

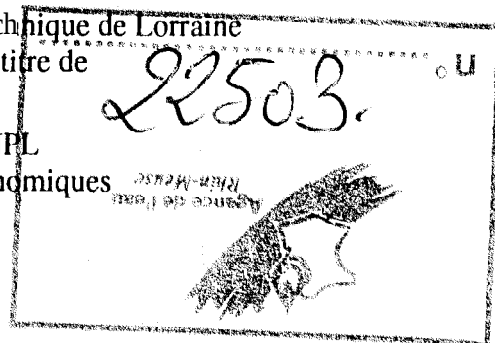
THESE

présentée à l'Institut National Polytechnique de Lorraine
en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'INPL
spécialité : Sciences Agronomiques

par

Laurence HEYDEL



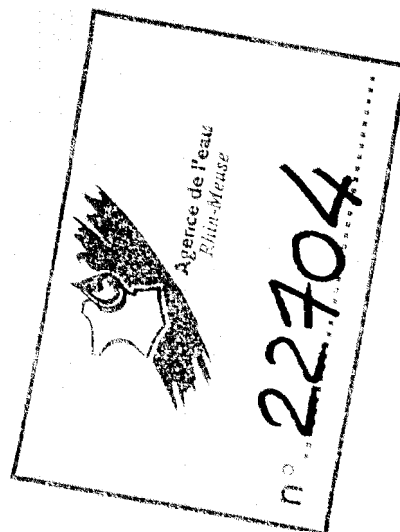
Diagnostic et maîtrise des contaminations des eaux
souterraines par les résidus d'atrazine.

soutenue publiquement le 4 mai 1998

devant le jury composé de :

M BABUT, Ingénieur à l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (Metz)
O BANTON, Professeur d'Hydrogéologie à l'Université du Québec, INRS-Eau (Canada)
JP DEFFONTAINES, Directeur de Recherche à l'INRA (Versailles)
M BENOIT, Chargé de Recherche à l'INRA (Mirecourt)
P RAVANEL, Maître de Conférences à l'Université J. Fourier (Grenoble)
B REAL, Ingénieur à l'ITCF d'Estrees-Mons
M SCHIAVON, Professeur à l'INPL-ENSAIA (Nancy)

A. Une question de recherche à l'échelle des bassins d'alimentation	5
1. Le problème de recherche	5
2. Les hypothèses de recherche	7
3. Les choix méthodologiques	8
B. Présentation du milieu : un territoire agricole situé en milieu karstique isolé	8
1. Deux plateaux karstiques réservoirs d'eau	8
2. Pratiques agricoles et entrées d'atrazine	9
a) Occupation des sols	10
(1) Méthode d'investigation	10
(2) Evolution de l'occupation des sols depuis 1955	13
b) Apports de produits phytosanitaires	14
(1) Méthode d'investigation	14
(2) Evolution des produits et quantités utilisées	15
(3) Conclusions	18
C. Transferts d'eau dans les bassins d'alimentation	18
1. Géologie	18
a) Géologie régionale	18
b) Géologie locale	19
2. Hydrogéologie	20
a) Aspects régionaux	20
b) Les plateaux du Haut-Santois	20
c) Représentativité des plateaux du Haut-Santois	21
3. Couverture pédologique	22
a) Atlas des sols de Lorraine	22
b) Carte des bassins	22
4. Contexte climatique	25
5. Conclusions	26
D. Potentialités de modification des apports de produits phytosanitaires	27
1. Méthode d'investigation	27
2. Possibilité d'évolution des pratiques	28
a) Les pratiques actuelles	28
(1) Le groupe des novateurs (quatre agriculteurs)	28
(2) Le groupe des suiveurs (treize agriculteurs)	28
(3) Réflexions communes aux deux groupes	29
b) Attitude face à la pollution	29
c) Vers de nouvelles pratiques	30
d) Et les techniciens, qu'en pensent-ils?	30
3. Conclusions : Des changements de pratiques envisageables	31
E. Conclusion de la première partie	32
III. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE : DEVENIR DE L'ATRAZINE APRES SON APPLICATION AU CHAMP	33
A. L'immobilisation de l'atrazine et de ses produits de dégradation	33
1. Description mathématique et modèles	33
a) Cinétique d'adsorption	33
b) Isothermes d'adsorption	34
2. Propriétés de l'atrazine	34
3. Propriétés de l'adsorbant	35
a) Matière organique des sols	35
(1) Teneur en matière organique	35
(2) Nature de la matière organique	36



