



HAL
open science

Dynamiques des systèmes de culture du bassin de la Seine : mise en évidence d'une intensification des pratiques culturelles au cours des trois dernières décennies

Céline Schott, Marc Benoît, Catherine C. Mignolet, Jean-François Mari, Amelina Bidel, Edouard Gillet, Rosine Lavez, Veronique Remy

► To cite this version:

Céline Schott, Marc Benoît, Catherine C. Mignolet, Jean-François Mari, Amelina Bidel, et al.. Dynamiques des systèmes de culture du bassin de la Seine : mise en évidence d'une intensification des pratiques culturelles au cours des trois dernières décennies. Rapport d'activité 2007. Territoires, carbone, azote et changements globaux. L'agriculture du bassin de la Seine : évolution, distribution spatiale, facteurs économiques, impacts environnementaux Diffusion du document : Public. 2008. hal-02823478

HAL Id: hal-02823478

<https://hal.inrae.fr/hal-02823478>

Submitted on 6 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.

Dynamiques des systèmes de culture du bassin de la Seine : mise en évidence d'une intensification des pratiques culturales au cours des trois dernières décennies

Céline Schott^{1*}, Marc Benoît¹, Catherine Mignolet¹, Jean-François Mari¹ avec la contribution de Améline Bidet, Edouard Gillet, Rosine Lavez et Véronique Rémy

¹ INRA, Unité de Recherche 055, 662 avenue Louis Buffet, 88500 Mirecourt
schott@mirecourt.inra.fr

1. Introduction	1
2. Dynamiques des successions de cultures sur le bassin de la Seine entre 1992 et 2003 : traitement des données Teruti par un logiciel de fouille de données temporelles (Carrotage).....	3
2.1. Matériel et méthodes	3
2.1.1 La succession culturale, objet de recherche modélisable selon un processus de Markov ?	3
2.1.2 Les données Teruti	4
2.1.3 Démarche de spatialisation.....	7
2.1.4 La fouille de données par Modèles de Markov cachés (HMM).....	9
2.1.5 Validation de la méthode.....	16
2.2. Résultats et discussion.....	21
2.2.1 Typologie des PRA du bassin de la Seine en fonction de leurs successions de culture majoritaires à l'échelle de toute la période enquêtée (1992-2003).....	21
2.2.2 Evolution temporelle des successions de cultures sur le bassin de la Seine : Segmentation en 2 périodes (1992-97 et 1998-2003).....	26
2.3. Conclusion.....	30
3. Typologie spatialisée des risques contributifs de dégagement de N ₂ O au sein du bassin de la Seine	31
3.1. Analyse de l'évolution des risques liée à l'évolution des itinéraires techniques de conduite du blé dans le bassin de la Seine	31
3.1.1 Description des données mobilisées.....	31
3.1.2 Présentation des variables retenues pour les analyses de 1970 à 2005.....	32
3.1.3 Analyse des conduites de blé sur les paramètres clés du risque de dégagement de N ₂ O	34
3.1.4 Conclusions	42
3.2. Analyse de l'évolution des itinéraires culturaux de blé sur leur risque de dégagement de N ₂ O entre 1994 et 2001	43
3.2.1 Description des données mobilisées.....	43
3.2.2 Analyse des pratiques sur blé	44
3.2.3 Conclusions	51
4. Bibliographie.....	52
5. Annexe 1 : Eléments bibliographiques sur les facteurs de risque de dégagements de N ₂ O par les pratiques agricoles.....	53

1. Introduction

Dans le cadre du PIREN-Seine, la participation de l'Unité de Recherche INRA de Mirecourt à l'axe de recherche "Territoire, carbone, azote, changements globaux" consiste à comprendre les dynamiques des activités agricoles sur l'ensemble du bassin de la Seine, afin de mettre en évidence leurs impacts

sur la dégradation de l'environnement. Pour analyser ces dynamiques et leur répartition spatiale au sein du bassin, nous utilisons différents descripteurs choisis à différents niveaux d'organisation des activités agricoles, qui sont le système de production, l'assolement, la succession de cultures et enfin l'itinéraire technique (Figure 1).

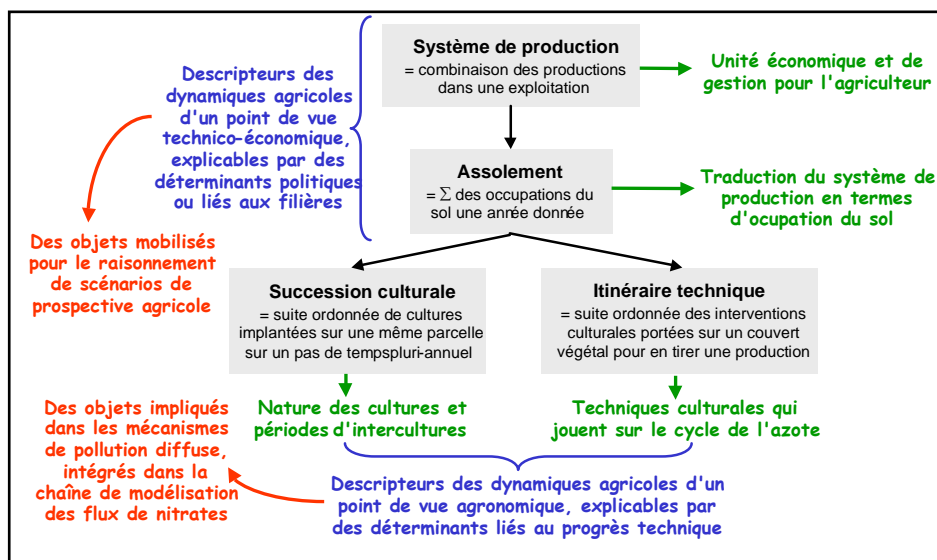


Figure 1 : Choix et rôle des niveaux de description des activités agricoles

Les dynamiques des systèmes de production agricoles et des assolements, que nous qualifions de descripteurs technico-économiques, ont été analysées au cours de la III^{ème} phase du PIREN-Seine à l'échelle de la Petite Région Agricole (PRA) et sur les trois dernières décennies. Depuis la IV^{ème} phase du PIREN-Seine, nous avons approfondi l'étude des descripteurs plus "agronomiques" des activités agricoles du bassin de la Seine – les successions de cultures et les itinéraires techniques – qui sont directement impliqués dans les mécanismes de pollution diffuse par les nitrates et le cycle du carbone.

Nous aborderons dans un premier temps une étude de la dynamique des successions de cultures sur le bassin de la Seine qui fait suite et complète le rapport d'activité PIREN-Seine de 2002. L'acquisition de nouvelles données sur la période 1999-2003 permet d'actualiser la typologie des PRA en fonction de leurs successions de cultures dominantes identifiées sur la période 1992-98 qui a été présentée en 2003 et surtout, permet de montrer les grandes tendances d'évolution observables entre le début et la fin de la période enquêtée (1992-2003). Cette nouvelle étude met en évidence des tendances plutôt négatives pour l'environnement, car elles semblent montrer une simplification croissante des successions de cultures rencontrées, voire un développement de la monoculture.

Dans un second chapitre, nous présenterons comment l'étude des itinéraires techniques peut contribuer à l'étude des risques de dégagement de N₂O, et donc évaluer la contribution actuelle de l'agriculture et son évolution au cours des trente dernières années au réchauffement climatique. Pour cela, nous sommes partis d'une étude bibliographique des faits liant pratiques agricoles aux dégagements de N₂O permettant de lister les principaux facteurs de risques que nous avons ensuite confrontés à ceux qui étaient accessibles dans les bases de données sur les pratiques agricoles dont nous disposons sur l'ensemble du bassin de la Seine et sur 30 ans. L'étape suivante a été de réaliser des typologies des risques par culture, typologie qui est ensuite spatialisée sur l'ensemble du bassin de la Seine à la maille des Petites Régions Agricoles (PRA).

2. Dynamiques des successions de cultures sur le bassin de la Seine entre 1992 et 2003 : traitement des données Teruti par un logiciel de fouille de données temporelles (Carrotage)

La connaissance des successions culturales est un des paramètres à prendre en compte dans diverses études environnementales, concernant notamment l'impact des pratiques agricoles sur la pollution de l'eau par les nitrates ou les produits phytosanitaires, l'érosion des sols par le ruissellement ou – à titre prospectif – la diffusion des transgènes par la pollinisation.

Bien qu'essentielle à la compréhension de ces phénomènes, la prise en compte des successions culturales dans ces études est souvent rendue difficile par le manque de données disponibles. En effet, contrairement à l'assolement, la variable "succession culturelle" est souvent peu connue, qu'il s'agisse de données issues directement d'enquêtes ou de méthodes permettant de les déduire.

L'étude des successions culturales se heurte en effet à leur grande variabilité dans l'espace et dans le temps et à la difficulté d'en extraire des régularités. Pourtant, nous faisons le postulat qu'il existe bien, dans toute région agricole, un ordre préférentiel dans lequel sont implantées successivement les cultures. Ce sont ces combinaisons logiques, caractérisant les systèmes de culture d'une région, que nous chercherons à extraire de données temporelles d'occupation du sol, issues d'enquêtes en exploitation ou de l'enquête nationale Ter-Uti. Le présent chapitre vise donc à démontrer l'utilité d'utiliser un logiciel de fouilles de données pour extraire de la connaissance sur les successions de cultures.

2.1. Matériel et méthodes

2.1.1 La succession culturelle, objet de recherche modélisable selon un processus de Markov ?

L'intérêt actuel pour l'étude des successions tient en deux faits majeurs : (i) les effets environnementaux de certaines successions culturales induisent de modifier celles-ci ou de changer leurs localisations (Mignolet et al, 2004 ; Souchère et al, 2003 ; Benoît, Papy, 1998), (ii) les types de successions choisies par les agriculteurs sont de bons marqueurs de leurs types de fonctionnement (Ramber, 1972 ; Capillon, 1985).

La suite logique et ordonnée des couverts végétaux est l'un des deux termes de la définition proposée pour les systèmes de culture (INRA-INAPG, 1975 ; Sebillotte, 1987 ; Sebillotte, 1990). L'autre terme est la suite logique et ordonnée des techniques qui s'appliquent à chaque couvert d'une succession. Ainsi, cette définition précise l'objet et le point de vue de recherche adopté.

Le point de vue de recherche insiste sur la dimension logique, et donc ordonnée, de ces suites de couverts. Nous posons l'hypothèse que ces suites sont en nombre finis, souvent peu nombreuses par petite région agricole. Ce nombre restreint est lié à l'ensemble des contraintes qui concernent le choix de ces successions. Ainsi la distance et la qualité des terrains (Morlon, Benoît, 1990), des contraintes agronomiques (temps de retour d'une même culture sur elle-même, par exemple) (Maxime et al, 1995), des contraintes d'équipements (Reboul, 1976) créent un contexte qui diminue fortement les degrés de liberté de ce choix. Si nous y ajoutons l'apprentissage souvent réalisé lors de l'enfance sur l'exploitation ou lentement acquis lors de la vie professionnelle, nous nous trouvons face à un fait agronomique fortement déterminé par son contexte local.

Parfois, ces contraintes sont telles que les successions acquièrent une grande régularité sur une longue période, nous parlons alors de rotations culturales. Les rotations culturales sont donc un cas particulier de successions culturales où le même ordre se reproduit à l'identique sur un temps long.

Ces successions culturales sont construites très souvent pour permettre de disposer chaque année d'une surface désirée de chaque couvert végétal. Cette répartition annuelle des surfaces des cultures dans une exploitation s'appelle l'assolement. Par extension, nous pouvons définir l'assolement d'une région comme la surface occupée telle année par les divers couverts végétaux qui la recouvrent.

Encadré 1 – La rotation culturale (extrait du Larousse agricole, 1981)

De nombreuses raisons justifient la pratique de la rotation culturale : [...] chaque plante a un système racinaire particulier, qui se développe toujours dans la même couche de terre. [...] La rotation des cultures apporte un remède à cette situation en faisant suivre, par exemple, une plante à racines superficielles (céréales) par une plante à racines plus profondes (ex. : betterave). On sait aussi que les plantes ont des exigences particulières. Certaines consomment, toutes proportions gardées, surtout de l'azote, d'autres de la potasse, etc. Or, si l'on cultive tous les ans la même plante sur le même sol, celui-ci s'épuisera surtout en un élément fertilisant. Pour éviter cette fatigue du sol, il faut prévoir une succession de plantes qui ont des besoins différents ainsi que des apports d'engrais. De plus, l'influence de la succession de cultures sur la structure du sol et sur la teneur de celui-ci en matière organique est très grande et peut contribuer à un épuisement du sol que ne fait pas disparaître un emploi de doses massives d'engrais. Le maintien de la même culture sur le même sol pendant de nombreuses années favorise aussi le développement des parasites végétaux ou animaux ainsi que des mauvaises herbes spécifiques de cette culture. La succession des cultures compromet en général le développement de ces parasites et entrave l'envahissement par les mauvaises herbes. (Larousse agricole, 1981)

2.1.2 Les données Teruti

L'enquête annuelle Teruti, réalisée par le SCEES, permet grâce à l'observation directe par enquêteur sur un échantillon constant de points (550 000 points sur les périodes 1982-90 et 1992-2003, près de 155 000 points à partir de 2004) repérés avec précision, de connaître l'occupation du territoire français tant du point de vue physique (surfaces occupées par les cultures, friches, landes, forêts et autres espaces naturels, terrains bâtis, routes, etc.) que du point de vue fonctionnel (agriculture, réseau routier, habitat, etc.) [SCEES]

L'enquête Teruti, associée à son outil de traitement et à sa cartographie spécifique, ouvre un vaste champ d'étude. Au-delà de l'occupation du territoire pour une année donnée, il est possible de suivre son évolution et même d'analyser les successions d'occupation du sol point par point. La répartition géographique de chaque phénomène peut être étudiée en fonction de nombreux découpages territoriaux. Cette enquête constitue donc un support pertinent pour répondre à de multiples questions tant sur des aspects agricoles ou forestiers que sur des aspects environnementaux ou urbains. [SCEES]

Dans notre cas, nous avons cherché à voir si cette enquête pouvait permettre d'estimer les grandes tendances d'évolution de l'occupation du sol à des échelles spatiales assez larges, et dans le cas de l'agriculture, de calculer une estimation de l'assolement annuel. Comme il s'agit d'un échantillon constant de points enquêtés, cette enquête permet d'aller plus loin et d'extraire les principales successions de cultures qui y sont pratiquées.

a) Mode d'échantillonnage des points Teruti

Cette enquête est réalisée selon la même méthode depuis 1982. L'échantillon de points a été entièrement renouvelé sur deux ans en 1991 et 1992. Le nombre de points, 550 000 de 1982 à 2003, a été réduit à 155 000 en 2004 pour des raisons budgétaires. Les résultats de l'enquête se composent donc de trois séries de données historiques continues : d'une part 1982-1990 et 1992-2003 à 550 000 points, d'autre part 1992-2004 à 155 000 points. Pour cette dernière, les années 1992 à 2003 ont été recalculées sur les seuls points observés en 2004. A partir de 2005, Teruti est remplacé par une nouvelle enquête Teruti-Lucas. Le passage de 2004 à 2005 s'effectuera donc avec une solution de continuité concernant à la fois l'échantillon et la nomenclature [SCEES].

Pour notre part, nous avons choisi de n'utiliser ici que la série 1992-2003. En effet, les méthodes de fouilles de données temporelles utilisées ici nécessitent une continuité dans l'échantillon de points enquêtés et, le nouvel échantillonnage opéré en 2004 nous a paru trop faiblement représentatif à notre échelle d'étude (bassin de la Seine et PRA). De plus, nous avons besoin d'un recul historique suffisamment long sur un même échantillon pour pouvoir étudier les successions de culture. L'échantillon Teruti-Lucas n'est donc pas assez ancien pour nous permettre d'effectuer nos

traitements. Il en résulte que cette étude ne pourra malheureusement pas prendre en compte les évolutions récentes des systèmes de culture.

Encadré 2 : Echantillon de photographies et de points

Le tirage de l'échantillon est un tirage systématique à deux degrés. Ce type de tirage assure une répartition satisfaisante de l'échantillon sur l'ensemble du territoire.

- **1^{er} degré : tirage des photographies**

Le tirage revient à recouvrir la France d'un quadrillage de mailles de 12 km x 12 km chacune dans les directions nord-sud et est-ouest. Le nombre de mailles est de 4700. A l'intérieur de chacune de ces mailles, huit photographies de position fixe ont été prévues (Figure 1).

Du fait de contraintes de coût, seules les photographies de positions 1, 2, 3 et 4 distantes les unes des autres de 6 km environ, ont été retenues sauf pour Paris, l'ancienne Seine-et-Oise et le Territoire de Belfort, qui enquêtent également pour des raisons de représentativité des résultats au niveau départemental, les photographies de positions 5, 6, 7 et 8.

- **2^{ème} degré : tirage des points**

Le tirage systématique revient à reporter sur chacun des segments une grille de 36 points à enquêter, alignés de 6 en 6 (n°1 à 36). Sur le terrain, les points sont distants d'environ 300 mètres et désignent chacun une superficie d'environ 10 m² (3m x 3m). Les 10 points enquêtés en 2004 sont les points numérotés 14 à 18 et 20 à 24.

L'échantillon ainsi constitué en 2004 compte 15 540 photographies et 154 501 points situés sur le territoire métropolitain. Entre 1982 et 2003, on comptait autant de photographies mais plus de points par photographie (36), soit environ 550 000 points enquêtés sur le territoire.

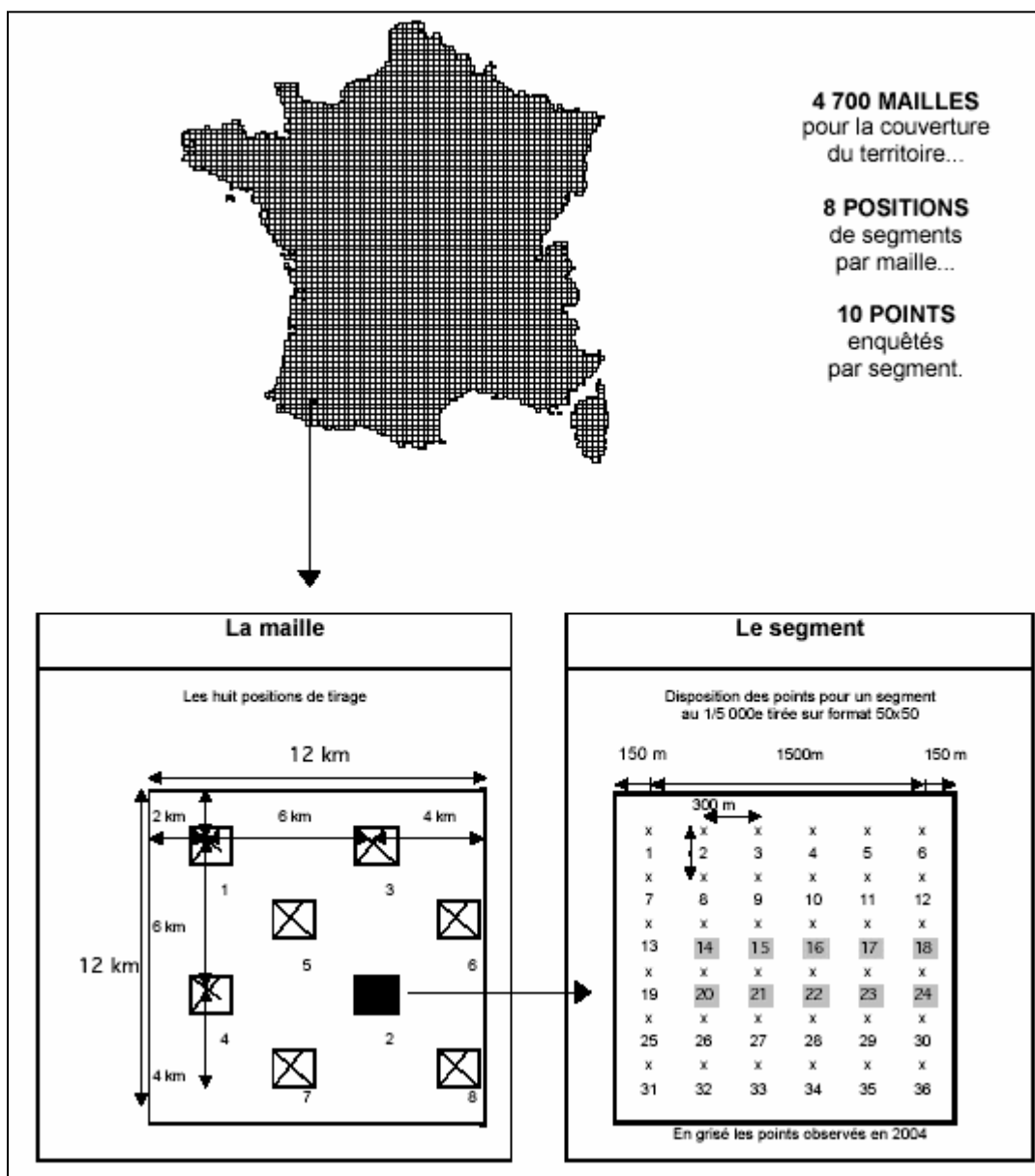


Figure 2 : Schéma du maillage de base de Teruti

b) Nomenclature Teruti

La nomenclature physique utilisée comporte 7 grandes classes d'utilisation du sol (sols à couverture boisée, sols agricoles utilisés, sols bâtis, etc.) détaillés en plusieurs sous-catégories.

Nous avons utilisé cette codification pour extraire et regrouper les catégories d'occupation du sol qui nous intéressaient en fonction des différentes étapes de cette étude. Le tableau ci-dessous (Tableau 1) montre le type de catégories existant dans la nomenclature Teruti et comment nous avons choisi de les regrouper dans notre étude (ex. terres labourables vs cultures pérennes).

Tableau 1 : Nomenclature physique Teruti et regroupements opérés dans la suite de l'étude

Nomenclature physique de l'enquête Teruti		Regroupements		Nomenclature physique de l'enquête Teruti		Regroupements	
code	Intitulé	code	Intitulé	code	Intitulé	code	Intitulé
EAUX PERMANENTES ET ZONES HUMIDES				52	jachères	3	Terres labourables
11	marais salants	0	Eaux permanentes et zones humides	53	abricotiers	5	Cultures pérennes
12	lacs	0	**	54	cerisiers	5	**
13	rivières, canaux	0	**	55	pêchers	5	**
14	marais, zones humides	0	**	56	pruniers	5	**
15	glaciers, neiges éternelles	0	**	57	poiriers	5	**
SOLS A ROCHE MERE AFFLEURANTE				58	pommiers	5	**
16	rochers, éboulis	1	Soils à roche-mère affleurante	59	mélanges des 6 espèces	5	**
17	dunes, plages de sables ou de galets	1	**	60	autres espèces fruitières que les 6	5	**
SOLS A COUVERTURE BOISEE				61	ass. des 6 espèces avec des prod. autres que fruitières	5	**
18	feuillus	2	Forêts et zones naturelles	62	ass. des autres esp. que les 6 avec des prod. autres que fruitières	5	**
19	résineux	2	**	63	vignes	5	**
20	boisement à faible densité	2	**	64	association vigne+verger des 6 espèces	5	**
21	mixtes	2	**	65	association vigne+autre culture	5	**
22	bosquets	2	**	66	petits fruits	5	**
23	arbres épars	2	**	67	jardins familiaux à dominante potagère	5	**
24	peupleraies en plein	2	**	AUTRES SOLS NI ALTERES NI BATIS			
25	peupleraies associées	2	**	68	pelouses	2	Forêts et zones naturelles
26	peupliers épars	2	**	69	friches	2	**
SOLS AGRICOLES UTILISES				70	landes	2	**
27	blé	3	Terres labourables	71	maquis	2	**
28	orge	3	**	72	haies	2	**
29	avoine	3	**	73	chemins de terre ou enherbés	2	**
30	maïs	3	**	SOLS ARTIFICIALISES NON BATIS			
31	seigle	3	**	74	chantiers	6	Zones urbanisées
32	mélanges et autres céréales	3	**	75	carrières	6	**
33	betteraves	3	**	76	décharges	6	**
34	cutures industrielles textiles	3	**	77	cimetières	6	**
35	tournesol	3	**	78	terrains vagues urbains	6	**
36	colza	3	**	79	cours de ferme	6	**
37	autre cultures oléagineuses	3	**	80	sols revêtus aréolaires sous couvert arboré	6	**
38	autres cultures industrielles	3	**	81	sols revêtus aréolaires nus	6	**
39	pomme de terre	3	**	82	sols revêtus linéaires sous couvert arboré	6	**
40	pois et petit pois	3	**	83	sols revêtus linéaires nus	6	**
41	fèves, féveroles	3	**	84	jardin d'agrément à structure complexe	6	**
42	autres legumes	3	**	SOLS BATIS			
43	pépinières, fleurs et plantes ornementales	5	Cultures pérennes	85	volumes construits de hauteur faible	6	Zones urbanisées
44	plantes sarclées fourragères	3	Terres labourables	86	volumes construits de hauteur moyenne et forte	6	**
45	autres cultures fourragères annuelles	3	**	87	serres	6	**
46	prairies artificielles	3	**	88	halles-hangars	6	**
47	prairies temporaires	3	**	89	volumes temporaires	6	**
48	prairies permanentes productives	4	Surfaces toujours en herbe	90	autres volumes	6	**
49	alpages et estives	4	**	91	volumes abandonnés	6	**
50	superficie en herbe à faible productivité	4	**	95	indeterminée	6	**
51	prés-vergers	4	**	99	zones interdites	6	**

2.1.3 Démarche de spatialisation

Deux approches de spatialisation des données extraites sur les successions de cultures sont possibles : *i*) considérer un maillage comme pertinent *a priori* pour représenter les activités agricoles : les données sont alors agrégées à l'échelle de chacune de ces mailles spatiales qui servent alors de support pour représenter les informations ; *ii*) ne pas considérer de maillage *a priori* et représenter les données individuelles à leur emplacement exact (sans agrégation) afin de comparer la spatialisation des phénomènes obtenue avec la 1^{ère} méthode.

Nos travaux portant sur la spatialisation des pratiques agricoles à l'échelle du bassin de la Seine utilisant le plus souvent la première approche, nous avons cherché le maillage spatial le plus adapté à notre zone d'étude et à notre thématique. Différents maillages spatiaux sont classiquement utilisés pour cartographier les activités agricoles, allant du maillage communal au maillage régional, en passant par les découpages en bassins versants.

Mais il existe un autre découpage qui, par la méthode qui a présidé sa délimitation au début des années cinquante, a *a priori* un sens pour décrire les activités agricoles. Il s'agit du maillage en Petites Régions Agricoles (PRA), dont les critères de délimitation portaient sur les conditions de sol et de climat et sur la nature des activités humaines, notamment agricoles (occupation du sol, systèmes de production, type d'habitat, ...). Ce découpage a été produit à l'intérieur de chaque département, par la Direction Départementale de l'Agriculture, aidée d'un groupe d'experts. Ce maillage est donc infra-départemental, mais la codification utilisée (2 chiffres pour le département, 3 pour la Région Agricole, ex. : 51317 pour la Champagne Crayeuse de la Marne, 10317 pour la Champagne Crayeuse de l'Aube) permet de retrouver les Grandes Régions Agricoles, qui ne sont pas restreintes aux limites administratives (Figure 3).

La précision spatiale des mailles PRA, qui sont au nombre de 147 sur le bassin, est relativement bonne au regard des 95 000 km² couverts par le bassin de la Seine. La superficie moyenne des PRA du bassin s'élève ainsi à 425 km², mais elle cache une importante variabilité qui s'étend de 50 km² pour les Buttes de Dammartin en Seine-et-Marne à 3600 km² dans la Champagne crayeuse de la Marne. Enfin, en tant qu'unique découpage spécifiquement dédié à l'analyse spatiale de l'agriculture par les services nationaux de statistique agricole, il constitue un maillage de référence de nombreuses enquêtes agricoles nationales, comme l'enquête Teruti.

