

N° d'ordre :



n° 10718

# THESE

présentée à

L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR DE STRASBOURG

INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES

pour l'obtention du diplôme de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR DE STRASBOURG

par

BERNHARD Claude  
Ingénieur ENITRTS

---

SUJET :

EVALUATION DU RISQUE DE CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES

DU RIED CENTRAL DE L'ILL PAR LES NITRATES

---

Soutenu le 15 juillet 1985 devant la Commission d'Examen :

MM	J.J. FRIED	Président
	D. BALLAY	Examineur
	R. CARBIENER	Examineur
	P. DESMARTIN	Examineur
	A. PRADINAUD	Examineur
	L. ZILLIOX	Examineur

## RESUME

L'augmentation des teneurs en nitrates des eaux souterraines pose un problème quasi-général en France, comme dans tous les pays industrialisés.

Pour la nappe phréatique de la plaine d'Alsace, qui constitue la principale ressource en eau et un véritable atout économique de la région, le risque présenté par l'augmentation des teneurs en nitrates n'est pas négligeable.

Les régions de Ried en Alsace représentent des zones particulièrement vulnérables par l'intensité des échanges entre les eaux superficielles et les eaux souterraines et par l'évolution des pratiques culturales.

C'est dans une telle zone sensible, entre Colmar et Sélestat, dans le Ried Central de l'Ill, que se localise le site d'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines par les nitrates.

Ce site, traversé par la rivière de l'Ill, se caractérise par son relief plat, par la proximité de la nappe phréatique qui alimente de nombreux cours d'eau drainants, et par l'importance des inondations qui se produisent souvent plusieurs fois de l'automne au printemps. On distingue essentiellement deux types de sols, l'un constitué de dépôts argileux et non calcaires de l'Ill et l'autre d'origine rhénane, limoneux et calcaire. Il existe par ailleurs des dépôts de tourbe et des cuvettes de sédimentations caractérisées par d'importants horizons à gley.

Forêt, prairie et culture de maïs constituent les trois classes d'occupation du sol.

Malgré un risque potentiel élevé d'apports de nitrates d'origine agricole à la nappe (l'impact industriel et domestique étant négligeables), la teneur en nitrates des eaux souterraines du site reste inférieure à 30 mg/l (Norme de potabilité à partir d'août 1985 : 50 mg/l).

L'objectif de la recherche consiste dès lors à appréhender l'évolution du risque de contamination, ce qui implique dans un premier temps la mise en évidence de l'influence des paramètres qui entrent en jeu dans les processus de transfert de l'azote du sol jusqu'à la nappe. Cette étude est menée sur le terrain et en laboratoire.

L'approche de terrain se fonde sur le suivi dans le temps du mouvement de l'eau du sol et de l'évolution des profils nitriques en plusieurs points représentatifs du site d'étude. Les principaux critères de choix de ces points ont été la nature des sols, l'emprise des inondations et l'occupation du sol.

L'équipement de chacun des points de mesure comprend un pluviomètre, un piézomètre, des bougies poreuses d'extraction de la solution du sol et des tensiomètres.

Des prélèvements de la solution du sol par les bougies poreuses et des mesures de teneur en eau sont effectués à une fréquence mensuelle. Les nitrates sont dosés dans l'eau du sol et par suite, l'évolution du profil nitrique peut être déterminée.

L'approche en laboratoire, sur modèle physique de type colonne, permet de préciser l'influence de certains paramètres dans des conditions de milieu contrôlées (type de sol, teneur en eau, température, pH, eH). Les possibilités de fixation des formes minérales de l'azote sur les sols du site ont ainsi été précisées de même que l'importance des phénomènes de dénitrifications. Par ailleurs, des expériences de dispersion hydrodynamique des nitrates à travers une colonne de sol ont été conduites.

La synthèse des résultats de terrain et de laboratoire permet de dresser une carte du risque de contamination des eaux souterraines du site par les nitrates d'origine agricole.