b) Nature minéralogique des argiles	36
(1) Rôle de la teneur en argile dans l'adsorption	36
(2) Importance de la nature des argiles	37
c) Oxydes et hydroxydes (métaux)	37
d) Conclusions	37
4. Propriétés du milieu	38
a) Température	38
b) Teneur en eau du sol	38
c) pH	3x
d) Teneur en matière organique dissoute	39
e) Structure du sol	39
5. Conclusions	39
B. Désorption et formation de résidus non extractibles	40
1. Définitions	40
2. Modèles de désorption	40
3. Quantification des résidus non-extractibles	41
4. Nature des résidus non-extractibles	41
5. Localisation des résidus non-extractibles	42
6. Stabilité des résidus non-extractibles	42
7. Conclusions	42
C. Dégradation de l'atrazine	43
1. Dégradation abiotique	43
2. Dégradation biologique	44
3. Minéralisation	44
4. Cinétique de dégradation	44
a) Description mathématique et modèles	44
b) Influence de la température et de l'humidité	45
c) Influence des propriétés du sol	45
5. Notion de persistance	46
6. Conclusions	47
D. Transfert des résidus d'atrazine	47
1. Définitions	41
2. Méthodes de suivi de la contamination des eaux	48
a) A l'échelle de la parcelle	4x
(1) Utilisation et installation	48
(2) Représentativité des échantillons	49
(a) Origine	49
(h) Composition	50
(3) Conclusions	51
b) A l'échelle du bassin d'alimentation	51
(1) Les différentes méthodes de mesure d'un flux de polluant et d'estimation du risque lié au dépassement d'une concentration	51
(2) Précision des méthodes	51
3. Contamination des eaux	51
4. Facteurs influençant les mouvements des résidus	52
a) par ruissellement	52
h) par lessivage	52
5. Conclusions	53
E. Conclusion de la synthèse bibliographique	54

d) Isotherme de désorption	57
e) Modélisation des cinétiques et isothermes	57
2. Résultats et discussion	58
a) Cinétique d'adsorption	58
b) Isothermes d'adsorption	62
c) Isothermes de désorption	64
3. Conclusions	66
B. Composition des sols et Immobilisation	66
1. Matériel et méthodes	67
a) Identification minéralogique : étude de la fraction argileuse	67
b) Nature de la matière organique	67
(1) Fractionnement physique	67
(2) Extraction des composés humiques	67
(3) Dosage du carbone et de l'azote des fractions organiques	68
c) Traitement statistique	68
2. Résultats et discussion	68
a) Composition des sols	68
b) Analyse en Composantes Principales Centrées Réduites (ACPR)	69
(1) ACPCR sans tenir compte de la composition des fractions argileuse et organique	69
(2) ACPCR sur la composition des fractions argileuse et organique	73
3. Conclusions	75
C. Dégradation de l'atrazine	75
1. Matériel et méthodes	75
a) Sols étudiés	75
b) Mise en place de l'incubation	77
c) Suivi de la minéralisation du carbone organique des sols et de l'atrazine	77
d) Dosage des résidus dans le sol	77
(1) Résidus extractibles	77
(2) Résidus non-extraits	79
(3) Localisation des résidus non-extraits au sein de la matière organique des sols	79
2. Résultats et discussion	79
a) Cinétique de minéralisation	79
(1) Minéralisation du carbone organique	79
(2) Minéralisation du ^{14}C de l'atrazine marquée sur le cycle	82
b) Disponibilité des résidus dans le sol	84
(1) Extractibilité des résidus	84
(a) Extraits aqueux	84
(b) Extraits méthanoliques	85
(2) Composition des extraits	86
(3) Résidus non-extractibles	88
(a) cinétique de l'immobilisation des résidus d'atrazine	88
(b) localisation des résidus non-extractibles	90
c) Persistance et rémanence	90
3. Conclusions	92
D. Conclusion sur le comportement de l'atrazine dans les sols des plateaux du Haut-Santois.	93
V. CONTAMINATION PAR L'ATRAZINE ET SES METABOLITES DES EAUX SOUTERRAINES DES PLATEAUX DU HAUT-SAINTOIS.	95
A. Fonctionnement hydrodynamique des bassins	95
1. Le bassin des sources de Grimonviller (V19, V20 et V21)	95
2. Le bassin de la source "Morley" (V6)	97
3. Le bassin de la source "Rognot l'huillier" (VS)	98
4. Conclusions	99
B. Contamination par les résidus d'atrazine	99
1. Matériel et méthodes	99
a) Prélèvement des échantillons d'eau	99
b) Techniques analytiques	100

