

Etude sur lysimètres de l'incidence d'une croûte de battance sur le lessivage d'atrazine, DEA, métolachlor et diuron

J-Y Chapot, C Kanaliotis*, J-E Delphin, C Schneider, J-L Meyer, G Schwab

Institut National de la Recherche Agronomique
UMR Vignes et Vins d'Alsace
Equipe Agriculture et Environnement Colmar

* DEA, ENSAIA Laboratoire Sols et Environnement Nancy

Etude conduite avec le soutien financier de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse

Sommaire

PROBLEMATIQUE

OBJECTIFS

METHODOLOGIE

- les facteurs de variations étudiés
 - ▄ mesures des flux d'eau
- mesures des concentrations
- mesures de la vitesse d'infiltration
- mesures de l'humidité du sol avant chaque irrigation
- mesures de la tension de l'eau au cours d'un épisode de drainage
- bougies poreuses de surface
- bougies poreuses dans le profil
- molécules comparées
- les analyses

RESULTATS

A/ LES TENEURS EN PESTICIDES

- 1 - Evolution des teneurs moyennes de l'eau de drainage entre 1 et 90 jours
- 2 - Cinétique d'évolution des concentrations de l'eau de drainage entre 0 et 48 heures, au cours des six premières irrigations
- 3 - Cinétique d'évolution des concentrations moyennes des bougies poreuses en surface entre 1 et 90 jours
- 4 - Cinétique d'évolution des concentrations moyennes du sol en surface extrait à l'eau
- 5 - Evolution des teneurs des bougies dans le profil

B/ LES FLUX D'EAU

- 1 - Cinétique d'évolution du drainage au cours des irrigations
- 2 - Comparaison de l'infiltrabilité du sol sur les 4 traitements

DISCUSSION

- 1 - Bougies poreuses de surface
- 2 - Relations état de surface du sol et teneurs de l'eau drainée
 - 2 -1/ Risques de contamination directe au cours de la phase de transferts préférentiels rapides
 - 2 -2/ Risques de contamination consécutifs à l'entraînement par transferts préférentiels, d'une plus forte proportion de pesticides en profondeur

CONCLUSIONS

PROBLEMATIQUE

Parmi les facteurs qui influencent le lessivage des pesticides, l'interaction entre les caractéristiques des flux d'eau et la porosité du sol est importante. La porosité du sol dans l'horizon supérieur et notamment en surface peut être modifiée par le climat et les pratiques culturales. Elle peut avoir une incidence sur la partition de l'eau entre transferts rapides par des voies de circulation préférentielles et un écoulement plus lent dans une porosité plus fine. La circulation rapide d'une partie de l'eau par des pores grossiers peut modifier la distribution des pesticides avec la profondeur. Les facteurs qui vont influencer la vitesse des transferts d'eau devraient avoir une incidence sur la durée et l'intensité du processus d'adsorption. Des transferts en profondeur plus élevés pourraient, du fait de la diminution de la teneur en matière organique, favoriser la désorption.

On a fait l'hypothèse que lors d'événements pluvieux intenses, temporairement supérieurs aux capacités d'infiltration du sol, l'état de surface du sol en modifiant de façon variable l'infiltration, devrait influencer la part des transferts d'eau rapides et lents. On a cherché à mesurer quelle pouvait être l'incidence de l'état poral du sol en surface sur l'**infiltrabilité** et les transferts de pesticides. L'incidence de l'état de surface du sol sur le lessivage de pesticides a été peu étudié.

OBJECTIFS

On a comparé l'effet de la présence d'une croûte de **battance** sur le lessivage de pesticides. On a cherché à établir des relations entre flux d'eau et concentration en pesticides de l'eau drainée et entre les teneurs de l'eau à différents niveaux de son transfert dans le profil. L'étude a été conduite sur lysimètres, sur 2 types de sol et avec 3 molécules.

Le dispositif lysimétrique de Colmar a été construit en 1983, financé pour partie par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Ministère de **L'Environnement** et l'**INRA**.

