HAL
open science

Projet sur le Comtat-Venaissin pour l'environnement. Rapport d'activité 1999-2000

Patrick P. Bertuzzi, Stephane Bellon, S. Vannier, . Chambre d'Agriculture de Vaucluse, . Université d'Avignon Et Des Pays de Vaucluse

To cite this version:

Patrick P. Bertuzzi, Stephane Bellon, S. Vannier, . Chambre d'Agriculture de Vaucluse, . Université d'Avignon Et Des Pays de Vaucluse. Projet sur le Comtat-Venaissin pour l'environnement. Rapport d'activité 1999-2000. 27 p., 2000. hal-02840266

HAL Id: hal-02840266

https://hal.inrae.fr/hal-02840266v1

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVS782

PROJET SUR LE COMTAT-VENAISSIN POUR L'ENVIRONNEMENT

Rapport d'activité 1999-2000

Patrick BERTUZZI[1], Stéphane BELLON[2] et Sophie VANNIER[3]

[1]INRA, Unité de Science du Sol – Site Agroparc- 84914 Avignon Cedex 9
[2]INRA, Unité d'Ecodéveloppement – Site Agroparc- 84914 Avignon Cedex 9
[3]Chambre d'Agriculture de Vaucluse– Site Agroparc- 84912 Avignon Cedex 9

Equipes participantes :

INRA-Centre de Recherches d'Avignon
Chambre d'Agriculture de Vaucluse
Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

SOMMAIRE

INTRODUCTION 3

AXE 1 – GÉOCHIMIE DE LA NAPPE ET DE LA QUALITÉ DES EAUX - APPLICATION À L'ÉVOLUTION DES FORMES DE L'AZOTE. 5

1-1 RAPPEL DES ACQUIS AU NIVEAU DE LA NAPPE 5
1-2 UN SCHÉMA GLOBAL DE FONCTIONNEMENT 5
1-3 POUR ALLER PLUS LOIN DANS LA COMPRÉHENSION DU FONCTIONNEMENT 7

AXE 2 - CARACTÉRISATION ET LOCALISATION DES PRINCIPAUX SYSTÈMES DE CULTURE DU BASSIN ET DES ÉLÉMENTS DE LA GESTION HYDRIAUE ET AZOTÉE À LA PARCELLE..... 9

2-1 CARACTÉRISATION ET LOCALISATION DES PRINCIPAUX SYSTÈMES..... 9
DE CULTURE DE LA ZONE VULNÉRABLE 9
*2-1-1 **Sensibilité du milieu à l'infiltration.*** *10*
*2-1-2 **L'analyse des systèmes de culture.*** *12*
A/ Rappel de la méthodologie. *12*
B/ Cas de la viticulture(Isoard, 1999) *13*
D/ Cas de l'arboriculture (Calmet, 1998, Bellon et al. 2000), ... *15*
E/ Cas des systèmes céréalier de grandes cultures (Adell, 1998) *17*
*2-1-3 **La localisation spatiale des systèmes de cultures.*** *18*
A/ La poursuite du diagnostic au niveau de l'analyse paysagère. *18*
B/ Les limites de l'analyse paysagère. *18*
C/ Une nouvelle méthodologie de spatialisation des systèmes de culture. *20*

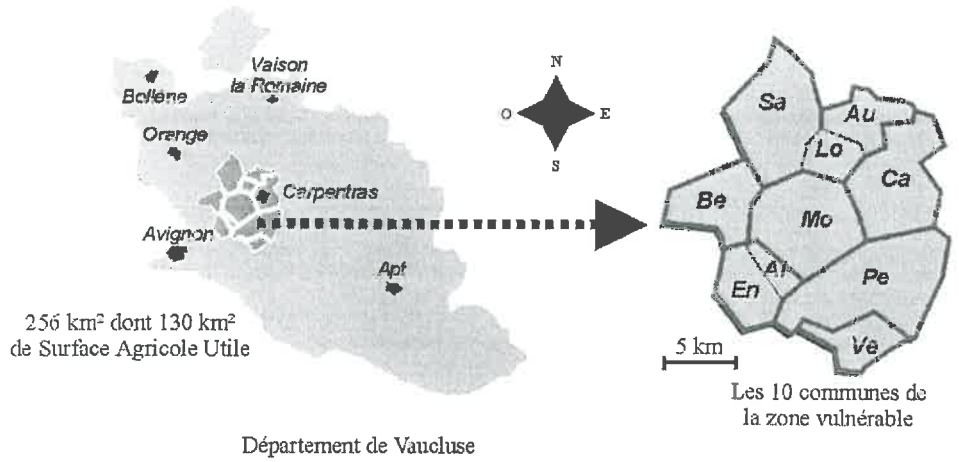
2-2 ELÉMENTS DE LA GESTION HYDRIQUE ET AZOTÉE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE. ...22

CONCLUSION ET BILAN 25

BIBLIOGRAPHIE 26

Introduction

Il convient de rappeler que Le « **PRO**gramme **CO**mtat-Venaissin **P**our l'**E**nvironnement **(PROCOPE)** » est un projet multidisciplinaire de recherches regroupant des unités du Centre d'Avignon et deux partenaires extérieurs, la Chambre d'Agriculture du Vaucluse, l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
La zone d'étude *(figure 1)* concerne les 10 communes du Comtat-Venaissin classées "Zone Vulnérable" au titre de la directive européenne Nitrate du 19 décembre 1991. Elle s'étend sur une surface d'environ 256 km² présentant une agriculture très diversifiée avec une forte



densité de population. Les surfaces cultivées couvrent la moitié de la zone.

Figure 1. *La zone vulnérable du Comtat-Venaissin. Les dix communes sont Althen des Paluds (Al), Aubignan (Au), Bédarrides(Be), Carpentras (Ca), Entraigues sur Sorgues (En), Loriol du Comtat(Lo), Monteux (Mo), Pernes les Fontaines (Pe), Sarrians (Sa) et Velleron (Ve).*

Les trois premières années de fonctionnement du programme PROCOPE ont permis de mettre en évidence un certain nombre d'éléments essentiels à la compréhension du diagnostic de la pollution des eaux souterraines pour le nitrate.
En premier lieu, la campagne d'analyse de près de 700 puits ou forages, réalisée au cours de l'été 1996, a permis:

- d'identifier un critère fiable de séparation des nappes (rapport Magnésium/Calcium) qui permet de classer l'appartenance des eaux analysées à l'une ou l'autre des deux nappes ;
- d'affirmer que la nappe alluviale est fortement touchée par la pollution nitratée notamment dans le quart Nord-Est de la zone où les teneurs dépassent le seuil de potabilité de 50 mg/l. Au contraire, la zone de plaine sud (ligne Velleron – Entraigues) n'est pas atteinte.
- d'affirmer que la nappe Miocène est atteinte de façon plus localisée, à l'aplomb de la zone fortement contaminée pour la nappe alluviale même si la norme de potabilité est rarement dépassée. Rappelons que l'enjeu de la protection de cette nappe est essentiel compte tenu de l'importance du réservoir, de la lenteur de l'écoulement des eaux et de son potentiel originel de qualité.

L'analyse de l'impact et du rôle de l'agriculture sur la pollution nitratée a été abordée à deux niveaux de:

- *l'occupation du sol:* une analyse paysagère a permis une structuration de l'espace en grandes unités, ce qui conduit d'une part à positionner les rapports entre agriculture et

autres usages de l'espace, d'autre part à identifier trois grands types de paysages agricoles (bocage, paluds et petits paluds) en fonction de leur structure, de leurs composants et de leur représentativité ;

- *l'analyse des systèmes de culture:* la complexité de l'organisation des cultures nous a amené à travailler, au cours des premières années, par grands systèmes de production. Ainsi, les pépinières, bois et plants de vigne, l'élevage ont été décrits et présentés.

Les travaux conduits au cours de ce programme s'inscrivent dans la continuité des travaux précédents sur les deux axes principaux du programme :

- AXE 1 – Géochimie de la nappe et de la qualité des eaux - Application à l'évolution des formes de l'azote qui cherche à rassembler l'ensemble des éléments du diagnostic de la zone touchant au fonctionnement du compartiment « sol – zone non saturée – nappe » en vue de comprendre le déterminisme de la quantité et de la forme de l'azote dans la nappe
- AXE 2 – Caractérisation et localisation des principaux systèmes de culture du bassin et des éléments de la gestion hydrique et azotée à la parcelle.

AXE 1 – Géochimie de la nappe et de la qualité des eaux Application à l'évolution des formes de l'azote.

1-1 Rappel des acquis au niveau de la nappe

Le relief de la zone d'étude peut être scindé en deux grandes unités *(figure 2)*. Une zone de terrasses et de glacis, située à l'Est principalement, a une altitude comprise entre 50 et 100 m environ Une zone basse centrale est constituée par deux plaines nord et sud, entre 30 et 50 m d'altitude. La zone d'étude ne forme pas une entité hydrologique en soi. Les eaux superficielles et souterraines sont drainées vers le Rhône à l'Ouest.

