

---

**THÈSE**

Présentée à l'Institut National Polytechnique de Lorraine  
par

**Corinne PERRIN-GANIER**

en vue de l'obtention du titre de  
DOCTEUR DE L'INPL  
SPÉCIALITÉ SCIENCES AGRONOMIQUES

DOCUMENT



n° 19776

**Dispersion et transformation de l'isoproturon  
dans le sol et l'eau**

---

Soutenue publiquement le 3 Juillet 1995

devant le jury composé de :

**M BABUT**, Ingénieur d'Études à l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (Metz)

**J-M CASES**, Directeur de recherche au CNRS-LEM (Nancy)

**A COPIN**, Professeur à la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique)

**J-C FOURNIER**, Ingénieur de Recherche à l'INRA (Dijon)

**C GUYOT**, Ingénieur Rhône Poulenc Agro R&D-Chimie de Environnement (Lyon)

**A MONTIEL**, Responsable de la Mission Qualité à la SAGEP (Paris)

**J-M PORTAL**, Ingénieur de Recherche au CNRS-CPB (Nancy)

**M SCHIAVON**, Professeur à l'INPL-ENSAIA (Nancy), Directeur de thèse

---

## RÉSUMÉ

---

L'emploi massif de produits de protection des cultures n'est pas sans conséquences sur l'environnement. L'isoproturon, qui est un herbicide des céréales très largement employé est l'un de ces produits. Afin d'expliquer, voire de prévenir, le passage de cet herbicide dans les eaux captées, nous nous sommes attachés à identifier les mécanismes régulant le transfert de la molécule dans le sol, vers les eaux. L'étude expérimentale du problème posé a été abordée par étapes, en contrôlant progressivement un nombre croissant de paramètres influant sur le devenir de l'isoproturon dans le milieu naturel. La première étape a consisté à suivre le lessivage de l'herbicide en plein champ en analysant la teneur en isoproturon de l'eau libre du sol prélevée par drainage ou bougie poreuse. Elle a démontré son passage **précoce** dans la solution du sol superficielle. Dans un second temps, le sol limono-argileux de la parcelle a servi à constituer des colonnes modèles dont la dimension finie permet d'établir un bilan du devenir du produit. Sous l'influence des conditions climatiques naturelles, la dynamique d'exportation de l'herbicide par les eaux de percolation ainsi que son état de disponibilité et de **dégradation** dans le sol ont été évalués au cours du temps. Il est apparu que les événements pluvieux susceptibles de provoquer les migrations importantes qui contaminent les eaux souterraines interviennent au cours du premier mois qui suit le traitement : l'isoproturon, non dégradé, est alors **très** mobile. Enfin, ce sont des études de laboratoires en conditions contrôlées qui ont permis de préciser le rôle  **joué**  par deux processus essentiels dans le devenir de la molécule : la dégradation de l'herbicide et son adsorption par les colloïdes **organo-minéraux** du sol. Il a été montré que l'isoproturon est peu fixé en tant que tel par les constituants du sol. En revanche, certains de ses produits de dégradation, qui sont rapidement prépondérants, semblent interagir plus fortement avec le substrat.