Un modèle de transport des nitrates dans l'eau souterraine du site permet d'estimer la part des apports de nitrates à la nappe liés aux pratiques culturales par rapport aux teneurs totales rencontrées dans les eaux souterraines. Elle peut représenter jusqu'à 30 % en certains endroits du site.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	1
LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISEES	3
ABREVIATIONS UTILISEES	4
RESUME FRANCAIS	5
RESUME ANGLAIS	7
SOMMAIRE	9
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>13</b>
<u>PREMIERE PARTIE</u>	
<b>1. GENERALITES SUR LE PROBLEME DES NITRATES DANS LES EAUX SOUTERRAINES</b>	<b>15</b>
1.1. L'AZOTE ET SON CYCLE NATUREL	15
1.1.1. Données sur la physico-chimie de l'azote	15
1.1.2. Le cycle de l'azote	16
1.2. ORIGINES ET EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DANS LES EAUX SOUTERRAINES	19
1.2.1. Origines des nitrates des eaux souterraines	19
1.2.1.1. Les origines naturelles	19
1.2.1.2. Les origines anthropiques	19
1.2.2. Evolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines	21
1.2.2.1. Situation générale	21
1.2.2.2. Situation en France	22
1.2.2.3. Cas particulier de l'Alsace	24
1.3. LES RISQUES POUR LA SANTE HUMAINE ET LES NORMES	24
1.3.1. Toxicologie humaine des nitrates	24
1.3.2. L'exposition aux nitrates	27
1.3.3. Aspects législatifs. Les normes	29
1.4. LES MESURES DE LIMITATION DES TENEURS EN NITRATES DES EAUX SOUTERRAINES	29
1.4.1. Les mesures préventives	29
1.4.2. Les mesures curatives	30
1.5. CONCLUSION	32
<u>DEUXIEME PARTIE</u>	
<b>2. LES PROCESSUS A PRENDRE EN COMPTE DANS L'ETUDE</b>	<b>33</b>
2.1. LE TRANSFERT DE L'AZOTE DU SOL JUSQU'AU TOIT DE LA NAPPE	33
2.1.1. Processus déterminant la concentration en azote minéral de la solution du sol	33
2.1.1.1. Sources et formes de l'azote du sol	33
2.1.1.2. Transformations bio-chimiques et absorption de l'azote du sol	35
2.1.1.3. Possibilités de rétention de l'azote minéral par le sol	40
2.1.2. Le transfert hydrique des solutés	42
2.1.2.1. Infiltration de l'eau dans les sols non saturés	42
2.1.2.2. La dispersion hydrodynamique	45
2.1.3. Difficultés de modélisation du transfert de l'azote minéral du sol	48
2.2. LE TRANSPORT DES NITRATES DANS UNE NAPPE A SURFACE LIBRE	50
2.2.1. Possibilités de dénitrification dans une nappe d'eau souterraine à surface libre	50
2.2.1.1. Possibilités de dénitrification chimique	51
2.2.1.2. Possibilités de dénitrification biologique	52
2.2.2. Le transport hydrodynamique des nitrates dans une nappe à surface libre	52
2.2.2.1. Ecoulement de l'eau dans un aquifère à surface libre	53
2.2.2.2. Prise en compte de la dispersion dans l'aquifère	54
2.3. CONCLUSION SUR LES PROCESSUS A PRENDRE EN COMPTE	56

TROISIEME PARTIE

<b>3. LE SITE D'ETUDE DU RIED CENTRAL DE L'ILL</b>	<b>57</b>
<b>3.1. PRESENTATION DU SITE</b>	<b>57</b>
<b>3.1.1. Situation géographique</b>	<b>57</b>
<b>3.1.2. Aspects géologiques et géomorphologiques</b>	<b>58</b>
<b>3.1.3. Les sols du site expérimental</b>	<b>61</b>
3.1.3.1. Les sols issus de dépôts de l'III	63
3.1.3.2. Les sols d'origine rhénane	66
<b>3.1.4. Le climat</b>	<b>68</b>
<b>3.1.5. Les eaux souterraines</b>	<b>69</b>
<b>3.1.6. Les eaux de surface</b>	<b>71</b>
3.1.6.1. Les rivières phréatiques	71
3.1.6.2. L'III	72
3.1.6.3. Les inondations	73
<b>3.1.7. Paysages, occupation du sol et pratiques culturelles</b>	<b>74</b>
<b>3.2. LE PROBLEME DES NITRATES DANS LES EAUX SOUTERRAINES DU SITE EXPERIMENTAL</b>	<b>78</b>
<b>3.2.1. Les apports de nitrates extérieurs au site</b>	<b>78</b>
3.2.1.1. Sources de pollution industrielle	80
3.2.1.2. Sources de pollution domestique	80
3.2.1.3. Sources de pollution agricole	82
<b>3.2.2. Le problème de la contamination des eaux souterraines du site expérimental par les nitrates</b>	<b>82</b>
3.2.2.1. Risques potentiels de contamination de la nappe par les nitrates sur le site expérimental	83
3.2.2.2. Situation actuelle et évolution des teneurs en nitrates au toit de la nappe sur le site.	85
<b>3.3. APPROCHE GENERALE DU PROBLEME DES NITRATES DANS LES EAUX SOUTERRAINES DU SITE</b>	<b>90</b>