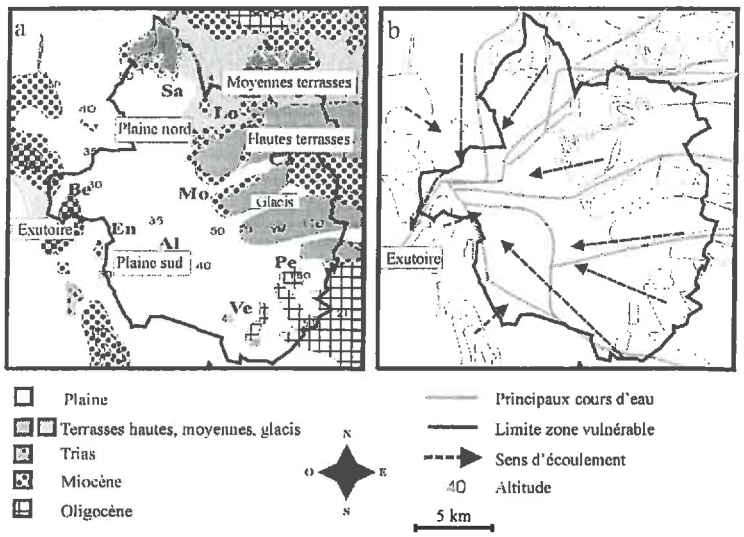


Figure 2. Les grandes unités morphologiques (a) et l'hydrologie (b) de la zone d'étude

1-2 Un schéma global de fonctionnement

La thèse de Joanne Musset (1999) a permis de cerner les caractéristiques du fonctionnement géochimique de la nappe alluviale. La carte des teneurs en oxygène (*figure 3a*) met clairement en évidence un contraste entre l'état oxique des eaux des zones hautes (terrasses, glacis) comparé à l'état anoxique des eaux des zones basses (plaines). De plus, le niveau de réduction du manganèse est atteint dans la zone basse (*figure 3b*)

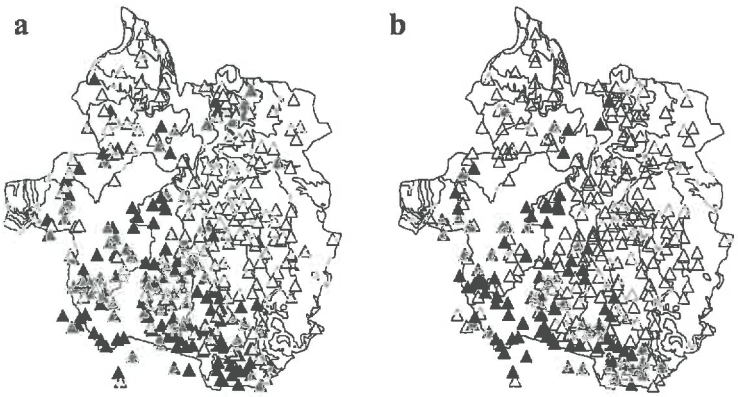


Figure 3. Répartition des teneurs en oxygène dissous (a) et en manganèse dissous (b) dans la nappe alluviale. La couleur de plus en plus foncée des triangles traduit une diminution des teneurs pour l'oxygène et une augmentation des teneurs pour le manganèse.

Ces résultats confirment le contraste important au niveau de l'aération et du potentiel redox de l'eau de la nappe alluviale suivant la position des différentes unités géomorphologiques. Indépendamment de l'occupation du sol, sur les zones hautes (terrasses et glacis), les conditions géochimiques sont favorables au maintien du nitrate dans la nappe. Il n'est donc pas étonnant de retrouver le nitrate dans la nappe alluviale tant que les conditions oxiques sont maintenues. Dans les zones basses, les conditions géochimiques sont atteintes pour que la dénitrification soit active. Elle joue un rôle d'élimination naturelle du nitrate. Le processus de dilution consécutif à l'entrée sur la zone *(figure 1b)* d'eaux faiblement chargées en nitrate, au Nord (Ouvèze) comme au Sud-Est (Sorgues), contribue aussi à la décroissance des teneurs (Musset et al., 2000).

Il existe donc un déterminisme de l'organisation spatiale des teneurs en nitrate illustrée sur la *figure 4* à gauche pour la campagne 1996. Elle donne la répartition spatiale de deux classes extrêmes des teneurs en nitrate. Le teneur les plus faibles (nitrate < 5 mg/l) sont toujours prioritairement dans les zones basses de plaine. Les teneurs qui dépassent la norme de potabilité de 50 mg/l sont principalement à l'Est sur les zones hautes. Pour les classes intermédiaires de teneurs, les résultats montrent un glissement d'Ouest en Est des classes croissantes (Musset et al. 2000).

Un schéma de fonctionnement global a pu être ainsi établi. La zone de plaines est le lieu de passage obligé des eaux. Des zones hautes vers les zones basses, lors de leur parcours, les eaux de la nappe alluviale vont rapidement voir décroître leur teneur en nitrate au niveau la zone de contact avec la plaine.

Ce schéma de fonctionnement a été vérifié sur un transect AB *(figure 4, à droite)*, sélectionné au Sud de la zone d'étude.

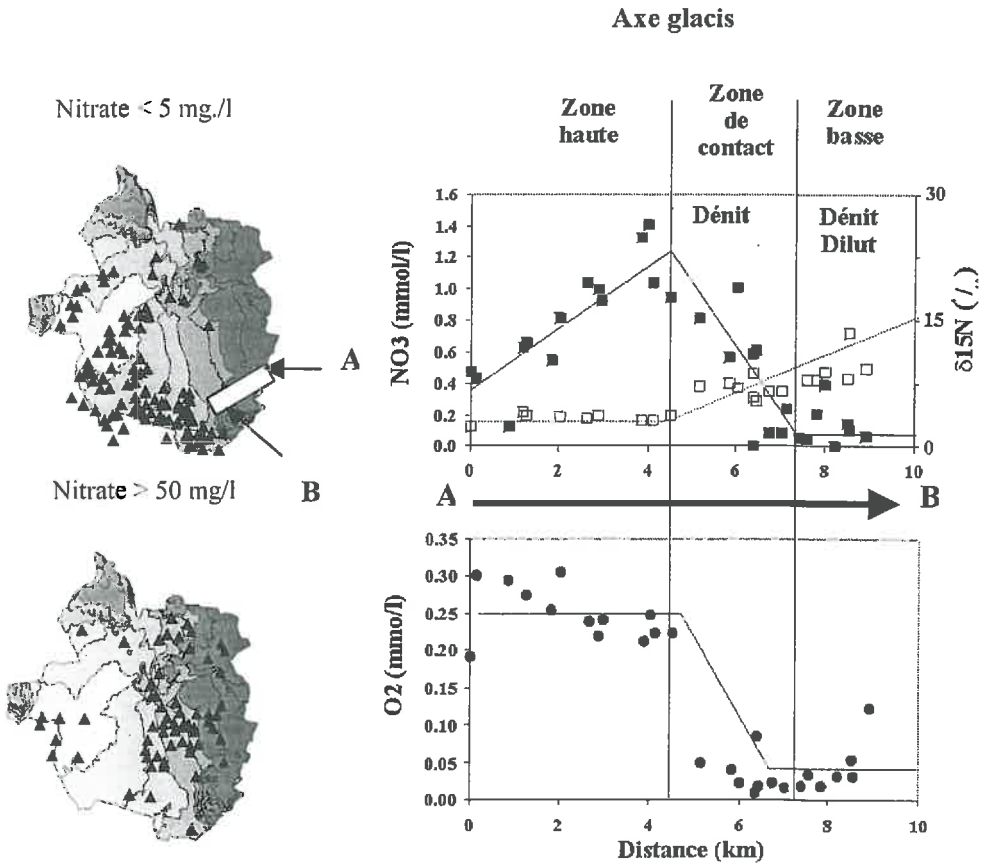


Figure 4. Localisation des points à faible et forte teneur en nitrate (les teintes de gris correspondant aux altitudes) et représentation des teneurs en nitrate ($N0_3$), azote 15 (^{15}N) et oxygène (O_2) le long du transect [AB].

Sur l'axe A-B, on constate que la teneur en nitrate augmente entre 0 et 5 km, augmentation qui peut être reliée à l'occupation du sol sur un milieu filtrant. Entre les points kilométriques 0 et 2 km (origine en A), l'activité agricole est faible, limitée à des cultures de coteaux secs (vigne et verger). De 2 à 5 km, il y a principalement des cultures maraîchères de plein champ et sous abri pouvant expliquer l'augmentation des teneurs en nitrate. La forte décroissance de la teneur en nitrate constatée à partir de 5 km s'accompagne par l'apparition de conditions anoxiques comme le montre la diminution de la teneur en oxygène dissous dans l'eau. Cette décroissance s'accompagne d'un enrichissement isotopique naturel en ^{15}N. Ces données isotopiques confirment la réalité du processus de dénitrification dans les zones basses auquel s'ajoute, par des apports d'eau exogène, un effet de dilution.
Les données recueillies en 1996, celles de 1998 ainsi que les données temporelles, depuis 1993, de l'Observatoire Maraîchage-Environnement de la Chambre d'Agriculture de Vaucluse confirment ce schéma de fonctionnement et son maintien dans le temps.

1-3 Pour aller plus loin dans la compréhension du fonctionnement

La compréhension et la maîtrise de l'apparition et du devenir de la pollution de la nappe par le nitrate nécessitent de comprendre le fonctionnement de l'ensemble du continuum "zone non saturée – nappe". Si le fonctionnement de la zone non saturée superficielle a fait l'objet de nombreux travaux dans la bibliographie, il n'en va pas de même du fonctionnement de la zone non saturée profonde et l'on admet trop souvent que le flux de nitrate sortant de la zone non saturée superficielle est égal au flux entrant dans l'aquifère.
La zone non saturée profonde présente trois spécificités par rapport aux horizons superficiels du sol :

- elle a un contenu faible en matière organique, les apports de carbone organique dépendant exclusivement des possibilités de transfert de composés dans la solution depuis la zone non saturée superficielle ;
- son aération peut être limitée par la consommation microbienne (même faible) de O_2, par la distance à l'atmosphère, et par l'humidité réduisant les possibilités d'échange entre le sol et l'atmosphère ;
- les flux d'eau peuvent être plus faibles que ceux observables dans les horizons de surface et aboutir à des temps de séjours longs de l'eau dans ces horizons.

Ces spécificités peuvent déboucher sur des processus dont les importances relatives diffèrent de celles observées pour les horizons organiques superficiels (i.e. le sol).
En 1999, nous avons entrepris un travail en collaboration avec le Laboratoire d'Hydrogéologie (LH) de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV) pour caractériser le fonctionnement du continuum "zone non saturée – nappe" localement en deux sites du Comtat-Venaissin(un dans la plaine sud près de Monteux, l'autre sur le glacis vers Pernes-les-Fontaines). Ils se différentient par leur fonctionnement hydrique et le risque associé de périodes d'hypoxie. Notre premier objectif est de pouvoir décrire les processus impliqués dans le devenir de l'azote sur l'ensemble de la zone non saturée. Au regard des modèles dont nous disposons actuellement, cet objectif suppose que nous soyons capables d'y incorporer une description (i) des transferts de matière organique, (ii) de l'aération de l'ensemble de la zone non saturée qui dépend du transfert et de la consommation de O_2 (elle-même affectée par le statut organique des horizons), et (iii) de leurs effets sur le transfert et les biotransformations de l'azote.
Nous avons réalisé, dans le cadre d'un D.E.A., une étude préliminaire pour caractériser dans ces sites la distribution verticale des communautés microbiennes dénitrifiantes et de leur activité spécifique dénitrifiante (Cannavo, 1999). Il s'agit d'une série de réactions

microbiennes se produisant en anaérobiose et réduisant nitrate (NO_3^-) et nitrite (NO_2^-) sous forme gazeuse (N_2O et N_2). Nous avons ainsi montré que la distribution verticale des germes dénitrifiants était quasiment homogène dans le profil présentant des risques d'hypoxie temporaire (Monteux), et se traduisait par un ratio "dénitrifiant/hétérotrophe" croissant avec la profondeur. Ce dernier est souvent considéré comme un indicateur pertinent de l'aptitude à coloniser un milieu conféré par l'aptitude à dénitrifier. Au contraire, dans le site sans risque marqué d'hypoxie (Pernes), hétérotrophes et dénitrifiants décroissaient simultanément avec l'accroissement de la profondeur, aucune variation du ratio "dénitrifiant/hétérotrophe" n'y étant statistiquement décelable. Il y avait plus de dénitrifiants dans le site présentant le plus de risques de conditions d'hypoxie (Monteux). L'activité dénitrifiante spécifique (i.e. l'activité dénitrifiante potentielle rapportée au nombre de germes dénitrifiants) est 2 fois plus élevée sur le site de Monteux, correspondant à des potentiels de dénitrification en surface de 110 et 66 kg $N.ha^{-1}.j^{-1}$, respectivement à Monteux et à Pernes. L'activité dénitrifiante décroît moins vite dans l'horizon sous-jacent (30-70 cm) du site de Monteux.