## TABLE DES MATIÈRES

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE .....  | 1  |
| Chapitre 1 : SUIVI DE LA <b>CONTAMINATION</b> DE LA SOLUTION<br>DU SOL PAR L'ISOPROTURON À L'ECHELLE DE LA<br>PARCELLE |    |
| 1) <b>SYNTHÈSE</b> BIBLIQGRAPHIQUE .....   | 4  |
| 1) Les systèmes de drainage .....  | 4  |
| 1-1) Circulation de l'eau et mécanismes de drainage .....  | 4  |
| 1-2) Suivi de pesticides dans les eaux de drainage .....   | 5  |
| 2) Les dispositifs de bougies poreuses .....   | 6  |
| 2-1) Mise en place et mise en oeuvre des dispositifs .....   | 7  |
| 2-2) Signification physique et chimique des échantillons<br>recueillis .....   | 8  |
| 2-2-1) Aspects physiques du prélèvement par succion .....  | 8  |
| 2-2-2) Interactions chimiques avec la <b>céramique</b> poreuse .....   | 12 |
| Conclusion .....   | 13 |
| 2-3) Application des bougies poreuses à l'étude du devenir des<br>pesticides .....                                     | 14 |
| <b>2-3- 1) Etudes</b> de laboratoire .....   | 14 |
| 2-3-2) Études du transfert des pesticides au champ .....   | 14 |
| 2-4) Conclusion .....  | 16 |
| 3) Conclusion .....  | 16 |
| II) ETUDE EXPÉRIMENTALE .....  | 18 |
| 1) Représentativité des échantillons <b>prélevés</b> par les bougies .....   | 18 |
| <b>1- 1) Matériel</b> .....  | 19 |
| 1-1-1) Les bougies poreuses .....  | 19 |
| 1-1-2) Les pesticides testés .....   | 19 |
| 1-1-3) Les solutions pures .....   | 19 |
| 1-1-4) Les solutions enrichies en composés humiques .....  | 20 |
| 1-1-5) Le sol en conditions <b>saturées</b> .....  | 20 |
| 1-2) Méthodes .....  | 21 |
| <b>1-2- 1) Dispositif de prélèvement</b> .....   | 21 |
| 1-2-2) Tests en solution .....   | 22 |
| 1-2-3) Tests dans le sol .....   | 22 |
| 1-3) Résultats et discussion .....   | 24 |
| 1-3-1) Tests de réactivité des bougies <b>à l'égard</b> des<br>pesticides en solution .....                            | 24 |
| 1-3-2) Tests dans le sol .....   | 30 |
| 1-4) Conclusion .....  | 33 |
| 2) Suivi du lessivage de l'isoproturon au champ .....  | 34 |
| 2-1) <b>Matériel</b> et méthodes .....   | 34 |
| 2-1-1) <b>Caractéristiques</b> et Cquipement de la parcelle .....  | 34 |

|  |    |
|--|----|
| 2-1-2) Conduite agronomique .....  | 35 |
| 2-1-3) Prélèvement des échantillons de solution du sol.....                              | 36 |
| 2-1-4) Techniques analytiques .....  | 36 |
| 2-2) Résultats et discussion .....   | 37 |
| 2-2-1) Pluviométrie et état hydrique du sol.....   | 37 |
| 2-2-2) Concentrations en résidus des eaux issues du drainage ou des bougies .....        | 39 |
| 2-3) Conclusion .....  | 42 |
| III) CONCLUSION .....  | 43 |
| <br>Chapitre II : ÉTUDE MODÉLISÉE DU TRANSFERT DE L'ISOPROTURON EN CONDITIONS NATURELLES |    |
| 1) SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....  | 44 |
| Introduction .....   | 44 |
| 1) Étude du transfert en colonnes de sol.....  | 44 |
| 2) Potentialités de transfert de l'isoproturon .....                                     | 45 |
| 2-1) Lessivage .....   | 45 |
| 2-2) Distribution verticale dans le sol .....  | 46 |
| 3) Facteurs influençant le mouvement vertical .....                                      | 46 |
| 3-1) Paramètres climatiques .....  | 46 |
| 3-2) <b>Caractéristiques</b> physiques du sol .....                                      | 47 |
| 3-3) Propriétés du pesticide .....   | 48 |
| 4) Conclusion .....  | 49 |
| II) ETUDE EXPERIMENTALE .....  | 50 |
| Introduction .....   | 50 |
| 1) Mobilité de l'isoproturon dans la couche de labour .....                              | 51 |
| 1-1) Matériel et méthodes.....   | 51 |
| 1-1-1) Dispositif.....   | 51 |
| 1-1-2) Lessivage .....   | 53 |
| 1-1-3) <b>Disponibilité</b> et localisation des <b>résidus</b> .....                     | 53 |
| 1-1-4) Identification des résidus- <b>14C</b> .....                                      | 54 |
| 1-2) Résultats et discussion .....   | 56 |
| 1-2-1) Lessivage et <b>caractéristiques</b> climatiques .....                            | 56 |
| 1-2-2) Niveaux de disponibilité des résidus .....  | 62 |
| 1-2-3) Localisation des résidus non <b>extractibles</b> .....                            | 69 |
| 1-2-4) Identification des <b>résidus</b> mobilisables .....                              | 75 |
| 1-3) Conclusion .....  | 77 |
| 2) Mobilité de l'isoproturon vers la profondeur .....                                    | 78 |
| 2-1) Matériel et méthodes.....   | 78 |
| 2-1-1) Réalisation des colonnes in <b>situ</b> .....                                     | 78 |
| 2-1-2) Dispositif expérimental .....   | 79 |