QUATRIEME PARTIE

<b>4. ETUDE DU TANSFERT DES NITRATES DU SOL VERS LES EAUX SOUTERRAINES SUR LE SITE</b>	<b>91</b>
<b>4.1. APPROCHE EN LABORATOIRE DU TRANSFERT DE L'AZOTE MINERAL DU SOL VERS LES EAUX SOUTERRAINES SUR LE SITE</b>	<b>91</b>
<b>4.1.1. Expériences de rétention de <math>\text{NH}_4^+</math> par les sols du site</b>	<b>92</b>
4.1.1.1. Matériels et méthodes	92
4.1.1.2. Résultats et interprétation des mesures de rétention de $\text{NH}_4^+$	95
<b>4.1.2. Expériences de déplacement des nitrates à travers des colonnes de sols</b>	<b>97</b>
4.1.2.1. Matériels et méthodes	97
4.1.2.2. Résultats et interprétation des expériences de dispersion.	103
<b>4.1.3. Expériences de dénitrification</b>	<b>106</b>
4.1.3.1. Matériels et méthodes	106
4.1.3.2. Résultats et interprétation des expériences de dénitrification	107
<b>4.1.4. Conclusion sur les apports des expériences en laboratoire.</b>	<b>109</b>
<b>4.2. APPROCHE DE TERRAIN DU TRANSFERT DES NITRATES DU SOL A LA NAPPE</b>	<b>110</b>
<b>4.2.1. Equipements et méthodes d'étude de terrain</b>	<b>110</b>
4.2.1.1. Equipements des points de mesures	110
4.2.1.1.1. Les bougies poreuses	111
4.2.1.1.2. Les tensiomètres	121
4.2.1.1.3. Autres équipements	124
4.2.1.1.4. Disposition des équipements sur chacun des points de mesures	125

4.2.1.2. Les mesures de teneur en eau	126
4.2.1.3. Les points de mesures	126
4.2.1.3.1. Critères de choix des points de mesures	126
4.2.1.3.2. Caractéristiques des points de mesures	127
4.2.1.4. Le protocole expérimental de terrain	129
4.2.1.4.1. Les apports d'engrais et la mise en culture	129
4.2.1.4.2. Fréquences de mesures	129
4.2.2. Résultats et interprétation des mesures de terrain	130
4.2.2.1. Données climatiques	130
4.2.2.2. Evolution des profils nitriques sous culture	133
4.2.2.2.1. Résultats obtenus à partir des prélèvements par les bougies poreuses sous sol nu	133
4.2.2.2.2. Résultats des dosages de l'azote minéral sur les sols des parcelles en culture	136
4.2.2.3. Résultats des mesures sous prairie	138
4.2.3. Synthèse des résultats par une carte du risque	139
4.3. CONCLUSION SUR LE TRANSFERT DES NITRATES DU SOL VERS LA NAPPE	142

#### CINQUIEME PARTIE

5. MODELISATION DU TRANSPORT DES NITRATES DANS LES EAUX SOUTERRAINES DU SITE	143
5.1. METHODES DE RESOLUTION NUMERIQUE	143
5.1.1. Le modèle d'écoulement de nappe	143
5.1.2. Le modèle du transport	145
5.2. RESULTATS ET INTERPRETATION DE LA MODELISATION	149
5.2.1. Résultats de la modélisation de l'écoulement de la nappe	149
5.2.2. Simulation du transport des nitrates dans la nappe sans apports sur le site	150
5.3. CONCLUSION SUR LA TENTATIVE DE MODELISATION	153

