



HAL
open science

Pression agricole sur les ressources en eau : évolution du risque nitrate dans les bassins de la Meuse et de la Moselle

Davide Rizzo, Guillaume Godfroy, Marc Benoît

► To cite this version:

Davide Rizzo, Guillaume Godfroy, Marc Benoît. Pression agricole sur les ressources en eau : évolution du risque nitrate dans les bassins de la Meuse et de la Moselle. [Contrat] INRA SAD-Aster. 2013. hal-02810521

HAL Id: hal-02810521

<https://hal.inrae.fr/hal-02810521>

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.



RAPPORT FINAL DU PROJET DynAMM'Eau

Pression agricole sur les ressources en eau :
évolution du risque nitrate
dans les bassins de la Meuse et de la Moselle

CONVENTION PARTICULIERE ZONE ATELIER MOSELLE

convention cadre AERM-INRA

Thème : territoires ruraux et ressources en eau



Davide **RIZZO**, Guillaume **GODFROY**, Marc **BENOÎT**

INRA UPR 055 SAD-ASTER, 88500 Mirecourt

Avril / 2013

Résumé

Les bassins de la Meuse et de la Moselle renferment les ressources en eau qui alimentent l'essentiel de la population lorraine et une partie des Ardennes, soit plus de deux millions d'habitants. De plus, les eaux véhiculées par la Meuse et la Moselle constituent l'essentiel des eaux frontalières que la France délivre vers ses voisins européens, Allemagne, Belgique, Luxembourg). Ces enjeux sont à l'origine de ce travail sur l'état des pressions azotées d'origine agricole sur les ressources en eau mené au sein de l'unité INRA SAD-ASTER.

L'**objectif** du projet de recherche DynAMM'Eau est de représenter l'évolution et la spatialisation de la pression azotée d'origine agricole sur les ressources en eau des bassins de la Meuse et de la Moselle. Il répond à une double demande sociétale. D'un côté hiérarchiser et localiser les systèmes de cultures selon la pression azotée induite sur les ressources en eau. De l'autre côté identifier les zones à risques vis-à-vis de la pollution de l'eau par l'azote en caractérisant les bassins de forte pression agricole.

La **démarche** mise au point dans cette recherche a articulé quatre figures principales :

- Une **mobilisation d'une base d'information spatialement dense** et sur la longue durée : les enquêtes TerUti où sont instruits les couverts végétaux et bâtis. Ces données TerUti fournissent chaque année des informations de 1981 à 2010, bien que présentant des discontinuités dans le temps (en 1990 et 2004-05). Et elles permettent un échantillonnage spatial dense sur un maillage 3 km carrés, d'environ 23 800 points annuels (réduits à 60% pour la période 2006-10). Leur traitement a permis de récupérer les trajectoires principales d'occupation du sol, en particulier les successions de cultures.
- Une **mobilisation des outils statistiques** pour identifier les successions de culture afin de regrouper les bassins selon leurs ressemblances sur la diversité des successions de culture présentes (ACH), puis pour évaluer les significativités des calculs de BASCULE.
- Un **calcul régional de l'indicateur BASCULE** (Balance Azotée Spatialisée des Systèmes de Culture de l'Exploitation) qui sur la base des successions identifiées a permis, en dépouillant les 1 982 enquêtes PK parcellaires (Pratiques Culturelles menées par le SSP), de calculer ces BASCULE en 1994, 2001 et 2006.
- Une **spatialisation des pressions agricoles** cohérentes avec les entités hydrogéologiques. Le maillage territorial a suivi un zonage hydrographique. Une liste et cartographie de bassins dits « élémentaires », sous-unités des bassins versants de la Meuse et de la Moselle, a été fournie par l'Agence de l'Eau Rhin Meuse.

Le **résultat principal** est la production d'une matrice lorraine construite sur la base des successions de culture identifiées de 1981 à 2010. Les successions majoritaires évoluent à partir d'un même module et tendent à rendre progressivement dominantes les successions sur trois années bâties autour du colza, du blé d'hiver et de l'orge d'hiver. Cependant la proportion des successions varient selon les bassins, avec une part encore importante de successions construites autour du maïs ensilage en Moselle amont, et une part encore plus dominante du triplet colza-blé-orge, en bassin de Seille et dans le bassin Ferrifère. Quand nous prenons en considération les BASCULE sur la période 1994 à 2007, une première tendance se dégage : une diminution de la proportion des balances azotées élevées (supérieures à 30 kg N /ha) dans l'ensemble des balances azotées.

Un **deuxième résultat** concerne le contraste entre cultures. Le **maïs** voit sa balance très déséquilibrée : trois quart des parcelles ont une balance supérieure à 30 kg N/ha, et la classe la plus représentée est celle des 150 à 180 kg N/ha. Pour contrebalancer ce constat, les surfaces en maïs ont cessé de croître depuis 1992. Le **colza** a également une balance déséquilibrée : 80 % des parcelles ont une balance supérieure à 30 kg N/ha, et la classe la plus représentée est celle des 60 à 90 kg N/ha. Contrairement au maïs, les surfaces de colza ont crû considérablement entre 1981 et 2010, passant de 2% à 5% de la surface des bassins, soit plus du double des surfaces en maïs en 2010. Le **blé d'hiver** et l'**orge d'hiver** ont des profils semblables : plus de la moitié des balances sont inférieures à 30 kg N/ha, le blé ayant les balances les plus modestes avec la classe la plus représentée entre - 30 et 0 kg N/ha, alors que pour l'orge il s'agit de la classe 0 à 30 kg N/ha. Les évolutions de surfaces sont favorables car les surfaces en blé croissent de 5 à 10 et celles en orge passent de 7 à 5 %.

En **conclusion** cette recherche, qui s'appuie sur le schéma DPSIR, permet une première spatialisation des pressions azotées des bassins de la Meuse et de la Moselle, en identifiant les principaux risques pour les ressources en eau qui perdurent au sein de la conduite des systèmes de culture lorrains. Les améliorations à apporter sur cette évaluation des pressions agricoles sur les ressources en eau concernent trois éléments : (i) un traitement complémentaires des enquêtes « pratiques culturelles » concernant les prairies permanentes, (ii) une comparaison des résultats obtenus dans tous les sous-bassins de la Meuse et de la Moselle, avec les pressions modifiées dans le cadre des opérations Agri-Mieux, et (iii) une poursuite de la spatialisation de la pression sur les critères pesticides.

Nous remercions pour leurs aides : Catherine MIGNOLET et Céline SCHOTT de l'unité ASTER, Jean-François Mari de l'UMR LORIA, et François-Xavier Schott de la CRAL. Les données TerUti et des enquêtes Pratiques Culturelles ont été mis gracieusement à disposition par le Service de la Statistique et de la Prospective (SSP) du Ministère en charge de l'agriculture.

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
1.1	CONTEXTE :	1
1.2	RECHERCHE SUR UNE PARTIE DU DPSIR : LES PRESSIONS	2
1.3	PRESENTATION DE L'ACTION DE RECHERCHE POUR LA MEUSE ET LA MOSELLE	2
2	MATERIEL ET METHODE	3
2.1	ETAPES DE TRAVAIL : CARACTERISATION DU TERRITOIRE SELON LES SUCCESSIONS DE CULTURES MAJORITAIRES, PUIS CALCUL DE L'INDICATEUR BASCULE SUR LES DIFFERENTES UNITES SPATIO-TEMPORELLES IDENTIFIEES	3
2.2	POINT SUR LES BASES DE DONNEES DISPONIBLES	4
2.2.1	<i>Informations nécessaires et présentation des différentes enquêtes</i>	4
2.2.2	<i>Choix des traitements de données effectués</i>	5
2.2.2.1	D'éventuelles discontinuités dans les ensembles de bases de données issues des enquêtes TerUti et PK	5
2.2.2.2	TerUti : pas de localisation précise mais rattachée aux communes	6
2.2.2.3	Entités spatiales : les bassins élémentaires (nécessité d'agrégation de certains BE => expertise AERM)	6
2.2.2.4	Enquêtes Pratiques Culturelles (PK) définition des termes tels que « parcelle » dans ces enquêtes : 7	
2.3	PARTIE 1 : CARACTERISATION DU TERRITOIRE SELON LES SUCCESSIONS DE CULTURES MAJORITAIRES	7
2.3.1	<i>Le concept de succession de culture utilisé par CarottAge / ArpentAge</i>	8
2.3.2	<i>Temps de retours : Analyse des trois séries d'enquêtes TU(L) sur 15 séquences à partir d'une fenêtre glissante de 5 années consécutives</i>	8
2.3.3	<i>Classification hiérarchique sur l'analyse en composantes principales</i>	10
2.3.3.1	ACP (données non réduites)	10
2.3.3.2	Construction et caractérisation des clusters	10
2.3.4	<i>Validation des résultats : atelier participatif</i>	10
2.4	PARTIE 2 : ÉVALUATION DE LA PRESSION AZOTEE PAR APPLICATION DE L'INDICATEUR BASCULE	11
2.4.1	<i>Principe de calcul de l'indicateur BASCULE</i>	11
2.4.1.1	Etape 1 "Relevé des pratiques agricoles"	11
2.4.1.2	Etape 2 "Calcul par année de la balance par parcelle"	11
2.4.1.3	Etape 3 "Calcul de la balance moyenne sur plusieurs années consécutives par parcelle (BASCULE parcellaire)"	14
2.4.1.4	Etape 4 "Calcul de la BASCULE de l'ensemble des parcelles situées sur la zone étudiée (addition des BASCULE positives, non soustraction des BASCULE négatives)"	14

2.4.2	<i>Eventuellement en encadré : ajustements apportés au mode de calcul original de l'indicateur BASCULE</i>	16
2.4.2.1	Calcul d'une BASCULE surfacique et non pas cumulée sur l'ensemble de la surface des parcelles concernées.....	16
2.4.2.2	Questionnement sur les valeurs des teneurs en azote des matières organiques exportées et des fertilisants organiques épandus	16
2.4.3	<i>Spatialisation des résultats de l'indicateur par cluster sur les zones agricoles (Corine Land Cover)</i>	16
3	RESULTATS	17
3.1	CARACTERISATION DES PRINCIPALES SUCCESSIONS DE CULTURE	17
3.1.1	<i>Dynamiques d'évolution de l'occupation des sols</i>	17
3.1.2	<i>Temps de retour des principales cultures</i>	19
3.2	TPOLOGIE DES SUCCESSIONS DE CULTURES MAJORITAIRES PAR CAH PUIS PAR ACP	19
3.2.1	<i>Descriptions des composantes principales</i>	19
3.2.2	<i>Description et cartographie des clusters obtenus</i>	20
3.3	DISTRIBUTIONS DES BALANCES AZOTEES	24
3.3.1	<i>Distribution de l'ensemble des balances azotées</i>	24
3.3.2	<i>Distributions des balances azotées distinguées selon la culture</i>	25
3.3.2.1	Sans distinction H/P et f/g.....	25
3.3.2.2	Avec distinction H/P et f/g.....	27
3.3.3	<i>Distributions des balances azotées distinguées selon l'année PK</i>	32
3.3.4	<i>Distributions des balances azotées distinguées selon le cluster</i>	33
3.4	PLAGES DE BASCULE OBTENUES	36
3.4.1	<i>Selon année PK et cluster</i>	36
3.4.2	<i>Selon précédent et culture</i>	37
3.4.2.1	Sans distinction H/P et f/g.....	37
3.4.2.2	Avec distinction H/P et f/g.....	38
3.5	CARTOGRAPHIE DES PRESSIONS AZOTEES APPLIQUEES AUX DIFFERENTS CLUSTERS.....	39
4	DISCUSSIONS	42
4.1	EFFET DE LA PRISE EN COMPTE DES REPOUSSES DE PRECEDENTS CULTURAUX ET/OU DE L'IMPLANTATION D'UNE CIPAN	42
4.2	POSSIBILITES D'ACTUALISATION DES TENEURS EN AZOTE	43
4.3	REALISATION DES EXTRAPOLATIONS DES BALANCES AZOTEES DES CULTURES EN PLACE AUX PRECEDENTS CULTURAUX EN UTILISANT LES MOYENNES ET LES INTERVALLES DE CONFIANCE	43
4.4	CALCULS DES BASCULE POUR L'ENSEMBLE DES SURFACES DES CLUSTERS : LIMITES ET VOIES D'AMELIORATION	45

5	CONCLUSION	46
5.1	RETOUR SUR LES RESULTATS	46
5.1.1	<i>Des pratiques agricoles très homogènes sur les bassins versants de la Meuse et de la Moselle</i>	46
5.1.2	<i>Une situation très préoccupante au vu des valeurs de BASCULE, souvent au-delà de 30 kgN/ha.....</i>	46
5.1.3	<i>Des résultats à considérer avec vigilance, au regard de la simplicité des calculs et de la fragilité de la base de données initiale (mode d'échantillonnage TU et PK, effectifs disponibles),</i>	46
5.2	POUR ALLER UN PEU PLUS LOIN	47
5.2.1	<i>Extrapolations temporelles et spatiales.....</i>	47
5.2.2	<i>Collaboration avec la CRAL pour application de la BASCULE aux opérations Agri-Mieux</i>	47
5.2.3	<i>Amélioration de la précision et de la quantité des données : vers un partenariat avec des détenteurs d'informations sur les pratiques agricoles.....</i>	47
5.2.4	<i>Application de la démarche aux prairies.....</i>	47
5.2.5	<i>Application de la démarche aux pesticides</i>	47
6	BIBLIOGRAPHIE	49

Table des illustrations

Figure 1 - Carte du territoire d'étude et des bassins qui le compose.....	1
Figure 2 - Schéma du modèle DPSIR (OCDE, 1993b)	2
Figure 3 - Nature et usages des indicateurs d'environnement (OCDE, 1993b)	3
Figure 4 - Nombre de points TerUti par bassin élémentaire et seuil d'acceptabilité des effectifs	6
Figure 5 – Carte d'agrégation des bassins élémentaires	7
Figure 6 - Moyennes et écarts-types des balances azotées de différents ensembles « culture en place – cluster – année PK » (en kg N/ha/an) ($n \geq 20$ pour chaque ensemble)	12
Figure 7 - Démarche méthodologique envisagée pour l'étape d'extrapolation des balances azotées.....	13
Figure 8 - Représentation schématique des effectifs des différentes classes constituées par recoupements des critères « année PK », « cluster », « culture en place » et « précédent cultural » (≥ 20 , < 20 non nul, nul)....	15
Figure 9 - Distribution cumulative des principales occupations des sols agricoles, exprimée en pourcentage nombre de points par occupation des sols sur le nombre totale de points TerUti (Lucas).	17
Figure 10 - Tendances des principales occupations agricoles des sols, exprimées en pourcentage nombre de points par occupation des sols sur le nombre totale de points TerUti (Lucas).	18
Figure 11 - Détail des tendances des principales cultures, exprimées en pourcentage nombre de points par occupation des sols sur le nombre totale de points TerUti (Lucas).	18
Figure 12 Graphique de la variance expliquée par chaque composante principale.	19
Figure 13 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour l'ensemble des cultures en place	24
Figure 14 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de blé tendre	25
Figure 15 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de colza	26
Figure 16 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de maïs.....	26
Figure 17 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place d'orge.....	27
Figure 18 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de blé tendre d'hiver	28
Figure 19 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de blé tendre de printemps.....	28
Figure 20 -Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de colza d'hiver	29
Figure 21 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de colza de printemps.....	29
Figure 22 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de maïs fourrage.....	30
Figure 23 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de maïs grain	30

Figure 24 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place d'orge d'hiver	31
Figure 25 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place d'orge de printemps	31
Figure 26 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires issues des enquêtes PK 1994	32
Figure 27 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires issues des enquêtes PK 2001	32
Figure 28 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires issues des enquêtes PK 2006	33
Figure 29 - Distribution des balances azotées annuelles pour les parcelles localisées dans le cluster 1	34
Figure 30 - Distribution des balances azotées annuelles pour les parcelles localisées dans le cluster 3	34
Figure 31 - Distribution des balances azotées annuelles pour les parcelles localisées dans le cluster 4	35
Figure 32 - Distribution des balances azotées annuelles pour les parcelles localisées dans le cluster 6	35
Figure 33 - Valeurs inférieures, centrales et supérieures de l'indicateur BASCULE et nombre de parcelles concernées pour chaque ensemble "cluster d'appartenance – année d'enquête PK"	36
Figure 34 - Valeurs inférieures, centrales et supérieures de l'indicateur BASCULE et nombre de parcelles concernées pour chaque ensemble "culture en place – précédent cultural"	37
Figure 35 - Valeurs inférieures, centrales et supérieures de l'indicateur BASCULE et nombre de parcelles concernées pour chaque ensemble "culture en place – précédent cultural", avec distinctions H/P et f/g	38
Figure 36 - Valeurs inférieures, centrales et supérieures de l'indicateur BASCULE pour l'ensemble des surfaces étudiées (pourcentages de surfaces non prises en compte dans les calculs complémentaires - urbaines et autres) et nombre de parcelles concernées pour chaque ensemble "cluster – année PK"	40
Figure 37 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur l'ensemble des surfaces des différents clusters pour l'année d'enquête PK 1994* * <i>Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)</i>	40
Figure 38 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur l'ensemble des surfaces des différents clusters pour l'année d'enquête PK 2001* * <i>Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)</i>	41
Figure 39 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur l'ensemble des surfaces des différents clusters pour l'année d'enquête PK 2006* * <i>Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)</i>	41
Figure 40 - Plages de valeurs de BASCULE et effectifs des différents ensembles "cluster-année PK", sans (à gauche) ou avec (à droite) prise en compte des implantations de CIPAN ou des repousses de précédents	42
Figure 41 - Plages de valeurs de BASCULE et effectifs des différents ensembles "culture en place – précédent cultural " sans distinction H/P et f/g, sans (à gauche) ou avec (à droite) prise en compte des implantations de CIPAN ou des repousses de précédents	42
Figure 42 - Plages de valeurs de BASCULE et effectifs des différents ensembles "culture en place – précédent cultural " avec distinction H/P et f/g, sans (à gauche) ou avec (à droite) prise en compte des implantations de CIPAN ou des repousses de précédents	43
Figure 43 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 50% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" sans distinction H/P et f/g (à droite)	44
Figure 44 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 20% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" sans distinction H/P et f/g (à droite)	44

Figure 45 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 5% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" sans distinction H/P et f/g (à droite).....	44
Figure 46 – Clusters des bassins élémentaires pour la période 1981-1990	XIII
Figure 47 – Clusters des bassins élémentaires pour la période 19992-2003	XIII
Figure 48 – Clusters des bassins élémentaires pour la période 2006-2010	XIV
Figure 49 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 50% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" avec distinctions H/P et f/g (à droite).....	XV
Figure 50 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 20% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" avec distinctions H/P et f/g (à droite).....	XV
Figure 51 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 5% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" avec distinctions H/P et f/g (à droite).....	XV
Figure 52 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur les seules cultures assolées des surfaces agricoles des différents clusters pour l'année d'enquête PK 1994* <i>*Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)</i>	XVII
Figure 53 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur les seules cultures assolées des surfaces agricoles des différents clusters pour l'année d'enquête PK 2001* <i>*Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)</i>	XVIII
Figure 54 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur les seules cultures assolées des surfaces agricoles des différents clusters pour l'année d'enquête PK 2006* <i>*Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)</i>	XVIII

Evolution et spatialisation de
la pression azotée d'origine
agricole sur les ressources en
eau des bassins de la Meuse et
de la Moselle

1 Introduction

1.1 Contexte

Les bassins de la Meuse et de la Moselle renferment les ressources en eau qui alimentent l'essentiel de la population lorraine, et une partie des Ardennes soit plus de deux millions d'habitants. De plus, les eaux véhiculées par la Meuse et la Moselle constituent l'essentiel des eaux frontalières que la France délivre vers ses voisins européens, Allemagne, Belgique, Luxembourg (*figure 1*). Ces enjeux sont à l'origine de ce travail sur l'état des pressions azotées d'origine agricole sur les ressources en eau mené au sein de l'unité INRA, SAD-ASTER.

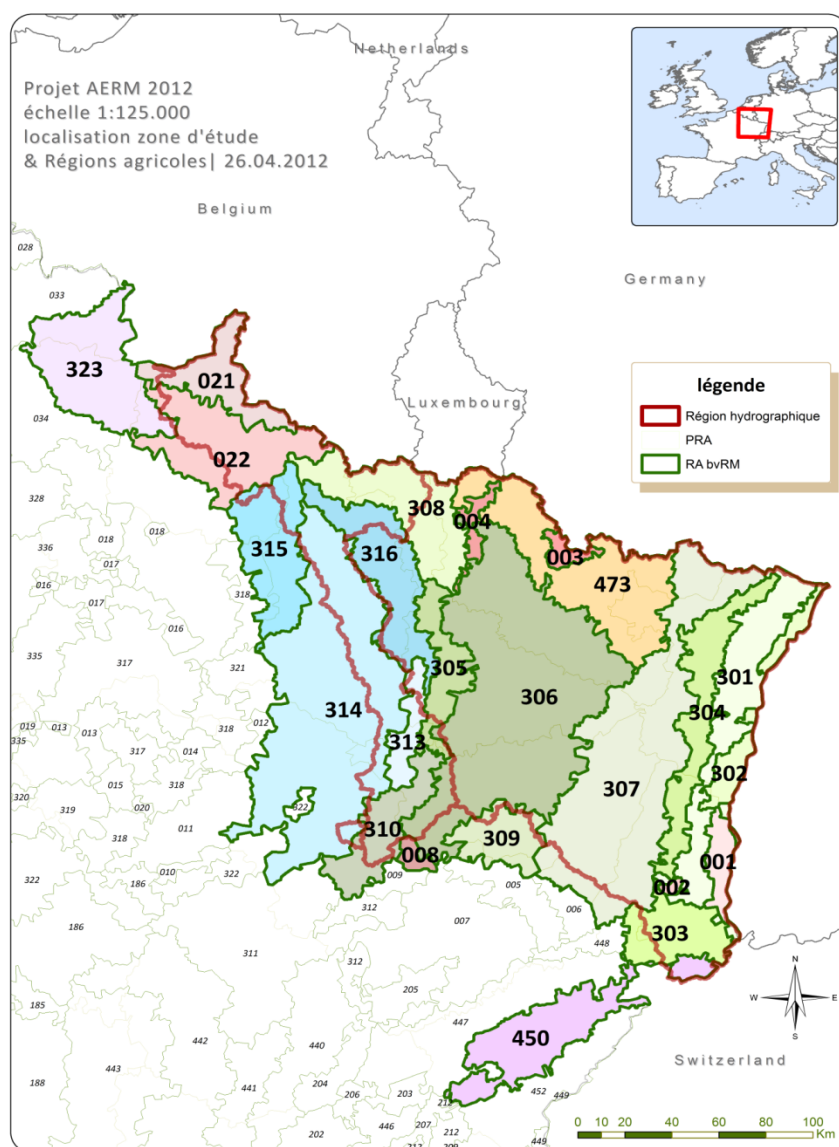


Figure 1 - Carte du territoire d'étude et des bassins qui le compose

1.2 Recherche sur une partie du DPSIR : les pressions

Le modèle *driving forces (D)— pressions (P)— state (S)— impact (I)— responses (R)*, DPSIR en anglais, et FPEIR en français (forces motrices — pressions — état — impact — réponses) a été conçu pour décrire l'environnement tel qu'il est modifié par une société donnée (OCDE 1993a, 1997, 1999a,b,c). Ce modèle vise à décrire les interactions entre la société et l'environnement à l'aide d'indicateurs qui distinguent les forces motrices, les pressions sur l'environnement, l'état de l'environnement, l'impact créé par cet état, et les réponses apportées par la société pour y remédier.

Il a été développé par l'Agence Européenne pour l'Environnement (EEA, 1999) à partir d'un modèle initial de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique, le modèle PER (pressions — état — réponses) (*figure 2*).

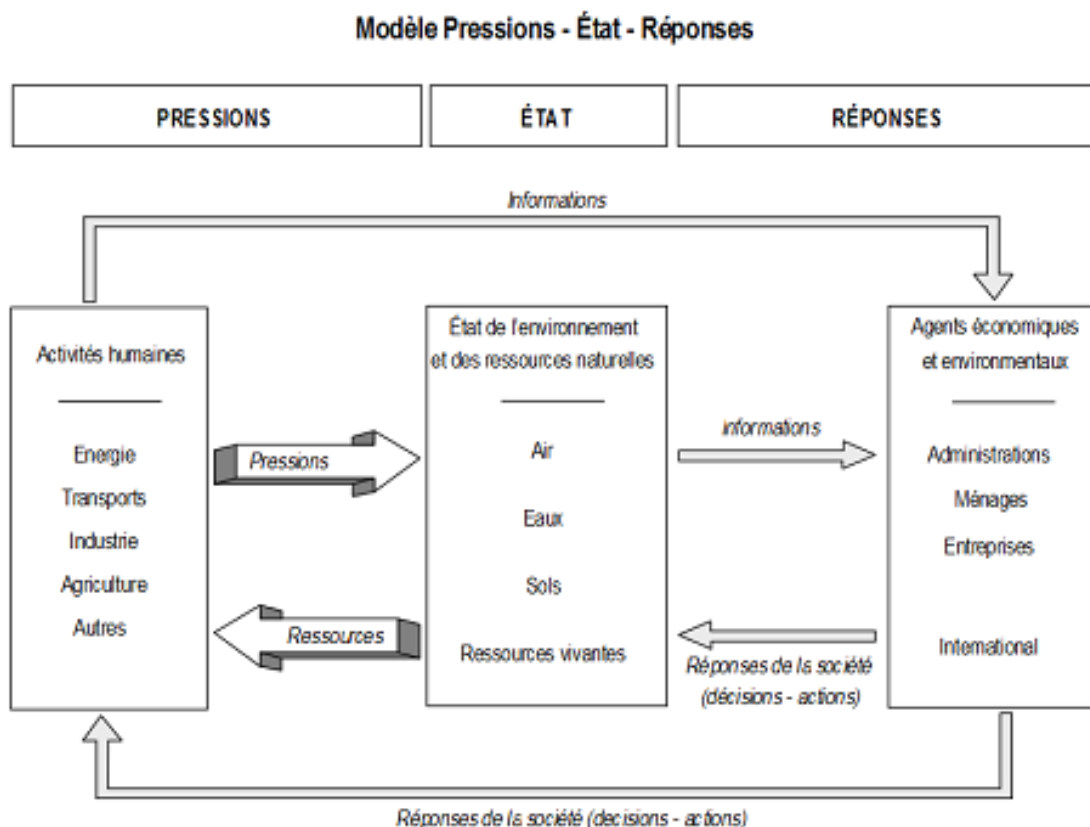


Figure 2 - Schéma du modèle DPSIR (OCDE, 1993b)

Nous mobilisons ce modèle en nous concentrant sur les pressions induites par les activités humaines.

1.3 Présentation de l'action de recherche pour la Meuse et la Moselle

Cette action de recherche vise donc à construire un indicateur de pression (voir *figure 3*) sur les ressources en eau. Nous effectuerons deux limitations :

- Nous nous concentrerons sur les pressions azotées liées à l'agriculture. Nous n'en traiterons pas des autres pressions telles que les rejets de stations d'épuration par exemple,
- Nous nous limiterons aux bassins de la Meuse et de la Moselle, de leurs sources à la frontière avec la Belgique et l'Allemagne

Nature et usages des indicateurs d'environnement

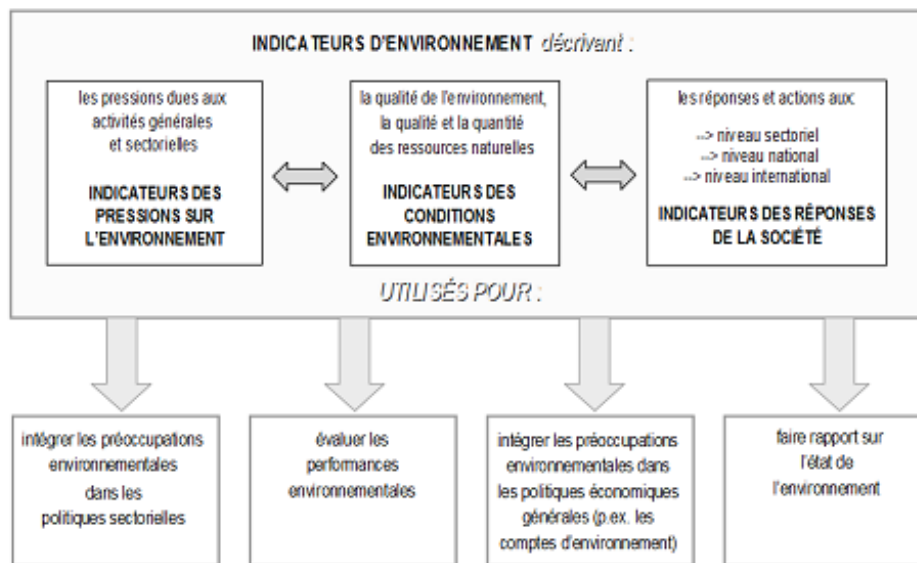


Figure 3 - Nature et usages des indicateurs d'environnement (OCDE, 1993b)

Ce projet, nommé DynAMM'Eau a mobilisé un partenariat avec les chambres d'agriculture de Lorraine, l'URFAPA, et fut financé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et l'INRA. Mené sur 13 mois son objectif est de produire et calculer un indicateur de pression azoté à l'échelle des principales masses d'eau des bassins de la Meuse et de la Moselle, avec un recul historique d'une vingtaine d'années.

2 Matériel et méthode

2.1 Etapes de travail : caractérisation du territoire selon les successions de cultures majoritaires, puis calcul de l'indicateur BASCULE sur les différentes unités spatio-temporelles identifiées

Le travail d'étude des pressions azotées sur les bassins versants de la Meuse et de la Moselle se décompose en deux grandes parties.

Il s'agit tout d'abord de décrire les pratiques culturales sur la zone étudiée et leur évolution au cours du temps. Le territoire peut ainsi être découpé en différentes entités spatio-temporelles caractérisées par des pratiques culturales homogènes.

Par la suite, la pression azotée sur les ressources en eau de divers systèmes de cultures est estimée à l'aide de la BASCULE (Balance Azotée Spatialisée des Systèmes de Culture de l'Exploitation – Benoît, 1992 **ANNEXE 1**). Cet indicateur constitue une balance azotée appliquée à un système de culture dans son intégralité spatiale et temporelle : une même BASCULE est calculée sur l'ensemble des parcelles présentant la même succession de cultures, et sa valeur est moyennée sur la durée de la succession. Les BASCULE obtenues, propres à chaque système de culture, peuvent donc être calculées sur les entités spatio-temporelles identifiées dans la première partie du projet. L'objectif est ici double :

- Hiérarchiser et localiser les systèmes de cultures selon la pression azotée induite sur les ressources en eau

- Par croisement avec les cartes de vulnérabilité de l'Agence de l'Eau Rhin Meuse, identifier les zones à risques vis-à-vis de la pollution de l'eau par l'azote (forte pression agricole et vulnérabilité importante du milieu)

2.2 Point sur les bases de données disponibles

2.2.1 Informations nécessaires et présentation des différentes enquêtes

Afin de pouvoir réaliser une typologie du territoire selon les systèmes de cultures et d'y calculer des BASCULE, il est nécessaire de disposer d'informations portant simultanément sur l'assolement pendant plusieurs années consécutives et à différentes périodes, sur les pratiques de fertilisation, sur les niveaux de rendements atteints, ainsi que sur la localisation de la parcelle.

La première étape consistait à extraire et évaluer la cohérence des données disponibles pour faire face à la question de recherche. Les images satellites (SPOT, Landsat) ont été rejetées parce qu'elles n'étaient pas rentables couvrant l'ensemble de la région étudiée sur une longue période. En particulier, on a vérifié la disponibilité d'images homogènes entre mars et juillet (avec la priorité suivante : mai > avril > juin > juillet > mars) de chaque année et moins de 10-20% de couverture nuageuse, le but étant de privilégier les périodes propices à l'identification de maïs, colza, blé et orge sur l'intégrité de la zone d'étude. Concernant les images SPOT (à 10 ou 20 m de résolution) aucune des années disponibles (1989-2004) ne permettait pas de couvrir complètement les deux bassins avec images prises pendant la même période. Ainsi, ces données résultaient inexploitable pour cartographier les assolements sur une longue période (en respectant le délai du projet).

D'autre part, les données Teruti fourni à la place du bon temps couvrant (1981-2010), bien que présentant des discontinuités dans le temps - en 1990 et 2004-05 pour les ajustements de la grille d'échantillonnage - et l'espace, avec un échantillonnage sur un maillage 3 km carrés. Pourtant, cet ensemble de données fourni 23.800 points pour chaque année (réduits à 60% pour la période 2006-10), permettant ainsi de récupérer les trajectoires principales d'occupation du sol.

De ce fait, les enquêtes TerUti (ou TerUti-Lucas) et Pratiques Culturelles (abrégé en « PK ») ont été retenues. Enquête réalisée par le service statistique, évaluation et prospective (SSP, ex SCEES) du Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, portant sur l'utilisation du territoire par observation directe sur un échantillon constant de points géographiques (près de 550 000 points sur les périodes 1981-90 et 1992-2003, et de XXX points à partir de 2006). La nomenclature physique utilisée comporte grandes classes d'utilisation du sol (sols à couverture boisée, sols agricoles utilisés, sols bâtis, etc.) détaillés en plusieurs sous-catégories (0 cultures différentes distinguées pour l'agriculture)

L'enquête TerUti décrit chaque année l'occupation du sol en des points précis, sur tout le territoire français. Elle constitue une base d'analyse des caractéristiques physiques des territoires et de leurs évolutions. À partir des données annuelles de l'enquête, plusieurs approches peuvent être menées selon que l'on désire mettre l'accent sur l'étude de la nature des occupations dominantes, ou plutôt sur leur agencement les unes par rapport aux autres.

Par ailleurs, comme indiqué dans la partie 2.2.2.3, l'AERM a été sollicitée pour son expertise lors de la définition du maillage territorial sur lequel s'est construite la caractérisation des ensembles de systèmes de cultures.

Enfin, il était nécessaire de distinguer les surfaces agricoles des autres types d'occupation des sols (forêts, terres artificialisées, ...). En effet, les données manipulées étaient liées aux identifiants des communes et non pas à une position parcellaire précise. Le recours à la base de données Corine Land Cover a permis ici de n'affecter les résultats obtenus qu'aux terres agricoles.

2.2.2 Choix des traitements de données effectués

Malgré la nature adéquate des informations utilisées, des trous importants dans les bases de données (éventuellement donner les populations des échantillons de TU(L) et PK)

Les bases de données utilisées présentent, comme énoncé dans la partie précédente, les informations nécessaires aux traitements à effectuer. Cependant, leur protocole de constitution ou leurs effectifs peuvent montrer certaines limites pour leur exploitation. Des solutions ont néanmoins pu être identifiées pour les différents problèmes rencontrés.