L'impact de l'usage des produits phytosanitaires sur la contamination des eaux souterraines des plateaux du Haut-Santois

2. Résultats et discussion	100
a) Concentration en résidus des eaux	100
(1) L'atrazine	101
(2) La dé-éthyl-atrazine	102
b) Variations de l'indice DAR`	103
c) Flux de résidus	105
d) Variation et conditions de milieu	106
e) Estimation du risque de dépassement d'une concentration	108
C. Conclusion sur la contamination par l'atrazine des eaux souterraines des plateaux du Haut-Santois : Une nécessaire évolution des pratiques agricoles	110
VI. DESHERBAGE DU MAIS : DE L'INTERET D'UTILISER DES TRAITEMENTS ALTERNATIFS.	113
A. Matériel et méthodes	114
1. Caractéristiques et équipement du site d'expérimentation	114
2. Conduite agronomique	115
3. Prélèvement de la solution du sol et techniques analytiques	116
a) Installation des bougies poreuses	116
b) Prélèvement de la solution du sol par les bougies poreuses	117
c) Conservation et analyse des échantillons	117
4. Rendement et adventices	117
5. Estimation des charges	117
6. Traitement statistique	118
B. Résultats et discussion	118
1. Concentrations en résidus d'atrazine des eaux du sol	118
a) Evolution des concentrations en résidus d'atrazine au cours des trois années	118
b) Comparaison des teneurs en résidus des eaux prélevées à 40 et 80 cm de profondeur.	121
c) Comparaison des teneurs en résidus selon la technique de désherbage	121
2. Rendement	123
3. Adventices	124
4. Charges	128
C. Conclusions	130
VII. CONCLUSION GÉNÉRALE	131
VIII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	135
IX. ANNEXES :	143
1. : Esquisse structurale de la région des plateaux du Haut-Santois	143
2. : Carte géologique détaillée des plateaux du Haut-Santois	143
3. : Echelle Lithostratigraphique	144
4. : Les sols des plateaux du Haut-Santois	145
5. : Perception des pratiques de traitement phytosanitaire du maïs et de leurs possibilités d'évolution par les agriculteurs exploitant les plateaux du Haut-Santois	154
X. LISTE DES TABLEAUX	155
XI. LISTE DES FIGURES	159

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE

La pollution des eaux souterraines et superficielles par les produits phytosanitaires est aujourd'hui un fait connu et reconnu par les pouvoirs publics (CORPEN, 1993). En France, l'analyse des eaux de captages a montré la présence de pesticides en Lorraine (DDASS 55, 1997 ; Babut *et al.*, 1996 ; Heydel *et al.*, 1996 ; Portal *et al.*, 1992) en Bretagne (Giovanni, 1996) et dans la région Centre (Baran, 1996). Des contaminations du même type sont observées dans l'ensemble de l'Europe avec la présence de triazines dans les eaux souterraines en Suisse (Kozel, 1997), en Belgique (Dejonckheere *et al.*, 1996 a et b), en Italie (Brambilla *et al.*, 1993), en Allemagne (Schlet *et al.*, 1996) et dans le monde : Egypte (Dogheim *et al.*, 1996), Etats Unis état d'Iowa (Weed *et al.*, 1995) et d'Arkansas (Senseman *et al.*, 1997), Québec (Hy *et al.*, 1995).

Ces constats alimentent des débats dans la presse. Ils traduisent l'inquiétude de la population face à l'augmentation du nombre de produits auxquels nous sommes exposés, dont certains sont connus pour leurs effets néfastes (WHOP-UNEP, cité par Werf, 1996). Cette pollution des eaux, considérée aujourd'hui comme inacceptable, n'est pas récente. En effet dès la fin des années 1960, des traces de produits phytosanitaires ont été détectées dans les eaux de drainage (Schiavon et Jacquin, 1973) et les eaux de ruissellement (White *et al.* 1967). Bien que n'étant pas la seule utilisatrice de ces produits, l'agriculture est souvent incriminée. Cependant, en améliorant la sécurité et les gains de productivité, la phytopharmacie a largement contribué au développement agricole et à l'expansion économique. Aujourd'hui la plupart des agriculteurs emploient ces substances, en espérant de plus performantes et n'envisagent pas de les délaisser car, d'une part, elles protègent les cultures et d'autre part, selon Johnen et Urech (1997), elles préservent la qualité des aliments produits. En parallèle, les firmes de l'agrochimie ainsi que l'ensemble des fournisseurs du monde agricole incitent à leur utilisation, car ces produits représentent, en France, un marché de plus de 12 milliards de francs (données UIPP 1996, Auber et Decoin, 1997).