Le choix de cet objectif a été motivé par des raisons de cohérence avec le contexte pédologique régional, l'importance des sols limoneux battants et par le souci d'une retombée éventuelle au niveau des pratiques culturales. Sur le plan scientifique, il se justifie parce qu'il existe moins d'une dizaine de publications sur le thème de l'effet d'une croûte de **battance** sur le lessivage des pesticides. Par ailleurs du point de vue méthodologique l'outil lysimétrique est adapté à l'étude des relations entre débits d'eau et concentrations en pesticides. Le lysimètre de grande dimension (**2m*2m* 1m**) permet par rapport à la colonne, d'intégrer la présence de macropores, notamment ceux liés à la macrofaune.

METHODOLOGIE

Les facteurs de variations étudiés -

Quatre traitements sont comparés sur les douze lysimètres, 2 états de surface et 2 types de sol soit 3 répétitions par traitement :

- l'état de surface, sur des sols non cultivés : présence d'une croûte de **battance** ; sol travaillé sur 3-4 cm ;
- le type de sol, limono-argileux (loess) et sablo-argilo-limoneux (alluvions du Rhin), respectivement appelé **LA** et **SAL**;
- les propriétés de la molécule avec notamment une variabilité de l'**adsorption** (atrazine, **DEA**, métolachlor, diuron);

Mesures des flux d'eau -

Les débits d'eau de drainage ont été mesurés après 7 irrigations entre mai et octobre 2001. Des apports d'eau de l'ordre de quinze à vingt millimètres, effectués en 2 apports successifs (de 8 - 10 mm) ont été réalisés avec une rampe d'irrigation qui fournit une pluviométrie horaire élevée de 90-100 **mm/heure**.

Mesures des concentrations -

Les concentrations de l'eau ont été mesurées à différents niveaux du profil lors des irrigations :

- point zéro avant l'expérience, des bougies dans le profil et dans l'eau de drainage à plusieurs dates ;

- concentrations en surface (0 – 2 cm) avec des bougies poreuses à forte conductivité hydraulique sur une durée de l'ordre de l'heure;

- teneurs des bougies à 6 profondeurs dans le profil, sur une durée de 48 heures ;

- concentrations de l'eau de drainage au cours du temps, à 6, ~~12~~, ~~24~~ et 48 heures respectivement lors des irrigations 2 à 7 et lors de prélèvements beaucoup plus fréquents pour la première irrigation. La première irrigation a été effectuée le lendemain du traitement, les suivantes à ~~10~~, ~~22~~, 37, ~~70~~, ~~91~~ et 175 jours.

Les concentrations du sol en surface (0-5 cm) ont été déterminées avant chaque irrigation à partir de 2 extractions successives à l'eau de 6 heures chacune, le rapport **sol/eau** étant de $\frac{1}{10}$.

Mesures de la vitesse d'infiltration -

Des mesures ont été réalisées sur les 4 traitements (sols avec ou sans croûte) avec l'infiltromètre" Trims ". Elles ont été effectuées aux potentiels de l'eau 0, -1, -3, -5, -7 cm d'eau pour mettre en évidence d'éventuelles différences de distribution de la taille des pores correspondant à ces potentiels.

Mesures de l'humidité du sol avant chaque irrigation -

Le sol, non cultivé, a été maintenu proche de la capacité au champ entre les sept irrigations. Une mesure de l'humidité du sol a été faite avec la sonde à neutrons, complétée par des mesures d'humidité gravimétrique sur l'horizon O-1 0 cm, pour pallier le manque de précision de la mesure neutronique en surface.

Mesures de la tension de l'eau du sol au cours d'un épisode de ressuyage -

Elle a été suivie sur les 2 sols suite à une pluie de 30 mm. Quatre lysimètres sont équipés de tensiomètres à six profondeurs.

Bougies poreuses de surface - Les prélèvements ont été réalisés sur 2 lysimètres par traitement. Une analyse par lysimètre a été effectuée à partir du regroupement des prélèvements de quatre bougies.

Bougies poreuses dans le profil - Les mesures ont été effectuées sur 2 lysimètres par traitement lors des sept irrigations. Dix bougies équipent chaque lysimètre à ~~12~~, ~~22~~, 37, 52, 67, 82 cm avec 2 répétitions aux quatre premiers niveaux.