|   |    |
|---|----|
| 2-1-3) Traitement herbicide .....   | 79 |
| 2-1-4) Suivi des <b>résidus</b> d'isoproturon .....                                   | 79 |
| 2-2) Résultats et discussion .....  | 80 |
| <b>2-2-1) Fonctionnement hydrique des colonnes</b> .....                              | 80 |
| 2-2-2) Concentrations en résidus dans les percolats .....                             | 80 |
| 2-2-3) Exportations par lessivage .....   | 81 |
| 2-2-4) Identification des résidus dans les percolats .....                            | 83 |
| 2-2-5) Disponibilité des résidus présents dans le sol un<br>an après traitement ..... | 84 |
| 2-2-6) Identification des résidus extractibles .....                                  | 85 |
| 2-3) Conclusion .....   | 87 |
| III) CONCLUSION .....   | 88 |

### Chapitre III : IMMOBILISATION ET **DÉGRADATION** DE L'ISOPROTURON EN CONDITIONS CONTRÔLÉES

#### Partie 1 :

#### Étude de l'adsorption de l'isoproturon dans le sol

|   |     |
|---|-----|
| 1) SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....   | 89  |
| Introduction .....  | 89  |
| 1) Méthodes d'étude de l'adsorption.....  | 90  |
| 2) Caractérisation dynamique et mathématique de l'adsorption.....                     | 91  |
| 2-1) Dynamique de l'adsorption .....  | 91  |
| 2-2) Description mathématique et paramètres caractéristiques de<br>l'adsorption ..... | 92  |
| 2-2-1) Modélisation de la cinétique d'adsorption .....                                | 92  |
| 2-2-2) Modélisation des isothermes d'adsorption .....                                 | 94  |
| 2-2-3) <b>Modélisation</b> de la <b>désorption</b> .....                              | 95  |
| 3) Mécanismes de l'adsorption de l'isoproturon .....                                  | 97  |
| <b>3-1) Influence des propriétés du pesticide</b> .....                               | 97  |
| 3-2) Rôle de l'adsorbant.....   | 98  |
| <b>3-2-1) Matières organiques du sol</b> .....  | 98  |
| 3-2-2) Constituants minéraux des sols .....   | 100 |
| 3-2-3) Conditions de milieu .....   | 101 |
| 3-2-4) Réversibilité de l'adsorption .....  | 101 |
| II) ÉTUDE EXPÉRIMENTALE .....   | 102 |
| Introduction .....  | 102 |
| 1) Matériel et méthodes.....  | 102 |
| 1-1) Sols étudiés .....   | 102 |
| 1-2) Solutions d'isoproturon .....  | 102 |
| 1-3) Cinétiques d'adsorption .....  | 103 |
| 1-4) Isothermes d'adsorption .....  | 103 |
| 1-5) Isothermes de <b>désorption</b> .....  | 104 |

|   |            |
|---|------------|
| 2) <b>Résultats</b> et discussion ..... | 104        |
| 2-1) Cinétique d'adsorption .....       | <b>104</b> |
| 2-2) Isothermes d'adsorption .....      | <b>108</b> |
| 2-3) Isothermes de désorption .....     | 109        |
| III) CONCLUSION .....                   | 112        |