2.2.2.1 D'éventuelles discontinuités dans les ensembles de bases de données issues des enquêtes TerUti et PK

Les coordonnées des point TerUti sont protégés pour raisons de confidentialité, tandis qu'on peut connaître la localisation à niveau de la commune. Or, la maille d'échantillonnage TerUti vise une description de grand territoire : exemples en est l'utilisation de ces données pour décrire les dynamiques a niveau des Départements ou de (Petites) Régions Agricoles. Cependant d'autres niveaux peuvent être envisagés de lorsqu'on garantit le respect des critères de représentativité statistique, ce seuil étant défini en fonction de l'objective d'étude. Dans notre cas, le but été de caractériser les dynamiques successions des cultures à l'échelle des bassins élémentaires telles que définies sur une carte fournie par l'Agence de l'eau pour faciliter l'intégration des résultats dans leurs plans de gestion de l'espace. Suite à une première analyse, il s'est avéré nécessaire agréger les bassins élémentaires plus petits pour atteindre un nombre de points cohérent avec les résultats attendus.

Un bassin a été défini petit lors que le nombre de points à son intérieur ne dépassait pas le seuil suivante :

$$N. indices \times N. états \times 10 \leq N. trames$$

Indices = nombre de combinaisons des occupations du sol élémentaires existantes en fonction de la longueur souhaité de la succession (multiplié pour 10 comme seuil statistique minimale pour calculer une moyenne)

Etats = longueur souhaité de la succession

Trames = nombre des combinaisons effectivement retrouvées dans le corpus analysé

Bref, on retrouve un seuil d'environ 900 points par bassin élémentaire en dessous duquel le bassin doit être fusionné avec l'un des bassins adjacents. Le choix a fait objet du deuxième comité de pilotage, suite auquel on a retenu la réorganisation montrée en *figure 4*.

La principale difficulté méthodologique rencontrée dans le cadre de ce projet a été de manipuler des ensembles de données n'étant pas forcément continus dans l'espace et dans le temps. Les enquêtes PK présentent également ce défaut puisque leurs échantillons sont issus des échantillons TerUti (Lucas).

Selon les cas rencontrés, les ensembles présentant des effectifs insuffisants ont été soit laissés comme tels et non considérés, soit agrégés en se fiant à des règles statistiques ou à des expertises.

Soulignons en outre que cette méthodologie d'échantillonnage se base sur un découpage administratif du territoire, en suivant les limites départementales. Si cette démarche permet une communication plus aisée sur les résultats produits, elle implique néanmoins une perte de cohérence comparativement à une approche selon les bassins hydrographiques ou selon les Petites Régions Agricoles.

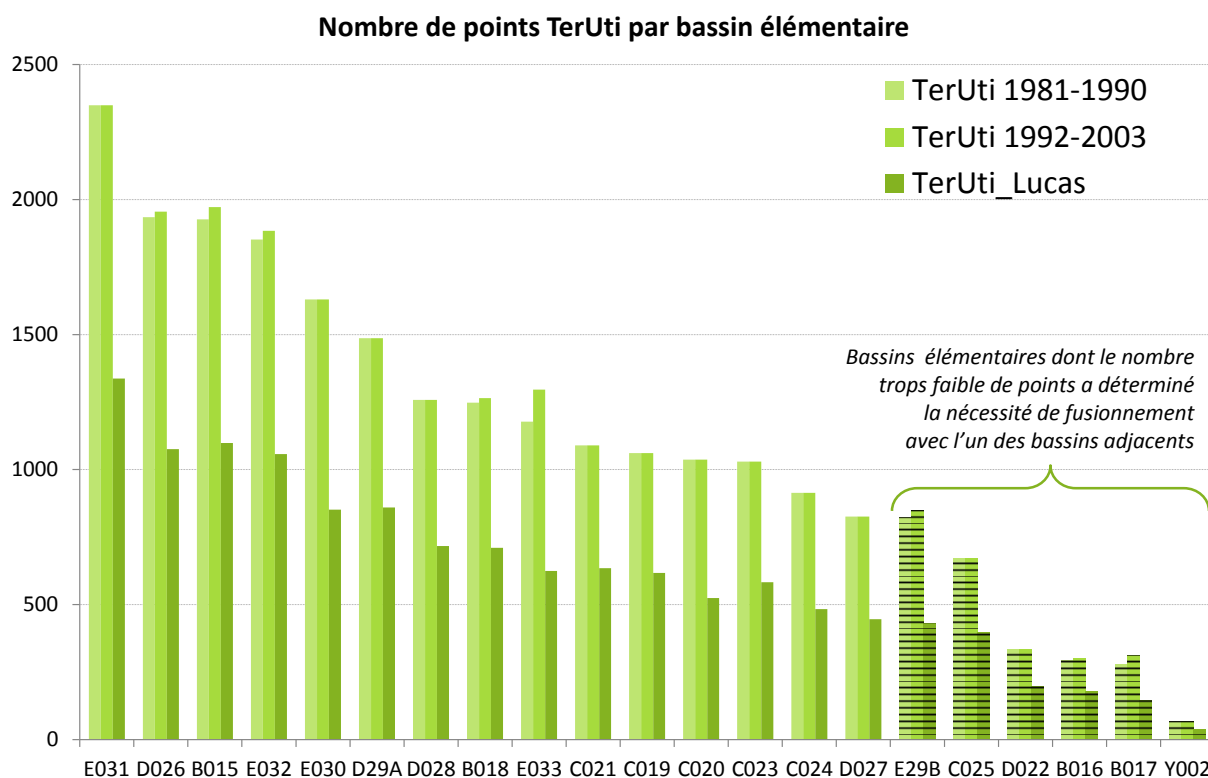


Figure 4 - Nombre de points TerUti par bassin élémentaire et seuil d'acceptabilité des effectifs

2.2.2.2 TerUti : pas de localisation précise mais rattachée aux communes

L'étude de l'occupation des sols des bassins de la Meuse et de la Moselle sur différentes périodes a été construite à partir des données TerUti et TerUti Lucas. Or, les données collectées par ces enquêtes ne sont localisées que par l'identification de la commune sur laquelle se trouve le siège de l'exploitation agricole, et non pas par géo-référencement précis de la parcelle renseignée. Ce système, établi dans le but de préserver la confidentialité des informations, ne constitue toutefois pas un point de blocage pour les travaux de DynAMM'Eau puisque la parcelle agricole représente un grain d'analyse trop précis par rapport à l'ensemble du territoire pris en compte et que l'échelle de la commune se révèle être adéquate.

2.2.2.3 Entités spatiales : les bassins élémentaires (nécessité d'agrégation de certains BE => expertise AERM)

Par souci de pertinence de l'approche adoptée dans l'étude portant sur l'évolution des occupations des sols, le maillage territorial a suivi un zonage hydrographique. Une liste de bassins dits « élémentaires », sous-unités des bassins versants de la Meuse et de la Moselle, a été fournie par l'Agence de l'Eau Rhin Meuse. Toutefois, du fait de leurs tailles inégales, ces entités territoriales comportaient des nombres variables de points d'enquêtes TerUti (figure 4). L'Agence de l'Eau Rhin Meuse a ainsi apporté son expertise afin de déterminer quels bassins élémentaires adjacents pouvaient être fusionnés sans compromettre la pertinence hydrographique de ces nouveaux ensembles. Dans la suite de l'étude, les termes de "bassin élémentaire" sont conservés pour désigner les entités obtenues (figure 5).

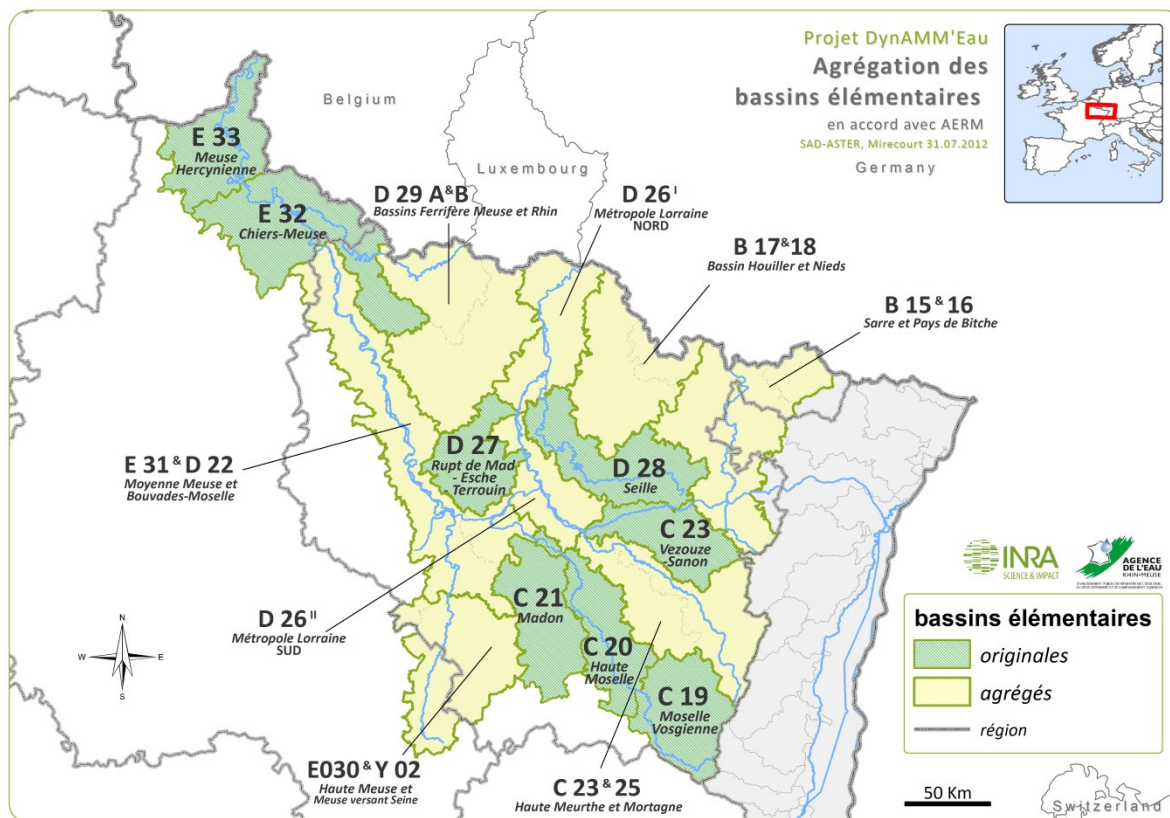


Figure 5 – Carte d'agrégation des bassins élémentaires

2.2.2.4 Enquêtes Pratiques Culturelles (PK) définition des termes tels que « parcelle » dans ces enquêtes :

Le guide d'entretien des enquêtes PK définit la « parcelle culturelle » comme « tout ensemble de terres jointives cultivées en une espèce végétale donnée et ayant le même précédent culturel ». La définition utilisée ici s'écarte donc légèrement du sens habituel de « parcelle », mais cette nuance sémantique est sans conséquence sur les méthodes et résultats de la présente étude.

En revanche, le degré de précision avec lequel est renseignée la nature des cultures ou des précédents culturels diffère entre les enquêtes TerUti et PK : les données PK, contrairement à celles de TerUti, détaillent si l'espèce végétale implantée est une culture d'hiver ou de printemps (dans le cas du blé tendre, du colza et de l'orge), et si le maïs est récolté en plante entière (comme fourrage) ou pour son grain. Cette distinction, notée par la suite « H/P ou f/g », peut être la cause d'incompatibilités dans le cas de mises en liens des bases de données TerUti et PK. Cependant, une simple agrégation sous Access permet, le cas échéant, de supprimer la distinction « H/P ou f/g » dans la base de données PK et de lever cette incompatibilité.

2.3 Partie 1 : Caractérisation du territoire selon les successions de cultures majoritaires

Deux méthodes ont été combinées pour récupérer les séquences majeures d'occupation du sol: i) un approche de fouille de données stochastique, basée sur l'hypothèse markovienne qu'une couverture du sol de l'année t est influencée par la couverture du sol des années t-1 et t-2 ; ii) une analyse des typologies de trajectoires d'occupation du sol. L'accent a été mis sur le temps de retour de couvertures du sol majeures, en soulignant les occupations agricoles des sols (i.e., cultures et prairies), avec une fenêtre glissante de cinq ans au cours de la période totale de trente ans pour chaque bassin versant élémentaire. Cet approche apporte une innovation aux recherches précédentes principalement basées sur une longueur prédéterminée succession de cultures (cf. Schott et al., 2009) ; innovation en raison de la nécessité de faire face à l'irrégularité temporelle

des successions culturales dans la zone d'étude. Les résultats ont été ensuite utilisés pour une classification hiérarchique des composantes principales, dont le choix du nombre optimal de composantes principales et du nombre de clusters a été validé par le biais d'algorithmes spécifiques. Les clusters ont été ensuite utilisés pour la deuxième partie de l'étude comme support de spatialisation pour le calcul de la Bascule.

2.3.1 Le concept de succession de culture utilisé par CarottAge / ArpentAge

Sur les parcelles de terres labourables, les cultures se succèdent dans le temps selon un ordre logique que l'on nomme succession de cultures. La succession de cultures répond à des logiques agronomiques de limitation de l'épuisement des sols et du développement de certaines maladies ou mauvaises herbes spécifiques à une culture, notamment par l'alternance d'espèces végétales, de cultures d'hiver ou de printemps. Ces successions peuvent être représentées selon un modèle : la rotation culturale, désignant un ordre de succession, sur une même parcelle, de plantes appartenant à des espèces ou à des variétés différentes et éventuellement de jachères, cette succession se répétant régulièrement sur un pas de temps prédéterminé. Les agriculteurs sont venus progressivement à s'affranchir de rotations agronomiques classiques en s'appuyant sur des engrais de synthèse et des pesticides, pour définir de plus en plus les successions culturales en fonction de critères spéculatifs et notamment en fonction de la marge économique escomptée par la culture. Cas extrême de modification (simplification) des successions de cultures est la monoculture qui désigne la répétition d'une même culture sur une même parcelle. Conduite habituelle des cultures permanentes, comme la vigne ou les vergers, la monoculture a été mis en place aussi pour certaines cultures annuelles comme le maïs ou les céréales d'hiver, avec des conséquences très négatives pour l'environnement, voire pour le rendement des récoltes.

Le risque de pollution par les nitrates dépend en grande partie sur les types de cultures qui sont cultivées. L'agencement spatial des systèmes des cultures (assolement) ainsi que le calendrier des pratiques de fertilisation influence les effets en cascade sur la pollution chimique selon les saisons et les conditions pédoclimatiques locales. Par conséquent, l'analyse de variations temporelles des systèmes des cultures pourrait compléter un suivi plus analytique (i.e., chimique) de la qualité de l'eau. Comme le système des cultures est la principale entrée pour les agriculteurs pour décider les pratiques agricoles, nous nous concentrons sur la fertilisation, ses variations temporelles pourraient aider à établir des profils de vulnérabilité d'une région donnée. Peu de méthodes ont été proposées à ce jour dans la littérature scientifique pour cartographier les systèmes des cultures. Leur majorité a expliqué les variations temporelles des systèmes de culture en fonction des aspects socio-économiques. Des séries temporelles d'images satellites étaient pour la plupart la principale source de données. Dans cette étude, nous voulons nous concentrer davantage sur les variations spatio-temporelles des systèmes de culture pour fournir une base plus complète pour l'analyse de l'agriculture liée à la pollution de l'eau douce à l'échelle des bassins versant.

2.3.2 Temps de retours : Analyse des trois séries d'enquêtes TU(L) sur 15 séquences à partir d'une fenêtre glissante de 5 années consécutives

Les données sur la gestion des cultures à l'échelle des grands territoires sont difficiles à récupérer. Même si les cultures qui peuvent être cultivées dans une région donnée sont définies par les conditions pédoclimatiques, les agriculteurs renouvellent leur choix de saison en saison selon un ensemble de paramètres, dont les possibilités de commercialisation et les aléas du marché jouent un rôle principale. Il en résulte que la rotation des cultures, même si définie en théorie afin d'optimiser la gestion agricole, subissent des subtiles adaptations saisonnières visant à changer les systèmes de culture sur le moyen / long terme.

Pour résumer, la littérature scientifique sur les systèmes des cultures à l'échelle régionale inclue des références: (i) aux rotations, pour souligner la régularité temporelle, (ii) aux séquences, plus focalisée sur les dynamique évolutive du choix des cultures aux fils des saisons, qui peuvent éventuellement se répéter ; (iii) aux assolements, pour décrire l'allocation spatiale des cultures. Dans cette étude, nous nous sommes référés à la

succession des cultures comme concept intermédiaire pour traiter à la fois avec les régularités temporelles et spatiales, afin de tenir compte également de l'évolution des cultures choisies au cours de la longue période. En particulier, le choix de travailler sur le temps de retour en tant que approximation de la rotation des cultures nous a permis de mettre l'accent sur la dynamique temporelle.

La modélisation des successions des cultures demandent la mobilisation d'un outil de veille sur la longue période. Les données de télédétection peuvent être utilisées pour décrire les systèmes des cultures. Ce type de données permet (potentiellement) de discriminer les cultures en fonction de la texture (exemple : cultures en rangs), des caractéristiques saisonnières (exemple : céréales d'hiver ou de printemps), de la signature spectrale (exemple : espèces différentes). Cependant, quand les détails nécessaires deviennent plus complexes d'une distinction parmi les principaux types des cultures (e.g., céréales d'hiver versus cultures de printemps) les contraintes à satisfaire augmentent. Une modalisation des systèmes des cultures prenant en compte l'identification précise des cultures et des leurs successions sur de vastes régions nécessite, ainsi, de séries conséquentes d'images satellitaires homogènes (même date ou période de prise), mieux si avec une haute résolution et multispectrale et géométrique. Ceci contraint fortement l'usage de la télédétection pour ce but lors que de grandes régions sont visées en raison, par exemple, de la faible disponibilité d'images prise à la même date ou couvrantes la totalité de la zone d'étude.

La méthode visait à caractériser les dynamiques des systèmes des cultures à l'échelle régionale, donc en incluent les changements dans le temps et dans l'espace des successions culturales. Les bassins versants élémentaires ont été supposés être entités spatiales homogènes par rapport à ces dynamiques. Dans cette hypothèse, nous avons fixé un élément de la dynamique (l'espace) de se concentrer sur la variation temporelle des successions culturales. Une «fenêtre temporelle» de cinq ans a été définie pour décrire le temps de retour des principales cultures au sein de chaque bassin versant élémentaire. Un laps de temps de 5 ans était suffisamment large pour inclure des rotations de cultures majeures pour la zone d'étude. Cette fenêtre a ensuite glissé sur une période d'environ trois décennies pour récupérer la dynamique temporelle du système de culture. Les individus de l'analyse ont été définis par l'intersection de la fenêtre temporelle et le bassin versant élémentaire, correspondants donc au nombre de bassins versants élémentaires (16) multiplié par le nombre de périodes élémentaires (15) tels que identifiés par la fenêtre glissante sur la période de l'étude globale.

Pour ce qui concerne les variables, les données TerUti des trois périodes ont été d'abord regroupées selon une légende commune de 11 types de couverture du sol. Pour discriminer au mieux les changements les plus pertinents dans la rotation des cultures, seules les grandes cultures ont été maintenues, tandis que les cultures secondaires et les occupations du sol non agricoles ont été largement regroupées. Pour chacune de ces occupations du sol on a évalué toutes les combinaisons possibles dans le laps de temps de 5 ans fouillant les données TerUti selon un tableau de tous les possibles motifs de présence/absence (*ANNEXE 2*)¹. Évidemment pas tous les motifs n'étaient pertinents. Par exemple, l'alternance de couvertures du sol artificielles avec d'autre classe n'a aucun sens. De la même manière, une prairie permanente est intrinsèquement définie par la répétition de cette couverture végétale pendant au moins quatre ans. Ainsi que d'une prairie temporaire ne peut pas être répétée pour plus de quatre ans. En outre, d'autres motifs sont résulté avoir une incidence très faible voire nulle, alors que d'autres étaient fortement corrélées donc redondants. En conclusion, seuls 29 de la variable de 110 possibles ont été retenus pour l'analyse suivante. De plus, le choix finale a visé à équilibrer les différentes composantes d'occupation du sol: 19 étaient pour les cultures annuelles, dont environ la moitié pour les céréales d'hiver et les restes pour les cultures de printemps et d'autres cultures, 10 pour les couvertures foncières permanents, dont 6 pour les prairies et les prairies et les reste 4 pour les couvertures du sol semi-naturels et artificiels. Les variables ont été normalisées en divisant le nombre de points récupérés par le nombre total des points de chaque bassin élémentaire pour les trois périodes. Le tableau final été donc

¹ Pour l'élaboration de cette partie du code on remercie Rui Barradas et le group r-help@r-project.org

composé par les 240 individus, chacun caractérisé par le pourcentage d'occurrence des 29 variables (motifs d'occurrence des 11 couvertures des sols).

2.3.3 Classification hiérarchique sur l'analyse en composantes principales

2.3.3.1 ACP (données non réduites)

Le tableau des 29 variables renseignées pour les 240 individus a été traité avec une analyse en composantes principales (ACP) dans le but de réduire le nombre initial de variables et de permettre la discrimination entre les composantes « structurales » et le « bruit » (Husson et al., 2012). Une réduction, c'est-à-dire une normalisation des données entre 0 et 1, se rend nécessaire soit lors d'une analyse intégrante donnée exprimées en unités de mesure différentes soit pour équilibrer des variables très contrastées. On a réalisé l'analyse sur les données non réduites, étant exprimés toutes comme pourcentage. Ceci nous a permis aussi de garder représentativité réel des occupations du sol, avec un déséquilibre dû à la forte présence de forêt en certains bassins. La normalisation des données aurait en ce cas permis de mettre en avant les dynamiques agricoles au détriment des vrais rapports entre les deux grands types d'utilisation du sol (i.e., forêt et agriculture).

2.3.3.2 Construction et caractérisation des clusters

Les individus décrits par le 5 premiers composants principales ont été ensuite regroupés afin d'identifier les structures subjacentes. Parmi l'éventail de techniques disponibles, nous avons choisi un algorithme de clustering ascendante hiérarchique (CAH) dans le but de poursuivre une agrégation des bassins versants selon une optimisation dite locale (versus la globale fournie par un clustering descendante). On a considéré ce type d'approche cohérent avec la structure hydrographique, où les bassins élémentaires se regroupent en bassins d'ordre croissant. Le nombre de clusters à retenir a été choisi en utilisant un algorithme d'optimisation mesurant les caractéristiques des clusters (compacité, superposition, ...).

2.3.4 Validation des résultats : atelier participatif

Des comités de pilotage régulières ont été organisées avec deux représentants de l'Agence de l'Eau et étendu ensuite à un représentant de la "Chambre d'agriculture" régionale afin d'assurer à la fois une transmission transparente de l'approche de recherche et l'évaluation itinéraire des résultats. Le dernier comité a concerné enfin les principaux représentants de l'AERM pour le secteur agricole et les représentants régionaux et provinciaux des "Chambres d'agriculture", couvrant presque toute la zone d'influence de l'Agence de l'Eau. Au total, 13 personnes ont pris part à la réunion d'une demi-journée. L'idée était de fournir une diffusion rapide des résultats préliminaires et commencer à en structurer les vulgarisations successives, donnant aux participants l'occasion de s'approprier et de mettre en discussion les méthodes et les résultats.

A cette occasion on a demandé aux participants d'évaluer la fiabilité des clusters. Pour cela, on a utilisé une adaptation de la méthode des cartes à dire d'acteurs (Debolini et al., 2013). Afin de pouvoir comparer les résultats on a préparé un fond de carte commun, représentant les bassins élémentaires fortement stylisé (une cartographie réel aurait apportée trop de détails) avec les repères principaux (rivières, préfectures, limites administratives). La question à laquelle on a demandé de répondre était la suivante :

« En vous basant sur votre expertise, rassemblez les bassins hydrographiques (limites vertes) en différents groupes homogènes sur le plan des occupations majoritaires des sols à partir des années 1980. »

On a aussi donné des consignes : (1) dans la mesure du possible, ne pas fractionner les bassins élémentaires ; (2) réaliser des cartes différentes en précisant les périodes concernées lorsque les groupes identifiés et/ou leurs limites auraient pu évoluer ; (3) demande de préciser les caractéristiques de chaque groupe (exemple : rotations majoritaires).

2.4 Partie 2 : Evaluation de la pression azotée par application de l'indicateur BASCULE

La BASCULE est une balance azotée spatialisée appliquée à la surface et à la durée d'une même succession de cultures. La méthode originale développée par Benoît en 1992 (*ANNEXE 1*) a été adaptée à notre cas d'étude et à ses contraintes méthodologiques. Tout en respectant le raisonnement et le cheminement de l'auteur, les étapes successives de calcul de l'indicateur ainsi que la nature des données utilisées ou produites ont donc subi quelques modifications.

2.4.1 Principe de calcul de l'indicateur BASCULE

2.4.1.1 Etape 1 "Relevé des pratiques agricoles"

La connaissance des pratiques agricoles sur le territoire d'étude a été renseignée par les séries d'enquêtes Pratiques Culturelles (PK), réalisées en 1994, 2001 et 2006. Pour cause, ces enquêtes comprennent les informations nécessaires au calcul et à la spatialisation de l'indicateur BASCULE, à savoir, pour chaque parcelle :

- La nature de l'espèce végétale cultivée l'année de l'enquête (nommée « culture en place » par la suite) et celle de son précédent cultural,
- Les niveaux de fertilisation et les rendements atteints pour les cultures en place,
- L'identifiant INSEE de la commune sur laquelle est implanté le siège de l'exploitation agricole.

Néanmoins, les données des enquêtes PK n'étaient pas exploitables dans l'absolu : les questions constitutives de chaque questionnaire étant différentes (par leur nature ou leur identification) d'une année d'enquête à l'autre, une harmonisation préalable des bases de données s'est imposée. Dans le cadre du projet DynAMM'Eau, la base de données nommée « OSITOP », générée sous Access en interne à l'unité INRA SAD-ASTER de Mirecourt à partir des bases de données PK disponibles, a pu être utilisée et a ainsi permis une économie de temps non négligeable sur ce travail préliminaire.

Notons simplement que l'enquête PK 2006 renseigne la nature des précédents culturaux jusqu'à l'année n-5. Cependant, la base OSITOP ne reportait ces informations que jusqu'à l'année n-2. Compléter cette base à partir des données brutes de l'enquête PK 2006 aurait été trop chronophage au vu du temps imparti pour le calcul et la spatialisation de la BASCULE. Cette possibilité n'a donc pas été retenue. De plus, par souci de cohérence, étant donné que les enquêtes PK 1994 et PK 2001 ne renseignent que la nature du précédent cultural de l'année n-1, il a été décidé de procéder de même pour PK 2006.

2.4.1.2 Etape 2 "Calcul par année de la balance par parcelle"

Cette étape consiste à calculer la balance azotée des différentes parcelles enquêtées pour chaque année renseignée, en appliquant la soustraction ci-dessous :

$$\text{Balance azotée} = \text{entrées} - \text{sorties}$$

Avec : entrées = fertilisation organique (kgN/ha) + fertilisation minérale (kgN/ha)

 sorties = rendements (q/ha) × teneur en azote des matières exportées (kgN/q)

Pour rappel, les données des trois séries d'enquêtes PK utilisées (1994, 2001 et 2006) couvrent chacune deux années consécutives (culture en place et précédent cultural).

Le calcul de cette balance azotée parcellaire peut être établi sans difficulté majeure pour les cultures en place. Seule une très légère perte de données est à déplorer, mais celle-ci reste négligeable. En effet, les calculs ont été bloqués du fait de l'absence d'informations sur les niveaux de fertilisation (dans 11 cas) ou sur les rendements atteints (dans 2 autres cas), portant le nombre d'enquêtes disponibles à 1862.

La distribution des balances azotées parcellaires obtenues pour les cultures en place peut être représentée graphiquement afin d'apprécier visuellement les valeurs les plus récurrentes et le niveau de dispersion des

résultats. Des analyses similaires peuvent être conduites entre plusieurs distributions distinguées selon la culture en place, l'année d'enquête PK ou encore le cluster d'appartenance (tels que définis au *paragraphe 2.3*).

Contrairement au cas des cultures en place, les rendements atteints et les niveaux de fertilisation ne sont pas renseignés pour les précédents culturaux. Les balances azotées parcellaires ne peuvent donc pas être calculées directement et doivent être extrapolées à partir des données issues des cultures en place.

Afin de respecter au mieux la caractérisation des données d'origine, l'extrapolation a été réalisée en suivant divers ensembles définis par :

- La nature de la culture implantée
- L'année d'enquête PK
- Le cluster d'appartenance

Les précédents culturaux de mêmes nature, année PK et cluster se voyaient ainsi attribuer une valeur identique, issue des cultures en place de mêmes caractéristiques.

Les valeurs à affecter aux précédents culturaux ont tout d'abord été établis par le calcul de la moyenne et de l'écart-type des balances azotées de chaque ensemble. Toutefois, des écarts-types très importants ont été constatés (*figure 6*).

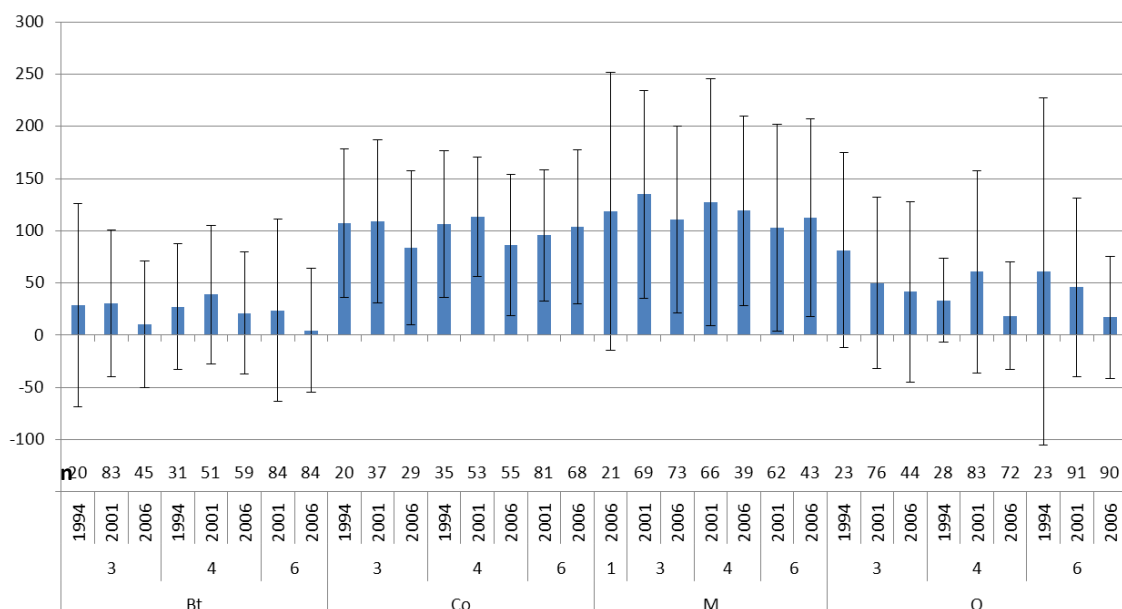


Figure 6 - Moyennes et écarts-types des balances azotées de différents ensembles « culture en place – cluster – année PK » (en kg N/ha/an) (n ≥ 20 pour chaque ensemble)

Par souci de manipuler des données dont les résultats soient pertinents et exploitables, il a été décidé de réaliser les extrapolations à partir de la médiane et des 1^{er} et 3^e quartiles de chaque ensemble « culture en place – année PK – cluster ».

De même, pour des questions de fiabilité des résultats, seuls les ensembles présentant des effectifs supérieurs à 20 ont été retenus. Le nombre le plus courant, notamment dans le domaine des statistiques, est de 30. Cependant, les quantités d'informations perdues auraient été trop conséquentes. Le seuil minimum a donc été ramené à 20 individus. Malgré la faible incidence de ce choix sur la fiabilité des résultats, les effectifs de chaque groupe seront mentionnés systématiquement, de manière à pouvoir interpréter avec les précautions qu'il se doit les figures et valeurs présentées.

Le processus d'extrapolation est à l'origine d'une nouvelle perte de données : dans les cas de certains ensembles « précédents culturaux – année PK – cluster », aucune valeur de balance azotée n'était disponible, en raison de l'absence de culture en place de même nature, pour l'année PK et le cluster correspondants. Par exemple, le maïs n'ayant été recensé qu'en effectifs insuffisants en tant que culture en place dans le cluster 6 au cours de l'enquête PK de 1994, aucune valeur de balance azotée n'a pu être attribuée aux précédents culturels identifiés en maïs. Par voie de conséquence, sur cet exemple, toutes les parcelles enquêtées en 1994 dans le cluster 6 présentant un précédent culturel de maïs ont été évincées (quel qu'ait été la culture en place). Les pertes d'informations induites restent malgré tout négligeables car elles concernent seulement 21 enquêtes et abaissent l'effectif total disponible à 1841 enquêtes.

Une méthode respectant de manière plus fine que la précédente les couples « précédent-culture » avait été envisagée pour cette étape d'extrapolation. L'encadré ci-après détaille son principe, ses intérêts et les éléments ayant conduit à l'écartier.

Encadré : Méthode alternative d'extrapolation des balances azotées

L'objectif de la mise en place de cette méthode a été d'adopter une démarche qui permette de conserver de la manière la plus fine possible un éventuel effet du précédent culturel sur la balance azotée. Le but était donc de réussir à établir un mode d'extrapolation non plus basé sur les ensembles « culture en place – année PK – cluster » mais sur les ensembles « précédent culturel – culture en place – année PK – cluster ».