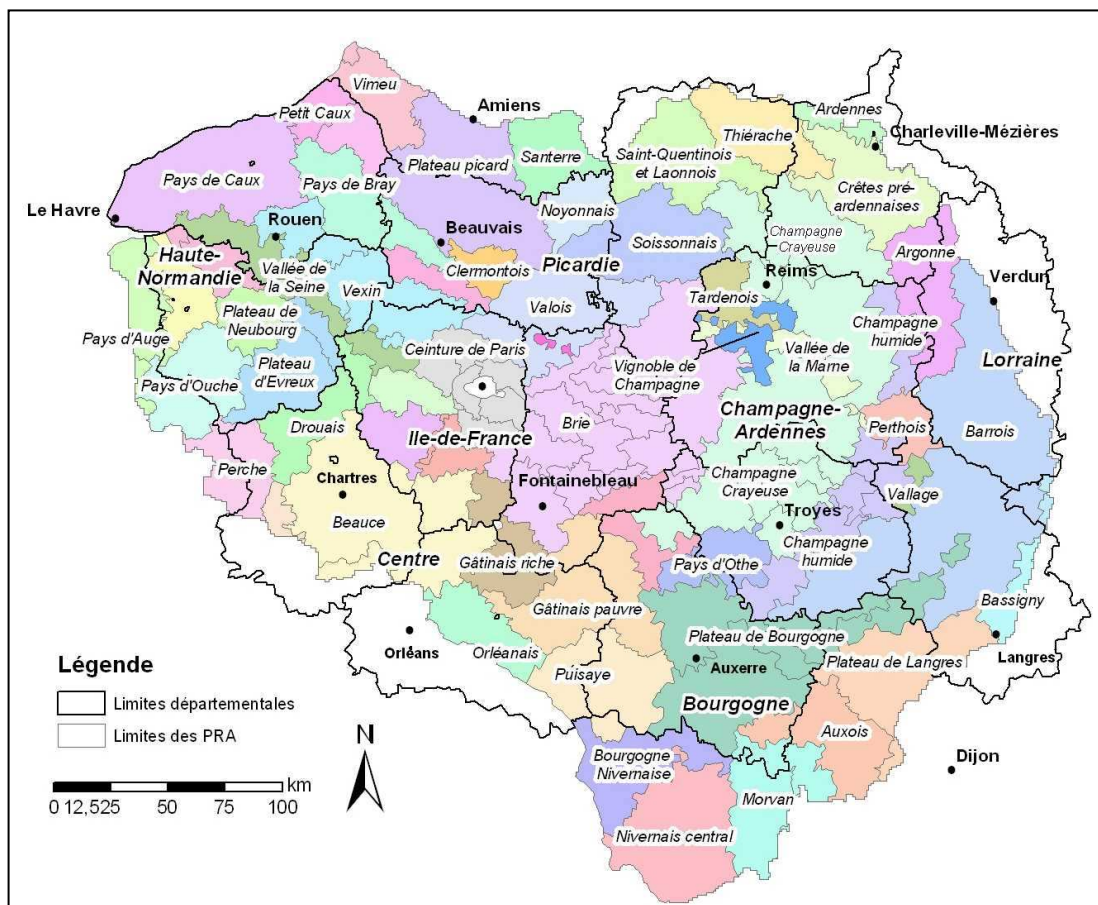


Figure 3 : Maillage du bassin de la Seine en Petites Régions Agricoles (PRA) et localisation des Grandes Régions Agricoles

Ainsi, il est possible de demander les données Teruti correspondant aux PRA qui intéressent notre étude et d'utiliser ce maillage spatial pour procéder aux extractions qui nous permettront de représenter les systèmes de culture à cette échelle.

La deuxième approche possible est de représenter les phénomènes à leur emplacement exact, à savoir la localisation du point Teruti. Ne disposant pas des coordonnées géographiques des points Teruti, nous avons cherché à les localiser sur le bassin de la Seine en nous aidant à la fois de la méthode d'échantillonnage (Figure 2) et du contour des PRA (Figure 3). Une fois les photographies positionnées sur le bassin de la Seine (Figure 4), la localisation des points est alors facile à déduire. Il s'agit bien sûr d'un calage approximatif, dont la marge d'erreur est de l'ordre de plusieurs kilomètres, mais qui nous permettra de représenter les phénomènes étudiés en s'affranchissant d'un maillage spatial prédéfini.

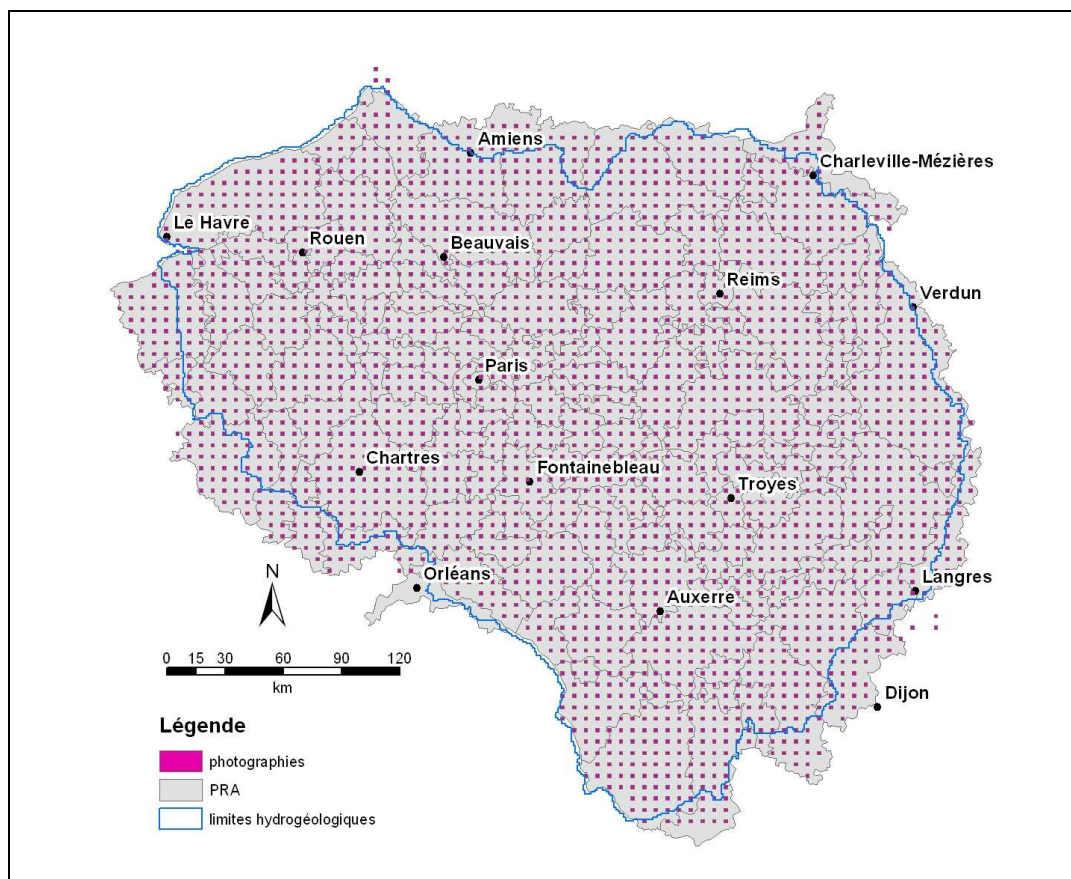


Figure 4 : Calage approximatif des photographies de l'enquête Teruti par rapport aux PRA du bassin de la Seine

2.1.4 La fouille de données par Modèles de Markov cachés (HMM)

a) Le logiciel de fouilles de données CarottAge et principes théoriques sous-jacents

Concernant l'identification des successions culturelles et de leur évolution à partir de l'enquête *Teruti*, nous avons mis en œuvre, en collaboration avec des informaticiens, une méthode de fouille de données par modèles de Markov cachés, dénommés HMM (Hidden Markov Model) (Mari *et al.*, 2000 ; Benoît *et al.*, 2001 ; Mari *et al.*, 2002). Cette méthode consiste à extraire des régularités repérées sur les parcelles échantillonnées, dont on fait l'hypothèse qu'elles évoluent selon un processus de Markov : cette hypothèse stipule que sur une parcelle, la règle de succession ne dépend que de l'occupation actuelle de la parcelle et de l'occupation de l'année ou des deux années précédentes, selon l'ordre des modèles. Les cultures successives d'une parcelle représentent ainsi un ensemble d'états directement observables qui définissent un processus stochastique représenté par une chaîne de Markov.

Dans un HMM, les états ne sont pas directement observables mais sont définis par des densités de probabilité sur l'ensemble des observations, c'est-à-dire dans notre cas sur l'ensemble des cultures. On considère ainsi que la répartition, ou la densité, des cultures dans une région donnée évolue selon un processus de Markov : sur une année donnée, elle ne dépend que de la répartition sur l'année ou les deux années précédentes. Le HMM permet ainsi de représenter deux processus stochastiques, le premier gouvernant le second (Baker, 1974).

Le premier processus est défini sur un ensemble d'états cachés pour un observateur, chaque état représentant une distribution de cultures. C'est une chaîne de Markov d'ordre un ou deux.

Le second processus est qualifié de visible. Il émet une observation à chaque pas de temps en fonction des densités de probabilité définies sur chacun des états par le processus caché. Chaque année, la chaîne de Markov produit une occupation du sol en fonction des transitions autorisées et de la densité de probabilité des cultures de l'état visité.

Les HMM peuvent être utilisés en réponse à deux objectifs de classification temporelle. Le premier consiste à définir des périodes durant lesquelles la distribution des cultures ne varie pas. Les modèles utilisés sont définis par des états (en général deux ou trois) sur lesquels sont autorisées les transitions en boucles. Ils ne permettent pas de mesurer la probabilité d'une transition entre cultures puisqu'une culture n'apparaît qu'à l'intérieur d'une répartition constituant un état. Pour répondre à cet objectif d'étude des successions de cultures, il est nécessaire d'introduire des états uniquement associés aux cultures majoritaires que nous souhaitons étudier. Le HMM obtenu possède alors deux types d'états : les états « de réserve » associés normalement à des répartitions de cultures, et les états « de Dirac » associés à une culture unique et définis par une densité où la probabilité de cette culture vaut 1 et les probabilités des autres cultures valent 0. C'est ce dernier type d'HMM que nous utilisons principalement pour identifier les successions culturelles majoritaires dans les PRA du bassin de la Seine.

b) Les données d'entrée Teruti

Les données d'entrée sur lesquelles nous allons travailler présentent donc l'aspect suivant : il s'agit d'un tableau de données comportant autant de lignes que de points Teruti enquêtés sur la zone d'étude, soit 112 849 points au total (sur 550 000 sur la France entière). Parmi ceux-ci, figurent un grand nombre de points concernés par des occupations du sol non agricoles, qui ne seront utiles que très brièvement dans cette étude (pour représenter les évolutions globales de l'occupation du sol sur le bassin de la Seine, cf § II.1). Nous avons donc sélectionné dans un 1^{er} temps, les données ne concernant que les surfaces agricoles, soit 67 667 points Teruti, puis dans un 2^{ème} temps, les données ne concernant que les terres labourables, après avoir ôté de la précédente sélection toutes les cultures pérennes (STH, vignes, vergers, potagers) qui, par définition, sont suivies par elles-mêmes et n'ont donc pas d'intérêt pour l'étude des successions de cultures.

Le corpus de données final sur lequel nous avons travaillé comporte donc 50 700 lignes sur une série temporelle de 12 ans. On entre donc dans le cadre du traitement de grandes masses de données dont seul l'usage d'un logiciel de fouille de données adapté permettra d'extraire des régularités. En effet, le tableau suivant (Tableau 2) montre un extrait du corpus de données Teruti montrant sa structuration. Outre le n° de la PRA, celui de la photographie et du point Teruti, on trouve sous forme codée la suite des cultures qui se sont succédées sur ce même point durant 12 ans. On peut observer sur cet exemple des séries où le code 48 se répète tout au long des années : il s'agit du code renvoyant aux prairies permanentes, dont on voit la continuité dans le temps, et la raison pour laquelle nous avons éliminé toutes les lignes où figurait ce code.

Tableau 2 : Extrait d'un tableau de données Teruti pour la période 1992-2003 pour la PRA 76046 (Pays de Caux) et exemple de transcription des codes Teruti

N°_PRA	N°_PHOTO	N°POINT	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	19 99	2000	2001	2002	2003
76046	9736	1	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
76046	9736	2	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
76046	9736	3	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
76046	9736	4	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
76046	9736	5	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
76046	9736	6	27	28	52	27	30	33	27	28	34	27	30	30
76046	9736	7	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
76046	9736	8	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
76046	9736	9	27	52	30	27	34	28	40	27	30	33	27	34
76046	9736	10	33	27	28	33	27	28	33	27	30	33	27	28
76046	9736	11	33	27	28	33	27	34	28	34	34	28	27	28
76046	9736	15	27	34	33	27	30	27	28	34	33	27	34	40
76046	9736	16	40	27	52	33	27	40	27	34	33	27	28	33
76046	9736	17	27	28	30	27	34	33	27	28	34	27	34	30

76046	9736	6	Blé	Orge	Jachère	Blé	Maïs	Betterave	Blé	Orge	Lin	Blé	Maïs	Maïs
76046	9736	9	Blé	Jachère	Maïs	Blé	Lin	Orge	Pois	Blé	Maïs	Betterav	Blé	Lin
76046	9736	11	Betterave	Blé	Orge	Betterave	Blé	Lin	Orge	Lin	Lin	Orge	Blé	Orge
76046	9736	17	Blé	Orge	Maïs	Blé	Lin	Betterave	Blé	Orge	Lin	Blé	Lin	Maïs

Pour les autres lignes, leur transcription du code sous forme du nom de la culture montre l'extrême complexité de ces suites ordonnées de cultures. Malgré ce que semble démontrer l'exemple choisi ici, nous faisons ici le postulat *i*) qu'il existe des régularités dans l'ordre de succession des cultures sur une même parcelle, *ii*) que les principales successions de cultures identifiées sont caractéristiques des systèmes de culture propres à une PRA ou un groupe de PRA. Notre objectif ici est donc de tenter de caractériser et spatialiser les systèmes de culture caractéristiques des PRA du bassin de la Seine au travers de leurs successions de cultures dominantes. Mais extraire des régularités de ce type de données temporelles pour en déduire les principales successions culturales nécessite des étapes successives que nous décrivons ci-dessous.

c) Les données de sortie

Le point Teruti comporte à la fois un emplacement (identifié par un n° de photo et un n° de point sur la photo) et une série de données temporelles sur son occupation du sol. Le rôle du logiciel CarottAge est de rechercher des régularités dans cette série, qu'il peut soit représenter sous forme graphique (diagramme de « Markov ») en représentant les transitions annuelles entre cultures, soit sous forme numérique en présentant la probabilité d'occurrence d'une culture ou d'une succession de cultures au sein d'un corpus de données.

- Les diagrammes de Markov

Ils permettent de visualiser comment les cultures se sont succédées d'une année à l'autre tout au long de la période enquêtée, et donc de mettre en évidence certaines évolutions temporelles. La représentation graphique permet de faire figurer les principales cultures sélectionnées en ordonnée et les années enquêtées en abscisse. Les transitions entre cultures sont représentées en traits rouges horizontaux si les transitions font se succéder une culture à elle-même et en traits obliques noirs si elle est suivie par une autre culture. L'épaisseur des traits affichée est proportionnelle à la probabilité de transition entre deux cultures données et le logiciel permet de choisir le seuil d'affichage en fonction d'une probabilité minimale.

Dans l'exemple suivant (Figure 5), nous avons choisi de représenter les principales transitions entre cultures à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Seine. Les cultures sélectionnées sont au nombre de huit, auxquelles s'ajoute un état de réserve contenant les autres cultures n'ayant pu être représentées sur ce graphique car trop peu importantes en terme de surface (tournesol, pomme de terre, etc.) ou autres surfaces agricoles (jachères).

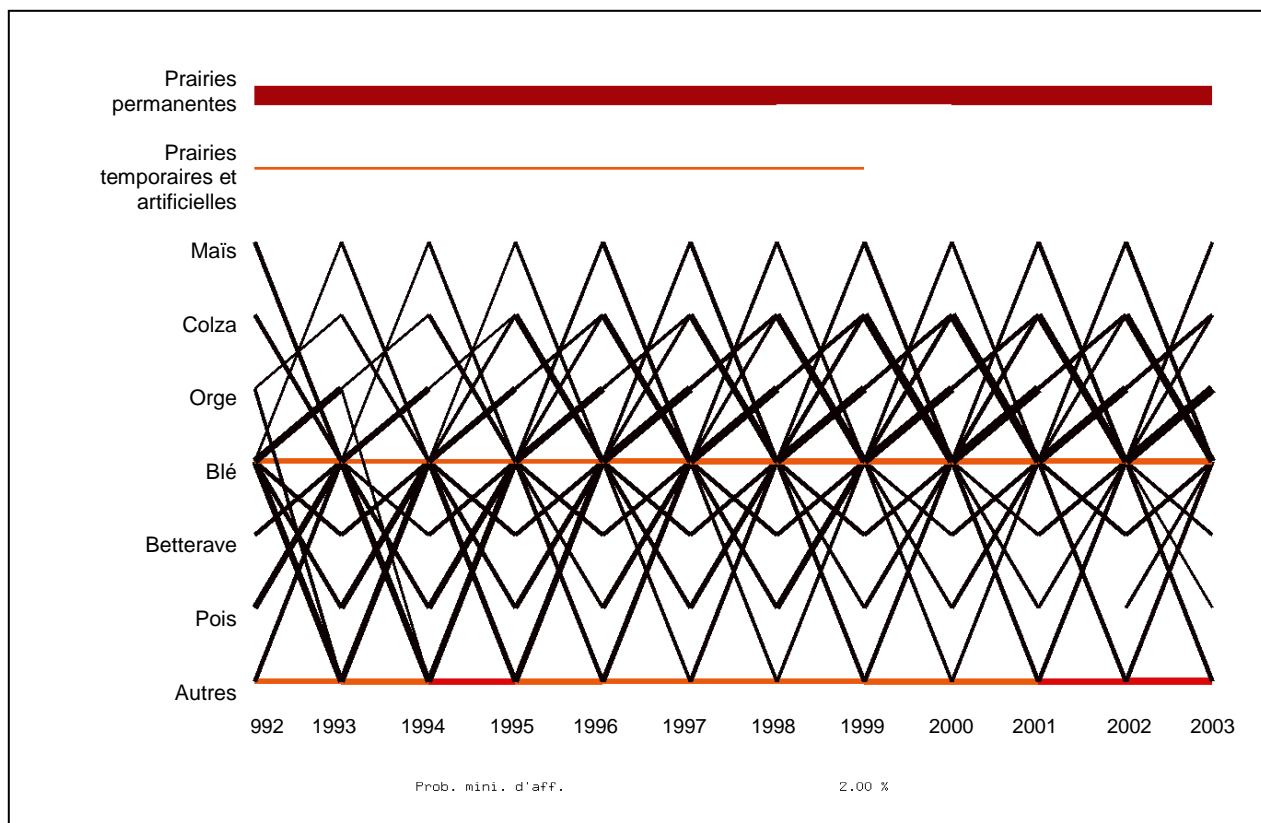


Figure 5 : Diagramme de Markov montrant les transitions entre cultures entre 1992 et 2003 sur le bassin de la Seine (Seuil d'affichage 2%)

Dans le cas de ce premier graphique, le seuil minimum d'affichage retenu est assez grossier (2%) afin de mettre en évidence les principales caractéristiques des transitions entre cultures :

- les différents types de prairies sont suivies par elles-mêmes
- la plupart des cultures, que l'on désigne comme « têtes de rotation », sont suivies et précédées par un blé (pois, betterave, colza, maïs), sauf le colza qui était essentiellement précédé par une orge jusqu'en 1994, puis de manière partagée par un blé ou par une orge à partir de cette date.
- l'orge est, sur ce graphique, toujours précédée par un blé et suivie tantôt par un colza, tantôt par une autre culture jusqu'en 1994.

Le blé est donc la culture pivot qui s'intercale entre toutes les têtes de rotation, sauf quand il est suivi par une orge, dans le cas des successions triennales, du type *colza-blé-orge*. Il est même souvent suivi par lui-même, comme le montrent les traits rouges de transition.

Au niveau temporel, la principale rupture semble donc se situer entre 1994 et 1995. La période suivante montre surtout une évolution progressive avec le renforcement des transitions menant vers le colza et l'orge et un affaiblissement des transitions vers le pois et la catégorie « autres cultures ».

En réduisant le seuil minimal d'affichage à 1% (Figure 6), on peut noter de nouvelles transitions entre cultures dont la probabilité est plus faible.

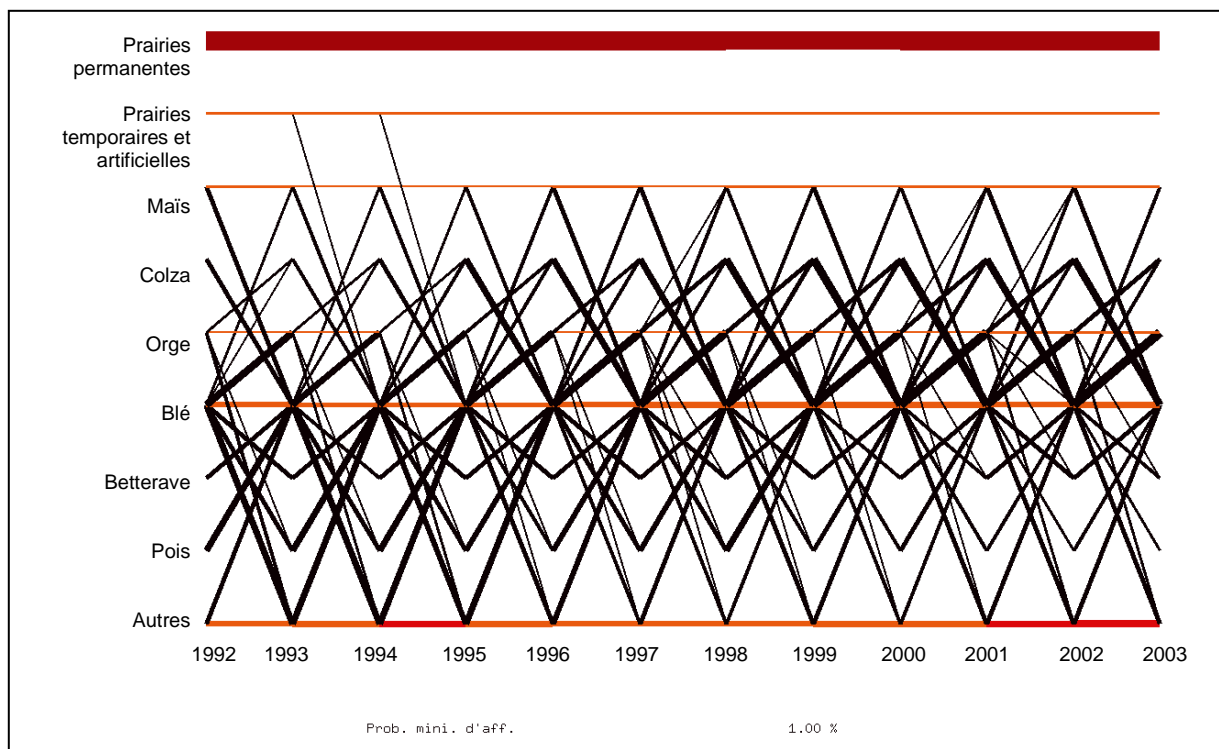


Figure 6 : Diagramme de Markov montrant les transitions entre cultures entre 1992 et 2003 sur le bassin de la Seine (Seuil d'affichage 1%)

Ce nouveau diagramme met en évidence les caractéristiques suivantes :

- - les prairies temporaires et artificielles sont majoritairement suivies par un blé (cf. 1994 et 1995). Le graphique ne donne en revanche pas d'information à ce seuil d'affichage sur les cultures qui les précèdent.
- - Certains maïs et certaines orges se succèdent parfois à eux-mêmes une à plusieurs années de suite et ce, depuis le début des années 90.
- - L'orge est également utilisée en précédent de la betterave (voir 2001 à 2003), du pois (1993 à 1999) et le maïs (en 1998, 2000 et 2001).

L'étude de ces diagrammes démontre donc que les cultures ont tendance à se suivre dans le temps selon un ordre logique que l'on nomme « successions culturelles », même si ce motif répétitif peut subir un certain nombre de variations localement ou dans le temps si on affine la précision de leur étude...

- Les listings de cultures

L'étude des diagrammes de Markov, que ce soit à l'échelle du bassin de la Seine dans son ensemble ou de la Petite Région Agricole, permet un aperçu de la manière dont les cultures s'organisent dans le temps sous forme de suite de trois cultures successives (ex : colza majoritairement précédé par une orge et suivi par un blé), mais ne permet pas de quantifier précisément les différentes combinaisons de plusieurs cultures successives sur une période donnée, ni connaître quelle sera la troisième culture rencontrée, après un blé notamment (ex. : une betterave est généralement suivie par un blé, mais quelle est la culture suivante la plus probable après le couple de culture *betterave-blé* ? un second blé ? une orge ? une betterave ? une autre tête de rotation ?).

Le logiciel Carottage présente également l'avantage de permettre d'extraire d'un corpus de données, comme les enquêtes Teruti, des tableaux présentant la liste des cultures rencontrées et leur probabilité d'occurrence que l'on peut à cette échelle d'analyse assimiler à l'assolement. Cette extraction peut se faire à l'échelle de toute la période enquêtée mais également à l'échelle d'autant de périodes égales que le souhaite l'analyste, jusqu'à l'échelle annuelle qui permet donc de reconstituer l'évolution de l'assolement annuel (voir § suivant).

Le même type d'extraction est possible en prenant en compte non plus la culture individuelle mais le couple de cultures (deux cultures consécutives), le triplet (trois cultures consécutives), etc. selon les besoins de l'étude (Tableau 3). On notera que les cultures pérennes comme les prairies permanentes gardent presque la même probabilité, ce qui est logique, quand on augmente le nombre de cultures successives recherchées par le modèle. En revanche, la probabilité des combinaisons de n cultures successives a tendance à chuter fortement au fur et à mesure que n augmente.

Tableau 3 : Extraits des tableaux de données issus l'enquête Teruti pour la période 1999-2003 à l'échelle du bassin de la Seine

1-uplet	Total	2-uplet	Total	3-uplet	Total
[ble]	30.85	[p.-perm p.-perm]	19.29	[p.-perm p.-perm p.-perm]	19,0%
[p.-perm]	19.56	[ble orge]	8.57	[orge colza ble]	3,7%
[orge]	11.64	[colza ble]	7.66	[ble orge colza]	3,4%
[colza]	8.37	[ble ble]	6.34	[ble colza ble]	3,4%
[mais]	6.32	[orge colza]	4.08	[colza ble orge]	3,4%
[betterave]	5.00	[betterave ble]	3.98	[ble betterave ble]	2,8%
[jacheres]	4.12	[ble colza]	3.66	[ble pois ble]	2,3%
[pois]	3.99	[mais ble]	3.66	[ble mais ble]	2,3%
[p.-art]	1.54	[pois ble]	3.63	[jacheres jacheres jacheres]	2,1%
[p.-temp]	1.46	[ble betterave]	3.43	[colza ble ble]	1,8%

Dans le cas de l'étude des successions de cultures avec le logiciel Carottage, c'est donc à l'utilisateur de définir à la fois :

1. Le nombre de cultures successives sur lesquelles il souhaite travailler (de 1 à 4-5, sachant que plus n est grand, plus complexes seront les sorties à analyser car quand n augmente, on multiplie le nombre de combinaisons possibles entre cultures) ;
2. la segmentation temporelle qu'il souhaite étudier (toute la période enquêtée, l'année, 2 périodes, 3 périodes à comparer entre-elles, etc.) ;
3. le niveau d'agrégation des données : le point teruti ? la PRA ? la région ou le bassin versant dans son ensemble ? etc.