Afin de protéger l'homme des risques multiples liés à l'utilisation des substances chimiques en agriculture, les Etats Unis ont adopté une loi sur l'eau (Federal Water Pollution Act) en 1972, contraignant à l'identification des pollutions diffuses d'origine agricole et à la mise en place de techniques d'analyses et de contrôle. Tripp, cité par Kauark Leite (1990), définit la pollution diffuse des eaux comme originaire des activités dispersées utilisatrices du sol qui peuvent occasionner la dégradation de la qualité des eaux. En 1975, la CEE (directive 75/440/CEE) prévoit que la concentration totale de parathion, lindane et dieldrine ne doit pas être supérieure à 5 µg/l dans les eaux potabilisables. Depuis 1989, la concentration maximale admissible par substance individualisée

est de 0,1 µg/l, et de 0,5 µg/l pour le total des résidus (transposition en droit français de la directive 80/778/CEE, décret 89.3). Ces maxima ont été définis par la limite moyenne de détection lors de la prise de décision, sans tenir compte des risques toxicologiques. Parallèlement, l'Organisation Mondiale de la Santé a élaboré une liste de composés chimiques dont les valeurs limites sont établies à partir de la notion de risque toxicologique et des caractéristiques de chaque composé. Par exemple, la limite a été fixée à 2 µg/l pour l'atrazine. De la même manière, l'US Environmental Protection Agency (Office of Drinking Water) a abouti à des valeurs similaires à celles de l'OMS, soit 2,5 µg/l pour l'atrazine. En France, bien que les distributeurs d'eau aient tenté d'obtenir la révision de la directive "eaux de boisson" 80/778 CEE (My, 1993), celle-ci a été renforcée par l'extension de la norme de 0,1 µg/l (par substance individualisée) aux métabolites.

Afin de lutter contre ces pollutions dont l'origine est essentiellement diffuse et dont les pratiques agricoles constituent sans doute la source principale, les ministres chargés de la santé, de l'environnement et de l'agriculture ont créé en 1992 le comité de liaison "eaux - produits antiparasitaires", Il a été institué afin de renforcer la cohérence des actions relatives à l'eau et aux produits phytosanitaires et afin d'étendre le champ des compétences du Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates (CORPEN), créé en 1984 par les ministres chargés de l'environnement et de l'agriculture. L'objectif principal de ces comités est d'élaborer ou d'approuver des "outils" servant aux agriculteurs pour modifier leurs pratiques en vue de préserver la qualité de l'eau compte tenu de leurs contraintes techniques et financières (L'écho des nitrates et des phytos, 1997).

Le grand défi qui est posé aujourd'hui n'est plus de "produire plus" mais de "produire mieux". En effet, le caractère essentiellement diffus de ces pollutions implique, dans l'objectif d'une amélioration de la qualité de l'eau, de contrôler les émissions de polluants. Ceci suppose de clarifier les relations entre les pratiques agricoles et la dégradation de la qualité des eaux.

L'objectif de notre travail vise à contribuer, à élucider les relations qui existent entre des systèmes de culture et la dégradation de la qualité des eaux par les résidus de produits phytosanitaires, afin de proposer des modifications des pratiques agricoles et des systèmes de production qui seraient susceptibles de se traduire par des teneurs acceptables en résidus de produits phytosanitaires dans les eaux, tout en analysant les conditions d'acceptation de tels changements des pratiques par l'ensemble des acteurs concernés.

Ce travail a été réalisé dans une région de polyculture et d'élevage du nord-est de la France, sur les plateaux karstiques du Haut Saintois en Lorraine. Nous avons retenu ce site car il est

1.1. Le contexte géologique et hydrogéologique de la région

constitué des calcaires **fissurés** du Dogger où l'alimentation des nappes se fait exclusivement par l'infiltration des pluies. Ce système hydrogéologique, décrit par Salou en 1992, a le mérite de **former** un milieu isolé qui **délimite** un réservoir suspendu dont la qualité de l'eau n'est influencée que par les **activités exercées** sur les plateaux, ces dernières étant exclusivement agricole et forestière. **De plus**, les exutoires des nappes captées étant destinés **à** l'alimentation en eau potable des communes avoisinantes, la **qualité** des eaux de ces plateaux représente des enjeux sanitaire et **économique** locaux, car plus de 120 000 m³ sont consommés chaque année (Salou, 1992). Enfin, la protection des **aquifères** karstiques est l'un des enjeux prioritaires identifiés par le **Schéma Directeur d'Aménagement** et de Gestion des Eaux (SDAGE) Rhin-Meuse (Gouverne, 1995).