Partie II :  
Étude de la dégradation de l'isoproturon dans le sol

|   |            |
|---|------------|
| I) SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....   | 113        |
| Introduction .....  | 113        |
| 1) Dégradation abiotique .....  | 113        |
| 2) Dégradation biologique .....   | 114        |
| 2-1) Aspects microbiens .....   | 114        |
| 2-2) Voies de dégradation .....   | 115        |
| 3) Cinétique de dégradation .....   | 117        |
| 3-1) Description mathématique et modélisation .....   | 117        |
| 3-2) Influence des propriétés du sol .....  | 118        |
| 3-3) Rôle des facteurs climatiques .....  | 119        |
| 4) Dégradation et persistance .....   | 120        |
| II) ÉTUDE EXPÉRIMENTALE .....   | 123        |
| Introduction .....  | 123        |
| 1) <b>Matériel</b> et méthodes .....  | 123        |
| 1-1) Milieu d'étude .....   | 123        |
| 1-2) Mise en place de l' <b>expérimentation</b> .....                                       | 123        |
| 1-3) Suivi de la minéralisation du carbone organique du sol et de l'isoproturon .....       | 124        |
| 1-4) Dosage des résidus dans le sol .....   | 124        |
| 1-4-1) Dosage des <b>résidus</b> extractibles .....   | 125        |
| 1-4-2) Dosage des <b>résidus</b> non extraits .....   | 125        |
| 2) Résultats et discussion .....  | 126        |
| 2-1) Cinétique de minéralisation .....  | 126        |
| 2-2) Disponibilité des <b>résidus</b> dans le sol .....                                     | 127        |
| 2-2-1) <b>Extractibilité</b> des <b>résidus</b> .....                                       | 128        |
| 2-2-2) Cinétique de formation des <b>résidus</b> "liés" .....                               | 129        |
| 2-2-3) Evolution de la <b>disponibilité</b> de l'isoproturon au cours de l'incubation ..... | 130        |
| 2-3) État de dégradation de l'isoproturon au cours du temps .....                           | <b>132</b> |
| 2-4) Persistance et <b>rémanence</b> .....  | <b>133</b> |
| III) CONCLUSION .....   | 135        |

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

La performance technique des activités industrielles et agricoles semble aujourd'hui indissociable de l'introduction dans le milieu naturel de composés qui en sont normalement absents. En **réaction**, les magazines scientifiques populaires ont multiplié les articles relatifs **à** des sujets dits "écologistes", recherchant parfois davantage l'aspect sensationnel que le fondement scientifique.

Ainsi, sous le titre volontairement alarmiste d'un article paru récemment dans le magazine Science et Vie, "Les pesticides nous rendent stériles" (Pilorge, 1995), se cache, semble-t-il, la **préoccupation** d'une atteinte **à** notre santé, par toutes sortes de polluants imperceptibles mais présents dans notre environnement. L'exemple spectaculaire de cet article est celui de **4000** ouvriers du Costa Rica, rendus stériles par le nématocide utilisé dans les bananeraies où ils travaillaient, le DBCP (dibromochloropropane), **malgré** l'interdiction de ce produit dès 1977. Dans ce cas marginal, les relations de cause à effet ont été faciles **à** établir. Les circonstances ne sont pourtant pas toujours aussi évidentes. Par exemple, le second fait rapporté par l'auteur de l'article est plus insidieux : les Londoniens qui boivent l'eau de la Tamise souffriraient d'une baisse de densité et de mobilité des spermatozoïdes. L'explication avancée par les chercheurs tiendrait en la présence d'agents de structures chimiques proches des oestrogènes femelles, comme peuvent l'être entre autres les PCB (biphényles polychlorés) ou le DDT (**dichlorodiphényltrichloroéthane**), qui interféreraient avec la spermatogénèse.

Plus généralement, l'objet réel **d'inquiétude** dans ce domaine est bien l'augmentation considérable du nombre d'agents plus ou moins nocifs auxquels nous sommes soumis de manière passive. Leurs natures sont diverses : composés organiques xénobiotiques, mais aussi radiations ionisantes (centrales nucléaires par exemple) ou métaux lourds (plomb). Certains de ces produits, dont plusieurs pesticides, sont connus

pour engendrer, à plus ou moins haute dose, des troubles mutagènes, carcinogènes et même tératogènes. Mais tous n'ont pas des conséquences aussi sensibles que le DBCP, ce qui est certainement rassurant.