Notre choix s'est porté sur l'extraction et l'étude des triplets de cultures (soit 3 cultures consécutives) pour les raisons suivantes :

1. de nombreuses successions de cultures sont de type triennal (ex : colza-blé-orge)
2. il s'agit d'un compromis idéal entre l'étude des couples de cultures, dont les combinaisons sont peu nombreuses mais difficiles à interpréter en termes de successions de cultures et les « quadruplets », très précis pour définir les successions de cultures mais générant un niveau de complexité trop élevé pour une démarche de généralisation des successions de cultures à l'échelle du bassin de la Seine.

En extrayant les triplets, on concilie à la fois un bon aperçu de la diversité des successions de cultures aux différentes échelles sans atteindre un niveau de complexité rendant la généralisation impossible par un niveau de détail trop élevé. Ce sont donc ces triplets de cultures qui représenteront les successions de cultures majoritaires que l'on souhaite représenter.

- La représentation spatiale des « états »

L'utilisation des modèles spatio-temporels permet de représenter spatialement les différents « états » recherchés, à savoir un type d'occupation du sol, un triplet de culture ou autre, à leur emplacement d'origine, c'est-à-dire la localisation du point Teruti.

On peut ainsi avoir des représentations cartographiques assez précises montrant que certains triplets de cultures sont très localisés dans l'espace, comme le triplet de culture Lin-Betterave-Blé dans la PRA Pays de Caux ou le triplet Luzerne-Luzerne-Blé en Champagne Crayeuse, permettant ainsi de valider a posteriori le maillage retenu (Figure 7).

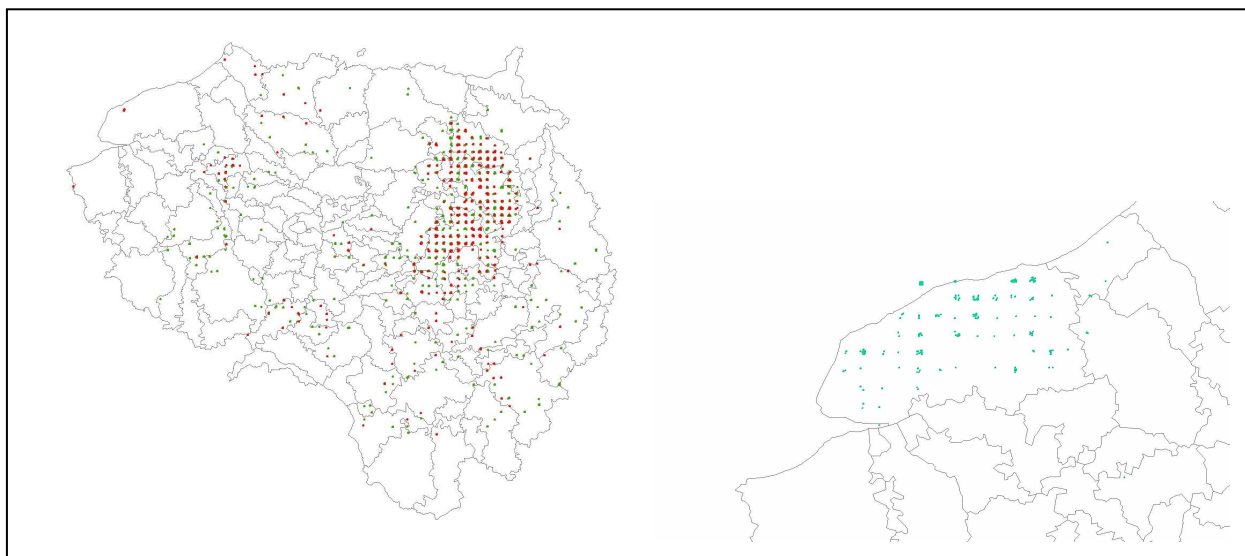


Figure 7 : Localisation du triplet Luzerne-Luzerne-blé (à gauche) sur le bassin de la Seine et du triplet Lin-Betterave-Blé en Seine-Maritime (à droite)

Dans d'autres cas, on peut représenter l'évolution de la localisation de certains triplets de cultures caractéristiques dans le temps. Dans l'exemple ci-dessous, on a demandé au modèle de rechercher tous les points Teruti qui correspondaient au triplet de cultures Colza-Blé-Orge (et ses différents états associés : Blé-Orge-Colza et Orge-Colza-Blé) à différentes périodes. Il en résulte trois cartes différentes montrant la localisation de ce triplet (figure 8). Si une évolution semble notable à l'œil nu, il est plus facile de superposer les trois cartes pour en tirer des enseignements afin de visualiser les zones où le triplet a gagné du terrain, et là où il en a perdu (Figure 9).

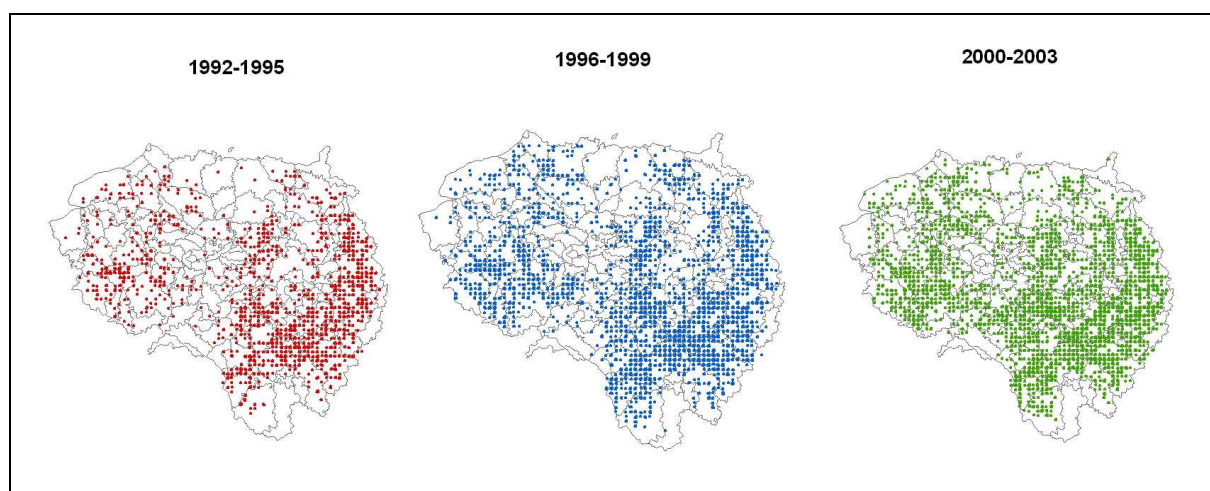


Figure 8 : Localisation du triplet de cultures Colza-Blé-Orge sur trois périodes (1992-95, 1996-99, et 2000-2003)

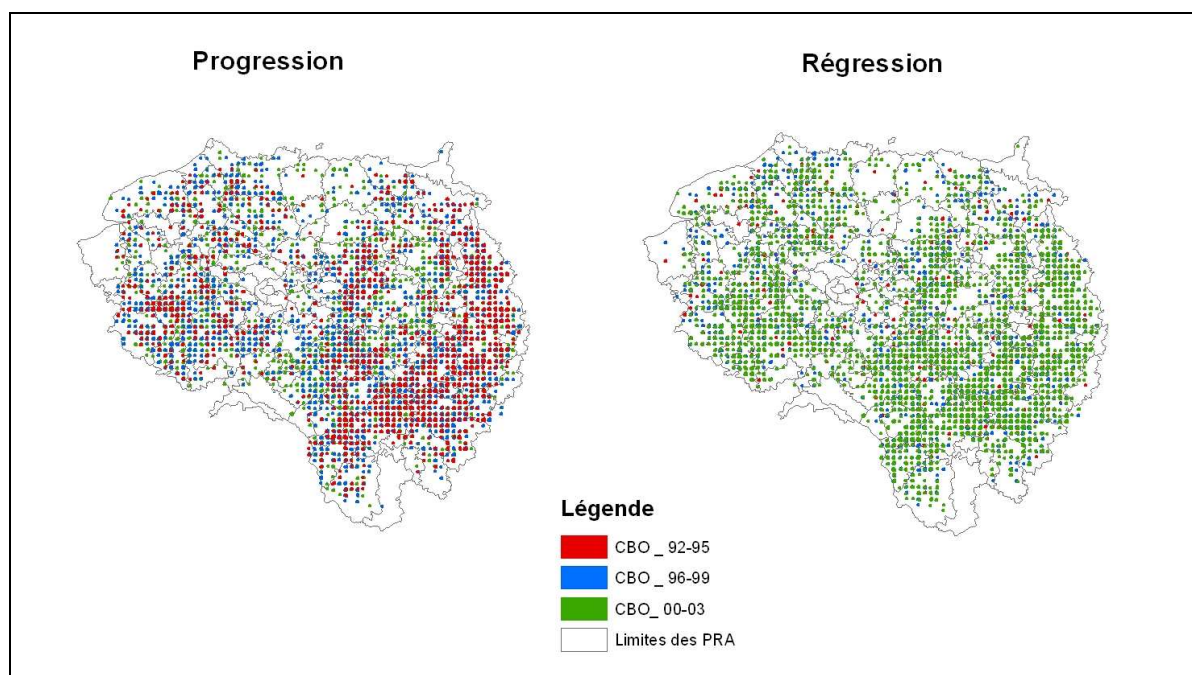


Figure 9 : Evolution temporelle du triplet de cultures Colza-Blé-Orge sur trois périodes entre 1992 et 2003

Dans le cas de la carte de gauche (Figure 9), la superposition fait apparaître la localisation du triplet CBO la plus ancienne (92-95, en rouge) au dessus et la plus récente au-dessous (2000-03 en vert). Les zones apparaissant en vert et en bleu (période 96-99) sont donc les zones où le triplet CBO a progressé dans le temps, ce qui est notable par exemple en Champagne Crayeuse ou dans le Gâtinais. Inversement, si on superpose la carte la plus récente sur les plus anciennes, on peut voir les zones où le triplet CBO a disparu (points rouges et bleus): dans le cas présenté ici, il s'agit surtout de groupes de points très diffus (assez nombreux dans les Ardennes ou dans l'Eure). On constate ainsi que les zones de progression sont plus importantes que les zones de régression...

L'utilisation de ces sorties cartographiques est pour le moment encore au stade exploratoire, mais offrira sans doute de nombreuses possibilités de traitements au cours des années à venir...

2.1.5 Validation de la méthode

L'objet de ce chapitre est de vérifier si les données Teruti et leur traitement par le logiciel CarottAge permettaient de fournir des résultats qui puissent être validés par d'autres sources d'informations. Concernant les sorties sous forme de successions de cultures (triplets ou autres), il n'existe pas d'autres sources d'informations (hormis des enquêtes à dire d'expert) qui puissent être croisées avec les extractions issues des données Teruti. En revanche, nous avons vu que les modèles utilisés pouvaient également extraire des séries annuelles d'occupation du sol, qui peuvent, elles, être comparées à d'autres sources (Corine Land Cover, RGA) et tester ainsi la fiabilité statistique du traitement des données Teruti à différentes échelles.

a) Extraction des résultats pour l'ensemble des occupations du sol

A partir du corpus de données Teruti complet, nous avons demandé au modèle linéaire d'extraire les séries annuelles des grandes catégories d'occupation du sol en % d'occupation du sol du bassin de la Seine. Pour cela, nous avons regroupé en grandes catégories les différentes classes d'occupation du sol de la nomenclature Teruti (voir Tableau 1) afin de rendre leur comparaison possible avec les données issues de Corine Land Cover 2000.

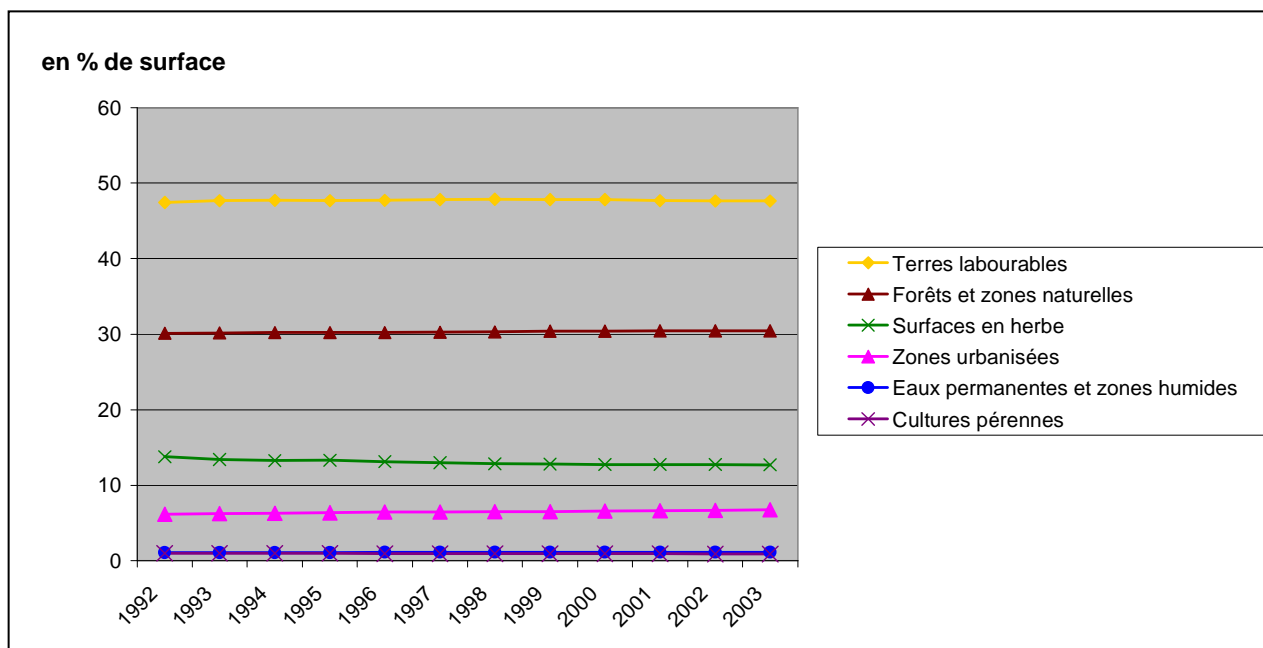


Figure 10 : Evolution de l'occupation du sol sur la bassin de la Seine (1992-2003)

La Figure 10 montre qu'en terme de dynamique d'occupation du sol, le bassin de la Seine n'a pas connu de grandes évolutions en 12 ans, si l'on considère les grandes catégories d'occupation du sol. En effet, les terres labourables représentent 47% de la surface, la forêt et autres zones « naturelles », 30% , les surfaces toujours en herbe 13% (perdent 1% en 12 ans), les zones urbanisées autour de 6-7%, les eaux permanentes et zones humides ainsi que les cultures pérennes (vignes, vergers) autour de 1%.

Si l'on compare à présent, pour l'année 2000, les données issues de Corine Land Cover et celles issues du traitement des données Teruti, on peut remarquer qu'on obtient globalement une assez bonne corrélation entre les deux sources de données, avec des biais de l'ordre de 5% au maximum. Les meilleures estimations concernent les surfaces en herbe, les zones urbanisées ou les cultures pérennes. Quant aux forêts et zones naturelles, les fortes différences peuvent s'expliquer par des différences de nomenclature avec la catégorie « autres ». Par ailleurs, on ne peut pas considérer l'enquête Corine comme référence absolue pour valider nos résultats, car sa résolution spatiale est assez faible et peut donc surestimer par exemple les surfaces en terres labourables en y incluant les chemins, bâtiments, fossés etc. L'enquête Teruti est peut être même plus fiable à ces échelles.

Tableau 4 : Comparaison des données d'occupation du sol issues de Corine Land Cover et des données Teruti en 2000 pour le bassin de la Seine

Comparaison 2000	Teruti	Corine	Diff
Terres labourables	47,8	52,0	-4,2
Forêts et zones naturelles	30,4	24,8	5,6
Surfaces en herbe	12,8	11,1	1,7
Zones urbanisées	6,6	5,9	0,7
Cultures pérennes	0,9	0,6	0,3
Autres	1,6	5,6	-4,0

Une autre approche de validation consistera ultérieurement à cartographier les points Teruti sous forme de différents états représentant les six grandes catégories figurées ci-dessus et la comparer avec la carte d'occupation du sol Corine Land Cover.

b) Extractions restreintes à la surface agricole utilisée (SAU)

En sélectionnant les codes Teruti représentant les sols agricoles utilisés, il est possible, grâce au logiciel CarottAge, de calculer l'assolement annuel moyen pour tout le bassin de la Seine. On peut

ainsi reconstituer les grandes tendances d'évolution de l'assolement au cours de la dernière décennie que ne peut retranscrire le Recensement Agricole qui n'a lieu que tous les 8 à 12 ans. Le graphique suivant (Figure 11) montre les sorties du modèle d'ordre 1 pour chaque année d'enquête Teruti.

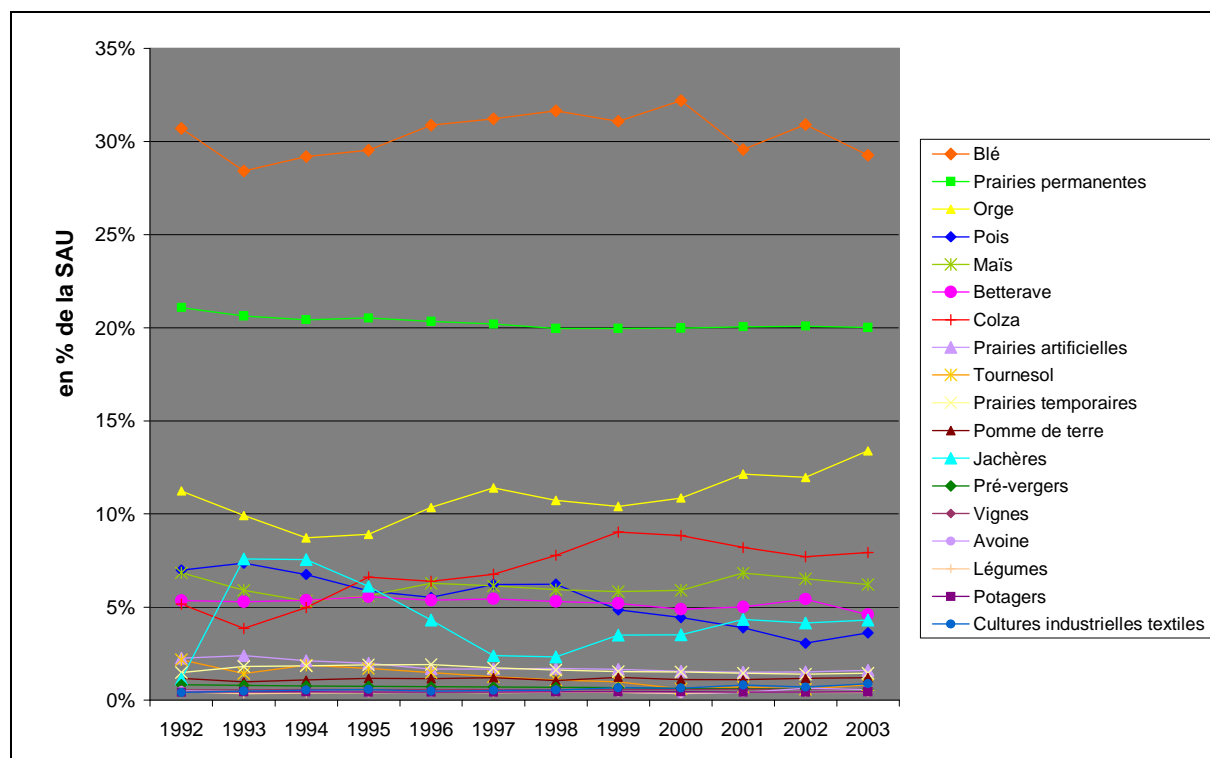


Figure 11 : Evolution des principales cultures sur le bassin de la Seine entre 1992 et 2003 par rapport à la SAU totale

Le graphique ci-dessus (Figure 11) montre quelques tendances observables depuis la mise en place de la réforme de la PAC de 1992, comme l'effet de l'obligation de « geler » 10% des surfaces COP (céréales et oléoprotéagineux). Les fluctuations observables au cours des années suivantes résultent de modifications de la législation européenne. Le pourcentage de gel obligatoire semble s'être stabilisé autour de 4% de la SAU entre 1999 et 2003.

Parmi les autres cultures, on note que le blé est de loin la principale culture du bassin de la Seine occupant, avec quelques variations, toujours environ 30% de la SAU. La culture suivante en termes de surfaces est l'orge qui semble augmenter de manière continue depuis 1994 (il passe de 9% en 1994 à plus de 13% en 2003). Le colza est la 3^{ème} principale culture depuis 1995, en augmentation continue entre 1993 et 1999 (doublement des surfaces puisqu'il est passé de 4% à 9% entre ces deux dates), mais il semble stagner, voire décliner légèrement depuis.

Le pois est, quant à lui, en régression constante depuis 1993, car il est passé de près de 7,5% à 3% de la SAU en 2002. Le maïs, comme la betterave, restent très stables sur toute la période et oscillent entre 5 et 7%. Les autres cultures sont très anecdotiques sur le bassin de la Seine. On peut citer le tournesol qui a beaucoup régressé entre 1992 et 2003, puisqu'il est passé de près de 2% à 0,6%, de même pour la luzerne qui est passée de 2,3 à 1,5%. Il faudra tenir compte de ces constats pour l'interprétation des résultats concernant les successions de cultures.

Pour valider les résultats ci-dessus, nous avons comparé les surfaces par culture entre deux types d'enquêtes : les données issues du RA 2000 et celles du traitement des données Teruti pour l'année 2000, pour toutes les PRA du bassin de la Seine (Tableau 5).

Tableau 5 : Comparaison des pourcentages de surface représentés par les différentes cultures sur le bassin de la Seine entre Recensement Agricole et données Teruti en 2000

Cultures	Teruti 2000	RA 2000
Blé	32.5	32.1
Orge	10.8	11.0
<i>maïs fourrage</i>		2.9
<i>maïs Grain</i>		3.1
Maïs	6.0	6.0
<i>avoine</i>	0.4	
<i>seigle</i>	0.1	
<i>mélanges et autres céréales</i>	0.2	
Autres céréales	0.6	1.1
Betteraves	4.8	5.0
cultures industrielles textiles	0.6	
autres cultures industrielles	0.2	
Autres cultures industrielles	0.8	1.0
Tournesol	0.6	0.7
Colza	8.9	8.5
Autre cultures oléagineuses	0.1	0.1
Pomme de terre	1.1	1.2
<i>pois et petit pois</i>	4.4	
<i>fèves, féveroles</i>	0.3	
Légumes secs et protéagineux	4.7	4.6
Autres légumes	0.4	0.5
Prairies artificielles	1.5	1.6
Prairies temporaires	1.5	1.4
Prairies permanentes productives	19.5	19.1
Superficie en herbe à faible productivité	0.5	0.3
Jachères	3.7	4.8
Fruitiers des 6 espèces	0.1	0.1
Vignes	0.6	0.6

En terme de validation, on peut considérer que les données Teruti donnent une très bonne estimation des surfaces cultivées à l'échelle d'un grand territoire comme le bassin de la Seine. Mais qu'en est-il à des échelles plus réduites comme celles de la PRA ?

Pour répondre à cette question, nous avons comparé les données issues de Teruti et du RGA pour des PRA de taille très variée en les triant en fonction de la taille de leur SAU, qui est le critère qui nous intéresse le plus ici. Nous avons retenu 5 PRA dans chacune des catégories de grandeur suivantes : les PRA comportant plus de 100 000 ha de SAU, celles comprenant une SAU comprise entre 10 000 et 100 000 ha, et celles dont la SAU est inférieure à 10 000 ha (Tableau 6). Dans la sélection des PRA, nous avons essayé de privilégier la répartition la plus représentative possible des différentes situations du bassin de la Seine.

Entre 10 000 et 100 000 ha, les écarts s'accroissent encore. Ils sont compris entre +/- 4% des surfaces entre 60 000 et 100 000 ha et +/- 8% en dessous de 30 000 ha pour certaines cultures. L'écart de 15% dans le cas des surfaces en prairies permanentes de l'Argonne de la Marne (PRA 51315) s'explique uniquement par des différences de nomenclature entre type de prairies : dans le cas du RA, 17% des prairies sont comptabilisées dans les « surfaces en herbes peu productives » alors qu'elles sont comptabilisées dans des surfaces productives dans le cas de Teruti. On note en effet que le total final de STH est le même dans les deux enquêtes.

Enfin, pour les très petites PRA (< 10 000 ha), les écarts peuvent être considérables (> à 10%). A ce niveau, l'enquête Teruti ne peut que montrer les grandes tendances, mais ne peut plus être considérée comme représentative. Cette catégorie de PRA inclut également des situations très spécifiques comme les zones péri-urbaines, où la SAU est très faible. Dans le cas de la PRA 92333, située en couronne parisienne, la totalité des points Teruti enquêtés, considérés comme surfaces agricoles utilisées, concernent des « jardins familiaux à dominance potagère », alors que le RA 2000 recense encore des surfaces en céréales et en maraîchage.

Il faudra donc tenir compte de cette hétérogénéité de fiabilité des données Teruti liée à la disparité de taille des PRA pour l'interprétation des prochains résultats, mais il faut également tenir compte du biais propre à l'enquête RA qui consiste à ramener à la commune du siège d'exploitation toutes les surfaces cultivées par les agriculteurs de cette commune, y compris si elles sont situées à des dizaines de kilomètres de cette commune. Ce biais joue assez peu sur les grands maillages mais peut être important quand on descend à des maillages fins comme certaines petites PRA qui ne regroupent que quelques communes.

2.2. Résultats et discussion

Après avoir présenté les outils et les méthodes proposés pour représenter les successions de cultures à l'échelle des PRA du bassin de la Seine, nous allons à présent aborder les résultats obtenus. Ils se décomposent en deux parties principales :

1. représentation des successions de cultures concernant l'ensemble de la période enquêtée (1992-2003)
2. représentation des évolutions entre deux périodes (1992-97 et 1998-2003).

Pour ces travaux, nous n'avons conservé que les points Teruti concernant les terres labourables, ceci afin de faire porter les traitements uniquement sur les successions de cultures et non sur les cultures pérennes comme les vignes et prairies permanentes qui induiraient des biais importants. Il en résulte une fiabilité statistique très faible pour les plus petites PRA. Cependant ces résultats peuvent déjà amener à une bonne compréhension globale de l'organisation des systèmes de cultures à l'échelle du bassin de la Seine.

2.2.1 Typologie des PRA du bassin de la Seine en fonction de leurs successions de culture majoritaires à l'échelle de toute la période enquêtée (1992-2003)

a) Etapes du traitement des données Teruti

1. Utilisation du modèle linéaire « 3 cultures » pour extraire les fréquences de triplets de cultures propres à chaque PRA et constitution d'un tableau triplets/PRA à l'échelle de tout le bassin de la Seine et pour toute la période 1992-2003 (sous forme de %)
2. Elimination des triplets redondants. On considèrera ici que le triplet colza-blé-orge est représentatif des combinaisons suivantes : blé-orge-colza et orge-colza-blé, celles-ci étant considérées comme des états successifs du même triplet colza-blé-orge, car elles respectent le même ordre des cultures. De même pour les triplets Pois-blé-betterave et Betterave-blé-pois, qui, associés aux triplets blé-pois-blé et blé-betterave-blé, peuvent être constitutifs de la même succession quadriennale betterave-blé-pois-blé. En revanche, Pois-betterave-ble et betterave-pois-blé seront considérés comme des successions différentes.
3. Sélection des triplets les plus représentatifs en terme de fréquence totale à l'échelle du bassin de la Seine et/ ou de fréquence à l'intérieur d'une ou plusieurs PRA. Il s'agit d'une étape

délicate car elle détermine une bonne part de la qualité des résultats finaux. Parmi les triplets retenus (Tableau 7), 43 seront conservés comme variables explicatives pour les analyses statistiques suivantes, car considérés comme représentant bien la diversité des situations rencontrées sur le bassin de la Seine (par ex. le triplet *LinBettB* est peu représenté à l'échelle du bassin de la Seine, mais très caractéristique d'une PRA, le Pays de Caux où il représente 2.73%). Les autres seront conservés comme variables illustratives, parce que trop faiblement représentés ou redondants avec d'autres. Certains, comme *BCB* ou *BPB*, pourtant très représentés, n'ont pas été inclus dans les analyses ultérieures car ils ne sont pas suffisamment porteurs d'informations sur la nature des successions, de même que le triplet *JJJ*. Mais tous les choix présentés ici reposent encore sur des critères purement empiriques basés sur la pratique de l'analyse des successions et non sur des critères formellement définis...

