

UNIVERSITÉ DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE : EMSTU

E.A. 6293 G oHydrosyst mes Continentaux (GÉHCO)

THÈSE présentée par :

Cécile POISVERT

soutenue le : **02 juillet 2018**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Tours**

Discipline/ Spécialité : Géosciences Environnement

Analyse et modélisation des surplus azotés en France au cours du siècle dernier :

Application aux échelles départementales et communales

THÈSE dirigée par :

GASSAMA Nathalie directrice Maître de conférences HDR, Université de Tours

RAPPORTEURS :

BOCKSTALLER Christian Ingénieur de recherche, HDR, INRA, Colmar
GASCUEL Chantal Directrice de recherche, INRA, Rennes

JURY :

BENOIT Marc Directeur de recherche, INRA, Mirecourt
BOCKSTALLER Christian Ingénieur de recherche, HDR, INRA, Colmar
GASCUEL Chantal Directrice de recherche, INRA, Rennes
GRIZZETTI Bruna Chargée de recherche, JRC, Ispra, Commission
Européenne
GROSBOIS Cécile Professeur, Université de Tours
THIEU Vincent Maître de conférences, Université Pierre et Marie
Curie

Membres invités :

BOUGON Nolwenn Chargée de mission, Agence Française pour la
Biodiversité
CURIE Florence Maître de conférences, Université de Tours
GASSAMA Nathalie Maître de conférences HDR, Université de Tours

Remerciements

Dans un premier temps, je souhaite remercier mes deux directrices de thèse, Mme Nathalie Gassama et Mme Florence Curie. Merci pour votre confiance. Merci Florence de m'avoir fait passer les portes des bibliothèques et ouvrir les volumes de la statistique agricole française, de m'avoir poussé, gentilement mais fermement, vers toujours plus de programmation, d'avoir su composer avec une partition qui n'était forcément évidente à bien des égards, et pour bien d'autres choses encore ... J'adresse également mes remerciements à Mme Chantal Gascuel et M. Christian Bockstaller d'avoir examiné ce travail.

Ce travail a été financé par l'Agence Française pour la Biodiversité que je tiens donc à remercier. J'adresse mes remerciements les plus vifs à Mme Nolwenn Bougon, qui a été notre interlocutrice principale à l'Agence Française pour la Biodiversité mais aussi à Mme Claire Billy.

Un grand merci à M. Marc Desmet puis à Mme Cécile Grosbois de m'avoir accueilli au sein du GéHCo, merci aussi pour les précieux échanges que j'ai eus avec vous. Chaque personne, personnalité de cette équipe m'a fait beaucoup apprendre, que ce soit ceux « d'en bas » qui sont partis vers d'autres horizons (merci Elie, Coraline, ...), ceux qui y sont encore (merci mille fois Anthony, ton aide et les discussions qu'on a eu ensemble ont été inestimables, merci Nikita et bon courage pour la suite, merci Isabelle et JP pour bien des choses...), merci au bureau des « bofs » pour lesquels je n'aurais jamais assez de gratitude (merci Aurélien, Paul-Antoine, un immense merci à Camille) ou ceux « d'en haut ». Merci Sébastien d'avoir initié tout ça, c'est un peu de ta faute. Merci Célestine et Aurélien, la « dernière ligne droite » aurait été encore plus dure sans vous, j'ai beaucoup de chance de vous avoir rencontré. Merci Isabelle pour ta douceur et tes mots gentils. Merci Florentina pour tes remarques judicieuses. J'aurais aussi une pensée émue pour tous ceux qui ont signés sur la carte-poney (Manon, Florent, Ovidiu...). Un merci tout particulier à Yann, tu es devenu à mes yeux bien plus que l'ingénieur de la cellule informatique.

Merci aussi à toutes les personnes qui ont contribué à la collecte et la saisie des données. Re-merci à Florence ... et aussi à nos stagiaires (M. Arnaud Lemeunier, M. Jimmy Bordier, M. Keletigui Keita). Merci à Mme Charlotte Charpy, Mme Nesrine Soualhia, M. Robin Allouchery pour m'avoir fait découvrir les joies de l'encadrement.

De nombreux professionnels ont pris du temps pour me répondre et me faire partager leurs doutes, leurs attentes sur mes travaux. Qu'ils en soient aussi remerciés.