Molécules comparées -

	Atrazine	Métolachlor	Diuron
Matières actives g/ha	1000	3072	1800
Koc ml/g	40 - 170	120 - 300	400
DT50 jours	50	100	95
Solubilité eau mg/l	30	530	42

Les doses apportées sont les doses recommandées. L'apport a été réalisé le **2/05/2001**.

Les analyses - Elles ont été faites au Laboratoire **d'Agronomie** de Colmar par HPLC. Des échantillons sont analysés pour comparaison, par le Laboratoire Sols et Environnement de **L'ENSAIA** de Nancy (Professeur Michel Schiavon).

RESULTATS

A/ LES TENEURS EN PESTICIDES

1 - Evolution des teneurs moyennes de l'eau de drainage entre 1 et 90 jours

Les teneurs moyennes à 48 heures ont été reconstituées par le calcul à partir des mesures intermédiaires. Globalement sur la période on observe 2 types de courbes très différents correspondant aux traitements avec et sans croûte (**fig 1 et 2**).

Sur le traitement "**croûte**" les concentrations sont fortes lors de la première irrigation, comprises selon le sol entre 15 - 40 **µg/l** pour l'atrazine et le diuron, et 30 - 60 **µg/l** pour le métolachlor. Au bout de dix jours elles sont fortement réduites, comprises entre 3 et 5 **µg/l** pour les 3 molécules, puis elles diminuent régulièrement jusqu'à 90 jours, elles sont alors de l'ordre de **0,7 µg/l** pour l'atrazine et le diuron et de **1,5 µg/l** pour le métolachlor. Sur le traitement "**sans croûte**" les concentrations sont inférieures à 3 **µg/l** lors de la première irrigation, puis elles diminuent régulièrement jusqu'à **0,1 - 0,2 µg/l**.

On observe une différence de teneurs de l'eau drainée entre les 2 sols. Elles sont plus élevées sur le sol sablo-limono-argileux. Sur les traitements "**croûte**", elles sont fortes lors de première irrigation, les teneurs sont 2 fois plus élevées, puis les écarts sont proportionnellement plus limités, ils varient au cours du temps d'environ 1 **µg/l** à 0,2 **µg/l**. Sur les traitements "**sans croûte**" les différences sont plus faibles, mais les teneurs sont toujours supérieures sur le sol sableux.

Les différences de concentrations dans l'eau de drainage **entre les 3 molécules** appliquées en surface sont relativement faibles. Les teneurs en métolachlor sont un peu plus élevées. L'interprétation n'est pas simple puisque les doses et les propriétés des molécules varient. Pour les 3 molécules atrazine, métolachlor, diuron les doses recommandées et appliquées varient dans le rapport 1, 3, **1,8**. Le Koc du diuron est plus élevé, la demi-vie de l'atrazine est inférieure de moitié à celle des 2 autres molécules, la solubilité dans l'eau du métolachlor est dix fois plus élevée que celle des deux autres molécules. Pour le métolachlor, solubilité et dose respectivement plus fortes, vont dans le sens d'une teneur un peu plus élevée surtout lors de la première irrigation, Les teneurs en **DEA**, métabolite de l'atrazine, sont faibles et stables sur chaque traitement au cours des 3 mois, de l'ordre de **1,5** et **0,5 µg/l** respectivement sur les sols sableux et limoneux. Elles sont plus élevées sur le sol sableux mais à l'inverse des trois molécules apportées, les teneurs sont un peu plus fortes pendant toute la période sur le traitement sans croûte. L'infiltration étant plus élevée sur ce traitement, on peut faire l'hypothèse d'une dégradation plus forte de l'atrazine dans l'horizon supérieur. Les teneurs en **DEA** de l'eau drainé entre 0 et 48 heures, au cours des six irrigations, sont relativement constantes. Les différents types d'eau drainés au cours de chaque épisode de transfert,

semblent avoir une concentration proche ce qui conduit à supposer que la concentration de l'eau mobile du profil de sol est homogène.