#### SIXIEME PARTIE

6. CONCLUSION GENERALE	155
------------------------	-----

BIBLIOGRAPHIE	161
---------------	-----

#### PIECES ANNEXES

<b>Annexe 1 :</b> Matériels et méthodes d'analyses des concentrations en solutés dans l'eau	169
<b>Annexe 2 :</b> Résultats des analyses de sols des points de mesures.	173
<b>Annexe 3 :</b> Evolution des profils nitriques aux points de mesures en soi nu. Résultats complets.	179
<b>Annexe 4 :</b> Listings des programmes de modélisation de l'écoulement de l'eau et du transport des nitrates dans la nappe.	185
. Programme NAPPE	
. Programme CHAMPV	
. Programme Transport	

## INTRODUCTION GENERALE

La recherche entreprise sur un site expérimental du Ried Central de l'Ill en Alsace s'intègre dans le programme de recherche méthodologique sur les hydrosystèmes pour optimiser la gestion des ressources en eau engagé par le groupe **PIREN-Eau/Alsace**.

En effet, l'existence d'un immense réservoir souterrain d'eau potable, la nappe phréatique rhénane, nécessite un éclairage scientifique aidant les projets d'aménagements à intégrer un maximum d'intérêts et garantissant à très long terme la conservation du milieu EAU [PIREN, 1984].

**L'approche interdisciplinaire** réalisée par le PIREN-Eau/Alsace répond ainsi aux besoins des collectivités territoriales, au-delà des études techniques ponctuelles correspondant à un souci à court terme.

En Alsace, plus de 60 % des besoins en eau de l'économie régionale sont couverts par la nappe phréatique rhénane, garantissant une ressource en eau de bonne qualité, facilement accessible et disponible à faible coût [SRAE-A, 1984]. L'eau souterraine est cependant marquée par différentes nuisances liées aux activités humaines. Toutes ces perturbations de l'état hydrochimique et bactériologique de la nappe n'ont pas la même importance, mais elles participent à la détérioration progressive de la qualité de l'eau par effets cumulatifs.

**La recherche menée, visant à l'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines du Ried Central de l'Ill par les nitrates**, s'inscrit dans le cadre général du problème de la pollution par l'azote nitrique des eaux de nappe dont les principaux aspects sont présentés sommairement dans le **premier chapitre**.

Le but de la recherche consiste à appréhender l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines au droit du site expérimental du Ried Central

de l'III où la nappe est alimentée, au moins partiellement, par une zone cultivée.

Il est ainsi nécessaire d'étudier les flux d'azote pénétrant verticalement dans la nappe ainsi que l'évolution des teneurs au sein même de l'aquifère. Les processus à prendre en compte dans une telle approche sont présentés dans le **deuxième chapitre**, avant de détailler les caractéristiques spécifiques au site d'étude au regard du problème des nitrates dans ses eaux souterraines (**troisième chapitre**).

La méthode d'étude du transfert des nitrates du sol vers la nappe se fonde sur des expériences en laboratoire permettant de préciser certains phénomènes rencontrés in-situ et sur le suivi de l'évolution du profil nitrique dans le sol jusqu'à la nappe en des points représentatifs du site expérimental.

L'ensemble de cette approche et des résultats obtenus est développé dans le **quatrième chapitre**.

Une tentative de modélisation du transport des nitrates dans les eaux souterraines du site est présentée dans le **cinquième chapitre**, avant de conclure sur les résultats acquis à ce jour et les perspectives de poursuite de la recherche.



### 1.3.3. Aspect législatif ; les normes

Jusqu'en 1980, la réglementation française n'imposait pas de limite pour les eaux de distribution, mais recommandait de ne pas dépasser 44 mg/l en  $\text{NO}_3^-$ .

Après avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, le Ministère de la Santé a décidé de souscrire à la directive de la Communauté Economique Européenne 80/778 du 15 juillet 1980 qui fixe les valeurs suivantes pour les teneurs en nitrates :

- niveau guide : 25 mg/l
- concentration maximale admissible : 50 mg/l

Une période transitoire de 5 ans a été prévue pour mettre les eaux distribuées en conformité avec cette norme. Ainsi, à compter d'août 1985, toutes les eaux destinées à la consommation humaine devront avoir une teneur en nitrates inférieure ou égale à 50 mg/l.

. Les risques de méthémoglobinémie chez le nourrisson sont ainsi pratiquement prévenus (cf. 1.3.1).