Dans le cas particulier de l'herbicide qui fait l'objet de notre étude, la molécule d'isoproturon est simplement **réputée** "nocive" et ne fait pas l'objet de gros titres dans la presse scientifique populaire. Pourtant des effets d'aberrations chromosomiques et de malformation des spermatozoïdes ont été démontrés **in vivo** sur des mammifères (Behera et Bhunya, 1990). Ce genre de conséquence nous concerne directement et il paraît logique de s'y intéresser. Mais nous ne devons pas limiter nos investigations aux effets sur les Hommes. Il importe également de se préoccuper des actions écologiques indirectes des xénobiotiques. Un pesticide tel que l'isoproturon peut, par exemple, **réduire** l'activité des muscles de vers de terre, ce qui diminue leur mobilité générale et peut en conséquence restreindre leur taux de reproduction (**Beneke** et Schwippert, 1988). Ceci n'aura certes pas d'effet immédiat sur la santé humaine mais une déplétion de ces organismes fouisseurs peut altérer la qualité du sol et provoquer ainsi un déséquilibre local de **l'écosystème** cultivé.

Il nous appartient donc de connaître d'une part les effets d'un produit xénobiotique isolé, tant sur les organismes animaux que végétaux, et d'autre part d'évaluer l'importance de sa **présence** potentielle dans chacun des compartiments source d'exposition : eau, sol, atmosphère, denrées alimentaires.

Pour ajouter à la complexité de la tâche, il peut arriver qu'un composé isolé n'induit que des effets nocifs mineurs sur les êtres vivants, mais qu'en revanche son association à d'autres polluants le rende plus dangereux. **L'étendue** des combinaisons possibles entre les différents agents **présents** dans l'environnement est telle que leur prise en compte devient **malaisée**.



L'étude **présentée** dans ce mémoire aspire **à** contribuer **à** l'acquisition de connaissances du comportement d'un produit xénobiotique dans le milieu, bien qu'elle ne **prétende** pas aborder tous les domaines requis pour estimer l'impact de l'isoproturon sur l'environnement. A un niveau plus modeste, nous avons choisi d'évaluer son devenir dans deux compartiments particuliers : le sol et l'eau.

En effet, une action importante menée récemment en Lorraine et visant à rechercher des produits phytosanitaires dans 173 captages souterrains alimentant des villes de la région, a mis en évidence la présence fréquente de 5 d'entre eux, dont des urées substituées (Chambre d'Agriculture de Lorraine, 1992). Une étude s'est parallèlement focalisée sur l'un des points de captage de manière **à** déterminer les variations en concentrations au cours de l'année (Porta1 et *al.*, 1992). Contrairement **à** d'autres molécules comme l'**atrazine** dont la **présence** est constante, l'isoproturon y est alors apparu aléatoirement sous forme de pics de concentration, sans que l'on puisse établir de relation avec la **pluviométrie** du lieu. Cette situation illustre les difficultés de contrôle sanitaire qui en découle et souligne la nécessité d'expliquer le comportement de cet herbicide dans le sol et son passage dans l'eau.

Notre attention s'est alors portée sur le lieu d'introduction de l'herbicide : la parcelle cultivée. Nous avons suivi le transport de l'isoproturon par l'eau qui s'y infiltre, tout en examinant le comportement du pesticide dans le même sol intégré dans des systèmes **expérimentaux** modélisés. Ces dispositifs permettent d'étudier plus en détail les processus auxquels la molécule est soumise : dégradation, immobilisation et transfert. A chaque étape de cette démarche expérimentale, nous nous sommes efforcés de dégager des conclusions **à** caractère fondamental sur le comportement de l'isoproturon mais nous sommes également attachés **à** considérer les résultats en tenant compte de la **préoccupation** actuelle de **préserver** la **qualité** de nos sols et de nos ressources en eaux. Ainsi, ces résultats devraient permettre en particulier de fournir des **éléments** utiles **à** la maîtrise du risque associé **à** l'emploi de cet herbicide ainsi qu'à une utilisation mieux **raisonnée** en agriculture.

---

## SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

---

### ***Devenir de la molécule mère***

**Simultanément** à sa dispersion, l'isoproturon est affecté par des transformations modifiant sa forme chimique ou son état de disponibilité. Dans le but de préserver la qualité des ressources en eaux, il est nécessaire de considérer simultanément ces **interférents** pour évaluer les risques de contamination potentielle par cet herbicide.