2 - Cinétique d'évolution des concentrations de l'eau de drainage entre 0 et 48 heures, au cours des six premières irrigations

On observe (fig 3 à 9) sur les traitements "croûte" pour les 3 molécules apportées, au cours de la première irrigation, une diminution des concentrations, forte entre zéro et 12 heures, très lente entre 12 et 48 heures. Lors des irrigations suivantes entre 10 et 90 jours, les teneurs sont plus élevées à 6 heures puis relativement stables entre 12 et 48 heures. D'une irrigation à la suivante, on constate une diminution des concentrations respectivement à 6 heures et sur la période 6 - 48 heures. Dans les conditions de l'expérience les transferts préférentiels ont une incidence sur les teneurs du premier prélèvement, à 6 heures. Entre 6 et 48 heures, l'augmentation de la durée ne semble pas avoir d'effet significatif sur l'adsorption, les teneurs restent stables.

Sur les traitements "sans croûte" les teneurs faibles sont stables entre zéro et 48 heures. Si le maximum de transferts semble se faire dans la mésoporosité, puisqu'ils sont lents, cependant les faibles concentrations observées dès les premiers drainages traduisent l'existence de quelques transferts directs par les macropores.

Les teneurs diminuent au cours des irrigations successives, la dissipation est liée à l'effet de l'adsorption, la dégradation, la dilution, le lessivage en fonction du temps.

3 - Cinétique d'évolution des concentrations moyennes des bougies poreuses en surface entre 1 et 90 jours

Pour chaque molécule les teneurs des bougies de surface sont proches sur les 4 traitements (fig. 10). Il n'y a pas de différence, malgré un taux de matière organique de l'horizon supérieur est un peu plus élevé sur le sol limoneux, soit respectivement 2,1 et 1,9 % sur les 2 sols et bien que sur le traitement "sans croûte" le travail du sol sur 3-4 cm ait pu entraîner une certaine dilution. L'évolution des teneurs des molécules au cours du temps est comparée pour la moyenne des quatre traitements. Pour les 3 molécules la diminution des teneurs est forte au cours des 20 premiers jours (de 3500 à 500 µg/l), puis plus lente (de 500 à 50 µg/l entre 20 et 90 jours). Les teneurs sont les plus faibles pour l'atrazine ce qui est en accord avec la plus faible dose apportée, le Koc le plus bas, une vitesse de dégradation deux fois plus rapide. L'évolution des teneurs en diuron et métolachlor est assez proche. On aurait pu attendre des teneurs en métolachlor supérieures, au moins pendant la période suivant l'apport, du fait de la plus forte dose apportée, d'un Koc inférieur, tandis que la durée de la demi-vie est comparable. C'est ce qu'on observe dans le cas des extractions du sol à l'eau du sol en surface.

4 - Cinétique d'évolution des concentrations moyennes du sol en surface extrait à l'eau

De même que les teneurs des bougies de surface, les teneurs de la solution du sol extrait à l'eau sont proches sur les quatre traitements, cette relation qui est cohérente. L'évolution des teneurs des molécules au cours du temps est comparée pour la moyenne des quatre traitements (fig. 10). On observe une évolution des teneurs globalement comparable pour les trois molécules, avec des pentes très différentes avant et après vingt jours. La méthode d'extraction du sol à l'eau, relativement énergique, fournit une estimation sans doute proche du maximum extractible à l'eau. Les valeurs obtenues sont supérieures à celles des bougies. Ces teneurs dépendent du rapport d'extraction. Les teneurs des bougies, suite à une pluie intensive sont en première approche inférieures de 50 % à celles mesurées dans les conditions de réalisation du test de laboratoire. L'évolution des teneurs des bougies est conforme à celle du sol extrait à l'eau.

5 - Evolution des teneurs des bougies dans le profil

Les résultats sont en cours de traitement.

B/ LES FLUX D'EAU

1 - Cinétique d'évolution du drainage au cours des irrigations

Le drainage a été suivi avec une fréquence inférieure à l'heure en début de percolation puis les mesures ont été espacées jusqu'à la fin du ressuyage. On présente les débits sous forme de graphique entre 0-6 heures et 0-48 heures (fig. 1 à 16). Les cinétiques de drainage des traitements avec et sans croûte se distinguent très nettement. En moyenne sur les traitements "avec croûte", le drainage débute rapidement après l'irrigation, souvent après une trentaine de minute et le débit est rapide jusqu'à 6 heures. Au delà commence la phase de ressuyage lent. Sur les traitements "sans croûte" le début du drainage est nettement retardé, on observe en moyenne une étape de transferts d'eau lents jusqu'à 6 heures, suivie d'une phase d'augmentation des débits, puis un ralentissement du ressuyage. Le drainage des 2 traitements semble correspondre à 2 types de cinétiques.