J'ai certainement oublié de remercier des personnes importantes, j'en suis désolée. Mes derniers remerciements sont adressés à ceux qui sont restés à mes côtés pendant tout ce temps, mais aussi à celles qui sont parties. Par ce travail, j'espère avoir fait, à tous et toutes, votre fierté.

Résumé

Depuis la révolution verte, l'augmentation des rendements est majoritairement causée par la hausse de la fertilisation azotée. Les apports excessifs d'azote au niveau des agrosystèmes sont à l'origine de pertes d'azote qui ont pour conséquence des pollutions azotées touchant l'atmosphère, les sols et les hydrosystèmes. Dans l'hydrosystème, ces excès entraînent des phénomènes d'eutrophisation des masses d'eau de surface (lacs, rivières et eaux côtières), et une dégradation de la qualité des eaux souterraines, ce qui génère un coût supplémentaire de traitement en vue de la distribution d'eau potable.

Différents modèles ont été développés pour décrire les flux d'azote dans les agrosystèmes. Suivant leur complexité, l'importance des hypothèses et la quantité de données nécessaires à leur application, ces modèles permettent de quantifier de façon plus ou moins précise le risque encouru par l'hydrosystème d'être soumis à une pollution azotée, aussi appelée pression azotée. Jusqu'à présent, l'évaluation des pressions azotées permettait de quantifier ces dernières à fine échelle pour deux années seulement (SOeS, 2013, 2012), où pour un demi-siècle mais à l'échelle du pays entier (Bouraoui et Grizzetti, 2011). L'objectif de ce travail est de pouvoir quantifier les pressions azotées et leur évolution à la fois à fine échelle spatiale et sur une période englobant les dates de faits importants au regard de l'évolution de l'agriculture : la révolution verte et la directive nitrates.

Le travail présenté dans cette thèse répond à deux objectifs (i) décrire les pressions azotées sur l'année la plus récente possible, suivant la disponibilité des données agricoles, et ce sur l'ensemble du territoire français, (ii) évaluer l'évolution des pressions azotées sur l'ensemble du territoire ainsi que ses facteurs de contrôle à une échelle infra-nationale.

Dans un premier temps, un modèle de balance azotée de surface du sol a été développé. Une attention particulière a été portée à la quantification des incertitudes liées aux paramètres utilisés. La sélection de données agricoles adaptées vis à vis de l'échelle spatiale et de la période d'étude a conduit à la constitution de deux bases de données agricoles. L'une est construite à partir des chiffres de la statistique agricole annuelle (SAA) et décrit l'agriculture départementale sur 99 années (1917-2015), l'autre est élaborée à partir des microfiches du recensement agricole (RA) de 1955 et décrit l'agriculture à l'échelle communale. Ces bases de données brutes ainsi que les données des autres RA (1970, 1979, 1988, 2000, 2010) ont été complétées et/ou reconstituées pour leur utilisation dans le modèle. L'utilisation combinée de ces deux bases de données agricoles complétées a permis d'obtenir des chroniques de surplus azotés à l'échelle départementale et à l'échelle communale.

L'analyse des résultats départementaux a ainsi permis ainsi de décrire l'évolution des surplus azotés à une échelle infra-nationale. La segmentation et l'évaluation des tendances des pressions azotées, montre que plus de 69% des départements sont caractérisés par une baisse des pressions azotées en 2015 (passage d'une tendance croissante des pressions à une stabilité ou une décroissance). La prise en compte des incertitudes pesant sur les paramètres du modèle CASSIS_N modifie les tendances dans 11% des cas seulement, prouvant la robustesse des tendances identifiées sur les surplus départementaux. Cette baisse des pressions azotées est le fait d'une modification de la fertilisation minérale dans au moins 86% des départements présentant une amélioration des pressions azotées.

Le modèle CASSIS_N a ensuite été appliqué à l'échelle communale ce qui a permis le calcul de surplus azotés à fine échelle pour 61 années (1955 - 2015). Ces résultats sont téléchargeables à l'échelle d'un découpage choisi par l'utilisateur, par le biais d'un site web. L'analyse menée sur les résultats communaux a permis de montrer que les surplus communaux étaient variables et dispersés par rapport au surplus départementaux, et ce dès le début de la période d'étude. Le minimum de la dispersion des surplus communaux est relevé en 1957 (9.63 kgN.ha⁻¹). Pour 74 départements, cette dispersion augmente au cours du temps. L'étape de désagrégation est donc nécessaire pour décrire la variabilité spatiale des surplus communaux. Sur trois départements présentant des contextes et productions agricoles différents, les variables agricoles qui sous-tendent la variabilité des surplus communaux sont les mêmes en 1955 (vaches laitières). En 2010, la dispersion des surplus est liée à une variable agricole répartie selon la spécialisation des communes et représentative de l'orientation agricole du département.