La **figure 7** ci-dessous illustre les explications qui suivent :

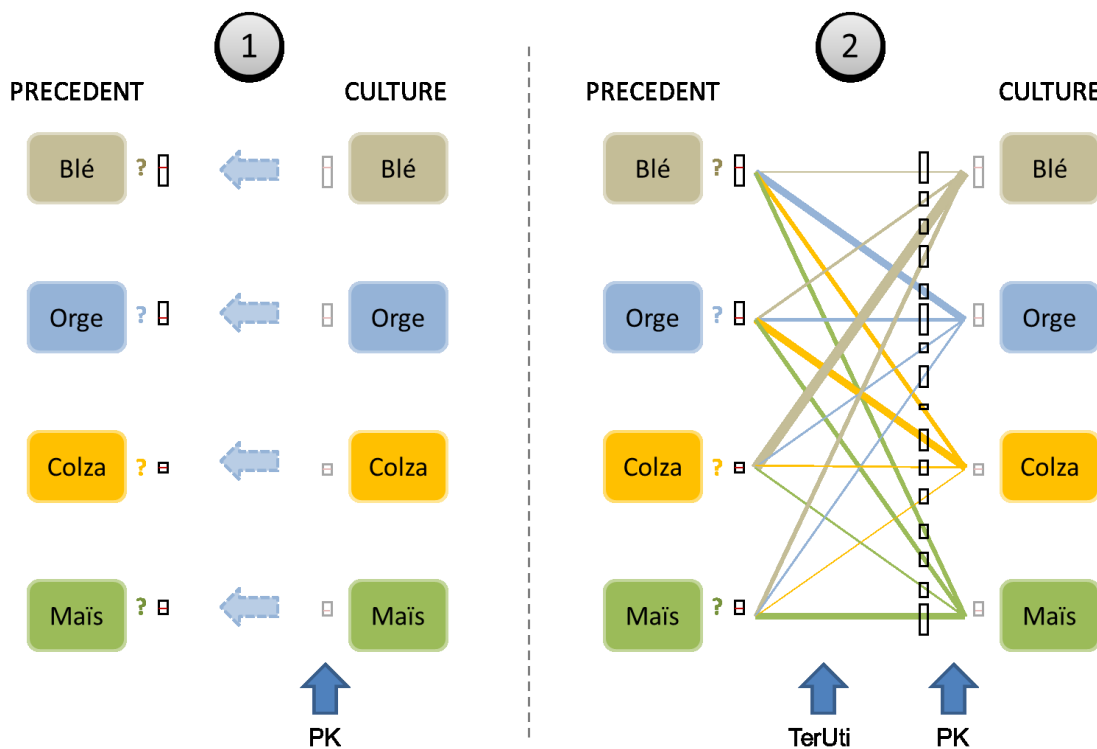


Figure 7 - Démarche méthodologique envisagée pour l'étape d'extrapolation des balances azotées

Cette démarche est appliquée pour chaque année PK (x3) et au sein de chaque cluster (x4).

- ① Les niveaux de fertilisation et de rendements (donc les balances azotées parcellaires) issus des enquêtes PK sont disponibles pour les cultures en place, ce qui n'est pas le cas pour les précédents culturels. C'est pourquoi les balances azotées doivent être extrapolées aux précédents culturels à partir des données

disponibles pour les cultures en place. Procède-t-on cependant avec suffisamment de précision en reportant simplement les valeurs de balances azotées des cultures aux précédents de même nature (par le calcul des 1^{er} et 3^e quartiles et de la médiane de chaque groupe ainsi formé) ?

- ② Si le précédent cultural peut avoir un effet sur la valeur de la balance azotée, il est préférable d'en tenir compte dans la constitution des ensembles pour lesquels seront calculées les valeurs des médianes et quartiles pour l'extrapolation. Ainsi, pour une année PK et un cluster donnés, les valeurs des médianes et quartiles ne sont pas calculées par culture mais par couple précédent-culture. L'épaisseur des liens sur le schéma représente grossièrement les proportions relatives des différents précédents pour chaque culture. Ces proportions sont issues des enquêtes TerUti, du fait que les échantillons de ces enquêtes sont beaucoup plus conséquents que ceux des enquêtes PK et que les deux plans d'échantillonnage sont liés.

Hypothèse de calcul : $balN_j = \sum_i balN_{ij}$ avec $balN$ = valeur de balance azotée

i = précédent cultural

j = culture en place

$$\text{d'où } balN_i = \sum_j balN_{ij}$$

Néanmoins, les proportions des couples précédent-culture issus de TerUti ne sont pas disponibles pour l'année PK 2006. En effet, l'enquête TerUti Lucas ne débute qu'en 2006 et ne renseigne donc pas la nature des précédents culturaux (c'est-à-dire les cultures en place en 2005). Par conséquent, de nombreuses données sont perdues par manque d'information pour l'année PK 2006.

Par ailleurs, les calculs décrits en hypothèse ne sont mathématiquement pas correct car les valeurs des balances azotées réfèrent à des médianes et quartiles. Or, ces grandeurs se calculent à partir du rang des données et non pas de leur valeur. Le gain de précision qui faisait l'intérêt de cette méthode est donc faussé par l'erreur mathématique introduite dans les calculs.

Ces raisons ont conduit à l'abandon de cette méthode alternative, pour conserver le processus décrit en ①, à savoir le simple report des valeurs (médianes et quartiles) des balances azotées des cultures en place aux précédents culturaux de même nature.

2.4.1.3 Etape 3 "Calcul de la balance moyenne sur plusieurs années consécutives par parcelle (BASCULE parcellaire)"

L'extrapolation de l'étape précédente permet de disposer des balances azotées parcellaires pour chaque année d'enquête PK et pour les précédents culturaux comme pour les cultures en place. À partir de ces données, il est possible de calculer ce que l'on pourrait appeler des « BASCULE parcellaires », c'est-à-dire des balances azotées parcellaires moyennées sur plusieurs années consécutives (ici deux années, avec le précédent cultural et la culture en place). Attention, il n'est en aucun cas question de moyenniser les balances azotées entre années d'enquêtes PK.

2.4.1.4 Etape 4 "Calcul de la BASCULE de l'ensemble des parcelles situées sur la zone étudiée (addition des BASCULE positives, non soustraction des BASCULE négatives)"

La dernière étape du calcul de l'indicateur BASCULE consiste à établir une balance azotée sur plusieurs années consécutives et sur l'ensemble des parcelles d'un même cluster. Les "BASCULE parcellaires" négatives ne peuvent être conservées en tant que telles, puisqu'elles ne correspondent pas à une production "d'anti-azote". Leurs valeurs sont donc annulées.

Rappelons qu'à l'étape 2 (cf. le **paragraphe 2.4.1.2**), les balances azotées parcellaires appliquées aux précédents culturaux ont été extrapolées à partir des médianes, 1^{ers} et 3^e quartiles des balances azotées parcellaires des cultures en place correspondantes. À chaque calcul de BASCULE, trois valeurs sont ainsi

obtenues. Ces grandeurs traduisent donc une partie (50%) de la dispersion des plages de valeurs décrites pour les BASCULE.

Malgré des effectifs encore relativement conséquents pour l'échantillon global étudié, le nombre de critères utilisables pour décrire différents ensembles auxquels appliquer une valeur de BASCULE est limité. Pour cause, même si les résultats de BASCULE peuvent être détaillés selon l'année d'enquête PK, le cluster, la culture en place et le précédent cultural, constituer des ensembles définis par ces quatre caractéristiques à la fois engendre l'obtention de groupes à effectifs souvent faibles (<20) voire nuls (*figure 8*). Logiquement, ce phénomène est encore plus flagrant si l'on distingue les cultures d'hiver et de printemps (ou maïs fourrage / maïs grain) parmi les cultures en place et les précédents culturaux.

Cult Prec	1994				2001				2006			
	1	3	4	6	1	3	4	6	1	3	4	6
Bt												
Bt	0	2	2	0	1	13	7	21	3	4	9	16
Co	1	7	22	13	7	36	31	53	2	19	34	45
M	0	11	5	5	1	30	6	8	8	22	12	12
O	0	0	2	1	2	4	7	2	2	0	4	11
Co												
Bt	0	9	10	8	2	18	14	45	3	10	4	18
Co	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
M	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	0	9	25	6	5	19	39	36	5	18	51	50
M												
Bt	0	6	0	0	5	29	26	25	8	30	24	13
Co	0	1	0	0	0	1	0	2	0	1	0	0
M	0	7	0	0	6	23	27	26	12	25	9	19
O	0	1	0	0	1	16	13	9	1	17	6	11
O												
Bt	1	14	19	16	4	55	61	72	12	37	54	75
Co	0	2	1	3	0	3	4	6	1	0	2	3
M	0	2	3	2	1	10	4	3	1	2	2	1
O	0	5	5	2	1	8	14	10	1	5	14	11

Figure 8 - Représentation schématique des effectifs des différentes classes constituées par recouvrements des critères « année PK », « cluster », « culture en place » et « précédent cultural » (≥20, <20 non nul, nul)

Le problème s'est donc posé de la méthode à adopter pour fusionner des ensembles à faibles effectifs en vue d'obtenir des groupes de tailles plus conséquentes. Etant donné l'objet de l'étude (identifier des pressions azotées en fonction des successions de cultures), des regroupements entre cultures en place ou entre précédents culturaux n'ont pas été envisagés. Afin de trancher entre des regroupements selon l'année d'enquête PK ou selon le cluster d'appartenance, la possibilité du calcul de la proximité statistique entre ensembles a été évoquée. Les distances statistiques peuvent être calculées partir des coordonnées des enquêtes concernées sur les axes de l'ACP (Cf. *paragraphe 2.3.3*). Cependant, au préalable, trois éléments limitant ont été soulevés :

- Des regroupements entre clusters induiraient un "étalement" de l'incertitude, en constituant des ensembles à effectifs toujours limités (bien que plus fiables) et couvrant des surfaces plus grandes.
- Un seul regroupement peut ne pas suffire pour obtenir des ensembles à effectifs supérieurs à 20. Par ailleurs, réaliser plusieurs regroupements augmente le risque de transformer de manière trop conséquente l'information.
- Les clusters définissent des entités spatio-temporelles : les délimitations géographiques des zones constituées peuvent évoluer d'une année d'enquête à l'autre. Par conséquent, le paramètre spatial (cluster) est lié au paramètre temporel (année d'enquête PK). Fusionner des données selon un de ces deux paramètres peut donc compromettre la pertinence et l'homogénéité des ensembles obtenus.

Il a donc été décidé de ne pas regrouper les groupes à effectifs insuffisants et de ne distinguer des ensembles que selon deux critères : soit selon l'année d'enquête PK et le cluster d'appartenance, soit selon la culture en place et le précédent cultural.

2.4.2 Eventuellement en encadré : ajustements apportés au mode de calcul original de l'indicateur BASCULE

Comme énoncé en introduction du *paragraphe 2.4*, les quatre étapes suivies précédemment ne correspondent pas exactement à la démarche d'origine décrite pour le calcul de la BASCULE (*ANNEXE 1*). En accord avec le concepteur de l'indicateur, les étapes successives ont donc été réorganisées, voire modifiées, afin de correspondre aux contraintes du projet et aux types de sorties attendus.

2.4.2.1 Calcul d'une BASCULE surfacique et non pas cumulée sur l'ensemble de la surface des parcelles concernées

L'indicateur fournit en principe, à l'échelle d'un territoire donné (exploitation agricole, bassin versant, ...), un comparatif des balances azotées de différentes successions de cultures, exprimées en quantités d'azote excédentaire ou déficitaire par an. Ne disposant des informations nécessaires au calcul de la BASCULE que pour un échantillon de parcelles, les quantités calculées ne peuvent être affectées qu'à une partie limitée du territoire étudié. De manière à manipuler des grandeurs applicables à l'ensemble d'une zone donnée (par exemple, un cluster), les quantités obtenues sont rapportées à l'hectare.

2.4.2.2 Questionnement sur les valeurs des teneurs en azote des matières organiques exportées et des fertilisants organiques épandus

Le calcul des balances azotées repose entre autres sur les teneurs en azote des fertilisants et des matières végétales exportées (pour rappel : balance azotée = fertilisation azotée – exportations d'azote). Dans la mesure du possible, l'agriculteur enquêté est invité à indiquer dans les questionnaires PK les teneurs en azote dont il a la connaissance. C'est notamment le cas pour les engrais minéraux ou pour certains fertilisants organiques sur lesquels des analyses ont été réalisées. Dans les situations où ces informations ne sont pas renseignées, des valeurs standard issues des tables CORPEN sont utilisées (CORPEN, 1988). Cependant, les enquêtes PK ayant été réalisées en 1994, 2001 et 2006, et les teneurs en azote des fertilisants et matières végétales ayant pu évoluer en vingt ans, une actualisation des données par recherche bibliographique a été effectuée. Au final, les différentes références identifiées recourent les valeurs du CORPEN.

2.4.3 Spatialisation des résultats de l'indicateur par cluster sur les zones agricoles (Corine Land Cover)

Les plages de BASCULE des différents ensembles constitués sont représentées dans des graphiques, de manière à pouvoir comparer entre groupes les valeurs obtenues et leurs dispersions. Par ailleurs, un des intérêts de l'indicateur BASCULE est de fournir des résultats spatialisables. Une dernière tâche consiste donc à réaliser des cartes présentant les sorties des calculs des BASCULE.

Seules les activités agricoles sont prises en compte dans les étapes successives du calcul de la BASCULE. De ce fait, les zones des cartes produites auxquelles sont appliquées des valeurs doivent exclusivement correspondre aux terres agricoles. Cette information n'étant pas disponible dans les enquêtes TerUti et PK (localisation communale d'un ensemble non exhaustif de parcelles), la base de données Corine Land Cover a été utilisée pour cette étape.

Les proportions de terres arables par rapport aux terres agricoles, ou par rapport à la surface d'un cluster, ont été obtenues à partir des données de la base TerUti. En effet, cette enquête détaille de manière plus précise que Corine Land Cover l'occupation agricole du sol, en distinguant notamment les terres labourables des autres types de couverture (prairies, haies, friches, ...).

Les fichiers des formes de paysage du CORINE Land Cover (troisième niveau) ont été téléchargés du site web de l'Agence Européenne pour l'Environnement (<http://www.eea.europa.eu/fr>). Les données, couvrants toute l'Europe, étaient séparées par code de couverture des sols (44 couches SIG). La séparation se rend nécessaire à cause de la taille de tables attributaires, dépassent au total 4 Go. Toutefois, pour pouvoir les utiliser, on a dû reconstituer la carte complète en trois passage. D'abord les fichiers de formes ont été fusionnés selon le code de premier niveau (1 à 5) en reconstituant les cartes des territoires artificialisés (code 1), des territoires agricoles (code 2), des forêts et milieux semi-naturels (code 3), des zones humides (code 4) et des surfaces en eau (code 5). Dans un deuxième temps on a sélectionné pour chaque carte les zones d'intérêt d'abord avec un masque contenant Lorraine, Alsace et Champagne-Ardenne, ensuite affinant cette sélection avec la couche des bassins élémentaires. On a ainsi obtenu un fichier des formes contenant à la fois les codes CLC (niveau 3) et les limites des bassins versants. La carte des zones agricoles retenues pour la spatialisation de la BASCULE contiennent les terres arables non irriguées (code 211), les zones agricoles hétérogènes (code 242) et les terres principalement occupée par l'agriculture, avec des inclusions importantes de végétation naturelle (code 243).

3 Résultats

3.1 Caractérisation des principales successions de culture

3.1.1 Dynamiques d'évolution de l'occupation des sols

La dynamique plus évidente qui apparaît est la réduction des surfaces en prairies. Les fortes variations des prairies temporaires et artificielles peuvent être plutôt imputées à un changement des définitions à compter des années '90. Par contre, pour les prairies permanentes productives s'agit d'une véritable baisse des surfaces. Bien que les différences entre les trois échantillons demandent prudence dans les comparaisons, on peut signaler une tendance à la réduction des surfaces en prairies d'environ 8% entre le début et la fin de la période d'étude, avec des dynamiques comparables entre les deux bassins de la Meuse et de la Moselle (*figure 10*). Au totale, les surfaces agricoles ne se réduisent pas trop, comme montré dans le graphique cumulatif (*figure 9*). En fait, la contraction des prairies et contrebalancée par une tendance en sens inverse des cultures majeures. D'une part, cette réduction des prairies correspond à une forte hausse plus ou moins comparable du blé et du colza. D'autre part le maïs, après un incrément en début des années '80, reste ensuite constant, tandis que l'orge subit une légère contraction des surfaces (*figure 11*).

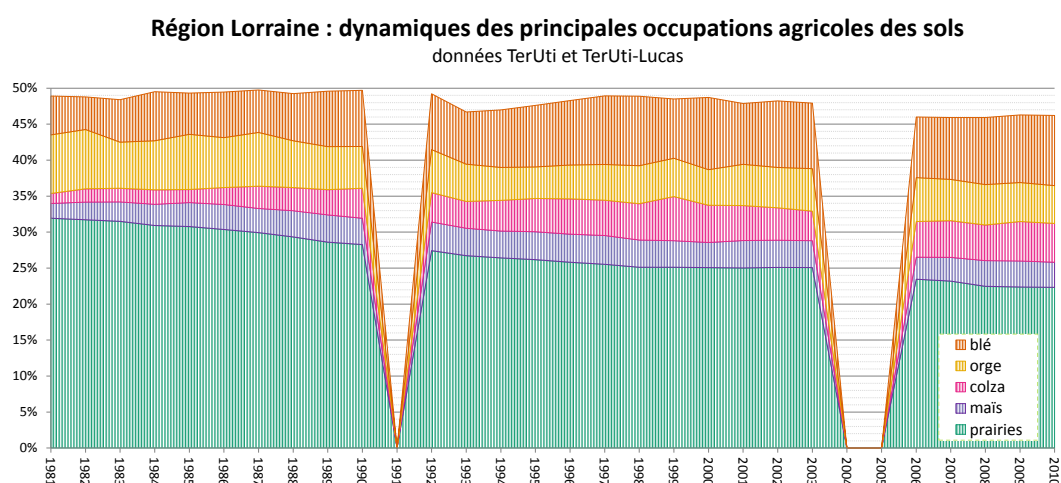


Figure 9 - Distribution cumulative des principales occupations des sols agricoles, exprimée en pourcentage nombre de points par occupation des sols sur le nombre totale de points TerUti (Lucas).

Région Lorraine : comparaison des sous-bassins
données TerUti et TerUti-Lucas

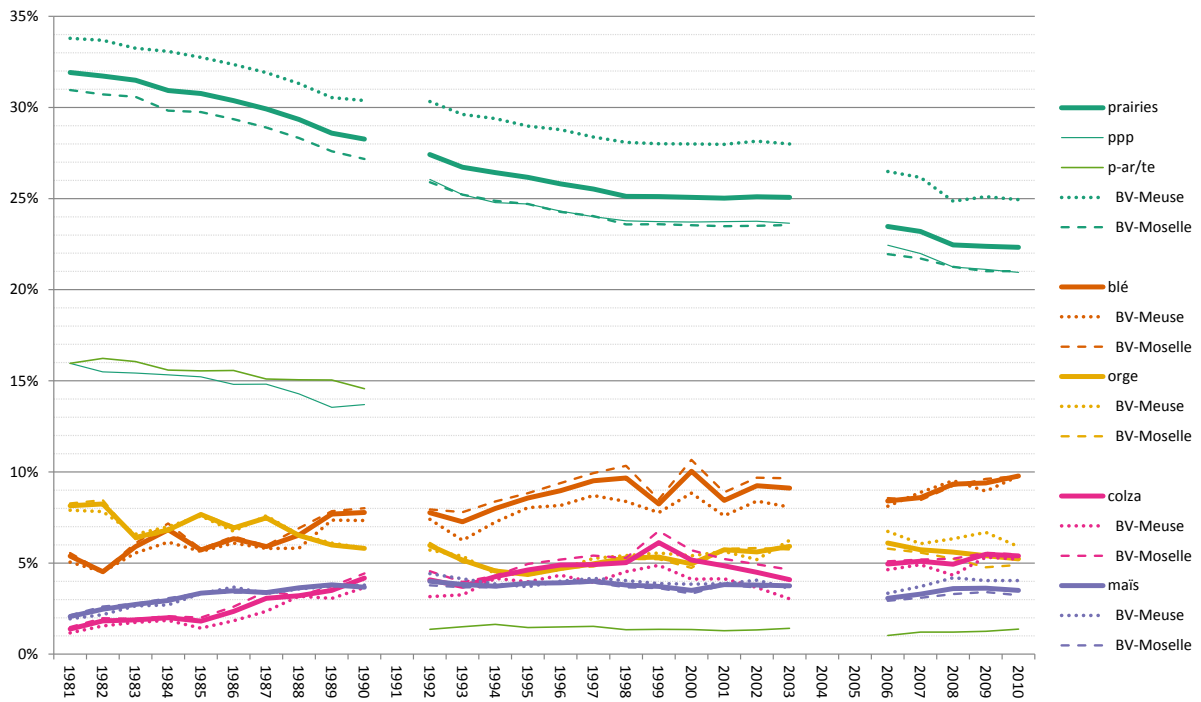


Figure 10 - Tendances des principales occupations agricoles des sols, exprimées en pourcentage nombre de points par occupation des sols sur le nombre totale de points TerUti (Lucas).

Région Lorraine : comparaison des sous-bassins
données TerUti et TerUti-Lucas

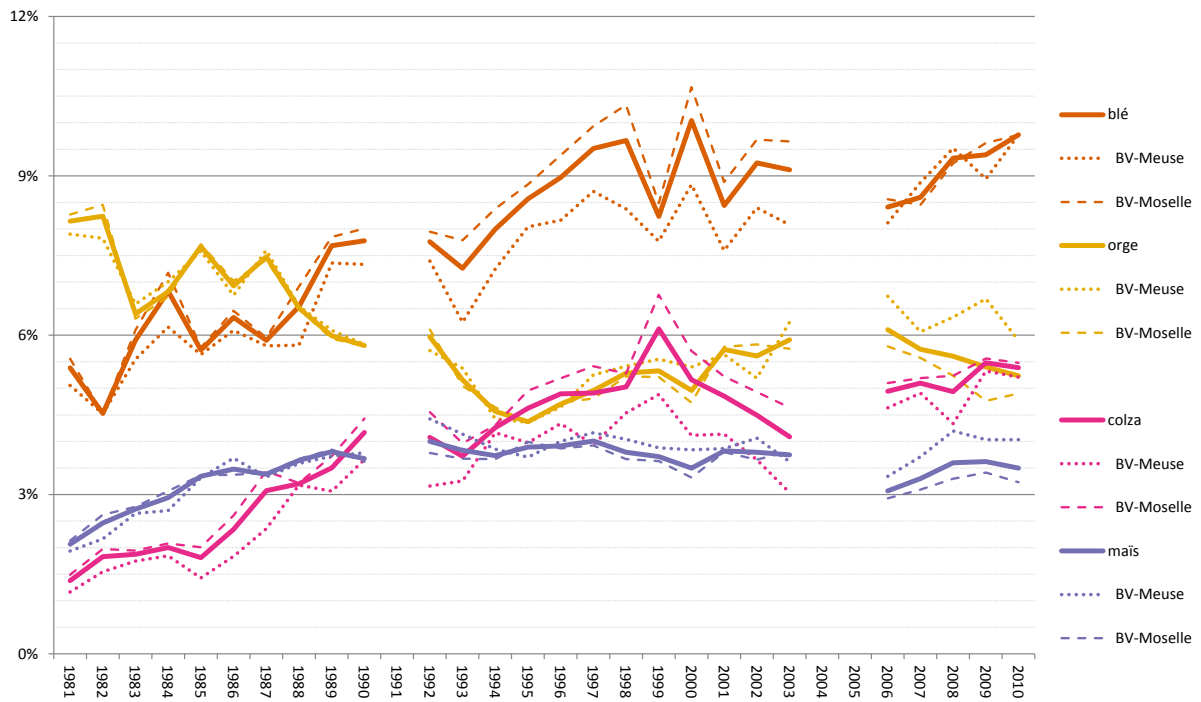


Figure 11 - Détail des tendances des principales cultures, exprimées en pourcentage nombre de points par occupation des sols sur le nombre totale de points TerUti (Lucas).

3.1.2 Temps de retour des principales cultures

3.2 Typologie des successions de cultures majoritaires par CAH puis par ACP

Chaque cluster agrège plusieurs individus, y compris des bassins versants élémentaires appartenant à des périodes différentes. Les bassins versants moins dynamiques ont eu tendance à être regroupés dans un seul cluster, tandis que les plus dynamiques ont pu être répartis sur plusieurs groupes au fil de la période d'étude.

3.2.1 Descriptions des composantes principales

Pour l'analyse on a retenu les 5 premières composantes, dont la somme explique le 96,8% de la variance totale (*figure 12*). Les premières 5 composantes principales utilisées pour le clustering ascendante hiérarchique (CAH) peuvent être décrites en fonction de la position (valeurs des coordonnées) que les variables originales y si occupent.

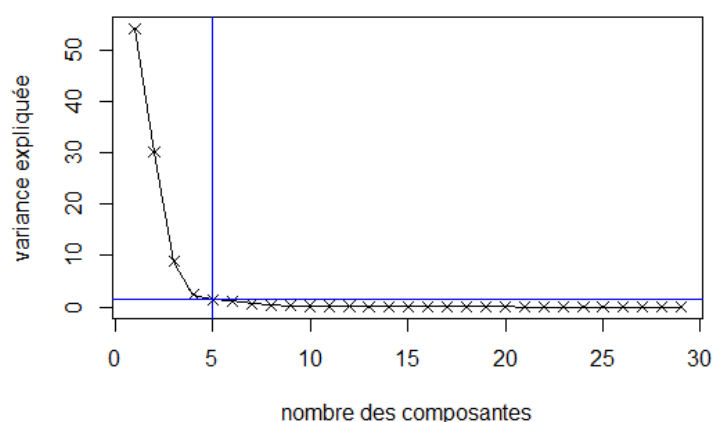


Figure 12 Graphique de la variance expliquée par chaque composante principale.

La 1^{ère} composante est principalement caractérisée par les couvertures semi-naturelles récurrentes sur les 5 ans, présentent toutefois des coordonnées négatives (corrélation négative avec la composante). Les coordonnées positives sont plutôt liées aux grandes cultures (maïs, colza, orge et blé) qui reviennent 1 ou 2 fois sur les 5 ans, jusqu'à 3 dans le cas du blé. Les similitudes dans les coordonnées de blé et de colza revenant 2 ans sur 5, suivi par le maïs (1 an sur 5) et l'orge (2 ans sur 5) peut être liée à la prédominance d'une rotation des cultures du genre colza-blé-orge avec parfois une introduction du maïs, en partie remplacé par la mise en jachère. Les prairies permanentes sont orthogonales à la fois pour les occupations semi-naturels et les cultures, avec des coordonnées positives, négatives lorsqu'on en considère l'absence. En bref, la première composante, qui représente plus de la moitié de la variance totale (54,2%), peut être largement interprété comme un gradient (coordonnées négatif à positives) du semi-naturel aux terres agricoles. Il intercepte ainsi le profil le plus apparent des bassins versants élémentaires, déterminé par un contraste entre forêts et zones cultivées qui n'a pas trop changé au cours de la période étudiée. Par conséquent, la variable supplémentaire décrivant le quinquennat ne semble pas jouer un rôle pour cette composante.

La 2^{ème} composante met également en évidence le contraste entre les terres cultivées et zones semi-naturels, avec un focus majeur sur la présence/absence des prairies. Cette composante marque l'association entre triplet colza-blé-orge (chacune des cultures survenant 2/5 ans) et absence de prairies permanentes. En outre, une analyse plus détaillée des valeurs de cosinus² montre un rôle important pour ce composant de

² Mesure de la proximité entre un point et l'individu qu'il représente ; une valeur proche de 1 indique que l'individu est proche de sa projection (bien représenté), tandis qu'une valeur proche de 0 démarque plutôt éloignement

réurrences élevée (2-3/5 ans) voire très élevée (jusqu'à 3-4/5 ans) des céréales d'hiver. Aussi bien les cultures mineures se rapportent à cette composante. En bref, la 2^{ème} composante, qui représente un tiers de la variance totale (30,1%), pourrait être associée à un gradient d'intensification agricole, où céréales d'hiver et colza (coordonnées positives) sont opposés aux prairies et aux occupations semi-naturels, ainsi que à l'absence des cultures mineures (coordonnées négatives). De toute évidence liés aux caractéristiques intrinsèques des bassins versants (déjà caractérisée par la première composante), la deuxième composante apparaît être liée aussi à la période. En particulier, il semble opposer les années '80 au début des années '90, probablement en raison de la réduction de l'orge que s'est produit entre ces deux périodes.

La 3^{ème} composante a une forte corrélation négative avec les prairies permanentes et les prairies temporaires de 2 ans, ainsi que avec l'orge récurrente (3-5/5 ans). Au contraire, elle est positivement corrélée au colza et le blé (récurrents 2-3/5), ainsi que l'absence de prairies artificielles. Les occupations artificielles des sols sont aussi positivement corrélées à la troisième composante. Les valeurs de cosinus montrent que cette composante est caractérisée par des terres agricoles liées à l'élevage, comme les prairies artificielles et l'orge très récurrente. En bref, la 3^{ème} composante, qui représente moins d'un dixième de la variance totale (8,8%), décrit un gradient allant de l'élevage (tel que de l'orge récurrente et des prairies permanentes et artificielles) (coordonnées négatives) à des grandes cultures en quelque sorte intensives (coordonnées positives). Il semble discriminer en plus la transition des années '80 aux années '90.

La 4^{ème} composante est principalement caractérisée par les occupations artificielles des sols en ajoutant au binôme colza-blé. Ces deux cultures ont les coordonnées les plus positives sur cette composante, alors que la couverture artificielle du sol et la prairie permanente exposent les coordonnées les plus négatives. Les valeurs de cosinus permettent de mettre en évidence le rôle de maïs et colza répétés sur deux ans, de même que le blé récurrent (2-4/5 ans). En bref, la 4^{ème} composante, qui représente en peu plus du 2% de la variance totale (2,4%), pourrait être associée à un gradient entre habitats et prairies (coordonnées négatives) vers les zones cultivées de manière intensive et semi-naturels (coordonnées positives). Derrière une certaine contradiction apparente, cette composante semble décrire deux structures de la région. D'une part, les villes et les villages entourés par les prés-vergers et d'autres prairies extensives. D'autre part, les zones les plus agricoles, souvent mêlés à des petits bois.

La 5^{ème} composante discrimine davantage les caractéristiques agricoles. L'occurrence de la mise en jachère (1/5 ans) apparaît être la variable la plus influente sur cette composante. Sur la partie positive la jachère est jointe à la prairie (à la fois sa présence et son absence), ainsi que à maïs et orge. La partie négative comprend colza, blé, prairies de 4 ans, prairies artificielles et couvertures artificielles. Néanmoins, les valeurs de cosinus identifient la prédominance de la mise en jachère, soit simple soit répétée sur deux ans, pour la définition de cette composante. En bref, la 5^{ème} composante, qui représente environ 1% de la variance totale (1,4%), pourrait être associée à un gradient allant des changements nuls de l'occupation des sols (coordonnées négatives) exprimées par occurrence de 3-4 ans de suite de prairies, couvertures artificielles ou semi-naturels, à l'agriculture des années '90 (coordonnées positive) caractérisées par l'introduction de la jachère.

3.2.2 Description et cartographie des clusters obtenus

Les clusters retenus ont été 6. Ce nombre résulte de fournir à la fois une bonne agrégation des individus (i.e., des bassins décrits par un quinquennat des dynamiques d'occupation des sols) et le moindre chevauchement entre clusters. Le tableau ci-dessous (**tableau 1**) montre la répartition des bassins selon les clusters. On peut observer que l'agrégation a permis d'identifier trois périodes principales, correspondantes aux trois jeux de données TerUti : 1981-1990, 1992-2003 et 2006-2010 (les cartes sont en **annexe 4**). Il peut être intéressant noter que certains clusters sont plutôt liés à l'une des périodes, comme le 2 et le 5 présents seulement pendant les années '80 ou le 3 et le 6 pour les années '90, alors que le 1 et le 4 traversent toute la période d'étude.

		1981-1985	1982-1986	1983-1987	1984-1988	1985-1989	1986-1990	1992-1996	1993-1997	1994-1998	1995-1999	1996-2000	1997-2001	1998-2002	1999-2003	2006-2010
bassin	code															
Sarre & Pays de Bitche	1516			2							3					3
Bassin Houiller & Niefs	1817			5							6					6
Moselle Vosgienne	1900			1							1					1
Haute Moselle	2000			2							3					1
Madon	2100			5							3					3
Haute Meurthe et Mortagne	2224			1							1					1
Vezouze - Sanon	2300			2							3					3
Métropole Lorraine (Nord)	2601			4							4					4
Métropole Lorraine (Sud)	2602			4							4					4
Rupt de Mad - Esche - Terrouin	2700			2							4					4
Seille	2800			5							6					6
Bassin Ferrifère Meuse et Rhin	2934			5							6					6
Haute Meuse et Meuse v/t Seine	3036			5							3					3
Moy. Meuse et Bouvades - Moselle	3125			2							4					4
Chiers - Meuse	3200			5							3					3
	3300			2							3					1

Tableau 1 – Répartition des bassins par quinquennat selon les clusters.

Pour simplicité les clusters sont décrits dans les prochains paragraphes selon leur numéro (1 à 6), pour être enfin identifiée par des libellés synthétiques. Dans les paragraphes suivants chaque cluster est décrit donc en fonction du nombre d'individus qui le composent, des principales dynamiques des occupations des sols qu'on y retrouve et par la relation avec les 5 composantes principales retenues pour l'analyse, dont le tableau (tableau 2) permet d'avoir un aperçu globale. A ce propos, on peut rappeler que les clusters ne sont pas indépendants des composantes ; cependant la corrélation entre clusters et composantes peut aider à décrire ces derniers.

Le cluster 1 comprend 13,3% du total d'individus³. Il résulte être caractérisé par la récurrence de occupation des sols semi-naturels, ainsi que par l'absence de cultures mineures et des prairies (temporaires et permanentes). De l'autre côté, ce groupe montre une occurrence de maïs, d'orge et de blé quatre fois inférieur à la moyenne. Par rapport à la première composante principale, principalement définie par le contraste zones semi-naturelles versus agricoles, les individus de ce cluster ont des coordonnées nettement plus faible que les autres appartenant aux autres clusters, tandis qui présentent des coordonnées légèrement supérieur à la moyenne sur la troisième composante, dont la partie positive est associée aux zones semi-naturelles (au-delà qu'aux grandes cultures). En bref, ce cluster semble regrouper les individus les moins agricoles. De fait, la pour les membres de ce groupe les dynamiques semblent avoir été principalement déterminées par des occupations non agricoles des sols (tel que la forêt) ou par les prairies. Les bassins versants les plus proches du barycentre de ce cluster sont la Haute-Meurthe et la Mortagne, en particulier dans la dernière décade. La Moselle vosgienne, surtout en fin de période d'étude, est le bassin plus éloigné (du barycentre) du cluster plus proche, et pourtant identifiable comme le bassin le plus spécifique du cluster. En synthèse, ce cluster peut être identifié, à cause de sa dominante semi-naturelle, comme « forêt, prairies ».

³ Pour rappel : un individu est défini, aux fins de cette analyse, par le croisement entre un bassin versant et une fenêtre temporelle d'observation de la durée de 5 ans.