Tableau 7 : Sélection des triplets de cultures retenus pour la typologie des PRA en fonction des successions de cultures dominantes

Variables explicatives						Variables illustratives			
triplet	%	triplet	%	triplet	%	triplet	%	triplet	%
AvBO	0,09	LinBettB	0,08	PtPtPt	0,29	BAvB	0,13	LeBBett	0,07
BBB	1,82	LinBO	0,08	TBB	0,26	BBettB	3,87	LLL	0,4
BBO	1,49	LLB	0,66	TBC	0,25	BCB	3,9	MBJ	0,14
BettBB	0,78	MBB	0,68	TBM	0,07	BettBC	0,23	MBLin	0,06
BettBBett	1,16	MBM	1,34	TBO	0,42	BFeB	0,2	PdtBLe	0,07
BettBLin	0,12	MBO	0,96	TBT	0,1	BJB	0,88	PdtBO	0,12
BettBM	0,28	MMB	0,53			BLeB	0,18	PtMB	0,07
BettBO	1,07	MMM	1			BLinB	0,36		
BettPB	0,32	OOC	0,43			BMB	2,69		
BettPdtB	0,16	PBB	1,19			BPB	4,23		
BOO	0,96	PBBett	1,43			BPdtB	0,71		
CBB	1,7	PBC	0,89			BTB	0,7		
CBC	0,8	PBLin	0,16			CBFe	0,08		
CBM	0,5	PBM	0,49			CBJ	0,29		
CBO	3,16	PBO	1,53			CBLin	0,08		
JBB	0,38	PBP	0,43			FeBO	0,05		
JBO	0,47	PdtBBett	0,48			JJB	0,24		
LeLeLe	0,1	PdtBP	0,16			JJJ	1,72		

NB : Le = Légumes, M = Maïs, B = Blé, O = Orge, T = Tournesol, L = Luzerne (prairies artificielle), J= Jachère, Bett = Betterave, C = Colza, Pdt = Pomme de terre, P = Pois, Pt = Prairie temporaire, Fe = Fèverole, Lin = lin textile, Av = Avoine.

A cette étape, nous disposons d'une information quantifiée et homogène sur les successions de cultures de l'ensemble du bassin de la Seine, sous la forme de triplets de cultures majoritaires caractérisant chaque PRA. Pour la traiter et spatialiser ces informations, nous proposons deux démarches complémentaires : *i*) réaliser une typologie des PRA du bassin de la Seine basée sur les triplets de cultures sélectionnés et cartographier les classes obtenues, *ii*) réaliser une cartographie des triplets majoritaires rencontrés au sein de chaque PRA, le but de la seconde démarche étant surtout de valider et d'interpréter les résultats de la première démarche.

b) Analyse statistique

Le but de cette analyse est de regrouper les PRA qui présentent des combinaisons de triplets de cultures proches, par la construction d'une typologie basée sur une analyse en composantes principales sur les pourcentages des 43 triplets de cultures majoritaires par PRA, puis sur une classification ascendante hiérarchique sur les coordonnées des PRA sur les premiers axes factoriels. Dans un premier temps, nous avons choisi de réaliser cette classification sur les 28 premiers axes, correspondant à 95% de la variance. La classification retenue comporte 20 classes, ce qui semble un bon compromis entre une trop grande simplification et un niveau de détail inexploitable. La légende de la carte obtenue indique la fréquence moyenne du triplet majoritaire et liste tous les autres triplets dépassant 1% de fréquence moyenne dans la classe.

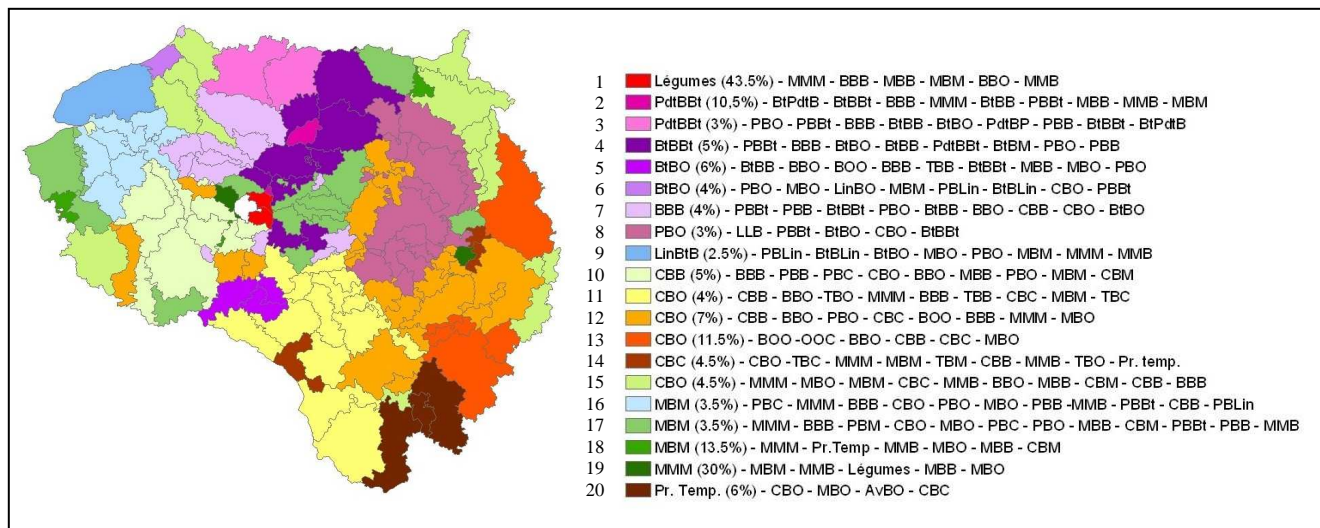


Figure 12 : Typologie des PRA du bassin de la Seine en fonction des principaux triplets de cultures observés entre 1992 et 2003

c) Cartographie des triplets majoritaires

Dans la démarche adoptée ici, il n'y a pas eu de traitement statistique préalable à la cartographie. Il s'agit simplement de représenter cartographiquement les deux principaux triplets de cultures identifiés par PRA parmi les 43 triplets sélectionnés : quelque soit leur valeur numérique, seul le rang occupé par le triplet est pris en compte ici. Le principe est le même que pour certaines cartes physiques : la symbologie de la légende utilise des aplats de couleur pour représenter le premier triplet identifié par PRA et des tramés pour le second, afin de pouvoir superposer ces deux couches d'information. L'information est donc relativement précise et détaillée sur la nature des deux principaux triplets observés mais il n'est pas possible, avec ce mode de représentation, de descendre plus finement dans les détails. La carte obtenue (Figure 13) permet donc de vérifier et de valider le contenu des classes de la typologie précédente et permet de voir sur quels critères s'est basée la classification. Mais ce type de cartographie qualitative entraîne forcément une grande perte d'information par rapport à l'ACP, qui se base sur les données quantitatives et sur un bien plus grand nombre de variables. Ces deux approches sont donc complémentaires.

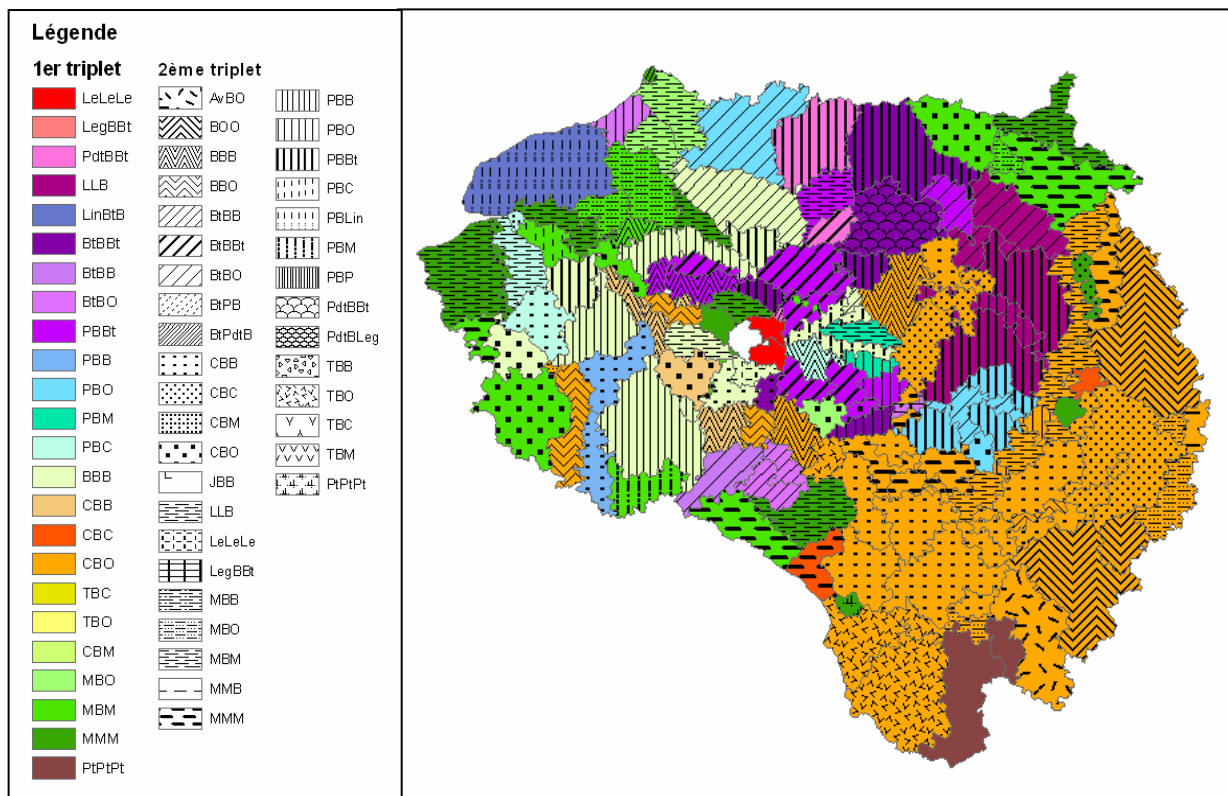


Figure 13 : Représentation des deux principaux triplets de cultures identifiés par PRA entre 1992 et 2003

d) Interprétation des résultats

La cartographie obtenue grâce à l'analyse statistique (Figure 12) montre que les grands systèmes de cultures du bassin de la Seine ont tendance à s'organiser sous forme de grands ensembles relativement cohérents, que la cartographie des deux triplets majoritaires (Figure 13) vient tantôt confirmer, tantôt infirmer. Nous décrivons donc les vingt classes identifiées par l'ACP en complétant la description, quand nécessaire, par la cartographie qualitative.

- les systèmes de cultures dominés par le colza

1) La succession *CBO* domine une grande partie du bassin de la Seine, notamment à l'est de ce dernier :

- une zone (classe 13) principalement située sur le Barrois de la Meuse et sur le Plateau de Langres qui comporte les plus fortes proportions de *CBO* (11,5%), associées avec les triplets *BOO*, *OOC*, *BBO*. Ces PRA, comme le montre également la « typologie qualitative » (Figure 13), sont indéniablement dominées par des successions de type *CBO*, secondairement *CBOO*, voire *CBBOO* ;
- Une zone (classe 12) assez fragmentée qui couvre une partie du Barrois de l'Aube et de la Haute-Marne, des Plateaux de Bourgogne, de Champagne Humide du Pays d'Othe, ainsi que des PRA plus centrales comme le Tardenois, la Brie Champenoise, des PRA du sud de l'Essonne, ainsi que le Perche d'Eure-et-Loir. Il s'agit de régions où le triplet *CBO* est bien représenté (7%), associé à des successions plus longues de type *CBBO* ou de la monoculture céréalière, comme le montre la présence des triplets *CBB* et *BBO*. D'après la « typologie qualitative » (Figure 13), cette classe est toujours dominée par le triplet *CBO*, mais le second triplet peut tantôt être *CBB*, mais également *CBC* (Barrois de la Haute-Marne, Brie Champenois), *MBM* (Champagne Humide de l'Aube) ou *MMM* (Pays d'Othe). Il s'agit donc d'une classe assez hétérogène.
- une vaste région (classe 11) couvrant une partie du Loiret, de l'Yonne et de la Nièvre (Orléanais, Gâtinais Pauvre, Puisaye, Bourgogne Nivernaise) ressemblant à la classe précédente mais caractérisée par la présence de triplets où entre le tournesol (*TBC* ou *TBO*, *TBM*). Cependant, leur fréquence est trop faible pour figurer sur la « typologie qualitative », sauf en

Bourgogne Nivernaise, Nivernais central et une partie du Gâtinais pauvre où le triplet *TBO* figure en second. Le reste des PRA semblent plutôt se rattacher au type 12 soit à des types 17 ou 18 par l'importance des triplets *MBM*, *MMM* dominés par le maïs (Orléanais, Gâtinais pauvre).

- Enfin, un dernier type (classe 15) est intermédiaire car le triplet *CBO* y domine (4,5% en moyenne) mais en association avec le maïs sous ses diverses formes (*MMM*, *MBO*, *MBM*). Ce type de PRA se retrouvent disséminées en périphérie du bassin (Bassigny, Ardenne, Argonne, Pays de Bray-Vimeu, Perche ornais). Il s'agit donc essentiellement des régions de polyculture-élevage caractérisées par la présence de maïs fourrage. La « typologie qualitative » montre cependant une certaine hétérogénéité à l'intérieur de cette classe, car la plupart sont dominées par le maïs (triplets *MBM* et *MMM* en 1^{ère} voire également en seconde place).

2) Une vaste zone (classe 10) située dans le sud-ouest du bassin de la Seine, correspondant à la Beauce et au Plateau d'Evreux est caractérisée par la présence du triplet *CBB*, associé à la monoculture du blé, mais également aux triplets *PBB* et *PBC* ; la Figure 13 semble indiquer au contraire la prépondérance numérique des triplets *PBB* et *BBB*.

3) On trouve également une classe (classe 14) comprenant deux PRA dans lesquelles le colza semble majoritairement se répéter un an sur deux (*CBC*), associé aux triplets *TBC* ou *MMM* : il s'agit de la Puisaye du Loiret, du Vallage et du Perthois de la Haute-Marne.

- les systèmes de cultures dominés par la betterave :

On distingue plusieurs grandes zones :

- une zone (classe 4) dominée par le triplet *Bt-B-Bt* au nord du bassin sur les plateaux limoneux de Picardie et sur quelques PRA de Seine-et-Marne : il s'agit de régions dans lesquelles les quotas betteraviers sont les plus importants, ce qui se traduit par des successions de cultures biennales de type *Betterave-blé* dans lesquelles la betterave revient tous les 2 ans, et secondairement des successions de cultures quadriennales *Pois-blé-betterave-blé* ; la « typologie qualitative » recoupe bien cette classe en montrant néanmoins que l'ordre entre les triplet *BtBBt* et *PBBt* peut être interverti, et que le Soissonnais de l'Aisne comporte en 2^{ème} position le triplet *PdtBBt*.
- une zone voisine (classe 7) qui couvre une partie de l'Oise (Plateau Picard, Clermontois, Vexin) et quelques PRA de Brie : cette zone ressemble à la précédente, mais la monoculture de blé (*BBB*) y est devenu le principal système de cultures et la succession quadriennale *Pois-blé-betterave-blé* y domine sur la succession biennale *Betterave-blé* ;
- deux zones où les triplets comportant la pomme de terre associée à la betterave sont dominants. Il s'agit d'une part 1) du Soissonnais de l'Oise (classe 2), d'autre part, 2) du Santerre et du Plateau Picard de la Somme (classe 3);
- une petite zone (classe 5) constituée de 3 PRA situées au sud du bassin de la Seine, composant la région agricole du Gâtinais Riche, dans laquelle la betterave est cultivée sous forme de successions triennales *Betterave-blé-orge* ou *Betterave-blé-blé*, voire quadriennales sous forme de successions *Betterave-blé-blé-orge* ; cette classe est bien identifiée également par la « typologie qualitative ».
- une vaste zone (classe 8), très bien délimitée, caractérisée par la présence de luzerne cultivée deux ans de suite suivie par un blé (*LLB*) : il s'agit de la Champagne Crayeuse où de nombreuses successions de cultures débutent par ce triplet, mais où on trouve également une grande diversité de cultures et de successions associées... la typologie qualitative montre que l'ACP est très sensible à la présence du triplet *LLB*, même en faible proportion car il y a en réalité une forte diversité à l'intérieur de cette classe : le sud de la Campagne Crayeuse est dominé par les triplets *PBO* et *PBBt*, tandis que la Champagne Humide de la Marne est dominée par le triplet *CBO*.
- Enfin, on trouve en Normandie, 2 PRA atypiques : le pays de Caux (classe 9), caractérisé par les triplets *LinBtB* et *PBLin*, et le Petit Caux (classe 6) par les triplets *BtBO*, *PBO* et des triplets associant ces cultures au lin textile.

- les systèmes de cultures dominés par le maïs :

1) Une classe relativement hétérogène (classe 17), regroupe des PRA aussi diverses que le Perthois, une partie de la Brie, du Pays d'Ouche et du Pays d'Auge, la Beauce Dunoise. Si les triplets majoritaires sont théoriquement *MBM* et *MMM*, elles présentent des triplets plus typiques des régions

céréalières comme *BBB*, *PBM*, *PBC* ou *PBP*. Il est donc difficile de dire ici si le maïs cultivé dans ses successions est plutôt grain ou fourrager, car l'enquête Teruti ne montre pas la distinction entre les deux. La typologie qualitative montre que cette classe regroupe en effet des PRA très hétérogènes en termes de triplets majoritaires, notamment celles qui composent la Brie : bien qu'elles comportent encore du maïs, elles sont plutôt dominées par des triplets *CBO-BBB* (Tardenois de l'Aisne), *MBO-CBO* (Brie Humide), et notamment *PBM* (vallées, Brie laitière, Brie Est, Beauce Dunoise). D'autres, comme le Pays d'Auge ou la Ceinture de Paris, sont en revanche dominées par le triplet *MMM*, puis *MBM*.

2) La classe 16 occupe une partie de la Haute-Normandie (Pays d'Ouche, Roumois, Lieuvin, etc.). Elle est assez proche de la classe précédente car elle est dominée également par des triplets *MBM*, *PBC*, *MMM*, et *BBB* mais elle est discriminée par l'ACP car elle comporte, même en très faible présence, des triplets où figure le lin textile : *PBLin*, *CBLin*, voire *BtBLin*, que la typologie qualitative ne peut mettre en évidence. Le maïs cultivé dans ces PRA y est plutôt le maïs fourrage.

3) Enfin, on trouve deux classes très peu représentées qui comporte surtout du maïs conduit de manière intensive : 1) une classe (classe 18) où le maïs est majoritairement conduit un an sur deux interrompu par un blé (*MBM*), mais également en monoculture (*MMM*) associée à de la prairie temporaire (Pays d'Auge, Thiérache des Ardennes), 2) une classe (classe 19), essentiellement composée de maïs en monoculture (une PRA de la vallée de la Seine et une de la Champagne Humide de la Haute-Marne).

- Les autres catégories

Il existe également une classe où dominant les prairies temporaires (classe 20) qui regroupe deux PRA situées au sud-est du bassin de la Seine (Morvan et Auxois).

Enfin, on distingue un type de PRA caractérisé par l'importance des surfaces légumières (classe 1) : celui-ci ressort très nettement autour de l'agglomération parisienne (« couronne maraîchère »).

2.2.2 Evolution temporelle des successions de cultures sur le bassin de la Seine : Segmentation en 2 périodes (1992-97 et 1998-2003)

Pour voir si des évolutions ont eu lieu au cours de la période enquêtée, nous avons scindé l'échantillon de données en deux périodes égales (1992-97 et 1998-2003) et refait pour chacune des périodes les traitements réalisés dans la partie précédente. Ceci nous a permis de mettre en évidence certaines évolutions temporelles dans la composition des successions de cultures du bassin de la Seine.

a) Evolutions à l'échelle du bassin de la Seine dans son ensemble

Avant de procéder à la spatialisation des types de successions de cultures rencontrés à l'échelle de la PRA et leur évolution entre les deux périodes, la première étape consiste à représenter leur évolution globale à l'échelle du bassin de la Seine. Le graphique ci-dessous (Figure 14) montre le pourcentage d'observation des triplets les plus représentatifs sur la période 1992-2003 et leur évolution entre le début et la fin de cette période (soit 92-97 et 1998-2003).

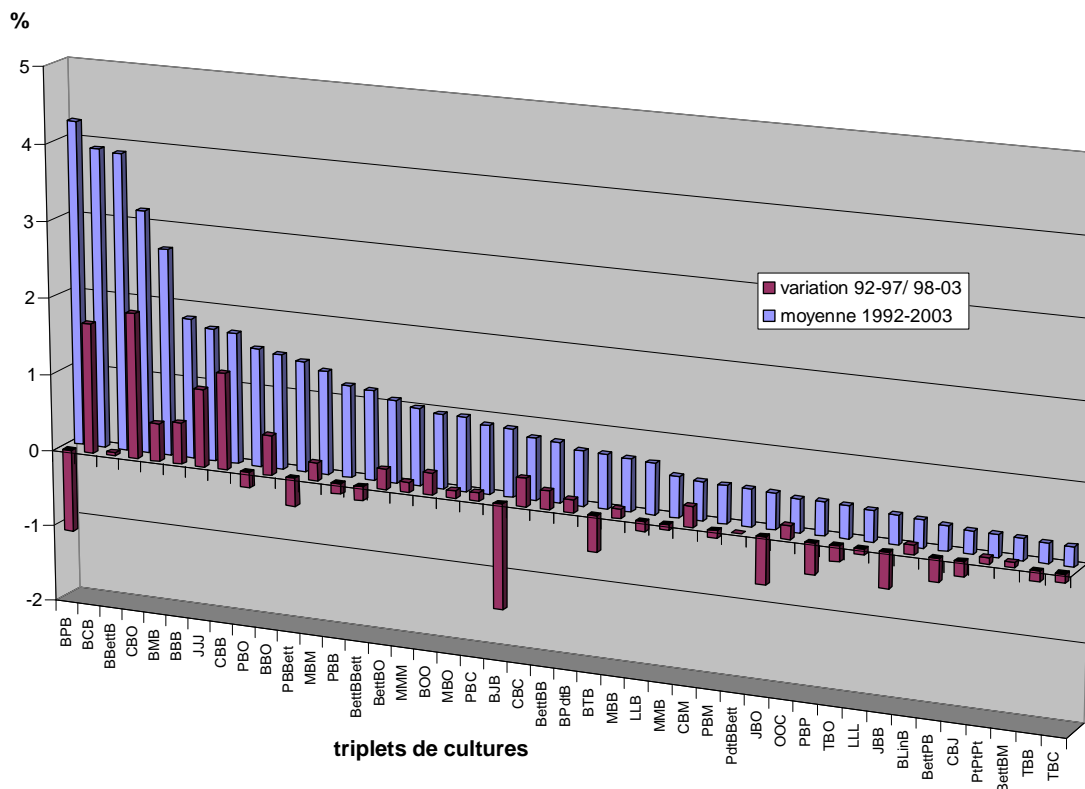


Figure 14 : Pourcentage d'observations des principaux triplets de cultures sur le bassin de la Seine entre 1992 et 2003 et comparaison de leur évolution entre deux périodes

Les principales évolutions constatées sur le bassin de la Seine résultent à la fois *i*) des évolutions de l'assolement constatées entre 1992 et 2003 (Figure 11), comme la diminution des surfaces en pois, tournesol et luzerne et l'augmentation des surfaces en colza et orge qui se répercutent logiquement sur les successions de cultures, et également *ii*) des changements de pratiques des agriculteurs.

Ainsi il est logique de constater que les plus fortes évolutions (en relatif) concernent en positif les triplets où le colza est principale tête de rotation : *CBB* +123%, *CBO* +89%, *BCB* +57%, *OOC* +55%, *CBC* +62%, ou associé à une autre tête de rotation : *CBLin* +175%, *BettBC* +90%, *CBM* +76%, et en négatif, les triplets où le tournesol et le pois figurent comme têtes de rotation : les triplets comportant un tournesol ont perdu entre 40 et 60% de leur fréquence et les triplets comportant un pois entre 10 et 60%, à l'exception du triplet *PBC* qui a gagné 13%.

Parmi les plus fortes diminutions, figurent les triplets comportant une ou deux années de jachère (*BJB* -80%, *JBO*, *JBB* -75%, *JJB*, *MBJ* -55%, *CBJ* -46%) montrant le phénomène suivant : la jachère qui au début de la Réforme de la PAC était essentiellement « rotationnelle », et donc intégrée à la succession de culture, est devenue fixe sur de nombreuses parcelles comme le montre l'importance du triplet *JJJ* (+85%).

Une autre évolution notable est le développement des triplets de cultures purement céréalières comme *BBB* (+35%), *BBO* (+43%) et *BOO* (36%), pour ne citer que les plus représentatifs.

En conclusion, on peut dire que l'on assiste en quelques années à une grande simplification des successions de cultures du bassin de la Seine, avec un tendance générale à la spécialisation des parcelles dont certaines sont dédiées à la culture du blé ou à la jachère, tandis que les autres terres labourables sont progressivement envahies par les successions à base de colza (*CBO*, *CBB*, *CBM*, etc.).

b) Spatialisation à l'échelle des PRA du bassin de la Seine

Dans cette partie, nous reprenons la même démarche que celle présentée dans le § 1.2.1, à savoir :

- conduite d'une ACP et d'une CAH pour chacune des deux périodes en sélectionnant les 43 principaux triplets retenus dans la partie précédente (même si parmi ceux-ci figurent des triplets insignifiants ou inexistant pour l'une ou l'autre des périodes) ;
- réalisation de cartographies qualitatives pour chacune des périodes sur les deux triplets majoritaires identifiés par PRA.