Au cœur du système économique mondial, l'agriculture française est soumise à la libéralisation croissante des marchés agricoles et à l'influence des politiques agricoles européennes. Ces dernières présentent un cadre réglementaire de plus en plus contraignant pour le respect des équilibres entre fertilisation azotée et production et visent donc une baisse des pressions azotées.

Les résultats de ce travail peuvent être valorisés vis à vis de problématiques telles que l'identification des pressions sur une zone hydrologique (masse d'eau, bassin versant, bassin d'alimentation de captage), en tant que données d'entrée pour différents modèles ou pour l'estimation des temps de réponse des systèmes aux modifications des pressions azotées.

Mots clés : azote, balance azotée de surface du sol, tendance, surplus azoté, efficacité, modélisation, pratiques agricoles, données agricoles, complément de données, facteur de contrôle

Résumé en anglais

The increase in crop yield over the last few decades has been the result of an increase in nitrogen fertilization. This increase in nitrogen input in agrosystems has resulted in nitrogen losses, thereby polluting the atmosphere, soils and the hydrosystem. Water bodies (lakes, rivers and coastal areas) are submitted to both eutrophication and a decrease of the quality the aquifers' water, leading to an increasing cost of water treatment.

Models were developed in order to describe nitrogen fluxes in agrosystems. Depending on their complexity, the strength of the hypothesis and data quantity needed for their application, those models allow, with varying degrees of precision, for the quantification of the risk for the hydrosystem to become polluted by nitrogen compound. This nitrogen pollution is often referred to as the "nitrogen pressure". Before the beginning of this work, to our knowledge, there had only been two studies specifically dealing with nitrogen pressures. The first one (SOeS, 2013, 2012) was specific to the municipality scale and only evaluated the pressure over two years. The second one (Bouraoui and Grizzetti, 2011) studied the whole country over a half century.

The objective of this work was to quantify trends in nitrogen pressure both at a fine scale but also for important fact regarding to agriculture evolution: the green revolution and the nitrogen directive. The objective was to quantify trends in nitrogen pressure at a fine scale over a period of time long enough to include the introductions of two important agricultural policies: the green revolution and the nitrogen directive, and to have better knowledge about their drivers.

First, a nitrogen soil surface balance was developed. Special attention was given to the evaluation of uncertainties of each parameter used in the model. Two datasets were selected to satisfy both temporal and spatial requirements. The first one comprises the data of SAA and describes agriculture at departmental scale on 99 year (1917-2015), the other is constituted by data of the agricultural census of 1955 and describes agriculture at the municipality scale. Those database and other results of agricultural census needed to be completed and/or reconstituted for being used in the nitrogen balance model.

Departmental results were analysed to identify trends at that scale. Segmentation of time series and identification of trends showed that more than 69% of departments were characterised nowadays by a decrease of nitrogen pressure (switch from an increasing to a stable or a decreasing trend). Only 11% of the trends were modified when uncertainties were taken into account, showing the robustness of identified trends. Decrease in nitrogen pressure is related to decrease in mineral fertilizer for at least 86% departments characterised by nitrogen pressure improvement.

The model was applied at the municipality scale over a 61 years period (1955 - 2015). Those results are downloadable on an area chosen by the user through a web interface. Analyse of these results showed important variations between municipalities, even of a single department, for the entire duration of the study. The minimum range of municipal values in a single department was highlighted in 1957 (9.63 kgN.ha⁻¹). For 74 departments, dispersion increases in time. The surplus calculation at

the municipality scale is necessary to take into account spatial variability of nitrogen surplus at fine scale. In three representative departments studied, dispersion was driven by the same agricultural variable in 1955 (dairy cow). In 2010, dispersion was driven by an agricultural variable related to the agricultural spacialization of the department.

French agricultural system is at the heart of the global economic system, is subjected to increase liberalisation of agricultural markets and is influenced by European policies. Those policies present an increasingly constraining framework for the respect of the equilibrium between nitrogen input and output and a decrease of nitrogen pressure.