Composante principale ¹	v. test	moyenne		ecart-type		p.value	cluster
		cluster	globale	cluster	globale		
3	3.01	0.03	1.78E-17	0.03	0.06	2.57E-03	
2	-3.08	-0.05	2.15E-17	0.05	0.11	2.04E-03	1 « forêt, prairies »
1	-10.66	-0.25	-1.87E-17	0.05	0.14	1.60E-26	
2	3.11	0.05	2.15E-17	0.05	0.11	1.87E-03	2 « orge '80 »
4	2.46	0.01	-1.31E-17	0.02	0.03	1.40E-02	
1	-5.21	-0.11	-1.87E-17	0.04	0.14	1.93E-07	
3	-5.91	-0.05	1.78E-17	0.02	0.06	3.48E-09	
1	4.73	0.07	-1.87E-17	0.09	0.14	2.22E-06	3 « polyculture-élevage »
5	2.24	0.01	2.18E-17	0.01	0.02	2.48E-02	
2	-11.93	-0.14	2.15E-17	0.04	0.11	8.54E-33	
2	6.92	0.09	2.15E-17	0.04	0.11	4.55E-12	4 « agricole urbain »
3	6.23	0.05	1.78E-17	0.04	0.06	4.60E-10	
4	-5.88	-0.02	-1.31E-17	0.05	0.03	4.06E-09	
1	3.69	0.08	-1.87E-17	0.06	0.14	2.25E-04	
2	2.32	0.04	2.15E-17	0.07	0.11	2.02E-02	5 « cultures '80 »
5	-2.19	-0.01	2.18E-17	0.02	0.02	2.84E-02	
3	-10.57	-0.09	1.78E-17	0.03	0.06	4.23E-26	
1	7.04	0.18	-1.87E-17	0.06	0.14	1.98E-12	6 « CBO '90 »
3	5.56	0.06	1.78E-17	0.02	0.06	2.65E-08	
2	4.85	0.09	2.15E-17	0.04	0.11	1.21E-06	
4	4.39	0.02	-1.31E-17	0.02	0.03	1.12E-05	

Tableau 2 – Description des clusters à l'aide des composantes principales (en ordre décroissant de v. test).

¹ La 1^{ère} composante principale décrit la contraposition entre occupation des sols semi-naturelles (-) et terres agricole (+), la 2^{ème} prairies et semi-naturel (-) vs des dynamiques centrées sur colza-blé-orge (+), la 3^{ème} l'agriculture liée à l'élevage (-) vs grandes cultures et semi-naturel (+), la 4^{ème} habitats et prairies (-) vs cultures et semi-naturel (+), la 5^{ème} des occupations permanentes (telles que prairies ou artificielles) (-) vs des dynamiques années '90 (caractérisées par courte récurrence du colza et la hausse des jachères) (+).

Le cluster 2 (15,0% des individus) est caractérisé par une fréquence des prairies supérieure à la moyenne, incluant à la fois soit les artificielles et temporaires de 2 ans soit les permanentes d'au moins 4 ans. Dans ce groupe aussi l'orge très récurrente (3-5 ans sur 5) est deux fois plus présente que la moyenne globale. Les prairies permanentes de 5 ans ainsi que colza et blé très récurrents ont par contre une fréquence inférieure à la moyenne. D'une manière cohérente, les membres de ce groupe présentent sur la seconde composante principale des valeurs supérieures à la moyenne, se plaçant ainsi dans une partie du graphique caractérisée par les systèmes de culture centrés sur la triplet colza, blé et orge. Au même temps, les individus de ce groupe ont des coordonnées inférieures à la moyenne sur 1^{ère} et 3^{ème} composantes, fait qui pourrait être interprété comme une prévalence d'un système d'élevage (quelques cultures, prairies abondantes). En bref, le cluster 2 semble décrire les systèmes agricoles des années 80, avec une culture mixte composée par de l'orge répétée et des prairies permanentes diffuses. L'individu plus proche de son centre sont Moyenne-Meuse et Bouvades-Moselle (surtout en début des années '80), avec pour la Vezouse-Sanon période centrale des années '80. Les individus les plus significatifs appartenant à ce groupe est le bassin Rupt de Mad-Esche-Terroin, surtout dans les années '80. En synthèse ce cluster, ayant comme éléments structurants l'orge récurrent (2 à 3 /5) et l'augmentation du colza, peut être identifié comme « orge '80 ».

Le cluster 3 (25,4% des individus) se caractérise par une récurrence des prairies de 5 ans et du maïs (avec différents taux d'occurrence) supérieure à la moyenne globale, ainsi que par l'absence de prairies temporaires

ou d'autres cultures. Au même temps ce groupe montre une occurrence de l'orge et de l'absence de prairies permanentes inférieure à la moyenne. En termes de composantes principales, ce groupe présente des coordonnées plus négatives de la moyenne globale sur la deuxième composante, marquant une association à prairies (permanentes et artificielle) ainsi que à l'orge récurrente et au maïs. D'autre il présente des coordonnées légèrement supérieures à la moyenne sur 1^{ère} et 5^{ème} composantes, marquant (surtout pour cette dernière) une association à céréales répétées (soit maïs soit blé ou orge) et à la jachère. En bref, le cluster 3 semble regrouper les prairies permanentes et le maïs récurrent. Les individus plus proches de son barycentre sont Haute-Meuse et Meuse versant Seine et Sarre et Pays-de-Bitche, respectivement en fin ou milieu des années '90. Ses individus les plus significatifs sont le Chiers-Meuse dans les années 90 et le Madon du début des années 90. En synthèse ce cluster, ayant comme éléments structurants la prédominance de C-B-O, l'augmentation des prairies, intensification du maïs pouvant ainsi être identifié comme « polyculture-élevage ».

Le cluster 4 (20,0% des individus) se caractérise par les occupations artificielles des sols ainsi que par la hausse de fréquence moyenne de l'alternance dans le triplet : colza, orge et blé. Ce groupe est en quelque sorte complémentaire au cluster 2 parce-que le premier présente une récurrence des prairies permanentes (4 ans) égal à moitié de la moyenne globale, ainsi que de deux ans prairies artificielles ou de l'orge ou du maïs récurrents. Les individus du cluster 4 se placent pour la plupart dans les secteurs positifs de 2^{ème} et 3^{ème} composante, et aux négatifs de la 4^{ème}. La caractéristique commune, marquée surtout par cette dernière, sont les occupations artificielle des sols, auxquelles on peut ajouter les grandes cultures (colza, blé, orge en alternance). En bref, le cluster 4 semble regrouper les bassins versants où les cultures sont mélangées avec des villages ou des zones urbaines. Les individus les plus proches de son barycentre sont Métropole-Lorrain (segment nord) dans la fin des années 90, ainsi que Rupt de Mad-Esche-Terrouin en fin de la période d'étude. L'individu le plus significatif reste Métropole-Lorrain (segment nord) en différents quinquennats. Ses composantes structurantes sont l'intensification du blé, l'augmentation de colza ('80) et la mise en jachère ('90), en plus des présences significatives de sols artificialisés. Pour cela on a identifié ce cluster comme « agricole | urbain ».

Le cluster 5 (15,0% des individus) est marquée par une présence importante du blé fréquemment récurrent (presque 4 fois la moyenne globale) avec des motifs diverses concernant le colza et la mise en jachère et une récurrence du maïs double qu'en moyenne. De l'autre côté, il montre une récurrence de l'orge plus faible que la moyenne, ainsi qu'une faible fréquence de occupations semi-naturels des sols. Ce groupe est fortement caractérisé par des coordonnées très négatives sur la 3^{ème} composante et négatives sur la 5^{ème}, qui ont en commun la récurrence des prairies permanentes sur 4 ans et le colza répété sur 2 ans (5^{ème} composante), alors que ils ont des coordonnées plus positives que la moyenne globale sur 1^{ère} et 2^{ème} composante, unies par les dynamiques liées aux cultures majoritaires de la région (colza, blé et orge). En bref, le cluster 5 semble regrouper des bassins versants dont la dynamique est déterminée par le blé et le colza. Les individus les plus proches de son barycentre sont principalement le Bassin-Ferrifère Meuse et Rhin ainsi que Niefs et Bassin Houiller, dans les deux cas concernant le début des années '80. Le bassin plus significatifs résulte être le Madon des années '80. En synthèse, les dynamiques structurantes ce cluster concernent une hausse du colza, l'augmentation/intensification du maïs ainsi que une inflexion des prairies. Pour cela on a identifié ce cluster comme « cultures '80 ».

Le cluster 6 (11,3% des individus) est marqué par forte présence du colza récurrent sur 2 ans (triple que la moyenne globale) et du blé en forte fréquence (2-4 fois sur 5 ans), auquel s'ajoute une présence significative de la jachère (double de la moyenne globale). D'autre part, ce groupe se caractérise pour une très faible présence des dynamique liées aux zone semi-naturelles (moitié de la moyenne globale) et de l'orge (surtout répété) soit et la présence de zone semi-naturelles. Sinon, les individus agrégés dans ce cluster ont des coordonnées plutôt positives sur toutes les composantes principales retenues pour l'analyse, ce qui les colloque dans une zone du graphique essentiellement caractérisée par les dynamiques agricoles. Les individus les plus proches de son barycentre sont principalement le Niefs et Bassin Houiller ainsi que Seille, dans les deux cas concernant les années '90 voire le début des années 2000. Le bassin de la Seille au fil des années '90

peut être identifié en outre comme le plus significatifs de ce cluster. En synthèse, les dynamiques structurantes ce cluster concernent une intensification du blé, l'augmentation du colza, une réduction des prairies artificiel et du maïs, ainsi qu'une diminution des prairies permanentes. Pour cela on a identifié ce cluster comme « CBO '90 ».

3.3 Distributions des balances azotées

Les balances azotées parcellaires annuelles obtenues pour les cultures assolées en place décrivent des distributions variables selon qu'elles sont considérées dans leur ensemble ou bien distinguées en fonction de l'année d'enquête PK, du cluster d'appartenance ou de la nature de la culture.

Les graphiques présentés ci-après sont construits de manière identique : les barres des histogrammes représentent le nombre de parcelles (en ordonnées) présentant des balances azotées comprises dans les différentes gammes de valeurs (en abscisses). Au-delà d'un excédent de 30 kgN/ha, on considère que la teneur en nitrates dans les eaux issues des surfaces concernées dépasse la limite légale de 50 mgN/l (Benôit et al., 1995). Les barres des histogrammes sont donc colorées différemment de part et d'autre de cette valeur. L'axe des ordonnées représentant des effectifs, son échelle peut varier selon le type de la discrimination appliquée. C'est cependant l'allure (la "forme") de la distribution qui importe ici. Sur les mêmes graphes, les points référant à l'axe secondaire des ordonnées correspondent aux pourcentages de fertilisation organique sur la fertilisation totale, en termes de quantités d'azote, pour chaque classe de balances azotées.

Un seuil minimal pour les effectifs est fixé à 20. Les résultats obtenus pour des effectifs au-dessous de ce seuil sont à traiter avec précaution, c'est pourquoi leur représentation a été allégée (couleurs des barres d'histogrammes et des points moins prononcées).

3.3.1 Distribution de l'ensemble des balances azotées

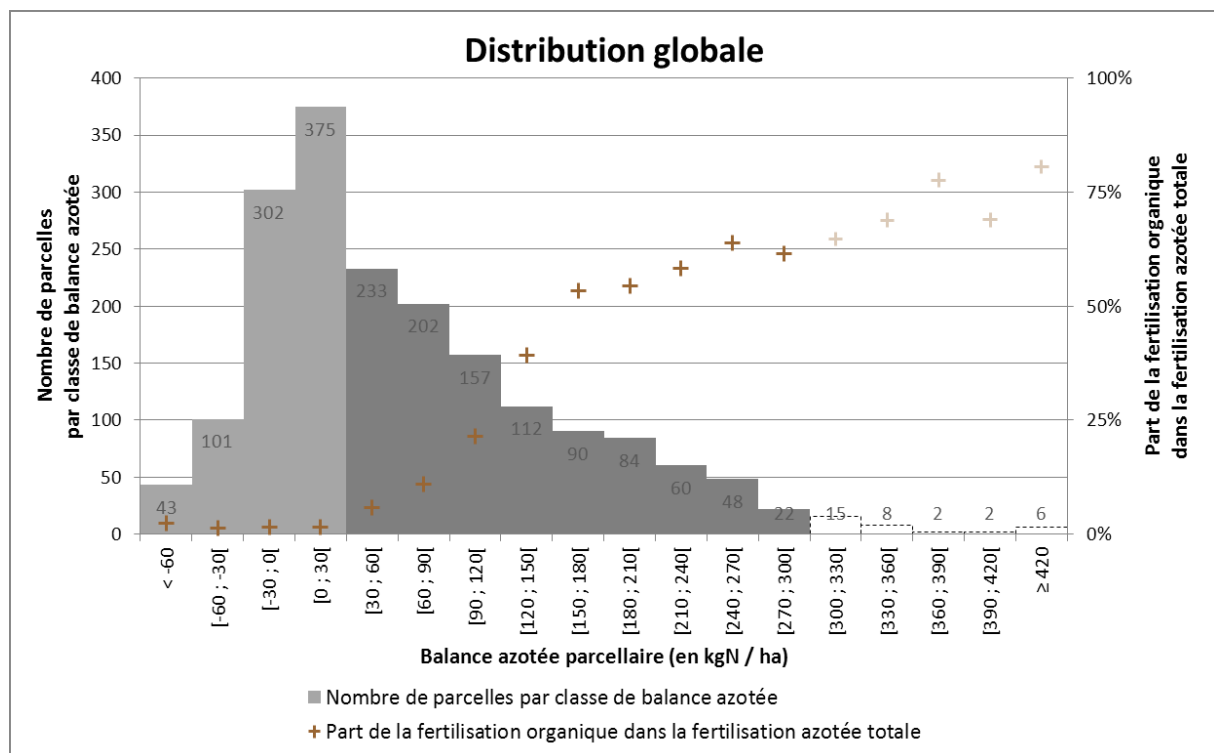


Figure 13 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour l'ensemble des cultures en place

Le mode (ou "pic") de la distribution se situe dans l'intervalle [0 ; 30[kgN/ha et les balances azotées induisant des pressions faibles ou nulles représentent environ 44% des cas, ce qui peut sembler satisfaisant (*figure 13*). Ceci étant, par déduction, 56% des parcelles présentent un excédent d'azote important, voire très important : certaines classes de balances azotées très élevées telles que [270 ; 300[kgN/ha sont constituées d'un nombre encore conséquent de parcelles. Les balances d'azote prises dans leur globalité ne suivent donc pas de distribution très homogène, ce qui montre d'importantes disparités dans les modes de gestion des flux d'azote sur les exploitations, et la queue de distribution tendant vers les valeurs importantes révèle des excès de fertilisation fréquents.

Quant à la part de fertilisation organique sur la fertilisation totale, elle apparaît d'autant plus grande que l'excès d'azote à l'hectare est important. Un constat aussi tranché peut par exemple s'expliquer par un fort chargement en fertilisants organiques des parcelles (parfois peu nombreuses) ou cultures pouvant recevoir des effluents d'élevage, par la fenêtre temporelle limitée pour les épandages et conduisant également à une concentration des épandages, ou encore par les difficultés de maîtrise de la minéralisation des fertilisants organiques.

3.3.2 Distributions des balances azotées distinguées selon la culture

En restant sur le même principe de construction des représentations graphiques, les distributions des balances azotées annuelles parcellaires selon la culture en place donnent les figures ci-après. Les données des enquêtes PK permettent de détailler les résultats ou non selon la distinction "culture d'hiver / culture d'été" ou selon l'utilisation en fourrage ou pour le grain pour le maïs.

3.3.2.1 Sans distinction H/P et f/g

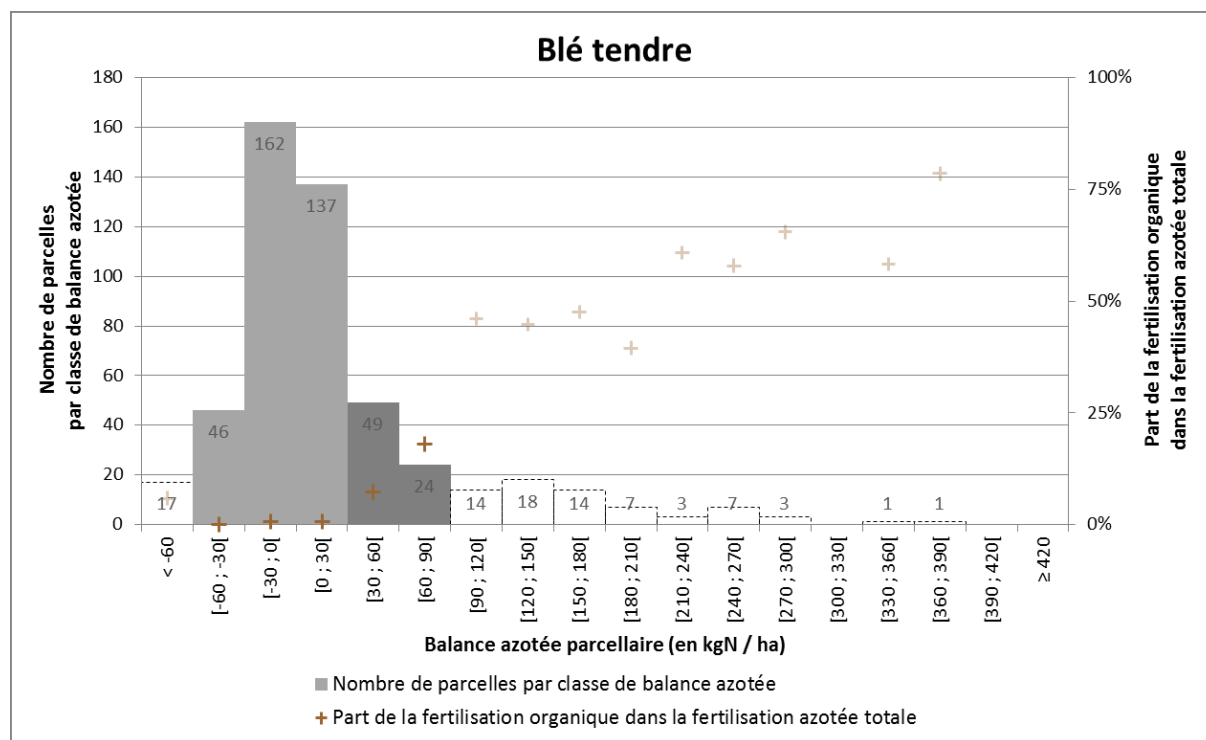


Figure 14 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de blé tendre

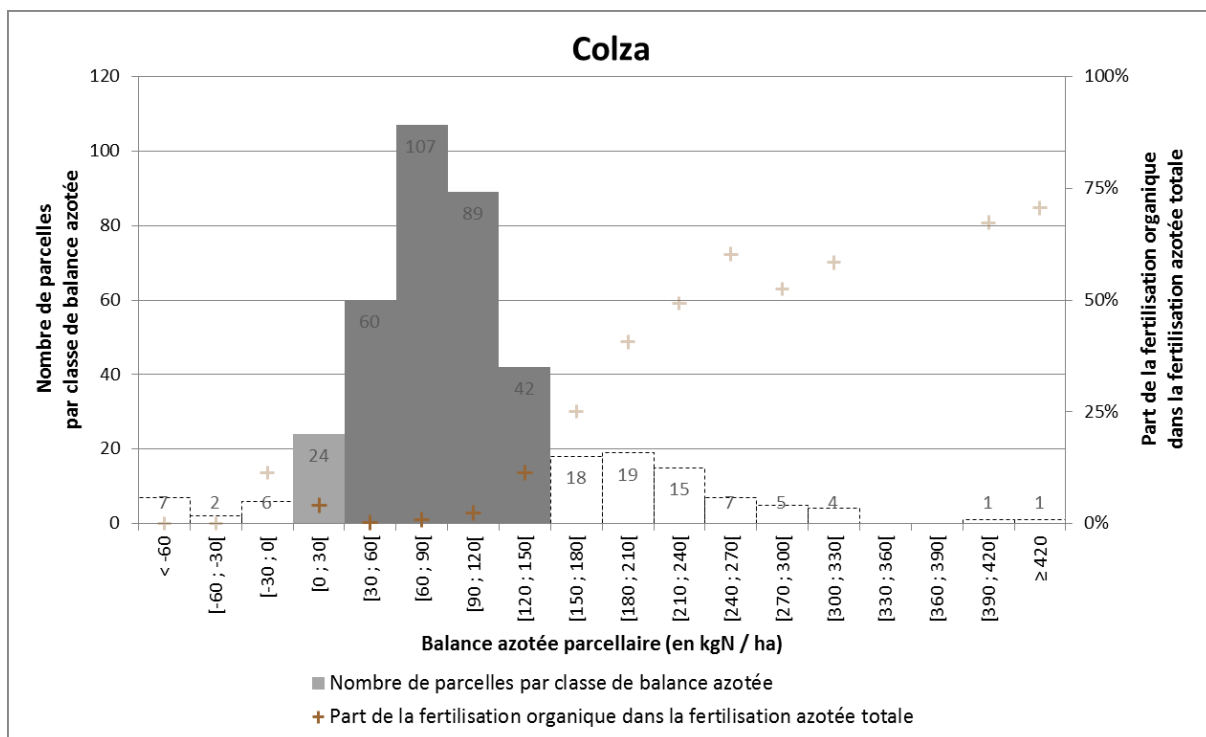


Figure 15 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de colza

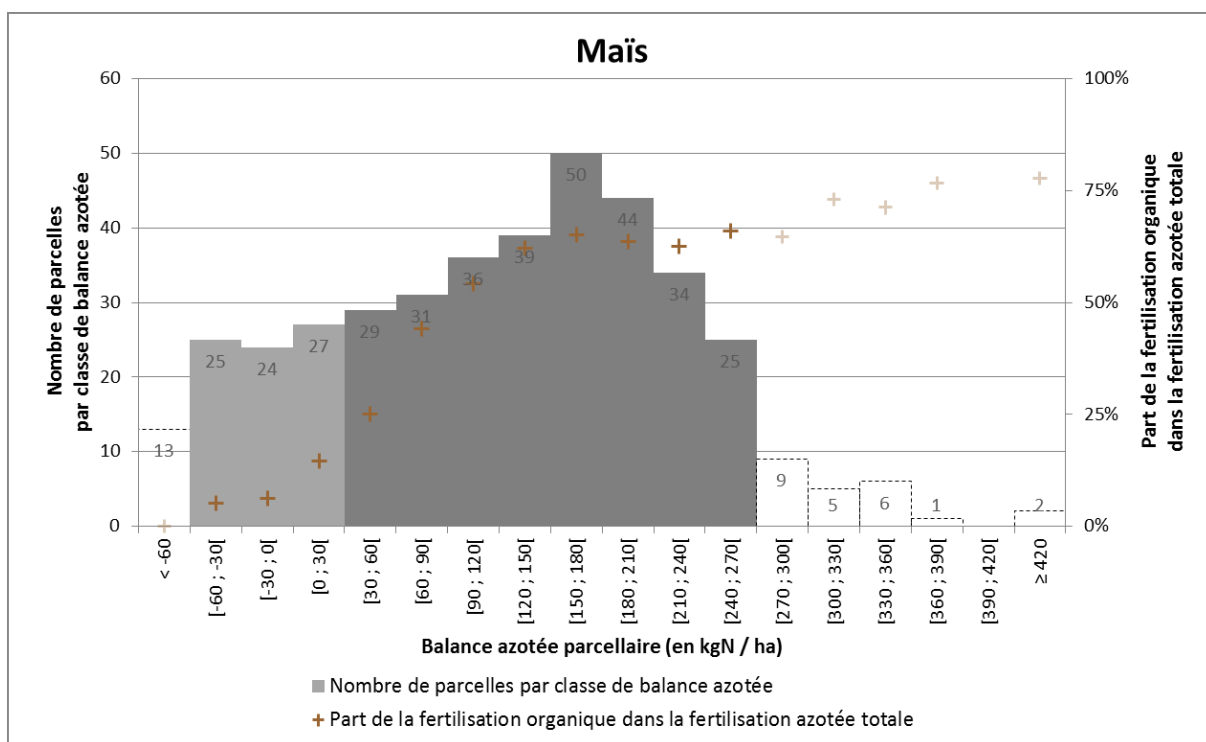


Figure 16 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de maïs

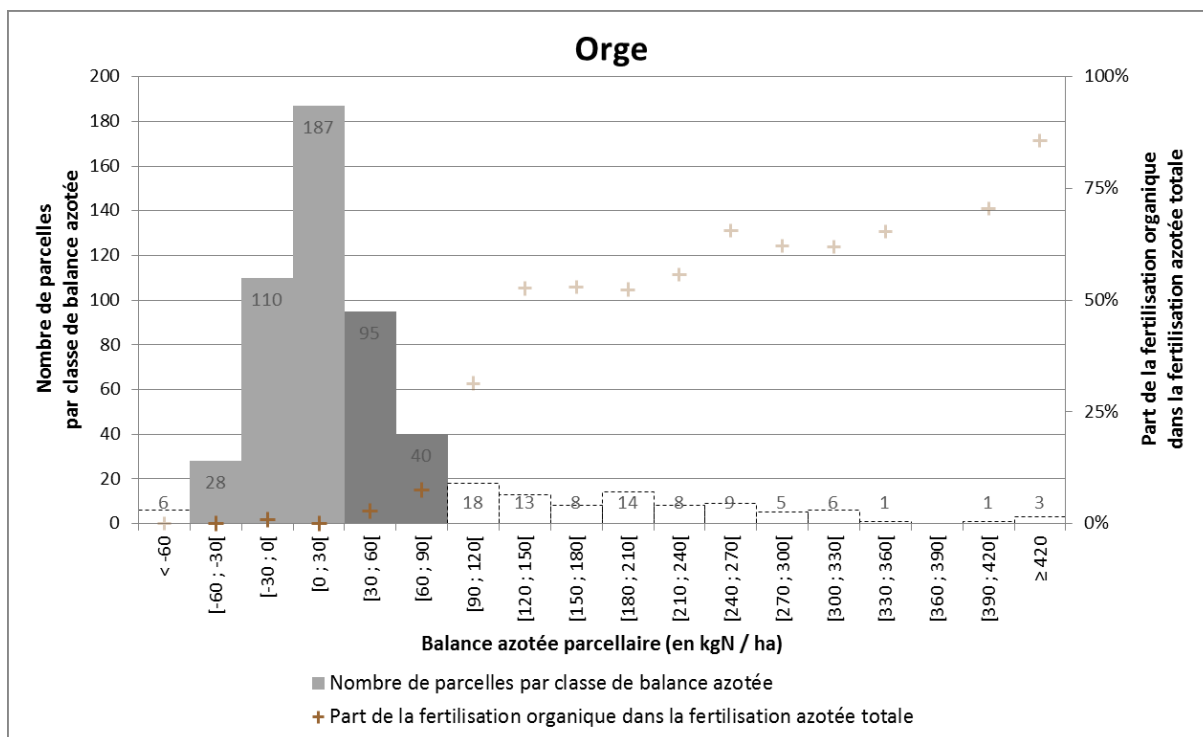


Figure 17 - Distribution des balances azotées annuelles parcelaires pour les cultures en place d'orge

Sur ces différents graphes, la contrainte des effectifs minimaux de 20 induit la perte d'une part importante des barres de distribution. Cependant, on constate malgré ces pertes des différences très marquées en fonction de la culture en place considérée.

Le blé tendre et l'orge présentent des balances satisfaisantes, avec des distributions relativement bien groupées et centrées sur des valeurs comprises entre -30 et 30 kgN/ha.

La distribution des balances pour le colza suit une allure similaire, mais les valeurs sont ici centrées sur la plage [60 ; 90] kgN/ha. La majorité des intervalles de valeurs de balances azotées dont les effectifs sont suffisants correspondent à des excédents importants. Le colza apparaît donc comme une culture participant à l'augmentation de la pression azotée.

Enfin, le maïs présente la distribution la plus alarmante : malgré une part non négligeable de balances négatives ou faiblement excédentaires, les gammes de valeurs rencontrées sont très variables et atteignent des excédents très importants. Le mode de la distribution se situe dans l'intervalle [150 ; 180] kgN/ha. La majorité des balances sont liées à une forte pression azotée sur les ressources en eau. Par ailleurs, contrairement aux autres cultures en place, la fertilisation organique du maïs est assez fréquente même pour les gammes de balances peu problématiques –notamment du fait des possibilités d'épandage qu'offre cette culture. La quantité d'azote organique sur la quantité totale d'azote augmente de manière conjointe (mais non proportionnelle) aux valeurs de balances azotées correspondantes.

3.3.2.2 Avec distinction H/P et f/g

Les figures 18 à 25 permettent de percevoir les contributions des cultures d'hiver et de printemps dans les résultats présentés précédemment.

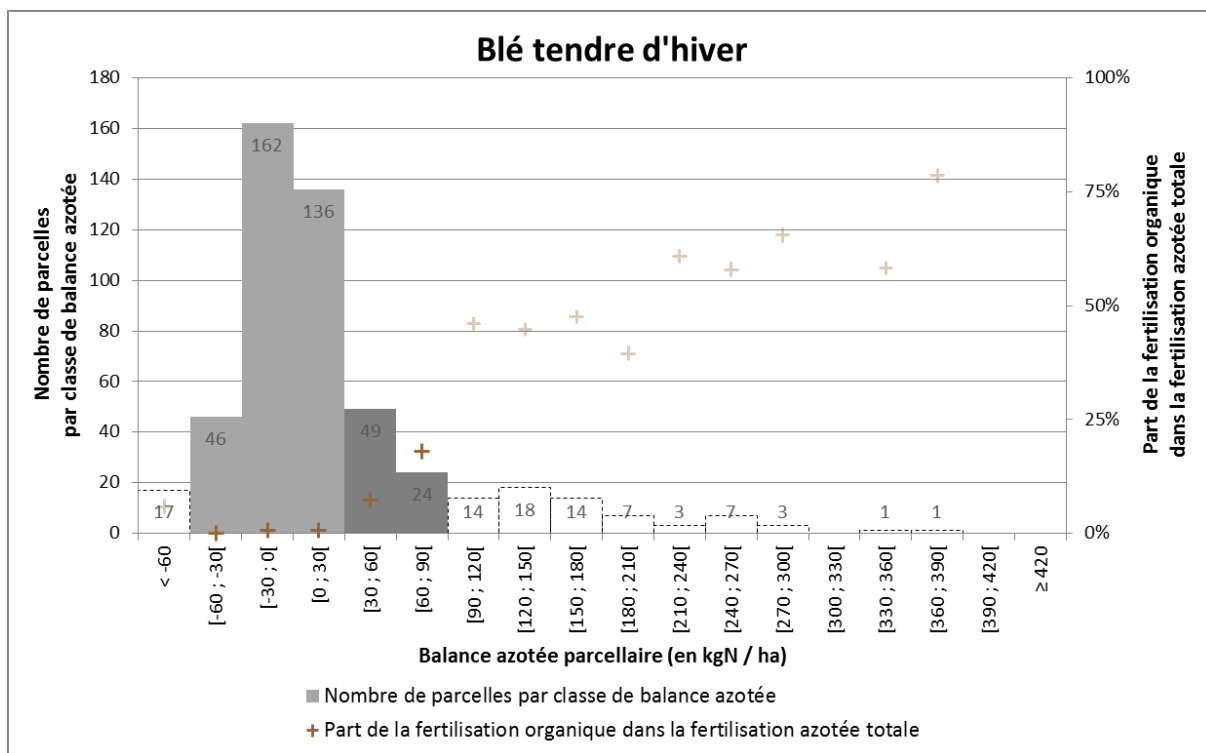


Figure 18 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de blé tendre d'hiver

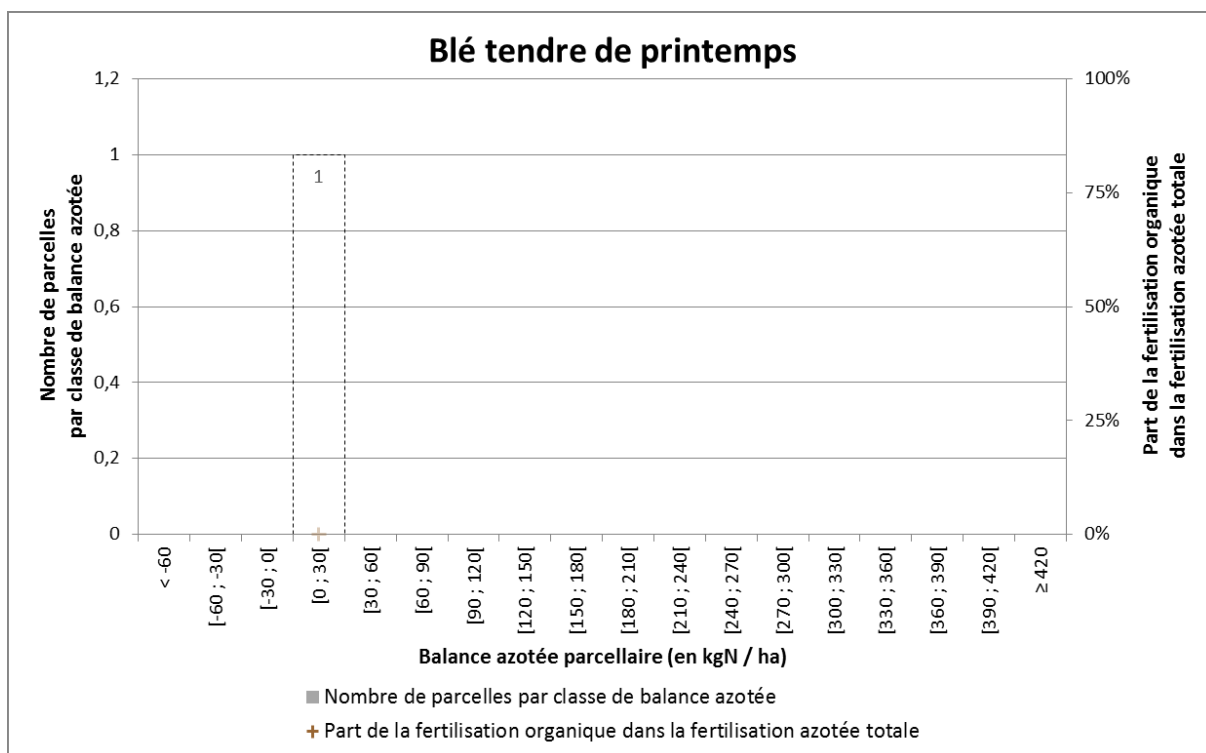


Figure 19 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de blé tendre de printemps

La prise en compte de la modalité H/P est sans intérêt pour le blé tendre puisqu'une seule parcelle est implantée en culture de printemps. On ne peut donc rien tirer de plus de ces deux graphes par rapport à la *figure 14*.