Clarifier les relations entre les pratiques agricoles et la dégradation de la qualité des eaux, implique de travailler en conditions naturelles. A l'aide de suivis de parcelles et de cases **lysimétriques**, de nombreux auteurs ont tenté de comprendre et de décrire les phénomènes affectant les produits phytosanitaires après leur application. **L'ensemble** des **résultats** obtenus dépend des **caractéristiques** de la parcelle (historique, localisation, types de sol) ; ils ne sont donc pas généralisables **à** une plus grande **échelle**. De plus, en se limitant **à** la parcelle, la zone qui alimente en eaux les cours d'eau ou la nappe souterraine n'est pas prise en compte dans son ensemble. Enfin, ces travaux **réalisés** sur de courtes **périodes**, n'intègrent ni la **durée** totale du phénomène de transfert, ni les évolutions des pratiques agricoles. **Afin** d'avoir une perception de ces phénomènes sur des temps et des espaces plus importants, il convient de travailler au niveau du bassin d'alimentation (unité de base de l'hydrologie) en tenant compte de l'**historique** des pratiques agricoles,

C'est pourquoi, **afin** tout d'abord de clarifier les relations entre les pratiques agricoles et la **dégradation** de la qualité des eaux puis ensuite de proposer des modifications des pratiques agricoles, **il nous a paru opportun** :

- **de travailler à trois échelles différentes : la molécule, la parcelle agricole et le bassin d'alimentation.**
- **de retracer l'historique de l'utilisation des produits phytosanitaires agricoles à l'échelle de la parcelle et du bassin d'alimentation et ce depuis leur première application.**

Avant d'aborder le plan de cette thèse, nous voudrions souligner le caractère pluridisciplinaire de ce travail, qui n'est pas l'œuvre d'un spécialiste des produits phytosanitaires ni même celle d'un sociologue mais **plutôt** celle d'un agronome qui a **essayé** de tenir compte de la globalité du système, de sa complexité et des relations entre les **partenaires**.

1.2. Les enjeux de la protection des ressources en eau

Dans la première partie de ce mémoire, nous présentons la problématique de cette thèse à partir d'une bibliographie centrée sur les relations entre des pratiques agricoles et la dégradation de la qualité des eaux par les résidus de produits phytosanitaires. Puis, nous décrivons le site retenu pour ce travail. Enfin, après avoir retracé l'évolution récente des pratiques de désherbage, nous étudions les perceptions qu'ont les agriculteurs du problème de la contamination des eaux par les résidus de produits phytosanitaires, ainsi que leurs logiques d'utilisation de ces produits, afin de définir les potentialités de modifications des pratiques agricoles,

Le travail présenté dans la seconde partie répond à un souci de synthèse bibliographique sur le comportement de l'atrazine, molécule la plus utilisée sur le site étudié. Après une brève description des phénomènes affectant la molécule dès son arrivée au sol, l'ensemble des éléments influant sur le transfert de cette molécule vers les aquifères est détaillé : sa dégradation, son immobilisation et ses potentialités de transport horizontal puis vertical, ceci en insistant sur l'influence des conditions de milieu.

Dans une troisième partie, nous testons en conditions contrôlées l'influence de la variable sol sur la dégradation et l'immobilisation de l'atrazine, ceci afin de montrer la variabilité du comportement de cette molécule au sein des sols des plateaux du Haut-Saintois.

La quatrième partie est consacrée à l'observation à l'échelle des bassins d'alimentation, de l'influence des pratiques agricoles sur la qualité des eaux souterraines. Dans cette partie, nous nous interrogeons sur les liens entre les teneurs observées et les pratiques agricoles, ainsi que sur les possibilités d'évolution de la qualité de l'eau.