Results of this work can be used for the characterization of nitrogen pressure on water bodies (drainage catchment, capture zone), as entry data for models or to estimate time lag between agrosystems and hydrosystems.

Key words : nitrogen, nitrogen soil surface balance, trends, nitrogen surplus, efficiency, modelling, agricultural practices, agricultural data, data filling, drivers

Table des matières

Résumé.....	5
Introduction :.....	19
I. Chapitre 1 : Contexte scientifique et problématique de la thèse.....	21
I.1. Origine et impact de l'utilisation de l'azote en agriculture.....	21
I.2. Le cycle de l'azote dans les agrosystèmes.....	25
I.2.1. Entrées d'azote dans les sols agricoles.....	25
I.2.2. Sortie d'azote des sols agricoles : export d'azote.....	33
I.2.3. Transformations et transferts d'azote.....	34
I.3. Modélisation du devenir de l'azote dans les agrosystèmes.....	37
I.3.1. Les modèles de culture : l'exemple de STICS.....	37
I.3.2. Les balances azotées.....	38
I.4. Problématique de la thèse.....	42
II. Chapitre 2 : Matériels et méthodes.....	44
II.1. Le modèle CASSIS_N.....	46
II.1.1. Calcul des postes de la balance azotée de surface du sol.....	46
II.1.2. Les paramètres du modèle.....	52
II.2. Les données agricoles en France.....	61
II.2.1. Données d'occupation du sol et de production agricole.....	61
II.2.2. Données de fertilisation minérale.....	69
II.2.3. Sélection des données en vue de leur utilisation dans les balances azotées.....	72
II.3. Mise en forme des données départementales et communales.....	78
II.3.1. Application du modèle CASSIS_N à l'échelle départementale : données de la SAA et de l'UNIFA.....	78
II.3.2. Application du modèle CASSIS_N à l'échelle communale : données des RA.....	84
II.4. Calcul des incertitudes.....	91
II.5. Synthèse.....	92
III. Chapitre 3 : Les surplus départementaux entre 1917 et 2015.....	93
III.1. Analyse des chroniques de surplus départementaux.....	93
III.1.1. Méthode de détection des tendances.....	93
III.1.2. Facteurs de contrôle du surplus.....	97
III.2. Tendances statistiques sur les surplus entre 1917 et 2015.....	102
III.2.1. Evolution et répartition des surplus départementaux en France.....	102
III.2.2. Tendances statistiques sur les surplus départementaux.....	103
III.3. Les facteurs de contrôle du surplus.....	105
III.3.1. L'efficacité de l'azote.....	105
III.3.2. Évolution de l'efficacité de l'azote dans 4 départements.....	114
III.3.3. Les facteurs de contrôle des surplus départementaux de 1917 à 2015.....	120
III.4. Limites du modèle et perspectives d'amélioration.....	125
III.4.1. Flux d'azote non considérés.....	125
III.4.2. Complétion des données.....	126
III.4.3. Fertilisation minérale.....	127

III.4.4. Origine des imprécisions	130
III.4.5. Identification des tendances et facteurs de contrôle.....	131
III.4.6. Synthèse.....	132
IV. Chapitre 4 : Désagrégation des surplus à l'échelle communale.....	133
IV.1. Dispersion des résultats communaux.....	133
IV.1.1. Analyse des résultats.....	133
IV.1.2. Evolution et répartition de la dispersion des résultats communaux à l'échelle départementale.....	137
IV.1.3. Facteur de contrôle de la dispersion des surplus communaux	145
IV.2. Comparaison avec le modèle NOPOLU	154
IV.2.1. Principe de la comparaison	154
IV.2.2. Eléments de comparaison méthodologique entre les deux modèles	156
IV.2.3. Résultats.....	157
IV.2.4. Synthèse de la comparaison entre les deux modèles.....	169
IV.3. Limites du modèle désagrégé.....	170
IV.3.1. Fertilisation minérale	170
IV.3.2. Rendement des cultures	172
IV.3.3. Flux d'azote non considérés	173
V. Chapitre 5 : Discussion générale	174
V.1. Les exports d'azote	174
V.2. Concentration et importance de la fertilisation organique	176
V.3. Le regain d'intérêt pour l'utilisation des légumineuses.....	178
V.4. L'équilibre de la fertilisation azotée	179
VI. Conclusion et perspectives.....	181
VI.1. Conclusion	181
VI.2. Perspective d'utilisation des résultats.....	184
Bibliographie.....	186
Annexes.....	196