A partir du mois de novembre 2000, ce travail se prolonge grâce à la thèse de P. Cannavo. Elle vise à décrire l'ensemble des processus physiques (transfert de masse – eau, solutés et gaz – et de chaleur) et biogéochimiques (biotransformations de C et N notamment) impliquées dans le devenir de l'azote.

AXE 2 – Caractérisation et localisation des principaux systèmes de culture du bassin et des éléments de la gestion hydrique et azotée à la parcelle.

2-1 Caractérisation et localisation des principaux systèmes de culture de la zone vulnérable

L'objectif principal de notre travail, évoqué dès le rapport 1997-1998, est d'évaluer les risques de fuites de nitrate vers la nappe pour les principaux systèmes de culture (SC_i) recensés en fonction de leur localisation. L'indice i fait référence au type de système de culture.

Une première étape consiste à identifier et caractériser les terrains du bassin en fonction des risques de transferts d'éléments vers les eaux souterraines, afin d'établir une hiérarchie de ces terrains et de définir des milieux (M_j, l'indice j fait référence au type de milieu) plus ou moins sensibles. Les sols du bassin de Carpentras seront caractérisés en privilégiant les transferts d'eau (aptitude des sols à l'infiltration verticale) et la dynamique de l'azote (minéralisation, dénitrification...). La spatialisation conduit à la définition de zones homogènes du point de vue des transferts de polluants et à une carte de sensibilité du milieu à l'infiltration.

A partir des ensembles de successions culturales et des modalités de conduite définies, il s'agit de caractériser chaque système de culture en termes de fuites de nitrate et de hiérarchiser ces SC_i. Ils concernent en particulier : les successions culturales (nature des cultures, nombre de productions par an, délai de retour), une évaluation de l'interculture (période, durée, gestion des résidus), la gestion de la fertilisation azotée (périodes, doses et fractionnement éventuel), l'irrigation (type, période, doses) Ces critères sont à moduler selon les systèmes de culture SC_i.

L'objectif final est de déterminer les combinaisons "systèmes de culture SC_i et milieux M_j", les terrains correspondants aux SC_i localisés aggravant ou minorant les pressions polluantes des SC_i. Cette étape doit permettre d'aboutir à une grille décrivant SC_i et milieux M_j selon le modèle suivant :

SC_i par ordre croissant de risques de fuites →

milieux M_j par sensibilité croissante ↓

SC_iM_j				
	$SC_{i+1}M_{j+3}$			

Ainsi, les systèmes de culture répertoriés comme présentant le plus de risques et situés sur les milieux les plus sensibles (cases situées en bas et à droite de la grille) seront à étudier préférentiellement (ordination des risques).

S'agissant de l'axe vertical de la grille de risque, le travail entrepris implique l'établissement d'une méthodologie de caractérisation de la sensibilité du milieu (sol et sous-sol) sur la zone vulnérable.

S'agissant de l'axe horizontal de la grille de risque, le travail entrepris nécessitait, dans un premier temps, un approfondissement de la connaissance des systèmes de production présents sur la zone.

Dans la suite, nous allons illustrer les résultats obtenus dans ces deux directions.

2-1-1 Sensibilité du milieu à l'infiltration.

Le transport en profondeur du nitrate, élément soluble dans l'eau, dépend étroitement du comportement hydrodynamique du sol et du sous-sol sous-jacent. L'évaluation de la sensibilité à l'infiltration des différents types de sol de la zone d'étude constitue donc un élément essentiel du diagnostic. La méthodologie proposée repose principalement sur une interprétation thématique de la carte pédologique de la zone. Elle a été extraite de l'étude pédologique du secteur sud-ouest du département de Vaucluse réalisée en 1974 par la société du Canal de Provence et d'Aménagement de la région Provençale (S.C.P.).
L'interprétation thématique directe de la pédologique du S.C.P. décrite précédemment n'est pas suffisante pour répondre à cet objectif. Construite sur des bases pédogénétiques, elle conduit à classer dans la même famille des sols de texture très contrastée n'ayant a priori pas le même comportement hydrodynamique vis à vis de l'infiltration.
C'est pourquoi, il est apparu nécessaire de construire une méthodologie d'évaluation de la sensibilité à l'infiltration adaptée au contexte de l'étude et aux données disponibles. Elle a été élaborée à partir de l'analyse de 56 profils pédologiques observés sur la zone vulnérable et décrits dans l'étude pédologique du S.C.P. L'objectif est d'utiliser au mieux l'information disponible de chaque profil afin de construire un critère quantitatif permettant de classer les capacités d'infiltration des différents types de sol.
Pour tous les horizons décrits d'un profil pédologique sont renseignées :

- la charge en cailloux,
- la texture sur le triangle GEPPA. Les 14 classes de texture du triangle GEPPA décrites dans tous les horizons ont été noté de 0 à 14 de la plus fine à la plus grossière. Plus la note est élevée, plus la texture est grossière.
- l'humidité équivalente. Elle correspond à une mesure de laboratoire de la capacité maximale de rétention de l'eau dans le sol. Plus cette valeur est élevée, plus la réserve en eau, pour une épaisseur considérée de sol sera importante.

Deux critères contrôlant l'infiltrabilité n'ont pas été pris en compte dans le contexte de cette étude. Le premier critère est la topographie traduisant l'effet de la pente sur le ruissellement au détriment de l'infiltration. Nous avons considéré que ce critère pouvait être négligé en première approximation. Le second critère est la présence d'une couche imperméable en profondeur dans la zone non saturée qui bloque l'infiltration. Globalement, à l'échelle de la zone d'étude, il est possible de faire un double constat. D'une part, sur les terrasses, le toit de la nappe phréatique se situe entre 10 et 15 m de profondeur, la zone non saturée est globalement filtrante et ne constitue pas une barrière hydraulique. Lorsque l'on se dirige vers la plaine, sur le glacis, le toit de la nappe remonte progressivement mais le même constat reste valable. D'autre part, seule, la plaine, avec des matériaux fins dans la zone non saturée peut présenter des zones plus imperméables. Néanmoins ce rôle d'écran est largement limité par la quasi-permanence du toit de la nappe très proche de la surface (généralement inférieur à 2 m), donc en contact direct avec la couverture pédologique. A l'échelle de la région d'étude, il a donc été admis l'absence d'une barrière hydraulique dans la zone non saturée. Ceci a conduit à ne pas prendre en compte la présence d'une couche imperméable comme critère limitant l'infiltrabilité du sol jusqu'à la nappe.

Pour chaque profil, l'indice synthétique d'infiltrabilité a été construit à partir de la somme de cinq notes :
La note 1 correspond à la charge en cailloux de l'horizon de surface
La note 2 correspond à la texture de l'horizon de surface.
La note 3 correspond à la charge moyenne en cailloux des différents horizons du profil de sol décrit.
La note 4 correspond à la texture moyenne des différents horizons du profil de sol décrit.
La note 5 correspond à la humidité équivalente moyenne des différents horizons du profil de sol décrit.
L'introduction des notes 1 et 2 se justifie par le rôle prépondérant d'écran de l'horizon de surface vis à vis de l'infiltration de l'eau dans le sol.
Dans le calcul des valeurs moyennes (notes 3,4,5), la valeur de chaque horizon est pondérée par le rapport de l'épaisseur de l'horizon sur la profondeur totale du profil observé. Enfin, afin de donner un même poids à chaque notation, les notes ont été normalisées en 0 et 1 en fonction des notes minimale et maximale de la distribution des 56 valeurs disponibles.
Une augmentation des notes 1 à 4 traduit une plus grande aptitude du sol à laisser l'eau s'infiltrer. Une augmentation de la note 5, par contre ; traduit une meilleure aptitude du sol à retenir l'eau. C'est pourquoi, dans la note finale, la note 5 est exprimée sous la forme normalisée inverse $1-C_5$. La note finale attribuée à chaque profil correspond à la somme de ces 5 notes donnant un poids égal à chaque critère de la note finale:

$$CT = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + (1 - C_5)$$

Les résultats obtenus sont représentés sur la *figure 5*.