## 1.4. LES MESURES DE LIMITATION DES TENEURS EN NITRATES DES EAUX SOUTERRAINES

Pour limiter les teneurs en nitrates des eaux de consommation provenant de nappes souterraines, des **mesures préventives et curatives** sont envisageables.

### 1.4.1. Les mesures préventives

Des mesures préventives peuvent facilement être appliquées aux sources de nitrates ponctuelles : il suffit parfois de les supprimer ou de les réduire pour ramener les teneurs en nitrates à des concentrations admissibles dans les captages d'eau souterraine.

Dans certains cas, la réfection de forages vétustes peut constituer une solution [LHEUREUX, 1983]. Mais pour les nitrates d'origine agricole, l'action de prévention est difficile à mener rapidement et efficacement [PHILIPOT & al., 1982].

## 6. CONCLUSION GENERALE

Notre recherche s'intéresse à l'évolution de la concentration en nitrates d'une eau souterraine alimentée au moins partiellement par une zone cultivée, problème qui constitue une préoccupation majeure des utilisateurs de l'eau [CALVET & al., 1984]. Le cas particulier du site expérimental dans le Ried Central de l'Ill, présentant a priori un risque élevé de contamination des eaux souterraines par lessivage des nitrates du sol, a été considéré.

L'étude bibliographique des processus à prendre en compte montre qu'il est nécessaire d'appréhender d'une part l'évolution des flux d'azote pénétrant verticalement dans la nappe et d'autre part l'évolution des teneurs en nitrates au sein même de l'aquifère.

Mais il s'est révélé qu'au stade actuel des connaissances, la quantification directe des transformations bio-chimiques de l'azote du sol en fonction des conditions du milieu (caractéristiques du sol, température, teneur en eau...) n'est pas envisageable.

Ainsi, des points de mesures représentatifs du site ont été équipés de manière à suivre l'évolution des profils nitriques dans le temps. La variabilité spatiale est cependant telle que cette première approche reste du domaine qualitatif ou semi-quantitatif.

L'utilisation de **bougies poreuses d'extraction de la solution du sol** a donné lieu à une analyse critique de cette technique, montrant que, si des indéterminations demeurent, les bougies poreuses constituent cependant la technique existante la moins mal adaptée au suivi de profils nitriques dans les conditions du site.

Les mesures de terrain ont été complétées par des expériences en conditions contrôlées en laboratoire. Ainsi, il a été montré que l'azote ammoniacal est pratiquement totalement retenu par les différents types de sols du site, au contraire des nitrates qui, en l'absence de transformations

bio-chimiques, se comportent comme un traceur conservatif.

Dans les sols tourbeux du Ried ou les argiles à gley, d'importants phénomènes de dénitrification ont été mis en évidence à la fois par une expérience en laboratoire et par les mesures in-situ.

*Si le risque de contamination des eaux souterraines par les nitrates du sol sur le site expérimental apparaissait a priori élevé, l'analyse des résultats de terrain et de laboratoire nous porte à pondérer ce jugement.*

Un couvert de forêt ou de prairie assure une bonne protection de la nappe quelle que soit la nature des sols.

Par contre en zone cultivée, l'influence du type de sol devient prépondérante et des situations extrêmes ont été mises en évidence à l'échelle du site expérimental. Ainsi, le risque de contamination de la nappe est pratiquement nul sous les sols tourbeux ou lorsqu'il existe un horizon à gley, par suite des phénomènes de dénitrification.

Le risque apparaît encore limité dans les zones de sols issus de dépôts argileux de l'Ill dans lesquels les transferts d'eau et de solutés sont extrêmement lents. Mais à terme, les nitrates accumulés dans le profil pédologique vont contaminer en grande partie la nappe.

Les sols de sables et limons du Rhin par contre laissent pratiquement tous les nitrates du sol qui n'ont pas été prélevés par les plantes à l'échelle d'une année rejoindre les eaux souterraines.

*Ainsi une carte du risque de contamination des eaux souterraines par les nitrates du sol sur le site expérimental a été dressée en fonction du type de sol et de l'occupation du sol (l'influence des inondations n'a pas encore pu être prise en compte).*

Au regard de la faible durée d'investigation et de la forte variabilité spatiale des phénomènes qui interviennent, **il n'est pas possible de quantifier à ce stade de la recherche** les apports réels de nitrates du sol à la nappe.