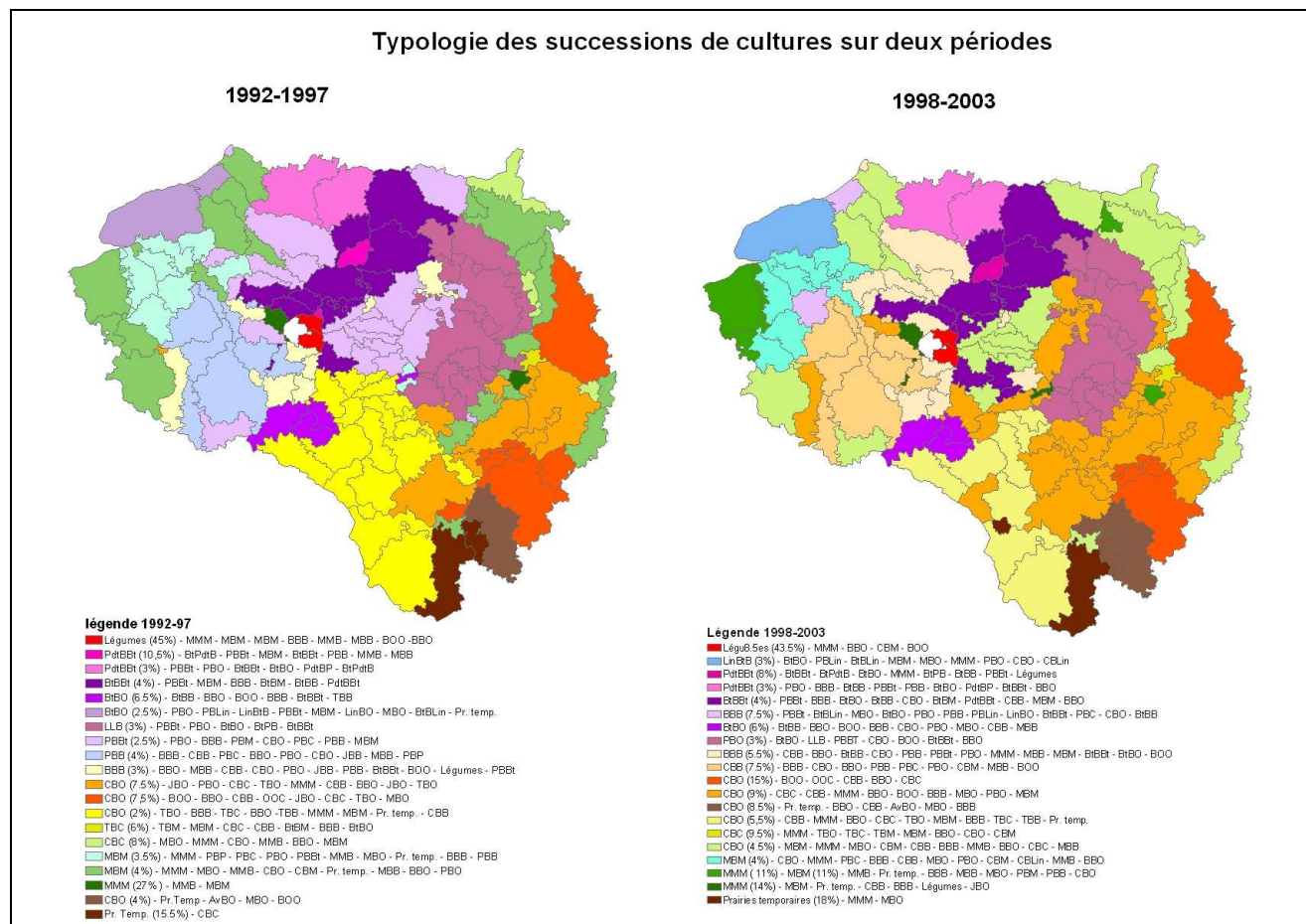


Figure 15 : Typologies des PRA du bassin de la Seine en fonction des principaux triplets de cultures observés en 1992-97 et 1998-2003

Le résultat cartographique de ces typologies n'est pas faciles à analyser car, si les variables utilisées pour conduire les ACP et le nombre de classes sont les mêmes entre les deux cartes (Figure 15), le contenu final des 20 classes est différent. Le premier constat que l'on peut faire est que les groupes de PRA identifiés par l'ACP restent relativement stables dans le temps, démontrant une certaine cohérence des résultats et des méthodes employées, ainsi que des systèmes de cultures du bassin de la Seine, et du découpage utilisé pour les représenter. On retrouve bien les grandes régions agricoles suivantes : Beauce, Gâtinais riche, Plateau picard, Champagne crayeuse, Morvan, etc. Concernant les changements que l'on peut noter, nous nous appuierons également sur la cartographie dite « qualitative » (Figure 16) pour les valider.

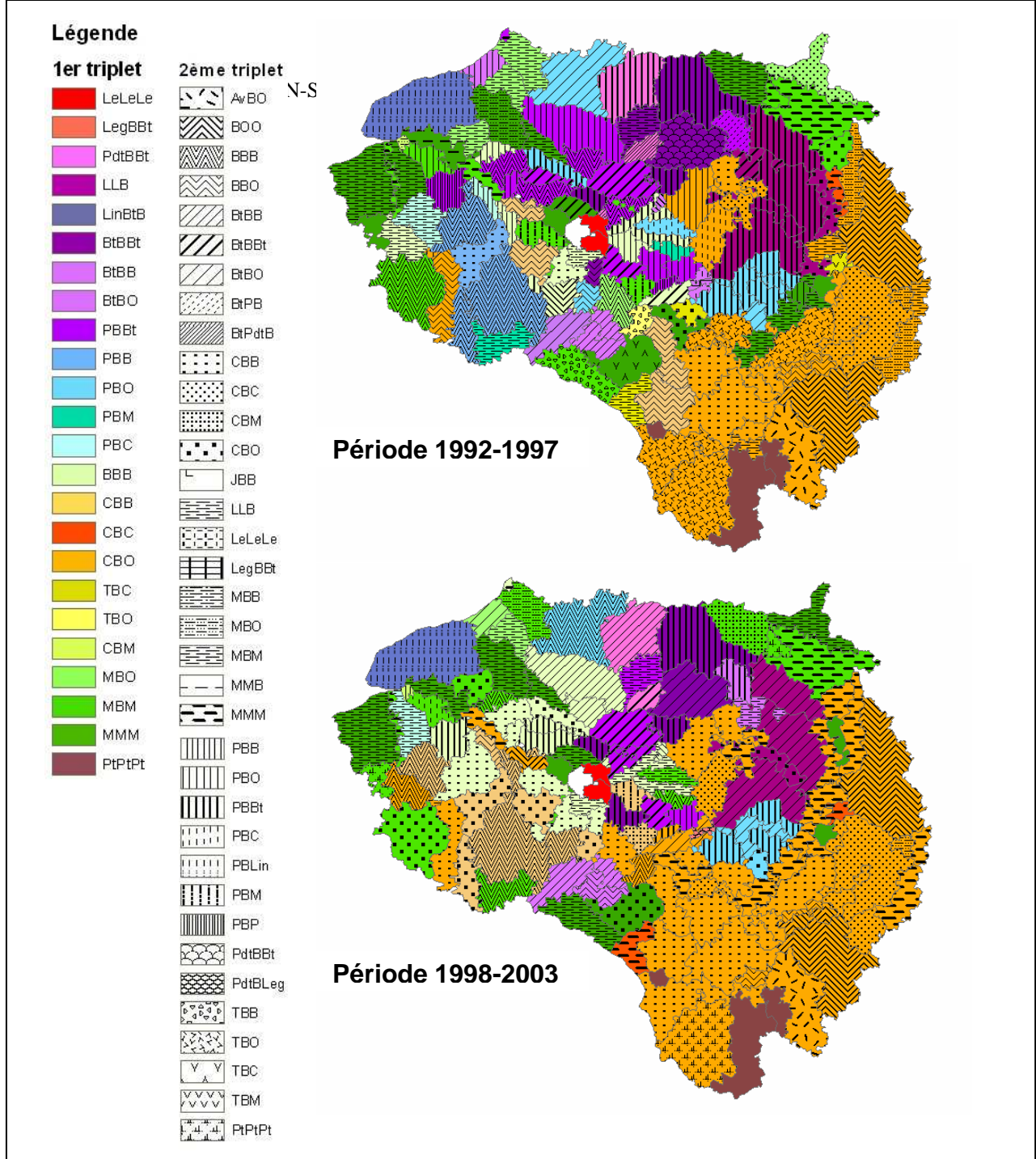


Figure 16 : Représentation de l'évolution des deux principaux triplets de cultures identifiés par PRA entre 1992-1997 et 1998-2003

Pour interpréter les changements observables entre les deux périodes, nous nous appuyons sur les principales évolutions figurant sur le graphique 14. Parmi ceux-ci, on peut noter :

1. la progression du triplet *CBO* : Celle-ci se remarque particulièrement à l'est, sur les plateaux du Barrois de Meuse et de Langres (classe orange foncé) où ce triplet était déjà largement majoritaire durant la 1^{ère} période, mais où il progresse encore (passant de 7,5 à 15%). Mais c'est surtout la classe voisine (couleur orange) qui est en forte expansion géographique : il s'agit d'une classe assez hétérogène dans laquelle le point commun entre les PRA est la prédominance du triplet *CBO*. Durant la 1^{ère} période, elle était limitée au Barrois de la Haute-Marne, au Plateau de Bourgogne et au Pays d'Othe et a gagné ensuite les PRA voisines ou centrales. Selon les cas, le triplet *CBO* s'est développé au détriment des triplets contenant du pois (Brie champenoise, Tardenois) ou du tournesol (sud Seine-et-Marne, Yonne), voire du maïs (Champagne Humide). Il apparaît également que dans les régions périphériques (Ardennes, Bassigny, Perche, Pays de Bray) où dominait le triplet *MBM* en 1992-97 (de

couleur verte), le triplet dominant soit également devenu le triplet *CBO* (couleur vert clair) en 1998-2003 (ce qui n'est pas toujours le cas d'après la Figure 16).

2. Le triplet *CBB* semble, quant à lui, plutôt caractéristique des PRA du sud du bassin : il semble être devenu le triplet dominant en Beauce en remplaçant le triplet *PBB* qui a subi un fort recul avec le déclin du pois, comme le montre la transition de couleur entre les deux périodes (classe bleu ciel puis orangée). Il a également beaucoup progressé dans certaines PRA de l'Oise et de l'Essonne, où il est devenu le second triplet après la monoculture du blé en 1998-2003 (classe orangé clair).
3. Le triplet *BBB* est majoritaire depuis le début des années 90 dans certaines PRA de Beauce et de Brie, puis s'est propagé dans les PRA de l'Oise (op. cit.) et de l'Eure, notamment sur le Plateau du Neubourg (Figure 16). Il est également très présent, mais en seconde place, dans toutes les PRA beauceronnes et du Pays d'Ouche. En revanche, on le retrouve très peu dans les PRA de l'Est où les successions céréalières se développent également, mais dans lesquelles le blé est associé à l'orge (triplets *BOO* ou *BBO*).

2.3. Conclusion

Les différents résultats présentés dans ce rapport montrent la pertinence de l'utilisation des données Teruti traitées par les modèles de Markov cachés pour analyser et identifier les systèmes de cultures dominants à l'échelle du bassin de la Seine. Cependant, il reste un certain nombre de biais à corriger compte-tenu de l'hétérogénéité de la taille des unités spatiales utilisées car nous avons vu que certaines PRA sont de trop petite taille pour constituer un échantillon suffisant de points Teruti. Nous proposons donc dans une prochaine étape de réaliser un nouveau zonage à partir de l'agrégation de PRA entre-elles basée à la fois sur des critères de taille (SAU, nombre de points Teruti ?), et de systèmes de cultures dominants (successions de cultures et/ou assolement ?). Ce nouveau zonage du bassin de la Seine constituera aussi bien un support pour produire de nouveaux résultats (cartographies), qu'un résultat en lui-même. En effet, si le maillage PRA présente de nombreux avantages pour l'étude des activités agricoles à l'échelle du bassin de la Seine, il est dans certains cas trop fin pour traiter certaines données spatiales comme l'enquête Teruti ou l'enquête Pratiques Culturelles sur Grandes Cultures. Ce nouveau maillage pourra être mobilisé pour les prochaines simulations de dégagement de gaz à effet de serre, ainsi que pour améliorer la localisation des groupes-types d'exploitations utilisés par le couplage AROPAj-STICS.

Par ailleurs, il restera également à développer les applications basées sur les modèles spatio-temporels permettant d'avoir une représentation précise de la localisation des phénomènes étudiés en s'affranchissant d'un maillage préexistant. Les perspectives de ce nouvel outil semblent prometteuses si son développement s'accompagne de la création d'un outil de géostatistique permettant d'en exploiter les résultats de manière rigoureuse (détermination de « clusters », de zones de transition, etc. en fonction de la densité de points).

Tous ces travaux sont très novateurs et exploratoires mais souffrent cependant d'un grand inconvénient : ils sont totalement dépendants d'une seule source d'information, les données d'enquête Teruti, dont l'échantillonnage a été fortement remanié au cours des dernières années, à la fois pour des raisons budgétaires et administratives (uniformisation à l'échelle de l'Union Européenne). Les méthodes présentées ici nécessitent une continuité de l'échantillon et une certaine durée de la période enquêtée, il sera impossible d'actualiser avant longtemps les résultats présentés ici, si toutefois l'enquête Teruti-Lucas ne subit pas une nouvelle modification de son échantillonnage au cours des prochaines années et si l'échantillon de points enquêtés reste suffisant par rapport à nos objectifs....

3. Typologie spatialisée des risques contributifs de dégagement de N₂O au sein du bassin de la Seine

Nous traiterons les données sur l'ensemble du bassin de la Seine, que nous découpons en Petites Régions Agricoles (PRA) pour identifier les localisations d'itinéraires techniques et d'assolement.

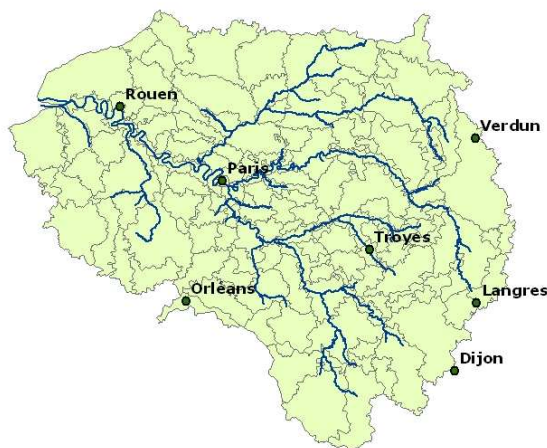


Figure 17 : répartition des 145 petites régions agricoles du bassin de la Seine

Deux bases de données, concernant l'agriculture du bassin de la Seine (Figure 17), sont mobilisées :

- une base construite à partir de « dire d'experts » élaborées par Céline Schott, permet de lire les évolutions sur les conduites culturales sur un long pas de temps : 1970 à 2005,
- une base statistique élaborée par le SCEES (enquêtes pratiques culturales) permet une information de 1994 à 2001.

3.1. Analyse de l'évolution des risques liée à l'évolution des itinéraires techniques de conduite du blé dans le bassin de la Seine

3.1.1 Description des données mobilisées

Ces données sont obtenues à « dire d'expert ». Les experts sont principalement des conseillers agricoles, qui ont une forte et ancienne expérience de terrain (nombreux contacts avec les agriculteurs), qui travaillent dans des Chambres d'Agriculture ou des coopératives agricoles. Au cours d'un entretien directif, ils ont pu reconstituer les pratiques agricoles dominantes dans leur secteur géographique et leur évolution depuis 1970. Les informations obtenues n'ont donc pas une précision à la parcelle mais représentent les principales tendances d'une PRA donnée.

A l'aide de la cartographie, les figures suivantes illustrent la distribution spatiale des observations des cultures enquêtées par PRA, en prenant l'exemple des cultures les plus représentatives. Le nombre d'observations par culture correspond au nombre d'itinéraires techniques différents que les experts ont identifiés au cours des 35 années par PRA.

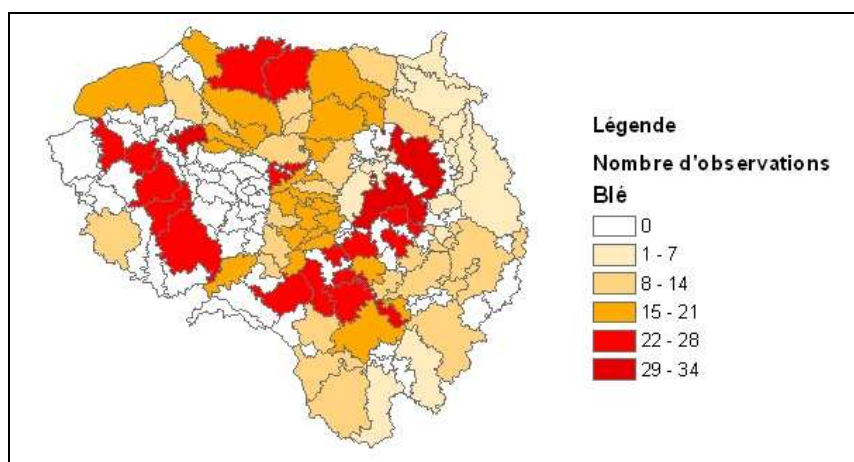


Figure 18 : répartition du nombre de ITK¹ sur blé identifiés par les experts de 1970 à 2005

Le blé est la culture la plus répandue sur l'ensemble du bassin de la Seine. En effet, 45% des cultures de blé de la France sont présentes sur le bassin. En outre, elle est généralement la culture principale dans l'assolement des différentes PRA. Cela explique le nombre important d'observations (1099) bien réparties sur l'ensemble du bassin (18), et notre choix méthodologique consiste à la retenir comme culture d'étude pour la thématique de l'évolution spatio-temporel du risque de dégagement de N₂O.

3.1.2 Présentation des variables retenues pour les analyses de 1970 à 2005

Les variables quantitatives choisies pour décrire l'évolution des itinéraires techniques du blé et en particulier la fertilisation azotée sont celles qui sont à la fois identifiées comme influençant les dégagements de N₂O dans la bibliographie présentée en *annexe1* et celles qui étaient disponibles dans la base de données construite par C. Schott. Ainsi, nous avons retenu :

- le rendement (Rendement) en t/ha,
- la date de semis (Semis)²,
- la date de récolte (Récolte),
- le pourcentage de surface labourée (Labour),
- le nombre d'apports minéraux (Nb app),
- la dose totale des apports (Dose totale) en unité d'azote (U N).

En outre, quelques variables qualitatives supplémentaires sont utilisées :

- le département,
- la période,
- la culture précédente.

Concernant les autres cultures, les mêmes variables ont été globalement conservées et le même type d'analyse a été effectué.

Pour le maïs grain et le maïs ensilage, la variable « pourcentage de surface labourée » n'a pas été choisie lors des analyses car elle n'apportait pas d'information et une autre variable a été ajoutée. Ainsi, l'analyse tenait compte également de la variable « dose totale d'apports organiques ».

¹ ITK : itinéraires techniques

² Pour utiliser les variables « date » dans un format quantitatif, elles ont été transformées en jours « julien ».

Tableaux 8 et 9 : étude des 1099 observations de blé

Description des variables concernant les observations de blé recueillies sur le bassin de la Seine

	Rendement	Dose totale	Récolte	Semis	Labour	Nb App
Unités	t/ha	U N	jour julien	jour julien	% des parcelles labourées	
Indicateurs de position :						
Minimum	3,20	70	191,00	257,50	20	1
Décile 1	5,50	120	204,30	281,00	50	2
Quartile 1	6,50	150	209,00	288,50	70	2
Médiane	7,50	180	211,50	296,50	100	2
Quartile 3	8,50	200	219,50	301,00	100	3
Décile 9	9,00	200	227,00	306,90	100	4
Maximum	9,40	250	249,75	327,00	100	4
Indicateur de dispersion relative	0,27	0,28	0,05	0,04	0,30	0,50
Indicateur de dissymétrie	0,00	-0,20	0,52	-0,28	-1,00	1,00
Moyenne	7,29	171,04	214,18	295,56	86,03	2,58
Ecart type	1,31	31,94	8,94	10,57	23,40	0,70
Effectif	1099	1099	1099	1099	993	1099

Description des fertilisations azotées

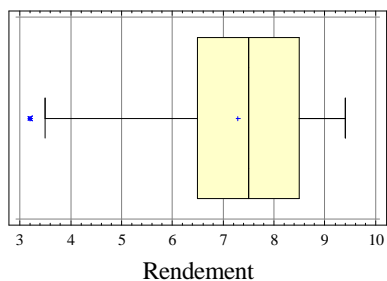
	Dose App 1	Dose App 2	Dose App 3	Dose App 4
Indicateurs de position :				
Minimum	20	20	20	20
Décile 1	50	50	30	30
Quartile 1	50	60	40	30
Médiane	60	80	40	30
Quartile 3	80	100	50	40
Décile 9	90	110	70	40
Maximum	120	150	130	50
Indicateur de dispersion relative	0,50	0,50	0,25	0,33
Indicateur de dissymétrie	0,33	0,00	1,00	1,00
Moyenne	64,82	81,43	46,04	32,56
Ecart type	17,74	24,83	19,13	6,08
Effectif	1099	1089	521	125

Remarque : les calculs concernant les doses d'apports d'azote sont effectués seulement sur les observations qui ont par exemple trois ou quatre apports, même chose pour le labour (Effectifs des tableaux 3 et 4).

Les indicateurs de position permettent de savoir comment sont réparties les données. Ainsi, pour le rendement, le décile 1 indique que 10 % des données sont inférieures à 5,5 t/ha. De même, le décile 9 indique que 10 % des données sont supérieures à 9 t/ha. 25 % des données sont inférieures au quartile 1 et 25 % des données sont supérieures au quartile 3. Ainsi, un quart des données du rendement sont inférieures à 6,5 t/ha et un quart sont supérieures à 8,5. En outre, la moitié des données sont sous la

médiane et l'autre moitié au dessus. Par exemple, en ce qui concerne le rendement, 50 % des données sont inférieures à 7,5 t/ha (Tableau 3). Ces indicateurs peuvent être représentés graphiquement à l'aide d'une boîte à moustaches.

Figure 19 : boîte à moustaches



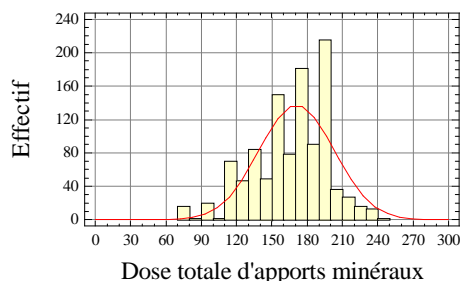
La boîte représente 50 % des données (Figure 19). Celle-ci commence au quartile 1 et s'arrête au quartile 3. Elle est séparée en deux parties par la médiane. La croix au centre de la boîte est la moyenne et celle à gauche du graphique est une valeur exceptionnelle. Dans ce cas, elle est inférieure à 3,50.

Pour décrire des données, il existe d'autres indicateurs comme l'indicateur de dispersion relative. Pour le rendement, on obtient 0,27 % en faisant la différence entre le quartile 3 et le 1 puis en divisant par la médiane. Plus cette valeur est grande, plus les données de l'échantillon sont dispersées.

De plus, l'indicateur de dissymétrie permet de savoir si la médiane sépare la boîte en deux parties plus ou moins égales. Le signe de l'indicateur de dissymétrie indique de quel côté est la médiane. Par exemple, la dose totale d'apports minéraux a un indicateur de dissymétrie de -0,20 donc la partie droite de la boîte est plus petite que la partie gauche ; lorsque le signe est positif, c'est le contraire. En outre, plus la valeur de cet indicateur est proche de 0 et plus la boîte est symétrique.

L'indicateur de dissymétrie dépend seulement des quartiles. Pour savoir si les données sont symétriques, il faut donc faire des histogrammes pour chaque variable en groupant les données en classes suffisamment nombreuses pour voir toutes les informations et ne pas être faussé par les valeurs exceptionnelles.

Figure 20 : histogramme



Par exemple, cet histogramme (Figure 20) permet de confirmer que les données concernant la dose totale d'apports minéraux ne sont pas symétriques. De plus, elles ne suivent pas une loi normale au risque de 1 % (probabilité critique inférieure à 0,01).

De la même façon, les variables Rendement, Récolte, Semis, Labour, Nb App, Dose App 1, Dose App 2, Dose App 3, Dose App 4 ne suivent pas une loi normale.

3.1.3 Analyse des conduites de blé sur les paramètres clés du risque de dégagement de N₂O

Analyse des conduites de blé sur les paramètres clés du risque de dégagement de N₂O

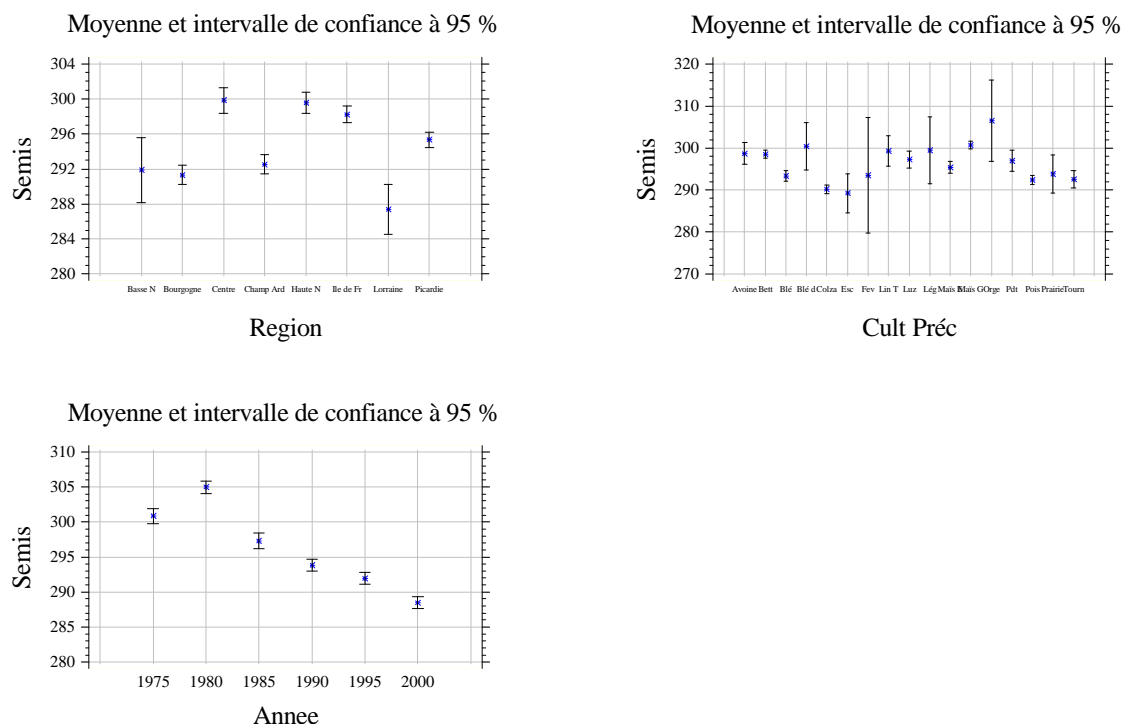
A- Analyse de la variance

Par cette analyse de variance, nous cherchons à évaluer si les trois variables qualitatives que nous avons identifiées a priori pour expliquer des différences d'itinéraires techniques, sont réellement explicatives.

Avant de pouvoir faire l'analyse de la variance de chaque variable (ANOVA), il faut commencer par analyser les variances (test de Bartlett) afin de définir le test à utiliser pour analyser les moyennes.

Ainsi, le test de Bartlett montre qu'il y a une différence statistiquement significative entre les variances, au risque de 5 %, pour les différentes variables selon la région, le précédent cultural et la période.

Bien que l'ANOVA soit robuste, sachant que les variables ne suivent pas une loi normale et qu'il y a une différence significative entre les variances, il est préférable d'effectuer un test de Kruskal-Wallis. Celui-ci permet d'évaluer, pour les différentes variables, si les différences entre les moyennes sont significatives ou non selon la région, le précédent cultural (Cult Préc) et la période. Pour chacune des variables, les résultats montrent qu'il existe une différence statistiquement significative entre les moyennes selon la région, le précédent cultural et la période (21).



Légende :

- 1975 : < 1975
- 1980 :]1975 ; 1980]
- 1985 :]1980 ; 1985]
- 1990 :]1985 ; 1990]
- 1995 :]1990 ; 1995]
- 2000 : > 1995

Figure 21 : représentations du test de Kruskal-Wallis avec l'exemple du semis

Remarque : les effectifs pour chaque région, culture précédente ou période ne sont pas les mêmes (Annexe B). Ces différences sont à prendre en compte dans l'analyse des classes.

B- Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) s'applique à des tableaux à deux dimensions croisant n individus statistiques en lignes dont on connaît les valeurs sur p variables quantitatives en colonnes. L'objectif général de l'ACP est exploratoire dans deux directions principales :

- elle permet d'établir un bilan des ressemblances entre individus ; c'est-à-dire, quels sont ceux qui se ressemblent ou qui sont différents ? Existe-t-il des groupes homogènes d'individus ?
- elle permet d'établir un bilan des liaisons entre variables ; c'est-à-dire, quelles sont celles qui sont corrélées positivement ? Quelles sont celles qui s'opposent ? Ce bilan consiste à résumer l'ensemble des variables initiales par un petit nombre de variables synthétiques appelées composantes principales (combinaisons linéaires des variables initiales, hiérarchisées et indépendantes les unes des autres).

D'après les résultats de l'ACP normée sur les variables suivantes :

- Rendement (RDT) en t/ha,
- date de semis (SEMIS),
- date de récolte (RECOLTE),
- pourcentage de surface labourée (LABOUR),
- nombre d'apports d'ordre minéraux (NB_APP),
- dose totale des apports en unité d'azote (DOSE_TOT),

Nous constatons qu'il y a un lien entre le rendement et le nombre d'apports (corrélation : 0,62), entre le rendement et la dose totale (corrélation : 0,56) et entre la dose totale et le nombre d'apports (corrélation : 0,51).

D'après le graphique des valeurs propres, nous conservons quatre axes, qui représentent 86,93 % de l'information initiale contenue dans le tableau. Les vecteurs propres permettent de voir quels axes opposent quelles variables. Ainsi, on obtient les résultats suivants :

Tableau 10 : vecteurs propres

	Prin 1³	Prin 2	Prin 3	Prin 4
RDT	0,49	0,14	0,44	0,02
DOSE_TOT	0,49	0,24	-0,09	0,20
RECOLTE	-0,33	0,20	0,68	-0,51
SEMIS	-0,32	0,10	0,42	0,84
LABOUR	-0,24	0,90	-0,32	-0,03
NB_APP	0,49	0,26	0,24	0,03

L'axe 1 oppose le rendement, la dose totale des apports en unité d'azote et le nombre d'apports minéraux à la date de récolte, de semis et au pourcentage de surface labourée (Tableau 10). Il traduit donc une opposition entre (i) les itinéraires techniques caractérisés par des semis et récoltes précoces, une proportion de non labour importante, des apports d'azote et des rendements élevés, caractéristiques des périodes les plus récentes (à partir des années 90) et (ii) les itinéraires techniques caractérisés par des semis et récoltes tardifs, une majorité de surface labourée, des apports d'azote et des rendements faibles, surtout pratiqués dans les années 70.

L'axe 2 n'oppose pas de variable mais suggère un effet « taille » : il oppose les itinéraires techniques qui ont des valeurs élevées pour toutes les variables (rendement, dose totale d'azote et nombre d'apports élevés, récolte et semis tardifs, pourcentage de surface labourée important) aux itinéraires techniques qui ont des valeurs faibles.

L'axe 3 oppose la dose totale des apports en unité d'azote et le pourcentage de surface labourée aux autres variables.

Enfin, l'axe 4 oppose la date de récolte et le pourcentage de surface labourée aux autres variables.

³ Prin 1 : première composante principale

De plus, les contributions permettent de voir les variables qui contribuent à la construction des axes et les valeurs des cosinus (Tableau 11) montrent quelles variables sont bien représentées sur les différents axes. Ainsi, on obtient les résultats suivants :

Tableau 11 : espace des variables

Points explicatifs (contribution > 1/p), permettent de voir les variables qui contribuent fortement à la construction de l'axe correspondant

Points expliqués (cos > 0.5), permettent de voir les variables qui sont bien représentées sur l'axe correspondant

- axe 1		+	
		DOSE_TOT	0,24
		RDT	0,24
		NB_APP	0,24
- axe 2		+	
LABOUR	0,80		
- axe 3		+	
RECOLTE	0,47	RDT	0,19
SEMIS	0,18		
- axe 4		+	
SEMIS	0,70		
RECOLTE	0,26		

- axe 1		+	
		DOSE_TOT	0,63
		RDT	0,63
		NB_APP	0,62
- axe 2		+	
LABOUR	0,75		
- axe 3		+	
- axe 4		+	
SEMIS	0,56		

Ces résultats précédents s'observent également sur quelques illustrations (Figure 22).

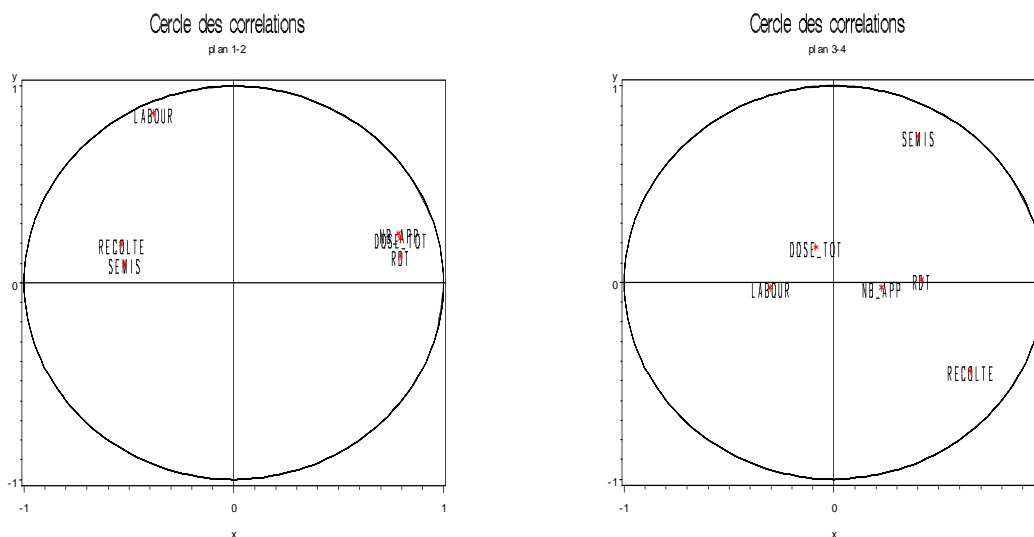


Figure 22 : cercles des corrélations

C- Classification ascendante hiérarchique :

Une classification ascendante hiérarchique (selon la méthode de Ward) sur les quatre premières composantes principales de l'ACP permet de distinguer six types de conduites du blé parmi les 1099 observations de l'échantillon.

Tableau 12 : caractéristiques des six classes de conduites du blé

Variables		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Nb d'obs		121	250	287	167	152	122
Nb d'obs en %		11	23	26	15	14	11
Rendement	Moyenne	7,07	6,76	8,07	5,86	7,34	8,67
	Ecart-type	0,80	1,21	0,82	1,22	0,86	0,71
	Minimum	5,30	4,20	6,00	3,20	5,50	6,30
	Maximum	9,00	9,00	9,40	8,00	9,00	9,00
Dose Totale	Moyenne	157,77	165,76	191,27	118,71	195,72	188,28
	Ecart-type	17,13	17,08	22,99	18,51	14,72	18,03
	Minimum	115,00	130,00	130,00	70,00	150,00	160,00
	Maximum	200,00	210,00	240,00	160,00	230,00	250,00
Récolte	Moyenne	214,19	215,03	212,51	224,30	207,43	210,87
	Ecart-type	4,96	8,15	8,35	10,05	4,58	4,13
	Minimum	203,50	197,00	191,00	203,50	191,00	203,50
	Maximum	235,50	249,75	246,50	247,50	216,50	227,00
Semis	Moyenne	295,88	299,42	289,49	301,96	296,40	291,83
	Ecart-type	8,31	10,90	9,32	9,74	9,79	7,47
	Minimum	257,50	266,00	266,00	277,00	278,00	275,50
	Maximum	306,50	327,00	318,50	326,00	321,50	311,00
Labour	Moyenne	37,16	98,36	65,47	99,70	80,99	70,45
	Ecart-type	20,96	7,00	37,41	2,73	32,90	39,06
	Minimum	0,00	50,00	0,00	75,00	0,00	0,00
	Maximum	60,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Dose 1 de N	Moyenne	64,30	71,88	51,10	67,37	88,95	49,60
	Ecart-type	9,99	15,50	8,65	12,50	15,58	6,61
	Minimum	50,00	40,00	20,00	40,00	60,00	30,00
	Maximum	100,00	100,00	80,00	90,00	120,00	60,00
Dose 2 de N	Moyenne	90,25	82,72	89,53	51,35	101,58	60,41
	Ecart-type	18,93	23,48	19,43	20,30	16,76	18,74
	Minimum	35,00	40,00	20,00	0,00	50,00	20,00
	Maximum	130,00	150,00	130,00	90,00	130,00	100,00
Dose 3 de N	Moyenne	3,22	11,16	50,44	0,00	5,20	45,41
	Ecart-type	7,55	18,08	19,14	0,00	12,81	22,01
	Minimum	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	20,00
	Maximum	30,00	60,00	130,00	0,00	40,00	90,00
Dose 4 de N	Moyenne	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	32,87
	Ecart-type	0,00	0,00	2,04	0,00	0,00	5,82
	Minimum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00
	Maximum	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	50,00

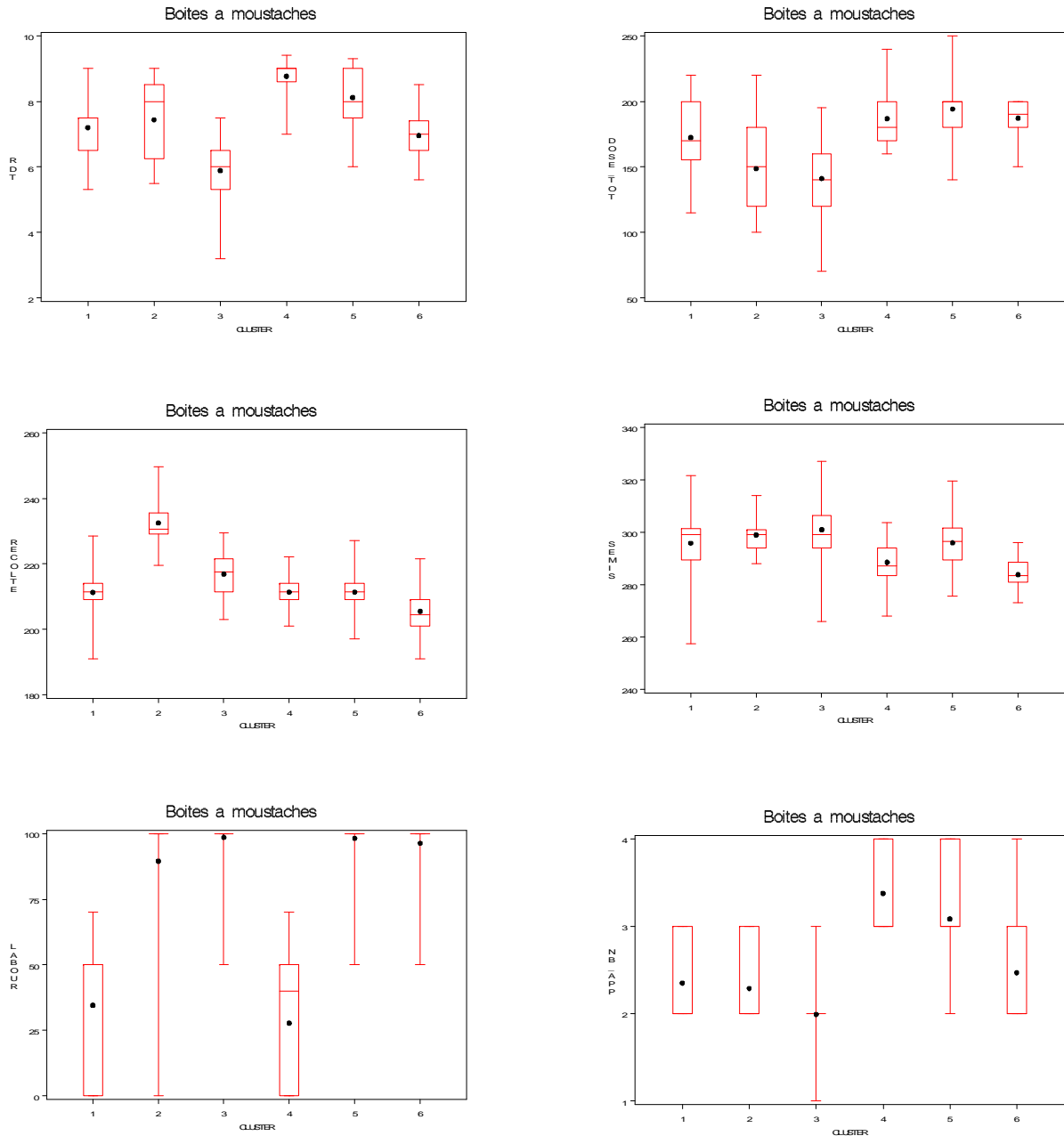


Figure 23 : représentations des caractéristiques des six classes de conduites du blé⁴

Ces graphiques (Figure 23) illustrent les résultats du tableau précédent (Tableau 12). De plus, ils permettent à la fois de visualiser la variabilité intra-classe et la variabilité inter-classe.

⁴ RDT = rendement
DOSE_TOT = dose totale des apports d'azote
CLUSTER = classe

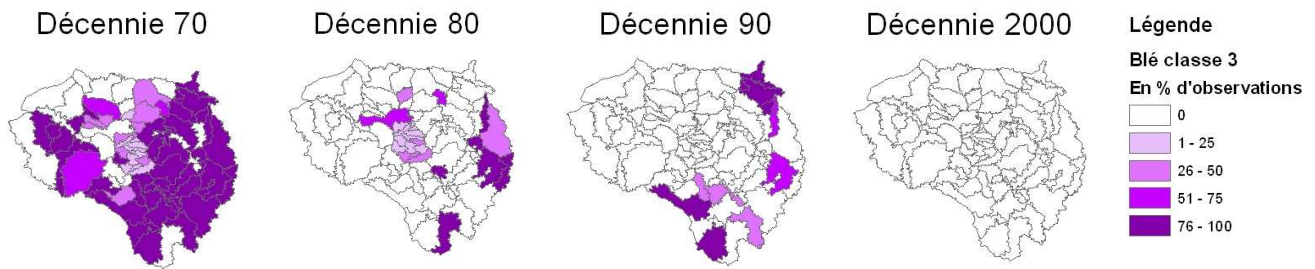


Figure 24 : répartition géographique de la classe 3 de blé (cf. Tableau 12) des années 70 aux années 2000 sur le bassin de la Seine

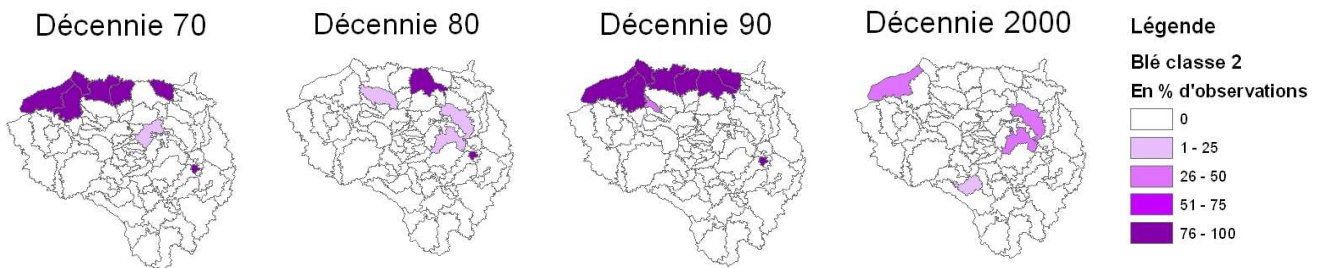


Figure 25 : répartition géographique de la classe 2 de blé (cf. Tableau 12) des années 70 aux années 2000 sur le bassin de la Seine

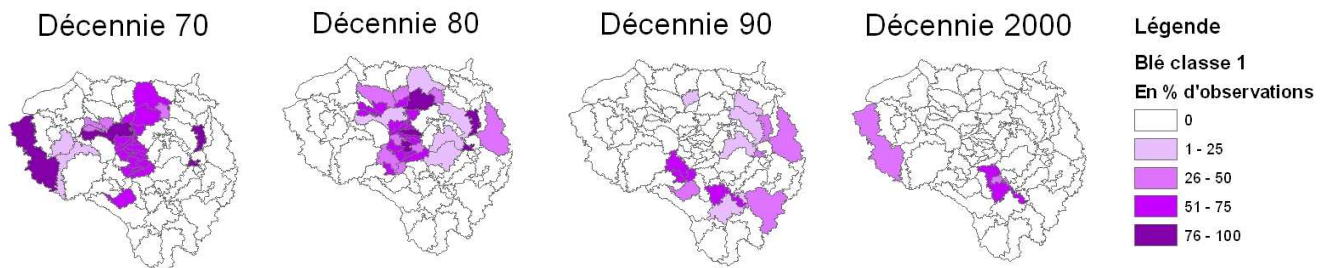


Figure 26 : répartition géographique de la classe 1 de blé (cf. Tableau 12) des années 70 aux années 2000 sur le bassin de la Seine

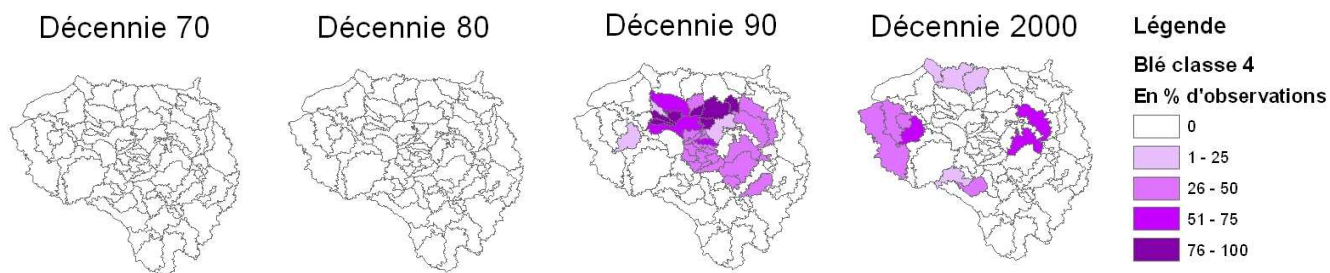


Figure 27 : répartition géographique de la classe 4 de blé (cf. Tableau 12) des années 70 aux années 2000 sur le bassin de la Seine

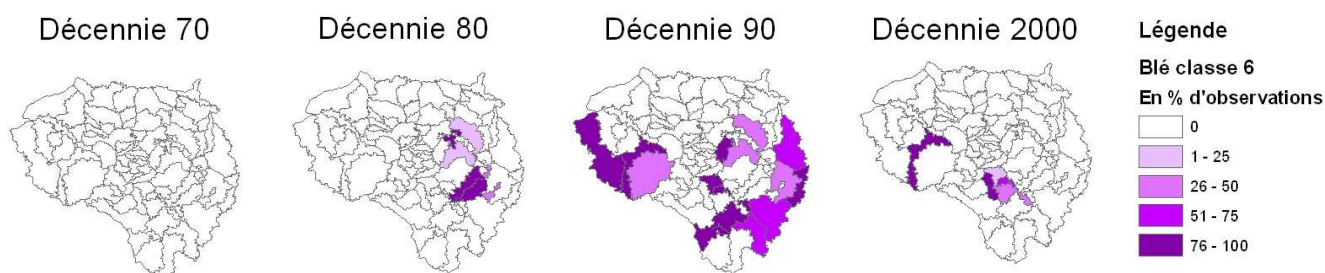


Figure 28 : répartition géographique de la classe 6 de blé (cf. Tableau 12) des années 70 aux années 2000 sur le bassin de la Seine

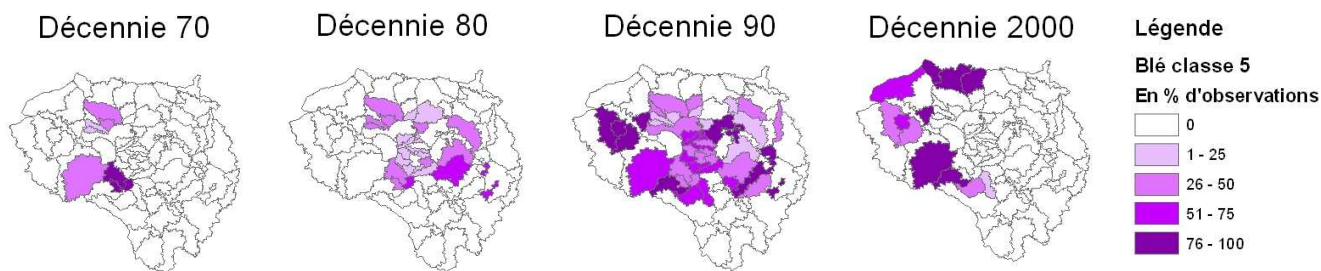


Figure 29 : répartition géographique de la classe 5 de blé (cf. Tableau 12) des années 70 aux années 2000 sur le bassin de la Seine

Les régions violettes représentent les endroits où sont localisées les observations de blé de chaque classe. Ainsi, plus le violet est foncé et plus le nombre d'observations pour chaque classe de risque est important.

D- Description des classes de conduites du blé :

Les six classes peuvent être ordonnées selon un gradient croissant d'apport et de fractionnement des apports, donc un gradient de risque de dégagement de N₂O :

Risque faible : la classe 4 est caractérisée par un ou deux apports d'azote minéral, représentant en moyenne une faible dose totale (inférieure à 120 U en moyenne) et associée à un rendement faible (58 qx) (Tableau 8). En cas de deux apports, c'est le premier qui est le plus important. Ces pratiques sont caractéristiques des années 70 (près de 90 % de ce type) ;

Risque moyen : trois types d'itinéraires techniques (classes 1, 2 et 5) sont ensuite caractérisés par deux ou trois apports d'azote. Dans tous les cas, cette fois c'est le deuxième apport qui présente la dose la plus élevée. Ils diffèrent selon la dose totale d'azote (qui va de 160 U à près de 200 U en moyenne) et le pourcentage de terres labourées. La classe 1 présentant une dose totale moyenne de 160 U est caractéristique des décennies 70 et 80 et se rencontre surtout dans les régions de grandes cultures du bassin derrière une betterave ou un maïs grain.

La classe 5 présentant une dose totale élevée (200 U) a été définie par les experts sur la décennie 90 et est plutôt localisée dans la partie Sud du bassin et en Seine-et-Marne ;

Risque fort : la classe 3 est caractérisée par trois ou quatre apports d'azote, correspondant à une dose totale élevée (en moyenne 190 U). Là encore, c'est le deuxième apport qui est le plus important en quantité (90 U en moyenne). On peut également noter que la quantité apportée au premier apport (quand la plante est encore jeune) est très inférieure à celle de la classe décrite précédemment : près de 90 U en moyenne pour la classe précédente (avec des valeurs allant de 60 à 120 U) et 50 U en moyenne pour cette classe (de 20 à 80 U). Le troisième apport est comparable au premier tandis que le quatrième apport, quand il existe, n'excède pas 20 U. Ce type d'itinéraire technique se pratique à partir du milieu des années 80 surtout dans la partie Nord du bassin (Oise, Aisne) ;

Risque maximum : enfin la dernière classe, la 6, présente le fractionnement le plus important, puisqu'il comporte toujours quatre apports. La dose totale d'azote reste importante mais légèrement inférieure aux deux types précédents (en moyenne 188 U). Le deuxième apport reste également le plus important, mais en dose moins élevée que dans les deux classes précédentes (60 U en moyenne). D'ailleurs, aucun apport n'excède les 100 U, alors que certains pouvaient atteindre 130 voire 150 U dans les autres classes. Le quatrième apport, systématisé, varie de 20 à 50 U. Ce type d'itinéraire technique est pratiqué à partir des années 90, surtout en Seine-et-Marne derrière des précédents pois, betterave et colza.

3.1.4 Conclusions

L'analyse de la diversité des itinéraires techniques de conduites du blé au cours des 35 dernières années permet de constater qu'il y a un effet « période » marqué. En effet, les classes mises en évidence par l'analyse statistique correspondent en général à des périodes bien définies au sein des 35 ans étudiés. Ainsi, cette analyse confirme qu'au cours des 35 dernières années, la dose totale d'azote minérale apportée sur blé s'est fortement accrue, corrélativement aux potentiels de rendement. Corrélativement, les apports ont été progressivement fractionnés, de manière à ajuster la fourniture d'azote aux besoins de la plante, passant ainsi de deux dans les années 70 à trois voire quatre dans les années 90. Nous observons également une tendance à la diminution de la dose apportée au premier apport (qui est reportée sur le deuxième apport).

Les grandes tendances d'évolution sont les suivantes :

- avancement des dates de récolte et de semis qui dépendent toutefois principalement des précédents culturels,
- augmentation de la dose d'azote minéral et fractionnement plus fréquents des apports (de 2 apports en 70 à 3 voire 4 en 2000), qui va de paire avec l'augmentation des rendements,
- 2 classes avec une forte proportion de non labour dont une caractéristique des années 70.

Ainsi, les tendances récentes tendent à augmenter les risques de dégagement de N₂O via deux évolutions nettes des itinéraires techniques :

- l'augmentation de la fréquence des classes à fertilisation azotée importante,
- le fractionnement des apports qui en les rendant plus tardifs en saison, les rendent concomitants aux périodes plus chaudes, donc plus favorables à des dégagements de N₂O.

3.2. Analyse de l'évolution des itinéraires culturaux de blé sur leur risque de dégagement de N₂O entre 1994 et 2001

Nous reprenons, en utilisant les mêmes liens entre pratiques et risques, une analyse où les informations sur les conduites sont plus précises (SCEES) mais où la dynamique étudiée sera plus courte : 1994 – 2001.

3.2.1 Description des données mobilisées

Ces données ont été recueillies auprès des agriculteurs du bassin de la Seine lors d'une enquête du SCEES⁵ en 1994 puis en 2001. Elles traitent de nombreux critères concernant l'agriculture comme l'explique la fin de la partie « Présentation du sujet ». En outre, ce sont des données qui concernent les pratiques culturales des céréales à paille telles que le blé, mais aussi les pratiques culturales des cultures de colza, de maïs, de pois, de jachères, de tournesol, etc. Contrairement à la base de données à « dire d'experts », les informations sont obtenues par enquête directe auprès des agriculteurs sur un échantillon précis de parcelles.

De la même façon que pour l'étude de la partie précédente, le blé tendre étant la culture la plus présente et la mieux répartie sur le bassin de la Seine, je vais continuer à étudier cette culture.

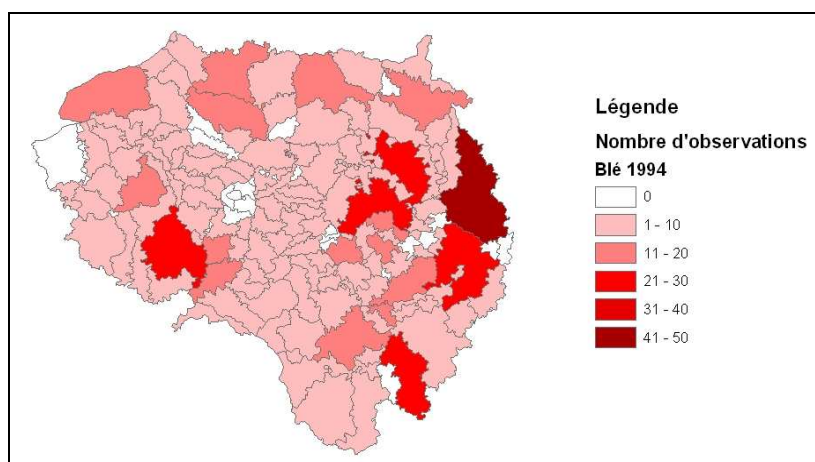


Figure 30 : répartition du nombre de parcelles enquêtées en blé en 1994

Le blé, culture répandue sur tout le bassin de la Seine, a été enquêté sur l'ensemble du bassin en 1994 (Figure 30). Parmi les parcelles les plus échantillonnées, on trouve la Meuse, le plateau du Barrois à l'est, la Champagne Crayeuse et la Beauce.

⁵ SCEES : Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques.