Ainsi, ce produit semble en premier lieu rapidement disparaître, puisque deux semaines après le traitement, la **molécule** mère sous forme libre ne **représente** plus que la moitié de la dose apportée. Sa seconde propriété est un caractère relativement mobile en ne contractant avec le substrat que des liaisons de faible énergie. Cette mobilité diminue avec le temps par renforcement des liaisons aux constituants du sol ou interaction avec des sites difficilement accessibles. La disparition progressive de l'isoproturon molécule mère dans la solution aqueuse provient donc d'une part d'une dégradation de la molécule, mais également d'une augmentation de sa **rétenion** par le sol **après** plusieurs semaines de présence.

A partir de ces **résultats**, il est possible d'établir dans une première approche que le risque de passage en **quantité** importante de ce produit dans l'eau intervient surtout pendant le mois qui suit le traitement. En cas de pluie précoce, la menace sera importante pour les eaux superficielles ou les eaux d'infiltration rapide (sol fissuré). En revanche, dans la situation d'un sol où l'eau circule plus lentement, le produit se **déplace** sous l'effet d'équilibres **d'adsorption/désorption** successifs et sa concentration diminue progressivement avec la profondeur, ce qui rend minime le risque de pollution des eaux souterraines.

## **Transformations chimiques de la molécule d'isoproturon**

L'existence d'un temps de demi-vie assez court pour la molécule d'isoproturon dans le sol indique l'importance de la prise en compte de ses produits de dégradation.

Parmi les produits issus de l'isoproturon, le composé déméthylé apparaît le premier, moins de deux semaines après le traitement. La déméthylation ne semble pas modifier profondément le caractère mobile de la molécule et l'isoproturon **mono-**déméthylé présente un comportement très similaire à celui de la molécule mère, vis à vis de son entraînement par l'eau et de sa rétention par le sol.

En revanche, lorsque ce produit subit une hydroxylation, il acquiert un caractère plus hydrophile et se retrouve rapidement sous forme lessivée ou lessivable (extractible à l'eau). Une attention particulière doit donc à l'avenir se porter sur la présence dans l'eau des dérivés de l'isoproturon portant un groupement -OH. Les produits hydroxylés de l'isoproturon, qu'ils soient mono- ou di-déméthylés, présentent cependant des difficultés analytiques particulières. Avec la méthode de dosage utilisée, leurs temps de rétention sont très proches et très courts. Il est alors difficile de les distinguer entre eux et parfois de les identifier en présence d'une matrice organique complexe. Des travaux pourraient s'orienter vers une mise au point de leur dosage.

Outre ces composés identifiés, deux produits moins polaires ou plus encombrés sont apparus avec une importance majeure dans les sols modèles sous conditions naturelles. Ils représentent plus de 75 % des résidus dosés après 6 mois. Ces produits ont pourtant peu de probabilité d'être retrouvés dans les eaux souterraines car leur présence semble se limiter aux premiers centimètres de sol. Cependant, ils se placent dans le pool extractible au méthanol, c'est à dire sous forme adsorbée, ce qui signifie que l'éventualité d'une libération n'est pas exclue. Il serait fort utile de savoir si ces produits sont

également prépondérants dans d'autres types de sols. Le cas échéant, leur identification permettrait d'évaluer à la fois leur mobilité et leur stabilité chimique, afin d'estimer le risque potentiel qu'ils peuvent représenter pour la qualité des ressources en eaux. Par ailleurs, la variabilité de leur présence et de leur disponibilité pourrait être mesurée à partir d'exuats de sols prélevés au champ à différentes profondeurs, dans différentes situations pédoclimatiques.