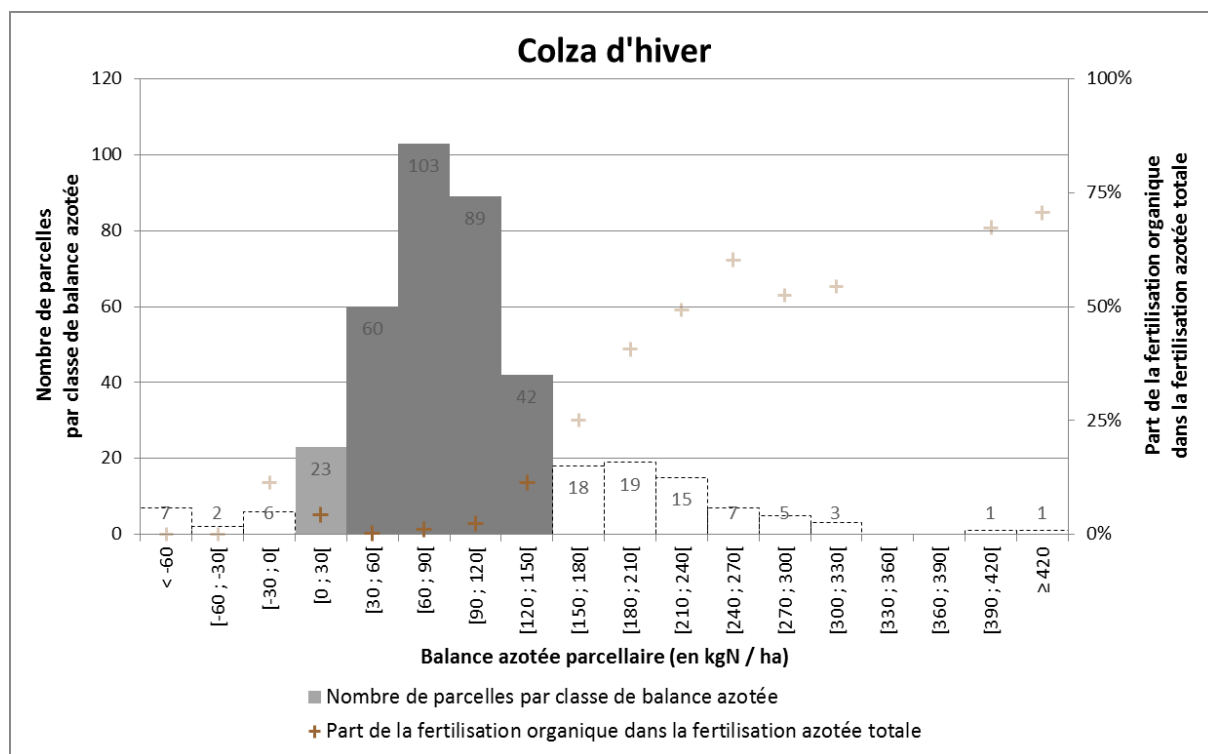


Figure 20 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de colza d'hiver

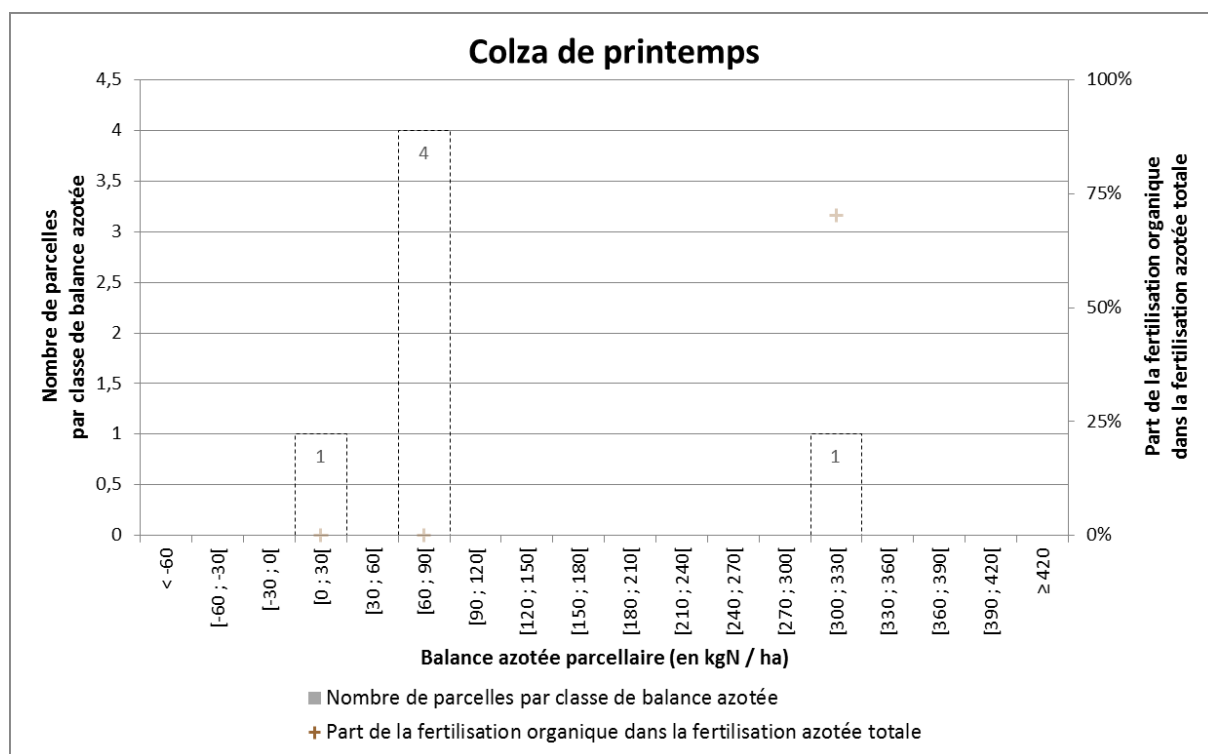


Figure 21 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place de colza de printemps

De même que pour le blé tendre, les cultures de printemps sont très largement minoritaires pour le colza. La distinction H/P ne nous apporte donc ici non plus aucune information supplémentaire.

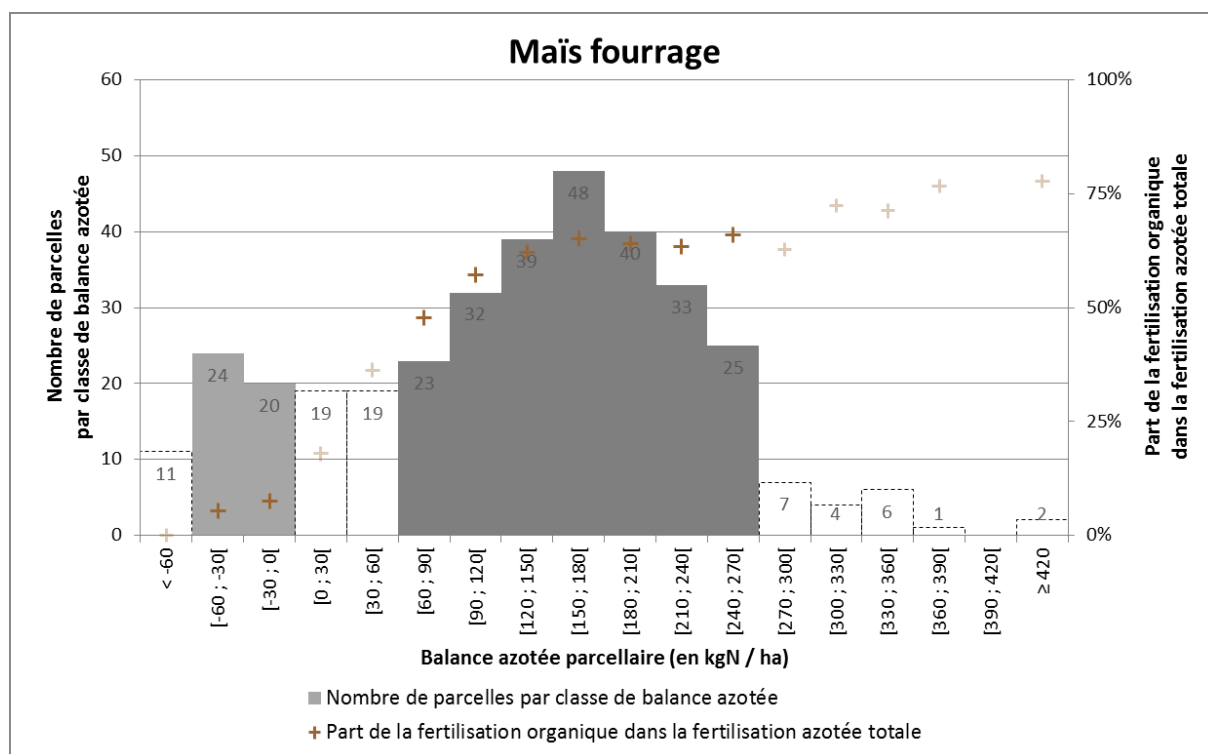


Figure 22 - Distribution des balances azotées annuelles parcelaires pour les cultures en place de maïs fourrage

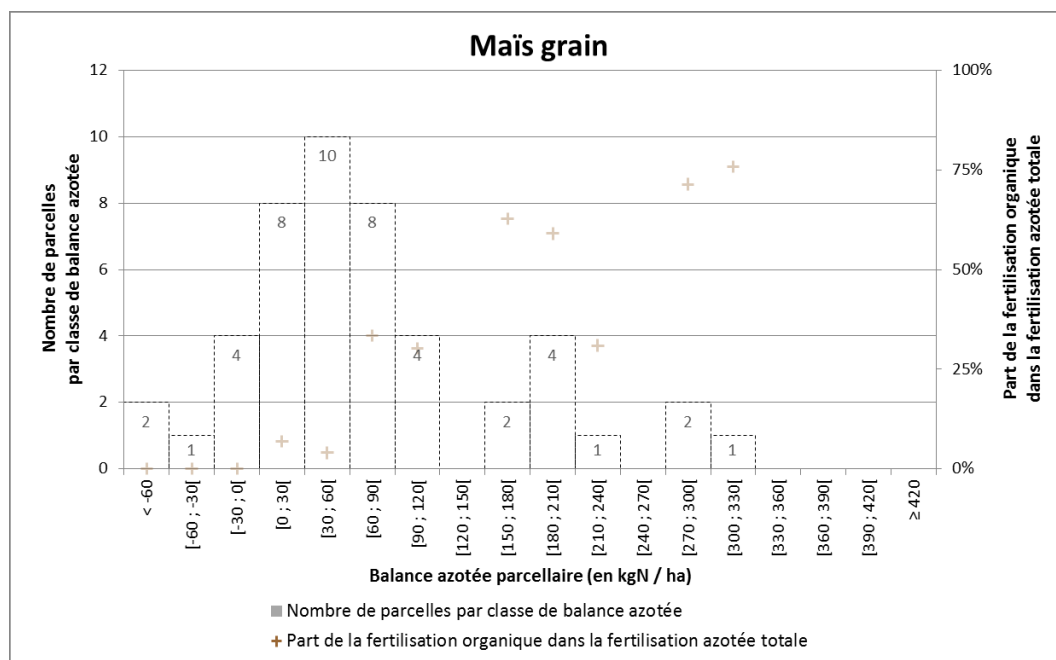


Figure 23 - Distribution des balances azotées annuelles parcelaires pour les cultures en place de maïs grain

Dans le cas du maïs, la récolte en grain est ici encore très faiblement représentée. Toutefois, parmi le faible nombre de parcelles recensées en maïs grain, la distribution des balances azotées annuelles parcelaires semble décrire un pic centré sur l'intervalle [30 ; 60]. Tout en ne négligeant pas les précautions à prendre quant

aux conclusions qui pourraient être tirées de la **figure 23**, on peut donc supposer que les cultures de maïs grain induisent en général des pertes d'azotes plus faibles que pour le maïs fourrage (pic à [150 ; 180]).

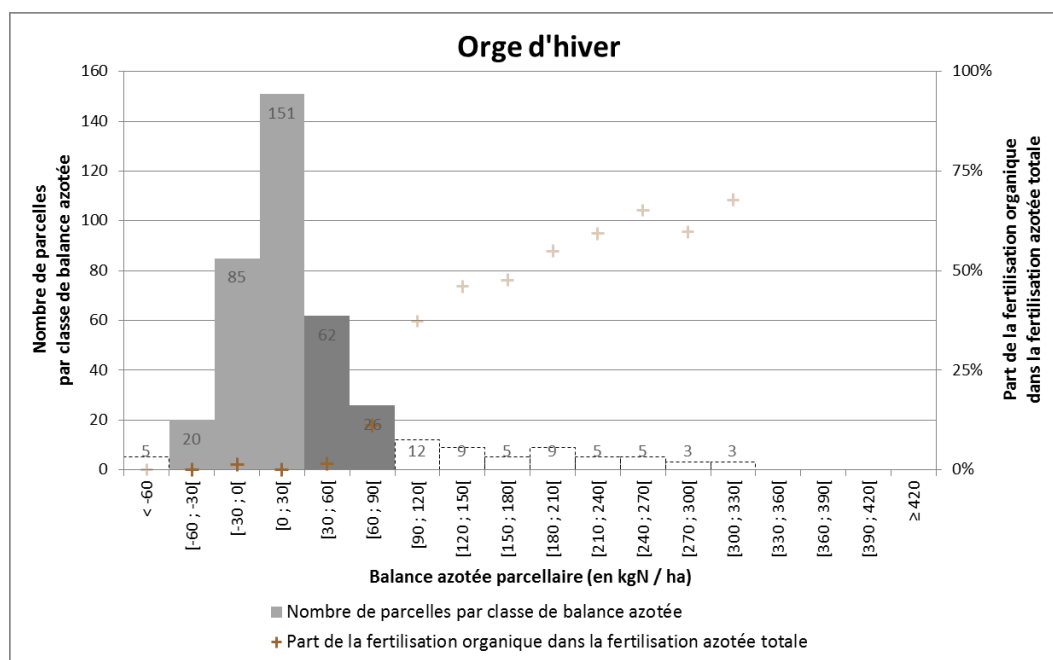


Figure 24 - Distribution des balances azotées annuelles parcelles pour les cultures en place d'orge d'hiver

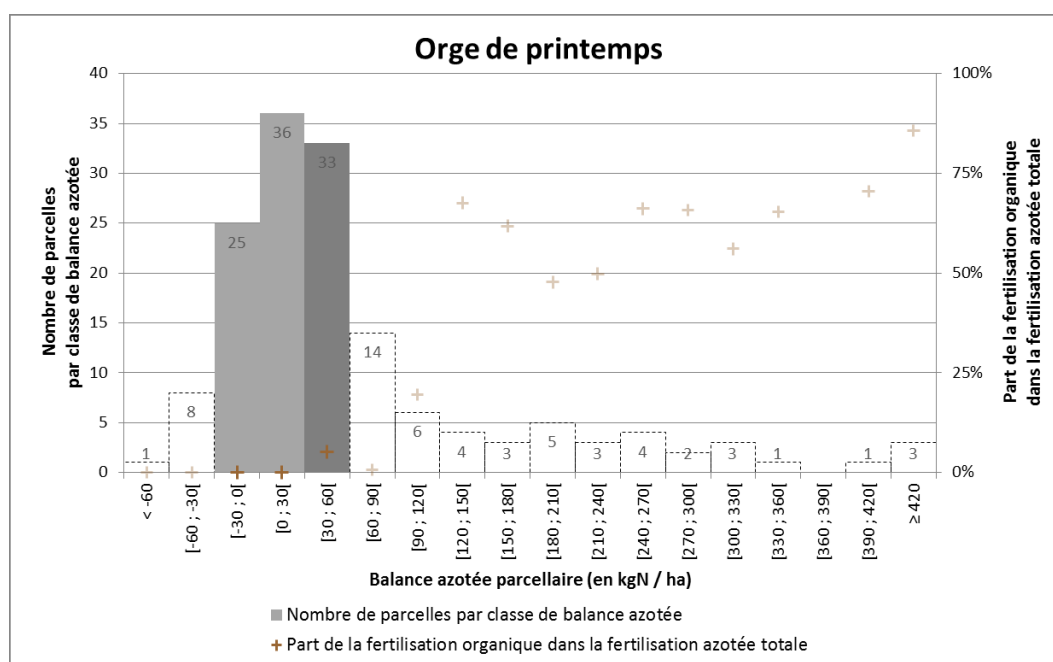


Figure 25 - Distribution des balances azotées annuelles parcelles pour les cultures en place d'orge de printemps

L'orge est représentée plus nettement que les autres cultures en place par ses deux composantes « culture d'hiver » / « culture de printemps ». Néanmoins, les deux distributions disponibles ne montrent pas de grandes différences : les deux modes sont situés sur l'intervalle [0 ; 30[et la dispersion des valeurs est faible. On peut simplement noter, pour la distribution des balances de l'orge de printemps, une présence un peu plus marquée sur les premiers intervalles problématiques (au-delà de 30 kgN/ha).

3.3.3 Distributions des balances azotées distinguées selon l'année PK

Les représentations graphiques des distributions des balances azotées selon l'année d'enquête PK donnent les **figures 26 à 28**. Les variations des échantillons d'une année d'enquête à l'autre impliquent différentes possibilités d'exploitation des résultats.

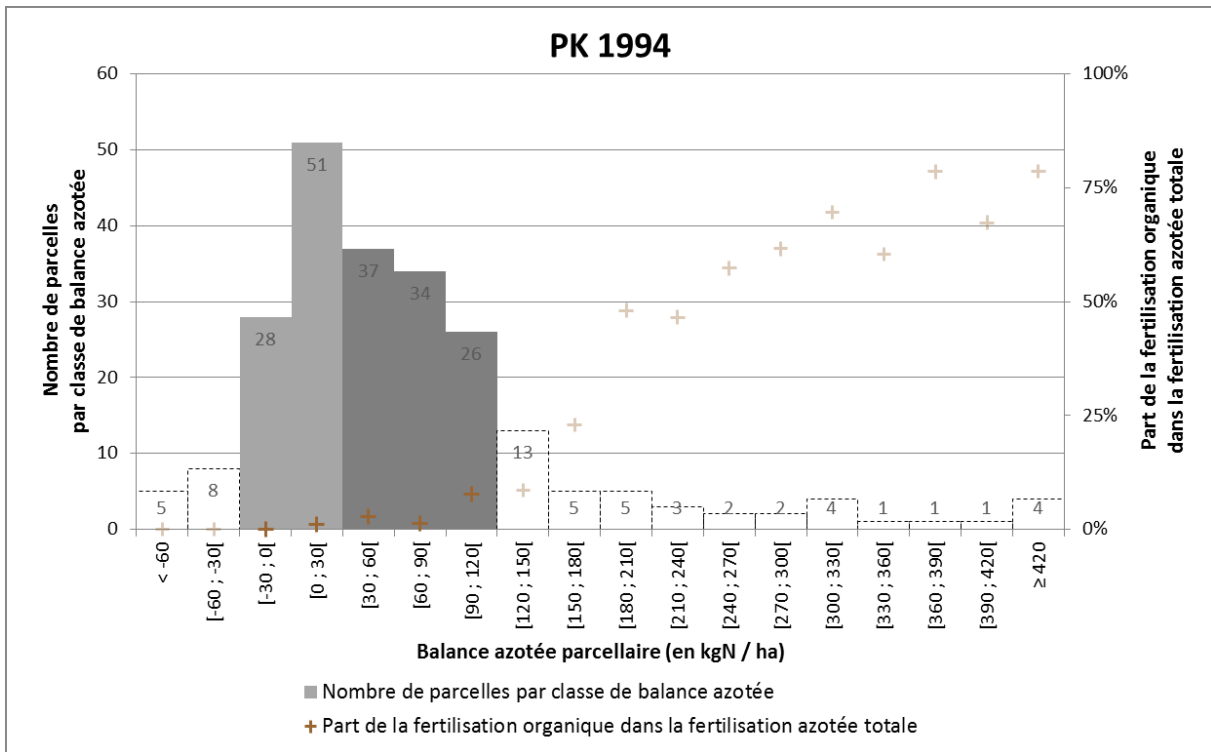


Figure 26 - Distribution des balances azotées annuelles parcelaires issues des enquêtes PK 1994

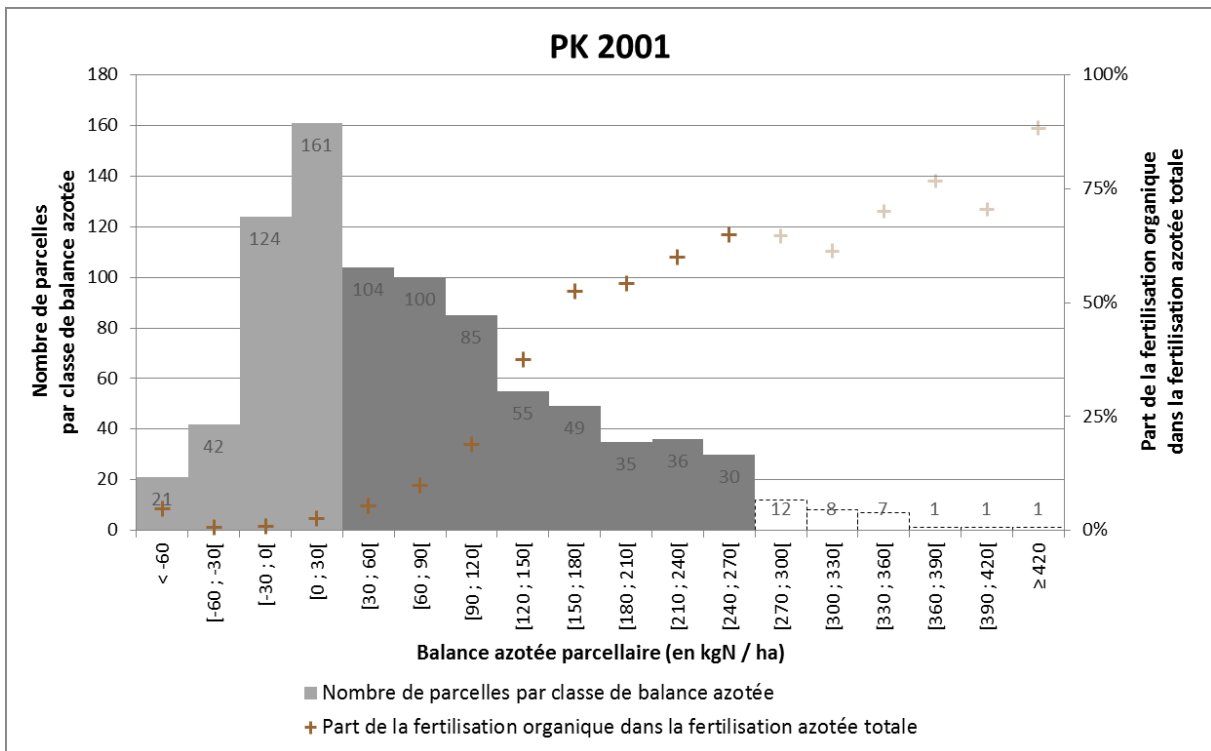


Figure 27 - Distribution des balances azotées annuelles parcelaires issues des enquêtes PK 2001

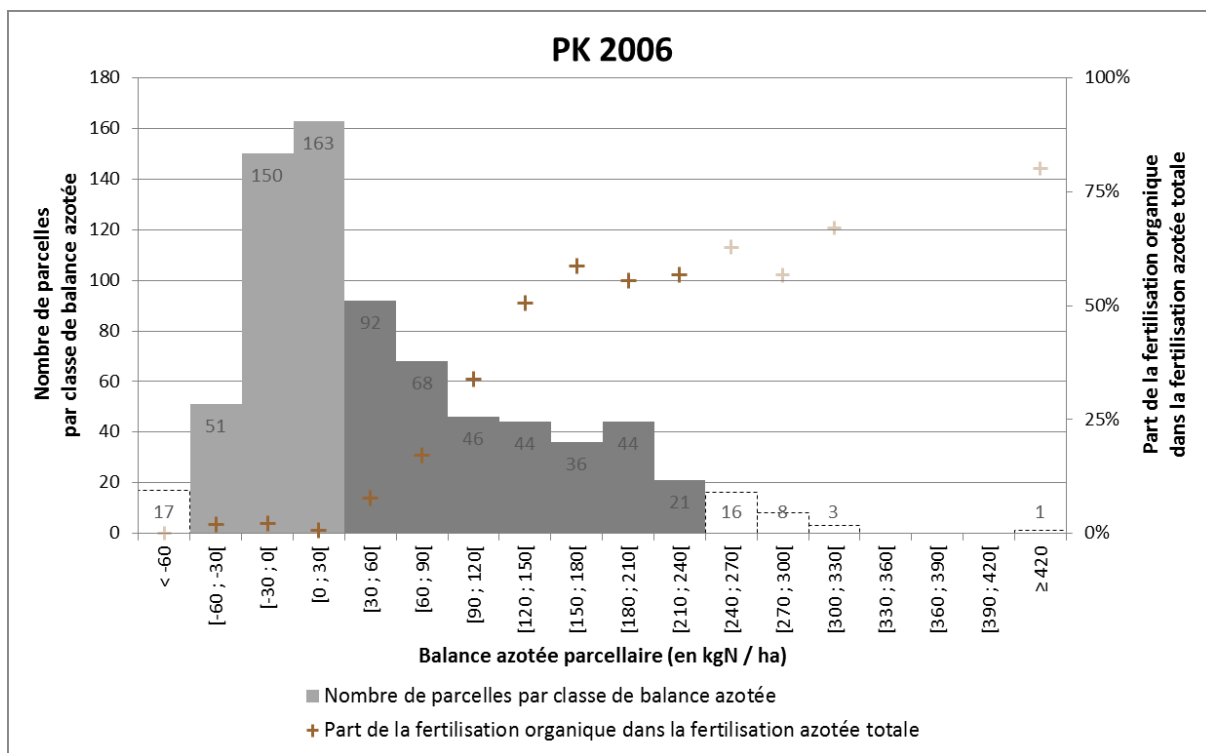


Figure 28 - Distribution des balances azotées annuelles parcellaires issues des enquêtes PK 2006

La part de la quantité d'azote organique sur les quantités totales d'azote épandues tend à s'améliorer légèrement au fil du temps : malgré une présence toujours claire de valeurs importantes pour ces pourcentages dans les hauts niveaux d'excédents azotés, la fertilisation organique intervient dans des classes de balances azotées de plus en plus basses au fur et à mesure des années d'enquêtes PK.

En considérant les distributions dans leurs allures générales, les forts excédents d'azote, peu présents en PK 1994, voient leurs effectifs se gonfler en PK 2001. Ce phénomène peut s'expliquer par une éventuelle dégradation des modes de gestion des flux d'azote sur les exploitations ("surdosage" de la fertilisation) et/ou par la prise en compte en 2001 d'éléments nouveaux. Rappelons notamment que l'enquête PK 1994 ne recensait que 15 parcelles implantées en maïs, contre 209 parcelles pour PK 2001.

Par ailleurs, les pics des distributions semblent se décaler vers des valeurs plus satisfaisantes et les balances azotées parcellaires annuelles négatives gagnent progressivement en effectifs.

3.3.4 Distributions des balances azotées distinguées selon le cluster

Les différents clusters ne sont pas renseignés par des échantillons de tailles similaires, ce qui implique que leurs interprétations pourront montrer certaines limites dans le cas des clusters à faibles effectifs. Le cas est flagrant pour le cluster 1 (figure 29), dont l'occupation du sol est caractérisée par une dominance de prairies et de forêts, puisqu'aucune des classes de balances azotées n'atteint l'effectif minimal de 20. Aucune analyse ne sera donc poussée plus loin que le constat que l'allure de la distribution se distingue très grossièrement des autres par une queue de distribution bien fournie pour des excédents d'azote importants.

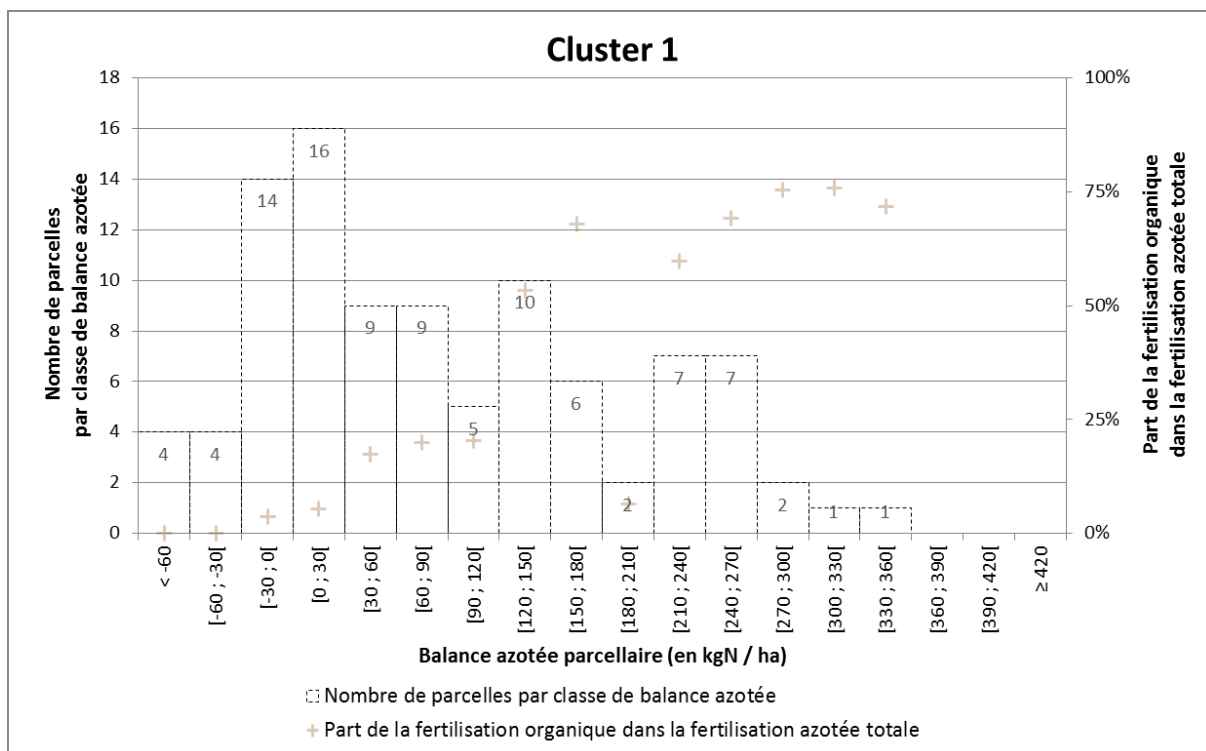


Figure 29 - Distribution des balances azotées annuelles pour les parcelles localisées dans le cluster 1

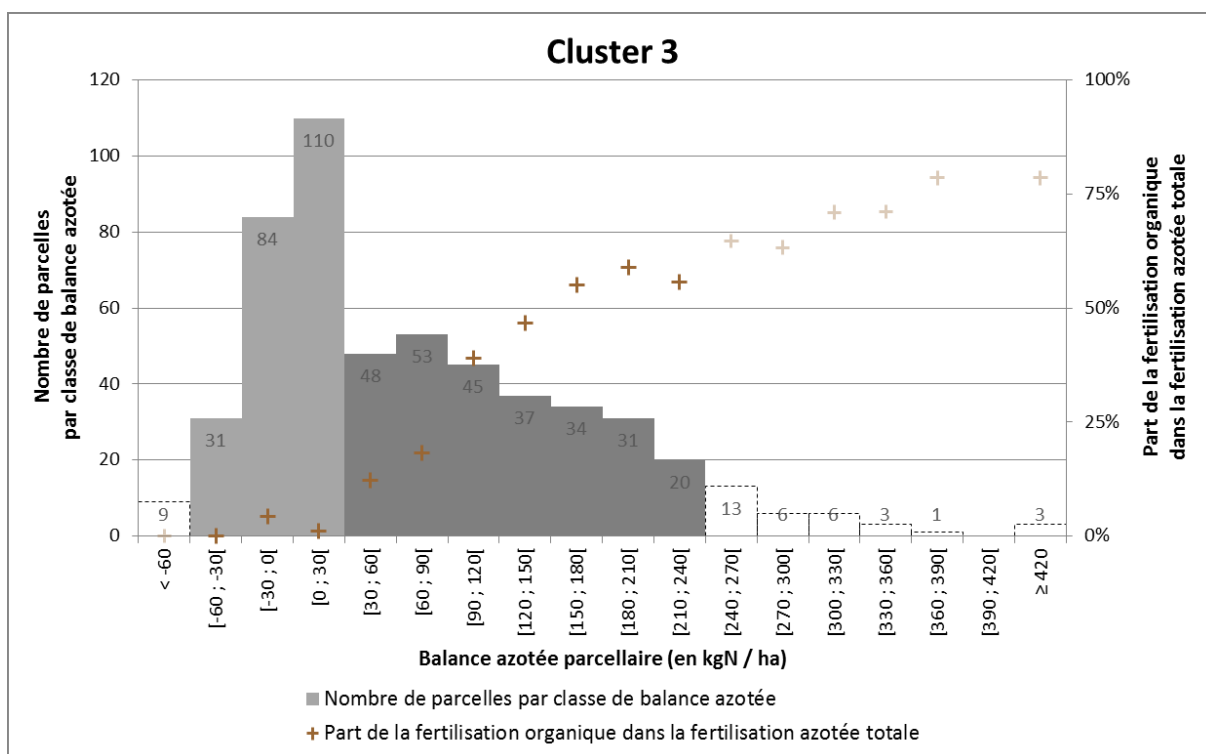


Figure 30 - Distribution des balances azotées annuelles pour les parcelles localisées dans le cluster 3

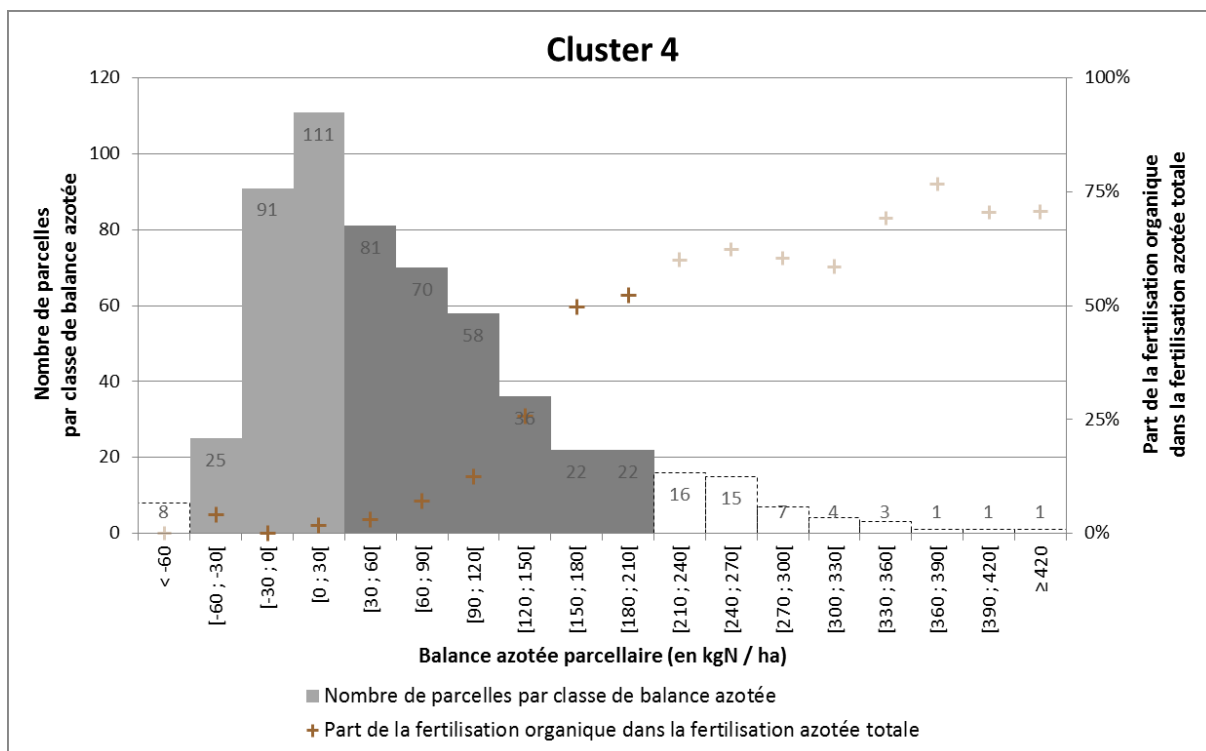


Figure 31 - Distribution des balances azotées annuelles pour les parcelles localisées dans le cluster 4

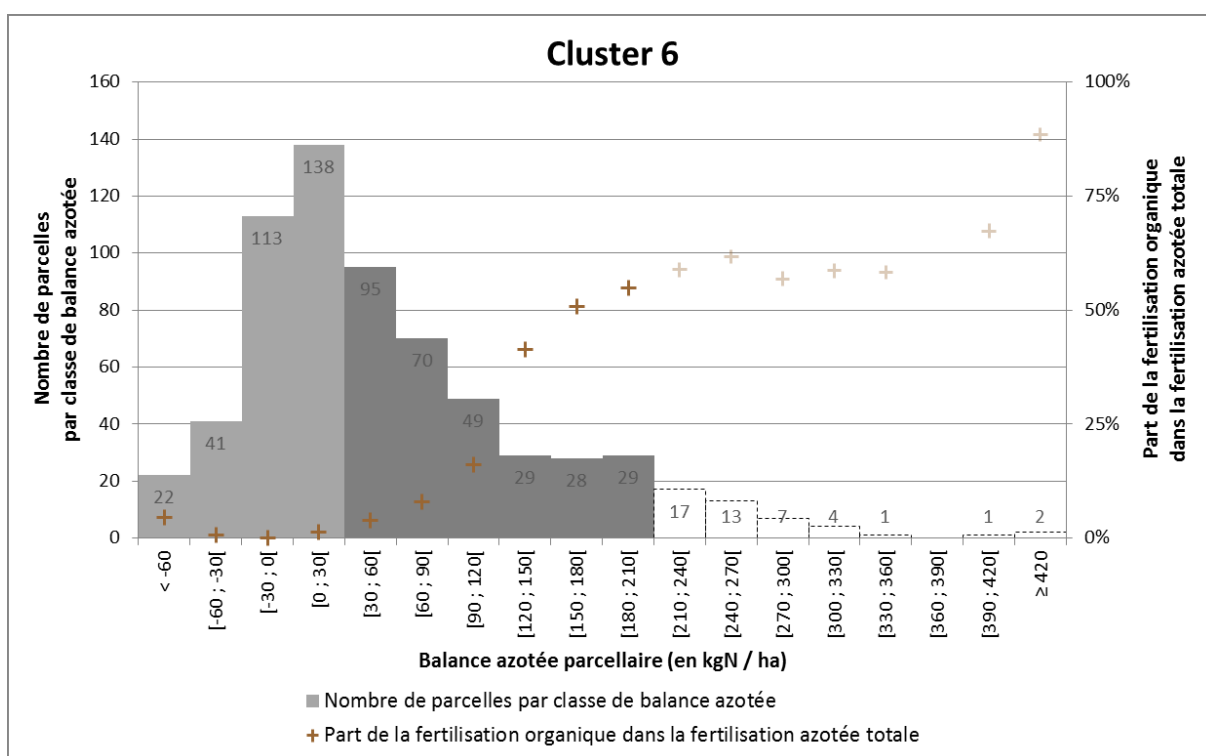


Figure 32 - Distribution des balances azotées annuelles pour les parcelles localisées dans le cluster 6

La distribution des balances azotées annuelles parcellaires des clusters 4 et 6 sont très ressemblantes. Pour rappel, leurs occupations du sol sont respectivement caractérisées par des surfaces majoritairement agricoles ou urbaines et par des successions de cultures "colza-blé-orge" typiques des années 1990. Même si les premiers intervalles d'excédents d'azotes "problématiques" présentent des effectifs plus conséquents pour le

cluster 4 que pour le cluster 6, les deux distributions décrivent des allures très proches et leurs modes se situe sur le même intervalle [0 ; 30] kgN/ha.