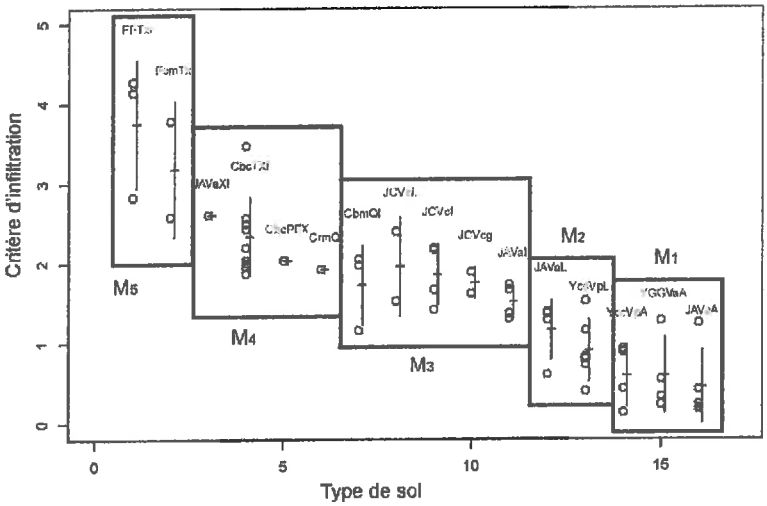


Figure 5. *Relation entre le critère d'infiltration et le type pédologique de sol selon la classification du S.C.P. ..*

Figure 6. *Représentation spatiale du risque à l'infiltration. Hormis la couleur noir (zone urbaine), une couleur plus foncée indique un risque croissant.*

La difficulté d'interprétation de ce graphique tient à la variabilité du nombre de profils disponibles par type de sol et à la variabilité des notes au sein d'un même type pédologique. Néanmoins, cette approche permet globalement d'obtenir un classement cohérent des différents types de sol ou milieu M_j. Les plus sensibles à l'infiltration (notes plus élevées) sont les sols fersialitiques (F). Les moins sensibles, les sols d'apport alluvial (JAVa) et

hydromorphes (YCC, YGG) de texture à dominante argileuse. Les sols alluviaux de texture grossière (JAVaXi) sont décalés vers la gauche (plus grande aptitude à l'infiltrabilité). Les sols bruns (Cb) et d'apport colluvial (JC) se situent en position intermédiaire.
De l'analyse de la *figure 6* a été défini une typologie de l'infiltrabilité en 5 milieux M_j. La figure YY synthétise l'information d'un point de vue cartographique. Les sols présentant un risque majeur (classe d'infiltrabilité supérieure ou égale à 4) représente environ 30 % de la zone vulnérable et sont principalement localisés à l'Est de la zone d'étude. Les zones de glacis et terrasses présentent le double inconvénient de :

- concentrer les sols et sous-sols les plus vulnérables vis à vis de l'infiltration,
- conserver un milieu thermodynamiquement stable du nitrate jusqu'à l'aquifère (cf. paragraphe 1-1).

Si l'on s'en tient à ce critère, la partie Est de la zone vulnérable, zone principalement définie par le quadrilatère Carpentras-Pernes-Monteux-Loriol est la plus exposée vis à vis de la contamination des eaux souterraines par le nitrate.

2-1-2 L'analyse des systèmes de culture.

Nous nous sommes particulièrement intéressés à trois systèmes importants de production et bien représentés sur la zone vulnérable :

- viticulture,
- arboriculture (pommes),
- grande culture.

A/ Rappel de la méthodologie.

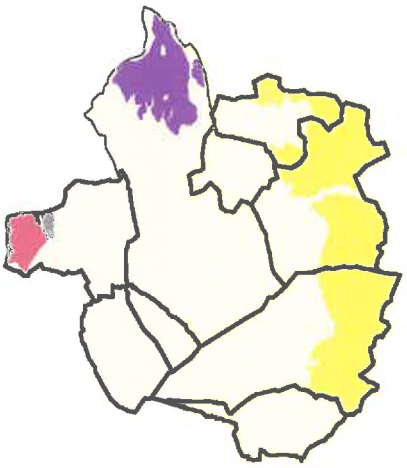
Pour chaque système, le premier objectif du travail consiste en une caractérisation des pratiques et de leur diversité. Le second objectif est l'évaluation des risques de pollution des eaux souterraines par le nitrate à l'échelle de la zone vulnérable.
Deux hypothèses principales sous-tendent ce travail de caractérisation.
Pour un système de culture donné, il existe à l'échelle de la zone d'étude une diversité de pratiques résultant (i) de la gestion à l'échelle de l'exploitation, (ii) cette gestion pouvant elle-même être différente entre exploitations. Ce sont les pratiques de fertilisation azotée, entretien du sol, et irrigation et leurs interactions qui conditionnent essentiellement les risques de pollution des eaux souterraines. La connaissance de ces pratiques, de leur combinaison en "mode de conduite" et de leur localisation est donc un préalable nécessaire à la connaissance de leur impact sur le milieu.
Au cours d'une première phase, nous avons recueilli des données concernant la conduite de la culture, la zone d'étude et la dynamique du nitrate et des produits phytosanitaires dans le milieu. Cette phase est utilisée pour l'élaboration des hypothèses de travail. Les données bibliographiques ont été complétées par la rencontre d'experts de la zone d'étude : conseillers, ingénieurs et chercheurs de divers organismes ou entreprises. Les données ainsi recueillies sont utilisées pour la définition d'un plan d'échantillonnage pour le choix des exploitations à enquêter, ainsi que pour l'élaboration du guide d'enquêtes.
Les données recueillies au cours des enquêtes sont utilisées pour la caractérisation des conduites, mais aussi pour définir des types d'exploitations, pour localiser et décrire les caractéristiques des parcelles ou groupes de parcelles.
La caractérisation des conduites est basée sur les opérations de fertilisation azotée, entretien du sol, protection phytosanitaire et irrigation. Une hiérarchisation des conduites en différents

niveaux de risques vis à vis de la pollution par le nitrate et par les produits phytosanitaires des eaux souterraines est ensuite proposée.

Nous allons illustrer, dans la suite, la méthodologie utilisée en décrivant la typologie obtenue et en illustrant plus spécifiquement les pratiques de fertilisation.

B/ Cas de la viticulture(Isoard, 1999)

La viticulture (« raisin de cuve ou de table » principalement) est une production importante puisqu'elle représente environ 35 % de la surface utilisée par l'agriculture. Comme le montre la carte de la location des zones AOC *(figure 7)*, la viticulture est localisée principalement en périphérie, sur les zones de terrasses et de glacis sensibles à l'infiltration.



Vacqueyras
Chateauneuf du Pape
Côtes du Ventoux

Figure 7. *Zones d'Appellation d'Origine Contrôlée de la zone vulnérable.*

Un total de 29 exploitations viticoles a répondu à l'enquête réalisée. S'agissant de la fertilisation azotée, le niveau des pratiques de fertilisation, tel qu'il a été perçu au niveau des enquêtes, est relativement faible *(figure 8)*. Les doses appliquées annuellement n'excèdent généralement pas 60 kg d'azote par hectare et par an. La seule différence porte sur la période principale d'apport. Les apports hivernaux privilégient une forme organique, les apports sortie d'hiver ou début printemps les formes minérales d'apport.

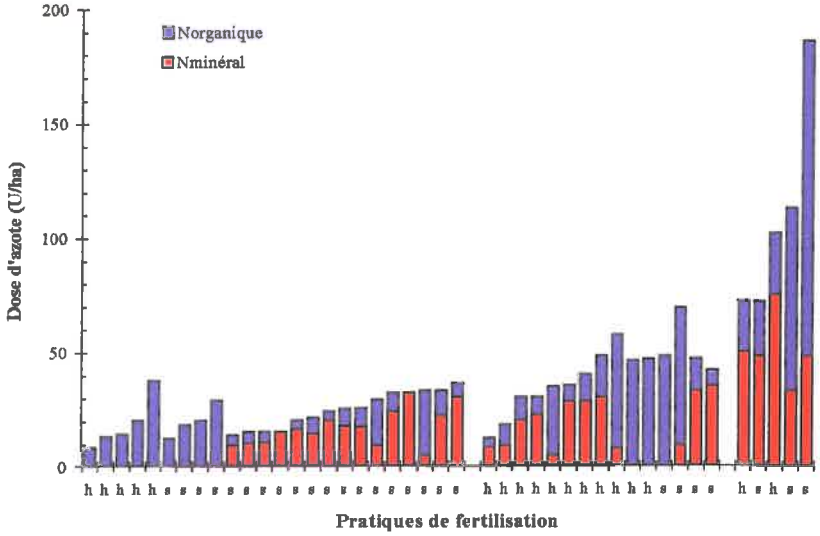


Figure 8. *Variabilité des pratiques de la fertilisation azotée dans les systèmes viticoles.*

La diversité des conduites au sein du vignoble des exploitations semble en grande partie liée aux productions viticoles, aux caractéristiques des terrains, à l'aménagement des parcelles

pour l'irrigation et à la facilité de passage dans les rangs des parcelles. La différenciation selon les productions n'existe pas dans toutes les exploitations, et lorsqu'elle existe, les conduites associées à chaque production ne sont pas les mêmes d'une exploitation à l'autre.

Tableau I. *Hiérarchisation des conduites vis à vis du risque de pollution nitrique et phytosanitaire des eaux souterraines.*

Niveau de risque	**Description des éléments de conduite impliqués** **Conduite de fertilisation azotée**
Très faible	I, II : apports azotés faibles à moyens avec impasses, irrigation peu fréquente
Faible	IV : apports azotés faibles à moyens, irrigation peu fréquente
Moyen	V : apports azotés faibles à moyens, mais minéralisation favorisée par l'irrigation par goutte à goutte systématique
Elevé	VII, VI : apports azotés moyens mais accentués par l'irrigation systématique et l'enracinement superficiel (non-travail du sol et pépinières)
Très élevé	III : apports azotés élevés et minéralisation favorisée par l'irrigation par goutte à goutte
Niveau de risque	**Description des éléments de conduite impliqués** **Conduite phytosanitaire**
Faible	I, II : peu de produits phytosanitaires appliqués
Moyen	IV : désherbage chimique partiel ou total, traitements phytosanitaires peu ou moyennement nombreux V : désherbage chimique partiel ou total, nombre de traitements phytosanitaires moyen ou élevé mais risque atténué par la micro-irrigation systématique
Elevé	III, VII : désherbage chimique total, risque limité par le non-travail du sol (III et VII) et la micro-irrigation systématique (III)
Très élevé	VI : nombre de traitements très élevé et désherbage chimique total, risque accentué par le travail du sol fréquent et l'irrigation gravitaire pour la pépinière

Parmi les conduites s'appliquant aux unités « raisin de cuve ou de table », deux conduites extrêmes ont été identifiées *(tableau I)*. Une première conduite (I) est caractérisée par des pratiques de fertilisation peu risquées pouvant être alternées avec des pratiques de risque moyen. Les traitements phytosanitaires sont peu à moyennement nombreux. L'irrigation est non pratiquée ou peu fréquente, par gravité. Le mode d'entretien du sol est variable, mais ne correspond jamais au désherbage chimique total. Cette conduite est exclusivement appliquée à des unités de raisin de cuve. A l'opposé, la conduite (III) est caractérisée par des apports élevés d'azote, l'entretien du sol par désherbage chimique partiel ou total, un nombre de traitements phytosanitaires moyen à élevé et l'irrigation par goutte à goutte. Cette conduite est peu répandue et ne concerne que des unités de raisin de table. Les autres exploitations ont été rapprochées dans trois groupes correspondant à des types de conduite intermédiaires entre ces deux modalités extrêmes. La conduite (II) diffère de la (I) par un nombre de traitements phytosanitaires plus élevé et par le système d'irrigation (goutte à goutte, bien qu'elle soit toujours peu fréquente). La conduite (IV) se distingue de la conduite I par un entretien du sol par désherbage chimique partiel à total. Le conduite (V) se rapproche de la conduite (III), mais en diffère par des apports azotés plus faibles. Ces trois dernières conduites s'appliquent à la fois à des unités de raisin de table et des unités de raisin de cuve, voire des unités mixtes table - cuve. Les conduites II et IV semblent toutefois plus caractéristiques du raisin de cuve et la conduite V du raisin de table. Il apparaît donc clairement que s'il est possible de décrire

un pôle exclusivement appliqué au raisin de cuve et un autre au raisin de table, il est impossible de séparer globalement les deux productions viticoles par leur conduite.
Les conduites VI et VII sont spécifiques des vignes mères de greffon et des pépinières de vigne. Elles présentent potentiellement un risque important pour l'environnement.
Pour évaluer les risques liés à chaque conduite, nous avons considéré séparément la pollution nitrique et la pollution par les produits phytosanitaires :