### ***Évolution de l'état de disponibilité des résidus d'isoproturon***

Simultanément à sa dégradation, l'isoproturon forme par ailleurs des résidus non extractibles en quantité importante (35 % à 50 % sous conditions naturelles en un an). Mise en évidence par recours aux molécules marquées au  $^{14}\text{C}$ , l'existence de ces résidus ne peut pourtant pas être démontrée au champ par nos moyens analytiques actuels. En portant nos efforts dans ce domaine, il deviendrait peut être possible d'identifier les produits fixés. Il serait particulièrement intéressant de savoir s'il s'agit de l'isoproturon lui-même, qui serait retenu physiquement dans des espaces de la microporosité non accessibles par nos techniques d'extraction, ou si des produits de transformation de la molécule mère sont capables d'établir de véritables liens chimiques, grâce à des groupes réactionnels nouveaux et par des processus directs ou consécutifs à l'adsorption par force physique.

### ***Des dispositifs modèles à la parcelle***

L'ensemble des conclusions qui précèdent ont pu être obtenues par des dispositifs expérimentaux modélisés dont l'intérêt et les limites intrinsèques ont été discutés par ailleurs. Leur valeur se juge également par leur aptitude à expliquer les observations de terrain. Dans notre cas, la parcelle suivie a en outre permis d'apprécier l'importance du

mode de circulation de l'eau dans l'exportation d'isoproturon sous forme soluble, grâce à son équipement par deux systèmes de prélèvement de la solution du sol.

Ainsi, au niveau de la parcelle, la pertinence d'emploi de bougies poreuses ayant été vérifiée, leur utilité pour prélever l'eau du sol afin d'y suivre l'isoproturon a été établie. Il apparaît que ce mode de prélèvement donne une image différente de la teneur en produit dans l'eau du sol par rapport à celle obtenue grâce à des drains placés à la même profondeur. L'eau issue du drainage permet en réalité une estimation des quantités en solution dans l'eau circulant dans la couche de labour. Alors que l'exportation d'isoproturon en deçà de 10 ou 20 cm se fait de manière très rapide, en quantité importante et pendant une période courte, elle est retardée, atténuée et prolongée à 80 cm de profondeur en dehors des tranchées de drainage. Cet effet s'explique à la fois par les phénomènes **d'adsorption/désorption** expliqués précédemment, mais aussi par un effet de dilution dans la masse de terre et par une accession progressive aux espaces de la microporosité. Ces phénomènes tendent à soustraire l'isoproturon de la solution du sol et contribuent à sa disparition lors de sa migration. Parallèlement, la dégradation microbienne se ralentissant avec la profondeur, les modifications chimiques des résidus devraient s'atténuer vers la base du profil.

En conséquence, la confrontation des résultats en systèmes modélisés et naturel permet d'affirmer que, même si les constituants de la couche superficielle de sol (en particulier la matière organique) présentent la réactivité relative la plus marquée pour l'isoproturon, on ne peut estimer que le sort de la molécule se joue uniquement dans la couche de labour. Il est aussi nécessaire de tenir compte de la redistribution du produit entre les différentes formes et les différents états dans les horizons de subsurface.

Aussi, en ce qui concerne la gestion de la qualité des eaux, des conclusions de portée générale sur l'aptitude de l'isoproturon à gagner les ressources en eau seraient certainement hâtives après ce travail. L'importance déterminante de la structure du sol et

des conditions climatiques sur le transfert de l'isoproturon introduisent des facteurs aléatoires qu'il semble difficile de maîtriser pour fournir une prédiction fiable des variations de concentrations. Si l'on ne peut, pour le moment, empêcher ni même prédire l'apparition d'isoproturon dans les eaux captées, il est toutefois possible d'indiquer que les traitements effectués au printemps (qui est généralement moins pluvieux que l'automne), devraient minimiser le passage d'isoproturon dans l'eau.

Finalement, il n'existe certainement pas de démarche idéale pour évaluer le devenir d'un produit phytosanitaire dans l'environnement et il semble que l'on ne puisse restreindre les études ni à des suivis de terrain, ni à des modèles de laboratoire. Par le simple fait qu'au champ on mesure une disparition de produit alors qu'en système modélisé on suit sa transformation, les deux niveaux d'approche se complètent nécessairement et naturellement. Les limites de chacun d'eux se situent en réalité sur le plan analytique. Nos efforts pour faire reculer ces limites répondront sans doute à plusieurs des questions qui ont émergé mais ils devront pour cela s'accompagner du souci de définir la signification des quantités dosées, dans le contexte naturel de l'écosystème sol.