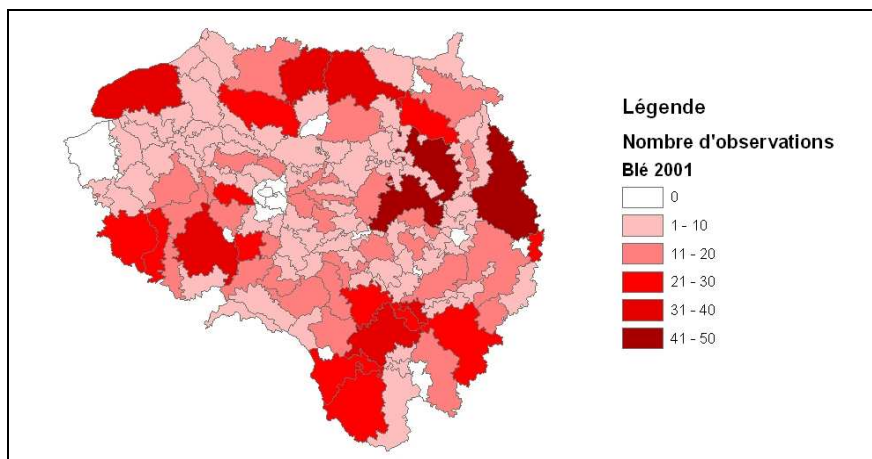


Figure 31 : répartition du nombre de parcelles enquêtées en blé en 2001

Le nombre de parcelles échantillonnées est plus important en 2001 (plateau du Barrois et de Bourgogne, Champagne Crayeuse, Beauce, Nièvre, etc.) et couvre tout le bassin, plus densément qu'en 1994 (Figure 31).

Les régions les plus enquêtées en 1994 et 2001 sont en particulier les périphéries du bassin de la Seine (par exemple, la Meuse). De plus, les parcelles étudiées sont réparties de façon homogène selon les différents départements du bassin.

3.2.2 Analyse des pratiques sur blé

Présentation des variables

Les variables quantitatives choisies pour décrire l'évolution des itinéraires techniques du blé concernant la fertilisation sont :

- la dose totale de fumure en azote (D_FUMQN),
- le nombre d'apports d'azote (NB_APP_N),
- la dose totale de fumure en phosphore (D_FUMQP),
- le nombre d'apports de phosphore (NB_APP_P),
- la dose totale de fumure en potasse (D_FUMQK),
- le nombre d'apports de potasse (NB_APP_K).

En outre, quelques variables supplémentaires sont utilisées :

- l'année,
- l'apport de fumure organique ou non,
- le rendement,
- la superficie agricole utilisée (SAU) en hectares,
- l'existence de drainage ou non,
- le département,
- le précédent cultural.

Description des variables concernant les observations de blé recueillies en 1994 et 2001 sur le bassin de la Seine

Tableau 13 : étude des 2243 observations de blé concernées par la fertilisation

	D_FUMQN	NB_APP_N	D_FUMQP	NB_APP_P	D_FUMQK	NB_APP_K
Unités	U N		U P		U K	
Indicateur de position :						
Minimum	28	1	12	1	8	1
Décile 1	136	2	40	1	40	1
Quartile 1	160	2	51	1	58	1
Médiane	182	3	70	1	80	1
Quartile 3	204	3	90	1	102	1
Décile 9	227	4	108	1	135	1
Maximum	400	6	250	4	315	4
Indicateur de dispersion relative						
	0,24	0,33	0,56	0,00	0,55	0,00
Indicateur de dissymétrie						
	0,00	-1,00	0,03	0,00	0,00	0,00
Moyenne	182,50	2,69	72,51	1,04	83,27	1,04
Ecart type	38,24	0,75	29,63	0,21	38,21	0,22
Effectif	2235	2235	1374	1374	1223	1223

La majorité des parcelles enquêtées reçoivent des apports d'azote, en moyenne 2,69 et la dose totale moyenne de ces apports est de 182,5 unités d'azote avec un écart type de 38,24. Les doses totales de ces apports varient entre 28 et 400 unités en un à six apports (Tableau 13).

Parmi les 2243 observations (783 de 1994 et 1460 de 2001), le précédent cultural majoritaire est le colza (27 %) suivi du maïs (16 %), du blé (15 %), du pois sec (12 %) et de la betterave (10 %).

Seulement 4 % des parcelles reçoivent un apport en fumure organique et 18 % sont drainées.

Analyse des moyennes et de la variance

Avant d'effectuer l'ANOVA, il faut commencer par analyser les variances afin de définir le test à utiliser pour analyser les moyennes. Ainsi, le test de Bartlett montre qu'il y a une différence statistiquement significative entre les variances, au risque de 5 %, pour les différentes variables selon la région, le précédent cultural et l'année.

Bien que l'ANOVA soit robuste, sachant qu'il y a une différence significative entre les moyennes et que les variables ne suivent pas une loi normale, il est préférable d'effectuer un test de Kruskal-Wallis. Celui-ci permet d'évaluer, pour les différentes variables, si les différences entre les moyennes sont significatives ou non selon la région, le précédent cultural et l'année. Ainsi, pour la majorité des variables, il y a une différence statistiquement significative entre les moyennes selon la région, le précédent cultural et l'année (

Figure 32) sauf pour le nombre d'apports de phosphore et de potasse.

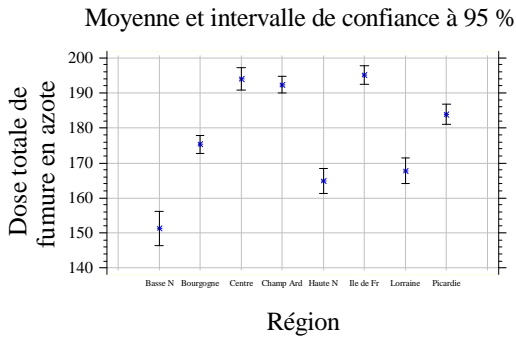
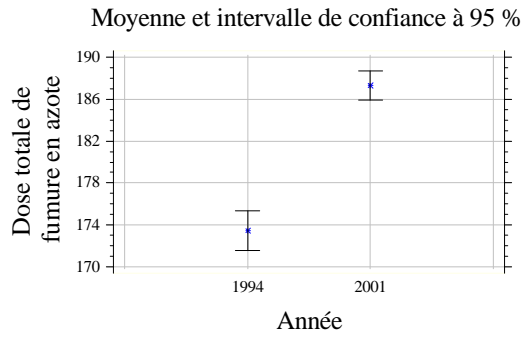
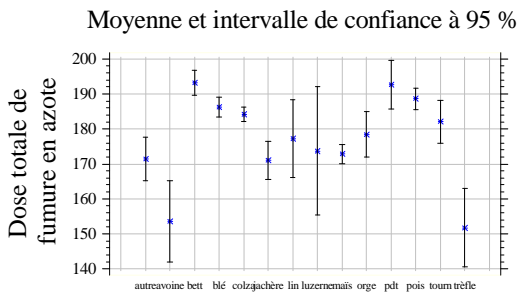


Figure 32 : représentations avec l'exemple de la dose totale de fumure en azote

Analyse en composantes principales puis classification ascendante hiérarchique

Une analyse en composantes principales suivie d'une classification ascendante hiérarchique (selon la méthode de Ward), sur les trois premiers axes, permet de distinguer sept types de conduites du blé parmi les 2243 observations de l'échantillon.

Tableau 14 : caractéristiques des sept classes de conduites du blé

Variables		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
Nombre de parcelles		384	449	328	318	429	207	128
Nb en %		17	20	15	14	19	9	6
D_FUMQN	Moyenne	163,13	208,70	181,87	134,83	180,94	221,57	199,32
	Ecart-type	32,33	28,86	30,41	38,27	24,44	26,06	23,25
	Minimum	30,00	132,00	54,00	0,00	96,00	185,00	140,00
	Maximum	280,00	400,00	315,00	193,00	275,00	330,00	262,00
NB_APP_N	Moyenne	2,18	3,24	2,16	1,88	2,88	3,10	4,16
	Ecart-type	0,53	0,47	0,59	0,43	0,32	0,30	0,41
	Minimum	1,00	2,00	1,00	0,00	2,00	3,00	4,00
	Maximum	3,00	5,00	5,00	3,00	3,00	4,00	6,00
D_FUMQP	Moyenne	0,00	0,00	94,24	61,85	57,35	81,15	59,80
	Ecart-type	0,00	0,00	32,01	22,85	26,95	27,62	28,10
	Minimum	0,00	0,00	24,00	0,00	0,00	25,00	0,00
	Maximum	0,00	0,00	250,00	160,00	140,00	180,00	202,00
NB_APP_P	Moyenne	0,00	0,00	1,14	0,98	0,95	1,01	0,98
	Ecart-type	0,00	0,00	0,38	0,16	0,23	0,10	0,28
	Minimum	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00
	Maximum	0,00	0,00	4,00	2,00	1,00	2,00	2,00
D_FUMQK	Moyenne	0,00	0,00	109,65	71,58	45,98	86,27	43,20
	Ecart-type	0,00	0,00	43,08	31,85	37,63	35,61	40,67
	Minimum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Maximum	0,00	0,00	315,00	196,00	180,00	184,00	164,00
NB_APP_K	Moyenne	0,00	0,00	1,13	0,97	0,72	0,98	0,64
	Ecart-type	0,00	0,00	0,39	0,20	0,47	0,15	0,48
	Minimum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Maximum	0,00	0,00	4,00	2,00	3,00	1,00	1,00
Rendement	Moyenne	70,18	78,96	71,28	63,78	70,31	76,65	73,34
	Ecart-type	14,92	13,33	12,34	16,00	13,67	12,37	12,61
	Minimum	5,00	12,00	15,00	8,00	8,00	25,00	40,00
	Maximum	108,00	112,00	104,00	105,00	113,00	104,00	105,00
SAU	Moyenne	170,65	196,55	137,73	125,87	169,93	154,54	210,98
	Ecart-type	170,73	129,34	84,20	74,24	98,46	78,90	107,39
	Minimum	6,80	3,52	6,00	4,71	17,00	14,50	44,76
	Maximum	2 960,31	1 120,02	600,00	476,52	650,00	432,00	683,89

* Ces deux variables n'ont pas été introduites dans l'analyse statistique mais ont été recalculées pour chaque classe obtenue.

Programme PIREN-Seine : Dynamiques des systèmes de culture du bassin de la Seine



Figure 33 : représentations des caractéristiques des sept classes de conduites du blé⁶

Ces graphiques (Figure 33) permettent d'illustrer les résultats du tableau précédent (Tableau 14). De plus, ils permettent à la fois de visualiser la variabilité intra-classe et la variabilité inter-classe.

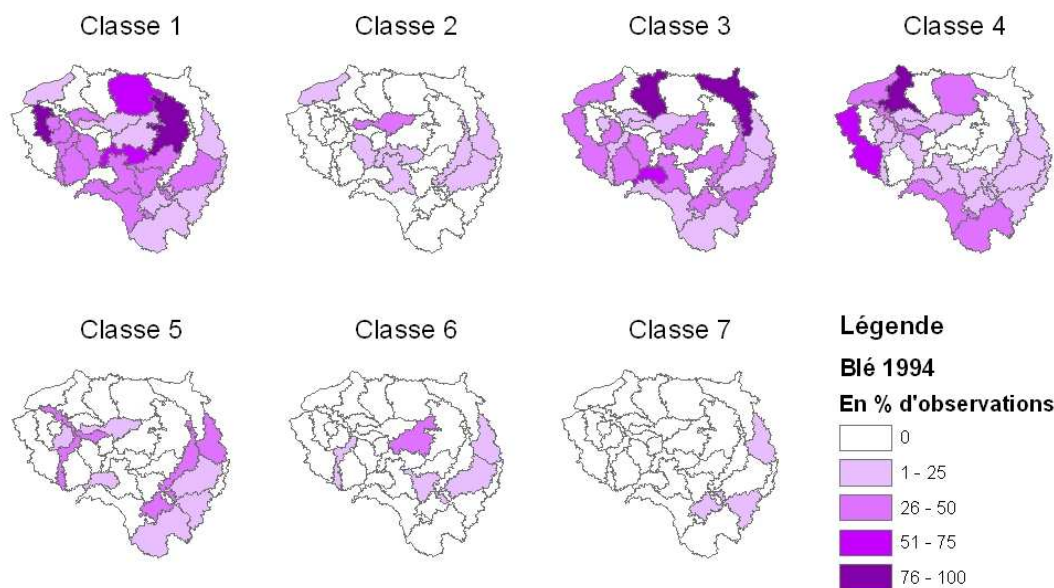


Figure 34 : répartition géographique des sept classes de blé de 1994 sur le bassin de la Seine

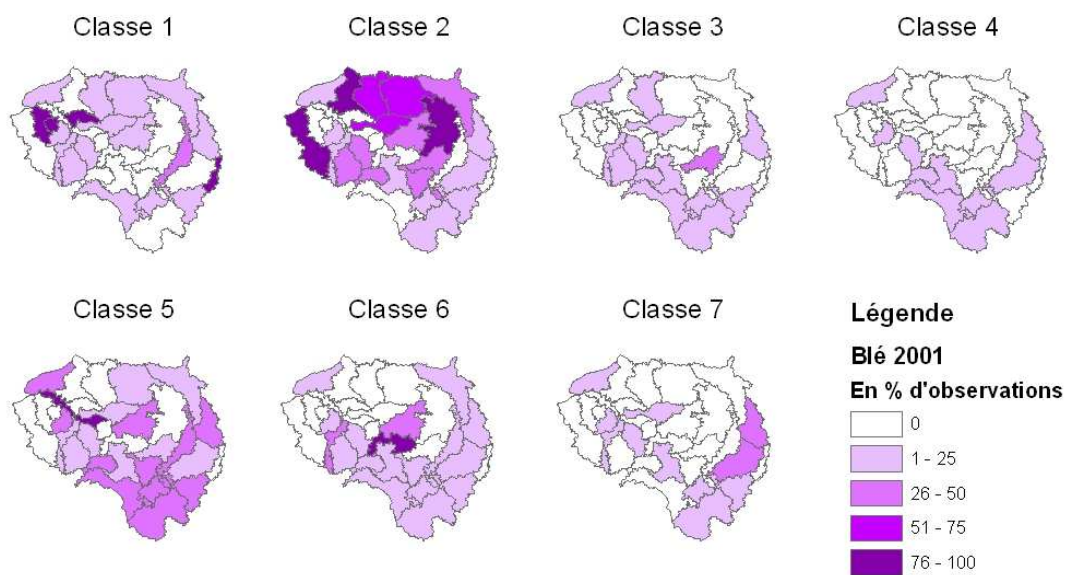


Figure 35 : répartition géographique des sept classes de blé de 2001 sur le bassin de la Seine

⁶ DOSE_FUMQN : dose totale de fumure en azote
 NB_APP_FUMQN : nombre d'apports d'azote
 DOSE_FUMQP : dose totale de fumure en phosphore
 NB_APP_FUMQP : nombre d'apports de phosphore
 DOSE_FUMQK : dose totale de fumure en potasse
 NB_APP_FUMQK : le nombre d'apports de potasse

Description des classes de conduites du blé

- a- Les blés ne recevant pas de fumure de fond minérale :

- Avec une dose totale d'azote faible en deux apports (Classe 1 : 17 %) : risque faible

Les blés de cette classe se caractérisent par l'absence de fumure de fond minérale (phosphore et potasse) et par une dose totale d'apport d'azote faible par rapport aux autres classes (163 U en 2,2 apports en moyenne). En revanche, 8 % des parcelles ont reçu un apport de fumure organique qui peut compenser l'absence d'apport de phosphore et de potasse minéral.

Les précédents culturaux de ces blés sont en particulier le colza, le maïs fourrage, le pois sec et la betterave. Ils sont très présents en 1994 sur tout le bassin de la Seine, en particulier en Champagne-Ardenne. En 2001, le nombre de parcelles enquêtées faisant partie de cette classe commence à devenir moins important : elles représentent la moitié des parcelles de la classe, alors que les parcelles de 2001 représentent les deux tiers de l'échantillon total (Figure 34 et Figure 35).

- Avec une dose totale d'azote élevée en trois apports (Classe 2 : 20 %) : risque très élevé

Les blés de cette classe se caractérisent par une dose totale d'apport d'azote forte par rapport à l'ensemble des autres classes (209 U en 3,2 apports en moyenne) et comme la classe précédente, par une absence d'apport de phosphore et de potasse. De plus, les blés de cette classe ont un rendement élevé (près de 80 qx) et semblent être cultivés dans des exploitations de grande taille (près de 200 ha en moyenne).

Les précédents culturaux de cette classe sont surtout le colza et la betterave mais aussi le pois sec, le blé et le maïs.

Les blés de cette classe sont peu présents en 1994 contrairement à l'année 2001, où on les retrouve sur l'ensemble du bassin. Ils concernent en particulier les PRA de la moitié Nord du bassin de la Seine (Figure 34 et Figure 35).

- b- Les blés recevant une fumure de fond minérale modérée :

- Sans apport d'azote ou une dose faible (Classe 4 : 14 %) : risque très faible

Les blés de cette classe se caractérisent par une dose totale d'apport d'azote et de phosphore faible par rapport aux autres classes, soit respectivement 135 U N en 1,9 apports et 62 U P en un apport. De plus, 7 % des parcelles ont reçu un apport de fumure organique. La superficie agricole utilisée des exploitations dans lesquelles ces blés sont cultivés est la plus faible (125 ha en moyenne).

Les précédents culturaux sont surtout le blé, le colza, le maïs fourrage et le pois sec.

Les blés de cette classe sont plus présents plus particulièrement en 1994. En effet, l'année 94 représente 60 % des parcelles de la classe, alors qu'elle ne correspond qu'à un tiers des parcelles de l'échantillon complet. Ils concernent les PRA du Sud du bassin pour les deux années mais également l'Ouest en 1994 (Figure 34 et Figure 35).

- Avec une dose totale d'azote moyenne en deux ou trois apports (Classe 5 : 19 %) : risque moyen

Dans cette classe, les pratiques de fertilisation sont modérées, comparativement à d'autres : les quantités de phosphore et potasse sont faibles (autour de 50 U en moyenne*) ; la fertilisation azotée s'élève à 180 U en 2 ou 3 apports.

Les précédents culturaux sont surtout le colza (37 %) et le blé (15 %).

Cette classe de blé est présente plus particulièrement en 2001 et elle concerne pratiquement tout le bassin de la Seine (Figure 34 et Figure 35).

* Le calcul des moyennes inclut les parcelles qui ne reçoivent pas de phosphore et potasse. Elle est donc sous-estimée pour les parcelles qui en reçoivent.

- Avec une dose totale d'azote élevée en au moins quatre apports (Classe 7 : 6%) : risque élevé

Les blés de cette classe se caractérisent par un nombre d'apports d'azote très élevé (de 4 à 6 apports pour une dose totale proche des 200 U). Les doses de phosphore (60 U) et de potasse (43 U) restent modérées. De plus, pratiquement aucune des parcelles n'a reçu un apport de fumure organique. Les exploitations agricoles dans lesquelles ces blés sont cultivés apparaissent de très grande taille (210 ha en moyenne).

Le précédent cultural majoritaire est le colza (54 %).

Les blés de cette classe, moins présents en 1994 qu'en 2001 sont surtout localisés à l'Est du bassin de la Seine (Figure 34 et Figure 35).

- c- Les blés recevant une fumure de fond minérale importante :

- Avec une dose totale d'azote moyenne en deux apports en moyenne (Classe 3 : 15 %) : risque moyen

Les blés de cette classe se caractérisent par une dose d'apport en phosphore (94 U) et en potasse (110 U) forte en un passage.

Les précédents culturaux de cette classe sont en particulier le blé, le colza et le pois sec.

Cette classe concerne l'ensemble du bassin en 1994 (les Ardennes, une partie de la Picardie, etc.), année où elle est la plus présente, et le Sud du bassin en 2001 (Nièvre, Côte d'or, etc.) (Figure 34 et Figure 35).

- Avec une dose totale d'azote élevée en trois ou quatre apports (Classe 6 : 9 %) : risque maximum

Les blés de cette classe se caractérisent par une dose totale d'apport d'azote et de phosphore forte par rapport aux autres classes, soit respectivement 222 U N en 3,1 apports et 81 U P en un apport. De plus, pratiquement aucune des parcelles n'a reçu un apport de fumure organique et le rendement des blés de cette classe est élevé.

Les précédents culturaux de cette classe sont surtout le blé, le colza et aussi le pois sec.

Les blés de cette classe sont peu présents en 1994 (Meuse et Marne) et ils recouvrent les deux tiers du bassin en 2001 (Figure 34 et Figure 35).

3.2.3 Conclusions

L'analyse des conduites du blé en 1994 et 2001, à propos de la fertilisation, permet de constater qu'il y a un effet « année ». En effet, les classes correspondent en général plus à l'une des années étudiées qu'à la seconde. En outre, l'effet « précédent cultural » n'est pas net et l'effet « réseau de drainage ou non » n'apparaît pas..

Même si la période de temps étudiée est courte (7 ans), nous pouvons dégager quelques tendances d'évolution, les mêmes que celles dégagées de 1970 à 2005 par « dire d'experts » et qui tendent à accroître les risques de dégagement en N₂O :

- augmentation de la dose d'azote,

- fractionnement plus fréquent des apports (de 2 apports en 94 à 3 voire 4 en 2001), ... qui va de pair avec l'augmentation des rendements.

4. Bibliographie

- Guigon-Moreau E. (2006). Transferts des pesticides vers les eaux superficielles et l'atmosphère : caractérisation et modélisation sur le bassin versant de la Vesle. Thèse d'Etat. Université Pierre et Marie Curie, Paris
- Guigon, E. ; Schott, C. ; Blanchoud, H. ; Langellier, F. ; Chevreuil, M. (2007). Vers la modélisation du transfert des pesticides dans le bassin versant de la Vesle (Reims) : expérimentations. In : Oturan Mehmet A. (dir.), Mouchel J.M. (dir.), *Pesticides : impacts environnementaux, gestion et traitements*. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées : 197-206.
- Le Ber, F. ; Benoît M. ; Schott, C. ; Mari, J.F. ; Mignolet, C. (2006). Studying crop sequences with CARROTAGE, a HMM-based data mining software. *Ecological Modelling*, 191 : 170-185.
- Mari J-F., Le Ber F., Benoît M., Mignolet C. et Schott C. (2003). - CarrotAge, un logiciel pour la fouille de données agricoles, *Colloque STIC et Environnement SE'2003, Rouen.*- 4p.
- Mignolet, C., Schott, C. ; Benoît, M. (2007). Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin : Methods for agronomic approaches on a regional scale. In : Billen G., Garnier J., Mouchel J.M., *Human activity and material fluxes in a regional river basin : The Seine River watershed*. Seine Special Issue, *Science of the Total Environment*, 375 (1-3) : 13-32.
- Mignolet C, Schott C, Benoît M. (2004). Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory : a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. The case of the Seine basin. *Agronomie*; 24 : 219-236.
- Mignolet C., Schott C., Mari J.-F. et Benoît M. (2003).- Typologies des successions de cultures et des techniques culturales dans le bassin de la Seine. *Rapport intermédiaire du contrat PIREN-Seine.*- Document de travail n°8, 23 p.
- Mignolet C., Benoît M. (2001). Réflexions sur une segmentation régionale selon la diversité des systèmes techniques agricoles. *Revue Internationale de Géomatique : Cartographie statistique et graphes de relations*, vol. 11 – n°2/2001:177-190.
- Rat A., Mercier P., Ledoux E. (2006). Modélisation des transferts de pesticides vers les eaux souterraines (Application au devenir de l'atrazine). Rapport d'activité programme PIREN-SEINE 2005. 31 p.
- Rat A., Guigon E., Schott C., Blanchoud H., Ledoux E., Benoît M. (2004). Etude du transfert de pesticides sur le bassin de la Vesle: intrants agricoles et modélisation du transfert vers les eaux de surface et souterraines. *Rapport du programme PIREN-Seine*.
- Schott, C. ; Mignolet, C. ; Benoît, M., Mari, J.F (2008). Dynamiques des systèmes de culture du bassin de la Seine : mise en évidence d'une intensification des pratiques culturales au cours des trois dernières décennies. *Rapport du programme PIREN-Seine*
- Schott, C. ; Mignolet, C. ; Rat, A. ; Ledoux, E. ; Benoît, M. (2007). Modélisation des pratiques phytosanitaires sur le bassin versant de la Vesle. In : Oturan Mehmet A. (dir.), Mouchel J.M. (dir.), *Pesticides : impacts environnementaux, gestion et traitements*. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées : 207-223.
- Schott, C. ; Brajot, C. ; Mignolet, C. ; Ruelland, D. ; Benoît, M. (2006). Dynamiques spatiales des activités agricoles dans le bassin de la Seine : méthodes et résultats sur les sites - ateliers de la Vesle et de la Blaise. Rapport de synthèse du programme PIREN-Seine. 37 p.
- Schott, C. ; Mignolet, C. ; Benoît, M. (2007). Caractérisation des pratiques phytosanitaires à l'échelle du bassin versant de la Vesle (2000-2005) : méthode proposée et premiers résultats. Rapport d'activité programme PIREN-SEINE 2006. 27 p.
- Schott, C. ; Mignolet, C. ; Benoît, M. (2005). Modélisation des pratiques phytosanitaires sur le bassin de la Vesle : le cas du désherbage chimique de la vigne et du maïs de 1970 à nos jours. Rapport d'activité programme PIREN-SEINE 2004 : 45 p.
- Schott, C. ; Mignolet, C. ; Benoît, M. (2003). Organisation spatiale des systèmes de cultures sur le bassin de la Vesle. Rapport d'activité du programme PIREN-SEINE. 25 p.

5. Annexe 1 : Eléments bibliographiques sur les facteurs de risque de dégagements de N₂O par les pratiques agricoles

Nous illustrerons successivement les thèmes identifiés dans notre recherche bibliographique en indiquant les références mobilisées et **en surlignant en gras**, les faits liés aux facteurs techniques de conduite des systèmes de culture. Les argumentst issus de l'analyse bibliographique sont regroupés par thème.

Estimations des émissions gazeuses de NH₃, NO et N₂O par les terres agricoles à l'échelle mondiale

Les émissions de N₂O et No sont dues aux applications d'engrais et de fumier. Leur quantification est importante pour évaluer l'efficacité des engrais azotés et leur impact sur la pollution atmosphérique, l'acidification et l'eutrophisation des écosystèmes.

Les pertes d'éléments nutritifs par les plantes dans l'environnement sont des conséquences de la lixiviation vers les eaux souterraines et des émissions vers l'atmosphère.

Les engrais azotés sont de plus en plus appliqués sur les prairies.

78 millions de tonnes d'engrais minéraux sont utilisées au niveau mondial.

L'utilisation d'engrais azotés par les plantes est plutôt inefficace (50% est absorbé seulement) car on observe ces pertes par lixiviation, ruissellement, érosion et émissions gazeuses. Ces dernières représentent le mécanisme dominant (volatilisation, nitrification et dénitrification).

Le N₂O est un gaz à effet de serre et représente 6% de l'effet de serre anthropique. Les sources les plus importantes sont les sols naturels et les émissions par les océans. Les sources anthropiques sont les champs agricoles ayant reçu des engrais azotés, les fumiers d'animaux, les aquifères, les eaux usées, les industries, les automobiles, la combustion de la biomasse, le défrichage des terres, l'incinération des détritux.

L'agriculture est à l'origine de 35% de la production de N₂O.

Les facteurs de gestion agricole :

- **Type de culture** : le flux de N₂O est inférieur pour une riziculture inondée par rapport à un riz pluvial. Les émissions de N₂O sont équivalentes pour des légumineuses et des non – légumineuses fertilisées.
- **Gestion des engrais** : le type influence de manière importante la nitrification et la dénitrification (ex : ammoniac anhydre engendre des pertes plus élevées de N₂O). La dénitrification et la production de N₂O sont étroitement liées à la quantité d'N inutilisée. Le mode et la période d'application de l'engrais influencent l'efficacité de l'absorption par la culture (les émissions de N₂O sont plus élevées à partir des engrais azotés appliquées ou injectées en dessous de la surface que pour des engrais minéraux épandus et des fumiers d'animaux).
- **Gestion des sols et des cultures** : les résidus de culture représentent des sources importantes de C et N pour la nitrification et la dénitrification. Ils ont une influence sur les conditions d'humidité de la couche supérieure du sol (Rq : l'incorporation de ces résidus peut aussi augmenter la minéralisation de la MO du sol). Les pertes de N₂o sont plus élevées dans les systèmes sans labour (dénitrification plus élevée).

Les pertes de N₂O sont plus importantes sur les sols inondés.