Liste des tableaux

Tableau II-1 : Liste des légumineuses prises en compte dans CASSIS_N.....	47
Tableau II-2: Coefficients utilisés pour le calcul de la fixation symbiotique (d'après Anglade <i>et al.</i> , 2015).....	47
Tableau II-3 : Engrais azotés minéraux pris en compte dans le modèle	48
Tableau II-4 : Équivalents UGB alimentation grossière (Agreste, 2010b; SOeS, 2013)	51
Tableau II-5 : Contenu en matière sèche des racines et tubercules fourragers (RTF).....	51
Tableau II-6 : Teneur en azote des différentes productions exprimées en kgN.q ⁻¹	53
Tableau II-7 : Excrétion mensuelle azotée en fonction du rendement laitier	56
Tableau II-8 : Hypothèses des rations simplifiées (pourcentage de la ration) pour les vaches laitières	57
Tableau II-9 : Valeur d'excrétion des vaches laitières pour l'ensemble des cas (rendement laitier et régimes alimentaires) possibles	58
Tableau II-10 : Excrétion azotée pour les différentes catégories de bétail.....	59
Tableau II-11 : Perte d'azote vers l'atmosphère selon l'origine des fertilisations organiques.....	60
Tableau II-12 : Volatilisation des différents types d'engrais azotés minéraux (adapté d'après EMEP-Corinair cité dans CORPEN, 2006).....	61
Tableau II-13: Exemple de thèmes abordés dans les enquêtes de structure relatives au domaine agricole	65
Tableau II-14 : Nombre de départements ou régions par culture et par an pour lesquels les résultats des enquêtes de fertilisation minérale sont disponibles	71
Tableau II-15 : Synthèse sur les types d'information, modes et échelles de collecte des données agricoles en France	78
Tableau II-16 : Modifications des valeurs de la SAU fournie par DISAR dans le département de la Corse.....	79
Tableau II-17 : Modalités de calcul de la SAU	81
Tableau II-18 : Nombres de catégories fournies à l'échelle régionale par la SAA.....	81
Tableau II-19 : Détail des données de livraison d'engrais minéral disponibles (sources : SSP et UNIFA).....	84
Tableau II-20 : Gestion des données des RA en cas de fusion de commune	87
Tableau III-1: Comparaison des tendances identifiées sur les chroniques de surplus azoté de référence et les chroniques de Monte Carlo	105
Tableau III-2 : Nombre de départements selon le nombre de sous périodes sur les chroniques de surplus azoté départementales	120
Tableau III-3 : Types de changement de tendance identifiés sur les chroniques de surplus azoté départementales et nombre de départements concernés (D : décroissant, S : stable, C : croissant)	122
Tableau III-4 : Facteurs de contrôle de l'évolution des surplus départementaux. Les valeurs indiquées dans le tableau représentent le pourcentage des sous périodes contrôlées par le facteur indiqué à gauche.....	124
Tableau III-5: Influence de la répartition des vaches en sous catégories dans le département de l'Indre-et-Loire en 1928.....	127
Tableau III-6 : Avantages et inconvénients des méthodes de détection des tendances utilisées.....	132

Tableau IV-1 : Étendue minimum et maximum, absolue et relative, de la différence des surplus communaux par rapport aux surplus départementaux	138
Tableau IV-2 : Comparaison des données utilisées dans NOPOLU 2010 et CASSIS_N 2010 (échelle communale)	156
Tableau IV-3 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour la fertilisation organique (échelle cantonale)	157
Tableau IV-4 : Valeurs d'excrétion azotée pour les différents types de bétail pour les modèles CASSIS_N et NOPOLU	159
Tableau IV-5 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour l'export d'azote (échelle cantonale)	160
Tableau IV-6 : Teneur en azote des végétaux récoltés pour les modèles CASSIS_N et NOPOLU ...	161
Tableau IV-7 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour la fixation symbiotique (échelle cantonale)	163
Tableau IV-8 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour la fertilisation minérale (échelle cantonale)	164
Tableau IV-9 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour le dépôt atmosphérique (échelle cantonale)	165
Tableau IV-10 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour le surplus azoté (échelle cantonale)	167
Tableau IV-11 : Tableau récapitulatif des différences pour les postes de la balance azotée calculés d'après CASSIS_N et NOPOLU	169
Tableau VI-1 : Tendances des pressions azotées pour les départements Français sur la période 1917 à 2015	182

Liste des figures

Figure I-1: Transformations et transfert de l'azote dans les agrosystèmes et leurs conséquences environnementales (Sutton <i>et al.</i> , 2011b).....	23
Figure I-2 : Cycle de l'azote au niveau du système plante-sol (modifié d'après Cameron <i>et al.</i> , 2013)	25
Figure I-3 : La symbiose entre le rhizobium hébergé en bactéroïde dans la plante (d'après Schneider et Huyghe, 2015)	26
Figure I-4 : Nombre de têtes du cheptel national (France, Allemagne, Royaume-Uni) et mondial (FAO, http://www.fao.org/home/fr/ , consulté le 04/02/2018).....	29
Figure I-5 : Étapes de la fabrication des engrais azotés (Vilain, 1997a).....	29
Figure I-6 : Consommation mondiale et française des différents types d'engrais (IFA, https://www.fertilizer.org/ , consulté le 04/02/2018). (Les chiffres mondiaux ont été calculés à partir des chiffres relevés pour les pays développés et en voie de développement).....	30
Figure I-7 : Consommation nationale (France, Allemagne, Royaume-Uni) et mondiale d'engrais minéraux azotés (IFA, https://www.fertilizer.org/ , consulté le 04/02/2018).....	31
Figure I-8 : Voies principales de formation des dépôts azotés (Hertel <i>et al.</i> , 2012)	32
Figure I-9: Différences conceptuelles entre les limites des systèmes et les flux d'azote considérés dans les balances azotées, classement qualitatif des modèles selon leur complexité, leur difficulté de mise en œuvre et leur puissance explicative (modifié d'après Bockstaller <i>et al.</i> , 2012; Bouraoui et Grizzetti, 2014).....	41
Figure I-10 : Organisation du mémoire	43
Figure II-1 : Etapes de calcul des chroniques de surplus azotés et leurs incertitudes associées par le modèle CASSIS_N.....	45
Figure II-2: Flux d'azote pris en compte dans le modèle CASSIS_N	46
Figure II-3 : Utilisation des pailles A) paille de blé B) paille d'orge (moyennes France entière) d'après Agreste, 1996; SCEES, 1983, 1970, 1965.....	52
Figure II-4 : Estimation de la SAU en France métropolitaine pour l'année 2007 selon différentes sources de données	69
Figure II-5 : Fertilisation minérale sur le blé tendre dans le département de l'Aube.....	75
Figure II-6 : Disponibilité et échelle de restitution des données agricoles en France	77
Figure II-7 : Nombre de données et de catégories saisies par an à partir de la SAA sur les productions, les surfaces végétales, et le nombre de tête de cheptel	80
Figure II-8 : Méthodes de comblement des vides dans les séries de données.....	82
Figure II-9 : Évolution territoriale de la région Parisienne en 1968 (source : https://fr.wikipedia.org/)	83
Figure II-10 : Nombre de catégories utilisées au sein des RA	85
Figure II-11 : Problème de spatialisation résultant de l'évolution des limites communales, exemple de la commune 01455, absorbée par la commune 01267 (commune absorbante)	86
Figure II-12 : Schéma de l'annulation de la fusion entre deux communes, exemple des communes 05023 et 05109	87
Figure II-13 : Schéma de la gestion des données des RA en cas d'annulation de la fusion de communes	88
Figure III-1: Livraison des engrais minéraux azoté à l'échelle de la France (source : http://www.unifa.fr/).....	94