Hiérarchisation des conduites vis à vis du risque de pollution par le nitrate : I, II , IV < V < VI, VII < III

Hiérarchisation des conduites vis à vis du risque de pollution par les produits phytosanitaires : I, II < IV, V < III, VII < VI

D/ Cas de l'arboriculture (Calmet, 1998, Bellon et al. 2000),

Les vergers de pommiers sont situés dans la partie ouest de la zone et dans les zones basses de plaine sur les communes de Pernes, Althen les Paluds, Monteux, Entraigues et Sarrians. Un total de 18 exploitations sur les 22 répertoriées, dont l'activité principale concerne les pommiers, ont répondu à l'enquête. Elles représentent une surface de 283 hectares de vergers.
Au niveau de l'analyse des pratiques, les éléments pris en compte dans l'analyse concernent la fertilisation, les traitements phytosanitaires, l'éclaircissage chimique et l'irrigation.
A titre d'exemple, au niveau des pratiques de fertilisation, l'élément essentiel de l'enquête réside dans la grande hétérogénéité des pratiques. Pour les fertilisations en azote, phosphore et potasse, il existe un ratio de 3, 10 et 4 respectivement entre le plus faible et le plus élevé niveau de fertilisation à l'hectare. Pour chaque élément chimique, les exploitations ont été classées par rapport à trois valeurs seuils de 80 kg/ha, 60 kg/ha et 140 kg/ha pour l'azote, le phosphore et le potassium respectivement. Le lien entre les doses épandues d'azote, de phosphore et de potassium est assez fort. Les engrais utilisés, bien que variés dans leurs dosages, comportent des proportions voisines des différents éléments. Une forte fertilisation azotée est souvent associée à de fortes doses de phosphore et de potassium. Les périodes d'apports sont principalement localisées en hiver et au début du printemps (*tableau II*). Quelques agriculteurs réalisent des apports conditionnels à la fin du printemps.

Tableau II. *Périodes d'apports de fertilisants par exploitation.*

	Périodes d'apports			
Exploitations	Nov-déc	Jan-fév	mars-avril	mai-juin
1, 5, 14, 17	**A**		**P**	
11, 15, 16		**H**		**(P)**
9,10,18			**P**	**(P)**
2, 3, 4, 6, 7,8,12			**P**	

apport systématique **(apport conditionnel)**

Le *tableau III* présente la synthèse des résultats de l'analyse des pratiques (Bellon et al., 2000). Trois systèmes de culture ont été identifiés. Le type A, constitué par les exploitations 1,4,5,12,14 et 18 qui appliquent de fortes doses de fertilisants à l'automne et/ou au printemps. Les fertilisations ne sont pas raisonnées. Ils pratiquent l'éclaircissage chimique et les

traitements phytosanitaires sont principalement raisonnés. Le type B qui regroupe les exploitations n° 2,3,7,8,15 et 16, pratiquent une fertilisation réduite en association avec des pratiques phytosanitaires toujours raisonnées et un nombre plus réduits d'intervention. Le type C qui regroupe les exploitations 9,10,11 et 17, pratiquent toujours une fertilisation additionnelle tardive au printemps. L'irrigation gravitaire est dominante, la pratique de l'éclaircissage chimique est faible ou absente.

Tableau III. *Caractéristiques des exploitations, surface des exploitations (SE), surface vergers (SV) et pratiques culturales. Les niveaux de fertilisation sont classés par rapport à des valeurs seuils. Les fertilisations sont programmés en automne et printemps (A+S), au printemps seulement (S), avec complément possible fin de printemps (S+s), en automne seulement (A). Les traitements phytosanitaires sont systématiques (syst) ou raisonnés (rais) L'irrigation est gravitaire (g), gravitaire + localisé ou aspersion (g+e) ou absent excepté pour quelques parcelles (ni). L'éclaircissage chimique est systématique (C), possible (L) ou jamais pratiqué (N). ND= données non disponibles.*

Exploit n°	S.E. (ha)	SV (ha)	Dose N (kg/ha)	Dose P_2O_5 (kg/ha)	Dose K_2O (kg/ha)	Calendrier Ferti	Contrôle pesticide	Irrigation	Eclaircissage
1	9	7	N>80	P>60	K>140	A+S	syst	g	C
2	50	50	N<80	P<60	K<140	A+S	rais	ni	C
3	95	75	N<80	P<60	K<140	S+s	rais	ni	C
4	23	21	N<80	P<60	K<140	S	rais	ni	C
5	11	5	N>80	P>60	K>140	A+S	rais	ni	C
6	24	15	N>80	P>60	K>140	S	rais	ni	C
7	23	21	N<80	P<60	K<140	S+s	rais	g	C
8	16	8	N<80	P>60	K<140	S	rais	g	C
9	15	13	N<80	P>60	K<140	S+s	syst	g	L
10	8	4	N<80	P>60	K<140	S+s	syst	g+e	L
11	8	7	N>80	P>60	K>140	S+s	syst	g	N
12	16	8	N>80	P>60	K>140	S	syst	g	C
13	32	17	ND	ND	ND	ND	syst	g	C
14	25	8	N>80	P>60	K>140	A+S	rais	g	C
15	23	6	N<80	P>60	K<140	S+s	rais	g+e	C
16	5	4	N<80	P>60	K<140	S+s	rais	g+e	C
17	11	2	N>80	P<60	K<140	A	syst	g+e	L
18	30	12	N>80	P<60	K>140	S	rais	g+e	C

Pour la fertilisation comme pour le risque phytosanitaire, la classification en terme de risques engendrés par le système de culture conduit au classement :

A = B >C

E/ Cas des systèmes céréalier de grandes cultures (Adell, 1998)

Sur la zone vulnérable, environ 200 exploitations, soit un quart des exploitations de la zone, produisent des grandes cultures. Parmi ces exploitations, environ 100 exploitations déclarent les céréales et les protéagineux comme étant leur orientation principale. Elle représente environ 30 % de la surface utilisée par l'agriculture.
Un total de 14 exploitations a été étudié. Elles sont toutes localisées dans les zones basses de plaines Majoritairement (11 sur 14), les exploitations se classent dans un système de production de type « grandes cultures seules » ou « grandes cultures en association avec des légumes de plein champ ». Ce sont ces deux types de succession qui ont fait l'objet d'une analyse approfondie. La seconde est particulièrement présente dans la plaine Sud de la zone vulnérable.
Dans le système « grandes cultures seules », les successions rencontrées sont de deux types :

- majoritairement, elle associe une succession Blé dur – Tournesol (B-T)
- minoritairement, elle peuvent inclure le maïs dans la succession B-T.

Les combinaisons de succession , autour de ces éléments sont variables et dépendent des exploitations.
Dans les successions B-T, les apports d'azote sont fractionnés. La dose totale d'azote apportée varie d'un facteur 2 entre les exploitations. Au niveau des pratiques trois critères ont contribué à la typologie proposée :

- le respect ou le dépassement des recommandations des doses de fertilisations,
- la présence d'apport de fertilisant au semis,
- l'absence ou la pratique systématique de traitement phytosanitaire qui associe soit l'emploi uniques d'herbicides ou d'herbicides et de fongicides.

Dans le système « grandes cultures en association avec des légumes », les successions associent soit :

- une association Blé suivi d'un ou deux légumes (Pomme de terre et/ou Carotte)
- une association à dominante « Grandes cultures » faisant intervenir au moins deux grandes cultures avant une culture légumière.

Au niveau des pratiques trois critères ont contribué à la typologie proposée :

- le respect ou le dépassement des recommandations des doses de fertilisations,
- la prise en compte de l'effet précédent de la culture légumières dans la fertilisation,
- l'absence ou la pratique systématique de traitement phytosanitaire qui associe soit l'emploi unique d'herbicides ou d'herbicides et de fongicides.

Pour la fertilisation comme pour le risque phytosanitaire, la classification en terme de risques engendrés par ces systèmes de culture n'a pas été finalisée. En effet, de nombreuses variantes sont possibles dans les successions. La classification doit être modulée en fonction du type de succession réellement pratiqué. Il joue un rôle déterminant sur la durée d'interculture. Ainsi une succession B-T-T engendre 5,6 mois de période d'interculture par an sur trois ans principalement concentrée dans les mois le plus pluvieux de l'année.

2-1-3 La localisation spatiale des systèmes de cultures.

A/ La poursuite du diagnostic au niveau de l'analyse paysagère.

La surface de la région d'étude, le morcellement du parcellaire rendaient difficilement réalisable la carte de l'occupation du sol. L'analyse paysagère était apparue comme une première approche pertinente de l'organisation de l'espace (Mirambeau, 1997). Une telle approche repose sur l'hypothèse que l'activité agricole modèle le paysage. Elle conduit à cartographier les différents types de paysages en y associant un descriptif général des grands types d'occupation du sol *(figure 9)*. On a identifié principalement dans les *plaines (figure 9a)* des paysages ouverts (types « paluds ») composés de grandes parcelles dédiées grandes cultures (blé, tournesol). Les « petits paluds » correspondent à une zone de cultures légumières de plein champ en association avec les grandes cultures. L'arboriculture est aussi présente (pommier principalement). Sur les zones de glacis et de terrasses, les paysages sont plus fermés (type « bocages ») et les parcelles plus petites *(figure 9b)*. La viticulture occupe principalement les zones les plus hautes des terrasses.
L'établissement d'un critère d'infiltrabilité (cf. paragraphe 2-1-1) nous a conduit à réexaminer le croisement de la carte des paysages agricoles avec la carte de sensibilité à l'infiltration. Il met en évidence une structuration corrélée de l'organisation de l'espace. Les sols à risque moyen à très élevé ($M_j \geq 4$) concentrent principalement les paysages de type « bocager », « paysage viticole », « vigne et vergers ». Les sols à risques faible à très faible ($M_j \leq 2$) concernent les paysages de type « paluds », « petit paluds » ou « bocage viticole principalement.
Pour vérifier la vulnérabilité du milieu il est apparu intéressant d'examiner la distribution des teneurs en nitrate obtenu dans la nappe pour chaque constituant des deux classifications thématiques infiltration et paysage. Au niveau du critère « risque à l'infiltration » *(figure 10, en haut)*, les histogrammes obtenus, avec un nombre suffisant de points, révèlent des distributions dissymétriques marquées et cohérentes en fonction de la classe de risque : dissymétrie gauche pour les risques faible, droite pour les risques forts. Au niveau du critère « paysage » *(figure 10, en bas)*, on retrouve de manière moins marquée cette dissymétrie.
L'analyse paysagère permet de rendre compte de manière indirecte du rôle de l'organisation de l'espace agricole dans la pollution de l'aquifère alluvial. Un élément dominant de l'organisation de l'espace agricole est le lien implicite existant entre les grands types d'occupations du sol et la sensibilité du milieu à l'infiltration et le degré de sensibilité de la nappe mis en évidence.

B/ Les limites de l'analyse paysagère.

La définition des unités paysagère repose sur une typologie des grands types de paysages.. Pour pouvoir aller plus loin dans les objectifs de la grille de risque, notamment dans la spatialisation des systèmes de culture, la carte des paysages n'est pas suffisante car elle ne peut rendre compte d'une manière précise des principales cultures et des successions rencontrées. Elle ne peut donc être valorisée sur le plan agronomique dans l'établissement de la grille de risque
La définition des unités paysagère peut ne pas poser de problème majeur de délimitation spatiale lorsqu'elle concerne des unités d'espace occupées majoritairement par des cultures pérennes comme la vigne ou l'arboriculture fruitière. Par contre, pour des usages plus diffus, comme le maraîchage (plein champ et sous abri), le problème de la définition des unités paysagères se pose de manière plus accru. Le quadrilatère constitué par les communes de Carpentras, Loriol-du-Comtat, Monteux et Pernes-les-Fontaines présente un risque élevé au

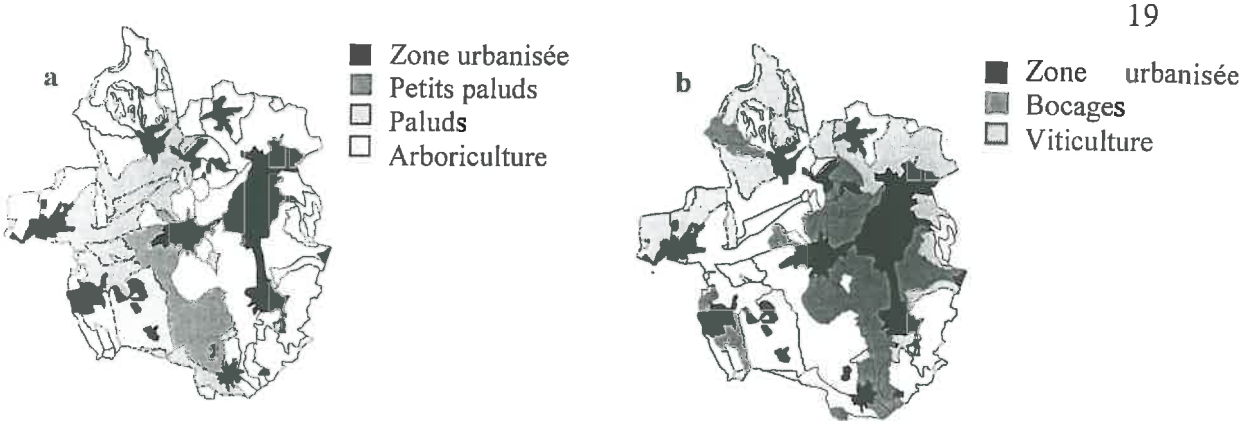


Figure 9. *Analyse paysagère de la zone vulnérable(Mirambeau, 1997).*

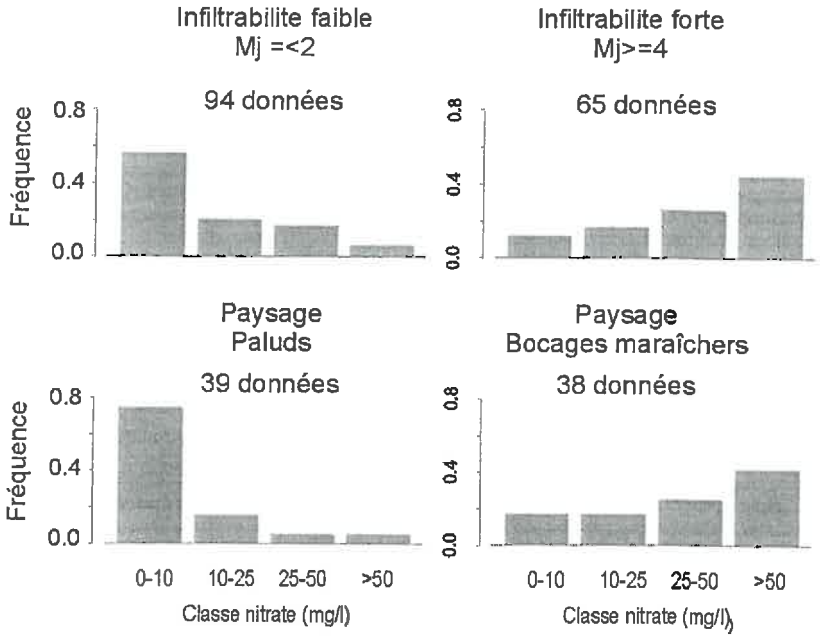


Figure 10. *Exemples de croisements des données nitrate de la nappe alluviale avec des unités thématiques de la carte de sensibilité à l'infiltration et des paysages.*

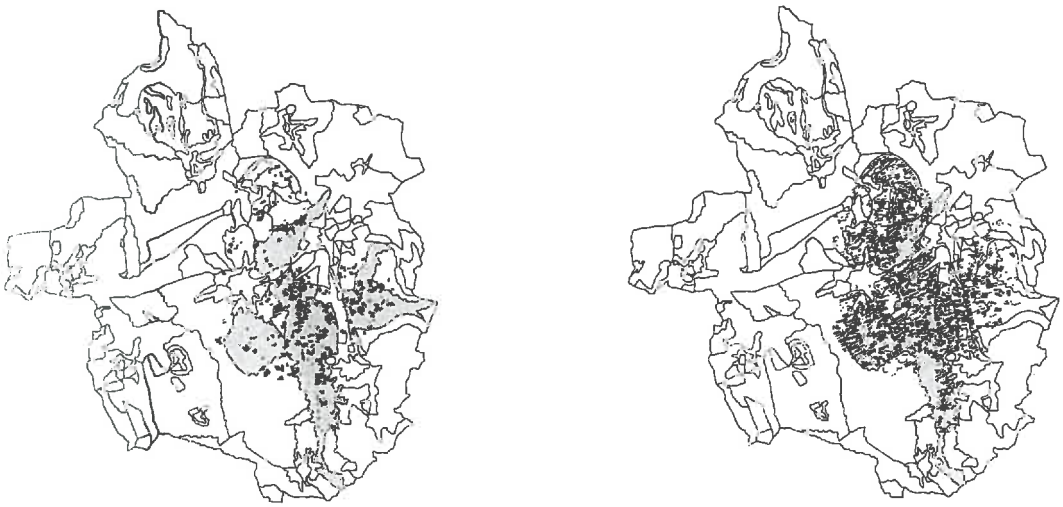


Figure 11. *Limites de l'analyse paysagère de la zone vulnérable. Le cas de l'unité « bocage maraîcher ».*

niveau de la nappe et concentre une part importante de l'activité maraîchères. Il a été sélectionnée pour la bonne représentativité spatiale de l'unité paysagère de type « bocages maraîchers». A l'aide de photos aériennes et de contrôle sur le terrain ont été relevés et les linéaires de haies *(figure 11, à droite)* et les surfaces des abris présents (tunnels plastiques et serres verres, *figure 11 à gauche*). Ces éléments sont des structures pérennes et caractéristiques des systèmes maraîchers sous abris et de plein champ présents dans l'unité paysagère « bocage maraîcher ».
Sur la *figure 11*, sont positionnées ces deux couches d'information en regard de la délimitation des aires de paysages de « bocage maraîcher» (en gris) présents sur ces communes. Il peut être noté globalement une certaine concordance de positionnement entre les couches. Néanmoins, de discordances en périphérie notamment pour les haies principalement. Un tel résultat constitue certes une validation partielle de la démarche paysagère mais aussi montre ses limites dans la définition des contours des unités spatiales dessinées.

C/ Une nouvelle méthodologie de spatialisation des systèmes de culture.

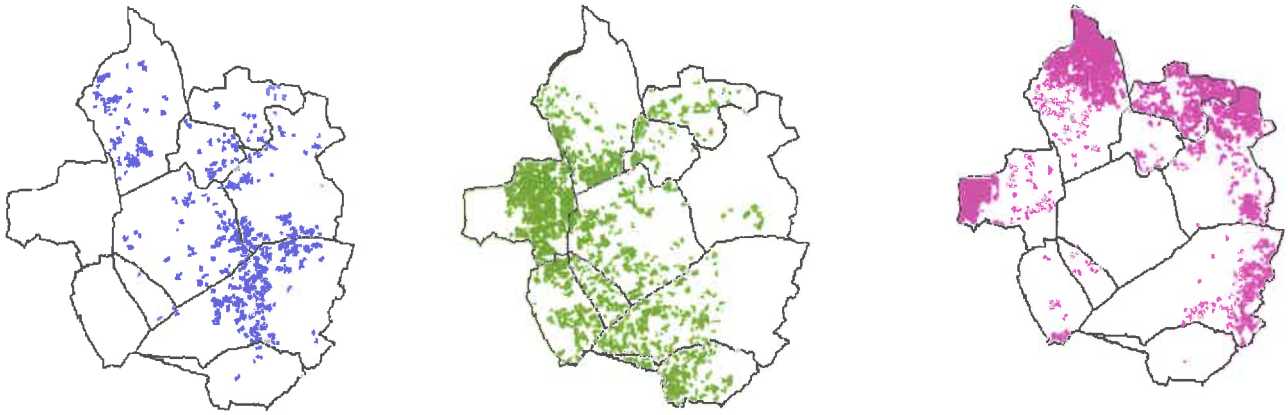
Pour pouvoir intégrer la diversité des pratiques agricoles de chaque grand système de production, comme nous l'avons montré au paragraphe 2-1-2, il a été nécessaire d'établir une typologie des modes de conduite. Le choix du mode de conduite est raisonné au niveau de l'exploitation. La spatialisation de cette typologie imposerait donc de caractériser et de positionner toutes les parcelles des exploitations agricoles concernées. Cet objectif n'est pas réaliste à l'échelle de la zone d'étude.
Nous avons opté pour une solution intermédiaire en cherchant à:

- établir, par zonage, une carte de localisation, des principales productions agricoles dominantes,
- associer, à chaque zone définie, un type de succession et un rattachement à un système de culture identifié.

Pour aboutir à ce travail, deux démarches parallèles ont été menées.

- La première a consisté à identifier, au niveau des parcelles agricoles, un maximum de cultures présentes. Ce travail a consisté à regrouper les informations pluriannuelles données par des photos aériennes et des banques de données. Une exemple de ces données disponibles est présenté à la *figure 12* pour l'ensemble de la zone vulnérable.
- La seconde démarche a consisté à interroger, par commune, des experts (agriculteurs ou conseillers) afin d'identifier, par zonage sur une carte de la commune, les principales productions et successions de culture associées.

Ce travail réalisé à l'échelle communal a fait l'objet d'une synthèse à l'échelle de la zone vulnérable afin d'homogénéiser les unités identifiées. Il a abouti à la carte présentée à la *figure 13* qui présente soit des unités homogènes (un seul type de culture) ou hétérogènes (association de plusieurs types de culture). Cette carte présente certaines similitudes avec la carte paysagère. Néanmoins, derrière chaque unité est associé un ou plusieurs systèmes de culture et des successions principales de culture. L'intérêt essentiel de cette approche est de fournir des bases objectives d'analyse agronomique nécessaire à la spatialisation de la grille de risque. Elle est actuellement entreprise, par la Chambre d'Agriculture de Vaucluse, dans le cadre de l'opération les « Puits de l'Avenir ».



Maraîchage - Abris | Grandes cultures | Parcelles vigne

Figure 12. *Carte de la localisation des principaux systèmes de production.*

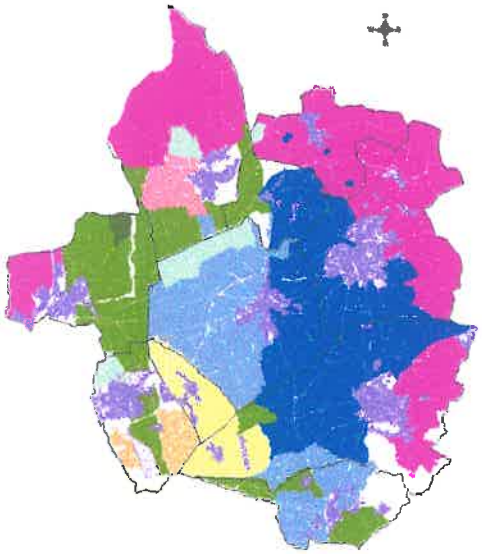


Figure 13. *Identification des principales composantes de l'occupation agricole du sol.*

- Arboriculture + Grandes cultures
- Grandes cultures
- Grandes cultures + Arboriculture
- Grandes cultures + Legumineuses
- Grandes cultures + Maraîchage plein champ
- Maraîchage plein champ + Tunnel
- Prairie
- Vigne
- Vignes meres

2-2 Eléments de la gestion hydrique et azotée à l'échelle de la parcelle.

Au cours de cette période, notre travail a principalement porté sur la recherche de références dans le domaine des systèmes maraîchers en plein champ et sous abris dans l'optique d'une meilleure gestion des intrants eau et azote.
Un premier travail d'enquête réalisé en 1999 (Ogier, 1999), dans le cas de culture de melon sous abris, a permis de cerner les conditions agronomiques d'une meilleure gestion hydrique et azotée dans ce type de système en suivant 10 exploitations agricoles de la zone vulnérable.
Si nous nous attardons à chaque fraction composant la fertilisation, il s'avère que chaque apport azoté n'est pas d'égale importance. Les apports azotés que les agriculteurs ont moyen de connaître et quantifier les apports en cours de culture ou par les fumures de fond, ne représentent qu'une partie de l'azote minérale mis à disposition de la culture. D'autres quantités d'azote minéral utilisable par la culture doivent être contrôler. Ces apports se proviennent, de la prise en compte du stock initial d'azote avant culture, de la minéralisation de l'azote organique et dans une moindre mesure l'eau d'irrigation initialement chargée en nitrate en cours de culture. Chacune de ces trois formes d'apports en azote minéral doit être mieux estimés sur le terrain.
A titre d'exemple, la concentration en nitrate dans l'eau utilisée pour l'irrigation peut fournir jusqu'à 15 % des besoins d'une culture. En ce qui concerne la part de la minéralisation, la difficulté de quantifier les apports en azote minéral de ce mécanisme ne doit pas faire oublier la contribution très importante qu'elle peut représenter pour les besoins de la culture *(Figure 14)*.

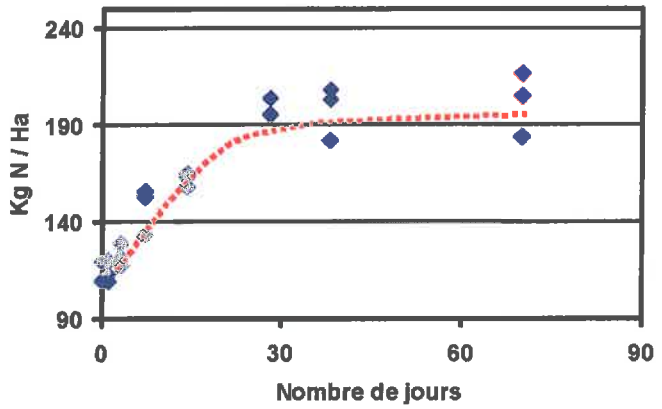


Figure 14. *Un exemple de cinétique de minéralisation d'un sol réalisée au laboratoire. Elle donne des indications sur la production potentielle de nitrate par le sol lors de la culture considérée (Ogier, 1999).*

Dans un second travail, pour illustrer les leviers de commande dont dispose un agriculteur pour limiter le risque de lessivage sous la culture, il nous a paru intéressant de situer l'impact de la modification des modes de conduite de la fertilisation et de l'irrigation (Cataluna, 1998 ; Bertuzzi,1999). Pour réaliser ce travail, nous avons eu recours à l'informatique en utilisant un modèle de simulation de croissance d'une culture. *Un modèle de fonctionnement*[1] *d'une culture est un ensemble de relations mathématiques qui permet de rendre compte du fonctionnement d'une culture dans un milieu donné. Le modèle comporte donc un ensemble de variables d'entrée (variables climatiques par exemple), de paramètres relatifs aux différents processus (dont certains dépendent des espèces) et de variables de sortie (production, consommation de différents éléments). Son intérêt est de conduire à une vision quantitative et dynamique de l'action combinée de plusieurs facteurs environnementaux sur le fonctionnement d'ensemble d'une culture.....*

[1]Définition donnée par R. Bonhomme dans l'ouvrage « L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau ». Riou C., Bonhomme R., Chassin P., Neveu A., Papy F. éditeurs. INRA et AUPELF-UREF éditions.

L'intérêt essentiel de l'utilisation d'un tel modèle est de multiplier les scénarios de culture et de pratiques agricoles pour lesquels le modèle fournit une vision quantitative et dynamique dans le temps de l'action combinée des acteurs climatiques sur le fonctionnement de la culture et sur l'impact environnemental des pratiques agricoles.

Ce travail s'inscrit typiquement dans ce cadre. La réalisation d'un travail équivalent sur une seule base expérimentale uniquement est difficilement envisageable compte tenu de la lourdeur des dispositifs expérimentaux, des contraintes imposées.

Nous avons eu recours au modèle STICS que nous avons adapté au cas d'une culture de salade (Cataluna, 1998). Cet outil a été mis au point au sein de l'INRA par une équipe multidisciplinaire. STICS simule le fonctionnement du système Sol-Plante-Atmosphère. Les principaux processus à l'origine de la croissance de la culture, du transport de l'eau et de l'azote, du cycle du carbone et de l'azote dans le sol *(figure 15)* sont décrits Les entrées du modèle en particulier les itinéraires techniques sont définies aussi simplement que possible. Le fonctionnement du sol nu peut-être lui aussi simulé.

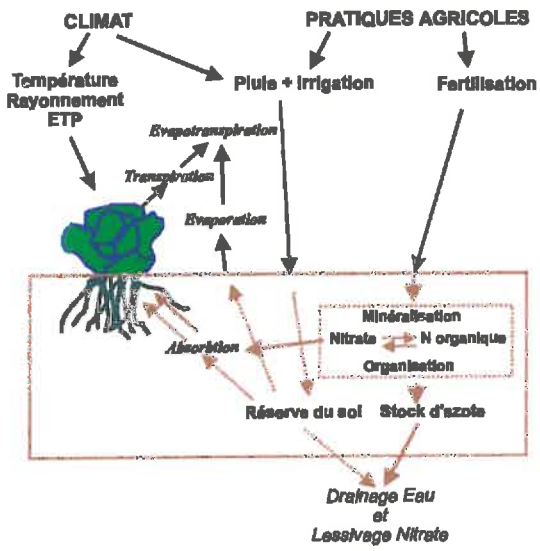


Figure 15. Schéma du modèle STICS.