Le cluster 3, dont l'occupation du sol est marquée par des cultures évoquant une forte présence des systèmes de polyculture-élevage, a son pic sur le même intervalle mais présente une allure relativement différente : les valeurs satisfaisantes de balances azotées sont en effectifs proportionnellement plus importants, mais la queue de distribution positive voit ses effectifs diminuer plus lentement (on a donc pour le cluster 3 davantage de balances azotées annuelles parcellaires fortement excédentaires que dans les clusters 4 et 6). La production de maïs fourrager dans les exploitations comportant de l'élevage peut en partie expliquer ce dernier élément.

3.4 Plages de BASCULE obtenues

Les distributions détaillées dans la partie précédentes sont tirées des balances azotées annuelles parcellaires pour les cultures en place. Le calcul d'une balance azotée moyennée sur les différentes années d'une succession de cultures (de deux ans dans notre cas d'étude) et sur l'ensemble des surfaces agricoles d'un cluster donné aboutit à l'obtention de valeurs de BASCULE. Comme indiqué dans la partie méthodologique, pour des raisons liées aux effectifs des ensembles considérés, les résultats des calculs des BASCULE ont été détaillés soit selon l'année d'enquête PK et le cluster, soit en fonction de la nature de la culture en place et du précédent cultural.

3.4.1 Selon année PK et cluster

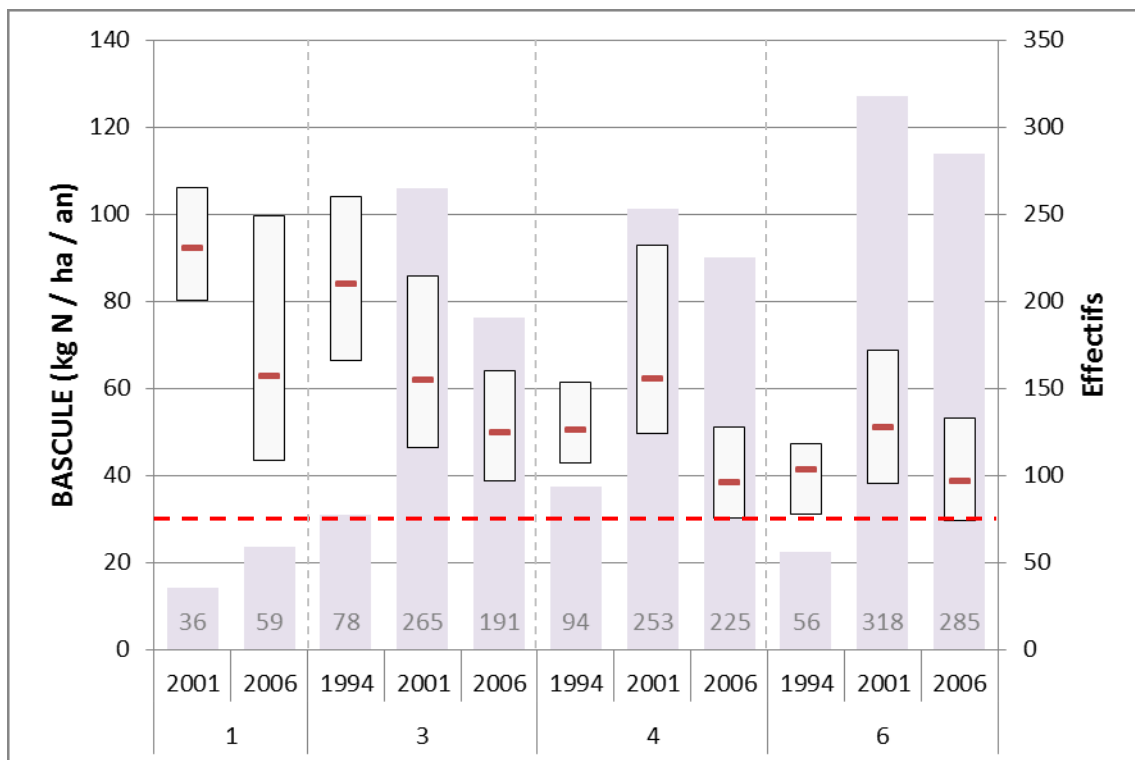


Figure 33 - Valeurs inférieures, centrales et supérieures de l'indicateur BASCULE et nombre de parcelles concernées pour chaque ensemble "cluster d'appartenance - année d'enquête PK"

Les plages de BASCULE montrent de grandes disparités au sein des différents groupes "cluster - année PK" formés. Pourtant, l'étape d'extrapolation s'est basée sur le recours des 1^{er} et 3^e quartiles de chaque ensemble de référence (donnant par la suite les valeurs inférieures et supérieures des plages de BASCULE), c'est-à-dire

que seulement 50% de la variabilité totale est prise en compte. La maîtrise des flux d'azote sur les exploitations d'un même groupe semble donc peu homogène.

Par ailleurs, la ligne de pointillés rouges matérialise le seuil évoqué plus tôt à partir duquel on considère que la pollution induite sur les ressources en eau par les excès d'azote dépasse le seuil réglementaire de 50 mgN/l. Cette ligne se situe en-dessous de toutes les plages de BASCULE. Ainsi, le principal constat qui ressort de cette étude est que, quels que soient le cluster pris en compte et l'année d'enquête (même la plus récente), la situation est problématique vis-à-vis de la pression azotée sur les ressources en eau.

Même si les plages de valeurs sont trop larges pour être comparées entre elles avec une rigueur statistique satisfaisante, certains constats très globaux peuvent être soulignés. Les exploitations agricoles du cluster 6 (dont l'occupation du sol est caractérisée par une récurrence importante des successions colza-blé-orge) semblent notamment mieux maîtriser leurs pertes d'azote que celles du cluster 1 (dont les terres non arables sont principalement composées de prairies et de forêts). En outre, on note une diminution généralisée les valeurs de BASCULE entre les années d'enquête PK 1994 et 2006.

3.4.2 Selon précédent et culture

Les données fournies par les trois séries d'enquêtes PK détaillent la nature des espèces végétales implantées (pour les cultures en place comme pour les précédents culturaux) en précisant si l'on a à faire à des cultures d'hiver ou de printemps (H/P), ou dans le cas du maïs, si la culture est vouée à servir de fourrage ou si elle est récoltée pour son grain (f/g).

Les deux paragraphes suivants proposent deux approches différentes (sans ou avec distinction H/P et f/g) pour la description des résultats de BASCULE selon la culture en place et le précédent cultural.

3.4.2.1 Sans distinction H/P et f/g

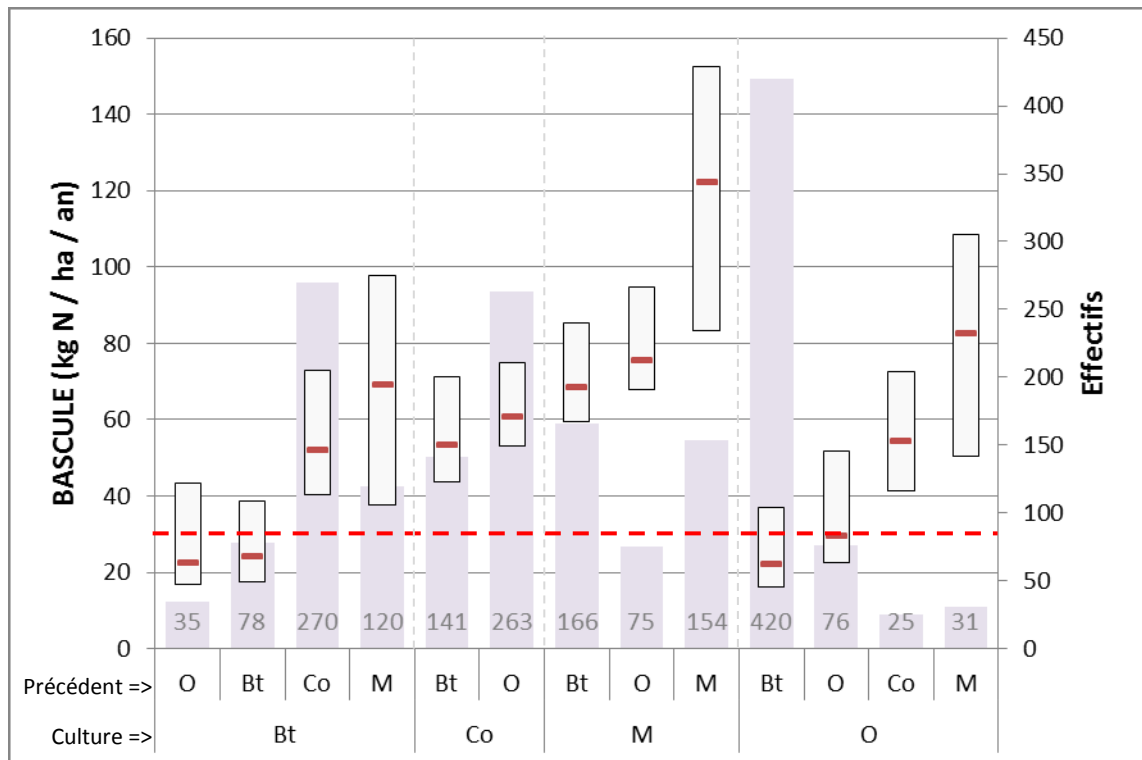


Figure 34 - Valeurs inférieures, centrales et supérieures de l'indicateur BASCULE et nombre de parcelles concernées pour chaque ensemble "culture en place – précédent cultural"

La première conclusion qui ressort de la lecture de ce graphe est que la nature du précédent cultural peut impacter la valeur de l'indicateur BASCULE pour une même culture en place. L'illustration la plus marquée de ce phénomène concerne la culture en place de l'orge, avec les précédents culturaux de blé tendre ou de maïs. Ce constat vient appuyer l'intérêt de calculer une balance azotée à l'échelle d'une succession de cultures, et non pas simplement sur une seule année.

De même que pour le cas précédent, les valeurs de BASCULE montrent d'importantes disparités au sein d'un même groupe "culture-précédent". Par ailleurs, comme observé au niveau des distributions des balances azotées, les précédents "maïs" présentent les niveaux de variabilité les plus importants. A l'inverse, les précédents "blé tendre" décrivent des ensembles de valeurs assez peu dispersés.

On remarque de plus qu'en dehors des successions associant du blé tendre et de l'orge (qui restent en partie à des niveaux de BASCULE en-deçà du seuil de 30 kgN/ha/an), la majorité des valeurs obtenues est supérieure à cette limite, ce qui traduit une pression azotée importante pour une grande partie des successions de cultures majoritaires sur la zone étudiée.

3.4.2.2 Avec distinction H/P et f/g

La **figure 35** présente les résultats de BASCULE en tenant compte des distinctions H/P et f/g des cultures en place et des précédents culturaux.

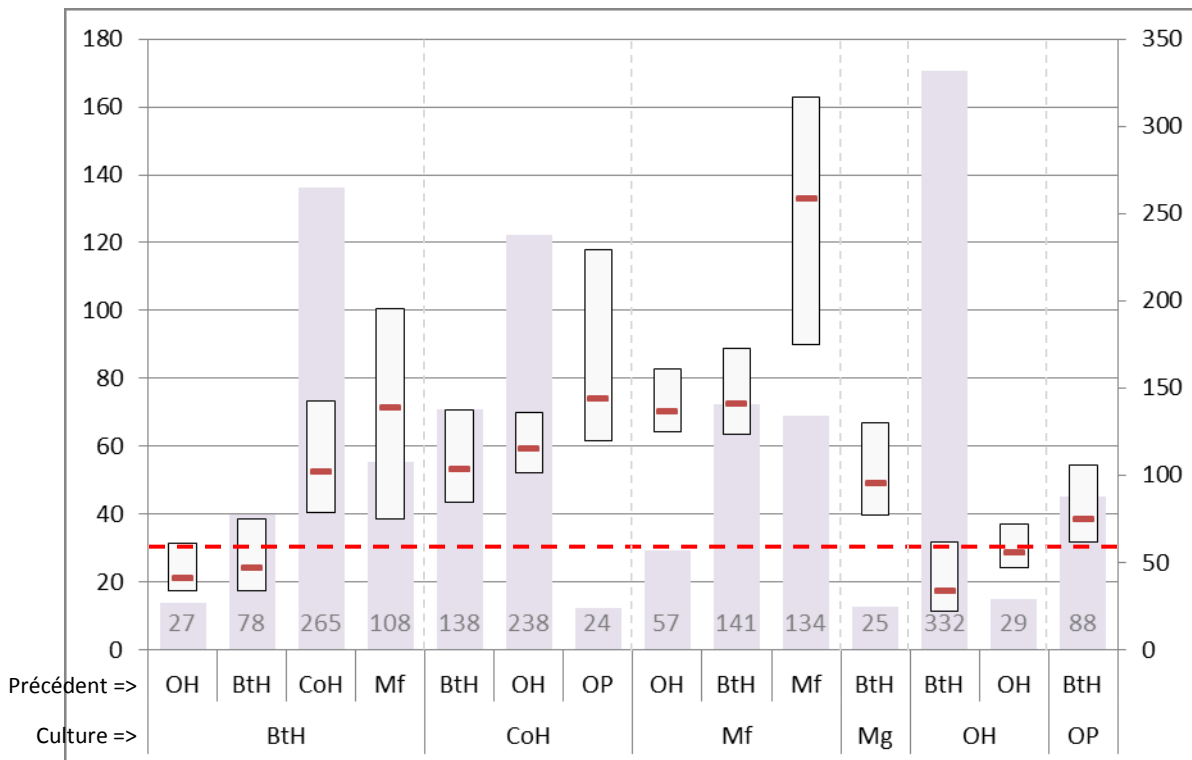


Figure 35 - Valeurs inférieures, centrales et supérieures de l'indicateur BASCULE et nombre de parcelles concernées pour chaque ensemble "culture en place – précédent cultural", avec distinctions H/P et f/g

Les plages de valeurs sont semblables à la représentation ne tenant pas compte des distinctions H/P et f/g pour les espèces dont une seule modalité a pu être retenue (effectifs suffisants à partir de 20). Notamment, la culture en place de blé et ses précédents culturaux restent globalement inchangés. En revanche, l'orge et le maïs décrivent parfois des résultats de BASCULE pouvant être détaillés selon les différentes modalités des distinctions H/P et f/g. Par exemple, la culture en place de colza ne se voit pas attribuer les mêmes plages de valeurs de BASCULE selon que son précédent cultural est une orge d'hiver ou une orge de printemps. De

même, pour un même précédent cultural de blé tendre d'hiver, les cultures en place d'orge d'hiver et d'orge de printemps montrent des résultats de BASCULE notablement distincts.

Par ailleurs, si les distinctions H/P et f/g apportent des précisions dans la nature des résultats obtenus, elles impliquent également une perte d'informations, du fait que les ensembles "culture en place – précédent cultural" sont plus nombreux et ne sont pas forcément constitués chacun d'effectifs supérieurs à 20. Pour reprendre comme illustration l'exemple des plages de BASCULE pour la culture en place d'orge, on n'a à disposition que les résultats correspondant aux précédents culturaux du blé tendre d'hiver et de l'orge d'hiver dans le cas de la prise en compte de la distinction H/P et f/g, alors qu'en se limitant à l'espèce végétale implantée, les précédents culturaux de colza et de maïs sont également renseignés.

La prise en compte de la distinction H/P et f/g permet donc de comprendre avec plus de finesse les contributions des différentes cultures aux valeurs de BASCULE obtenues. Cependant, elle implique également un niveau de découpage de l'échantillon d'étude plus important ce qui induit une certaine perte d'information. Par conséquent, ces deux approches fournissent des résultats qui n'ont pas vocation à être comparés entre eux, mais qui apportent des clés d'interprétation complémentaires.

3.5 Cartographie des pressions azotées appliquées aux différents clusters

La *figure 36* présentent les résultats de BASCULE obtenus sur les terres assolées et labourées du périmètre étudié (et non pas sur l'ensemble des surfaces). Il est donc possible de constater de fortes pressions sur des terres labourées localisées dans des zones pour lesquelles la quantité de nitrates dans l'eau n'est pas problématique. Par conséquent, pour une exploitation plus aisée de ces supports cartographiques, des calculs de BASCULE sur l'ensemble des surfaces prises en compte sont ainsi proposés : une BASCULE théorique est appliquée aux surfaces prairiales et forestières ; de ce fait, on obtient un indicateur de la pression azotée par cluster prenant en compte l'effet "tampon" des forêts et prairies ; les pourcentages des couvertures du sol pour lesquelles aucune valeur standard de BASCULE n'a pu être affiliée (notamment les zones urbaines) sont indiqués pour précision.

Pour ces calculs de pression par bassin, les valeurs suivantes ont été adoptées :

- 15 kgN/ha/an en moyenne pour les prairies (Benoît et al., 1995 ; Benoît et Simon, 2004 ; Vertés et al., 2010),
- 2 kgN/ha/an en moyenne pour les forêts (Fiquepron et al., 2010).

Les calculs menés ont aboutis aux cartes présentées en *figures 37 à 39*.

Une vigilance particulièrement importante est à adopter concernant les résultats de ces calculs complémentaires. Néanmoins, on constate que, tel que calculé ici, l'effet tampon des prairies et forêts a des conséquences non négligeables (voir *ANNEXE 5*, sans prise en compte de ces autres surfaces). Ainsi, les surfaces du cluster 1, dont les terres labourées présentent des pressions azotées alarmantes, montrent les niveaux de BASCULE les plus satisfaisants lorsque l'indicateur intègre les contributions des prairies et des forêts ; inversement, les pratiques agricoles permettant la meilleure gestion de l'azote sur terres labourées sont identifiées dans le cluster 6, alors que la plus faible présence de prairies et surtout de forêts y génère un effet tampon plus modéré.

Les valeurs ainsi obtenues s'avèrent par ailleurs rassurantes vis-à-vis des pressions azotées globales par cluster, où nous sommes globalement sous la barre des 30 kgN/ha/an.

Mais, il est important de souligner, en revenant aux graphiques précédents, que les pressions azotées sur terres labourées sont critiques et nécessitent des actions d'optimisation des flux d'azote.

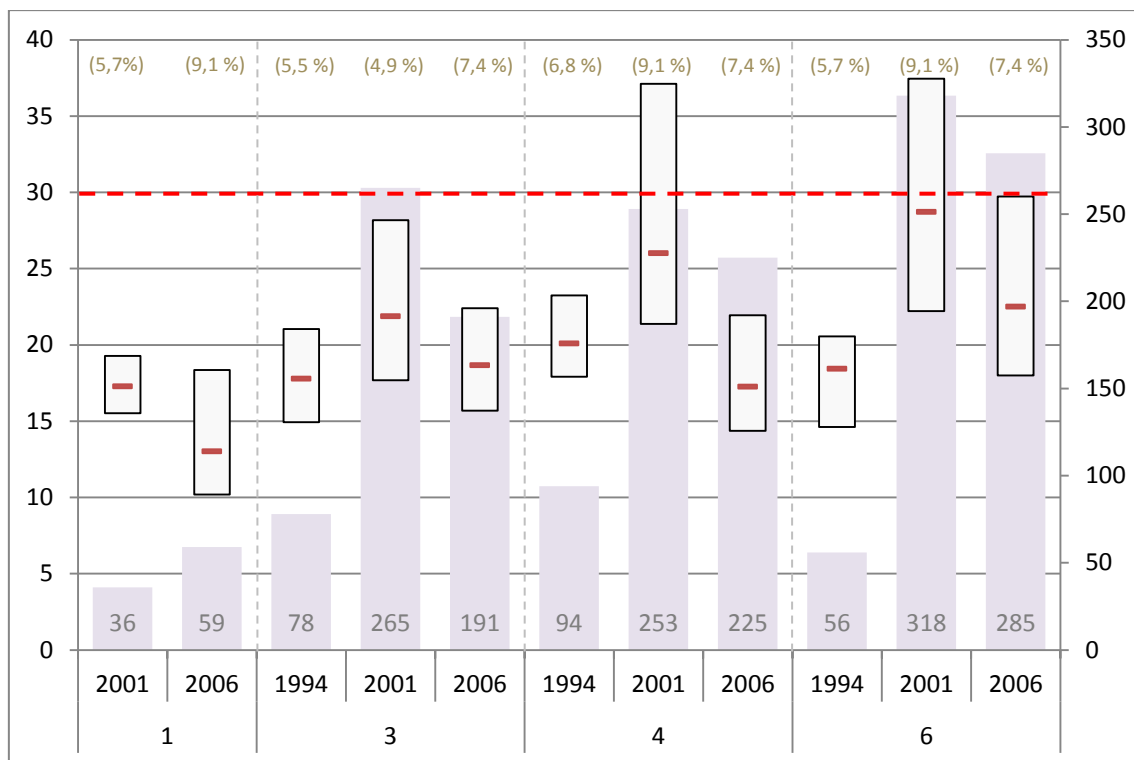


Figure 36 - Valeurs inférieures, centrales et supérieures de l'indicateur BASCULE pour l'ensemble des surfaces étudiées (pourcentages de surfaces non prises en compte dans les calculs complémentaires - urbaines et autres) et nombre de parcelles concernées pour chaque ensemble "cluster – année PK"

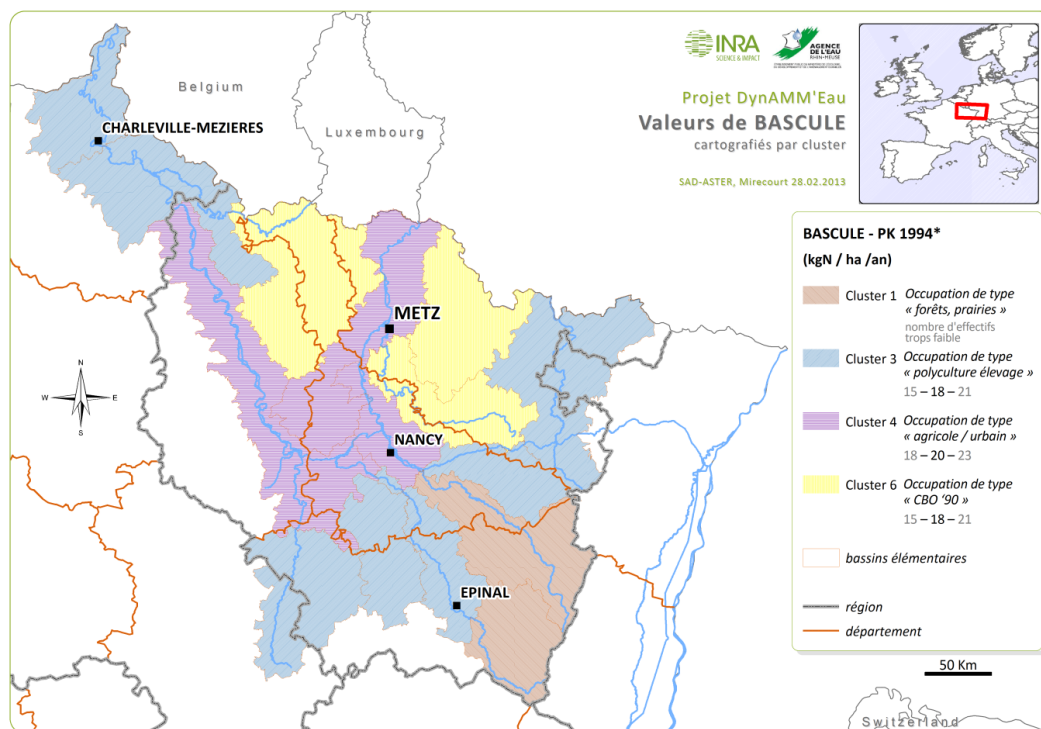


Figure 37 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur l'ensemble des surfaces des différents clusters pour l'année d'enquête PK 1994*

* Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)

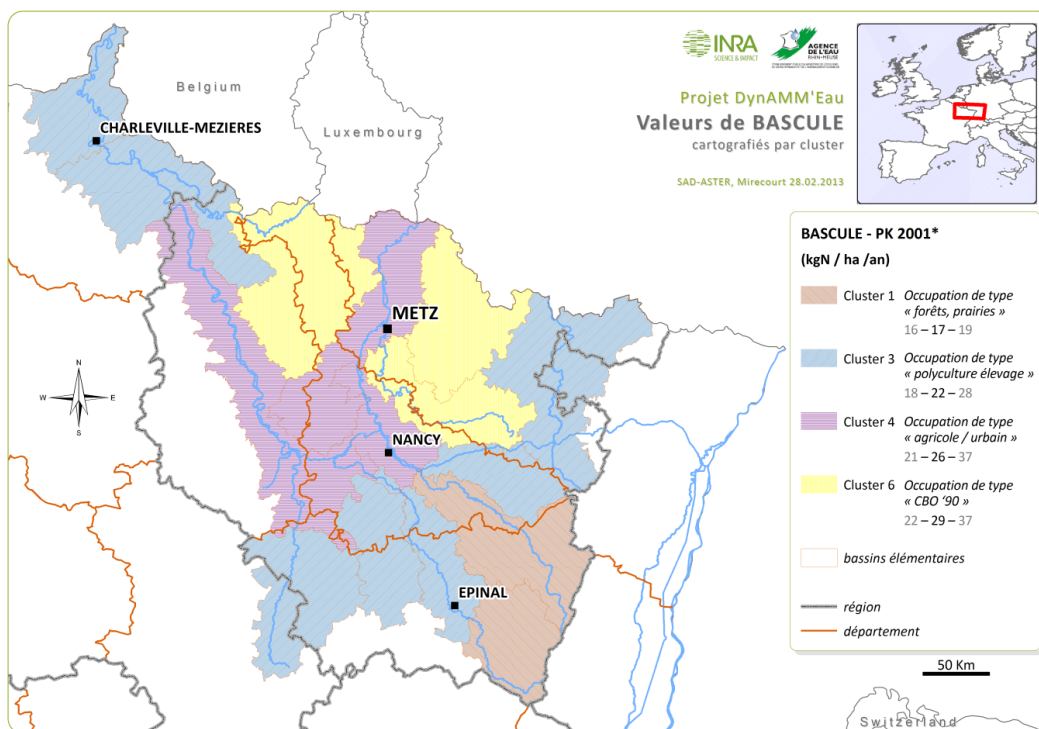


Figure 38 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur l'ensemble des surfaces des différents clusters pour l'année d'enquête PK 2001*

* Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)

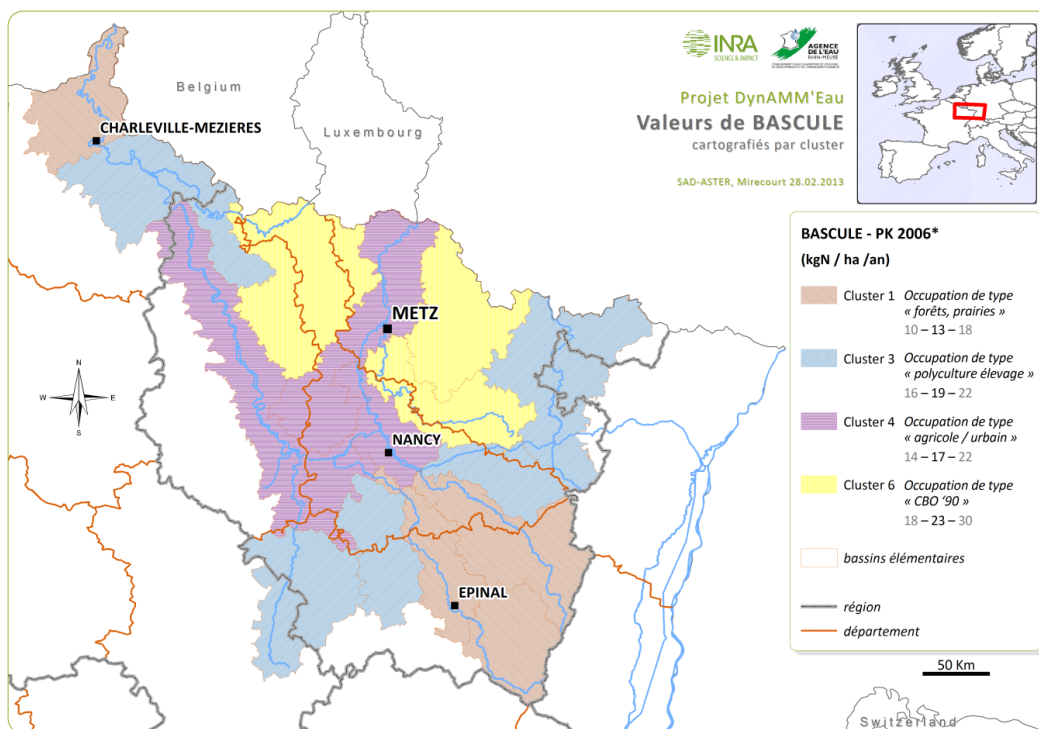


Figure 39 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur l'ensemble des surfaces des différents clusters pour l'année d'enquête PK 2006*

* Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)

4 Discussions

4.1 Effet de la prise en compte des repousses de précédents culturels et/ou de l'implantation d'une CIPAN

Les trois questionnaires PK recensent les parcelles sur lesquelles une Culture Intermédiaire Piège A Nitrates a été implantée entre le précédent cultural et la culture en place. De plus, ils détaillent si l'agriculteur a laissé le précédent cultural repousser après la récolte. Les données des enquêtes PK fournissent donc des informations qualitatives quant à l'existence ou non de ces deux paramètres impactant négativement les pertes azotées. Il a donc été décidé d'en tenir compte a posteriori de manière à évaluer la portée de ces mesures sur la maîtrise des flux d'azote. Toutefois, les niveaux de prélèvement d'azote dans le sol par les CIPAN et les repousses de précédents sont fonction de la durée et de la qualité de la croissance, de la densité du couvert, ou encore du mode de destruction employé (simple broyage, broyage et enfouissement, ...). Ne disposant pas de ces informations, une valeur standard a été fixée : selon la bibliographie, des CIPAN ou des repousses de précédents culturels menées dans des conditions climatiques et techniques favorables absorbent environ 30 kgN/ha. Nous retenons donc cette hypothèse optimiste et l'appliquons lorsqu'au moins une des deux conditions (implantation d'une CIPAN ou repousse du précédent cultural) est vérifiée.

Les variations des valeurs de BASCULE induites par la prise en compte de la modalité "CIPAN ou repousse de précédent" sont représentés pour différents cas dans les *figures 40 à 42*.

