agriculture. Quebec Department of Agriculture and MacDonald College of McGill University. 84 p.
- C.E.P.P.A.C. Comité d'experts sur la prospection pédologique d'Agriculture Canada, 1987. Le système canadien de classification des sols. Direction générale de la recherche. Agriculture Canada. No 1646, 170 p.
- DOEBELIN E.O., 1983. *Measurement systems. Applications and design*. McGraw-Hill, Third edition, 876 p.
- FAWCETT R.S., CHRISTENSEN B.R. et TIERNEY D.P., 1994. *J. Soil Water Conservation*, 49: 126-135.
- FLURY M., 1996. *J. Environ. Qual.*, 25: 25-45.
- GAYNOR J.D., TAN C.S., DRURY C.F., VAN WESENBEECK I.J. et WELACKY T.W., 1995a. *Water Qual. Res. J. Canada*, 30(3): 513-531.
- GAYNOR J.D., MacTAVISH D.C. et FINDLAY W.I., 1995b. *J. Environ. Qual.*, 24:246-256.
- KAY R.L. et BAKER J.L., 1989. Trans. ASAE, paper no 89-2157.
- LAFRANCE P., BANTON O. et F. BERNARD Inc., 1996. Évaluation environnementale des pratiques culturales sur maïs pour la réduction des pertes d'herbicides. INRS-Eau, rapport No R-390 pour la Direction de l'information environnementale et de la recherche, ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 919 p.
- LAMONTAGNE L. et NOLIN M.C., 1990. Étude pédologique du comté de Verchères (Québec). Équipe pédologique du Québec. Centre de recherches sur les terres, Agriculture Canada, Sainte-Foy, Québec. Contribution no 87-92-1990. 287 p.
- TOPP E. et SMITH W., 1992. *J. Environ. Qual.*, 21: 316-317.
- THURMAN E.M., GOOLSBY D.A., MEYER M.T., MILLS M.S., POMES M.L. et KOLPIN D.W., 1992. *Environ. Sci. Technol.*, 26: 2440-2447.

**RESEAU
EROSION**



Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION

Pour citer cet article / How to cite this article

Lafrance, P.; Gagné, P.; Banton, O. - Impact de pratiques culturales de conservation sur les concentrations en herbicides drainées sous culture de maïs, pp. 506-516, Bulletin du RESEAU EROSION n° 18, 1998.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr