



**HAL**  
open science

## Quels systèmes de production agricole sont en mesure de préserver la qualité de la ressource en eau dans les bassins d'alimentation et de captage ?

Maxime Lamy

### ► To cite this version:

Maxime Lamy. Quels systèmes de production agricole sont en mesure de préserver la qualité de la ressource en eau dans les bassins d'alimentation et de captage?. Sciences du Vivant [q-bio]. 2011. hal-02803263

**HAL Id: hal-02803263**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02803263>**

Submitted on 5 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.

Quels systèmes de production agricole sont en mesure de préserver la qualité de la ressource en eau dans les bassins d'alimentation et de captage ?



Mémoire de fin d'étude présenté par Maxime LAMY

Maître de stage : Marc Benoit

Tuteur universitaire : Damien Banas



*"Rien, ici-bas, n'est plus souple, moins résistant que l'eau, et pourtant il n'est rien qui vienne mieux à bout du dur et du fort."*

Lao-Tseu



## Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier toute l'équipe de l'INRA de Mirecourt ; Marc Benoit, mon maître de stage pour m'avoir permis de faire ce stage et m'avoir guidé au cours de celui-ci ; Catherine Mignonet, la directrice de l'unité de recherche ASTER de Mirecourt pour m'avoir accueilli dans ce lieu ; Jean-Marie Trommenschlager pour avoir résolu mes problèmes informatiques ; et Jean-Louis Fiorelli pour avoir pris le temps d'échanger sur les données collectées à Mirecourt.

Merci à Jean-Pierre Butault, co-encadrant de mon stage, pour son aide précieuse concernant les aspects économiques et les produits phytosanitaires.

Merci aussi à Damien Banas, mon tuteur de stage pour m'avoir conseillé tout au long de ces six mois.

Je tiens également à remercier toutes les personnes avec lesquelles j'ai passé de bons moments. Merci à tous les sportifs de Mirecourt, Laurine, Amandine pour le badminton, Laura pour la piscine, Clément et Clothilde pour les sorties vélo, Marie et Guillaume pour l'entraînement au triathlon et Maxime pour la course à pied, la natation, le vélo, le badminton, ...

Merci également aux appétits toujours enthousiastes qui ont partagé notre table et notre cuisine. Merci à Maxime et David pour les sorties « naturalistes », de cueillettes de plantes sauvages et de cuisine « au naturel ».

Merci au multi-instrumentiste Guillaume pour ses airs de musique et ses improvisations.

Pour finir, un grand merci à toute ma famille ...



# Sommaire

## Table des annexes

<b>Introduction</b>	p.1
<b>I. Contexte</b>	p.2
<i>Evolution de l'activité agricole en France</i>	p.2
<i>Politiques agricoles et préservation de l'environnement</i>	p.3
<i>Politiques publiques de l'eau</i>	p.4
<i>Dégradation de la qualité des eaux</i>	p.4
<b>II. Problématique</b>	p.7
<b>III. Hypothèse</b>	p.8
<b>IV. Matériel et méthode</b>	p.9
<i>Associer à un système de culture une quantité de pollution</i>	p.9
<i>Confrontation des critères à la littérature</i>	p.11
<i>Une analyse statistique pour le paramètre concentration en nitrates</i>	p.12
<i>Changement d'échelle : de la parcelle à l'exploitation</i>	p.12
<b>V. Résultats</b>	p.14
<i>Publications utilisées</i>	p.14
<i>Analyse statistique</i>	p.15
<i>Hierarchisation des systèmes de culture</i>	p.17
<i>L'échelle de l'exploitation agricole</i>	p.19
<i>Hierarchisation des systèmes de production</i>	p.21
<b>VI. Discussions</b>	p.22
<i>Domaine de validité des publications utilisées</i>	p.22
<i>Choix du travail par l'assolement</i>	p.22
<i>Limites de la démarche territoriale utilisée</i>	p.23
<i>Limites de la classification en OTEX</i>	p.23
<i>Foret et eau</i>	p.24
<i>Produits phytosanitaires</i>	p.24
<i>Démarche déconvolutive</i>	p.26
<i>Perspectives</i>	p.26
<b>Conclusion</b>	p.27
<b>Bibliographie</b>	p.28
<b>Annexes</b>	p.33





# Table des annexes

<i>Annexe 1</i> : Bonnes conditions agricoles et environnementales .....	i
<i>Annexe 2</i> : Mesures agro environnementales .....	vii
<i>Annexe 3</i> : Concentrations en pesticides dans les cours d'eau .....	ix
<i>Annexe 4</i> : Concentrations en pesticides dans les eaux souterraines.....	x
<i>Annexe 5</i> : Script utilisé sous le logiciel R.....	xi
<i>Annexe 6</i> : Résumé des publications utilisées.....	xiii
<i>Annexe 7</i> : Descriptif des individus formant les différents groupes .....	xxii
<i>Annexe 8</i> : Lien entre Volume d'eau drainée et concentrations en nitrates.....	xxxi
<i>Annexe 9</i> : Niveaux de fertilisation.....	xxxii
<i>Annexe 10</i> : Description des systèmes de production utilisés .....	xxxiii
<i>Annexe 11</i> : Pression phytosanitaire.....	xxxiv



## Introduction

Créée en 1938, la Fédération professionnelle des entreprises de l'eau (FP2E ex-SPDE) regroupe la quasi-totalité des entreprises privées assurant la gestion des services d'eau et d'assainissement en France.

Au sein de Eureau (Fédération européenne des associations nationales des services de l'eau et des eaux usées), elle s'est posé la question de savoir quel type d'agriculture voudrait-elle voir favorisée par la nouvelle politique agricole commune.

Pour répondre à cette interrogation, la FP2E s'est tournée vers l'INRA (Institut national de la recherche agronomique). Au fil des échanges, une problématique de travail s'est dégagée, donnant lieu à mon stage :

Quels systèmes de production agricole sont en mesure de préserver la ressource en eau potable ?

Pour répondre à cette question, nous nous intéresserons dans ce texte à essentiellement deux paramètres de la qualité des eaux que sont le paramètre nitrates en tant que concentrations en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) dans les eaux de drainage et le paramètre produits phytosanitaires en tant que concentrations en matières actives et résidus dans les eaux de drainage.

Ces deux paramètres ont retenu notre attention pour diverses raisons dont notamment le fait que ce sont deux paramètres pour lesquels le législateur a défini une norme de potabilité et ce sont les polluants les plus importants dans l'eau destinée à la consommation mais surtout car ce sont les deux polluants émanant principalement de l'activité agricole, sujet qui nous préoccupe ici.

Ce texte suivra une démarche décrivant dans un premier temps le contexte, puis dans un deuxième temps les procédés utilisés puis les résultats et enfin une place sera réservée aux discussions.

Types d'exploitations	"végétales"			"animales"			"mixtes"		
	PV	PA	N	PV	PA	N	PV	PA	N
<b>Partis dans le total de</b>									
<b>1970</b>	40 %	2 %	5 %	14 %	64 %	61 %	46 %	34 %	34 %
<b>1978</b>	46 %	2 %	10 %	16 %	77 %	64 %	38 %	21 %	26 %
<b>1984/86</b>	75 %	6 %	26 %	8 %	75 %	55 %	17 %	19 %	19 %
<b>1987</b>	76 %	7 %	30 %	9 %	75 %	54 %	15 %	18 %	16 %
<b>1992</b>	77 %	7 %	31 %	10 %	77 %	54 %	13 %	16 %	15 %
<b>1994</b>	79 %	7 %	32 %	7 %	75 %	53 %	14 %	18 %	15 %

*PV = Production végétale ; PA = Production animale ; N = Effectif des exploitations ; A partir de 1984, les données disponibles permettent d'inclure dans l'analyse les exploitations orientées principalement vers les production ovines, caprines ou porcines. Le changement de classification ne permet pas de comparer directement les résultats de 1978 et les résultats de 1984. Source : RICA*

**Tableau 1 : Répartition des productions végétales et animales entre les différents types d'exploitation, D'après Dupraz et Vermesch 1997**

# I. Contexte

## *Evolution de l'activité agricole en France*

L'agriculture française a connu de profonds changements au cours des dernières décennies du siècle dernier. Ces changements se sont exprimés à travers des processus de spécialisation et d'agrandissement des exploitations.

La spécialisation des exploitations agricoles se traduit par une proportion de biens agricoles provenant d'exploitations spécialisées (c'est-à-dire ne fournissant qu'un nombre restreint de biens) de plus en plus importante. Dupraz et Vermesch (*Dupraz et Vermesch, 1997*) ont mis en évidence ceci en s'intéressant à la répartition des productions végétales et animales entre différents types d'exploitations (c.f. Tableau 1). On peut observer que la situation entre 1970 et 1987 passe d'une prépondérance des exploitations animales et mixtes à une prépondérance des exploitations spécialisées, aussi bien animales que végétales. Il est intéressant de noter que depuis 1987, ce phénomène s'est fortement ralenti. Ceci s'explique par divers mécanismes. Les exploitations « mixtes » ne bénéficient pas d'économies d'échelles croissantes<sup>1</sup> et les économies de gammes<sup>2</sup> qu'elles réalisent ne suffisent pas à compenser la différence de coûts de production avec les exploitations spécialisées. Les exploitations « mixtes » ont alors tendance à s'adapter (i.e. substituer certains facteurs de production par d'autres, moins onéreux en capitaux) ou à disparaître. A partir de la fin des années 1980, les exploitations « mixtes » ont réussi leur « mue » et se maintiennent, d'autant plus qu'elles sont aidées par la réforme de la politique agricole commune de 1992. La concentration des exploitations est marquée par la diminution du nombre d'exploitations. En effet, entre le recensement agricole de 1970 et l'enquête « structure » de 2007, on observe une diminution de 1,6 à 0,5 millions du nombre d'exploitations qui est conjointe à une augmentation des tailles moyenne de 19 à 52 hectares.

---

<sup>1</sup> Les économies d'échelles croissantes correspondent à la réduction des coûts de production associée à l'augmentation des volumes produits

<sup>2</sup> Les économies de gammes correspondent à la réduction des coûts de production associée à la combinaison de production de différents biens



Ces deux phénomènes ont été accompagnés de l'intensification des facteurs de production dont notamment une intensification par rapport au facteur travail et au facteur terre. Selon Pierre Dupraz (*Dupraz, 1998*) « L'intensification par rapport à la terre est la cause principale des pollutions d'origine agricole ».

### *Politiques agricoles et préservation de l'environnement*

Les politiques agricoles en Europe et à fortiori en France sont souvent synonymes de Politique Agricole Commune (PAC).

Le fonctionnement de la PAC depuis sa mise en place en 1962 a subi beaucoup de changements mais ce n'est que récemment que la préservation de l'environnement fait partie de ses objectifs. Les prémices de ce changement sont à porter au crédit de la réforme de la PAC opérée en 1992 qui a instauré les premières mesures agroenvironnementales. Cela s'est poursuivi en 1999 avec l'introduction de la première forme de conditionnalité des soutiens à l'agriculture.

L'éco conditionnalité, comme elle est dorénavant nommée, comprend différents volets. Celui qui nous intéresse fait référence aux Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales (BCAE) et est présenté en Annexe 1. Ces BCAE correspondent à des obligations de pratiques agricoles qui si elles ne sont pas suivies, entraînent des suspensions de subventions.

Les mesures agro environnementales (MAE) sont des contrats d'une durée de cinq ans entre un agriculteur d'une part et la collectivité d'autre part pour la fourniture de biens ou services environnementaux. Ces MAE poursuivent différents objectifs mais la préservation de la ressource en eau n'en fait pas partie. Néanmoins, une description de quatre MAE les plus susceptibles de participer à la protection de la ressource en eau est faite en Annexe 2.





## *Politiques publiques de l'eau*

Depuis 2000 et l'adoption d'une directive cadre, la politique de l'eau est commune, européenne et globale. En effet, jusqu'à cette date, plusieurs directives traitaient chacune d'aspects différents depuis l'eau potable (Directive 98/83/CE), la baignade (Directive 76/160/CEE) ou encore les nitrates d'origine agricole (Directive 91/676/CEE).

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) du 23 octobre 2000 (Directive 2000/60/CE) a pour objet de donner une cohérence à la politique européenne en matière d'eau et poursuit plusieurs objectifs tels que la prévention et la réduction de la pollution, la promotion d'une utilisation durable de l'eau, la protection de l'environnement, l'amélioration de l'état des écosystèmes aquatiques et l'atténuation des effets des inondations et des sécheresses.

Le but avoué de cette directive est d'atteindre le bon état des masses d'eau à l'horizon 2015.

Pour y parvenir, elle s'appuie sur une méthode de travail commune comprenant :

- Un état des lieux
- Un plan de gestion
- Un programme de mesure
- Un programme de surveillance

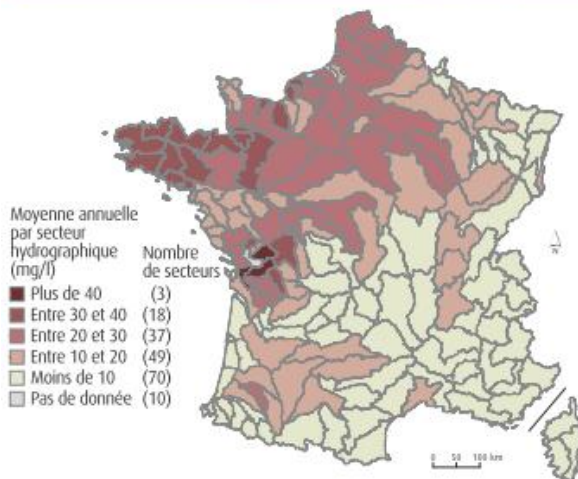
La première étape de l'état des lieux a pris fin en 2004 et les plans de gestion et les programmes de mesures ont été publiés en 2009. La prochaine étape consistera à l'évaluation en 2015 de l'atteinte des objectifs fixés.

Cette directive est le signe d'une volonté politique européenne de préserver et d'améliorer les qualités des ressources en eau.

## *Dégradation de la qualité des eaux*

Selon la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement), 66 % des pollutions aux nitrates sont d'origine agricole alors que seulement 22 % sont d'origine domestique et 12 % d'origine industrielle (*Direction de l'Eau et de la Biodiversité, [http1](#)*).

Moyenne annuelle 2007 des concentrations en nitrates dans les cours d'eau, par secteur hydrographique

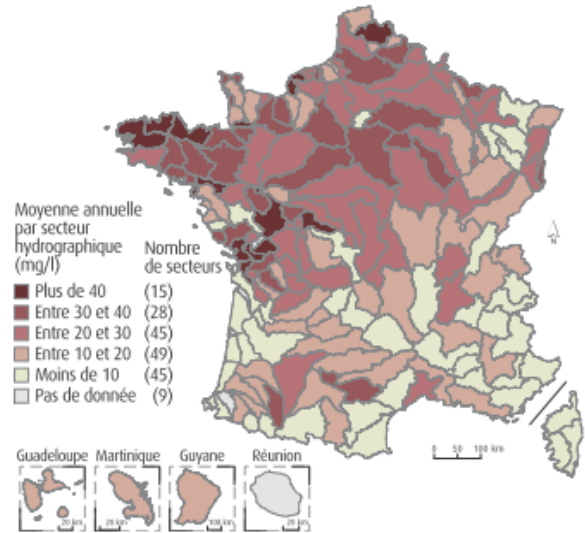


Note : Moyennes annuelles calculées à l'aide des données issues du réseau de contrôle de surveillance (RCS) mis en œuvre par les agences de l'Eau au titre de la DCE. La fréquence est au minimum de six prélèvements dans l'année.

Source : Agences de l'Eau, 2007 - MEEDDM, BD Carthage, 2008. Traitements : SOEs, 2009.

Figure 4, d'après Commissariat général au développement durable, 2010

Moyenne annuelle 2007 des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines, par secteur hydrographique



Note : Moyennes annuelles calculées à l'aide des données issues uniquement du RCS mis en œuvre par les agences de l'Eau au titre de la DCE (données extraites de la banque nationale d'accès aux données sur les eaux souterraines (Ades) gérée par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Les données du contrôle sanitaire sont exclues, d'où un nombre restreint de stations par rapport au tableau p. 21. La fréquence des mesures est de deux par an en général (entre 1 et 10 analyses selon les points). Pour certains points, la moyenne annuelle correspond donc à une seule analyse (5 094 analyses de nitrates au total pour 2007, sur 1 697 points).

Source : Agences de l'Eau - BRGM, banque de données Ades, 2007 - MEEDDM, BD Carthage, 2008. Traitements : SOEs, 2009.

Figure 3, d'après Commissariat général au développement durable, 2010

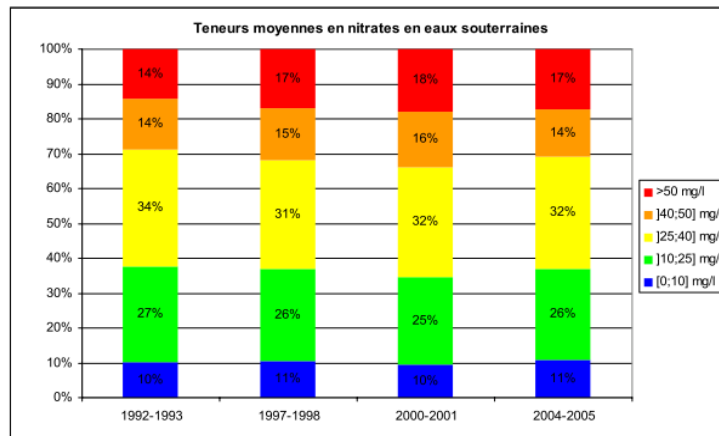


Figure 2 : Evolution entre 1992-1993 et 2004-2005 du nombre de points communs, en eaux souterraines, aux quatre campagnes

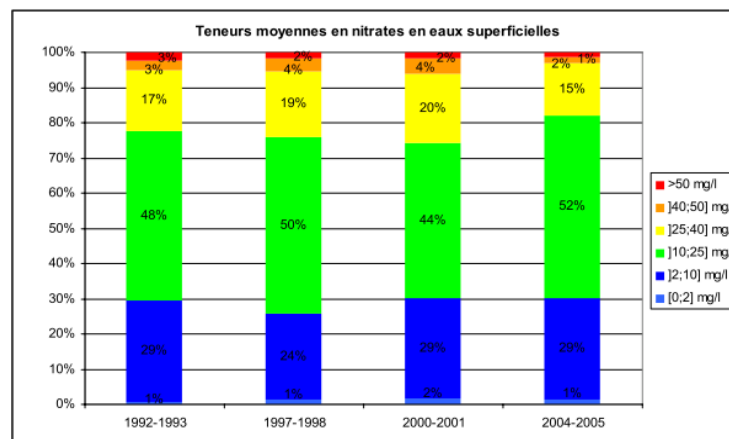


Figure 1 : Evolution entre 1992-1993 et 2004-2005 du nombre de points communs, en eaux superficielles, aux quatre campagnes

La situation n'est pas homogène sur l'ensemble du territoire de la France métropolitaine et on peut grossièrement la diviser via une diagonale allant de Bordeaux à Nancy (cf. figures 1 et 2), les zones les plus touchées aussi bien par la pollution des eaux de surface que par la pollution des eaux souterraines se situant au nord-ouest de cette délimitation.

Les premiers suivis de la teneur en nitrates ont été réalisés à partir de 1992 au titre de la directive « Nitrates » (*directive n°91/676/CEE du 12 décembre 1991*). A la demande de la direction de l'Eau du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, l'Office International de l'Eau (OIEau) a collecté des données auprès des Agences de l'Eau, des Directions Régionales de l'Environnement (DIREN) et des Directions Régionales de l'Action Sanitaire et Sociale (DRASS).

A l'heure actuelle, quatre campagnes de surveillance ont été effectuées.

Le graphique des évolutions des teneurs en nitrates entre les différentes campagnes (figure 3) montre une certaine stabilité des classes de teneur concernant la qualité des eaux souterraines avec une tendance à la dégradation qui semble se ralentir lors de la dernière campagne.

On peut remarquer la même tendance concernant la teneur en nitrates des eaux superficielles avec néanmoins un pourcentage des points de contrôle à teneur élevée (supérieur à 40 mg/l de nitrates) nettement moins important (figure 4). Le pourcentage des points suivis sur les quatre campagnes ayant une teneur élevée en nitrates pour la campagne 2004-2005 est pour les eaux souterraines de 31 % alors que ce pourcentage pour les eaux superficielles est de 3 %. Cette différence notable est en partie due à une des caractéristiques des masses d'eau souterraines qui est le délai de latence. En effet, la percolation de l'eau au travers des différentes portions de sol qui la conduisent à une nappe phréatique peut atteindre plusieurs dizaines d'années (*Molénat, 2008*).

La situation face aux pollutions par les produits phytosanitaires est contrastée par rapport à la situation face aux nitrates. En effet, les points de suivi dans les cours d'eau qui ont des teneurs importantes sont plutôt localisés dans des régions d'agriculture intensive telles que le Bassin parisien, la vallée du Rhône et le Bassin d'Aquitaine (c.f. Annexe 3).



Concernant les eaux souterraines, il est intéressant de remarquer que les teneurs les plus importantes ont été relevées au sein des grands bassins sédimentaires du Bassin parisien et de sa périphérie, dans la vallée du Rhône et dans le bassin d'Aquitaine (c.f. Annexe 4), zones correspondant à celles les plus touchées dans les eaux superficielles.

Il faut noter que la situation est différente entre les eaux superficielles et les eaux souterraines. En effet, la teneur en produits phytosanitaires dans les cours d'eau est en baisse de quantification pour les produits dorénavant interdits, auxquels se sont substitués de nouveaux produits. Dans les eaux souterraines, ce sont les métabolites qui sont le plus quantifiés et en tête de ceux-ci on retrouve l'atrazine déséthyl (un métabolite de l'atrazine, herbicide interdit en 2001) avec un taux de quantification de 43 %.

Les campagnes nationales de suivi (menées en parallèle des suivis nitrates) sont au nombre de 3 et ont débuté en 1997. Ce sont les herbicides qui sont le plus souvent quantifiés lors de ces campagnes. Sur les 20 produits les plus quantifiés, on retrouve 18 herbicides et 2 insecticides (*Commissariat général au développement durable, 2010*).

Le ministère de la Santé et des Sports considère que lors de l'année 2008 l'eau du robinet a été au moins une fois non conforme pour 8,1 % de la population française vis à vis de sa teneur en pesticides (*Direction générale de la Santé, Bureau de la qualité des eaux, 2008*). Toujours selon la même source, 94 unités de distribution sur 96 qui étaient concernées par des limitations d'usage, l'étaient à cause de l'atrazine ou un de ses métabolites.

Comme mentionné avant, l'objectif ultime de la directive cadre sur l'eau est d'atteindre un bon état de toutes les eaux communautaires d'ici à 2015.

Pour les masses d'eau de surface, ce bon état est présumé atteint lorsque le bon état écologique et le bon état chimique sont atteints. Concernant les masses d'eau souterraines, le bon état global est atteint lorsque le bon état chimique et le bon état quantitatif sont atteints.

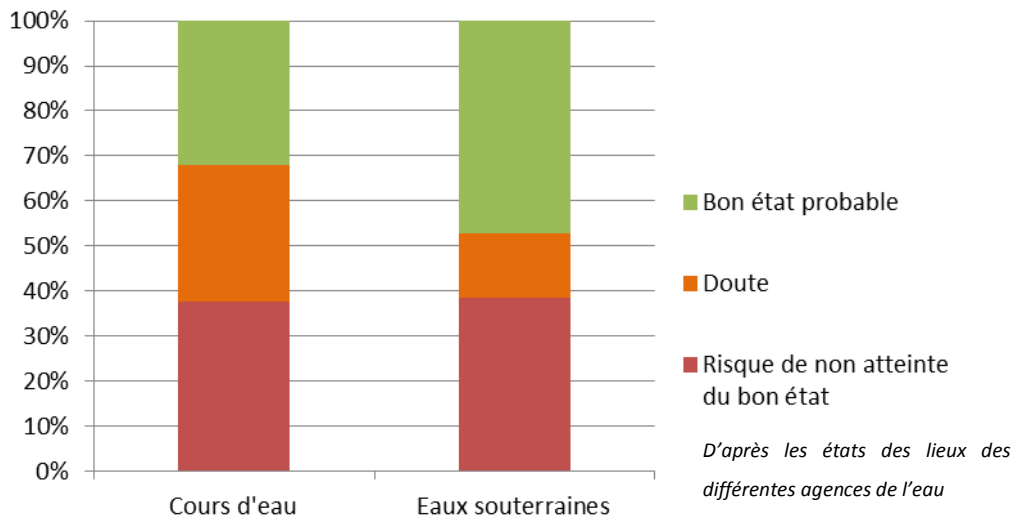


Figure 5 : Risque de non atteinte du bon état global des masses d'eau en 2015

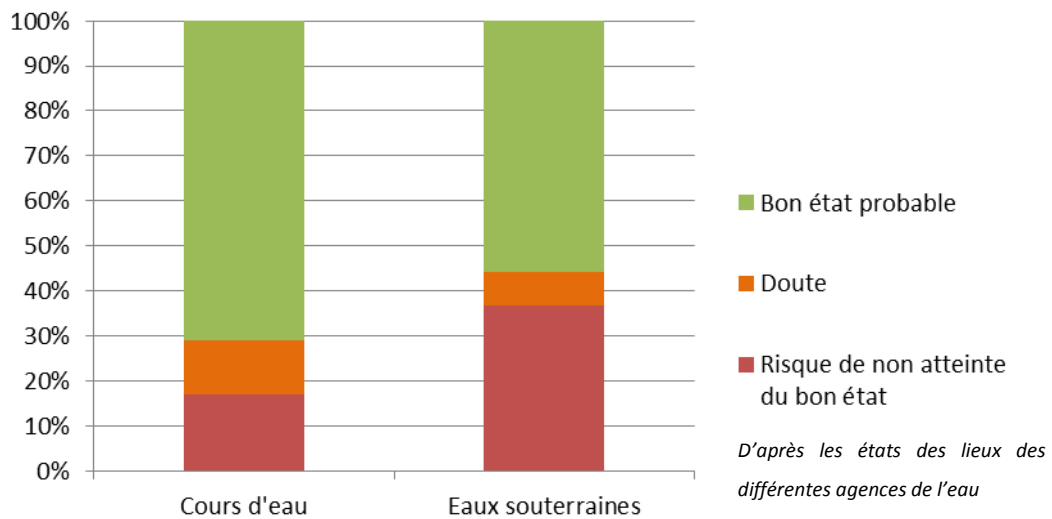


Figure 6 : Risque de non atteinte du bon état chimique des masses d'eau en 2015

Pour cela, dans chaque état membre, un état des lieux des masses d'eaux par bassin hydrographique doit être réalisé. En France ces états des lieux ont été réalisés lors de la mise en place des SDAGE<sup>3</sup> de la période 2010-2015 par les agences de l'eau.

La figure 5 représente le risque de non atteinte du bon état pour les masses d'eau à l'échelle nationale. On peut observer que quel que soit le type de masse d'eau, environ 40 % risquent de ne pas atteindre le bon état.

La figure 6 représente le risque de non atteinte du bon état chimique des masses d'eau. On peut se rendre compte que la non atteinte du bon état global des masses d'eau n'est pas toujours d'origine « chimique » pour les cours d'eau. Pour les masses d'eaux souterraines, on observe que la grande majorité des eaux souterraines en risque de non atteinte du bon état global sont également en risque de non atteinte du bon état « chimique ».

## II. Problématique

Les gestionnaires de l'eau, représentés par la fédération professionnelle des entreprises de l'eau, sont aujourd'hui en quête de nouvelles solutions pour proposer des alternatives aux traitements curatifs qui montrent aujourd'hui leurs limites.

Une fois entendu que l'activité agricole, qui couvre la majeure partie du territoire français (*Agreste, 2011*), a un rôle à jouer dans la préservation de la ressource en eau, il était clair que la réflexion à avoir devait s'orienter en se posant cette question :

Quels systèmes de production agricoles sont en mesure de préserver la qualité de l'eau dans les bassins d'alimentation de captage ?

---

<sup>3</sup> Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux, en application de la loi sur l'eau de 1992, fixe les orientations fondamentales d'une politique de gestion des eaux équilibrée entre la satisfaction des usages et la préservation des milieux aquatiques.





### III. Hypothèse

Pour répondre à cette question, un point sur le contexte permet de replacer beaucoup d'éléments à leur place.

Temporellement, la mutation de l'activité agricole en France, qui s'est traduite par la spécialisation et la concentration des exploitations agricoles, a été concomitante avec la dégradation de la qualité des ressources en eaux souterraines.

Cette mutation s'est également accompagnée d'une intensification des facteurs de production par rapport au facteur travail et au facteur terre (*Dupraz, 1998*).

Si l'on considère que l'activité agricole, de par ses changements de mode de production (notamment la spécialisation), est responsable, en partie, de la dégradation de la ressource en eau, tout nous laisse à penser qu'en favorisant les types d'exploitations dont la proportion est ou a été en diminution, la qualité de la ressource ne peut que s'améliorer. Or, il nous faut prouver ceci en émettant une hypothèse et en la testant. Nous avons choisi de tester cette hypothèse :

Les systèmes de polyculture-élevage seraient à l'origine d'une pollution diffuse acceptable pour la production d'eau potable

## Classement des systèmes de culture

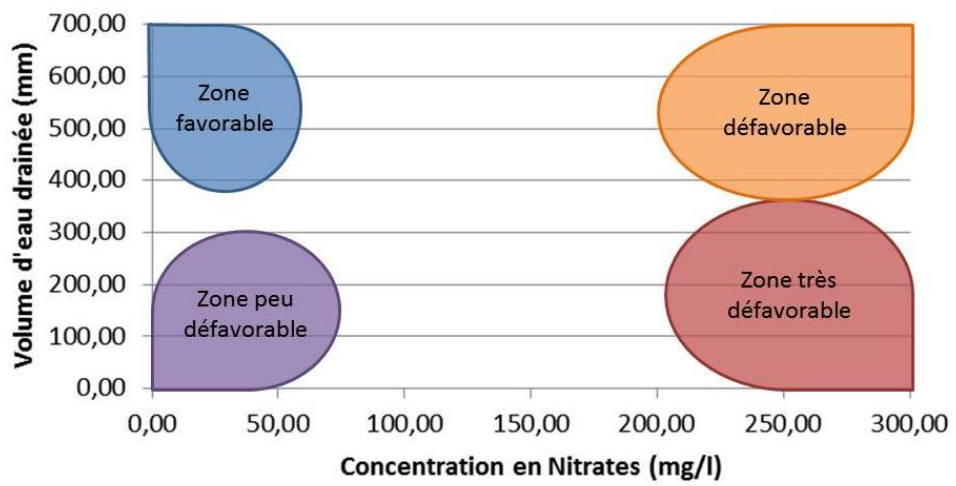


Figure 7 : Classement des systèmes de production

## IV. Matériel et méthode

Pour répondre à cette question, il a été décidé d'un commun accord entre les partenaires de travailler à partir de données issues de la littérature scientifique pour établir un lien entre une « quantité » de pollution et différents systèmes de production.

Pour ce faire, nous avons décidé d'associer à un système de culture (compris comme étant un doublet culture en place au printemps de l'année n et culture en place au printemps de l'année n-1) une quantité et une pollution des eaux.

### *Associer à un système de culture une quantité de pollution*

Pour s'affranchir de la variabilité des situations dans lesquelles les pollutions ont été étudiées, un tableau regroupant les variables causes de cette variabilité a été élaboré. Il comprend trois variables à expliquer :

- La concentration en nitrates
- La concentration totale en produits phytosanitaires
- Le volume d'eau drainée

Le choix s'est porté sur ces trois variables car il semblait important de tenir compte de la concentration en nitrates et en produits phytosanitaires qui établit la quantité de polluants à éliminer. Le paramètre volume d'eau permet quant à lui de cerner le volume d'eau à traiter. En effet, il semble plus commode de traiter beaucoup d'eau à des concentrations faibles en polluants puis peu d'eau à des concentrations faibles puis peu d'eau à des concentrations importantes et finalement beaucoup d'eau à des concentrations importantes comme on peut le visualiser sur la figure 7.

Ces trois premières variables sont suivies de variables explicatives :

- La culture précédente
- La culture en cours
- La couverture du sol en hiver
- La période de minéralisation
- La quantité de fertilisation minérale apportée
- Le nombre d'apports de fertilisation minérale



- La quantité de fertilisation organique apportée
- Le pourcentage d'argiles granulométriques du sol
- Le pourcentage de sables granulométriques du sol
- Le pourcentage de matière organique du sol
- L'IFT (Indice de Fréquence et de Traitement) de la culture en cours
- La famille de produits phytosanitaires la plus utilisée
- La solubilité des produits phytosanitaires dans l'eau
- Le temps de demi-vie ( $DT_{50}$ ) des produits phytosanitaires
- Le coefficient de partage  $K_{oc}$  (ou  $K_d$ ) des produits phytosanitaires

Cette liste a été élaborée à partir de l'importance donnée par la littérature aux différents facteurs ci-dessus. Le paramètre culture apparaît comme étant le principal facteur de variabilité divisé en deux paramètres, culture en cours, le plus important et culture précédente. Ceci peut être expliqué par le fait des demandes physiologiques différentes des cultures, des pratiques inhérentes à cette culture mais également par l'implantation racinaire et la structure du sol en résultant.

Le deuxième paramètre est constitué des indicateurs relevant des doses appliquées et éventuellement de leur fractionnement comme par exemple pour la fertilisation minérale et organique. On imagine aisément que lors du fractionnement des apports de fertilisation azotée, les apports correspondent mieux aux besoins des plantes et la quantité absorbée par celles-ci est plus importante.

Le paramètre composition du sol joue également un rôle dans cette liste. En effet, selon la composition granulométrique et le taux de matière organique présente, la rétention des molécules et la circulation de l'eau sont différentes.

Concernant les nitrates, il a été choisi d'étendre la liste à deux paramètres supplémentaires qui sont la couverture du sol en hiver et la période de minéralisation. La couverture du sol en hiver permet de limiter le ruissellement et surtout la culture en place peut être considérée comme un piège à nitrates car l'azote qu'elle mobilise n'est pas soumis au lessivage hivernal. La période de minéralisation rentre en ligne de compte lors de l'apport de fertilisation organique. En effet, avant d'être utilisés par les plantes les éléments nutritifs sont minéralisés dans le sol. Or cette minéralisation n'est pas continue dans le temps et peut être approchée par une période de minéralisation correspondant à des caractéristiques climatiques permettant la minéralisation de la matière organique.



Concernant les produits phytosanitaires, il a semblé nécessaire d'intégrer différents paramètres décrivant les potentialités de ruissellement. La solubilité des produits phytosanitaires dans l'eau en constitue un premier. En effet, si un produit est fort soluble, il va être davantage soumis au lessivage. Le temps de demi-vie des produits a également été intégré. Temps nécessaire pour que la moitié des molécules appliquées soient dégradées, il permet de cerner le temps pendant lequel il va pouvoir être lessivé. Le coefficient de partage  $K_{oc}$  caractérise et donne une indication sur l'aptitude de la molécule à être adsorbée ou désorbée sur la matière organique du sol. Il reflète ainsi un potentiel de rétention dans le sol.

Dans cette liste, aucun critère ne tient compte des pratiques agricoles associées aux cultures. En effet, mis à part leur diversité qui se révèle difficile à traiter, les pratiques agricoles apparaissent dans la littérature comme des facteurs explicatifs de moindre importance par rapport à ceux cités plus haut.

### *Confrontation des critères à la littérature*

En parcourant la littérature nous avons ensuite essayé de renseigner tous les champs. Il est assez vite apparu que les données concernant les produits phytosanitaires n'étaient pas suffisamment présentes pour pouvoir mener à bien une analyse statistique.

Il en a été de même pour certains autres critères. Nous avons donc dû nous résigner à abandonner la période de minéralisation, l'IFT, la famille de produits phytosanitaires la plus utilisée, la solubilité des produits phytosanitaires dans l'eau, le temps de demi-vie et le coefficient de partage des produits phytosanitaires.

De plus, le choix a été fait d'intégrer les résultats provenant de modèles informatiques afin de pouvoir avoir un nombre conséquent de mesures à exploiter.

Nous souhaitons aborder le paramètre phytosanitaire par un angle détourné, c'est-à-dire en appréhendant des concentrations par systèmes de culture ou à défaut par culture mais les données étaient manquantes. Nous reviendrons sur ce point dans la partie discussion.



	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
<b>Nitrates</b>	< 45 mg/L	45 < X < 100 mg/L	100 < X < 200 mg/L	> 200 mg/L
<b>Volume</b>	< 90 mm	90 < X < 300 mm	300 < X < 540 mm	> 540 mm
<b>Fertilisation minérale</b>	< 100 kgN/ha	100 < X < 180 kgN/ha	180 < X < 300 kgN/ha	> 300 kgN/ha
<b>Fertilisation organique</b>	< 100 kg/ha	100 < X < 160 kg/ha	160 < X < 300 kg /ha	> 300 kg/ha
<b>Argiles granulométriques</b>	< 3 %	3 < X < 9 %	9 < X < 17 %	> 17 %

Tableau 2 : Découpage de variables en 4 classes

	Classe 1	Classe 2	Classe 3
<b>Sables granulométriques</b>	< 55 %	55 < X < 68 %	> 68 %
<b>Matière organique du sol</b>	< 2,5 %	2,5 < X < 4,5 %	> 6,5 %
<b>Jours de pâturage</b>	< 99 jours	99 < X < 299 jours	> 299 jours

Tableau 3 : Découpage de variables en 3 classes

### Dendrogramme des Clusters

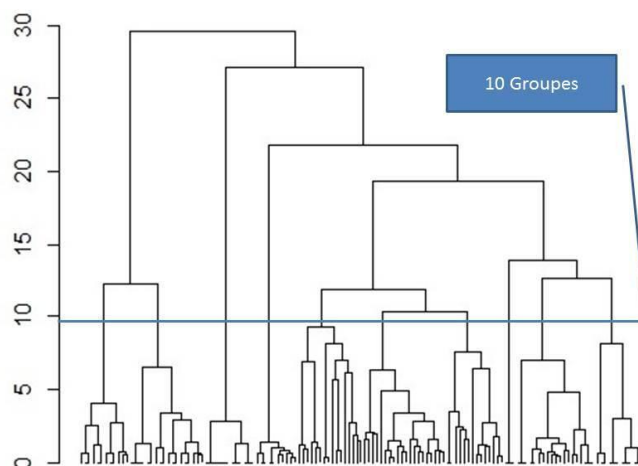


Figure 8 : Découpage en 10 groupes

### *Une analyse statistique pour le paramètre concentration en nitrates*

A partir des données recueillies par la recherche bibliographique, nous avons souhaité mettre en œuvre une analyse statistique pour rapprocher les situations proches et former des groupes de successions culturales similaires. Au vu du type de données présentes dans le tableau, une analyse factorielle à composantes multiples s'est avérée correspondre aux besoins de l'étude.

Composé de données à la fois quantitatives et qualitatives, le tableau a dû être transformé pour répondre aux besoins de l'analyse.

La première étape a été de discrétiser l'ensemble des variables continues.

Pour ce faire chaque variable continue a fait l'objet d'un classement en 3 ou 4 classes, comme on peut le voir dans les tableaux 2 et 3. Les bornes de ces classes ont été déterminées pour arriver à des effectifs de quasi même grandeur dans l'ensemble des classes, tout en tenant compte de leur signification en termes de pratiques et de doses.

A l'aide des données ainsi transformées, nous avons réalisé une analyse factorielle à composantes multiples suivie d'une classification ascendante hiérarchique à l'aide du logiciel R. Le script utilisé est présent en annexe 5.

Pour l'analyse factorielle à composantes multiples, 19 axes factoriels ont été retenus et le choix a été fait de diviser les successions culturales en 10 groupes (c.f. figure 8), comme nous pourrions le constater dans la partie résultats.

### *Changement d'échelle : de la parcelle à l'exploitation*

Dans le but de pouvoir proposer une quantité de pollution par système de production, il nous fallait passer de l'échelle de la parcelle à l'échelle de l'exploitation agricole.

Pour ce faire, nous avons utilisé les assolements des différents types d'exploitations agricoles classées selon leurs orientations technico-économique. Ces données sont tirées du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA), données disponibles en accès libre depuis le site Agreste.

Nouveau Code	Code initial
1 : Grandes cultures	13 : Céréales et oléoprotéagineux
	14 : Cultures générales
	60 : Polyculture
2 : Maraîchage, horticulture	28 : Maraîchage
	29 fleurs et horticulture diverse
3: Viticulture, fruits	37 : Viticulture d'appellation
	38 : Autre viticulture
	39 : Fruits et autres cultures permanentes
4 : Herbivores	41 : Bovins lait
	42 : Bovins viande
	43 : Bovins lait-viande
	44 : Ovins, caprins et autres herbivores
5 : Granivores	50 : Granivores
6 : Polyélevage à orientation herbivores	71 : Polyélevage à orientation herbivores
7 : Polyélevage à orientation granivores	72 : Polyélevage à orientation granivores
8 : Grandes cultures et herbivores	81 : Grandes cultures et herbivores
9 : Autres associations cultures-élevages	82 : Autres associations

Tableau 4 : Regroupement des OTEX de 18 en 9 postes

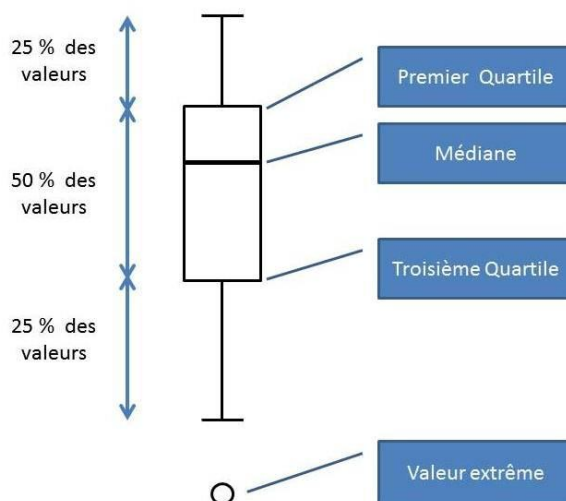


Figure 9 : Boîte à moustache

De la liste initiale en 18 postes, nous avons décidé de réduire à une liste en 9 postes, présente dans le tableau 4.

Avec cette démarche, nous arrivons à associer à chaque type de système de production, une quantité de pollution correspondant à une profondeur de prélèvement. Or, dans l'ensemble des cas, les prélèvements d'eau utilisés dans les études sont faits à des profondeurs oscillant entre 0,70 et 1,20 mètre. L'eau analysée ne correspond pas exactement à celle qui est utilisée pour la production d'eau potable car sa percolation à travers les matériaux qui la conduisent vers les aquifères peuvent en modifier sa composition.

Dans la suite, des boîtes à moustache seront utilisées pour décrire les dispersions des résultats. Il nous a semblé utile de faire un rapide descriptif de ses paramètres en figure 9.

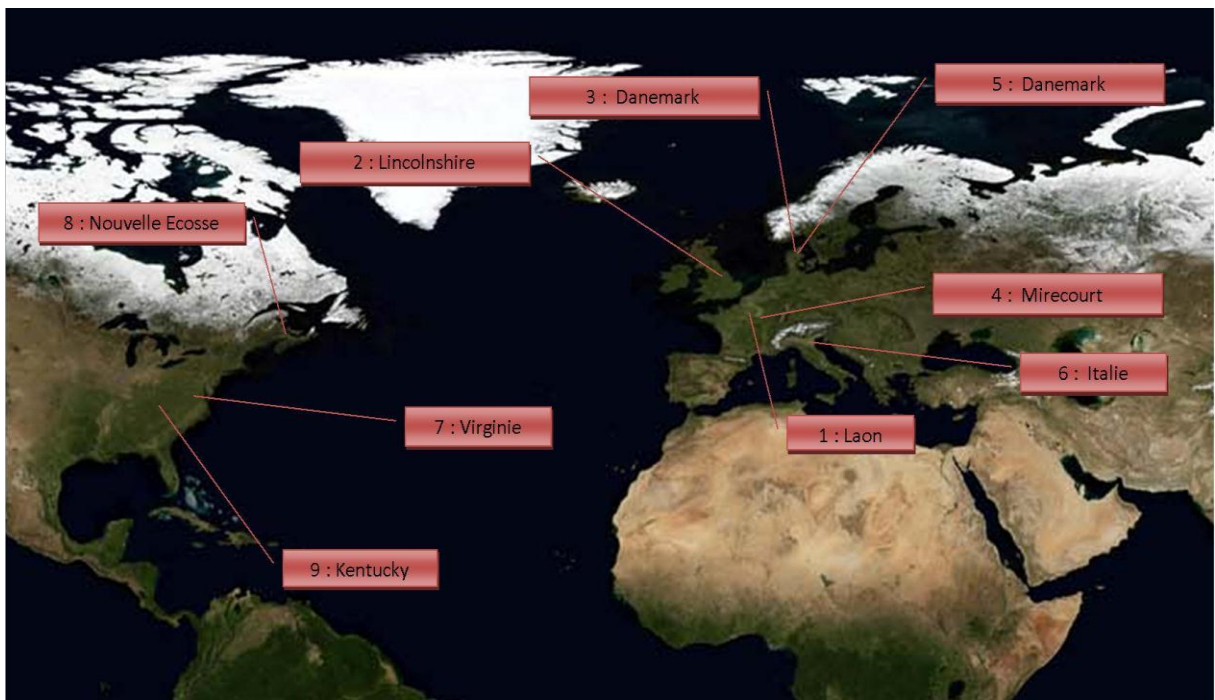


Figure 10 : Origine des publications utilisées

## V. Résultats

### *Publications utilisées*

La recherche bibliographique nous a fourni 9 publications répondant aux critères. Comme on peut le constater sur la figure 10 la distribution géographique est importante au sein de l'hémisphère Nord. Schématiquement, on peut distinguer l'Europe de l'Ouest, de l'Amérique du Nord, notamment la Côte Est.

Parmi celles-ci, on retrouve deux études danoises, *Simmelsgaard et Djurhuus (Simmelsgaard et Djurhuus, 1998)* qui ont élaboré un modèle empirique de lixiviation de l'azote à partir d'observations et *Simmelsgaard (Simmelsgaard, 1998)* qui a étudié les facteurs endogènes à l'activité agricole ayant un rôle sur la lixiviation des nitrates (il s'agit des points respectivement 5 et 3 sur la figure 10).

*Johnson et al, (Johnson et al, 2002)* ont travaillé en Angleterre sur les doses d'azote minéral apporté et sur la conduite des cultures pour expliquer les pertes azotées (il s'agit du point 2 sur la figure 10).

*Acutis et al (Acutis et al, 2000)* ont utilisé le modèle de prévision LEACHN pour calculer les lixiviations en nitrates de différents systèmes de culture du maïs (il s'agit du point 6 sur la figure 10).

En France, *Beaudoin et al (Beaudoin et al, 2005)* ont étudié l'effet des pratiques culturales, des sols et des rotations sur la lixiviation des nitrates dans les zones d'agriculture intensive (il s'agit du point 1 sur la figure 10).

Toujours en France, *Pervanchon et al (Pervanchon et al, 2005)* ont élaboré un indicateur de pertes azotées sur prairies en combinant des sous-indicateurs dont un sur les nitrates issu de données collectées à Mirecourt (il s'agit du point 4 sur la figure 10).

Des études ont également été réalisées outre atlantique, au Canada, où *Fuller et al (Fuller et al, 2010)* se sont intéressés à la conduite des amendements en termes de saisonnalité et de rotations sur les lixiviations en nitrates (il s'agit du point 8 sur la figure 10).

### Evolution des valeurs propres en %

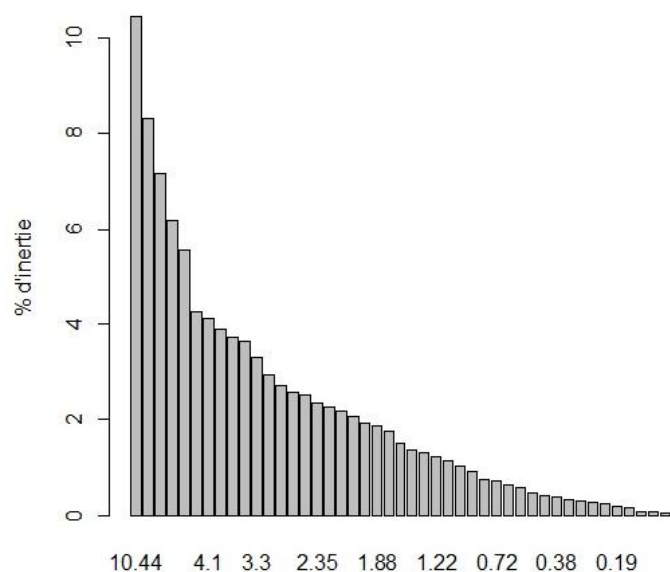


Figure 11 : Evolution des valeurs propres

Groupe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Effectif	20	16	14	19	10	11	18	12	12	3	135

Tableau 5 : effectifs des différents groupes de systèmes de culture

Groupe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Culture principale	Orge de printemps (80%)	Blé d'hiver (38%)	Betterave (36%)	Mais Grain (84%)	Prairie permanente (100%)	Prairie temporaire (73%)	Mais ensilage (100%)	Mais Grain (100%)	Maraichage (100%)
		Colza hiver (25%)	Orge de printemps (29%)						
			Prairie temporaire (29%)						

Les chiffres en parenthèses représentent l'effectif de cette culture par rapport à l'effectif du groupe

Tableau 6 : Cultures principales composant les groupes de systèmes de culture

*Evanylo et al (Evanylo et al, 2008)* ont étudié aux Etats Unis les effets des pratiques de fertilisation sur les sols et l'eau pour les systèmes de maraîchage biologique (il s'agit du point 7 sur la figure 10).

*Stoddard et al (Stoddard et al, 2005)* ont travaillé également aux Etats Unis sur les contributions de la fertilisation et du labour sur la lixiviation des nitrates et des herbicides (il s'agit du point 9 sur la figure 10).

L'annexe 6 présente plus en détail les résumés de ces publications.

Au total, nous obtenons 135 lignes de mesures correspondant chacune à une année de prélèvements pour un système de culture sur une parcelle donnée.

### *Analyse statistique*

L'analyse factorielle en composantes multiple nous permet d'expliquer 80,25 % de la variance à l'aide des 19 axes factoriels retenus (c.f. figure 11).

A la suite de l'analyse factorielle, nous avons pris le parti de découper l'ensemble des mesures en 10 groupes. Cela nous permettait d'obtenir des groupes avec un nombre moyen attendu de mesures relativement conséquent (environ 13) et une diversité des systèmes de culture permettant une représentativité accrue.

Le découpage qui a été choisi, en 10 classes, offre effectivement une répartition des effectifs quasi égaux comme on peut le voir sur le tableau 5. Il est important de noter que le groupe 10 possède un effectif relativement faible eu égard aux autres groupes. De plus les successions représentées par ce groupe comprennent des cultures telles que le soja dont l'occurrence est faible en France. C'est pourquoi nous avons décidé de ne pas le conserver et de l'ignorer dans la suite.

Les 9 groupes ainsi retenus, sont assez homogènes en composition concernant la culture principale comme on peut le constater sur le tableau 6. En effet, sur l'ensemble des groupes seuls deux (les groupes 2 et 3) n'ont pas leur culture principale représentant plus de 70 % de l'effectif.



Groupe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Précédent majoritaire	Orge de printemps (50%)	Blé d'hiver (25%)	Orge de printemps (57%)	Prairie permanente (58)	Prairie permanente (100%)	Maïs grain (55%)	Prairie temporaire (100%)	Maïs grain (100%)	Maraichage (100%)
	Blé d'hiver (25%)	Pois (19%)	Prairie temporaire (29%)	Maïs grain (26%)		Prairie temporaire (45%)			
		Colza hiver (19%)							

Les chiffres en parenthèses représentent l'effectif de cette culture par rapport à l'effectif du groupe

Tableau 7 : Précédents majoritaires composant les groupes de systèmes de culture

	Succession principale	Succession secondaire	Succession tertiaire
Groupe 1	Orge -> Orge (40%)	Blé d'hiver-> Orge (25%)	Betterave-> Orge (15%)
Groupe 2	Colza-> Blé d'hiver (19%)	Pois-> Blé d'hiver (19%)	
Groupe 3	Orge-> Betterave (29%)	Orge-> Prairie temporaire (21%)	Prairie temporaire-> Orge (21%)
Groupe 4	Prairie permanente-> Maïs grain (42%)	Maïs grain-> Maïs grain (26%)	
Groupe 5	Prairie permanente-> Prairie permanente (100%)		
Groupe 6	Prairie temporaire-> Prairie temporaire (45%)	Maïs grain-> Soja (27%)	Maïs grain-> Prairie temporaire (27%)
Groupe 7	Prairie temporaire-> Maïs ensilage (100%)		
Groupe 8	Maïs grain-> Maïs grain (100%)		
Groupe 9	Maraichage-> Maraichage (100%)		

Les chiffres en parenthèses représentent l'effectif de cette succession par rapport à l'effectif du groupe

Tableau 8 : Successions principales composant les groupes

	Total	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5	Groupe 6	Groupe 7	Groupe 8	Groupe 9
Concentration (en mg NO <sub>3</sub> /L)	59,39	89,02	82,25	69,37	20,52	29,05	8,76	256,85	176,20	13,26
Volume d'eau (en mm)	342,85	396,5	283,19	616,93	503,53	334,70	647,09	102,00	94,67	59,57

Tableau 9 : Concentrations et volumes d'eau des différents groupes de systèmes de culture

#### Dispersion des concentrations en nitrates

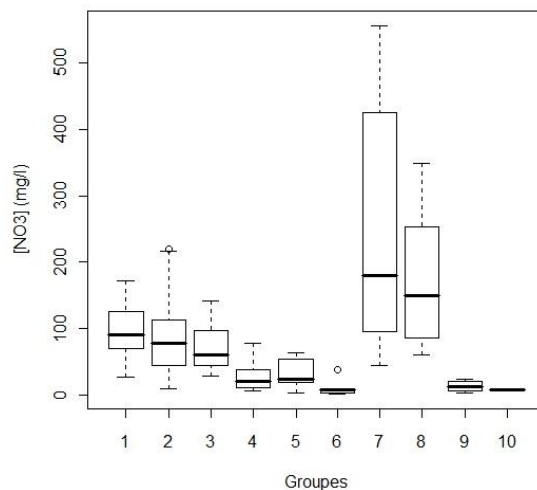


Figure 12 : Dispersion des concentrations en nitrates des groupes de systèmes de culture

Il est intéressant de noter également que 4 groupes (les groupes 5, 7, 8 et 9) sont composés de seulement une culture. L'annexe 7 rassemble les différents groupes et leurs caractéristiques.

Si l'on se penche sur les précédents majoritaires constituant les groupes (c.f. tableau 7), les résultats ne sont pas si tranchés. Mis à part les 4 groupes 5, 7, 8 et 9 déjà composés d'une seule culture et qui sont également composés d'un seul précédent, aucun autre groupe n'est composé de précédent majoritaire constituant plus de 60 % de l'effectif du groupe.

En étudiant les successions majoritaires à l'intérieur des groupes (c.f. tableau 8), on peut observer les mêmes tendances. En effet, les groupes 5, 7, 8 et 9 sont composés assez logiquement d'une seule succession culturelle.

Les groupes 1, 4 et 6 sont eux composés de successions composant plus de 40% des effectifs du groupe.

Enfin, les groupes 2 et 3 sont caractérisés par une succession ne représentant pas plus de 30% des effectifs.

On peut alors supposer que le facteur culture en cours est le facteur prédominant dans l'analyse.

Si l'on s'intéresse aux résultats en termes de concentrations et de volumes d'eau, on observe une certaine dispersion entre les groupes (c.f. tableau 9). Si la concentration moyenne globale est de 59,39 milligrammes de nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) par litre, les extrêmes se situent entre 8,76 milligrammes de nitrates par litre pour le groupe 6 et 256,85 milligrammes de nitrates par litre pour le groupe 7. Les constatations sont équivalentes avec le volume d'eau drainée puisque la moyenne totale est de 342,85 millimètres et les extrêmes sont situés entre 59,57 millimètres pour le groupe 9 et 647,09 millimètres pour le groupe 6.

Les dispersions à l'intérieur des groupes sont plutôt satisfaisantes pour le paramètre concentration en nitrates comme on peut le constater sur la figure 12, excepté pour les groupes 7 et 8 qui sont plus dispersés. Cela reste toutefois acceptable.

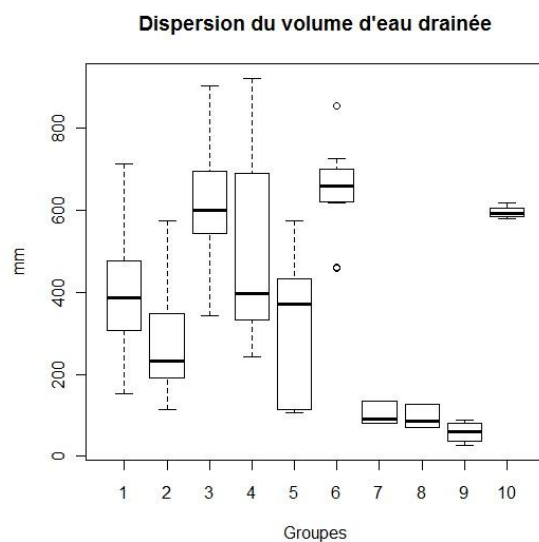


Figure 13: Dispersion du volume d'eau drainée des groupes de systèmes de culture

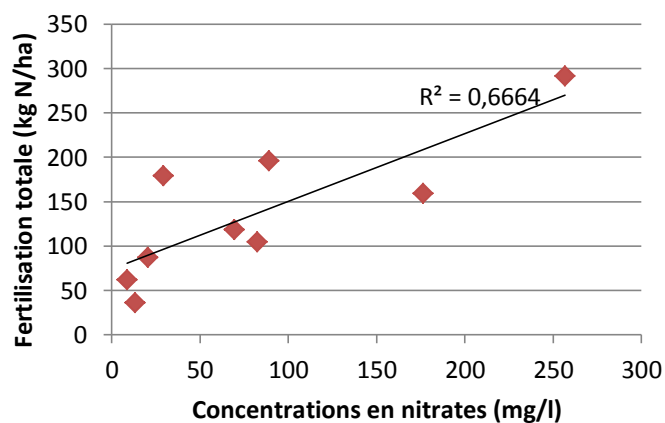


Figure 14 : lien entre fertilisation azotée et concentration en nitrates

	Groupe 9	Groupe 6	Groupe 5	Groupe 4	Groupe 8	Groupe 2	Groupe 7	Groupe 1	Groupe 3
<b>Quantité d'azote (kg N/ha)</b>	7,90	56,69	97,23	103,34	166,80	232,91	261,98	352,96	427,95
<b>Culture en place</b>	Maraîchage	Prairie permanente	Prairie temporaire	Maïs grain	Maïs grain	Blé d'hiver	Maïs ensilage	Orge	Betterave

Tableau 10 : Hiérarchisation des systèmes de culture selon la quantité d'azote

	Groupe 6	Groupe 4	Groupe 5	Groupe 3	Groupe 9	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 8	Groupe 7
$\frac{C}{V}$	0,01	0,04	0,09	0,11	0,22	0,22	0,29	1,86	2,52
<b>Culture en place</b>	Prairie temporaire	Maïs grain	Prairie permanente	Betterave	Maraîchage	Orge	Blé d'hiver	Maïs grain	Maïs ensilage

Tableau 11 : Hiérarchisation des systèmes de culture selon le rapport  $\frac{C}{V}$

Concernant les volumes d'eau drainée, les dispersions au sein des groupes sont également assez restreintes comme on peut le constater sur la figure 13, exception faite des groupes 4 et 5.

A première vue, il nous semblait qu'un lien pouvait être établi entre la quantité d'eau drainée et la concentration en nitrates. Après une rapide analyse, le lien n'est pas avéré puisqu'une régression linéaire a été réalisée mais le coefficient de détermination était loin d'être satisfaisant (c.f. Annexe 8).

A l'opposé, le lien entre la concentration en nitrates et la fertilisation totale semble beaucoup plus fort (c.f. figure 14). La fertilisation totale est comprise comme étant la somme des fertilisations minérale et organique, avec un facteur de conversion entre la quantité apportée et la quantité d'azote disponible la première année de 2,5 kilogrammes d'azote par tonne de matière organique apportée (*http 2*, Annexe 9)

Le groupe 5, composé uniquement et seulement de toutes les prairies permanentes est également le seul au sein duquel est pratiqué le pâturage.

### *Hiérarchisation des systèmes de culture*

Pour essayer de classer les groupes, nous avons tout d'abord considéré la quantité d'azote associée à un système de culture comme étant un indicateur fiable (c.f. tableau 10). Comme énoncé plus haut, nous recherchons un système de culture associé à des concentrations faibles et un volume d'eau drainée important. Or il s'avère que cet indicateur ne correspond pas à nos attentes. En effet, avec celui-ci, plus le volume est important, plus la quantité est importante et moins le système de culture est intéressant.

Nous avons donc considéré le rapport  $\frac{C}{V}$  où  $C$  représente la concentration en nitrates et  $V$  le volume d'eau drainée. Nous cherchons donc le système de culture à même de minimiser ce rapport. Sur le tableau 11, nous pouvons observer ce rapport pour les différents groupes.

## Classement des systèmes de culture

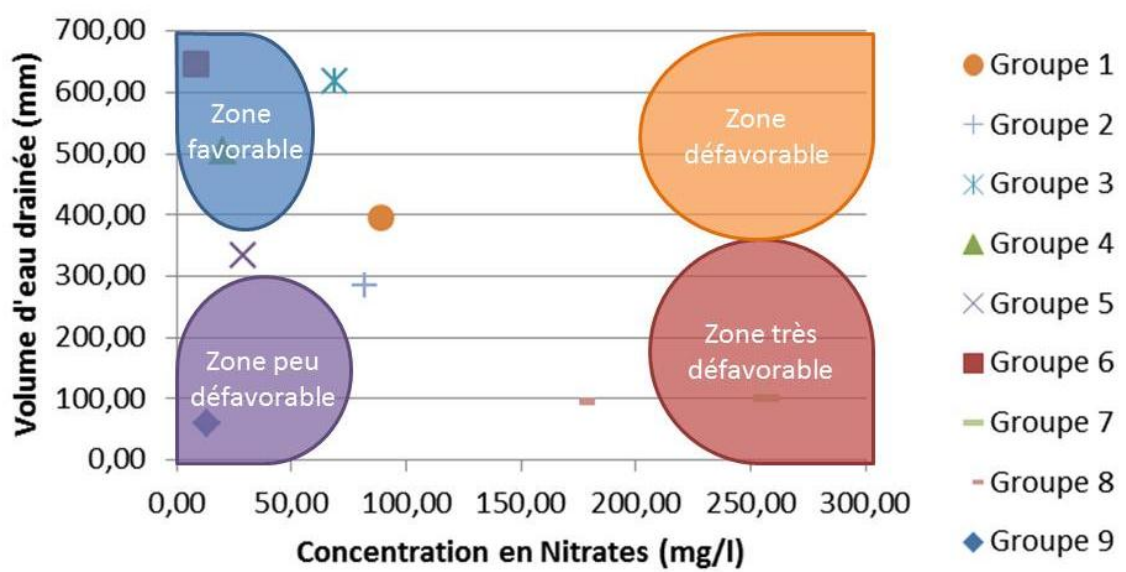


Figure 15 : Classement des systèmes de culture

Le groupe le plus avantageux selon ce classement est le groupe 6 composé du système de culture prairie temporaire. A son opposé on retrouve les groupes 7 et 8 composés de systèmes de culture mettant en place du maïs (Maïs ensilage pour le groupe 7 et maïs grain pour le groupe 8). Il est à noter qu'un troisième groupe contenant le système de culture maïs grain est présent en bonne position selon ce critère, il s'agit du groupe 4.

Les différences entre ces groupes peuvent être reliées à un écart de fertilisation. En effet, le groupe 4 reçoit environ 87 kilogrammes d'azote minéral par hectare alors que le groupe 8 reçoit environ 159 kilogrammes d'azote minéral par hectare et le groupe 7 reçoit environ 292 kilogrammes d'azote minéral par hectare.

Afin de compléter cette analyse nous avons utilisé la représentation de la figure 8 afin de différencier certains systèmes de culture aux rapports  $\frac{C}{V}$  proches. La figure 15 illustre ceci. On y remarque que le groupe le mieux placé est le groupe 6 correspondant aux prairies temporaires et que le groupe 7 est le groupe le plus mal placé. On peut également noter les différences existantes entre les groupes 1 et 9 qui ont un rapport  $\frac{C}{V}$  identique mais un placement différent qui nous indique que le groupe 9 est à privilégier par rapport au groupe 1.

Nous avons également testé le lien entre la composition du sol et les volumes d'eau drainée mais aussi le lien entre la composition du sol et les concentrations en nitrates et nous avons conclu par la négative dans les deux cas.

Nous avons ensuite essayé de mettre en évidence l'effet de la couverture du sol en hiver (couvert végétal ou culture d'hiver) sur la réduction des concentrations en hiver. Malheureusement aucun effet n'a pu être mis en évidence au vu du manque de données pour ce paramètre.

Au vu de ces résultats on peut conclure sur le fait que le paramètre culture en place est la variable première pour expliquer les concentrations en nitrates retrouvées, suivi par les niveaux de fertilisation. Le paramètre culture en place semble également la variable première pour décrire les volumes d'eau drainée.



## *L'échelle de l'exploitation agricole*

Avant de s'intéresser directement aux résultats par type d'exploitation, il paraît sage de comprendre comment leur assolement est constitué. En Annexe 10, on peut retrouver la description des différents types d'exploitation utilisés pour cette étude et nous en ferons une observation ici. Ces données proviennent du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA) et sont une image de l'agriculture professionnelle entre les années 2002 et 2009.

L'orientation numéro 1, Grandes cultures, est constituée d'exploitations de taille assez importante (103,5 hectares en moyenne) avec un assolement composé de plus de la moitié de céréales (58,8 hectares en moyenne) et d'un quart de cultures industrielles (25,1 hectares en moyenne) et de peu d'animaux (17,5 UGB<sup>4</sup> en moyenne).

L'orientation numéro 2, Maraîchage et horticulture, est constituée d'exploitations de très petite taille (6 hectares en moyenne) dont la superficie est consacrée aux légumes. Elles sont également caractérisées par une quasi-absence d'animaux (0,8 UGB en moyenne).

L'orientation numéro 3, Viticulture et fruits, est constituée d'exploitations de taille relativement petite (23,5 hectares en moyenne) qui sont consacrée en majorité à la viticulture (13,3 hectares en moyenne) et à l'arboriculture dans une moindre mesure (2,7 hectares en moyenne). Tout comme les exploitations de l'orientation numéro 2, ces exploitations ne possèdent que très peu d'animaux (1,5 UGB en moyenne).

Les exploitations de l'orientation numéro 4, Herbivores, sont de taille modeste (76,4 hectares en moyenne) avec une absence de céréales et de cultures industrielles dans leur assolement et une prépondérance d'herbe (54,1 hectares en moyenne).

Ces exploitations sont également caractérisées par la présence d'animaux dont le nombre est modeste (87,5 UGB en moyenne).

Les exploitations de l'orientation numéro 5, Granivores, sont caractérisées par leur faible surface (26,3 hectares en moyenne) et par leur important nombre d'animaux (432,9 UGB en moyenne).

---

<sup>4</sup> UGB = l'Unité Gros Bétail sert à normaliser la quantité d'animaux selon leurs catégories



<b>Orientations</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Concentration (mg/L /ha)</b>	83,91	13,26	/	48,07	16,06	37,49	69,51	76,58	88,06
<b>Volume d'eau (mm/ha)</b>	320,05	59,57	/	414,36	534,64	467,29	435,17	352,03	326,44

**Tableau 12 : Concentrations en nitrates et volume d'eau associées aux différents systèmes de production**

L'orientation numéro 6, Polyélevage à orientation herbivore, est caractérisée par des exploitations de taille modeste (75 hectares en moyenne) avec environ deux tiers de la surface en herbe (49,4 hectares en moyenne) et peu de céréales (19,7 hectares en moyenne) dont la majorité en blé tendre. Ces exploitations comprennent également des animaux en nombre assez important (164,7 UGB en moyenne).

L'orientation numéro 7, Polyélevage à orientation granivore, est caractérisée par des exploitations de taille modeste (60,6 hectares en moyenne) dont la moitié de la surface est en herbe (31,1 hectares en moyenne) et un sixième en maïs fourrager (8,8 hectares en moyenne). Ces exploitations ont pour autre caractéristique de comprendre un grand nombre d'animaux (300,7 UGB en moyenne).

Les exploitations de l'orientation numéro 8, Grandes cultures et herbivores, sont caractérisées par une taille assez importante (109,8 hectares en moyenne), surface occupée par de l'herbe (42,4 hectares en moyenne) et des céréales (40,9 hectares en moyenne) dont majoritairement du blé tendre (23,1 hectares en moyenne). Une autre caractéristique est la présence d'animaux en nombre assez modeste (86,1 UGB en moyenne).

L'orientation numéro 9, Autres associations cultures-élevage, est caractérisée par des exploitations de taille modeste (61 hectares en moyenne) dont la moitié de la surface est consacrée aux céréales (30,5 hectares en moyenne) et un sixième est réservé aux surfaces en herbe (11,9 hectares en moyenne). Ces exploitations sont également caractérisées par la présence d'animaux dont le nombre est assez important (191 UGB en moyenne).

Sur le tableau 12, on peut observer les concentrations en nitrates et les volumes d'eau associés aux différentes orientations des systèmes de production. Il faut toutefois mentionner que ces données sont élaborées sous hypothèse de pluviométrie semblable.

L'orientation numéro 3, Viticulture et fruits, nous pose problème. En effet, aucun groupe de systèmes de culture ne correspondait à l'assolement type de cette orientation.

L'orientation numéro 2, Maraîchage, est celle qui est associée à la plus faible concentration de nitrates (13,26 mg/L/ha). On peut y rapprocher l'orientation numéro 5, Granivores, qui est associée à une concentration proche (16,06 mg/L/ha).

A l'opposé, on retrouve l'orientation numéro 9, Autres associations cultures-élevage, qui est liée à la concentration la plus importante (88,06 mg/L/ha) et à laquelle on peut assortir l'orientation numéro 1, Grandes cultures (83,91 mg/L/ha).

Orientations	5	6	4	7	8	2	1	9
$\frac{C}{V}$	0,03	0,08	0,12	0,16	0,22	0,22	0,26	0,27

Tableau 13 : Hiérarchisation des systèmes de production selon le paramètre nitrate

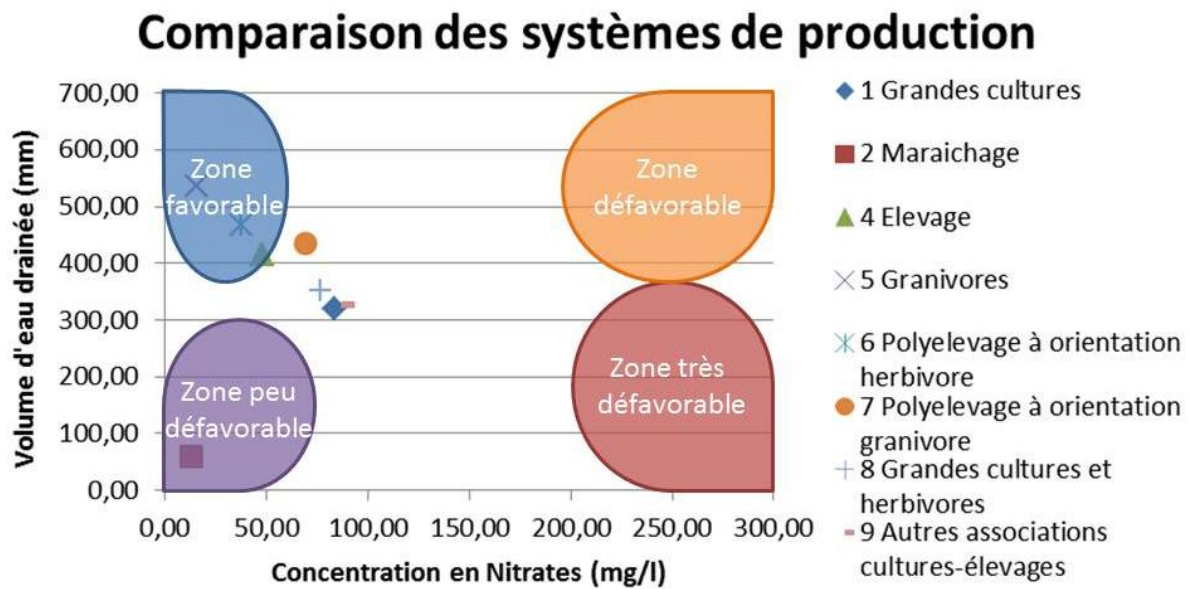


Figure 16 : Comparaison des systèmes de production

Tout comme pour les concentrations en nitrates et pour les mêmes raisons, l'orientation numéro 3, Viticulture et fruits, n'est pas associée à un volume d'eau drainée.

Le volume d'eau le plus important est à créditer à l'orientation numéro 5, Granivores (534,64 mm/ha) et le volume d'eau le plus faible est à associer à l'orientation numéro 2, Maraîchage (59,57 mm/ha) qui constitue un cas particulier.

En effet, les autres systèmes de production se situent entre 320,05 millimètres par hectare et 534,64 millimètres par hectare.

### *Hiérarchisation des systèmes de production*

Nous avons ensuite classé ces orientations de systèmes de production selon le rapport  $\frac{C}{V}$ . Les résultats sont présents sur le tableau 13. Selon ce classement c'est l'orientation numéro 5, Granivores, qui présente le meilleur rapport (0,03) alors que l'orientation numéro 9, Autres association cultures-élevage, présente le moins bon (0,27). Afin d'approfondir l'analyse nous avons établi un graphique avec la représentation associée à la figure 8 (c.f. figure 16). Globalement la hiérarchie observée en haut est respectée hormis concernant l'orientation numéro 2 correspondant au maraîchage qui est atypique.

Selon ce classement, il conviendrait de favoriser les exploitations d'élevage de granivores, correspondants à l'orientation technico-économique numéro 5. Néanmoins, nous reviendrons sur ce point dans la partie Discussions.

Au vu de ces résultats, on peut dire que les systèmes de polyculture élevage, dans une forme qui s'approche de l'orientation numéro 6, polyélevage à orientation herbivores, n'est pas le système de production le plus à même de préserver la ressource en eau mais est fait partie des deux systèmes les plus à même de préserver la ressource en eau.

Publication	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9
Latitude	49° 33' N	53° 13' N	54° 54' N	48° 18' N	55° 38' N	44° 59' N	38° 14' N	45° 04' N	38° 07' N

Tableau 14 : Latitudes correspondant aux différentes publications utilisées

## VI. Discussions

### *Domaine de validité des publications utilisées*

En étendant notre zone de recherche de publications nous avons posé un problème de représentativité. En effet, les domaines de validité de certaines études peuvent poser problème en l'état.

Par exemple, l'étendue des latitudes correspondant aux différents sites d'expérimentation est assez élevée. On y retrouve des latitudes allant de 55° 38' Nord à 38° 07' Nord comme on peut le constater sur le tableau 14.

Ceci implique quelques différences au niveau climatique pour certaines situations. De plus la France possède également des différences notables en termes de climat entre le pourtour méditerranéen au climat singulier et les façades océaniques régulées par l'océan.

### *Choix du travail par l'assolement*

Pour décrire les systèmes de production et pouvoir par la suite les relier à une pression de pollution, nous avons à notre disposition les données du RICA. Or, ces données ne comprennent pas la description des systèmes de cultures utilisés par les exploitations tels que nous les avons définis.

En fait, les données disponibles via le RICA sont des données statiques qui décrivent un assolement. Nous aurions pu à partir de celles-là poser des hypothèses afin d'établir une rotation type par orientation. Cette approche aurait permis une meilleure description des systèmes de production mais elle aurait également induit une incertitude très élevée dans les résultats obtenus.

Nous avons donc décidé de nous en tenir à l'assolement tel que décrit au travers du RICA.

<b>Orientations</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Aliments du bétail (k€)</b>	3,9	0,2	0,3	0,3	139,9	35,2	83,1	17,7	52,8

Tableau 15 : Dépenses en aliments du bétail selon les systèmes de production

### *Limites de la démarche territoriale utilisée*

Dans la hiérarchisation des systèmes de production vis-à-vis du paramètre concentrations en nitrates, les exploitations « hors-sol », c'est-à-dire correspondant à l'orientation numéro 5, Granivores, sont placées en très bonne position. Or, ceci nous pose problème car ce sont des exploitations dont le cheptel est très important et concentré sur de faibles surfaces. Ces exploitations sont donc consommatrices d'une part d'aliments du bétail (c.f. tableau 15) et productrices d'autre part de fertilisants organiques.

La démarche utilisée montre ici une limite dans le sens où elle ne prend en compte que l'occupation du sol et non pas les flux d'azote.

Pour être complet, il aurait fallu tenir compte, pour les systèmes de production élevant des animaux, des surfaces extérieures à l'exploitation mais qui contribuent à l'alimentation du cheptel.

### *Limites de la classification en OTEX*

La classification des exploitations agricoles selon leurs orientations technico-économiques masque d'une certaine manière les disparités existantes au sein des systèmes de production. En effet, la classification selon les OTEX est basée sur la notion de valeur ajoutée et de la contribution des différentes productions à la valeur ajoutée créée par l'exploitation.

La première cause de disparité « intra OTEX » provient des différentes tailles d'exploitations aussi bien économiques que « territoriales ». En effet, cette classification regroupe des exploitations de grande taille et de poids économique important avec d'autres exploitations beaucoup plus modestes.

De plus, regroupées dans la même OTEX on peut également trouver des exploitations ayant des modes de conduite différents, comme par exemple le degré d'intensification du pâturage.



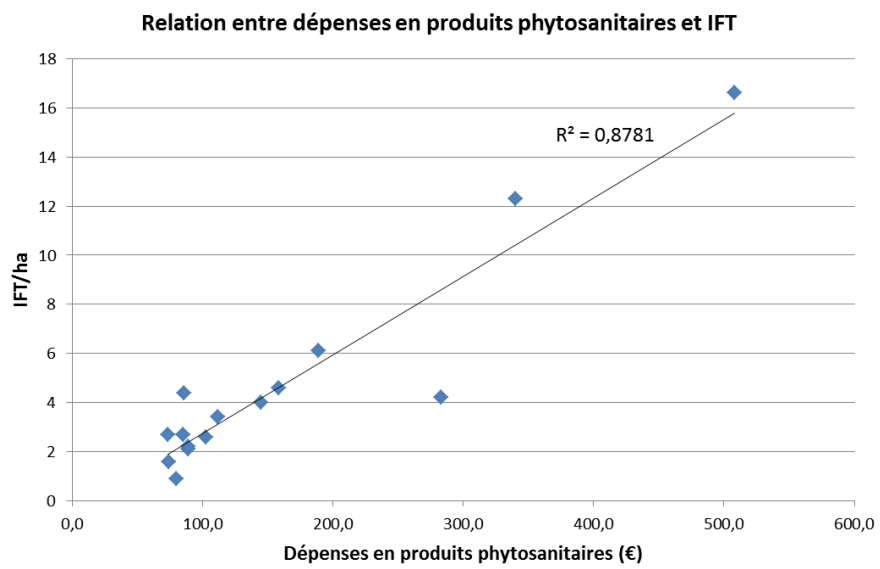


Figure 17 : Relation entre dépenses en produits phytosanitaires et IFT

## *Forêt et eau*

Notre démarche prend fin à l'échelle d'une exploitation agricole. Or l'activité agricole ne constitue pas l'unique occupation du sol dans un territoire. C'est pourquoi intégrer l'ensemble des systèmes de production agricole et les autres occupations du sol (forêt et zones urbanisées notamment) semble un axe de recherche intéressant.

En effet, le couvert forestier semble être associé à de faibles teneurs en nitrates. Benoît et Fizaine (*Benoît et Fizaine, 1999*) ont étudié le lien entre couverture forestière, conduite forestière et quantité de nitrates sur des bassins hydrographiques composés par des forêts uniquement. Selon eux, « sous les couverts forestiers, en période de croissance hors exploitation » les teneurs en nitrates avoisinent les 4,2 milligrammes de nitrates par litre. De plus, la nature du couvert (résineux ou feuillus) ne semble pas apporter de variations. Le seul point négatif relevé est la dégradation possible des teneurs en nitrates lors des exploitations de type « coupe à blanc ».

## *Produits phytosanitaires*

Le paramètre produits phytosanitaires nous a posé des problèmes. En effet comme mentionné plus en amont, nous n'avons pas trouvé suffisamment d'informations pour relier une concentration en produits phytosanitaires à un système de culture.

Nous avons donc choisi de mettre au point un indicateur à partir des dépenses en produits phytosanitaires par culture. Avec à notre disposition un fichier regroupant les dépenses en produits phytosanitaires pour chaque culture à l'échelle de grandes régions (*J.P. Butault, Communication personnelle*), nous avons agrégé ces données en deux indicateurs :

- Dépenses en produits phytosanitaires sur céréales en euro par hectare
- Dépenses en produits phytosanitaires sur cultures industrielles en euro par hectare

L'indicateur dépenses en produits phytosanitaires a été préféré à l'indicateur IFT plus commun car il permet une agrégation et une interprétation plus aisée que pour l'IFT. De plus le lien entre les deux indicateurs est assez fort (c.f. figure 17).

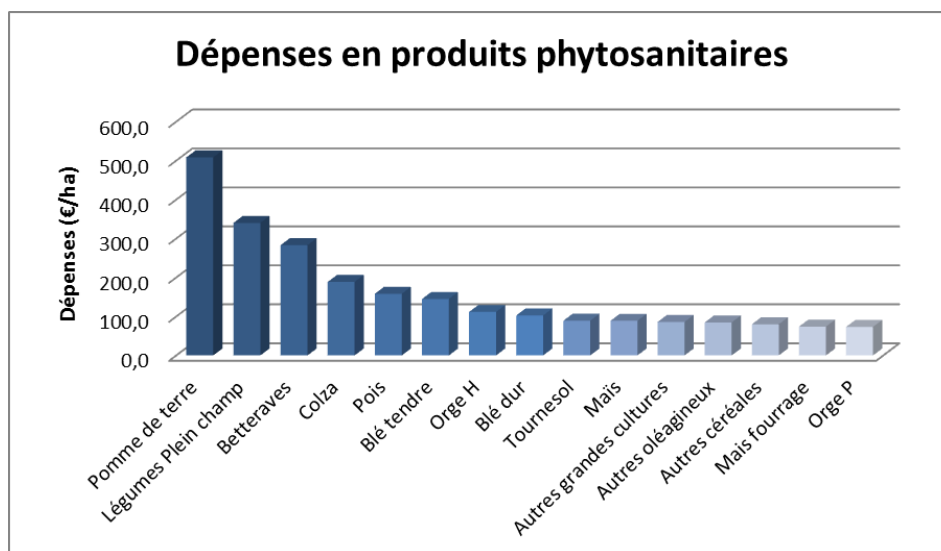


Figure 18 : Dépenses en produits phytosanitaires selon le type de culture

Orientations	4	3	6	7	8	5	9	2	1
Dépenses en produits phytosanitaires (€/ha)	16,22	52,74	53,93	53,95	78,44	83,60	95,30	129,91	137,47

Tableau 16 : Hiérarchisation des systèmes de production selon le paramètre produits phytosanitaires

Bien que le lien entre l'Indice de Fréquence et de Traitement (IFT) et les dépenses en produits phytosanitaires soit probant, aucun de ces deux indicateurs ne peut réellement se substituer à un risque de pollution (*Ouvrard, 2009 ; Pingault, 2007*).

En effet, chaque matière active et chaque préparation possède des caractéristiques chimiques intrinsèques différentes qui ont pour conséquence des proportions de rétention et des temps de dégradation différents. De plus, pour être totalement complet, il faudrait tenir compte des modes d'applications et des circonstances climatiques telles que le vent ou l'humidité de l'air et du sol.

Une première description de ces données (c.f. figure 18) nous permet de discerner les cultures faisant l'objet des dépenses les plus importantes. On y retrouve la pomme de terre et les légumes en plein champ ce qui laisse présager un impact négatif des exploitations maraîchères.

En s'intéressant aux dépenses en produits phytosanitaires (Figures 1 & 2 en annexe 11), on peut observer à l'échelle nationale une certaine disparité géographique. En effet, plus particulièrement pour les céréales, la pression en produits phytosanitaire est concentrée sur les régions du Nord de la France. Ceci peut être expliqué d'un point de vue climatologique. Du fait d'un climat plus favorable au développement des pathogènes et adventices en termes de répartition des précipitations et de températures, les cultures sont plus traitées dans les régions du Nord de la France.

Les cultures industrielles sont marquées par de plus fortes dépenses et une disparité géographique plus marquée.

Les céréales représentent également une part plus importante des surfaces dans les régions du Nord de la France (Figures 3 & 4 en annexe 11). Ceci peut expliquer une plus forte concentration en pathogènes et adventices au vu d'une proportion d'habitats plus favorables.



Cette correspondance n'est pas présente avec les cultures industrielles. En effet, si l'on observe les figures en annexe on peut remarquer que les régions de l'Ouest de la France ont des dépenses assez élevées en produits phytosanitaires mais n'ont pas une proportion élevée de surfaces en cultures industrielles. Il en va de même pour les régions du Nord de la France qui présentent des dépenses relativement modestes et ont une proportion de surfaces en cultures industrielles plutôt importante.

### *Démarche déconvolutive*

Afin de s'assurer de la validité de notre approche, nous pourrions procéder à une démarche qui s'oppose à celle décrite dans ce document. En effet, à partir d'analyse d'eau brute destinée à la production d'eau potable, nous aurions pu étudier le territoire du bassin versant correspondant aux analyses. En opérant un tel recoupement, nous arriverions à associer à chaque occupation du sol une quantité de pollution.

A partir de tels résultats la confrontation entre les deux méthodes permettait d'une part de s'assurer du bien-fondé du cheminement utilisé et d'autre part de s'affranchir des délais existants entre l'application des produits et leur manifestation dans les eaux souterraines.

### *Perspectives*

Il pourrait être intéressant également de poursuivre cette réflexion en se posant d'autres questions dont notamment des scénarios de rupture dans l'utilisation de la fertilisation azotée à l'image de ce qui a été réalisé dans l'étude Ecophyto R&D (*Butault et al, 2009*) où les auteurs ont essayé de prévoir les conditions de réduction de l'emploi de produits phytosanitaires. En tenant compte de divers indicateurs économiques et de rendements, ils ont étudié divers niveaux de rupture puis leur combinaison pour atteindre une « optimisation » des volumes de produits phytosanitaires utilisés.

Dans le même esprit, on pourrait imaginer déterminer quelle combinaison d'orientations techniques offrirait la meilleure qualité d'eau tout en maintenant un niveau de revenu global stable ou encore quelle combinaison de systèmes de culture pourrait offrir des systèmes de production compatibles avec une alimentation en eau potable en vue d'intégrer de telles considérations dans les politiques agricoles futures.



## Conclusion

Lors de cette étude nous avons cherché à caractériser des systèmes de production agricole en fonction de deux paramètres les concentrations en nitrates et les concentrations en produits phytosanitaires dans les eaux de drainage.

Bien que la littérature comprenne des articles traitant de la qualité des eaux ou des effets de diverses techniques agronomiques sur des concentrations en éléments nutritifs, il s'est avéré que l'accès à l'information n'était pas aisé. C'est pourquoi notre champ géographique a été élargi et que le paramètre concernant les produits phytosanitaires n'a pas été abordé comme il aurait fallu le faire.

Le lien entre les concentrations en nitrates et les systèmes de cultures, reflète de l'occupation du sol des systèmes de production agricole, nous a permis de classer ces systèmes de culture. Il en est ressorti que les prairies temporaires offraient de bonnes garanties pour la production d'eau potable alors que les systèmes de culture intégrant des cultures de maïs présentaient de sérieux doutes quant à leur compatibilité avec la production d'eau potable.

Assemblés, ces systèmes de culture, donnent lieu à une image des systèmes de production. En étudiant les concentrations en nitrates à cette échelle, nous avons pu conclure que les systèmes d'élevage de granivores offraient un faible impact sur la qualité de l'eau et qu'au contraire les systèmes de grandes cultures et de maraichage sont les plus susceptibles d'avoir un impact négatif sur la ressource en eau.

Ces constatations doivent être nuancées par le fait que les systèmes d'élevage de granivores font appel à des ressources extérieures en quantités importantes pour l'alimentation de leurs cheptels. Compte tenu des résultats et de leurs limites, on peut dire que les systèmes de production en polyculture élevage basé sur des surfaces en herbe font partie des systèmes les plus à même de protéger la ressource en eau, avec les systèmes d'élevage hors-sol.

Il existe de nombreuses pistes pour prolonger cette étude dont notamment le changement d'échelle jusqu'au territoire, l'intégration du paramètre phytosanitaire ou encore un volet économique qui pourraient permettre de mieux rendre compte des mécanismes en jeu et entrevoir des pistes d'action avec l'avènement de politiques agricoles ayant le parti pris de la préservation de la ressource en eau.





## Bibliographie

http1 : Eaufrance, [http://www.eaufrance.fr/spip.php?rubrique12&id\\_article=12](http://www.eaufrance.fr/spip.php?rubrique12&id_article=12), consulté le 13/04/2011

http2 : <http://www.agro-systemes.com/engrais-organiques.php>, consulté le 17/08/2011

Acutis M., Ducco G. et Grignani C., 2000, Stochastic use of the LEACHN model to forecast nitrate leaching in different maize cropping systems, *European Journal of Agronomy*, n° 13, pp.191 – 206

Agence de l'eau Adour-Garonne, 2005, *L'état des ressources en eau du Bassin Adour-Garonne*, 134p. (Disponible le 29/04/2011 via <http://www.eau-adour-garonne.fr/page.asp?page=1171>)

Agence de l'eau Artois-Picardie, 2005, *Etat des lieux des districts hydrographiques*, 217p. (Disponible le 29/04/2011 via <http://www.eau-artois-picardie.fr/-Etat-des-lieux,482-.html>)

Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2004, *Etat des lieux du Bassin Loire-Bretagne*, 245p. (Disponible le 29/04/2011 via [http://www.eau-loire-bretagne.fr/sdage\\_et\\_sage/etat\\_des\\_lieux/document\\_etat\\_des\\_lieux](http://www.eau-loire-bretagne.fr/sdage_et_sage/etat_des_lieux/document_etat_des_lieux))

Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2005, *Eléments de diagnostic de la partie française du district Meuse et Sambre*, 245p. (Disponible le 29/04/2011 via [http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/dce/site/documents\\_etat\\_international.php](http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/dce/site/documents_etat_international.php))

Agence de l'eau Seine-Normandie, 2007, *Document d'accompagnement n° 1.1 du SDAGE Bassin Seine et cours d'eau côtiers normands Résumé de l'état des lieux*, 25p. (Disponible le 29/04/2011 via <http://www.eau-seine-normandie.fr/index.php?id=6207>)

Agreste, 2011, L'utilisation du territoire en 2010, Les paysages agricoles dominant toujours le territoire français, *Agreste Primeur*, n°260, avril 2011 4p. (Disponible le 30/08/2011 via [http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf\\_primeur260.pdf](http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_primeur260.pdf))

Beaudoin N., Saad J.K., Van Laethem C., Machet J.M., Maucorps J. et Mary B., 2005, Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 111 pp. 292–310

Benoît M., Fizaine G., 1999, Qualité des eaux en bassins forestiers d'alimentation, *Revue forestière française*, n°2 1999, pp. 162-172

Butault et al, 2009, Ecophyto R&D vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires, Volet 1, Tome VI

Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques, 2010, *L'environnement en France*, Chapitre L'eau, 8 p.

Comité de Bassin Rhône-Méditerranée, 2005, *Etat des lieux du Bassin du Rhône et des cours d'eau côtiers méditerranéens*, 330p. (Disponible le 29/04/2011 via <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion/dce/etat-des-lieux.php>)

Commissions internationales pour la protection de la Moselle et de la Sarre, 2005, *Secteur de travail international « Moselle-Sarre »*, *Etat des lieux*, 174p. (Disponible le 29/04/2011 via [http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/dce/site/documents\\_etat\\_international.php](http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/dce/site/documents_etat_international.php))

Direction générale de la santé/Bureau de la qualité des eaux, 2008, *Bilan de la qualité de l'eau au robinet du consommateur vis-à-vis des pesticides en 2008*, 6p.

Directive 76/160/CEE du Conseil, du 8 décembre 1975, concernant la qualité des eaux de baignade (Disponible le 23/08/2011 via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31976L0160:FR:NOT>)

Directive 91/676/CEE du Conseil du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles (Disponible le 23/08/2011 via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31991L0676:FR:NOT>)

Directive 98/83/CE du Conseil, du 3 novembre 1998, relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (Disponible le 23/08/2011 via [http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi%21celexplus%21prod%21DocNumber&lg=fr&type\\_doc=Directive&an\\_doc=1998&nu\\_doc=83](http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi%21celexplus%21prod%21DocNumber&lg=fr&type_doc=Directive&an_doc=1998&nu_doc=83))

Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (Disponible le 23/08/2011 via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:FR:NOT>)

Dupraz P., 1998, Intensification et spécialisation des exploitations agricoles : apports et limites de la théorie des marchés contestables, *Etudes & Recherches sur les systèmes agraires et le développement*, n° 31, pp. 357-369

Dupraz P., Vermesch D., 1997, La spécialisation et la concentration des exploitations agricoles peuvent-elles être remises en cause ?, *INRA Sciences sociales*, N°2 – Avril 1997, 4 p.

Evanylo G., Sherony C., Spargo J., Starner D., Brosius M. et Haering K., 2008, Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 127, pp.50–58

Fuller K.D., Gordon R., Grimmett M., Fillmore S., Madani A., Van Roestel J., Stratton G.W., MacLeod J., Embree C. et St. George E., 2010, Seasonal and crop rotational effects of manure management on nitrate–nitrogen leaching in Nova Scotia, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 137, pp.267–275

Johnson P.A., Shepherd M.A., Hatley D.J. et Smith P.N., 2002, Nitrate leaching from a shallow limestone soil growing a five course combinable crop rotation: the effects of crop husbandry and nitrogen fertilizer rate on losses from the second complete rotation, *Soil Use and Management*, n°18, pp. 68-76

Molénat J., 2008, Hydrologie et transfert de substances dissoutes dans les aquifères superficiels, Mémoire présenté pour obtenir l'habilitation à diriger des Recherches, Université de Rennes 1, 86 p.

Ouvrard N., 2009, L'emploi des produits phytosanitaires demeure stable, *Réussir Grandes Cultures*, n° 225, p18 (Disponible le 18/08/2011 via <http://www.reussir-grandes-cultures.com/actualites/environnement-ecophyto-2018-pesticides-l-emploi-des-produits-phytosanitaires-demeure-stable&fldSearch=:4IL12UWC.html>)

Pervanchon F., Bockstaller C., Amiaud B., Peigné J., Bernard P.Y., Vertès F., Fiorelli J.L. et Plantureux S., 2005, A novel indicator of environmental risks due to nitrogen management on grasslands, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 105, pp. 1–16

Pingault N., 2007, Améliorer la qualité de l'eau : Un indicateur pour favoriser une utilisation durable des produits phytosanitaires, *Atelier OCDE, 19-21 Mars 2007, Washington* (Disponible le 18/08/2011 via [http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/IFT\\_fr2.pdf](http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/IFT_fr2.pdf))

Préfet coordonnateur de Bassin Rhin-Meuse, 2005, *District hydrographique international Rhin, Secteur de travail international du Rhin Supérieur, Rapport de l'état des lieux*, 114p. (Disponible le 29/04/2011 via [http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/dce/site/documents\\_etat\\_international.php](http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/dce/site/documents_etat_international.php))

Simmelsgaard S.E. et Djurhuus J., 1998, An empirical model for estimating nitrate leaching as affected by crop type and the long-term N fertilizer rate, *Soil Use and Management*, n° 14, pp. 37-43

Simmelsgaard S.E., 1998, The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil, *Soil Use and Management*, n° 14, pp.30-36

Stoddard C.S., Grove J.H., Coyne M.S. et Thom W.O., 2005, Fertilizer, tillage, and dairy manure contributions to nitrate and herbicide leaching, *Journal of Environmental Quality*, vol. 34, pp. 1354-1362

# Annexes

# Annexe 1

## Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales (BCAE)

La conditionnalité est un principe récent dans la construction de la Politique Agricole Commune (PAC) puisqu'il date de 2005. En effet, avec la mise en place du découplage des soutiens financiers de l'acte de production, la conditionnalité « garantit une agriculture plus durable et favorise ainsi une meilleure acceptation de la politique agricole commune par l'ensemble des citoyens » (*Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Pêche, http1*). Au sein de cette conditionnalité, on retrouve, entre autres, l'exigence des Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales (BCAE).

Cette partie a pour but de mettre en évidence les relations entre d'une part ces exigences et d'autre part leurs effets sur la qualité de l'eau.

Les Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales sont réputées atteintes lorsque l'agriculteur a satisfait sept contraintes. Il s'agit :

- De la mise en place d'une bande enherbée de largeur minimum de 5 mètres autour des cours d'eau
- De l'interdiction du brûlage des pailles et des résidus de culture (exceptées les pailles de riz)
- De l'obligation de présenter une diversité culturale minimum sur son assolement
- De l'obligation pour les agriculteurs irrigants de posséder les autorisations ou récépissés de déclaration de prélèvement d'eau et de mettre en place sur leurs points de prélèvement des moyens de mesures ou d'évaluation des prélèvements
- De la mise en place de modalités pour l'entretien minimum des surfaces
- De l'obligation de maintenir une partie de sa surface en « particularités topographiques »
- De fixer des règles concernant l'affectation de surfaces aux pâturages permanents, c'est-à-dire le maintien d'un ratio de pâturages permanents.

Celles-ci sont également présentées un peu plus en détail ainsi que leurs évolutions dans le tableau 1.

Bien que les objectifs des Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales ne comprennent pas la protection de la ressource en eau, la mise en place de bandes tampons le long des cours d'eau participe à la rétention des polluants. Cependant, diverses études ont été menées concernant l'efficacité de rétention de ces bandes tampons. On peut citer ici *Patty et al. 1997*, qui ont travaillé sur l'efficacité de rétention des bandes enherbées par rapport aux produits phytosanitaires, aux nitrates et au phosphore dissous. Leurs résultats sont assez hétérogènes puisqu'ils observent pour les nitrates une rétention de 47 à 86 % pour une largeur de bande tampon de 6 mètres et une rétention de 69 à 97 % pour une largeur doublée à 12 mètres. Les résultats concernant les produits phytosanitaires s'échelonnent de 44 à 97 % pour une largeur de 6 mètres et de 67 à 100 % pour une largeur de 12 mètres.



Au vu de ces résultats, on peut se poser la question du choix de la largeur des bandes enherbées mises en place par la conditionnalité qui est de 5 mètres. En fonction de leur situation et de la topographie alentour, il est possible qu'une partie de ces dispositifs ne soient pas efficaces.

Les autres mesures constituant les Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales apparaissent actuellement très peu étudiées du point de vue de leur efficacité par rapport à la ressource en eau.

Tableau 1 : Récapitulatif de l'évolution des Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales

	D 615-46	D 615-47	D 615-48	D 615-49	D 615-50	D 615-50-1	D 615-51
<b>Code Rural au 27/11/2005</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface en couvert environnemental = 3% de la surface aidée</li> <li>• En priorité en bord de cours d'eau</li> <li>• Pas d'obligation en cas de cultures industrielle sur gel</li> </ul>	Brulage des pailles et des résidus de cultures interdits	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diversité de cultures sauf pour cultures pérennes, PP<sup>5</sup>, gel non cultivé, ou monoculture de PT<sup>6</sup></li> <li>• Si Monoculture → Couverture hivernale du sol ou gestion résidus de culture</li> </ul>	Si aide pour surface irriguée en COP <sup>7</sup> , → Obligation de fournir les autorisations ou récépissés de déclaration de prélèvement et de mettre en place des moyens de mesures ou d'évaluation des quantités	Modalités d'entretien minimal des terres via arrêté préfectoral  PP <sup>6</sup> , PT <sup>7</sup> ou estive : - Chargement minimal - Obligation de pâture - Obligation de fauche + preuve de vente	---	Obligation de suivre les règles d'affectation de surfaces aux pâturages permanents fixées par arrêté
<b>Code Rural au 02/08/2006</b>	Instauration d'un seuil de 92 tonnes de céréales	---	Augmentation des surfaces non concernées	---	Obligation de fauche assujettie à une preuve d'exportation Obligations concernant les terres en gel	---	---
<b>Code Rural au 02/12/2007</b>	---	---	---	---	Obligations concernant les oliveraies	---	---
<b>Arrêté du 22/05/2008</b>	Largeur > 5mètres Surface > 5ares	---	---	---	---	---	---
<b>Code Rural au 16/11/2008</b>	---	---	---	---	---	---	---

<sup>5</sup> Prairies Permanentes

<sup>6</sup> Prairies Temporaires

<sup>7</sup> Céréales Oléagineux Protéagineux

	D 615-46	D 615-47	D 615-48	D 615-49	D 615-50	D 615-50-1	D 615-51
<b>Arrêté du 30/04/2009</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface en couvert environnemental = 3/97 de la SAU sauf surface en herbe</li> <li>• Couvert implanté du 1<sup>er</sup> Mai au 31 Août</li> <li>• Largeur &gt; 5mètres Surface &gt; 5ares</li> <li>• Cours d'eau = traits bleus pleins + traits bleus pointillés nommés</li> </ul>	---	Diversité de cultures : <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 cultures avec au moins 5% de la sole chacune</li> <li>- 2 cultures si 10% et plus de la sole est en PT<sup>7</sup> ou légumineuses</li> </ul>	Extension des surfaces concernées à certains vergers, aux cultures fourragères, PT <sup>7</sup> , PP <sup>6</sup> et cultures non alimentaires	Règles présentes en Annexe II	---	---
<b>Code Rural au 04/05/2009</b>	Plus de seuil minimum Plus de dérogation pour cultures industrielles	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obligation de diversité sauf pour PT<sup>7</sup>, PP<sup>6</sup> et cultures pérennes de plus de cinq ans, surfaces boisées et cultures non alimentaires</li> <li>• Si Monoculture → Couverture hivernale du sol ou gestion résidus de culture</li> </ul>	Surfaces concernées : cultures annuelles, pluriannuelles ou pérennes irriguées	---	---	---

	D 615-46	D 615-47	D 615-48	D 615-49	D 615-50	D 615-50-1	D 615-51
<b>Arrêté du 13/07/2010</b>	---	---	---	Surface concernée = toute surface irriguée	Règles présentes en Annexe II	SET <sup>8</sup> > 1% en 2010	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintien des PT<sup>7</sup> à 50% de la surface de référence et 100% des PP<sup>6</sup></li> <li>• Productivité minimum</li> <li>• Diverses dérogations</li> </ul>
<b>Code Rural au 18/07/2010</b>	Plus de Surface min mais largeur > 5m	---	---	---	Conditions d'entretien selon le règlement (CE) n°73/2009	Maintien de particularités topographiques sauf si SAU <sup>9</sup> < 15ha	Maintien d'une surface de référence en PP <sup>6</sup> +PT <sup>7</sup> (calculée sur la base de 2001)

---

<sup>8</sup> Surface Equivalente Topographique

<sup>9</sup> Surface Agricole Utile

## Bibliographie

http1 : Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire, <http://agriculture.gouv.fr/la-conditionnalite>, consulté le 08/04/2011.

Patty L., Réal B., Gril J.J., 1997, The use of grassed buffer strips to remove pesticides, nitrate and soluble phosphorus compounds from runoff water, *Pesticide Science*, n°49, pp. 243-251

## Annexe 2

### Mesures agro-environnementales

Les mesures agro environnementales (ou MAE) sont des mesures émanant de la Politique Agricole Commune (PAC) visant à « encourager les agriculteurs à protéger et à valoriser l'environnement en les rémunérant pour la prestation de services environnementaux » (*Commission Européenne, http1*).

Pour une durée de cinq ans, les agriculteurs s'engagent à respecter un certain nombre de contraintes influençant leurs pratiques et perçoivent par la suite une compensation des coûts supplémentaires engendrés par ces pratiques.

En termes d'économie, il s'agit par ces mesures d'internaliser des effets externes positifs générés par des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement. On peut l'assimiler à une rémunération pour la fourniture de biens publics tels que le paysage ou la bonne qualité de l'eau.

Dans la suite, on se focalisera sur certaines MAE qui ont un impact sur la réduction des pollutions diffuses d'origine agricole, c'est-à-dire :

- La MAE Conversion à l'agriculture biologique (BIOCONVE)
- La MAE Maintien de l'agriculture biologique (BIOMAIN)
- La MAE Implantation de cultures intermédiaires (COUVER01)
- La MAE Création et entretien d'un couvert herbacé (COUVER06)

Ces mesures agroenvironnementales possèdent quelques travers. En effet, il est important de noter que les exploitations qui souscrivent les mesures les plus « environnementales » sont celles qui possèdent les pratiques agricoles les plus proches des pratiques demandées. Ceci a pour effet un changement relatif puisque les pratiques les plus dommageables pour l'environnement ne sont pas modifiées et ce sont uniquement les pratiques les plus respectueuses qui sont légèrement modifiées (*Chabé-Ferret et Subervie, 2011 ; Aubertot et al, 2005*).

De plus, elles ne possèdent pas la même efficacité intrinsèque et le même taux de contractualisation. Si les MAE concernant l'agriculture biologique ont globalement un impact positif sur les paramètres nitrates et pesticides et ont permis une reprise des conversions, les améliorations ne se font pas beaucoup sentir à l'échelle d'un bassin versant au vu des surfaces en agriculture biologique et leur dissémination. A contrario, la mesure de création et entretien d'un couvert herbacé a un effet démontré sur les taux de nitrates mais aucun effet sur le paramètre pesticide n'a été mis en évidence. L'impact de la MAE implantation de cultures intermédiaires est indéniable sur le paramètre Nitrates et au vu de la compensation apportée a connu un succès relatif, ce qui permet de prévoir une certaine amélioration de la qualité des eaux souterraines.

## Bibliographie

http1 : Commission européenne,

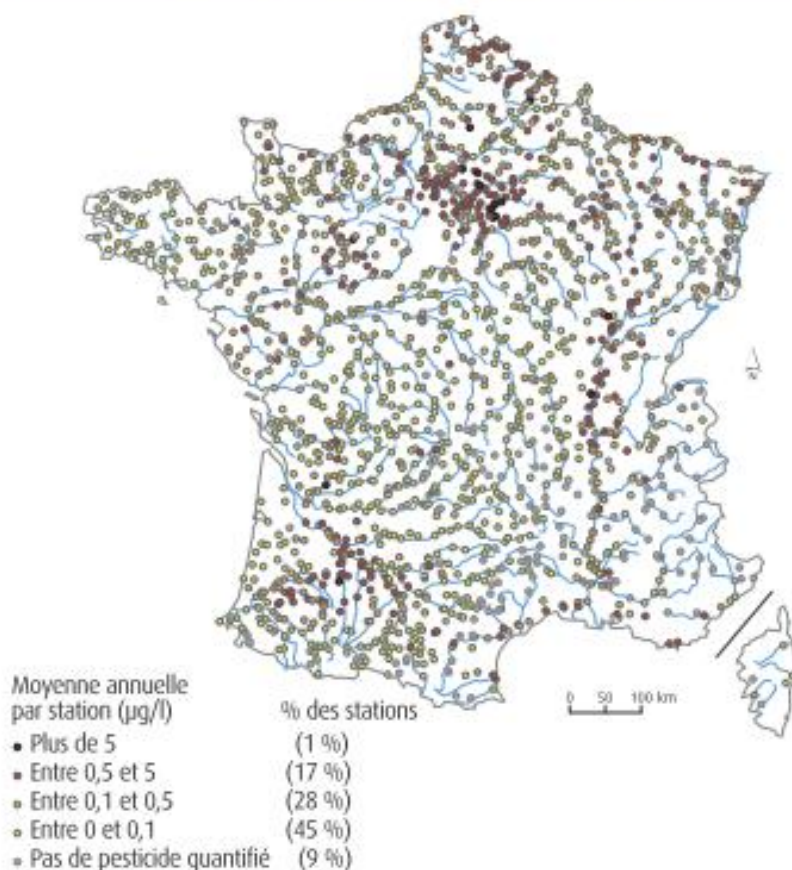
[http://ec.europa.eu/agriculture/envir/measures/index\\_fr.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/envir/measures/index_fr.htm), consulté le 27/04/2011

Chabé-Ferret et Subervie, 2011, *Estimations des effets propres des MAE sur les pratiques des agriculteurs*, CEMAGREF, 6p.

Aubertot J.N., J.M. Barbier, A. Carpentier, J.J. Gril, L. Guichard, P. Lucas, S. Savary, I. Savini, M. Voltz (éditeurs), 2005. *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et Cemagref (France), 64 p.

## Annexe 3 : Concentrations en pesticides dans les cours d'eau

### Moyenne annuelle 2007 des concentrations en « pesticides totaux » à la station dans les cours d'eau



*Note :* Moyennes établies à l'aide des stations des programmes de surveillance DCE et réseaux complémentaires (1 787 stations). Le paramètre « pesticides totaux » est calculé comme la somme des analyses quantifiées, les non quantifiées étant considérées comme nulles. Seules les stations présentant plus de quatre analyses dans l'année avec un suivi stable sur les pesticides classés comme prioritaires et dangereux au titre des annexes IX et X de la DCE ont été conservées. Le suivi en pesticides est malgré tout différent d'une station à une autre, les limites de quantification peuvent également varier selon la station et la substance recherchée.

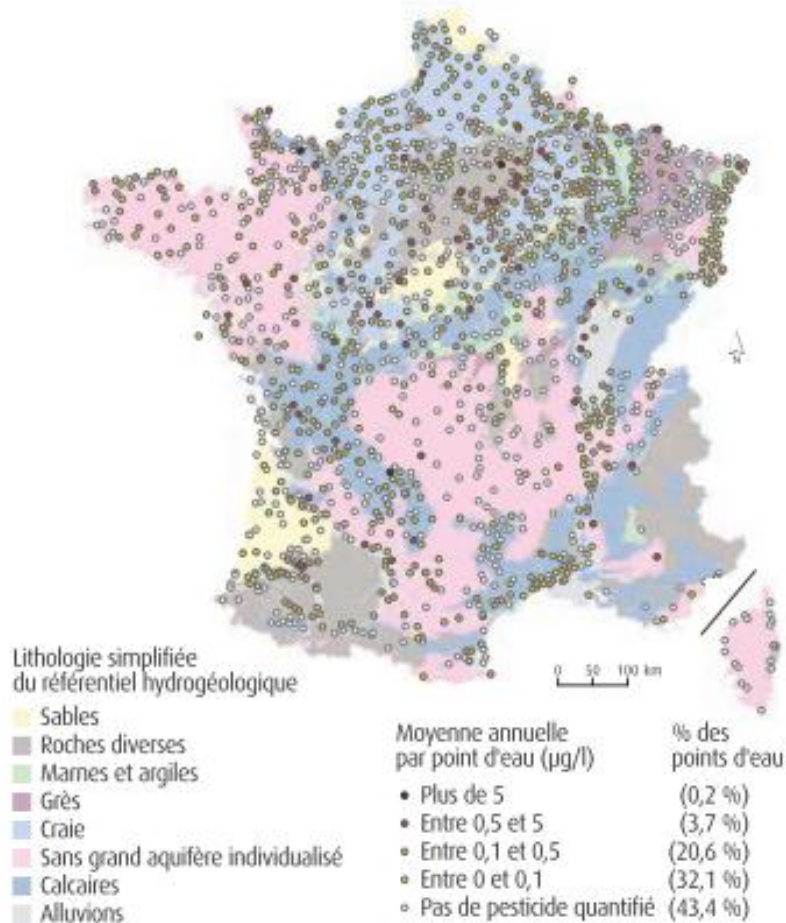
Source : Agences de l'Eau, 2007 - MEEDDM, BD Carthage, 2008. Traitements : SOeS, 2009.

D'après Commissariat général au développement durable, 2010



## Annexe 4 : Concentrations en pesticides dans les eaux souterraines

### Moyenne annuelle 2007 des concentrations en « pesticides totaux » au point d'eau dans les eaux souterraines



Note : Moyennes établies à l'aide des données du réseau RCS (1 534 points d'eau), extraites de la banque de données Ades du BRGM. Le paramètre « pesticides totaux » correspond à la somme des substances pesticides quantifiées, au cours d'un même prélèvement, sur une station. Limite de la méthode : la fréquence d'analyses des eaux souterraines est faible : deux par an dans la majorité des cas (entre 1 et 10 analyses). Pour certaines stations, la moyenne annuelle correspond donc à une seule analyse.

Source : Agences de l'Eau - BRGM, banque de données Ades, 2007, fond de carte BDRHFV1, Traitements : SOEs, 2009.

D'après Commissariat général au développement durable, 2010

## Annexe 5 : Script utilisé sous le logiciel R (version 2.12.0)

```
rm(list=ls())

#lecture du fichier
eau <- read.table("Nitrate.txt", h=T)
eau

#définition des variables en tant que facteurs
eau$Id <- as.factor(eau$Id)
eau$pre <- as.factor(eau$pre)
eau$cours <- as.factor(eau$cours)
eau$drainage <- as.factor(eau$drainage)
eau$Nitrates <- as.factor(eau$Nitrates)
eau$Ferti_min <- as.factor(eau$Ferti_min)
eau$Ferti_orga <- as.factor(eau$Ferti_orga)
eau$Paturage <- as.factor(eau$Paturage)
eau$Argile <- as.factor(eau$Argile)
eau$Sables <- as.factor(eau$Sables)
eau$mo <- as.factor(eau$mo)

# variables retenues dans l'afcm
eauafc<-
data.frame(eau$pre,eau$cours,eau$drainage,eau$Nitrates,eau$Ferti_min,eau$Ferti_orga,eau$Paturage,eau$Ar
gile,eau$Sables,eau$mo)
eauafc

#Calcul AFCM
library(ade4)

#19 axes factoriels sont retenus
z<-dudi.acm(df = eauafc, scannf = FALSE, nf = 19)

#calcul et plot des valeurs propres
round(z$eig/sum(z$eig)*100,2)
inertie<-z$eig/sum(z$eig)*100
round(inertie,2)
barplot(inertie,ylab="% d'inertie",names.arg=round(inertie,2))
title("Evolution des valeurs propres en %")

#plot plan des modalités
plot(z$co[,1],z$co[,2],type="n",xlab="Axe 1",ylab="Axe 2", xlim=c(-1.4,1.4))
text(z$co[,1], z$co[,2], label= rownames(z$co))
title("Plan des modalités")
abline(h=0,v=0)

# plan des individus
plot(z$li[,1],z$li[,2],type="n",xlab="Axe 1",ylab="Axe 2",
xlim=c(-1.4,1.4))
text(z$li[,1], z$li[,2])
title("Plan des individus")
abline(h=0,v=0)

#dendrogramme
hier<-hclust(dist(z$li), method="ward")
plot(hier,hang=-1)

# découpage en 10 classes
cl5<-cutree(hier,10)

#fusion de tableau
final<-merge(eau$Id,cl5, by= "row.names")
final
```

```

#comptage du nombre d'individu communes par classe
final$y<-as.factor(final$y)
summary(final$y)

#écriture du fichier
write.table(final,"final.txt",quote=FALSE,sep=";")

#boites à moustaches
box <- read.table("classeur1.txt",h=T)
box$y <- as.factor(box$y)

boxplot(box$drainage ~ box$y, ylab="mm",xlab="Groupes")
title("Dispersion du volume d'eau drainée")

boxplot(box$nitrate ~ box$y, ylab="[NO3] (mg/l)",xlab="Groupes")
title("Dispersion des concentrations en nitrates")

ferti <- read.table("classeur2.txt",h=T)
ferti$y <- as.factor(ferti$y)

boxplot(ferti$Ferti_min ~ ferti$y, ylab="kg N/ha",xlab="Groupes")
title("Dispersion de la qunatité d'azote minéral appliquée")

boxplot(ferti$ferti_orga ~ ferti$y, ylab="kg/ha",xlab="Groupes")
title("Dispersion de la quantité d'azote organique appliquée")

```

## Annexe 6 : Résumés des publications utilisées

1 Beaudoin N., Saad J.K., Van Laethem C., Machet J.M., Maucorps J. et Mary B., 2005, Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 111 pp. 292–310

### Résumé :

L'efficacité des « bonnes pratiques agricoles » (BPA) pour réduire la pollution par les nitrates est testée à l'échelle d'un petit bassin versant (187 ha) qui est presque entièrement sous usage agricole. Les BPA ont été introduites dans toutes les parcelles depuis 1990. Elles consistent à appliquer soigneusement des doses recommandées d'engrais azoté, d'établir les cultures intermédiaires avant toute culture de printemps et de recycler tous les résidus de récolte. L'eau du sol et de l'azote minéral ont été mesurés trois fois par an sur 36 sites représentatifs des cultures (blé, betterave à sucre, pois, l'orge, colza) et des matériaux du sol (argileux, limono-argileux et cailloux, sable argileux et calcaire, sable) pendant 8 ans (1991-1999). Ces mesures (environ 3600 échantillons de sol) ont été utilisées dans le modèle LIXIM pour calculer les flux d'azote et de d'eau en dessous de la zone d'enracinement. Le modèle peut reproduire de façon satisfaisante l'eau et le contenu en azote minéral mesuré à la fin de l'hiver. Il simulait assez bien la concentration en nitrates mesurée dans le sol (3-10 m de profondeur) des neuf champs. Les moyennes des montants calculés d'eau drainée et d'azote lessivé sous la profondeur d'enracinement ont atteint  $231 \text{ kg mm an}^{-1}$  et  $27 \text{ N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , correspondant à une concentration en nitrates de  $49 \text{ mg L}^{-1}$ . L'azote lessivé varie d'un facteur cinq, quatre et trois selon l'année, les cultures et les sols, respectivement. La concentration en nitrate a été principalement affectée par le type de sol : elle a varié de  $31 \text{ mg L}^{-1}$  dans les sols limoneux profonds à  $92 \text{ mg L}^{-1}$  dans des sols sableux superficiels, et était liée à la capacité en eau du sol. La rotation Betterave-Blé a donné la plus faible concentration ( $38 \text{ mg L}^{-1}$ ) et la rotation Pois-Blé le plus élevé ( $66 \text{ mg L}^{-1}$ ). En dépit de leur croissance modérée (biomasse moyenne =  $0,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), les cultures dérobées ont permis de réduire la concentration moyenne de 50% à l'échelle annuelle et de 23% à l'échelle de rotation. L'incorporation de paille a également été bénéfique puisque la minéralisation nette entre la récolte et la fin de l'automne a été réduite de  $24 \text{ kg N ha}^{-1}$  lorsque les résidus de paille ont été incorporés. Réduire la fertilisation en dessous du taux recommandé ne réduit pas significativement le lessivage des nitrates. Bien que les BPA n'ont pas toutes été optimales et donc moins efficace que dans des expériences bien contrôlées, elles apparaissent essentielles à l'agriculture intensive en vue de se conformer à la norme de l'UE pour la concentration en nitrates.

2 Johnson P.A., Shepherd M.A., Hatley D.J. et Smith P.N., 2002, Nitrate leaching from a shallow limestone soil growing a five course combinable crop rotation: the effects of crop husbandry and nitrogen fertilizer rate on losses from the second complete rotation, *Soil Use and Management*, n°18, pp. 68-76

#### Résumé :

L'étude a testé les effets de trois systèmes de gestion sur les pertes par lessivage des nitrates à partir d'une rotation de cinq cultures sur un sol calcaire dans l'Est du Lincolnshire en Angleterre. Le système standard est similaire aux pratiques agricoles dans la région. Le système protectif a intégré des pratiques individuelles, qui étaient censées diminuer les pertes de nitrates (Par exemple, l'introduction de cultures intermédiaires, le retard des interventions sur les cultures en automne, la manipulation des dates de semis et pendant les premières années de la première rotation l'incorporation de paille). Le système intermédiaire a été un compromis entre les deux extrêmes. Toutes les cultures ont été cultivées avec des doses correspondant à la fois à la dose recommandée et à sa moitié. Cet article rapporte les données de la deuxième rotation complète (années 6 à 10), permettant ainsi de continuer d'étudier les effets à moyen terme des pratiques agricoles.

Les moyennes annuelles des pertes par lessivage de l'azote à 49, 35 et 25 kg N ha<sup>-1</sup> pour les systèmes standard, intermédiaire et protectif, respectivement, ont été significativement différentes. Les concentrations respectives moyennes de NO<sub>3</sub> pondérées par le débit étaient 167, 131 et 96 mg l<sup>-1</sup>. Ainsi, adopter des pratiques de rétention des nitrates par la rotation a été en mesure de réduire considérablement les pertes. Le système protectif est aussi efficace que dans la première rotation complète, ce qui démontre que 10 ans de telles pratiques n'ont pas d'effets négatifs dans le moyen terme.

Cependant, les pratiques culturales simplifiées ont causé de graves problèmes de mauvaises herbes. Le coût de la lutte contre les adventices et les pertes de rendement causées par les adventices rendent la production céréalière rentable après quelques années. Ainsi, les règles pour le contrôle de la lixiviation des nitrates doivent être tempérées par des considérations pratiques et agronomiques. Aussi, peu de (si aucune) techniques de gestion testées ont offert la garantie que les pertes de nitrates seraient faibles dans toutes les conditions, parce que l'interaction avec les conditions hivernales, notamment les précipitations, a été d'une importance vitale.

3 Simmelsgaard S.E., 1998, The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil, *Soil Use and Management*, n° 14, pp.30-36

Résumé :

Des mesures de lessivage des nitrates au Danemark ont été analysées pour examiner les effets des facteurs agronomiques.

Les données sont composées de mesures hebdomadaires de drainage et de concentration en nitrates de drains dans six parcelles de 1971 à 1991, et des mesures hebdomadaires de concentration de nitrates dans l'eau du sol, extraite par des ventouses à une profondeur de 1 m, à partir de 16 champs de 1988 à 1993. La composition des sols varie des sables grossiers à la texture limon sablo-argileux.

Le modèle utilisé pour l'analyse des données a été :

$$Y = \exp(1,136 - 0,0628 \text{ argile} + 0.00565N + \text{culture})D^{0.416},$$

avec  $R^2 = 0,54$ , où Y est le lessivage des nitrates (kg N / ha par an), *argile* est le pourcentage d'argile dans l'horizon 0-25 cm de profondeur (%), N est la moyenne de la fertilisation azotée dans la rotation (kg/ha/an) et D est le volume d'eau drainée (mm/an). Le facteur le plus important influençant le lessivage a été le type de culture. L'association d'herbe sous couvert d'une culture d'orge a montré un faible taux de lixiviation (17-24 kg/ha/an). Les céréales d'hiver après une culture d'herbe, les betteraves, les céréales d'hiver suivant des céréales et une culture intermédiaire semée en automne après des céréales ont montré des taux de lessivage des moyennes (36-46 kg/ha/an). Les taux élevés de lixiviation ont été estimés à partir de céréales d'hiver suivant le colza ou les pois, un sol nu suivant des céréales et des applications de fumier en automne sur un sol nu (71-78 kg/ha/an). Les estimations de lessivage de sols contenant 5, 12 et 20% d'argile étaient de respectivement 68, 44 et 26 kg/ha/an. L'estimation du lessivage augmente de façon significative avec des quantités croissantes de fertilisation appliquée.

Le modèle est adapté pour des calculs des effets de la rotation culturale, du type de sol, et de l'application de la fertilisation azotée sur le lessivage des nitrates dans un sol sablonneux à limon sablo-argileux pour un climat tempéré côtier.

4 Pervanchon F., Bockstaller C., Amiaud B., Peigné J., Bernard P.Y., Vertès F., Fiorelli J.L. et Plantureux S., 2005, A novel indicator of environmental risks due to nitrogen management on grasslands, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 105, pp. 1–16

#### Résumé :

Un indicateur agro-écologique des pertes en azote a été introduit afin d'estimer les risques de pollution de l'air et l'eau par la gestion de l'azote sur des prairies. Le score des pertes dans cette étude correspond à la note la plus faible des quatre sous-indicateurs ( $I_{\text{NH}_3}$ ,  $I_{\text{N}_2\text{O}}$ ,  $I_{\text{NO}}$  et  $I_{\text{NO}_3}$ ) qui, respectivement, fournissent des informations sur la volatilisation, les émissions d'oxyde nitreux et nitrique dans l'air et le lessivage des nitrates dans les eaux souterraines. Le score de chaque sous-indicateur a été obtenu en comparant les pertes d'azote à un seuil qui correspondait au niveau maximal acceptable pour l'environnement (par exemple 50 mg de  $\text{NO}_3 \text{ L}^{-1}$  pour la lixiviation pour le sous-indicateur  $I_{\text{NO}_3}$ ). Les pertes dans l'air des émissions de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  et  $\text{NO}$  ont été calculées au moyen de coefficients d'émission. Le lessivage des nitrates a été estimé à partir de l'azote minéral résiduel dans le sol des prairies se trouvant au début de la période de drainage. Une validation de l'indicateur a été opérée en comparant les données calculées avec des mesures de lessivage des nitrates par des bougies poreuses sur à la fois des prairies pâturées et des prairies de fauche. Un écart entre les données observées et calculées a été relevé lors de l'utilisation des données dans les bougies poreuses pour valider l'indicateur. Néanmoins, l'indicateur a donné des résultats réalistes et est valide pour une utilisation afin d'indiquer le degré de risque de pollution des techniques de gestion agronomiques.

5 Simmelsgaard S.E. et Djurhuus J., 1998, An empirical model for estimating nitrate leaching as affected by crop type and the long-term N fertilizer rate, *Soil Use and Management*, n° 14, pp. 37-43

Résumé :

Un modèle empirique a été développé pour la prédiction du lessivage moyen annuel des nitrates affecté par le montant à long terme de la fertilisation azotée et par le type de culture. L'effet de la fertilisation azotée a été estimé à partir des valeurs annuelles de lessivage des nitrates provenant de deux enquêtes danoises sur les volumes écoulés de drains avec quatre différents taux de fertilisation azotée sur un sable limoneux et un limon sablo-argileux entre 1973 et 1989. L'effet de la culture avec la fertilisation azotée recommandée a été estimé à partir de 147 observations de lessivage des nitrates annuels obtenus à partir de mesures sur le terrain. Le modèle de lessivage des nitrates se compose d'un sous-modèle relatif fertilisation azotée et un sous-modèle absolu pour les combinaisons spécifiques des cultures, des sols et le volume d'eau drainée avec le taux normal de fertilisation azotée.

Le sous-modèle relatif est  $Y/Y_{1N} = \exp [0,71 (N / N_1)]$ , où  $Y$  est le lessivage des nitrates (kg N/ha par an) au taux de fertilisation azotée, et  $Y_{1N}$  et  $N_1$ , sont les valeurs correspondantes au taux normal de fertilisation azotée.

Le sous-modèle relatif est valable pour les céréales, les légumes racines et les prairies permanentes fertilisées avec des engrais minéraux à  $N/N_1 < 1.5$ , et à la condition que le taux de fertilisation azotée ait été constant depuis quelques années. Pour illustrer l'utilisation du sous-modèle relatif de lessivage, les valeurs estimées de  $Y_{1N}$  corrigées avec le volume d'eau drainée annuel pour 1970 à 1990 au Danemark pour les céréales de printemps et de l'herbe sur les sols sableux et argileux sont donnés comme entrée pour le sous-modèle relatif de lessivage. Le modèle peut être utilisé pour des sols sablonneux à limoneux afin d'estimer le lessivage moyen des nitrates sur un certain nombre d'années.



6 Acutis M., Ducco G. et Grignani C., 2000, Stochastic use of the LEACHN model to forecast nitrate leaching in different maize cropping systems, *European Journal of Agronomy*, n° 13, pp.191 – 206

#### Résumé :

Cet article propose une application stochastique d'un modèle déterministe (LEACHN) dans le but de prévoir la probabilité de dépasser des niveaux donnés de lixiviation des nitrates pour différents systèmes de culture et des caractéristiques hydrologiques du sol. La compréhension du niveau de probabilité associé à la prédiction de lixiviation est un critère important pour le jugement des systèmes de culture. Après étalonnage des taux de minéralisation de matière organique et de nitrification dans deux sols, un sablo limoneux et un limoneux dans l'ouest de la vallée du Po (Italie du Nord), LEACHN a été utilisé comme un outil stochastique pour évaluer la variabilité de la météorologie et la variabilité spatiale des paramètres hydrologiques d'un sol. La variabilité météorologique a été générée à l'aide de la série de température mesurée de l'air, des précipitations et du rayonnement global pour une période d'au moins 15 ans, et celles-ci ont été ensuite élargies à 100 ans en utilisant le simulateur climatique CLIMGEN. La variabilité du sol a été simulée à l'aide de la méthode des facteurs d'échelle. La moyenne et les écarts types des facteurs d'échelle ont été obtenus dans huit endroits avec une zone de 1000 m<sup>2</sup>. Les facteurs d'échelle stochastiques ont été appliqués aux paramètres a et b de la fonction de rétention de l'eau de Campbell et à la conductivité hydraulique.

Les combinaisons suivantes de cultures ont été simulées dans les deux sols: (a) maïs continu pour l'ensilage (MM) ; (b) maïs grain continu (MG) ; (c) une combinaison de Ray-grass italien et maïs ensilage de cycle court récoltés tard (LRM) ; et (d) une combinaison de Ray-grass italien et maïs ensilage à maturation tardive (ERM). Les cultures ont été fertilisées avec 200 ou 300 kg N/ha/an (ou 450 kg pour MM) et soumises à trois régimes hydriques : aucune irrigation, irrigation en se fondant sur le bilan hydrique et irrigation traditionnelle, qui a entraîné le volume le plus élevé. La lixiviation simulée était plus élevée lorsque les apports en fertilisation et en irrigation étaient les plus élevés. Elle a été encore réduite par l'introduction de cultures intermédiaires et est plus élevée dans les sols sablonneux. Tous ces facteurs ont interagi, créant différents niveaux de risque de lixiviation de nitrate, allant d'un minimum de lixiviation de 4 kg N/ha/an, avec une probabilité de rupture de 10 % de 16 kg N/ha/an (ERM faiblement irrigué et peu fertilisé dans le sol sablo-argileux) jusqu'à un maximum de lessivage moyen de 146 kg N/ha/an avec une probabilité de rupture de 10 % de 235 kg N/ha/an (MM hautement fertilisé et conventionnellement irrigué dans le sol sablonneux). Les courbes de probabilité de rupture associées à la lixiviation des nitrates sont faussées, montrant que les valeurs plus faibles que la valeur moyenne sont plus fréquentes que celles plus élevées. Les écarts de lixiviation annuelle étaient étroitement corrélés aux moyennes et sont souvent plus élevés que les moyennes, notamment dans le sol sablonneux. Les résultats de simulation stochastique ont offert la possibilité de classer les systèmes culturaux en classes de probabilité de dépasser une valeur donnée de lessivage et la possibilité d'émettre des suggestions pour une gestion améliorée des cultures.

7 Evanylo G., Sherony C., Spargo J., Starner D., Brosius M. et Haering K., 2008, Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 127, pp.50–58

### **Résumé :**

La dégradation de la qualité des sols, diminue la productivité agricole et l'augmentation de la pollution diffuse des eaux de surface, ce qui peut être amélioré en utilisant la matière organique du sol, comme c'est pratiqué par l'utilisation du compost en agriculture biologique. La quantité de compost apporté à des taux inférieurs à ceux requis pour répondre aux besoins des cultures en éléments nutritifs demande une enquête parce qu'appliquer du compost à des taux d'azote « agronomiques » peut ne pas être économiquement viable pour les producteurs de légumes biologiques. Nous avons effectué des recherches de terrain au cours des années 2000 à 2002 sur un luvisol afin de comparer les effets nutritifs et non nutritifs des différents taux et dates d'application de compost de déchets de litières de volaille mélangés avec un engrais organique traditionnel et les engrais inorganiques sur les composantes environnementales des sols et de la qualité de l'eau dans une rotation de légumes biologiques. Le carbone organique du sol, l'azote total, et le phosphore disponible ont augmenté de 60%, 68% et 225%, respectivement, au-dessus du contrôle, lors de l'application de 144 Mg/ha de compost (en poids sec) pendant l'étude de 3 ans, mais le faible taux de compost (31 Mg/ha) n'a pas affecté l'azote et le carbone du sol. La minéralisation de l'azote n'était pas synchronisée avec l'assimilation azotée du maïs doux, provoquant un excès en nitrates près de la zone racinaire qui aurait posé un risque de lixiviation, sans l'utilisation d'un seigle d'hiver en culture intermédiaire. Les concentrations de nitrate lessivé sous la zone racinaire ont occasionnellement dépassé les 10 mg N/l norme sanitaire, mais n'étaient pas différentes entre les traitements de compost de litière de volaille, d'engrais, et le contrôle, pour presque tous les cas d'échantillonnage. Malgré l'augmentation des concentrations des eaux de ruissellement en azote et phosphore, le taux de compost réduit grandement la quantité de N et P qui ont été transportés de la surface par cinq fois et quatre fois, respectivement, par rapport à l'engrais minéral en raison d'une quadruple réduction du volume d'eau de ruissellement. Les rendements des cultures n'ont pas augmenté avec les taux de compost bas pendant la durée de l'étude, cependant, des améliorations de densité apparente et de porosité ont indiqué des avantages sur le long terme, le faible taux de compost pouvant augmenter avec le temps.

8 Fuller K.D., Gordon R., Grimmett M., Fillmore S., Madani A., Van Roestel J., Stratton G.W., MacLeod J., Embree C. et St. George E., 2010, Seasonal and crop rotational effects of manure management on nitrate–nitrogen leaching in Nova Scotia, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 137, pp.267–275

### Résumé :

Des concentrations et des charges élevées en NO<sub>3</sub> dans les eaux de drainage en réponse aux pratiques de fertilisation des cultures et d'autres pratiques de gestion des terres sont une cause majeure de préoccupation pour la santé des humains, des animaux et de l'environnement. L'étude, réalisée à Kentville, en Nouvelle-Écosse (NS), a examiné l'effet de la rénovation des terres en jachères avec l'introduction de prairies permanentes avec des amendements en fumier (PF) ou de maïs (*Zea mays* L.) soja (*Glycine max* L.) et blé (*Triticum aestivum* L.) en rotation maïs-soja-blé (CSW) avec des amendements en fumier également, sur la saison de végétation (GS) et en dehors (NGS) sur les concentrations en nitrates (NO<sub>3</sub>-N) et les volumes des eaux de drainage.

Les traitements comprenaient (i) rotation PF établie avec les pratiques de travail du sol classique (CT) ; (ii) rotation CSW-CT ; (iii) travail du sol minimum dans une rotation CSW (CSW-MT) et (iv) le travail du sol zéro dans une rotation CSW (CSW-ZT). Les volumes d'eau drainée NGS ont été sensiblement plus élevés et les concentrations en nitrates pondérées en fonction du débit significativement plus faible pour toutes les années, comparativement à GS. Il n'y a aucune différence constante observée dans les concentrations en nitrates pour GS ou NGS et les volumes d'eau entre les trois niveaux de travail du sol dans la rotation CSW avec des concentrations allant entre 7,1 et 28,2 kg N/l et 18,7 et 77,0 kg N/L GS et NGS, respectivement. La rotation PF a été sensiblement plus efficace en absorption de l'azote, comparativement à une rotation CSW, ce qui implique des concentrations sensiblement inférieures. La diminution des charges de nitrates dans le temps semblait reliée à l'accroissement de l'évapotranspiration et de l'absorption d'azote pendant que le fourrage avançait en maturité.

Bien que des différences d'absorption de l'azote par le maïs, le soja et le blé de printemps dans la rotation CSW aient été observées, celles-ci n'étaient pas importantes pour déterminer l'ampleur des concentrations en nitrates. La corrélation entre l'application de fertilisation organique et les pertes de nitrates dans les eaux de drainage sous cette rotation et une saison particulière s'est révélée difficile à définir. L'étude a montré que le temps de réponse biologique du système sol amendé en fertilisants organiques pour les concentrations en NO<sub>3</sub> est plus long qu'un cycle saisonnier et démontre la nécessité d'évaluer les répercussions à long terme de ces rotations.

9 Stoddard C.S., Grove J.H., Coyne M.S. et Thom W.O., 2005, Fertilizer, tillage, and dairy manure contributions to nitrate and herbicide leaching, *Journal of Environmental Quality*, vol. 34, pp. 1354-1362

### Résumé :

Peu d'études ont examiné l'impact sur la qualité de l'eau de l'utilisation de fumiers dans les systèmes de non-travail du sol. Une étude à l'aide de lysimètres sur une monoculture de maïs (*Zea mays* L.) a été effectuée sur un sol correspondant à un limon fin de Maury (Paleudalf mésique typique, fin, mixte, semi-actif) afin d'évaluer les effets du travail du sol (sans labour [NT] et usage d'un cultivateur (Chisel Disk) [CD]), les taux d'engrais minéraux azoté (0 et 168 kg N ha<sup>-1</sup>) et les moments d'application de fumiers de bovins laitiers (aucun, au printemps, à l'automne ou à l'automne et au printemps) sur les concentrations en nitrates, en atrazine (2-chloro-4-éthylamino-6-isopropylamino-s-triazine), et en alachlore [2-chloro-2-(6-diethyl-N-(methoxymethyl) acétanilide)] dans les lixiviats prélevés à 90 cm de profondeur. Les concentrations en herbicides les plus élevées ont été observées immédiatement après l'application, puis à moins de 4 µg L<sup>-1</sup> après environ deux mois. Le fumier et le moment de son application avaient peu d'effet sur les lixiviats d'herbicides; au contraire, les données suggèrent que les macropores transmettent rapidement l'atrazine et l'alachlore à travers le sol. Habituellement, le labour n'affecte pas significativement la lixiviation des nitrates, mais le non-labour avait tendance à provoquer des concentrations plus élevées en NO<sub>3</sub>. Le fait d'appliquer une fertilisation organique cause des concentrations plus élevées en nitrates et la fumure de printemps a eu plus d'impact que celle d'automne, mais le fumier d'automne contenait environ 78 % de l'azote dans le fumier de printemps. La concentration en nitrates dans le cadre du traitement engrais uniquement au printemps a dépassé 10 mg L<sup>-1</sup> dans 38 % du temps, comparé à 15 % pour le traitement fumier seul au printemps. Après trois ans, la lixiviation issue des sols amendés excède celle pour le sol recevant uniquement des engrais minéraux. Les nitrates retrouvés dans le profil de sol (90 cm) après le maïs récolté excédait 22 kg N ha<sup>-1</sup> était associé à une lixiviation hivernale en NO<sub>3</sub> de plus de 10 mg N L<sup>-1</sup>. La fumure organique peut être efficacement utilisée dans les systèmes de labour du sol sur des sols comme ici et similaires. La prise en compte de tous les intrants azotés, y compris les applications précédentes de fumier, sera importante.

## Annexe 7 : Descriptif des individus formant les différents groupes

Groupe	Publication	identifiant	Culture précédente	Culture en cours	Couverture du sol en hiver	Concentration en Nitrates (mg/l)	Volume d'eau drainée (mm)	Doses d'azote minéral (kg/ha)	Passages de fertilisation minérale	Doses d'azote organique (T/ha)	% d'argiles	% de sables	% de matière organique
1	1	101	Betterave	Blé d'hiver	oui	32	153	22	NA	NA	15	30	
1	3	301	Orge	Orge	oui	69,65	714	80	1	85	3,7	90,9	1,3
1	3	303	Orge	Orge	non	171,26	361	120	1	0	4,6	86,8	3
1	3	306	Blé d'hiver	Orge	oui	132,60	299	200	1	83	7,5	80	2,8
1	3	307	Orge	Orge	non	87,27	308	51	1	91	7,5	80	2,8
1	3	308	Blé d'hiver	Orge	non	101,32	325	48	1	94	9,2	73,9	2,9
1	3	311	Orge	Orge	non	163,04	305	208	1	0	11,5	70,1	2,5
1	3	312	Orge	Trèfle	non	99,40	480	212	1	97	12	69,1	3,9
1	3	313	Orge	Orge	non	145,70	226	204	1	0	12,3	78,2	2,3
1	3	314	Orge	Orge	non	127,83	368	208	1	0	12,3	72	1,9
1	3	315	Blé d'hiver	Orge	non	43,00	422	212	1	0	16,8	65,3	2,4
1	3	316	Betterave	Orge	non	28,66	422	204	1	0	17,1	57,8	2,5
1	5	505	Betterave	Orge	NA	68,73	562	55	NA	0	5,1	83,3	6,5
1	5	511	Orge	Orge	NA	79,36	537	200	NA	0	17,1	57,8	2,5
1	5	512	Orge	Orge	NA	123,37	197	200	NA	0	17,1	57,8	2,5
1	5	515	Blé d'hiver	Orge	NA	87,34	322	300	NA	0	17,1	57,8	2,5
1	5	516	Orge	Prairie temporaire	NA	26,62	450	300	NA	0	17,1	57,8	2,5
1	5	518	Prairie temporaire	Blé d'hiver	NA	79,43	471	450	NA	0	17,1	57,8	2,5
1	5	519	Blé d'hiver	Orge	NA	102,69	601	450	NA	0	17,1	57,8	2,5
1	5	521	Betterave	Orge	NA	92,34	407	200	NA	233	17,1	57,8	2,5

Groupe	Publication	identifiant	Culture précédente	Culture en cours	Couverture du sol en hiver	Concentration en Nitrates (mg/l)	Volume d'eau drainée (mm)	Doses d'azote minéral (kg/ha)	Passages de fertilisation minérale	Doses d'azote organique (T/ha)	% d'argiles	% de sables	% de matière organique
2	1	102	Colza hiver	Blé d'hiver	oui	56	244	120	NA	NA	15	30	NA
2	1	103	Blé d'hiver	Colza	oui	35	182	0	NA	NA	15	30	NA
2	1	104	Blé d'hiver	Orge d'hiver	oui	51	264	121	NA	NA	15	30	NA
2	1	105	Pois	Blé d'hiver	oui	80	216	42	NA	NA	15	30	NA
2	1	106	Orge d'hiver	Culture intermédiaire	oui	41	278	34	NA	NA	15	30	NA
2	2	201	Blé d'hiver	Pois	NA	113	222	65	0	0	30	50	NA
2	2	202	Pois	Blé d'hiver	NA	219	149	38	1	0	30	50	NA
2	2	203	Blé d'hiver	Orge d'hiver	NA	124	197	126	2	0	30	50	NA
2	2	204	Orge d'hiver	Colza hiver	NA	48	185	106	2	0	30	50	NA
2	2	205	Colza hiver	Blé d'hiver	NA	215	201	110	1	0	30	50	NA
2	3	305	Orge de printemps	Colza hiver	non	112,79	566	60	1	0	5,7	84,6	2,2
2	3	309	Pois	Blé d'hiver	non	74,44	325	42	1	52	9,2	73,9	2,9
2	4	403	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	9,3	575	240	1	0	27,7	11,3	5,8
2	4	405	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	29,4	114	70	1	0	27,7	11,3	5,8
2	5	513	Orge de printemps	Colza hiver	NA	96,91	369	200	NA	0	17,1	57,8	2,5
2	5	514	Colza hiver	Blé d'hiver	NA	98,53	444	300	NA	0	17,1	57,8	2,5

Groupe	Publication	identifiant	Culture précédente	Culture en cours	Couverture du sol en hiver	Concentration en Nitrates (mg/l)	Volume d'eau drainée (mm)	Doses d'azote minéral (kg/ha)	Passages de fertilisation minérale	Doses d'azote organique (T/ha)	% d'argiles	% de sables	% de matière organique
3	3	302	Trèfle	Orge de printemps	non	100,56	695	103	1	121	3,7	90,9	1,3
3	3	304	Orge de printemps	Betterave	non	83,31	605	122	1	220	5,1	83,3	6,5
3	3	310	Blé d'hiver	Betterave	non	58,63	596	204	1	0	10,1	76,2	2,9
3	5	501	Orge de printemps	Prairie temporaire	oui	60,48	610	150	NA	0	5,1	83,3	6,5
3	5	502	Prairie temporaire	Prairie temporaire	oui	55,40	904	150	NA	0	5,1	83,3	6,5
3	5	503	Prairie temporaire	Orge de printemps	NA	141,16	570	135	NA	0	5,1	83,3	6,5
3	5	504	Orge de printemps	Betterave	NA	96,73	830	120	NA	0	5,1	83,3	6,5
3	5	506	Orge de printemps	Prairie temporaire	NA	44,70	501	160	NA	0	5,1	83,3	6,5
3	5	507	Prairie temporaire	Orge de printemps	NA	39,09	544	110	NA	0	5,1	83,3	6,5
3	5	508	Orge de printemps	Prairie temporaire	NA	29,76	557	0	NA	0	5,1	83,3	6,5
3	5	509	Prairie temporaire	Orge de printemps	NA	28,90	802	0	NA	127	5,1	83,3	6,5
3	5	510	Orge de printemps	Betterave	NA	60,23	624	0	NA	275	5,1	83,3	6,5
3	5	520	Orge de printemps	Betterave	NA	109,58	343	200	NA	152	17,1	57,8	2,5
3	5	522	Orge de printemps	Blé d'hiver	NA	82,42	456	200	NA	254	17,1	57,8	2,5

Groupe	Publication	identifiant	Culture précédente	Culture en cours	Couverture du sol en hiver	Concentration en Nitrates (mg/l)	Volume d'eau drainée (mm)	Doses d'azote minéral (kg/ha)	Passages de fertilisation minérale	Doses d'azote organique (T/ha)	% d'argiles	% de sables	% de matière organique
4	4	401	PP	PP	oui	14,3	NA	208	NA	20000	NA	NA	NA
4	4	402	PP	PP	oui	20,9	NA	212	NA	70000	NA	NA	NA
4	8	801	PP	Prairie temporaire	oui	8,86	659	0	0	651,72	17,2	59,2	3,54
4	8	806	PP	Mais grain	non	10,85	690	0	0	651,72	17,2	59,2	3,54
4	8	809	Blé de printemps	Mais grain	non	5,65	720	0	0	636,36	17,2	59,2	3,54
4	8	811	PP	Mais grain	non	11,83	666	0	0	651,72	17,2	59,2	3,54
4	8	814	Blé de printemps	Mais grain	non	7,23	739	0	0	636,36	17,2	59,2	3,54
4	8	816	PP	Mais grain	non	9,79	921	0	0	651,72	17,2	59,2	3,54
4	8	819	Blé de printemps	Mais grain	non	7,11	752	NA	0	636,36	17,2	59,2	3,54
4	9	901	PP	Mais grain	non	21,77	546	NA	0	0	20	20	NA
4	9	902	Mais grain	Mais grain	non	10,77	370	NA	0	0	20	20	NA
4	9	903	PP	Mais grain	non	41,05	332	NA	0	17400	20	20	NA
4	9	904	Mais grain	Mais grain	non	25,07	244	NA	0	19100	20	20	NA
4	9	905	PP	Mais grain	non	33,66	367	NA	0	14400	20	20	NA
4	9	906	Mais grain	Mais grain	non	22,46	397	NA	0	16200	20	20	NA
4	9	907	PP	Mais grain	non	56,05	265	NA	0	31800	20	20	NA
4	9	908	Mais grain	Mais grain	non	76,95	316	NA	0	35300	20	20	NA
4	9	909	PP	Mais grain	non	59,43	332	NA	1	17400	20	20	NA
4	9	910	Mais grain	Mais grain	non	61,10	244	NA	1	19100	20	20	NA

PP = prairie permanente



Groupe	Publication	identifiant	Culture précédente	Culture en cours	Couverture du sol en hiver	Concentration en Nitrates (mg/l)	Volume d'eau drainée (mm)	Doses d'azote minéral (kg/ha)	Passages de fertilisation minérale	Doses d'azote organique (T/ha)	% d'argiles	% de sables	% de matière organique
5	4	404	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	54,1	372	300	1	0	27,7	11,3	5,8
5	4	406	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	13,7	503	230	4	0	27,7	16,7	4,4
5	4	407	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	2,3	372	222	4	0	27,7	16,7	4,4
5	4	408	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	24,8	114	429	4	0	27,7	16,7	4,4
5	4	409	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	33,8	432	60	4	0	43,9	12,6	5,4
5	4	410	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	18,2	372	330	4	0	43,9	12,6	5,4
5	4	411	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	20,9	106	0	4	0	43,9	12,6	5,4
5	4	412	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	20,4	575	0	4	0	27,7	16,7	4,4
5	4	413	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	61,9	387	110	4	0	27,7	16,7	4,4
5	4	414	Prairie permanente	Prairie permanente	oui	63,7	114	110	4	0	27,7	16,7	4,4

Groupe	Publication	identifiant	Culture précédente	Culture en cours	Couverture du sol en hiver	Concentration en Nitrates (mg/l)	Volume d'eau drainée (mm)	Doses d'azote minéral (kg/ha)	Passages de fertilisation minérale	Doses d'azote organique (T/ha)	% d'argiles	% de sables	% de matière organique
6	5	517	Prairie temporaire	Prairie temporaire	NA	37,47	695	450	NA	0	17,1	57,8	2,5
6	8	802	Prairie temporaire	Prairie temporaire	oui	4,55	661	0	1	0	17,2	59,2	3,54
6	8	803	Prairie temporaire	Prairie temporaire	oui	2,81	656	0	0	640,74	17,2	59,2	3,54
6	8	804	Prairie temporaire	Prairie temporaire	oui	2,203	854	0	0	636,36	17,2	59,2	3,54
6	8	805	Prairie temporaire	Prairie temporaire	oui	2,01	707	0	0	0	17,2	59,2	3,54
6	8	807	Mais Grain	Autre culture	non	8,57	461	0	0	0	17,2	59,2	3,54
6	8	810	Mais Grain	Prairie temporaire	non	6,72	618	0	0	0	17,2	59,2	3,54
6	8	812	Mais Grain	Autre culture	non	9,51	459	0	0	0	17,2	59,2	3,54
6	8	815	Mais Grain	Prairie temporaire	non	7,54	622	0	0	0	17,2	59,2	3,54
6	8	817	Mais Grain	Autre culture	non	8,64	727	168	0	0	17,2	59,2	3,54
6	8	820	Mais Grain	Prairie temporaire	non	7,17	658	NA	0	0	17,2	59,2	3,54

Groupe	Publication	identifiant	Culture précédente	Culture en cours	Couverture du sol en hiver	Concentration en Nitrates (mg/l)	Volume d'eau drainée (mm)	Doses d'azote minéral (kg/ha)	Passages de fertilisation minérale	Doses d'azote organique (T/ha)	% d'argiles	% de sables	% de matière organique
7	6	601	M.E.	M.E.	NA	104,07	134	300	2	0	4,5	68,7	1,557
7	6	602	M.E.	M.E.	NA	111,60	92	300	2	0	4,5	68,7	1,557
7	6	603	M.E.	M.E.	NA	44,73	80	300	2	0	4,5	68,7	1,557
7	6	604	M.E.	M.E.	NA	310,44	134	450	2	0	4,5	68,7	1,557
7	6	605	M.E.	M.E.	NA	364,47	92	450	2	0	4,5	68,7	1,557
7	6	606	M.E.	M.E.	NA	245,34	80	450	2	0	4,5	68,7	1,557
7	6	607	M.E.	M.E.	NA	480,94	134	200	2	0	4,5	68,7	1,557
7	6	608	M.E.	M.E.	NA	546,93	92	200	2	0	4,5	68,7	1,557
7	6	609	M.E.	M.E.	NA	421,16	80	200	2	0	4,5	68,7	1,557
7	6	610	M.E.	M.E.	NA	58,01	134	300	2	0	16	60,7	1,211
7	6	611	M.E.	M.E.	NA	57,13	92	300	2	0	16	60,7	1,211
7	6	612	M.E.	M.E.	NA	76,17	80	300	2	0	16	60,7	1,211
7	6	613	M.E.	M.E.	NA	94,77	134	200	2	0	16	60,7	1,211
7	6	614	M.E.	M.E.	NA	105,40	92	200	2	0	16	60,7	1,211
7	6	615	M.E.	M.E.	NA	108,06	80	200	2	0	16	60,7	1,211
7	6	616	M.E.	M.E.	NA	424,70	134	300	2	0	16	60,7	1,211
7	6	617	M.E.	M.E.	NA	554,46	92	300	2	0	16	60,7	1,211
7	6	618	M.E.	M.E.	NA	530,99	80	300	2	0	16	60,7	1,211

M.E. = *Maïs ensilage*

Groupe	Publication	identifiant	Culture précédente	Culture en cours	Couverture du sol en hiver	Concentration en Nitrates (mg/l)	Volume d'eau drainée (mm)	Doses d'azote minéral (kg/ha)	Passages de fertilisation minérale	Doses d'azote organique (T/ha)	% d'argiles	% de sables	% de matière organique
8	6	619	Mais grain	Mais grain	NA	121,79	126	0	2	0	4,5	68,7	1,557
8	6	620	Mais grain	Mais grain	NA	131,09	87	0	2	0	4,5	68,7	1,557
8	6	621	Mais grain	Mais grain	NA	60,23	71	0	2	0	4,5	68,7	1,557
8	6	622	Mais grain	Mais grain	NA	306,46	126	638	2	0	4,5	68,7	1,557
8	6	623	Mais grain	Mais grain	NA	349,41	87	0	2	0	4,5	68,7	1,557
8	6	624	Mais grain	Mais grain	NA	228,96	71	0	2	0	4,5	68,7	1,557
8	6	625	Mais grain	Mais grain	NA	76,61	126	0	2	0	16	60,7	1,211
8	6	626	Mais grain	Mais grain	NA	73,51	87	638	2	0	16	60,7	1,211
8	6	627	Mais grain	Mais grain	NA	95,21	71	0	2	0	16	60,7	1,211
8	6	628	Mais grain	Mais grain	NA	166,96	126	0	2	0	16	60,7	1,211
8	6	629	Mais grain	Mais grain	NA	245,34	87	0	2	0	16	60,7	1,211
8	6	630	Mais grain	Mais grain	NA	263,06	71	638	2	0	16	60,7	1,211

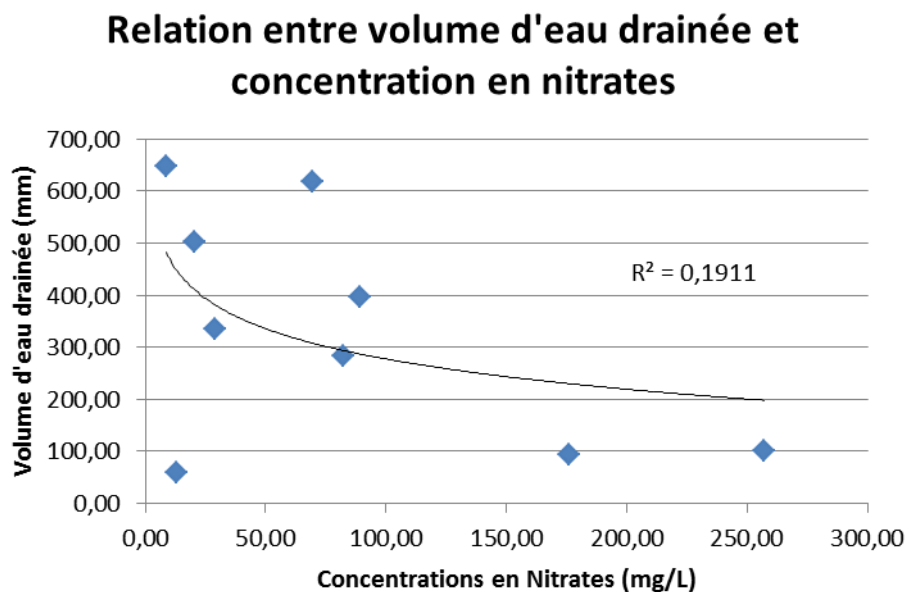
Groupe	Publication	identifiant	Culture précédente	Culture en cours	Couvertu re du sol en hiver	Concentration en Nitrates (mg/l)	Volume d'eau drainée (mm)	Doses d'azote minéral (kg/ha)	Passages de fertilisation minérale	Doses d'azote organique (T/ha)	% d'argiles	% de sables	% de matière organique
9	7	701	Maraichage	Maraichage	oui	9,43	27,70	0	0	0	35	10	2,595
9	7	702	Maraichage	Maraichage	oui	3,19	88,26	40	0	43700	35	10	2,595
9	7	703	Maraichage	Maraichage	oui	24,31	75,48	0	0	2150	35	10	2,595
9	7	704	Maraichage	Maraichage	oui	16,70	46,84	0	1	0	35	10	2,595
9	7	705	Maraichage	Maraichage	oui	9,43	27,70	0	0	0	35	10	2,595
9	7	706	Maraichage	Maraichage	oui	3,19	88,26	0	0	66900	35	10	3,979
9	7	707	Maraichage	Maraichage	oui	24,31	75,48	0	0	4760	35	10	2,595
9	7	708	Maraichage	Maraichage	oui	16,70	46,84	0	1	0	35	10	2,595
9	7	709	Maraichage	Maraichage	oui	9,43	27,70	0	0	0	35	10	2,595
9	7	710	Maraichage	Maraichage	oui	3,19	88,26	0	0	32900	35	10	3,979
9	7	711	Maraichage	Maraichage	oui	24,31	75,48	0	0	5780	35	10	2,595
9	7	712	Maraichage	Maraichage	oui	16,70	46,84	0	1	0	35	10	2,941

## Annexe 8 : Lien entre Volume d'eau drainée et concentrations en nitrates

Nous avons voulu tester le lien qui semblait exister entre le volume d'eau drainée et les concentrations en nitrates associés aux groupes de systèmes de culture. Sur la figure 1, nous pouvons observer la distribution des groupes selon deux axes, les volumes d'eau en ordonnée et les concentrations en nitrates en abscisses.

Ensuite, comme il est présenté sur la figure 1, nous avons ajouté une courbe de tendance et son coefficient de détermination. Celui-ci étant très faible, nous avons conclu à une absence de lien entre les concentrations en nitrates et les volumes d'eau drainée associés aux groupes de systèmes de culture.

Figure 1 : Relation entre volume d'eau drainée et concentration en nitrates



## Annexe 9 : Niveaux de fertilisation

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5	Groupe 6	Groupe 7	Groupe 8	Groupe 9
<b>Fertilisation minérale (kg/ha)</b>	196,2	104,6	118,1	52,5	179,1	61,8	291,7	159,5	3,3
<b>Fertilisation organique (t/ha)</b>	35,9	4,7	82,1	13958,7	0,0	116,1	0,0	0,0	13015,8
<b>Fertilisation totale (kg/ha)</b>	196,3	104,6	118,3	87,4	179,1	62,1	291,7	159,5	35,9
<b>Concentrations en nitrates (mg/l)</b>	89,0	82,2	69,4	20,5	29,1	8,8	256,8	176,2	13,3

## Annexe 10 : Description des systèmes de production utilisés

Orientations	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nombre d'exploitations dans échantillon	2112	367	1341	2305	168	113	146	740	137
Nombre d'exploitations représentées	91248	10705	56283	131652	8155	6259	6190	34486	7292
Surface agricole utilisée (SAU) (ha)	103,5	6,0	23,5	76,4	26,3	75,0	60,6	109,8	61,0
Surface jachère rotationnelle & libre (ha)	8,9					2,5		5,8	4,1
Surface en céréales (ha)	58,8					19,7		40,9	30,5
Surface en blé tendre (ha)	31,2					10,8		23,1	13,4
Surface en maïs grain (ha)	10,3					3,5		6,5	11,4
Surface en orge (ha)	11,3					2,7		8,4	3,5
Surface en autre céréale	6,0					2,7		3,0	2,3
Surface en cultures industrielles (ha)	25,1								6,3
Surface en oléagineux sauf colza (ha)	4,9								
Surface en colza (ha)	10,2								
Surface en betterave à sucre (ha)	3,3								
Surface en pomme de terre (nc primeur) (ha)	1,4								
Surface en pois protéagineux (ha)	2,1								
Surface en légumes frais (ha)	1,7	2,3							
Surface en cultures industrielles autre	1,1								
Effectifs animaux (UGB)	17,5	0,8	1,5	87,5	432,9	164,7	300,7	86,1	191,0
Surface en fleurs (are)	0,0	0,5							
Surface en vergers (ha)	0,3	0,1	2,7						
Surface en vignes (ha)	0,7	0,1	13,3						
Surface manquante <sup>10</sup>	10,0	2,9	7,6	15,4	19,3	3,5	20,7	10,7	6,8
Surface fourragère principale (SFP) (ha)				61,1	7,0	49,4	39,8	52,5	13,3
Surface en maïs fourrager (ha)				6,9			8,8	10,1	1,3
Superficie toujours en herbe (ha)				33,4	2,5	18,7	11,7	28,2	6,0
Surface en PT				20,7	4,5	30,7	19,4	14,2	5,9

<sup>10</sup> La surface manquante a été considérée comme la différence entre la SAU et la somme formée de la surface en jachère, de la surface en céréales, de la surface en cultures industrielles des surfaces en fleurs, vergers et vignes et de la surface fourragère principale.



# Annexe 11 : Pression phytosanitaire

Indicateur de pression phytosanitaire sur céréales

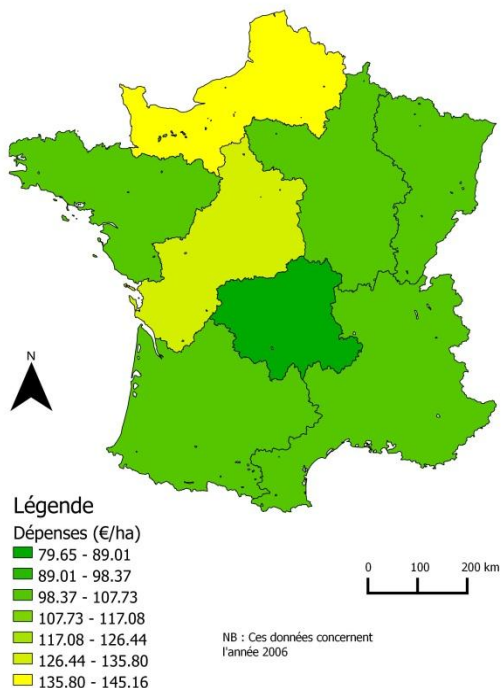


Figure 1 : Pression phytosanitaires sur céréales

Indicateur de pression phytosanitaire sur cultures industrielles

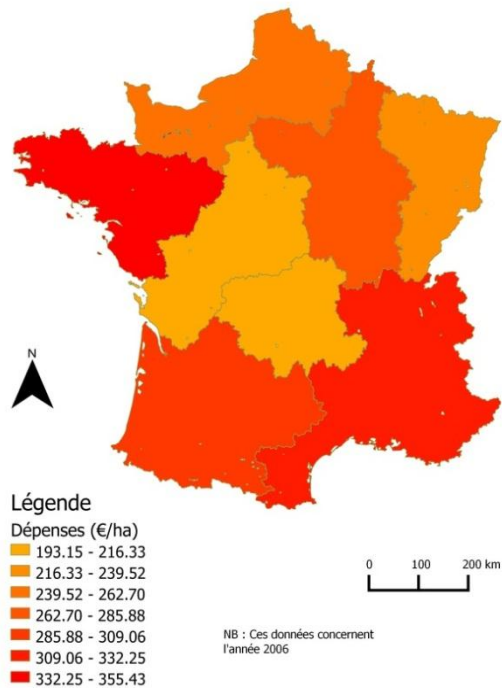


Figure 19 : pression phytosanitaire sur cultures industrielles

Pourcentage de surfaces en céréales

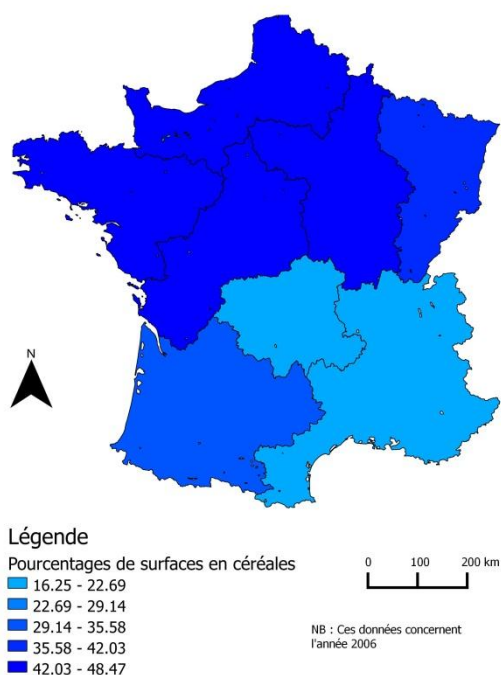


Figure 3 : Pourcentage de surfaces en céréales

Pourcentage de surfaces en cultures industrielles

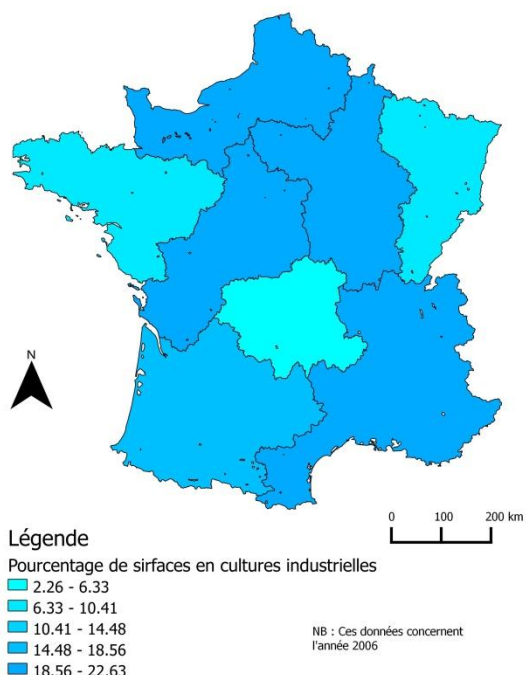


Figure 4 : Pourcentage de surfaces en cultures industrielles



## Résumé

L'agriculture française a connu un mouvement de spécialisation et de concentration des exploitations au cours de la fin du XX<sup>ème</sup> siècle. On a également remarqué sur la même période une dégradation de la qualité des eaux. Les politiques publiques et la préservation de l'environnement sont depuis peu associées et leurs effets ne sont pas encore probants. C'est dans ce contexte que les entreprises de l'eau se mobilisent pour chercher de nouvelles solutions. Favoriser une agriculture compatible avec la ressource en eau en est une. Dans cette étude nous cherchons à savoir quel type d'agriculture correspond à cette demande, c'est-à-dire fournit le moins de nitrates et de produits phytosanitaires. A partir de données issues de la littérature scientifique, nous avons mis en place une analyse pour associer à un système de culture (compris comme un doublet de culture sur deux cycles végétatifs) une quantité de pollution. Malheureusement seul le paramètre concentration en nitrate a pu être traité. Il a été mis en évidence que les systèmes de culture à base de prairies temporaires étaient les plus à même de préserver la ressource en eau et qu'au contraire les systèmes basés sur du maïs présentaient un risque. Nous nous sommes ensuite intéressés à l'échelle de l'exploitation agricole du point de vue de son emprise territoriale. Nous avons pu observer que les systèmes d'élevage hors sol présentaient le meilleur profil et que les systèmes de grandes cultures, le moins bon. De nombreuses perspectives sont évoquées comme par exemple étendre l'échelle de l'exploitation jusqu'au territoire ou encore de réaliser une étude économique.

Mots clés : Qualité de l'eau, pollution agricole, nitrates, système de culture, système de production

## Abstract

French agriculture has known some important changes during the end of the XX<sup>th</sup> century. There has been a specialization and a concentration of farming systems. During this time, we could observe that water quality decreased. Public policies take care of the preservation of environment since few decades and we couldn't see major changes on environment quality. Today, companies of water services try to find a new way to protect the water resources. Promoting a water-compatible farming is one of them. In this study, our aim is to determine what type of farming is able to release the least of nitrates and pesticides in the environment. From data collected in literature, we conduct an analysis to associate an amount of pollution to a cropping system (as known as crops cultivated during two seasons). Unfortunately, only nitrates could be analyzed. In one hand, cropping systems based on temporary grasslands seems to be the most efficient systems to protect the water quality and in the other hand, cropping systems based on corn (*Zea mays*) seems to be the less effective to protect water resources. Then, we worked at the farm scale as a land use. Farming systems with farming battery present the best profile to protect water resources and farming systems with arable crops seem to have the least profitable profile. Many perspectives are discussed in the end as for example working at the land scale or working in an economic way.

Keywords : Water quality, agricultural pollution, nitrates, cropping systems, farming systems