Enfin, dans la dernière partie nous testons à l'échelle de la parcelle l'influence des techniques culturales sur la contamination de la solution du sol, afin de répondre à l'interrogation suivante : "Est-il possible de produire du maïs ensilage en Lorraine, en limitant la contamination de la solution du sol, tout en maintenant la productivité des parcelles et sans trop alourdir les coûts de production ?"

A chaque étape, nous nous sommes attachés à tirer des conclusions sur les possibilités d'évolution de la qualité de l'eau sur le site étudié. Ainsi, les résultats obtenus devraient fournir quelques éléments de réflexion nécessaires aux gestionnaires de l'eau et aux agriculteurs pour procéder à des choix sur l'évolution des pratiques agricoles en prenant en compte la qualité de l'eau.

VII. CONCLUSION GÉNÉRALE

Le devenir de l'atrazine après son application au champ dépend de l'interaction d'un grand nombre de facteurs tributaires à la fois du climat, de la composition des sols et des actions de l'homme.

Nos travaux à l'échelle de la parcelle montrent que les teneurs en résidus d'atrazine de la solution du sol résultent de la date d'apport de la matière active, de la pluviométrie et de l'état hydrique du sol. Ainsi, les teneurs en résidus de la solution du sol sont maximales après les premières précipitations efficaces qui suivent le traitement, c'est-à-dire aux mois de juin et juillet, puis elles diminuent jusqu'aux mois d'octobre - novembre et enfin se stabilisent jusqu'au traitement de l'année suivante. Cette évolution des teneurs est probablement la conséquence d'un transfert vertical à la fois rapide, par convection au sein de la macroporosité du sol, et d'un transfert lent par diffusion au sein de la microporosité du sol.

Un tel comportement n'est cependant pas observé à l'échelle du bassin d'alimentation. En effet, le suivi sur quatre années des teneurs en résidus d'atrazine des eaux de cinq sources des plateaux du Haut-Santois n'a pas montré de liens évidents entre l'évolution de ces teneurs et les dates d'apport de la matière active sur les bassins, la pluviométrie et la circulation de l'eau dans les sols et sous-sols des bassins d'alimentation. Cette absence de lien provient vraisemblablement des phénomènes d'immobilisation et de dégradation qui interfèrent sur le transfert de l'atrazine depuis la surface du sol jusqu'aux exutoires des nappes d'eau souterraines.

Or l'immobilisation et la dégradation de l'atrazine sont très variables dans les sols des plateaux du Haut-Santois. La variabilité de l'immobilisation de l'atrazine semble essentiellement due à la teneur en matière organique de ces derniers, ainsi qu'à la nature de cette matière organique, et tout particulièrement ses teneurs en acides fulviques et en humines. Enfin, lorsque la teneur en matière organique diminue, les argiles semblent jouer un rôle plus important dans l'adsorption.

Le caractère extrêmement variable de l'immobilisation et de la dégradation de l'atrazine dans les sols des plateaux du Haut-Santois rend difficilement modélisable les variations des teneurs en résidus d'atrazine des eaux de source. D'autant plus qu'il y a formation de résidus non-extractibles dans les sols, et que ces résidus sont susceptibles d'être libérés d'une manière progressive et diffuse durant plusieurs années après l'arrêt des traitements. Il est donc problématique, dans l'état actuel des connaissances, de définir l'âge des résidus retrouvés dans les eaux de sources.

Si les teneurs en résidus des eaux de sources semblent imprévisibles, il paraît cependant possible de limiter les quantités susceptibles d'être transférées en installant préférentiellement les cultures de maïs sur les sols les plus favorables à la dégradation de l'atrazine et aussi en restreignant les quantités de matières actives apportées au niveau de la parcelle.

Toutefois, il convient de rappeler que les outils (les bougies poreuses) que nous avons utilisés pour mesurer les concentrations de la solution du sol, lors des essais à l'échelle de la parcelle, n'ont permis que des évaluations ponctuelles des concentrations en résidus dans les sols. Il serait donc nécessaire de renouveler des comparaisons analogues sur des parcelles drainées de grande taille, sur différents types de sols et dans des conditions climatiques variables. Les bougies poreuses apparaissent finalement comme un outil qui, s'il n'intègre pas la variabilité totale d'une parcelle, permet cependant de réaliser un grand nombre de répétitions d'une même modalité sans pour autant nécessiter de grandes surfaces (contrairement à la parcelle drainée). Ainsi, les bougies poreuses peuvent être utilisées dans l'objectif d'une présélection de modalités d'itinéraires culturaux, qui sont susceptibles d'influer sur les concentrations de la solution du sol, avant des tests de validation en grandeur nature sur des parcelles drainées d'agriculteurs.