*Une estimation indirecte de la part des nitrates apportés à la nappe sur le site par rapport à la teneur totale en nitrates dans l'eau souterraine a été tentée à l'aide d'un **modèle mathématique à résolution numérique** du transport des nitrates dans la nappe.*

Ce modèle, simple et cohérent avec les mesures de terrain dont on dispose, permet de simuler la répartition des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du site en imposant les concentrations réelles mesurées au toit de la nappe aux limites du domaine étudié, en l'absence d'apports de nitrates sur le site même. Ainsi, la différence entre les teneurs réelles sur le site et celles obtenues à l'aide du modèle par **cette simulation permet d'estimer à 5 mg/l en moyenne la part des teneurs en nitrates de l'eau souterraine provenant des apports du site** (en certains endroits, cette part peut représenter jusqu'à 30 % de la teneur totale dans la nappe).

*La carte des apports que l'on peut dresser de cette manière est cohérente avec la carte du risque de contamination de la nappe par les nitrates sur le site, obtenue à partir des résultats de terrain et de laboratoire.*

*En interprétant différemment les résultats de cette simulation, il apparaît aussi que l'on peut espérer une baisse moyenne de 5 mg/l des teneurs en nitrates de la nappe au droit du domaine modélisé, si le lessivage des nitrates était totalement limité par de meilleures pratiques culturales sur le site.*

Mais la validation définitive du modèle nécessite la quantification des apports en nitrates sur le site par une méthode différente. Les ordres de grandeur indiquées correspondent cependant certainement à la réalité.

**Des conclusion pratiques** peuvent être tirées de cette recherche.

Au niveau des méthodes de suivi des profils nitriques in-situ, **l'emploi de bougies poreuses d'extraction de la solution du sol nous apparaît être indiqué** dans des conditions de types de sols et d'hydromorphie similaires

à celles du site du Ried Central de l'Ill.

Par ailleurs, l'analyse des résultats de terrain nous engage à **rappeler aux agriculteurs que la minéralisation des matières organiques du sol libère des quantités non négligeables d'azote minéral** dont il convient donc de tenir compte dans la détermination de la dose d'engrais azotés apportés sous forme minérale ou organique. De plus, **la pratique d'un engrais vert limiterait à la fois le lessivage hivernal des nitrates et l'érosion des sols lors des inondations.**

*Enfin, il peut apparaître profitable de **promouvoir l'approche qualitative du problème** développée jusqu'ici à des régions entières. Une cartographie systématique définissant les zones à risque élevé d'apport de nitrates du sol à la nappe permettrait de focaliser les action de prévention et de les rendre ainsi plus efficaces. Une échelle de travail au 1:50 000 nous semble concilier les contraintes de coût minimal et de précision suffisante dans la délimitation des zones à risque.*

Dans **les perspectives de poursuite** de la recherche, plusieurs étapes sont à considérer :

1 - **le suivi sur une période plus longue** (2 ou 3 ans au moins) de l'évolution des profils nitriques aux points de mesures existants, afin d'étudier l'influence des inondations et de préciser les résultats actuels dans différentes conditions climatiques et hydrologiques. Des périodes de fréquence de mesures hebdomadaires permettront la mise en évidence de faibles fluctuations des profils nitriques.

2 - **la mise en culture des points de mesures** actuellement en sol nu apparaît nécessaire pour mieux étudier l'influence de l'occupation du sol et des pratiques culturales. Mais des difficultés pratiques sont à craindre, notamment au niveau de l'uniformité du couvert végétal et des prélèvements d'eau du sol en été lorsque l'évapotranspiration est très forte.

3 - **l'étude de la variabilité spatiale** du transfert des nitrates à travers le sol à l'échelle d'une parcelle d'1 ha par exemple , équipée d'une

dizaine de points de mesures devient nécessaire pour quantifier les phénomènes.

4 - **la quantification des apports de nitrates à la nappe** est alors envisageable en équipant de la sorte plusieurs parcelles représentatives du site expérimental.

5 - *le modèle de transport des nitrates dans la nappe peut ainsi être validé sur le site expérimental et son application étendue dès lors à la région naturelle du Ried Central de l'Ill toute entière. Les gestionnaires de la ressource en eau disposeront ainsi d'un outil de simulation/prévision valable à l'échelle de plusieurs centaines de kilomètres carrés.*