Le drainage est un peu plus élevé sur le traitement "croûte" ; il est supérieur de 10 % pour les six irrigations cumulées, soit respectivement pour les traitements "croûte et "sans croûte" 163 et 147 mm sur le sol limoneux et 187 et 166 mm sur le sol sableux.

Le drainage est plus élevé sur le sol sableux, de 14 % sur la même période.

Au bout de 6 heures, lors du premier prélèvement pour analyses, le drainage des traitements sans croûte est de l'ordre de un millimètre tandis qu'il varie de 3 à 8 mm avec croûte. Vu le faible niveau de drainage au bout de 6 heures sur le traitement sans croûte, un premier prélèvement plus précoce eu été peu réaliste.

2 - Comparaison de l'infiltrabilité du sol sur les 4 traitements

L'infiltrabilité des 2 sols est comparable à ces niveaux de potentiels respectivement en présence ou absence de croûte (fig. 17 et 18). Ces niveaux de potentiel compris entre zéro et moins 70 mm d'eau caractérisent les pores de plus grande taille. Si cette catégorie de pores est relativement comparable sur les 2 sols, la proportion de pores plus fins devrait être plus élevées sur le sol limoneux. Il existe des différences d'infiltrabilité forte entre les traitements avec et sans croûte. La présence d'une croûte réduit en moyenne la vitesse d'infiltration d'un facteur trois. Cela favorise la formation de flaques sur le sol avec croûte. L'évolution du pourcentage de flaque au cours du temps a été suivi lors de chaque irrigation sur les douze lysimètres. Lors du flaquage de l'eau en surface l'eau libre est orienté vers les macropores. On visualise très bien l'infiltration de l'eau dans les trous de vers de terre. Quelques mesures avec l'infiltromètre, à un potentiel de l'eau de plus 10 mm, montrent qu'il suffit d'un trou de vers de terre pour multiplier la vitesse d'infiltration par quinze. Les fissures qui délimitent les différents éléments de la croûte, pourraient contribuer pendant une certaine durée en début d'irrigation, aux transferts d'eau rapides.

DISCUSSION

1 - Bougies poreuses de surface –

L'évolution parallèle des teneurs des bougies de surface et du sol extrait à l'eau - proches du maximum extractible - valide l'utilisation des bougies, dû moins dans des conditions de pluviométrie instantanée élevée. Cette relation doit être vérifiée dans le cas de pluviométries plus faibles. Le rapport des concentrations entre le test au laboratoire et les bougies, devrait varier en fonction de la dilution liée à la pluviométrie. Les teneurs mesurées par les bougies de surface vont constituer les données d'entrée du système. Elles seront utiles en modélisation.

2 - Relations état de surface du sol et teneurs de l'eau drainée -

Les résultats montrent l'importance des relations entre teneurs de l'eau drainée et modalités des transferts d'eau. L'interaction entre débits et teneurs de l'eau explique probablement une grande partie de la variabilité des résultats obtenus dans différentes expérimentations. Ces résultats ont permis en comparant deux situations avec et sans transferts préférentiels, de mesurer les risques liés à l'existence de ce type de transferts. Les risques liés aux transferts préférentiels se situent à deux niveaux.