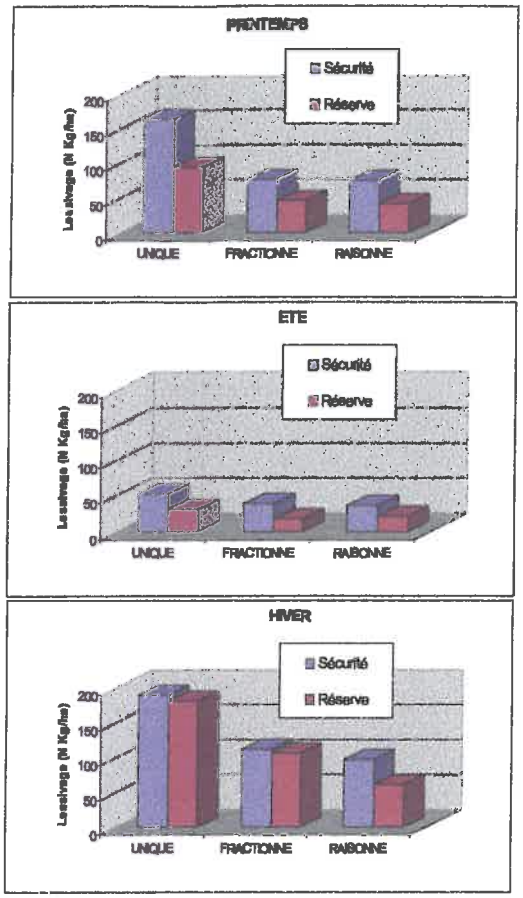
STICS gère l'azote que sous une forme minérale qui est le nitrate. De plus, les pertes gazeuses d'azote par dénitrification et volatilisation ne sont pas pris en compte dans le modèle STICS. Elles sont considérées comme étant négligeable dans le cadre de notre étude. Comme pour l'eau, l'hypothèse surface de sol plane conduit à négliger la perte relative au ruissellement d'azote.

Dans l'étude, deux scénarios de pratique de l'irrigation ont été testés :

- irrigation dite « **sécurité** », l'agriculteur irrigue régulièrement, intervalle régulier, durée et dose fixes en fonction de la saison de culture.
- irrigation dite de « **réserve** » où l'agriculteur pilote l'irrigation en fonction d'un indicateur sur l'état d'humidité dans la zone racinaire. Ces deux scénarios ont été croisés avec trois scénarios de la fertilisation :
- apport « **unique** » de 120 Kg N/ha en début
- apport « **fractionné** » en trois apports de 20 – 50 – 50 Kg N/ha selon un calendrier cultural fixe qui dépend de la saison de culture.
- apport « **raisonné** », hebdomadaire, avec prise en compte du stock d'azote disponible dans le sol. Cette dernière pratique se développe en relation avec l'utilisation de techniques de dosage rapide du nitrate dans le sol pour ajuster l'offre d'azote dans le sol à la demande de la plante.

Quelle que soit la saison de culture (printemps, automne, hiver), le scénario qui combine une irrigation de « **sécurité** » et un apport « **unique** » de fertilisation en début de culture correspond au scénario potentiellement le plus risqué. Les quantités lessivées sont les plus importantes et ne permettent pas toujours, en hiver et au printemps, de garantir le rendement de la culture à la récolte.

Figure 16. Influence des conduites de l'irrigation et de la fertilisation sur le lessivage du nitrate.



Ce fait conditionne la nécessité d'une sur-fertilisation de la culture dans des conditions les moins contrôlables et les du nitrate. Les modalités de fractionnement de la fertilisation (apport « **fractionné** » ou apport « **raisonné** ») réduisent de plus de 50 % le lessivage du nitrate. Dans les situations climatiques les plus défavorables pour le lessivage du nitrate (printemps et surtout en hiver), le mode de conduite qui combine une irrigation dite de « **réserve** » et une fertilisation « **raisonnée** » est le plus performant. On ne peut donc qu'encourager vers le développement des techniques d'évaluation du stock de nitrate dans le sol en cours de culture. En plus de la réduction du lessivage du nitrate, les avantages essentiels d'une fertilisation « **raisonnée** » sont à la fois :

- de réduire le niveau pratiqué de fertilisation,
- de réduire le stock final d'azote minéral après la culture. Ce point contribue à mieux gérer la période d'inter-culture en diminuant une source potentielle de lessivage.

Néanmoins l'utilisation d'une technique de mesure du stock d'azote minéral se heurte au problème de la définition d'un protocole d'échantillonnage fiable et robuste dans une majorité de situations.

Conclusion et bilan

Ce travail réalisé dans le cadre du projet **PROCOPE**, sur plusieurs années de collecte et d'analyse de données autour de la zone vulnérable du Comtat-Venaissin, a permis d'établir un diagnostic d'une zone vulnérable. Concernant la vulnérabilité au nitrate des nappes, le résultat essentiel concerne le différentiel important existant au niveau du risque en fonction de la localisation. Spatiale. Le problème environnemental concerne essentiellement la périphérie de la zone, les zones hautes de glacis et de terrasses concentrent les activités agricoles les plus à risque sur un milieu favorable à la migration et au maintien du nitrate en profondeur. Dans les zones de plaine, l'impact de l'agriculture bénéficie d'effets correctifs naturels (dilution et dénitrification) favorables à la diminution du nitrate dans la nappe. Sur les zones hautes, il a été mis en évidence un impact certain des pratiques agricoles sur la pollution nitratée.

Sur le plan agronomique, en particulier sur l'impact des activités agricoles, l'ensemble des données est acquis pour pouvoir finaliser un diagnostic global de l'incidence des pratiques agricoles. Ce travail est en cours de réalisation à la Chambre d'Agriculture de Vaucluse.

Dans le domaine du diagnostic environnemental, la présentation de la problématique **PROCOPE** dans différentes instances, en particulier dans des colloques scientifiques, a permis de cerner à la fois l'originalité et les difficultés de la démarche.

L'originalité essentielle tient à la dimension géographique de la zone et à la diversité des formes d'utilisation de l'espace. Elle tient aussi à la multiplicité des approches utilisées. Nous avons posé le diagnostic relatif à l'agriculture selon l'interaction existante entre quatre niveaux d'analyse : (1) les pratiques agricoles, (2) l'occupation du sol, (3) les caractéristiques physiques du sol et du sous-sol, (4) les caractéristiques hydrogéologiques et géochimiques des aquifères. L'essentiel des travaux publiés dans ce domaine concerne de petites surfaces (quelques km^2), homogènes du point de vue de l'occupation du sol et comportant peu d'exploitations agricoles.

La difficulté tient au niveau différent de synthèse des données obtenues sur ces quatre points comme mentionné précédemment pour le point sur les pratiques agricoles.

Le projet **PROCOPE** a suscité d'autres questions scientifiques concernant :

- l'impact des pesticides dans l'environnement avec la mise en place d'une nouvelle collaboration entre les partenaires du projet PROCOPE ainsi que d'autres partenaires nouveaux ;
- la meilleure compréhension du fonctionnement du sol et de la zone non saturée, jusqu'à la nappe. La modélisation de cet ensemble est un élément essentiel de la caractérisation du devenir du nitrate, en terme de transfert et aussi de transformation biologique, entre l'apport de surface jusqu'à son arrivée dans la nappe. Les situations contrastées rencontrées sur la zone vulnérable sont adaptées à ce type d'étude.
- la meilleure compréhension de fonctionnement des systèmes maraîchers sous abris froid. Les travaux menés dans le cas du projet **PROCOPE** ont guidé la mise en place d'une réflexion sur les questions scientifiques touchant à la gestion de ce système. Un projet soutenu par la Région PACA est une illustration de cette nouvelle préoccupation.

Outre l'intérêt scientifique proprement dit, le projet PROCOPE a contribué à mieux structurer les relations entre l'I.NR.A., les partenaires de développement agricole et les services d'état intéressés par les questions environnementales. Enfin, pour terminer, le projet **PROCOPE** a contribué à faire émerger la question de la gestion patrimoniale d'une ressource en eau. Les problèmes soulevés autour de la gestion et de la protection de la nappe Miocène en sont une illustration concrète.

Bibliographie

ADELL C. . 1998. Place des grandes cultures dans le Comtat-Venaissin. Evaluation de leur contribution à la pollution des nappes. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention di diplôme d'ingénieur agronome de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse. 76 pages + annexes.

BELLON S., BERTUZZI P., MUSSET J., VANNIER S., LAQUES A.E., MIRAMBEAU C. and P. DERIOZ. 1998. Approach of groundwater nitrate pollution in a small mediterranean region. Third European Symposium, « Rural Farmong System Analyses : Environmental Perspectives ». Hohenheim, RFA, March 25-27, 1998

BELLON S, LESCOURRET F. and J.P. CALMET. 2001. Characterisation of apple orchard management systems in a French mediterranean vulnerable zone. Accepté pour publication dans Agronomie Environnement.

BERTUZZI P. . 1999. Impact de la conduite de l'irrigation et de la fertilisation azotée en culture maraîchère sur le lessivage du nitrate. Séminaire CIRAD-Flhor / INRA-ea-sad-spe. 30-31 Août 1999. Montpellier. France. 5 pages.

CALMET JP. . 1998. Caractérisation et localisation des systèmes de culture des exploitations productrices de pommes du bassin de Carpentras. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon. 76 pages + annexes.

CANNAVO P. . 2000. L'activité dénitrifiante dans la zone non saturée : confrontation de plusieurs méthodes sur deux profils de sol dans le Comtat-Venaissin (84). Mémoire de D'plôme d'Etudes Approfondies, Spécialité Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental. 52 pages + annexes.

ISOARD S. . 1999. Caractérisation des conduites en viticulture et de leurs impacts sur les eaux souterraines dans la zone vulnérable du bassin de Carpentras. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon. 52 pages + annexes.

MIRAMBEAU C. . 1997. Dynamiques d'évolution de l'occupation des sols et mutations paysagères en Comtat-Venaissin. Mémoire du Diplôme d'Etudes Approfondies « Structures et dynamiques spatiales ». Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon, France, 49 pages + annexes.

MUSSET J. . 1999. Déterminisme de la distribution spatiale du nitrate dans un système d'aquifères. Application à une petite région agricole méditerranéenne (Comtat-Venaissin, Vaucluse, France). Thèse de doctorat option Sciences de la Terre. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (Avignon, France). 96 pages + annexes.

MUSSET J., BERTUZZI P., PUIG J.M., BELLON S. et VANNIER. S. . 2000. Influence des facteurs physiques et humains sur les teneurs en nitrates des eaux souterraines dans une petite région agricole méditerranéenne. diagnostic et approche multidisciplinaire des mécanismes. Communication orale au colloque « Eaux souterraines en région Agricole (ESRA) » du 13 au 15 Septembre 2000 à Poitiers (France).

MUSSET J., BERTUZZI P., PUIG J.M., VANNIER S., GRABLY M., MONESTIEZ P., VALLES V., PENEL J.P et de COCKBORNE A.M. . 2000. Mechanisms of the nitrate distribution into a system of two surperimposed aquifers: the example of a mediterranean area in France. Proposé pour publication dans Agronomie-Environnement.

OGIER J.N. 1999. Etude du potentiel de minéralisation de l'azote organique. Application sur les sols de la zone vulnérable du Comtat-Venaissin en culture estivale intensive de melon - Vaucluse – France. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur agricole de l'I.S.A.R.A.de Lyon. 52 pages + annexes.