Les facteurs ayant une influence significative sur les émissions de N₂O (en gras ceux que nous pouvons informer sur les conduites de culture) :

- **dose d'N appliquée par type d'engrais**
- type de climat

- teneur en C organique du sol
- texture du sol
- drainage
- pH
- **type de culture**
- longueur de l'expérimentation
- fréquences des mesures.

Estimations globales : les émissions annuelles globales de N₂O sont estimées à environ 3.5 millions de tonnes dont 34% sont issus des champs cultivés des pays développés et 66% des champs cultivés des pays en voie de développement. Les prairies fertilisées produisent environ 0.3 millions de tonnes de N₂O, les émissions induites par les engrais représentent environ 0.9 millions de tonnes, soit 0.8% des apports d'N. Les plus forts taux d'émission sont observés pour l'urée et tout autre engrais N simple, les plus faibles pour les engrais organiques.

Long-term measurements of N₂O emissions

Une prairie pâturée sur sol argileux produit 11.9kg N ha⁻¹.435j⁻¹ (8.4 kg N ha⁻¹.280j⁻¹ selon Van Cleemput (1994)). Les causes de ces émissions importantes sont des **apports importants en N** (la fertilisation, les dépôts d'urine et de fumier par le bétail), une compaction du sol et une relativement forte humidité.

Une prairie temporaire (non pâturée) sur un sol sablo-argileux produit 3.35 kg N ha⁻¹.312 j⁻¹ et un maïs sur le même type de sol 2.7 kg N ha⁻¹ 312j⁻¹. Ces émissions plus faibles s'expliquent par un apport en N plus faible et de bonnes pratiques (fertilisation contrôlée, un bon système de drainage, une faible compaction...).

Nitrous oxide emissions under different soil and land management conditions

Les taux les plus importants de N₂O sont mesurés au cours du printemps sur le sol brun lixivié hydromorphe qui a été fertilisé avec de l'N.

Les plus faibles émissions (<2g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹) sont mesurées au niveau de la jachère herbacée et du sol nu au niveau des 3 sites.

Les flux calculés par intégration sont compris entre 0.01 kg N ha⁻¹ et 7 kg N ha⁻¹. il y a moins de 100 g n ha⁻¹ pour le seigle, mais la quantité de N₂O peut atteindre plusieurs kg N ha⁻¹ pendant la même période dans le colza fertilisé à Messigny et Longchamp.

Les valeurs moyennes de N₂O peuvent être classées dans l'ordre suivant : jachère herbacée<sol nu<colza fertilisé de façon optimale<colza surfertilisé.

Les plus fortes émissions ont été enregistrées à Longchamp qui est le site où les activités des enzymes impliquées dans la dénitrification sont les plus faibles.

L'activité de la N₂O réductase est certainement un des facteurs contrôlant la quantité de N₂O émis.

Le taux d'N appliqué détermine le taux d'émission de N₂O d'un site donné. Cette donnée indique que les effets de la fertilisation azotée sur les émissions de N₂O augmentent quand la concentration en NO₃⁻ dépasse ca. 25 mg N kg⁻¹ de sol.

Harrison et al. (1995) ont montré une augmentation régulière des flux de N₂O quand la quantité d'N appliquée augmente de 0 à 48 kg N ha⁻¹ et 96 kg N ha⁻¹ ; il y a une pointe d'émissions pour les taux élevés de fertilisation.

Quelque soit le site, le flux moyen de N₂O pour le colza surfertilisé est approximativement 2 fois plus important que celui mesuré sous un colza recevant la dose de fertilisant calculée à partir de la méthode de la balance azotée.

Estimates of N₂O and CH₄ fluxes from agricultural lands in various regions in Europe

En 1996, les émissions de N₂O sont de l'ordre de 672 Gg N₂O-N pour l'Europe des 15 avec une variation de 10 à 17.7 Gg N₂O-N. Ceci représente 11% de l'émission globale de N₂O par l'agriculture (Mosier et Kroeze, 1998).

Différents facteurs influencent les émissions :

- **assolement :**
 - Vermoesen et al.(1996) : prairies fauchées : 3.3 kg N₂O ha⁻¹ sur une période de 435 j (1.7% de l'N appliqué) ; prairies pâturées : 12 kg N₂O ha⁻¹ sur une période de 312 j (2.9%) ; maïs : 2.7 kg N₂O ha⁻¹ sur une période de 312 j (3.6%).
 - Kaiser et al. (1998) : prairies monospécifiques (0.6% de l'N appliqué)>prairies avec trèfle (0.8%).
- **type de fertilisants :**
 - Clayton et al. (1997) : effluents (*cattle slurry*) : 2.2% de l'N appliqué ; urée : 1.4% ; NH₄NO₃ : 1.2% ; Ca(NO₃)₂ : 1.1% ; (NH₄)₂SO₄ : 0.4%.
 - Lessard et al. (1996) : 1% de ma fraction potentiellement minéralisable de l'engrais est émis sous forme de N₂O (environ 0.2% de l'N appliqué).
- **incorporation de l'engrais (pour réduire la volatilisation de NH₃) :**
 - Chadwick et al. (1999) : ce procédé augmente dramatiquement les émissions de N₂O : de 1.96 à 6.16% sur un sol argilo-limoneux et de 0.05 à 0.10% sur un sol sableux.
- **irrigation :**
 - Jambert et al. (1997) : 11 kg N₂O-N ha⁻¹ (3.9% de l'N appliqué) sur un champ de maïs intensivement irrigué > champ de maïs non irrigué (0.6 à 3.6% de l'N appliqué) (Vermoesen et al. (1996)).
 - Teira-Esmatges et al. (1998) : 0.4 à 0.8% de l'N appliqué est émis pour un champ de maïs irrigué.
- **type de sol :**
 - Hénault et al. (1998) : les émissions de N₂O sont plus importantes si le sol contient une forte teneur en argile et en MO et si le pH est alcalin.
- **résidus de culture :**
 - Kaiser et al. (1998) : après l'incorporation des résidus, la plus faible émission est mesurée au niveau du blé : 0.7%, la plus forte pour la betterave à sucre : 4.1%.

Les émissions de N₂O varient de 10.10⁶ kg N₂O-N an⁻¹ pour le Portugal à 177.10⁶ pour la France.

La Grande – Bretagne, l'Allemagne et la France ont des émissions les plus importantes pour l'agriculture.

En Europe, les émissions de N₂O directes représentent 401.10⁶ kg N₂O-N (60%) (N minéral : 23% ; N fumier : 20%, plantes fixatrices d'N : 2%, plantes non fixatrices d'N : 18% et pâturage : 23%) ; les émissions de N₂O indirectes 244.10⁶ kg N₂O-N (36%) et les émissions de N₂O animaux 27 .10⁶ kg N₂O-N (4%).

Les plus importantes émissions par ha sont mesurées aux Pays-Bas, en Belgique, en Allemagne et en Grande-Bretagne où les agricultures sont les plus intensives. Les plus faibles en Suède, Finlande, Italie, Espagne, Portugal et Grèce.

Spatial and temporal scaling of nitrous oxide emissions from the field to the regional scale in Scotland

Les stratégies pour réduire les émissions devraient se concentrer sur les secteurs où les émissions sont importantes via un changement des cultures (potentiel d'émission plus faible), une réduction des fertilisants et du fumier, une diminution du pâturage et une amélioration du drainage du sol.

Les émissions de N₂O dans l'atmosphère à partir du sol dépendent principalement de **l'apport d'N (influencé par l'assolement)** et des processus microbiens (nitrification et dénitrification) qui sont influencés par la température du sol et l'humidité du sol. (Smith et al. 1998).

Clayton et al. (1994) rapportent que le flux de N₂O issu d'une herbe non pâturée est en relation avec la température de l'air, la concentration en azote du sol et les précipitations récentes.

Reiners et al. (1998) : l'effet indirect de la topographie sur le flux de N₂O est principalement dû à l'influence de la topographie sur l'humidité du sol.

Clayton et al. (1997) ; Dobbie et al. (1999) : il existe une forte corrélation entre le taux d'émission de N₂O et l'humidité du sol quand il y a un minimum de 5 mg kg⁻¹sol de N.

Davidson (1991) : une forte humidité du sol entraîne des conditions anaérobiques qui augmentent l'activité dénitrifiante et donc la production de N₂O.

Skiba et al. (1996) : les prairies, en particulier celles qui sont pâturées, donnent les plus fortes émissions de N₂O.

La fréquence et la période d'application des fertilisants pour différentes cultures et le degré d'humidité du sol sont considérées comme étant les facteurs majeurs contrôlant les émissions de N₂O issus des sols cultivés.

Clayton et al. (1997) ; Dobbie et al. (1999) : les émissions de N₂O varient considérablement et sont principalement dépendantes de l'interaction entre l'humidité du sol et la disponibilité du sol en N, par exemple après l'application de fertilisants. (ex : prairies non pâturées : émissions annuelles = 1 kg N ha⁻¹ à 18 kg N ha⁻¹ (Dobbie et al. 1999)).

Les pics de N₂O sont observés immédiatement après l'apport de fertilisants.

Une augmentation des émissions de N₂O est associée avec des sols plus humides et l'extension des systèmes prairiaux pâturés.

Les plus importantes émissions (>10kg N ha⁻¹ an⁻¹) sont associées avec un réseau de drainage naturel, sinueux et étroit dans lequel le ruissellement des sols avoisinants se rassemble. Les sols sont très mal drainés et l'assolement est principalement du pâturage intensif.

Les plus faibles émissions sont observées au niveau des landes et des prairies pâturées extensivement (<1 kg N ha⁻¹ an⁻¹).

Estimates of nitrous oxide emissions from soil in the UK

Les prairies pâturées en GB produisent 16 kt N₂O-N an⁻¹ et constituent la source la plus importante.

Sur les sols agricoles, les émissions maximales de N₂O sont généralement observées dans les 2 à 3 semaines suivant l'application de fertilisants. L'importance des émissions dépend du **taux et de la forme du fertilisant appliqué, du type de culture**, de l'humidité du sol et de la température du sol.

Les émissions de N₂O sont plus importantes pour les prairies non pâturées que pour les sols arables.

Les émissions totales pour les prairies non pâturées, fertilisées avec NH₄NO₃ sont de 1.7 ; 4 et 1.2 kg N₂O-N ha⁻¹ en 1992, 1993 et 1994 respectivement.

Les plus importantes émissions ont été enregistrées au cours de l'année la plus humide (1993), s'élevant à 1.1% du NH₄NO₃ appliqué, en comparaison des 1.4% et 0.3% pour l'urée et (NH₄)₂SO₄ respectivement.

Les prairies sont la source majeure de N₂O issu des sols agricoles, spécialement **les prairies pâturées qui à elles seules contribuent à 70% des émissions totales agricoles**. Ceci est dû à un gros % de perte de N appliqué, à cause de la compaction et de l'addition non chiffrée d'N via l'urine et le purin, et aussi le fort % de parcelles agricoles fertilisées qui sont pâturées.

Les émissions de N₂O issues des pommes de terre sont plus importantes que celles des céréales du fait d'une application tardive de fertilisants (quand le sol est chaud), d'une exudation racinaire pendant le développement du tubercule et des résidus de culture moins stables après la récolte.

Controlling nitrous oxide emissions from agriculture : experiences in the Netherlands

Spécialement au niveau d'une ferme laitière, les émissions de N₂O sont liées avec celle de CH₄.

Les fertilisants inorganiques (sur sol sableux dans les quantités recommandées) sur des prairies produisent de plus faibles émissions de N₂O que les fertilisants organiques.

Dolfing et al. : L'application de fertilisants avec des petites doses réduit les émissions de N₂O issues des prairies. Les plus faibles émissions sont observées quand de l'ammonium sulfate 100 et du nitrate d'ammonium 50/50 sont utilisés suivant un protocole.

Velthof et al. : le fumier issu d'une digestion anaérobie diminue les émissions de N₂O sur sol argileux, par rapport à « undigested manure ».

Techniques pour réduire les émissions :

- **restreindre le pâturage**
- **appliquer moins de fertilisants azotés**
- **diminuer le chargement**
- construire plus de bâtiments d'élevage produisant de plus faibles émissions de NH₃.

The impact of grassland ploughing on CO₂ and N₂O emissions in the Netherlands

Les émissions sont très importantes directement après le labour et diminuent lentement pendant une période d'au moins 50 ans.

Les émissions de N₂O au niveau de la **rotation 3/3** (prairie temporaire et cultures) sont de 2.1 tonnes CO₂ équ. ha⁻¹ an⁻¹ et de 11.0 tonnes CO₂ équ. ha⁻¹ an⁻¹ pour la **rotation 6/1** (prairie temporaire (6) et bulbe (1)).

Pour la « rénovation » des prairies, les émissions sont de 1.8 à 5.5 tonnes de CO₂ équivalents ha⁻¹.

Les pertes et les émissions de N₂O dans le cas des bulbes sont 5 fois plus importantes du fait d'une longue période en prairie temporaire et une opportunité réduite d'utiliser l'azote libéré.

Il est estimé que en 2000 approximativement 1.7 Mtonnes CO₂-équivalents dont 0.6 Mtonnes de N₂O ont été émis du fait du **labour des prairies**.

Nitrous oxide emissions from grazed grassland : effects of cattle management and soil conditions

Les élevages laitiers se caractérisent par un surplus considérable d'N et l'N déposé au cours du pâturage représente un risque significatif pour l'environnement de part les émissions de N₂O.

La concentration en azote dans les tâches d'urine peut aller de 20 à 80 g N m⁻², et les conditions du sol associées à de telles concentrations peuvent affecter la production de N₂O via la nitrification et la dénitrification. Les propriétés du sol et la fertilisation peuvent aussi influencer les émissions de N₂O.

La régulation des émissions de N₂O peut varier avec la composition de l'urine et les conditions pédologiques.

Une optimisation de la nourriture pourrait permettre de réduire les émissions de N₂O, bien que ceci soit compliqué par les effets de la qualité de la pelouse (« sward »), le stade de lactation, les conditions climatiques et le type de sol.

Estimating annual N₂O emissions from agricultural soils in temperate climates

MCROPS (modèle) montre que les températures printanières et les précipitations estivales expliquent 35% de la variance des émissions annuelles de N₂O issues des cultures.

MGRASS montre que la fertilisation azotée et les températures hivernales expliquent 48% de la variance des émissions annuelles de N₂O issues des prairies.

Sur une base annuelle, **les céréales émettent moins de N₂O que les prairies et des différences apparaissent parmi les différents types de cultures** (Skiba et al. 1996 ; Wagner-Riddle et al. 1997 ; Henault et al. 1998 ; Kaiser et al. 1998 ; Smith et al. 1998 ; Dobbie et al. 1999).

Nitrous oxide emission from urine-treated soil as influenced by urine composition and soil physical conditions

Les tâches d'urine du bétail et des moutons sur les pâtures représentent de considérables sites d'application d'N.

Emissions de N₂O : 0.3% de l'N appliqué (urine) (sol sec)
0.9% (sol humide)
+ compaction (sol humide) : 4.9%
+ fumier (sol humide) : 7.9%

Oenema et al. (1997) : **entre 0.1 et 3.8% de l'urine est émis dans l'atmosphère**

Entre 0.1 et 0.7% du fumier est émis dans l'atmosphère

Les émissions cumulées pendant la période d'incubation sont plus importantes pour « urine + fumier » et « urine + compaction » (résultats significativement différents).

Les effets de la compaction et de l'addition de fumier augmentent de 5 à 8 fois les émissions.

Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain : the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables

EF (emission factor) = quantité de N₂O-N émis exprimé comme une fraction ou un% de l'N appliqué. D'après Clayton et al. (1997) ; Dobbie et al. (1999) : EF pour les sols agricoles écossais : 0.2 à 7% ; Bouwman (1996) : 0 à 7.8% ; Mosier et Kroeze (1999) : 0.1 à 7.3%

Les émissions les plus importantes sont observées pour les sols avec de **l'herbe fauchée pour ensilage par rapport à des sols où des céréales ou des plantes annuelles** poussent.

Les émissions de fond correspondent au flux obtenu de sols non fertilisés.

Prairies :

- pics d'émissions de N₂O aussitôt après l'application d'azote
- de 27.6 kg N₂O-N ha⁻¹ an⁻¹ à 1.7 kg
- facteurs d'émission : 0.4 à 6.5%

Terres arables :

- émissions moins importantes que pour les prairies
- la plus importante émission apparaît après la récolte du blé d'hiver
- facteurs d'émission faible pour le blé : 0.6% et orge : 0.5%, pour la pomme de terre : 1.5%.

Flux issus de parcelles non fertilisées (prairies) : 0.3 kg N₂O-N ha⁻¹ an⁻¹

Terres arables : des études antérieures (McTaggart et Smith, 1996 ; McTaggart et al., 1997) montrent que les émissions de fond issues **des cultures non fertilisées sont relativement et absolument plus élevées que celles correspondant aux prairies**. En 1993, le flux de printemps pour un orge de printemps fertilisé est de 0.4 kg N₂O-N ha⁻¹, tandis que le flux correspondant pour un orge non fertilisé est de 0.3 kg N₂O-N ha⁻¹. Les flux équivalents pour les prairies sont 2.2 et 0.1 kg N₂O-N ha⁻¹, respectivement (Clayton et al. 1997 ; McTaggart et al. 1997).

Les émissions de fond sont une proportion plus importante du flux total pour les cultures fertilisées. Ceci est une conséquence de la minéralisation des **résidus de culture**.

Rq : au niveau de tous les sites d'études, les cultures suivent des cultures de céréales, après lesquelles la paille a été enlevée des parcelles. Donc, la source d'N minéral à l'origine des émissions de N₂O est semble-t-il la minéralisation des racines.

Quand la distribution des facteurs d'émission des prairies et des terres arables est représenté séparément, il est évident que les facteurs d'émission des céréales à « petit grain » (et colza) présentent des pics pour des valeurs plus faibles, tandis que les valeurs pour les légumes avec des feuilles et les pommes de terre sont semblables à celles des prairies.

Spatial variability of nitrous oxide fluxes in mown and grazed grasslands on a poorly drained clay soil

Les effets combinés du **fumier, de l'urine et du compactage du sol par le bétail** sur les prairies pâturées entraînent des flux de N₂O plus importants par rapport à des prairies fauchées comparables. (Carran et al. 1995 ; Velthof et Oenema 1996).

Les flux de N₂O augmentent rapidement après l'application d'N, suggérant que la couche de surface est le principal site de la production de N₂O.

La variabilité spatiale des flux est large. Les flux issus des prairies pâturées sont sensiblement plus importants que ceux issus des prairies fauchées.

Flux moyens : - prairies pâturées : 5.68 mg m⁻² h⁻¹ (21 sept) ; 6.46 mg m⁻² h⁻¹ (22 sept)

- prairies fauchées : 4.81 mg m⁻² h⁻¹ (20 sept) ; 1.22 mg m⁻² h⁻¹ (21 sept)

Les résultats suggèrent que les flux sont plus importants pour les prairies pâturées que pour les prairies fauchées (mêmes résultats que Velthof et Oenema 1995)

Le gazon pâturé doit avoir un meilleur potentiel d'assimilation de l'azote que la prairie fauchée, mais doit avoir reçu une plus grande quantité de NH₄⁺ en retour via l'urine et le fumier. Au total, plus d'azote minéral est présent sous la fauche le 20 sept mais le ratio NH₄⁺/NO₃⁻ est plus important pour la pâture.

Ces modèles suggèrent que la nitrification est une source significative de N₂O pour les **prairies pâturées** et la dénitrification pour les **prairies fauchées**.

Références bibliographiques mobilisées

Bareth, G., Heincke, M. & Glatzel, S. 2001. Soil-land-use-system approach to estimate nitrous oxide emissions from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **60** : 219 – 234.

Boeckx, P. & Van Cleemput, O. 2001. Estimates of N₂O and CH₄ fluxes from agricultural lands in various regions in Europe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **60** : 35-47.

Bouwman AF, 1996, Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. In nutrient Cycling in Agroecosystems. 46 : 53-70.

Brown, L., Syed, B., Jarvis, S.C., Sneath, R.W., Phillips, V.R., Goulding, K.W.T., Li, C. 2002. Development and application of a mechanistic model to estimate emission of nitrous oxide from UK agriculture. *Atmospheric Environment* **36**: 917-928.

Chadwick D.R, Sneath R.W., Phillips V.R., Pain B.F, 1998, A UK inventory of nitrous oxide emissions from farmed livestock, *Atmospheric Environment* **33** (1999) 3345-3354.

Chantigny M, Emissions de protoxyde d'azote (N₂O) en agriculture, contribution des amendements organiques, des fertilisants minéraux et du labour, 65^e Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec.

Clayton, H., McTaggart, I. P., Parker, J., Swan & Smith, K. A. 1997. Nitrous oxide emissions from fertilised grassland : a 2-year study of the effects of N fertiliser form and environmental conditions. *Biol Fertil Soils* **25** : 252 – 260.

Dobbie, K.E. & Smith, K.A. 2003. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology* **9**: 204-218

FAO et IFA, 2003. Estimations des émissions gazeuses de NH₃, NO et N₂O par les terres agricoles à l'échelle mondiale, première version.

Flessa. H and al, 2000. Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **91** (2002) 175-189.

- Gabrielle B., Laville P. and al, 2005, Simulation of nitrous emissions from heat-cropped soils using CERES, Nutrient Cycling in Agroecosystems (2006) 74 : 133-146.
- Germon J.C., Bouwman A.F., Sol et changement climatique, Scientific registration n°3026, symposium n°26.
- Glyn Francis and al, 2004, Emission of nitrous oxide from fertilised potatoes, SuperSoil : 3rd Australian New Zealand Soils Conference , 5-9 December 2004, University of Sydney, Australia, Crop & Food research.
- Harrison R., Ellis S., Cross R., Hodgson J.H., 2002, Emissions of nitrous oxide and nitric oxide associated with the decomposition of arable crop on a sandy loam soil in Eastern England, Agronomie 22 (2002) 731-738, INRA, EDP Sciences 2002.
- Hénault C, Devis X, Lucas J.L., Germon J.C, Influence of different agricultural practices (type of crop – from of N-fertilizer) on soil N₂O emissions. Enregistrement scientifique n°993, Symposium n°26.
- Hénault C, Devis X, Page S, Justes E, Reau R & Germon JC (1998) Nitrous oxide emissions under different soil and land management conditions. Biol Fertil Soils 26: 199–207
- Hénault, C., Chèneby, D., Heurlier, K., Garrido F., Pérez, S. & Germon, J. C., 2001. Laboratory kinetics of soil denitrification are useful to discriminate soils with potentially high levels of N₂O emission on the field scale. *Agronomie* **21** : 713 – 723.
- Jambert C, Serça D & Delmas R (1997) Quantification of N losses as NH₃, NO, and N₂O and N₂ from fertilized maize fields in south-western France. Nutr Cycl Agroecosyst 48: 91–104
- Kaiser EA, Kohrs K, Kücke M, Schnug E, Heynemeyer O & Munch :JC (1998) Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilisation, crops and temporal variation. Soil Biol Biochem 30: 1553–1563
- Kaiser, E.A. & Ruser, R. 2000. Nitrous oxide emissions from arable soils in Germany - An evaluation of six long-term field experiments. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **163**: 249-259.
- Kramer K.J., Moll H.C., Nonhebel S., 1999, Total greenhouse gas emissions related to the Dutch crop production system, Agriculture, Ecosystems and Environment 72 (1999) 9-16.
- Kuikman, P.J., Velthof, G.L. & Oenema, O. 2003. Controlling nitrous oxide emissions from agriculture : experiences in the Netherlands. In : *Proceedings of the 3rd International Methane and Nitrous Oxide Mitigation Conference. Beijing. China.* pp.415-422.
- Laville P., Cellier P., Nitrous oxide emission from agricultural land : compararison between measurements by closed chamber and micrometeorological techniques. Enregistrimnt scientifique n°988, symposium n°26.
- Lilly, A., Ball, B.C., McTaggart, I.P. & Horne, P.L. 2003. Spatial and temporal scaling of nitrous oxide emissions from the field to the regional scale in Scotland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **66** : 241-257.
- McTaggart, I.P., Clayton, H., Parker, J., Swan, L. & Smith, K.A., 1997. Nitrous oxide emissions from grassland and spring barley, following N fertiliser application with and without nitrification inhibitors. *Biol Fertil Soils* **25** : 261-268.
- Petersen, S. O., Simek M., Stamatiadis, S. & Yamulki, S. Nitrous oxide emissions from grazed grassland : effects of cattle management and soils conditions.
- Regina, K. and al. Nitrous Oxide Emissions from Organic and Conventional Crop Rotations in Europe.
- Roelandt, C., van Wesemael, B. & Rounsevell, M. (submitted) Modelling annual N₂O emissions from arable and grassland soils in temperate climates. *Global Change Biology* (submitted).
- Scott, A., Ball, B.C., Crichton, I. & Aitken, M.N. 2000. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions from grassland amended with sewage sludge. *Soil Use and Management* **16**: 36-41
- Skiba U., McTaggart I.P., Smith K.A., Hargreaves K.J. and Fowler D. 1996. Estimates of nitrous oxide emissions from soil in the UK. *Energ. Conv. Manage.* 37: 1303–1308.
- Smith K.A., Thomson P.E., Clayton H., McTaggart I.P., Conen F., Effects of temperature, water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils, *Atmos. Environ.* 32 (1998) 3301–3309

- Smith P. and al, 2004 Greenhouse Gas Emissions from European Croplands, This discussion paper arifinated from a workshop in Clermont-Ferrand, France, September 2003, a contribution to the project *Concerted Action CarboEurope-GHG*, wich is part of the CarboEurope Cluster.
- Soussana, J. F. et al. 2004. Sources et puits de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O) en prairie pâturée et stratégies de réduction.
- Soussana, J.F., Salètes, S., Smith, P., Schils,R. & Ogle, S., 2004. Greenhouse Gas Emissions from European Grasslands.
- Steve Thomas and al, , 2004, Effects of tillage and soil moisture on forage production and N₂O emissions from simulated grazing of winter forage crop, SuperSoil : 3rd Australian New Zealand Soils Conference , 5-9 December 2004, University of Sydney, Australia, Crop & Food research.
- Thorman, R. E., Webb, J. & Atkin, D. W. Nitrous Oxide Emissions from Arable Land – Influence of Solid Manure Type and Incorporation Technique.
- Van Groenigen, J.W., Kuikman, P.J., de Groot, W.J.M., & Velthof, G.L. 2004. Nitrous oxide emission from urine-treated soil as influenced by urine composition and soil physical conditions. *Soil Biology and Biochemistry* (in press)
- Vellinga, Th.V., Van den Pol-van Dasselaar, A. & Kuikman, P.J. 2004. The impact of grassland ploughing on CO₂ and N₂O emissions in the Netherlands. *Nutrient Cycling and Agroecosystems* (in press)
- Velthof G.L., Kuikman P.J, Oenema O., 2002, Nitrous oxide emission from soils amended with crop residues, Nitruent Cycling in Agroecosystems 62 : 249-261.
- Velthof G.L., Kuikman P.J, Oenema O., 2003, Nitrous oxide emission from animal applied to soil under controlled conditions. *Biol Ferti Soils* (2003) 37 : 221-230.
- Velthof, G. L. and Oenema, O., 1997. Nitrous oxide emission from dairy farming systems in the Netherlands. *Netherlands Journal of Agricultural Science* **45** : 347 – 360.
- Velthof, G.L., Jarvis, S.C., Stein, A., Allen, A.G. & Oenema, O. 1996. Spatial variability of nitrous oxide fluxes in mown and grazed grasslands on a poorly drained clay. *Soil Biology and Biochemistry* **28**: 1215 – 1225.
- Velthof, G.L., Oenema, O., Postma, R. & M.L. van Beusichem, M.L. 1997. Effect of type and amount of applied nitrogen fertilizer on nitrous oxide fluxes from intensively managed grassland. *Nutrient cycling in Agroecosystems* **46**: 257 – 267.
- Vermoesen A, Van Cleemput O & Hofman G (1996) Long-term measurements of N₂O emissions. *Energy Convers Mgmt* 37: 1279–1284.