2 -1/ Risques de contamination directe au cours de la phase de transferts préférentiels rapides ~

Dans des conditions de pluviométrie instantanée élevée, en présence d'une croûte de battance, on observe des teneurs plus élevées au cours des six premières heures, puis des concentrations plus faibles et relativement stabilisées entre 6 et 48 heures. En absence de croûte les teneurs sont beaucoup plus faibles et relativement constantes au cours de chaque épisode de transfert. Les cinétiques de drainage sont différentes selon l'état de surface. Avec croûte le drainage est rapide au cours des six premières heures, puis s'atténue progressivement. Sans croûte on peut distinguer trois phases, le drainage est tout d'abord lent, puis s'accélère avant de ralentir. La première phase pourrait correspondre à des transferts préférentiels limités ce qui serait cohérent avec la présence des pesticides dans l'eau de la première mesure de drainage. Une croûte de **battance** réduit l'infiltration, favorise le flaquage, oriente une partie de l'eau libre vers les macropores d'où une phase d'écoulements d'eau rapides, suivie d'une étape de ralentissement progressif correspondant à des transferts principalement dans la mésoporosité. Les relations entre teneurs et débits de l'eau peuvent s'expliquer principalement par une durée différente du processus d'adsorption. La suppression de la croûte de **battance** favorise l'infiltration dans un maximum de pores, il y a peu de transferts préférentiels, l'eau circule dans la mésoporosité, la durée et les surfaces **d'échanges** sol/ soluté sont augmentées, l'adsorption est optimisée. Sur le traitement sans croûte, les teneurs de l'eau sont atténuées d'un facteur supérieur à mille pour les trois molécules, entre la surface du sol et un mètre de profondeur. L'extinction est très forte, dans des conditions de pluviométrie instantanée très élevée, qui ne sont pas les plus favorables aux transferts lents et à l'adsorption. Aux transferts par les macropores correspondent des sorties d'eau plus rapides avec des teneurs fortes car l'adsorption est plus limitée. Le fait de briser la croûte sur 3-4 cm, suffit en augmentant fortement les surfaces de contact sol à eau, à diminuer la tension de l'eau, accroître la capacité de stockage notamment temporaire et à favoriser l'infiltration. Les macropores et particulièrement les plus grossiers, les trous de vers de terre sont toujours visibles à 3-4 cm de profondeur. Les teneurs de l'eau drainée attestent qu'ils ne sont quasiment plus empruntés par l'eau libre.

2 -2/ Risques de contamination consécutifs à l'entraînement par transferts préférentiels, d'une plus forte proportion de pesticides en profondeur

Cependant au cours de la phase de transferts d'eau lents, les teneurs sont beaucoup plus élevées en présence de croûte, alors que sur les deux traitements, les durées de contact **sol/soluté** sont identiques et tandis que l'eau circule dans la même porosité. Les résultats sont cohérents si on les interprète avec l'hypothèse de départ. Les teneurs seraient liées principalement à la désorption plus élevée du pesticide entraîné en plus grande quantité en profondeur au cours de la phase précédente. Le pouvoir épurateur des horizons supérieurs est en partie court-circuité (adsorption, dégradation) par une part du pesticide. Au cours de cette phase les teneurs de l'eau drainée dépendraient de la quantité et de la profondeur

d'entraînement du pesticide, la désorption augmentant lorsque le taux de matière organique diminue.

CONCLUSIONS

Parmi les facteurs de risques de lessivage des pesticides, le transfert en profondeur par voies préférentielles semble celui qui présente le niveau de gravité le plus élevé. Dans les conditions de l'expérience, les résultats ne montrent pas de différences importantes entre les trois molécules, mais les doses apportées, qui correspondent aux doses recommandées sont différentes. Par rapport à une situation sans flux préférentiel, les risques liés aux transferts préférentiels sont élevés, parce qu'à l'existence d'une contamination directe à forte teneur de l'eau en profondeur, s'ajoute une pollution diffuse à plus long terme, à plus forte teneur qu'en absence de flux préférentiels. Les résultats ont permis de mettre en évidence les deux processus et d'estimer les deux niveaux de risques. Une partie du pesticide court-circuite le pouvoir épurateur des horizons supérieurs, est transférée en profondeur sur la phase solide, où elle est alors soumise à une désorption plus forte que dans l'horizon supérieur.

Les résultats montrent bien le risque élevé lié à la présence d'une croûte de **battance** et l'utilité d'y remédier par un travail superficiel du sol. Sous réserve d'études complémentaires, les résultats orientent vers la recommandation de cette pratique culturale avant les périodes d'apports de pesticides, sur cultures perennes (vignes, vergers) et sur les cultures annuelles avant les traitements en début ou en cours de végétation lorsque c'est possible