Figure III-2 : Analyse des tendances des surplus départementaux.....	95
Figure III-3 : Clé de lecture des graphiques de l'efficience A) domaines remarquables des graphiques B) relation entre entrées d'azote, efficience et surplus.....	98
Figure III-4 : Étape d'identification des facteurs de contrôle de l'efficience	99
Figure III-5 : Etapes d'identification des facteurs de contrôles des surplus départementaux	100
Figure III-6 : Surplus azotés en France métropolitaine (département de la Seine non inclus) sur la période 1917 à 2015.....	102
Figure III-7 : Évolution et répartition des surplus départementaux moyens (moyenne sur 10 ans) et leurs imprécisions associées	103
Figure III-8 : Tendances statistiques des surplus azotés à l'échelle départementales sur les périodes 1917 à 1991 et 1991 à 2015.....	104
Figure III-9 : Trajectoire de l'azote à l'échelle de la France entière	106
Figure III-10 : Schéma des trajectoires de l'azote les plus rencontrées au niveau des départements français. (Voir le texte pour la légende)	107
Figure III-11 : Types de trajectoires de l'azote à l'échelle des départements français	108
Figure III-12 : Entrées d'azote majoritaires dans les balances azotées départementales parmi la fixation symbiotique, la fertilisation organique et la fertilisation minérale (le dépôt atmosphérique étant considéré constant au cours du temps, il n'est pas considéré dans la comparaison) A) en début de la période d'étude (moyenne 1917 - 1933), B) en fin de la période d'étude (moyenne 2001 - 2015), C) type de changement d'entrée majoritaire	109
Figure III-13 : Évolution des rendements moyens de différentes cultures. Les moyennes sont indiquées en couleur, les écart-type en gris. Les calculs ont été faits à partir des résultats de la mise en forme des données départementales de l'ensemble des départements français hors Seine, hormis dans le cas où les rendements étaient aberrants -cf. partie limites de la méthode III.4.2.3-. Les départements écartés sont alors mentionnés sous la figure.....	111
Figure III-14 : Cultures les plus exportatrices d'azote en moyenne sur A) les quinze premières années (1917- 1933); B) les quinze dernières années de la période étudiée (2001 - 2015), C) type de changement de culture exportant le plus entre les 15 premières années et les 15 dernières années de la période étudiée.	112
Figure III-15 : Efficience de l'azote et ses composantes dans le département de l'Aisne entre 1917 et 2015 A) chronique d'exports cumulés, B) chroniques de fertilisations, C) Trajectoire de l'azote (un point est la moyenne de 10 ans)	115
Figure III-16 : Efficience de l'azote et ses composantes dans le département de la Somme entre 1917 et 2015 A) chronique d'exports cumulés, B) chroniques de fertilisations, C) Trajectoire de l'azote (un point est la moyenne de 10 ans)	116
Figure III-17 : Efficience de l'azote et ses composantes dans le département du Finistère entre 1917 et 2015 A) chronique d'exports cumulés, B) chroniques de fertilisations, C) chronique de fertilisation organique cumulé par type de cheptel, D) Trajectoire de l'azote (un point est la moyenne de 10 ans)	117
Figure III-18 : Efficience de l'azote et ses composantes dans le département du Cantal entre 1917 et 2015 A) chronique d'exports cumulés, B) chroniques de fertilisations, C) chronique de	

fertilisation organique cumulé par type de cheptel, D) Trajectoire de l'azote (un point est la moyenne de 10 ans)	119
Figure III-19 : Chronique des surplus en Lozère segmentée en sous période selon BFAST	121
Figure III-20 : Segmentation de la chronique des surplus de l'Aube A) segmentation obtenue d'après BFAST B) segmentation visuelle	122
Figure III-21 : Fertilisation organique, fertilisation minérale et surplus azotés dans le département de l'Aube.....	123
Figure III-22 : Dates de l'amélioration de la pression azotée	123
Figure III-23 : Facteurs de contrôle de l'amélioration des pressions azotées (N = 65 avec BFAST, N = 69 pour l'interprétation visuelle)	124
Figure III-24 : Comparaison des quantités de fertilisation minérale utilisées à l'échelle des départements estimées via la désagrégation des données d'engrais national par le biais des données du RICA et les livraisons d'engrais de l'UNIFA.....	129
Figure III-25 : Comparaison de la valeur de fertilisation minérale départementale estimée selon les enquêtes de pratiques agricoles (sorties du modèle NOPOLU 2010), les résultats obtenus par le biais de l'utilisation du RICA et par les données de livraison de l'UNIFA.....	130
Figure III-26 : Facteurs de contrôle de l'imprécision	131
Figure IV-1 : Méthode de calcul et interprétation des descripteurs de la dispersion des valeurs communales par rapport aux valeurs départementales	135
Figure IV-2 : Sensibilité des ACP à un individu extrême, exemple du Finistère en 1955 A) graphique des individus, B) graphique des variables	137
Figure IV-3 : Dispersion des valeurs de surplus communaux par rapport à la valeur des surplus départementaux.....	139
Figure IV-4 : Modalités possibles de répartition des surplus communaux par rapport au surplus départemental.....	140
Figure IV-5 : Dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux exprimés en valeur absolue (kgN.ha ⁻¹) (A) et relative (%) (B) pour le département de l'Yonne	141
Figure IV-6 : Dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux exprimés en valeur absolue (kgN.ha ⁻¹) (A) et relative (%) (B) pour le département de la Corse	141
Figure IV-7 : Différence de valeurs pour la SAU dans les départements de la Corse et des Pyrénées-Orientales selon la source des données : RA ou SAA	142
Figure IV-8 : Dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux exprimés en valeur absolue (kgN.ha ⁻¹) (A) et relative (%) (B) pour le département de la Manche	143
Figure IV-9 : Dispersion des résultats communaux (kgN.ha ⁻¹) dans le département de la Manche pour la fertilisation organique (A), pour l'export d'azote (B), et pour la fixation symbiotique (C)	144
Figure IV-10 : Différence d'estimation de la production à l'échelle du département pour le trèfle et la luzerne d'après les données utilisées : RA ou SAA (département de la Manche)	144
Figure IV-11 : Représentation des variables et des individus en sortie de l'ACP pour le département du Finistère en 1955 A) graphique des individus, B) graphiques des variables	146
Figure IV-12 : Représentation des individus et des variables pour le Finistère en 2010 A) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 2, B) représentation des variables selon	