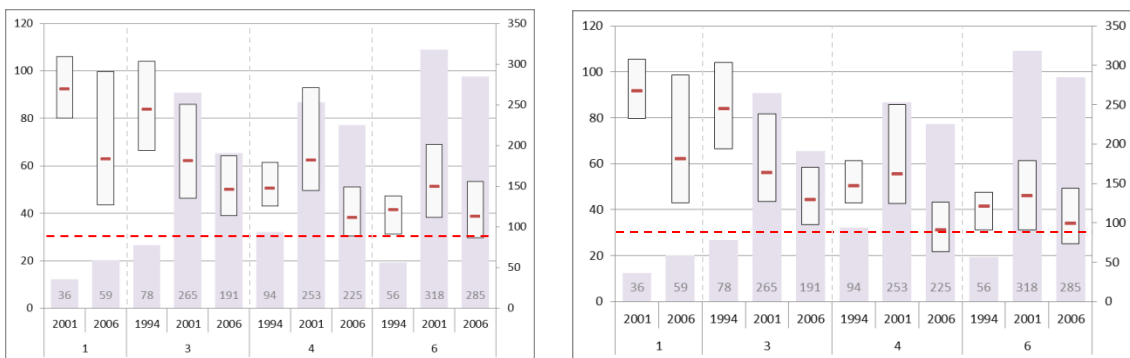


Figure 40 - Plages de valeurs de BASCULE et effectifs des différents ensembles "cluster-année PK", sans (à gauche) ou avec (à droite) prise en compte des implantations de CIPAN ou des repousses de précédents

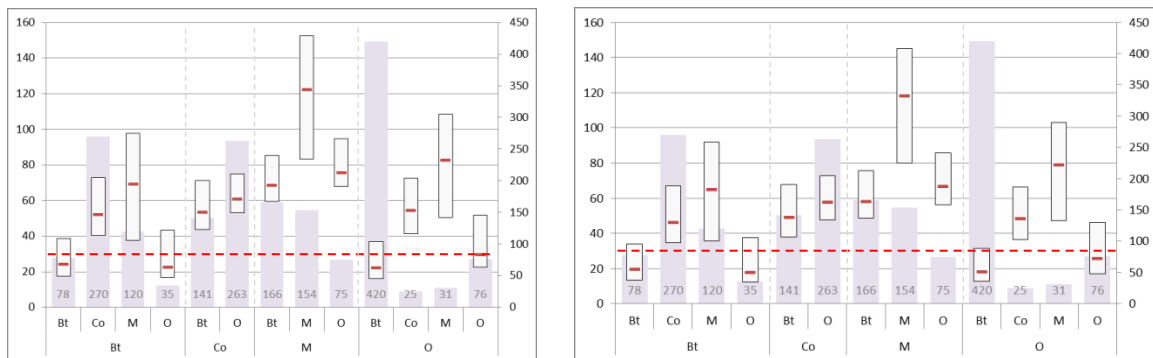


Figure 41 - Plages de valeurs de BASCULE et effectifs des différents ensembles "culture en place – précédent cultural" sans distinction H/P et f/g, sans (à gauche) ou avec (à droite) prise en compte des implantations de CIPAN ou des repousses de précédents

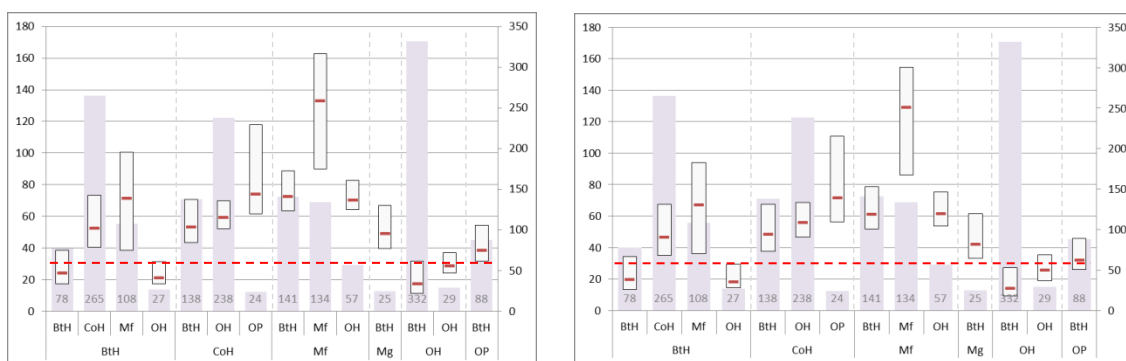


Figure 42 - Plages de valeurs de BASCULE et effectifs des différents ensembles "culture en place – précédent cultural " avec distinction H/P et f/g, sans (à gauche) ou avec (à droite) prise en compte des implantations de CIPAN ou des repousses de précédents

Des effets de la modalité "CIPAN ou repousse de précédent" sur les valeurs des BASCULE sont observés pour presque tous les ensembles représentés. Seuls les ensembles "cluster – année PK" liés à PK 1994 semblent très peu impactés. Pour cause, les faibles effectifs de ces groupes ne comprennent que quelques rares parcelles présentant la modalité "CIPAN ou repousse de précédent".

Pour les autres ensembles, les variations sont d'ampleurs inégales, mais la diminution des excédents d'azote générée reste très majoritairement inférieure à 10 kgN/ha/an.

4.2 Possibilités d'actualisation des teneurs en azote

Les valeurs servant de base aux calculs des BASCULE sont issues de diverses sources de données. Dans la formule « entrées – sorties = fertilisation (minérale + organique) – rendements × teneur en N des produits exportés », les grandeurs n'ayant pas été fournies par les enquêtes PK ont été fixées selon des valeurs standards. C'est le cas de la composition de certains engrais organiques, ainsi que de celle des matières végétales exportées lors de la récolte. Le fait est que les valeurs utilisées dans ces deux cas sont issues des tables proposées par le CORPEN en 1988 (CORPEN, 1988). Ces valeurs restent ainsi inchangées entre les enquêtes PK de 1994 et de 2006. Une recherche bibliographique succincte a donc été réalisée afin d'actualiser les teneurs prises en compte dans les calculs.

Les valeurs collectées sont détaillées en ANNEXE 3. Autant pour les teneurs en azote des fertilisants organiques que pour celles des produits exportés, les valeurs identifiées ne remettent pas en cause la base de données initiale du CORPEN.

4.3 Réalisation des extrapolations des balances azotées des cultures en place aux précédents culturaux en utilisant les moyennes et les intervalles de confiance

Le manque d'informations quant aux pratiques culturales sur les précédents culturaux a impliqué la nécessité d'une extrapolation. Comme expliqué plus tôt, les très importantes variabilités des balances azotées par recours aux moyennes et aux écarts-types ont conduit privilégier une description des résultats selon les médianes et les 1^{ers} et 3^{es} quartiles. Cependant, les médianes et quartiles sont des grandeurs situant les données entre elles selon leur rang et non pas selon leur valeur. Par conséquent, elles ne permettent par la suite aucune exploitation mathématique ou statistique. Pour ne pas s'arrêter à ce constat quelque peu frustrant, les mêmes étapes de calcul de la BASCULE ont été menées en prenant cette fois en compte la moyenne et la variance (sous la forme d'intervalles de confiance). Les figures 43 à 45 correspondent aux résultats de BASCULE pour trois niveaux d'incertitude : 50% (en partant du principe qu'avec les médianes et

quartiles, la moitié de l'information était écartée), 20% (niveau d'incertitude intermédiaire) et 5% (niveau d'incertitude fréquemment utilisé en analyse statistique).

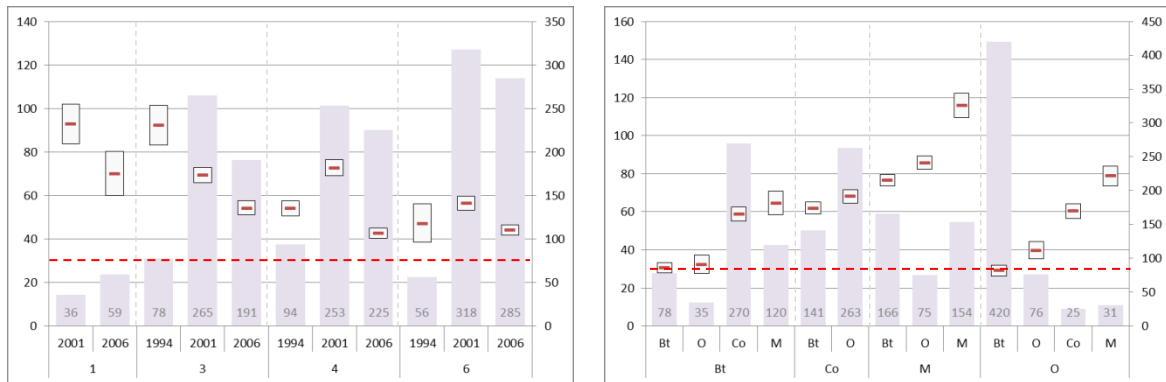


Figure 43 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 50% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" sans distinction H/P et f/g (à droite)

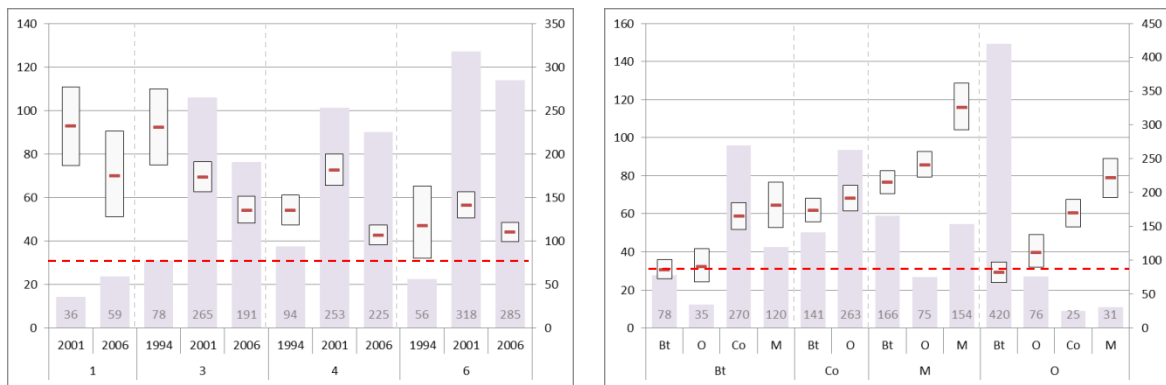


Figure 44 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 20% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" sans distinction H/P et f/g (à droite)

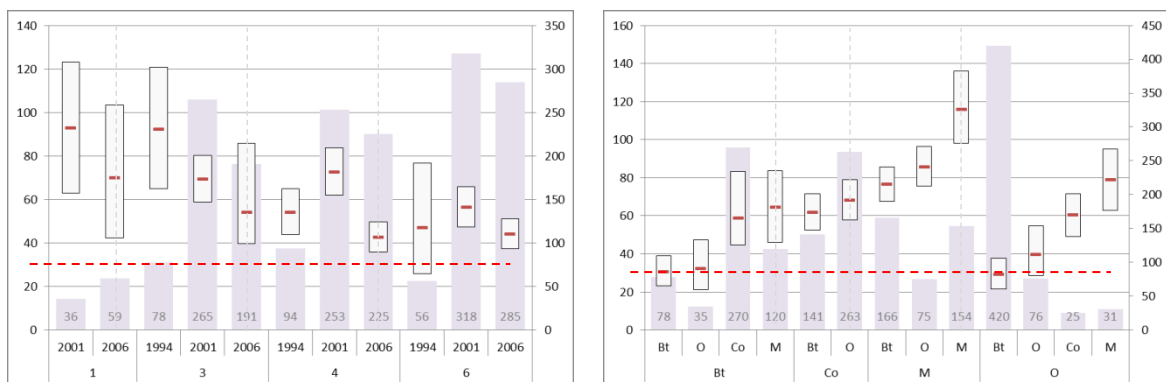


Figure 45 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 5% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" sans distinction H/P et f/g (à droite)

Logiquement, les gammes de valeurs des BASCULE augmentent lorsque l'incertitude diminue : autrement dit, plus les plages de BASCULE sont réduites, plus on a de risques de se tromper vis-à-vis des valeurs que pourront éventuellement prendre les BASCULE.

Après une rapide comparaison avec les graphes similaires obtenus par recours des médianes et quartiles pour l'étape d'extrapolation, il apparaît que les plages de valeurs décrites par les BASCULE issues des médianes et quartiles ont des étendues proches de celles issues des moyennes et intervalles de confiance à 5% (et dans certains cas, plutôt avec intervalles de confiance à 20%).

Quoi qu'il en soit, la consolidation des calculs et l'exploitation des résultats n'ont pu être approfondis du fait que l'étude arrivait à son terme. Néanmoins, cet *a parte* révèle la possibilité de réaliser l'étape d'extrapolation en se basant sur les valeurs de moyennes et de variances, et ce sans compromettre l'exploitabilité des résultats.

Les graphes correspondant aux mêmes modes de calcul des BASCULE, à partir des moyennes et des trois niveaux d'incertitude, mais en détaillant la nature H/P et f/g des cultures, figurent en **ANNEXE 3**.

4.4 Calculs des BASCULE pour l'ensemble des surfaces des clusters : limites et voies d'amélioration

Comme détaillé au **PARAGRAPHE 3.5**, des valeurs standard de bilans azotés ont été attribuées aux surfaces identifiées en prairies et en forêts afin d'estimer la pression azotée spatialisée de l'ensemble des différents clusters.

Cette approche est avant tout exploratoire et présente l'avantage de fournir un aperçu de la pression azotée sur les ressources en eau en adoptant une approche ne se limitant pas aux seules terres labourées. L'influence d'autres occupations des sols peut ainsi être approximée. Toutefois, cette étape complémentaire présente deux limites :

- A notre connaissance, aucune référence bibliographique n'a permis d'attribuer aux sols de types urbains de valeur standard ;
- Les valeurs tirées de la bibliographie pour les surfaces en prairies et forêts sont fixées arbitrairement et peuvent être déconnectées des pratiques et contextes locaux.

Ces nouvelles hypothèses réduisent donc la fiabilité des résultats obtenus, bien que ceux-ci, rappelons-le, ne puissent être considérés autrement que comme des indicateurs de tendances. Pour pallier à ce problème, des approfondissements bibliographiques et/ou études *in situ* s'imposent quant aux relargages azotés des zones urbaines, et de manière similaire aux terres labourées, l'analyse des pratiques culturales peut être envisagée sur le territoire défini par les bassins de la Meuse et de la Moselle, en particulier en ce qui concerne les prairies.

5 Conclusion

5.1 Retour sur les résultats

5.1.1 Des pratiques agricoles très homogènes sur les bassins versants de la Meuse et de la Moselle

Les pratiques agricoles sont très semblables entre les divers bassins versants de la Meuse et de la Moselle. Les successions majoritaires évoluent à partir d'un même module, et tendent à rendre dominantes les successions sur trois années bâties autour du colza, du blé d'hiver et de l'orge d'hiver. Cependant la proportion des successions varient selon les bassins, avec une part encore importante de successions construites autour du maïs ensilage en Moselle amont, et une part encore plus dominante du triplet colza-blé-orge, en bassin de Seille et dans le bassin ferrifère.

5.1.2 Une situation très préoccupante au vu des valeurs de BASCULE, souvent au-delà de 30 kgN/ha

Quand nous prenons en considération les BASCULE sur la période 1994 à 2007, une première tendance se dégage : une diminution de la proportion des balances azotées élevées (supérieures à 30 kg N /ha) dans l'ensemble des balances azotées.

Un deuxième résultat concerne le contraste entre cultures :

- Le maïs voit sa balance très déséquilibrée : trois quart des parcelles ont une balance supérieure à 30 kg N/ha, et la classe la plus représentée est celle des 150 à 180 kg N/ha. Pour contrebalancer ce constat, les surfaces en maïs ont cessé de croître depuis 1992.
- Le colza a également une balance déséquilibrée : 80 % des parcelles ont une balance supérieure à 30 kg N/ha, et la classe la plus représentée est celle des 60 à 90 kg N/ha. Contrairement au maïs, les surfaces de colza ont crû considérablement entre 1981 et 2010, passant de 2% à 5% de la surface des bassins, soit plus du double des surfaces en maïs en 2010.
- Le blé d'hiver et l'orge d'hiver ont des profils semblables : plus de la moitié des balances sont inférieures à 30 kg N/ha, le blé ayant les balances les plus modestes avec la classe la plus représentée entre - 30 et 0 kg N/ha, alors que pour l'orge il s'agit de la classe 0 à 30 kg N/ha. Les évolutions de surfaces sont favorables car les surfaces en blé croissent de 5 à 10 et celles en orge passent de 7 à 5 %.

5.1.3 Des résultats à considérer avec vigilance, au regard de la simplicité des calculs et de la fragilité de la base de données initiale (mode d'échantillonnage TU et PK, effectifs disponibles).

Ce premier travail région sur la pression azotée demande d'être lu avec précaution. Nous disposons, certes d'une enquête de qualité (enquête pratiques culturelles du SCEES puis du SSP) mais dont la base statistique est numériquement faible : 1842 parcelles sont disponibles sur les trois enquêtes de 1994, 2001 et 2006. Ces enquêtes restent une base importante à consolider pour trois raisons : (i) elle est aléatoire, sur base d'un tirage au sort de points de l'enquête TerUti, et ne contient donc pas de biais lié à une population particulière d'exploitants agricoles, (ii) elle est répartie sur le territoire lorrain (sur l'échantillonnage aléatoire TerUti) et ne comporte donc pas de biais géographique, (iii) elle est riche en items enquêtés par parcelle ce qui fiabilise les informations recueillies. Une vigilance particulière est à envisager pour le calcul des pressions azotées sur l'ensemble des bassins. Ainsi, ce travail fin réalisé sur les cultures doit être surfaciement pondéré par les surfaces en prairies et en forêts. Pour ces calculs de pression par bassin, nous avons adopté les valeurs suivantes :

- Balance de 15 kgN/ha en moyenne pour les prairies (Benoît et al., 1995 ; Benoît et Simon, 2004 ; Vertés et al., 2010),
- Balance de 2 kgN/ha (Fiquepron, 2010).

5.2 Pour aller un peu plus loin ...

5.2.1 Extrapolations temporelles et spatiales

Pour permettre une extension au bassin du Rhin, il nous faudra mettre en œuvre cette méthode sur les bassins rhénans. D'autre part, l'ensemble des paramètres de la balance par bassin se modifient au cours du temps : assolement, balances unitaires. Ainsi, une remise à jour périodique, de l'ordre de toutes les cinq années s'avère indispensable.

5.2.2 Collaboration avec la CRAL pour application de la BASCULE aux opérations Agri-Mieux

Il serait intéressant de tester et comparer les résultats présentés ici avec ceux des territoires agricoles couverts par les opérations Agri-Mieux, en collaboration avec les chambres d'agriculture.

5.2.3 Amélioration de la précision et de la quantité des données : vers un partenariat avec des détenteurs d'informations sur les pratiques agricoles

D'autres sources d'informations seraient à tester sur le mode de calcul et de spatialisation que nous avons mis au point. Il serait intéressant de tester l'usage des (i) données disponibles auprès des adhérents de coopératives et négoce, (ii) informations issues de modes d'enregistrement informatique en exploitations (de type « Mes parcelles »), (iii) des carnets de plaine conservés chez les agriculteurs.

5.2.4 Application de la démarche aux prairies

Les enquêtes pratiques culturales étant partiellement disponibles sur prairies, elles peuvent être mobilisées pour valider les pressions azotées des couverts prairiaux.

5.2.5 Application de la démarche aux pesticides

Les enquêtes « PK » contenant les informations sur les usages de pesticides, elles peuvent être utilisées pour calculer divers indicateurs de pressions pesticides. Ce travail pourra être mené avec intérêt suite au calage des indicateurs en cours de finalisation dans Ecophyto R&D.

6 Bibliographie

Benoît M (1992) Un indicateur des risques de pollution azotée nommé "B.A.S.CUL.E", *Fourrages*.

Benoît M, Saintôt D, Gaury F (1995) Mesures en parcelles d'agriculteurs des pertes en nitrates. Variabilité sous divers systèmes de culture et modélisation de la qualité de l'eau d'un bassin d'alimentation. *C.R. Acad. Agric.*, 81(4): 175-188.

Benoît M, Simon JC (2004) Grassland and water resources : recent findings and challenges in Europe. *IN : Lüscher A., Jeangros B., Kessler W., Huguenin O., Lobsiger M., Millar N., Suter D. Land use systems in grassland dominated regions, Grassland Science in Europe, vol.9 ; 20. General meeting of the European Grassland Federation, Luzern (CHE) ; 2004/06/21-24 : 117-128.*

CORPEN (1988) Bilan annuel à l'exploitation.

Debolini M, Marraccini E, Rizzo D, Galli M, Bonari E (2013) Mapping local spatial knowledge in the assessment of agricultural systems: a case study on the provision of agricultural services. *Applied Geography* (en cours de publication).

EEA (1999) (European Environmental Agency) Environmental indicators: typology and overview. Technical report N°25.

Fiquepron et al. (2010) Des forêts pour protéger les ressources en eau. CNPF, 24 pages.

Husson F, Josse J, Le S, Mazet J (2012) FactoMineR. CRAN

OCDE (1993a) Indicators for the Integration of Environmental Concerns into Energy Policies. (*Indicateurs de l'intégration de considérations environnementales dans les politiques en matière d'énergie*) OECD Environment Monographs No.79. (Monographies OCDE sur l'environnement)

OCDE (1993b) Jeu de base d'indicateurs de l'OCDE pour l'étude de performance environnementale. OECD Environment Monographs No. (*Monographies OCDE sur l'environnement*) 83. OCDE Paris.

OCDE (1997) Environmental Performance Reviews - A Practical Introduction" OCDE/GD(97)35 Paris 1997. (*Études de l'OCDE sur les performances environnementales - Introduction pratique*) Des copies de ce document ainsi que d'autres matériaux de support sont disponibles auprès du : Responsable du service Publications, OCDE, 2, rue André-Pascal 75775 Paris cedex 16, France.

OCDE (1999a) Working Group on the State of the Environment. indicators for the Integration of Environmental Concerns into Transport Policies. (Groupe de travail sur l'état de l'environnement - Indicateurs de l'intégration de considérations environnementales dans les politiques en matière de transport)

OCDE (1999b) Working Group on the State of the Environment. Towards more Sustainable Household Consumption Patterns: Indicators to measure progress. (*Groupe de travail sur l'état de l'environnement : Vers des comportements durables de consommation des foyers : indicateurs de mesure de l'évolution*).

OCDE (1999c) Working Party on Pollution Prevention and Control. Advanced Air Quality Indicators and Reporting. Methodological Study and Assessment. (*Groupe de travail sur la prévention et le contrôle de la pollution - Indicateurs et reporting avancés sur la qualité de l'air - Étude méthodologique et évaluation*) ENV/EPOC/PPC(99)9.

Schott C, Mignolet C, Benoit M (2009) Agriculture du bassin de la Seine : Découvrir l'agriculture du bassin de la Seine pour comprendre les enjeux de la gestion de l'eau. Nanterre (FRA) : Agence de l'Eau Seine-Normandie ; 2009. 79 p. Programme Piren - Seine, (5).

Vertés F, Benoît M, Dorioz M (2010) Couverts herbacés pérennes et enjeux environnementaux(en particulier eutrophisation) : atouts et limites. *Fourrages*, 202 : 83-94.

Annexes

Annexe 1 : Fiche « Un indicateur des risques de pollution azotée nommé BASCULE »

Journée Agronomique
Alsace-Lorraine,
Sarrebouurg, le 19 Mars 1992

Rédacteur : **Marc BENOIT**
INRA Station S. A.D
88500 MIRECOURT

MAITRISER LA FERTILISATION AZOTEE POUR REDUIRE LES CHARGES ET RESPECTER L'ENVIRONNEMENT

5 La balance d'azote parcellaire

UN INDICATEUR DES RISQUES DE POLLUTION AZOTEE NOMME "BASCULE"
(Balance Azotée Spatialisée des Systèmes de Culture de l'Exploitation)

L'activité agricole a des effets sur la qualité des eaux souterraines. Le pilotage des pratiques agricoles est géré par les agriculteurs d'où l'intérêt de leur donner les moyens de connaître les risques qu'ils font courir à la ressource en eau. L'indicateur proposé ne nécessite qu'une bonne connaissance des pratiques mises en oeuvre sur le territoire de l'exploitation. Le calcul de la balance "entrées d'azote - sorties d'azote" par parcelle et par an permet d'établir une balance pondérée par système de culture en tenant compte de sa surface. Le cumul des balances positives par exploitation est une évaluation de son agressivité. Le même type de cumul réalisé sur les parcelles d'un bassin d'alimentation d'une ressource en eau nous fournit les risques que subit cet espace.

I - PRINCIPES DE CALCUL

1) INTERET D'UN INDICATEUR POUR AGIR

Le problème actuel central est de permettre aux pilotes des pratiques agricoles, les agriculteurs, d'évaluer l'impact de leurs pratiques sur les pertes en nitrates vers les eaux souterraines.

Il s'agit donc, dans un but d'efficacité, de livrer une méthode utilisable par tout agriculteur connaissant les pratiques agricoles qu'il met en oeuvre dans le territoire de son exploitation. Nous partons; en conséquent, du principe de la construction d'un indicateur utilisant ces informations sans utiliser de mesures in-situ complémentaires.

2) LES HYPOTHESES DE CALCUL

Si cette balance s'avère positive, cela indiquera que le système de culture " s'enrichit" en azote. Ce gain peut se traduire en deux façons : soit il est perdu vers les ressources en eau (ou en air par volatilisation) mais dans tous les cas il y a agression, soit il est conservé dans le sol et augmente le stock des matières minéralisables en créant un risque supplémentaire lors d'une période climatique favorable à la minéralisation de ce stock. Dans tous les cas, une balance positive se traduit par un risque accru à terme non connu d'agression des ressources en eau. Si cette balance s'avère négative, cela indiquera une diminution du risque que ce système de culture fait courir au milieu.

La dimension spatiale de cet indicateur doit permettre de raisonner : des diversités intra-exploitation dans la conduite et l'agressivité des peuplements végétaux au sein du territoire de chaque exploitation, et, de la combinaison de ces conduites et agressivités de portions d'exploitations qui forment un bassin d'alimentation.

COLLABORATION : Association pour la Relance Agronomique en Alsace

II – LES ETAPES DU CALCUL

La proposition de calcul de la BASCULE s'articule autour de 8 étapes :

1) Relevé des pratiques agricoles dans toutes les parcelles de l'exploitation, en précisant au mieux : les apports d'engrais minéraux et organiques (fumiers, lisiers, purins, composts), et les récoltes (paille, grains, plantes entières, tubercules, racines) que ces produits "sortis" de la parcelle le soient par moyens mécaniques ou pâturage.

2) Calcul par an, de la balance par parcelle (apports-récoltes) en multipliant chacune des quantités physique par sa concentration en azote donnée par les tables.

3) Réalisation de la valeur moyenne sur quelques années de ces valeurs annuelles de balance parcellaire. Ceci pour tenir compte des successions culturales mises en oeuvre (exemple : apport important de fumier avant un maïs suivi d'un blé et d'une orge).

Cette moyenne, calculée après la connaissance des valeurs annuelles, permet de détecter les parcelles dont la balance reste positive à moyen terme. Ces parcelles seront les premières à bénéficier d'une réflexion de la part de l'agriculteur.

4) Cartographie des parcelles de l'exploitation. Pour établir cette carte du territoire de l'exploitation, si elle n'existe déjà, nous proposons de travailler sur fond de photographies aériennes IGN, agrandies au 1/10000ème.

5) Cartographie du bassin d'alimentation de la ressource en eau concernée par le projet de protection agronomique.

6) A partir des étapes 4 et 5, spatialisation des systèmes de culture dont les parcelles de mise en oeuvre sont situées sur le bassin d'alimentation.

7) Calcul de la balance azotée spatialisée (BASCULE) de l'ensemble des parcelles situées sur le bassin d'alimentation : addition des balances positives des parcelles repérées lors de l'étape 6. Nous ne prenons en compte que les parcelles à balance positive car, même en retenant l'hypothèse optimiste que les parcelles à balance négative produisent de l'eau de bonne qualité, elle ne produisent malheureusement pas "d'anti-nitrates". Dans la construction d'un indicateur d'agressivité des systèmes de culture, nous ne pouvons pas soustraire les balances négatives.

Nous proposons dans une première approximation de ne pas en tenir compte dans le calcul de la balance, même si nous sommes conscient de minorer ainsi leur agressivité car de telles conduites aboutissent toujours à des pertes en nitrates, souvent faibles il est vrai.

8) Si nous désirons calculer une balance globale au niveau de l'exploitation, nous procédons de même en additionnant les balances azotées positives de l'ensemble des parcelles de l'exploitation et en négligeant l'effet des parcelles dont les balances azotées sont négatives.

III – EXEMPLE DE CALCUL DANS UNE EXPLOITATION LORRAINE

Le plan parcellaire du graphique n°1 indique : la localisation des parcelles et leur position par rapport au périmètre d'alimentation de la ressource en eau en jeu. Sur le plan ont été figuré les types de systèmes de culture de cette exploitation.



Plan parcellaire de l'exploitation servant d'exemple. Localisation des systèmes de culture :

- | | |
|-------------------------------------|---|
| A : colza + fumier/blé/orge d'hiver | E : parcs à vaches laitières (surface de base) |
| B : luzerne (3 ans)/blé/orge | F : foin + regain = pâturage vaches (surface additionnelle) |
| C : maïs (3 ans)/+ fumier/blé/orge | G : foin + regain |
| C' : maïs + fumier/blé/orge | H : parcs à génisses (surface de base) |
| D : trèfle violet (2 ans)/blé/orge | I : ensilage + regain + pâturage génisses (surface additionnelle) |

Le graphique n°2 représente les balances azotées par hectare pour chacun des systèmes de culture. Le calcul a porté sur une moyenne des balances sur trois ans pour chaque succession.

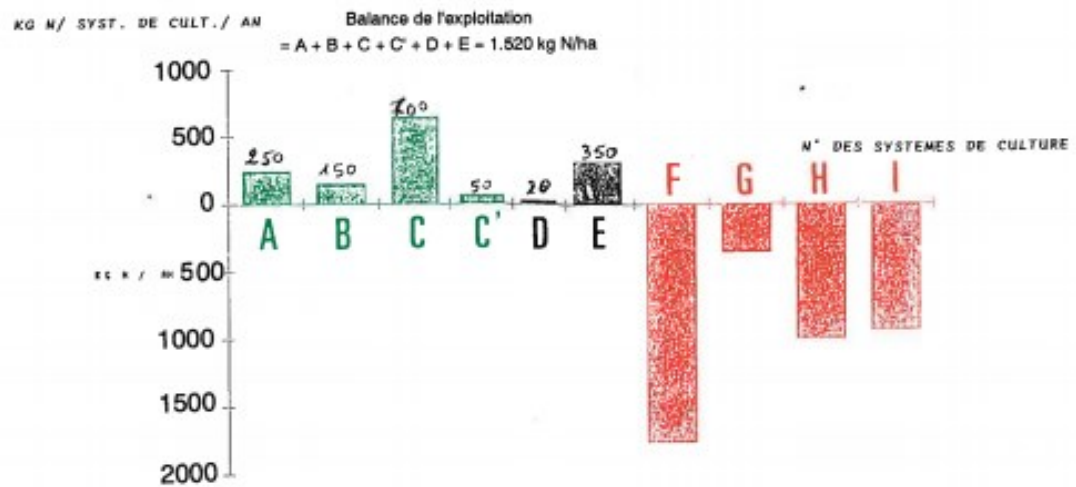


Balance azotée à l'unité de surface des systèmes de culture de l'exploitation servant d'exemple (en kg N/ha/an). Les lettres renvoient aux systèmes décrits au graphique n°1.

Le graphique n°3 représente les surfaces des systèmes de culture présents dans le bassin d'alimentation.



Le graphique n°4 est le produit des balances/hectare par la surface des systèmes de culture concernés. Les valeurs positives de ces balances sont additionnées (celles des six premières colonnes) pour obtenir la BASCULE des systèmes de culture de cette exploitation concernés par la ressource en eau dont le périmètre est à protéger agronomiquement.



Balance azotée pondérée par système de culture de l'exploitation servant d'exemple (en kg N/système de culture/an).

Cette méthode serait à appliquer en priorité sur les zones sensibles vis-à-vis de la ressource en eau et dans le cadre des opérations Ferti-Mieux.