De façon analogue, l'immobilisation et la dégradation de l'atrazine ont été déterminées en laboratoire à l'aide de dispositifs expérimentaux modélisés dont l'intérêt et les limites sont largement discutés dans la bibliographie. Dans notre cas, ils ont essentiellement permis d'expliquer les observations de terrain (contamination des eaux souterraines par l'atrazine). Mais ces dispositifs sont relativement lourds et difficiles à mettre en oeuvre pour intégrer l'ensemble de la variabilité d'un bassin d'alimentation. Les résultats obtenus permettent néanmoins de supposer que le sol superficiel serait le sol le plus susceptible de limiter les transferts d'atrazine vers les eaux souterraines, étant données ses fortes capacités de dégradation. Il faut cependant souligner que cette faible rémanence de l'atrazine dans ce sol peut se traduire par un contrôle du développement des adventices relativement limité dans le temps, ce qui pourrait être préjudiciable au rendement de la culture. Il conviendrait de confirmer ces résultats obtenus en laboratoire par des essais de terrain,

Enfin, les prélèvements d'eaux de source ont montré leurs limites par le biais de l'importante variabilité observée dans les concentrations entre deux prélèvements. Cette variabilité amène à s'interroger sur la pertinence du pas de temps choisi. Mais, il faut rappeler que si les concentrations observées actuellement sont difficiles à expliquer, il sera d'autant plus problématique d'expliquer celles obtenues avec un pas de temps plus réduit.

Toutes ces limites se traduisent par un certain nombre de questions : Compte tenu du passé des plateaux du Haut-Santois, à quelle échéance les solutions envisagées pour réduire la contamination des eaux souterraines se traduiront-elles par une diminution du bruit de fond et des pics des teneurs en résidus d'atrazine des eaux de sources ? Quels seront les effets à long terme de ces solutions sur le **développement** des adventices et par voie de conséquence sur les rendements ? Les **réponses** à ces questions ne pourront être obtenues qu'en modifiant les pratiques agricoles sur les plateaux du Haut-Santois et en réalisant un suivi à long terme des teneurs en résidus des eaux de source. Cependant, à ce jour, nous n'avons pas les moyens de savoir si ces modifications de pratiques seront **appliquées** sur les bassins, Car, **même** si les agriculteurs ne semblent pas hostiles à ces pratiques, rien n'a encore **été** fait pour les inciter à les adopter, et ils ne connaissent pas nos **résultats**. Une question importante à **gérer** est donc maintenant la communication de ces **résultats**.

Du fait des **dépassements** de la valeur seuil de $0,1\mu\text{g/l}$ par les concentrations d'atrazine et de **dé-éthyl-atrazine**, l'eau provenant des cinq sources **observées** peut être considérée comme potable au plus un jour sur quatre. On peut donc s'attendre à des réactions de la part de la population et des gestionnaires de l'eau. Même si dans le cas des plateaux du Haut-Santois, l'origine de la pollution est **identifiée** comme étant la culture du maïs et son **désherbage** exclusif par l'atrazine depuis plus de 30 ans, il est difficile d'**établir** des liens entre cette pollution et les pratiques agricoles actuelles et par voie de **conséquence** de délimiter des **périodes** à "risques" pendant lesquelles les concentrations dans les eaux de source seraient plus **élevées**. Par analogie, il paraît également improbable de **définir** le niveau de pollution d'un aquifère à partir d'un nombre restreint d'analyses.

Un tel constat doit amener, dès maintenant, à être attentif aux risques d'accumulation et de **relargage** diffus lors de la mise en place d'une culture associant un nombre restreint de produits **phytosanitaires**. Une **prévention** des risques implique donc l'enregistrement de l'**intégralité** des itinéraires techniques de toutes les parcelles cultivées,

A l'issue de ce travail, il faut reconnaître qu'il ne nous est pas possible de prévoir l'évolution des teneurs en résidus d'atrazine des eaux souterraines des plateaux du Haut-Santois. Il serait donc utile de poursuivre des travaux à l'**échelle** des bassins d'alimentation, afin d'**évaluer** le temps nécessaire à une **réduction** du bruit de fond et des pics de concentration des teneurs en résidus d'atrazine des eaux de sources, Pour cela, il conviendrait en accord avec les agriculteurs de tester trois solutions, en continuant le suivi des teneurs en résidus des eaux de source. La **première** consisterait en l'interruption **définitive** des apports d'atrazine, la seconde reviendrait à remplacer les pratiques actuelles de **désherbage** du maïs par l'association d'un traitement dirigé du rang et d'un binage de l'inter-rang ; et la dernière impliquerait d'installer uniquement les parcelles cultivées en

maïs sur le sol superficiel. Ces tests à l'échelle des bassins d'alimentation permettraient de plus d'observer les conséquences des solutions testées sur le développement de la flore adventice et sur les rendements des cultures.

Enfin, il convient de préciser que des opérations visant à limiter les apports de matière organique sur les parcelles des plateaux du Haut-Santois sont en cours depuis 1992. Des limitations analogues ont par ailleurs également été instaurées sur les sites faisant l'objet d'opérations "Ferti-Mieux" ou de mesures agri-environnementales. Ces modifications des apports de matière organique sont susceptibles d'entraîner des changements à la fois qualitatif et quantitatif de la matière organique des sols, Or selon la bibliographie et les résultats obtenus en laboratoire, la matière organique est l'un des principaux régulateurs du transfert de l'atrazine vers les eaux souterraines. Il convient donc de s'interroger sur les effets de ces modifications sur le transfert des résidus de produits phytosanitaires vers les nappes d'eau souterraine.

Résumé

Après 1970, plusieurs analyses d'eaux souterraines ont montré une contamination par des résidus de produits phytosanitaires, ce qui induit un risque de transfert de substances toxiques vers les organismes vivants. Cependant, les processus qui contrôlent le devenir des produits phytosanitaires dans le sol sont peu connus, notamment à cause de la complexité du milieu. Aussi, dans ce travail, nous avons étudié la dynamique d'un herbicide : l'atrazine, et de ses résidus en alliant études de terrain et expériences en laboratoire afin de préciser l'impact de l'agriculture sur la qualité des eaux ainsi que de proposer des pratiques respectueuses de l'environnement et acceptables par les agriculteurs. Sur le terrain, à l'échelle des bassins d'alimentation des plateaux karstiques du Haut-Sannois en Lorraine (Rance), à partir des données concernant les apports de matière active collectées par enquête auprès des agriculteurs, la circulation de l'eau et le devenir de l'atrazine dans les sols, nous avons tenté d'expliquer l'évolution des teneurs en résidus d'atrazine des eaux souterraines. Le devenir de l'herbicide dans les sols des bassins d'alimentation a été évalué en conditions contrôlées de laboratoire par détermination des caractéristiques d'adsorption, de désorption et de dégradation. À l'échelle de la parcelle, nous avons testé l'influence de techniques de désherbage du maïs sur les risques de lessivage de résidus. Nous avons également observé l'influence de ces techniques sur le rendement de la culture, la population d'adventices et les charges de mécanisation. Enfin, nous avons déterminé, par une enquête réalisée auprès des agriculteurs et des techniciens du site, les potentialités de modification des pratiques agricoles.

L'évolution des teneurs en résidus d'atrazine des eaux n'est corrélée ni avec les apports de cet herbicide, ni même avec la circulation de l'eau dans les bassins d'alimentation. En outre, l'aptitude des sols à l'immobilisation et à la dégradation de l'atrazine sont très variables. C'est notamment le sol superficiel qui est le plus apte à limiter les transferts d'atrazine vers les nappes. Ces résultats démontrent que la présence d'atrazine et de ses résidus dans les eaux souterraines n'est pas contrôlée par des processus à court terme (1-3 ans), Ils suggèrent plutôt le transfert très lent des substances toxiques à partir d'une réserve d'herbicide séquestrée temporairement dans la matrice du sol. D'autre part, les essais en parcelles montrent qu'il est possible de diminuer la concentration en résidus d'atrazine de la solution du sol à l'aide d'un désherbage limité au rang de maïs. Cette nouvelle technique, qui semble adoptable par les agriculteurs, est aussi très prometteuse car elle ne modifie pas le rendement de culture, du moins à court terme. Cependant, même en cas d'adoption généralisée de cette technique, nous ne pouvons pas connaître le temps nécessaire à l'amélioration de la qualité des eaux souterraines, Des compléments d'études s'avèrent donc nécessaires pour évaluer ce temps à l'échelle du bassin d'alimentation.

mots clés : pratiques agricoles, atrazine, bassin d'alimentation, eau, sol, adsorption/désorption, dégradation