Bibliographie : CORPEN, 1988, Bilan annuel à l'exploitation
BENOIT Marc, 1992, un indicateur des risques de pollution azotée nommée "B.A.S.C.U.L.E"
Fourrages - mars 1992

Tableau des richesses en azote de quelques éléments (CORPEN, 1988)

ENTREES DANS LES PARCELLES		SORTIES DES PARCELLES	
Engrais (voir leur formulation)		maïs grain	1,5 kg N/quintal
Fumier bovins :	5,5 kg N/t	maïs fourrage	12,5 kg N/tonne de MS
Déjections 1 UGB :	73 kg N/an	blé ou grain	1,9 kg N/quintal
Lisier bovins :	4 kg /t	avoine grain + paille	2,5 kg N/quintal
Lisier porcs		orge grain	1,5 kg N/quintal
PCP (1 t/PCP) :	4,1 kg N/m ³	orge grain + paille	2,1 kg N/quintal
Fientes sèches		colza	3,5 kg N/quintal
poules pondeuses :	20 kg N/t	betteraves racines	1,5 kg N/tonne
		betteraves verts	3 kg N/tonne
		tournesol	1,9 kg N/quintal
		pommes de terre	3,5 kg N/tonne
		légumineuses sans fleur	46 kg N/tonne de MS
		légumineuses avec fleur	32 kg N/tonne de MS
		pâturage 3 semaines	50 kg N/tonne de MS
		pâturage 4 semaines	35 kg N/tonne de MS
		pâturage 6 semaines	25 kg N/tonne de MS
		ensilage	20 kg N/tonne de MS
		foin épiaison	15 kg N/tonne de MS
		foin floraison	13 kg N/tonne de MS

Annexe 2 : motifs de présence/absence utilisés pour calculer les temps de retour des cultures

année					typologie	Ratio/5 ans
1	2	3	4	5		
FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	absente	0
FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	alternée	1
FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	alternée	1
FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	TRUE	répétée	2
FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	alternée	1
FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	alternée	2
FALSE	FALSE	TRUE	TRUE	FALSE	répétée	2
FALSE	FALSE	TRUE	TRUE	TRUE	répétée	3
FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	alternée	1
FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	TRUE	alternée	2
FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	alternée	2
FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	TRUE	irrégulière	3
FALSE	TRUE	TRUE	FALSE	FALSE	répétée	2
FALSE	TRUE	TRUE	FALSE	TRUE	irrégulière	3
FALSE	TRUE	TRUE	TRUE	FALSE	répétée	3
FALSE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	répétée	4
TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	alternée	1
TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	alternée	2
TRUE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	alternée	2
TRUE	FALSE	FALSE	TRUE	TRUE	irrégulière	3
TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	alternée	2
TRUE	FALSE	TRUE	TRUE	TRUE	irrégulière	4
TRUE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	répétée	2
TRUE	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	irrégulière	3
TRUE	TRUE	TRUE	FALSE	FALSE	répétée	3
TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	FALSE	répétée	4
TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	répétée	5
TRUE	FALSE	TRUE	TRUE	FALSE	irrégulière	3
TRUE	TRUE	FALSE	FALSE	TRUE	irrégulière	3
TRUE	TRUE	FALSE	TRUE	TRUE	irrégulière	4
TRUE	TRUE	TRUE	FALSE	TRUE	irrégulière	4
TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	alternée	3

Annexe 3 : Vérification des valeurs de teneurs en azote utilisées dans les calculs de BASCULE

Tableau 3 - Teneurs en azote de divers types de fertilisants organiques (valeurs de référence du CORPEN surlignées en gris)

Nature du fertilisant organique	kg N / t ou m ³	Source
Bovins / UGB lisier	4	
Lisier VL	3,5	Groupe Azote Marne, 2011 ¹
Lisiers de bovins presque purs (système couvert)	4	GREN Champagne-Ardenne, 2012 ²
Lixiviats de purins dilués	0,4	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Lisier VL sur caillebotis	4	Chambre d'agriculture 52, 2002 ³
Lisier VL raclé en fosse extérieure	2,8	Chambre d'agriculture 52, 2002
Lisier VL dilué (aire exercice découverte)	1,5	Chambre d'agriculture 52, 2002
Lisier bovins viande sur caillebotis	4	Chambre d'agriculture 52, 2002
UGB fumier	5,5	
Fumier VL	6,5	Groupe Azote Marne, 2011
Fumier VA	6	Groupe Azote Marne, 2011
Fumier taurillon	9	Groupe Azote Marne, 2011
Fumier bovins très compact de litières accumulées	5,8	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fumier de bovins compact de pente paillée	4,9	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fumier de bovins en logettes	5,1	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fumier de dépôt ou de stockage	8	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fumier de bovins aire de couchage paillée (vaches)	5,5	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier de bovins logettes paillées (vaches)	4,2	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier de bovins raclage d'aire d'exercice paillée	5	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier de bovins viande	5	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier de veaux	4	Chambre d'agriculture 52, 2002
Compost de fumier bovin		
Compost de fumier de bovins stabilisé	8	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Lisiers de veaux (place)	2,86	
Lisier veaux de boucherie	2,2	Chambre d'agriculture 52, 2002
Lisier de porc PCP	5	
Lisier de porc	3	Groupe Azote Marne, 2011
Lisiers mixtes de porcs (prélevés en fosse extérieure)	4,3	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Lisier moyen non dilué	4,4	Chambre d'agriculture 52, 2002
Lisier moyen dilué	3,5	Chambre d'agriculture 52, 2002
Lisier porc pré fosse d'engraissement	6,1	Chambre d'agriculture 52, 2002
Lisier truies maternités, gestantes	2,3	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier de porc	4,1	
Fumier de porc	8	Groupe Azote Marne, 2011
Fumier de porcs (litière accumulée sur paille)	7,2	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fumier porc engraissement sur litière accumulée	8	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier truies gestantes	4	Chambre d'agriculture 52, 2002
Poules pondeuses lisier PP	6,8	
Lisier poules pondeuses	7	Chambre d'agriculture 52, 2002
Poules pondeuses fientes sèches	20	
Fientes poules pondeuses séchées en fosse profonde	30	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fientes poules pondeuses séchées sous hangar	40	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fientes sèches après séchage rapide	40	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fientes sèches après pré-séchage	30	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fientes humides	15	Chambre d'agriculture 52, 2002

Nature du fertilisant organique	kg N / t ou m ³	Source
<i>(Tableau 3, suite)</i>		
Fumier VC	29	
Fumier volailles	22	Groupe Azote Marne, 2011
Fumier poulet de chair (après stockage)	22 à 26	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fumier poulet label (après stockage)	15 à 18	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fumier dinde de chair (après stockage)	21 à 25	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fumier poulets, dindes : sortie de bâtiment	30	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier poulets, dindes : après stockage	22	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier poulettes : après stockage	18	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier poulets label et bio : après stockage	15	Chambre d'agriculture 52, 2002
Fumier canard	5	
Fumier canard	4,5	Chambre d'agriculture 52, 2002
Lapin lisier	9	
Lisier de lapins	8	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Lisier de lapins	8	Chambre d'agriculture 52, 2002
Ovins lisier	7,7	
Ovins fumier	10,8	
Fumier ovins	8,5	Groupe Azote Marne, 2011
Fumier ovins	6,7	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Fumier ovins	10,8	Chambre d'agriculture 52, 2002
Vinasses		
Vinasses	30	Groupe Azote Marne, 2011
Vinasses de sucrerie	20 à 25	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Caprins fumier		
Fumier caprins	6,1	GREN Champagne-Ardenne, 2012
Compost déchets verts		
Compost déchets verts	6 à 12	GREN Champagne-Ardenne, 2012

¹ **Groupe Azote Marne (2011)** Couverture du sol en automne - Calcul du bilan azoté dans les parcelles qui bénéficient de la dérogation à l'implantation d'une culture intermédiaire.

² **GREN Champagne-Ardenne (2012)** Guide de calcul de la dose d'azote prévisionnelle, Méthodes admises en Champagne-Ardenne – Méthode du bilan additif – Méthode CAU (Coefficient Apparent d'Utilisation de l'engrais).

³ **Chambre d'agriculture 52 (2002)** Données pour le Plan Prévisionnel de Fumure (PPF)

Tableau 4 - Récapitulatif des divergences constatées entre les valeurs de référence du CORPEN et les valeurs relevées lors des recherches bibliographiques

Nom de l'engrais	kg N / t ou m ³	Valeur identifiée	Nb enq. concernées
Autres boues d'industries agro-alim	3,6		
Boues de STEP (liquide)	3		
Compost d'origine animale	8		
Fumier Composte	8		
Fiente de poule	30		
Fumier Pailleux	4,9		
Fientes pâteuses poules pondeuses	20		
FPO +	36		0
Fientes sèches poules pondeuses	20	35	1
Fumier bovins	5,5		
Fumier canards	5	4,5	0
Fumier Cheval	8,2		0
Fumier ovins	6,7		
Fumier de porcs	4	6	2
Fumier volailles chair	29	25	1
Granulek (32%So3)	9		0

Nom de l'engrais	kg N / t ou m ³	Valeur identifiée	Nb enq. concernées
<i>(Tableau 4, suite)</i>			
Lisier bovins	4		
Lisier lapins	9		
Lisier ovins	7,7		0
Lisier porcs	5		
Lisier poules pondeuses	6,8		
Lisier veaux	2,9		
Vinasse	25		

Les rares fertilisants organiques pour lesquels les teneurs en azote données par la bibliographie diffèrent des valeurs CORPEN concernent à chaque fois moins de trois enquêtes (sur les 1800 environ prises en compte). Les teneurs en azote des fertilisants organiques sont donc considérées identiques à celles préconisées par le CORPEN.

Tableau 5 - Teneurs en azote de diverses productions végétales (valeurs de référence du CORPEN surlignées en gris)

Culture	kg N / unité (+ précisions éventuelles)	Unité	Source
BtH	2,5 , pailles exp	q	DDT 79, 2009 ¹
	1,9 , grain	q	NOPOLU-Agri, 2007 ²
	2,5 , pailles exp	q	Groupe Azote Marne, 2011 ³
	1,9 , grain	q	Groupe Azote Marne, 2011
	2,5 , pailles exp	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003 ⁴
	1,9 , grain	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	1,9 , grain	q	Chambre d'agriculture 14, 2006 ⁵
	2,5 , grain + paille	q	Chambre d'agriculture 14, 2006
BtP	2,5 , pailles exp	q	DDT 79, 2009
	1,9 , grain	q	NOPOLU-Agri, 2007
	2,5 , pailles exp	q	Groupe Azote Marne, 2011
	1,9 , grain	q	Groupe Azote Marne, 2011
	2,5 , pailles exp	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	1,9 , grain	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	1,9 , grain	q	Chambre d'agriculture 14, 2006
2,5 , grain + paille	q	Chambre d'agriculture 14, 2006	
CoH	3,5	q	NOPOLU-Agri, 2007
	3,5 , grain	q	Groupe Azote Marne, 2011
	7 , grain + paille	q	Groupe Azote Marne, 2011
	3,5 , grain	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	7 , grain + paille	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
CoP	3,5	q	Chambre d'agriculture 14, 2006
	3,5	q	NOPOLU-Agri, 2007
	3,5 , grain	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	7 , grain + paille	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
Mf	3,5	q	Chambre d'agriculture 14, 2006
	12,5	tMS	Groupe Azote Marne, 2011
	12,5	tMS	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
Mg	12,5	tMS	Chambre d'agriculture 14, 2006
	1,5	q	NOPOLU-Agri, 2007
	1,5 , grain	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	2,1 , grain + paille	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	2,2	q	Chambre d'agriculture 14, 2006

Culture	kg N / unité (+ précisions éventuelles)	Unité	Source
<i>(Tableau 5, suite)</i>			
OH	1,5	q	NOPOLU-Agri, 2007
	1,5 , grain	q	Groupe Azote Marne, 2011
	2,1 , grain + paille	q	Groupe Azote Marne, 2011
	1,5 , grain	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003 ⁴
	2,1 , grain + paille	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	1,5 , grain	q	Chambre d'agriculture 14, 2006
OP	2,1 , grain + paille	q	Chambre d'agriculture 14, 2006
	1,5	q	NOPOLU-Agri, 2007
	1,5 , grain	q	Groupe Azote Marne, 2011
	2,1 , grain + paille	q	Groupe Azote Marne, 2011
	1,5 , grain	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	2,1 , grain + paille	q	Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées, 2003
	1,5 , grain	q	Chambre d'agriculture 14, 2006
	2,1 , grain + paille	q	Chambre d'agriculture 14, 2006

¹ **DDT 79 (2009)** Le bilan CORPEN à l'échelle de l'exploitation : Un exemple concret

² **NOPOLU-Agri (2007)** Développement d'un outil d'évaluation de la pollution diffuse des eaux par l'agriculture « NOPOLU-Agri » - Emissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et solde azoté (N) – Méthodes, coefficients, résultats (PÖYRY, SOLAGRO, IFEN).

³ **Groupe Azote Marne (2011)** Couverture du sol en automne - Calcul du bilan azoté dans les parcelles qui bénéficient de la dérogation à l'implantation d'une culture intermédiaire.

⁴ **Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées (2003)** Bases agronomiques du raisonnement de la fertilisation azotée sur grandes cultures et prairies

⁵ **Chambre d'agriculture 14 (2006)** Comment remplir ma balance globale azotée ?

La quasi-totalité des références identifiées dans la bibliographie donne des valeurs égales à celles disponibles dans les tables de 1988 du CORPEN. L'utilisation de ces dernières a donc été validée pour l'ensemble des calculs de BASCULE effectués dans cette étude.

Cependant, certaines des sources citées dans le tableau 3 reprennent directement les références du CORPEN sans les remettre en cause, ce qui limite la rigueur des travaux réalisés. Par ailleurs, si les recherches bibliographiques menées ne contredisent pas les valeurs établies il y a environ 25 ans, elles ont permis de constater que de réelles mesures des teneurs en azote des productions agricoles sont presque inexistantes. La très large majorité des informations disponibles (notamment auprès des instituts techniques spécialistes des différentes cultures) détaille en fait directement les besoins des plantes en azote. Des données constituent les résultats de calculs réalisés selon d'autres méthodes que par l'indicateur BASCULE, et ne conviennent par conséquent pas pour le travail présenté dans ce rapport.

Les teneurs en azote utilisées dans les calculs de l'indicateur BASCULE sont malgré tout validées, mais cette actualisation est l'occasion de souligner un manque problématique de valeurs établies plus récemment.

Annexe 4 : Cartographie des clusters obtenus

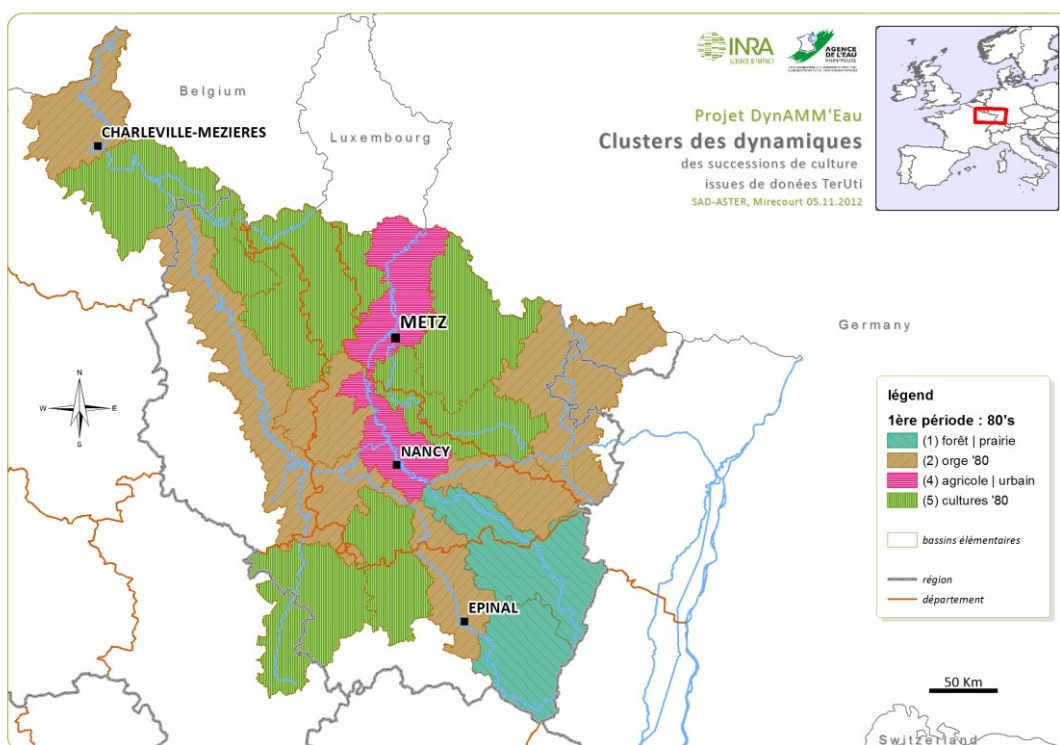


Figure 46 – Clusters des bassins élémentaires pour la période 1981-1990

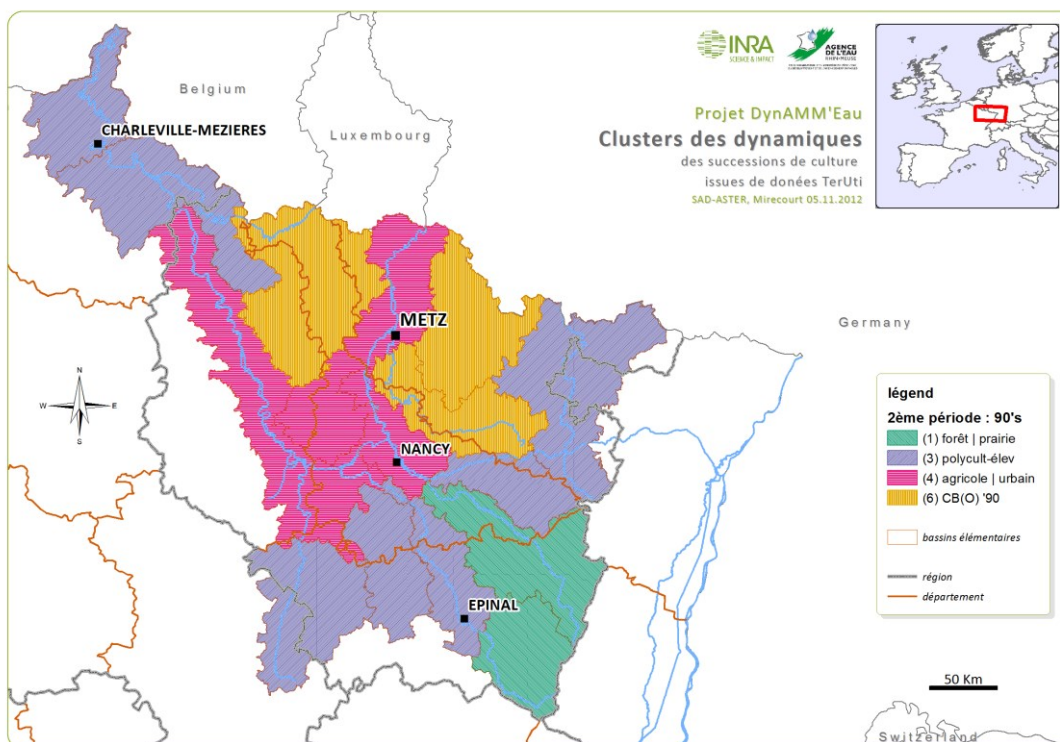


Figure 47 – Clusters des bassins élémentaires pour la période 1992-2003

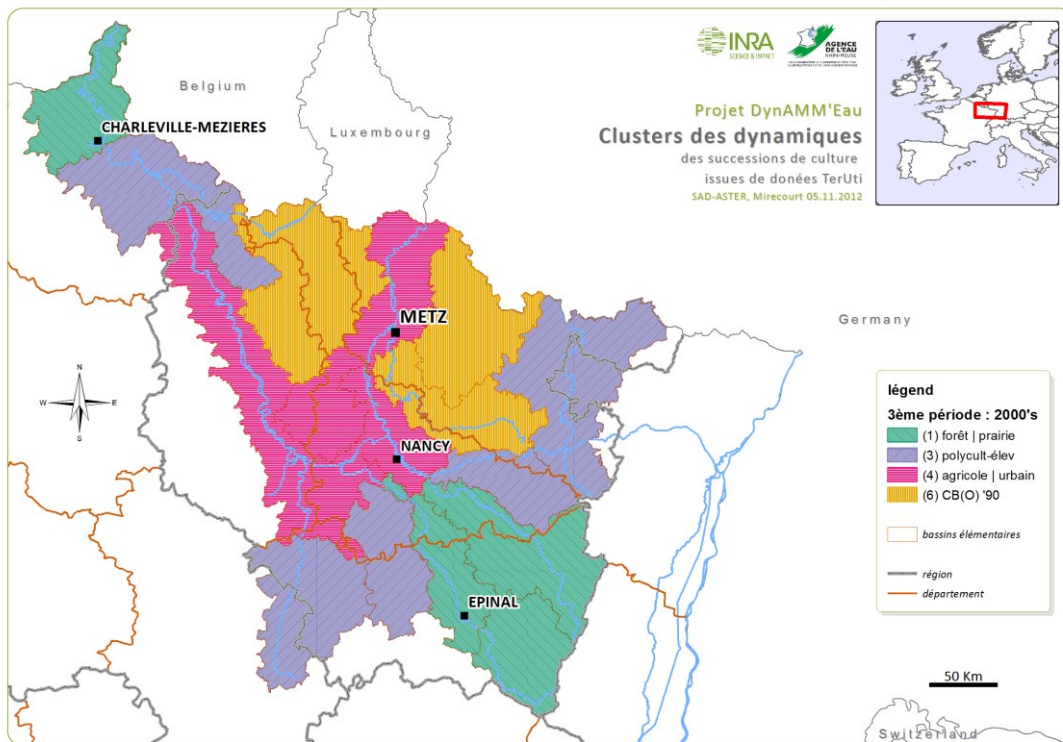


Figure 48 – Clusters des bassins élémentaires pour la période 2006-2010

Annexe 5 : Valeurs de BASCULE obtenues par recours des moyennes et intervalles de confiance, avec distinctions H/P et f/g

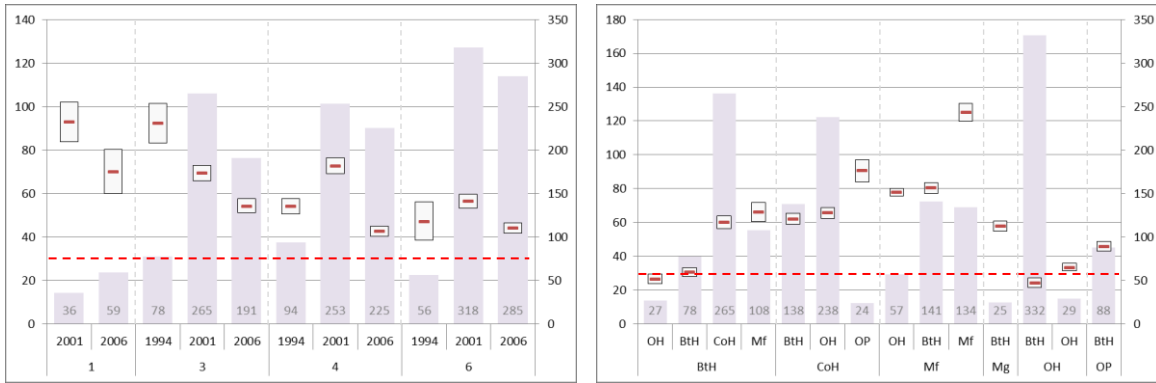


Figure 49 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 50% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" avec distinctions H/P et f/g (à droite)

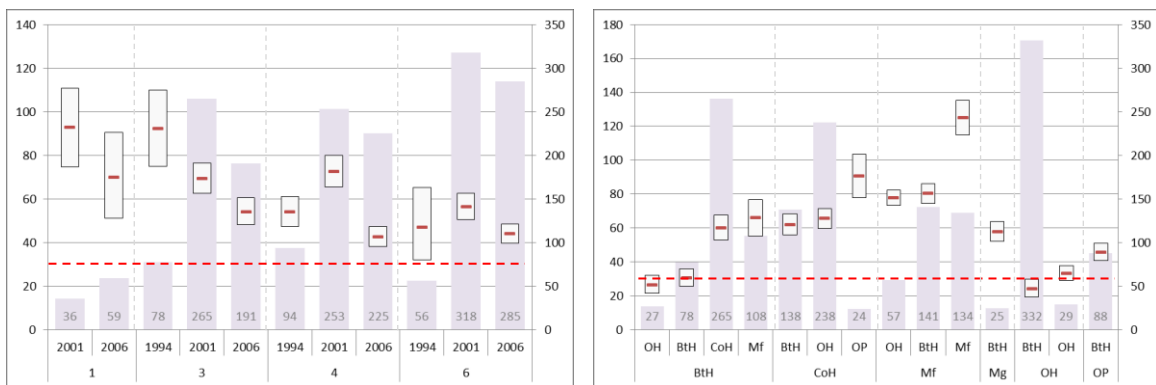


Figure 50 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 20% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" avec distinctions H/P et f/g (à droite)

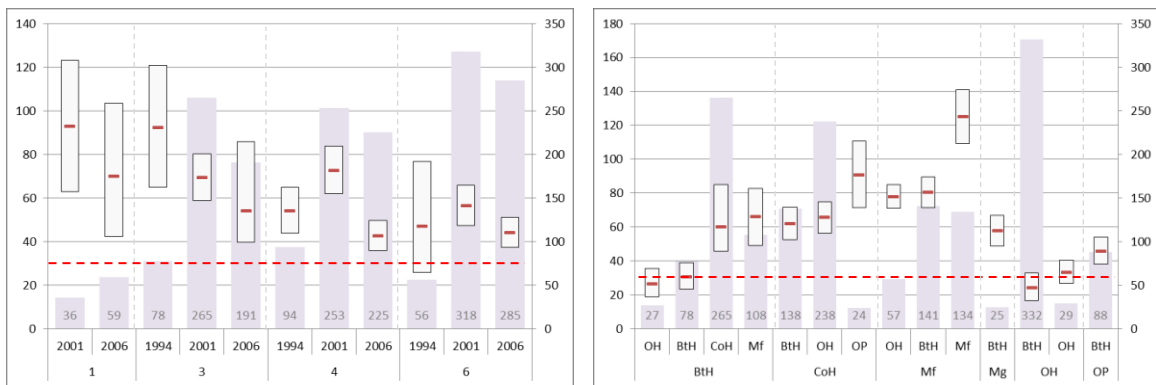


Figure 51 - BASCULE moyennes et intervalles de confiance à 5% pour les ensembles "cluster – année PK" (à gauche) et "culture en place – précédent cultural" avec distinctions H/P et f/g (à droite)

Annexe 6 : Cartographie des pressions azotées appliquées aux seules surfaces labourées des différents clusters

La présente partie propose d'exposer les résultats des BASCULE (décrits précédemment sous forme de graphes) sur support cartographique. L'objectif de cette opération est de pouvoir croiser *in fine* diverses pressions azotées d'origine agricole avec différents niveaux de vulnérabilité, dont l'Agence de l'Eau Rhin Meuse a déjà établi les cartes. Plus concrètement, ces représentations permettent notamment de localiser les zones sur lesquelles des actions urgentes sont requises, c'est-à-dire les secteurs présentant des BASCULE élevées et de fortes vulnérabilités.

Les résultats de BASCULE n'ayant pu être décrits que par groupe "année d'enquête PK – cluster" ou "précédent cultural – culture en place", la cartographie des BASCULE ne détaille pas le poids des diverses cultures dans les valeurs obtenues.

En outre, les calculs ne prenant en compte que les terres cultivées assolées, il serait faux d'en attribuer les résultats à l'ensemble des surfaces des bassins de la Meuse et de la Moselle. Il s'agit donc ici d'identifier les parcelles agricoles, et plus précisément, celles concernées par les calculs effectués, à savoir les terres arables. Pour ce faire, les enquêtes TerUti et PK ne peuvent convenir puisqu'elles correspondent à des échantillons et non pas à l'exhaustivité des parcelles concernées. La base de données Corine Land Cover convient aux exigences formulées et est donc utilisée pour cette étape.

Les **figures 52 à 54** présentent les valeurs de BASCULE des seules cultures assolées de chaque cluster et leur localisation pour les trois années d'enquêtes PK.

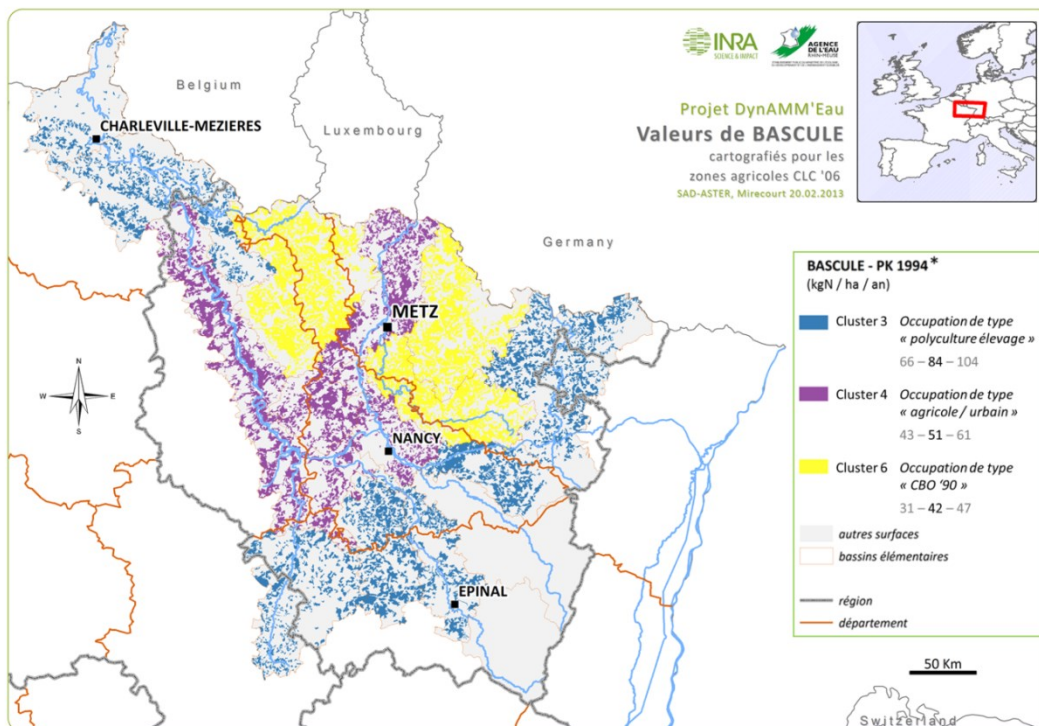


Figure 52 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur les seules cultures assolées des surfaces agricoles des différents clusters pour l'année d'enquête PK 1994*

*Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)

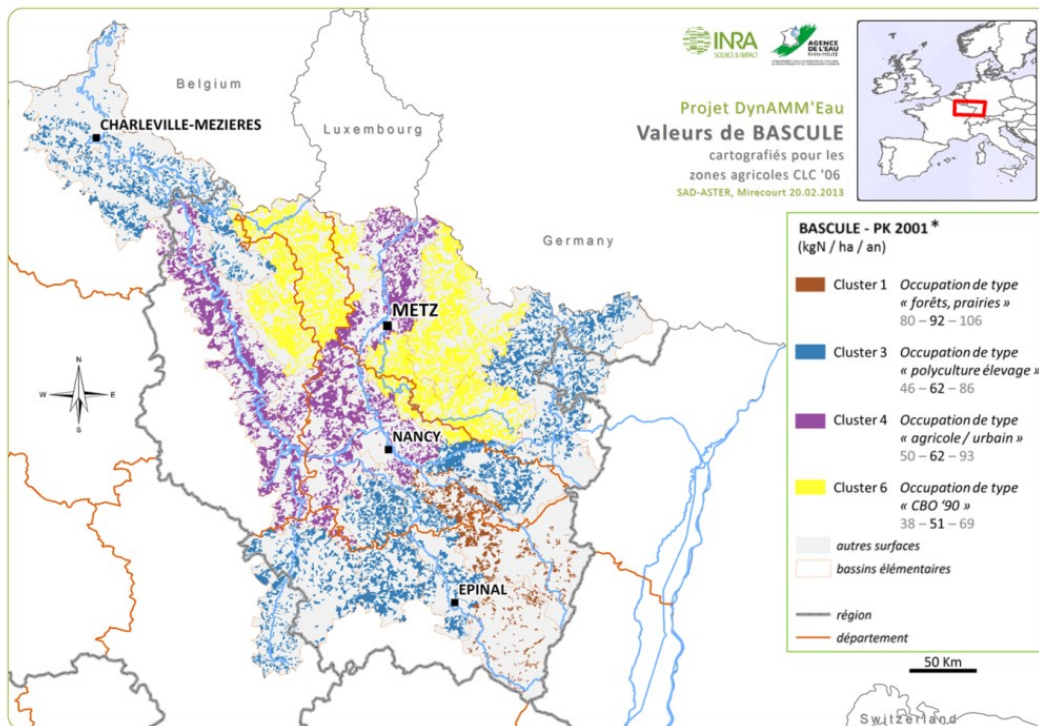


Figure 53 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur les seules cultures assolées des surfaces agricoles des différents clusters pour l'année d'enquête PK 2001*

*Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)

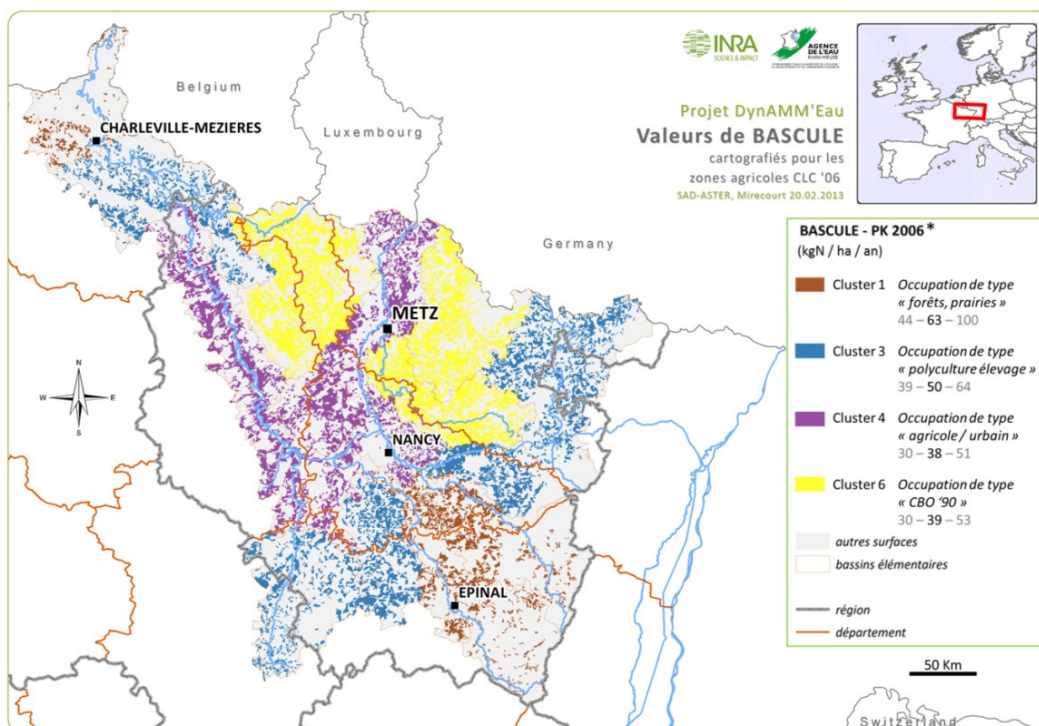


Figure 54 - Carte des valeurs inférieures, centrales et supérieures des BASCULE sur les seules cultures assolées des surfaces agricoles des différents clusters pour l'année d'enquête PK 2006*

*Attention, les étiquettes des différents clusters désignent leurs principales occupations du sol (représentant leurs traits caractéristiques)

Quelques brefs rappels s'imposent pour la bonne interprétation de ces cartes :

- Premièrement, les couleurs choisies pour attribuer à certaines zones de la carte des niveaux de pression azotée sont liées à l'identifiant du cluster. Elles sont donc indépendantes des valeurs de BASCULE (qui varient d'ailleurs d'une année PK à l'autre).
- Ensuite, du fait d'effectifs insuffisants, les résultats de BASCULE pour le cluster 1 (caractérisé par une présence importante de prairies et forêts sur ses sols) n'ont pu être obtenus pour l'année d'enquête PK 1994, ce qui explique qu'une zone conséquente n'ait pas été renseignée sur la première des trois cartes.
- Enfin, même si elle tend globalement à diminuer au fil des années PK, la variabilité des valeurs de BASCULE pour un même ensemble "année d'enquête – cluster" reste importante et ne représente que la moitié des valeurs potentiellement atteignables (les deux quarts inférieur et supérieur ayant été évincés lors de l'étape d'extrapolation des balances azotées des cultures en place aux précédents culturels).