les axes factoriels 1 et 2, C) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 3, D) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 3	147
Figure IV-13 : Représentation spatiale des facteurs de contrôle de l'écart des valeurs communales aux valeurs départementales pour le Finistère en 1955 et 2010 (valeurs en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$)	148
Figure IV-14 : Représentation des individus et des variables pour l'Indre-et-Loire en 1955 A) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 2, B) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 2, C) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 3, D) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 3	149
Figure IV-15 : Représentation des variables et des individus pour l'Indre-et-Loire en 2010 A) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 2, B) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 2, C) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 3, D) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 3	150
Figure IV-16 : Représentation spatiale des facteurs de contrôle de l'écart des valeurs communales aux valeurs départementales pour l'Indre-et-Loire en 1955 et 2010 (valeurs en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$)	151
Figure IV-17 : Représentation des individus (A) et variables (B) pour la Lozère en 1955 selon les axes factoriels 1 et 2	152
Figure IV-18 : Représentation des variables pour la Lozère en 2010 selon A) les axes factoriels 1 et 2, B) les axes 1 et 3	152
Figure IV-19 : Représentation spatiale des facteurs de contrôle de l'écart des valeurs communales aux valeurs départementales pour la Lozère en 1955 et 2010 (valeurs en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$)	153
Figure IV-20 : Sélection des cantons pour la comparaison entre NOPOLU et CASSIS_N suivant les valeurs de la SAU	155
Figure IV-21 : Répartition des différences de SAU cantonale (ha) utilisées par NOPOLU (N) et CASSIS_N (C), A) sous forme d'histogramme, B) sous forme de carte	155
Figure IV-22 : Répartition spatiale des différences absolues ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU) pour les valeurs de fertilisation organique calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale	157
Figure IV-23 : Répartition spatiale des différences absolues ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU) pour les valeurs d'export d'azote calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale	160
Figure IV-24 : Répartition spatiale des différences absolues ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU) pour les valeurs de fixation symbiotique calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale	164
Figure IV-25 : Répartition spatiale des différences absolues ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU) pour les valeurs de fertilisation minérale calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale	165
Figure IV-26 : Répartition spatiale des différences absolues ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU) pour les valeurs de dépôt atmosphérique calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale	166
Figure IV-27 : Valeur des postes de la balance azotée de surface du sol et du surplus azoté pour deux cantons de l'Ariège (09), A) Lavenet, B) Mas-d'Azil. Le pourcentage de variation entre les valeurs obtenues par CASSIS_N et par NOPOLU est indiqué au-dessus de chaque poste de la balance et pour le surplus azoté.	167
Figure IV-28 : Répartition spatiale des différences absolues ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU) pour les valeurs de surplus azoté calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale	168

Figure IV-29 : Valeurs cantonales de surplus pour l'année 2010 (kgN) calculées d'après CASSIS_N et NOPOLU. Les valeurs notées n.d. (non disponibles) obtenues pour les deux modèles sont les cantons où la SAU est égale à zéro.....	168
Figure IV-29 : Résidus des équations linéaires multiples déterminées selon A) la méthode dite "temporelle" pour l'année 1990, B) pour la méthode dite "géographique" pour le département de la Seine-et-Marne. FM : fertilisation minérale en kgN, BT : blé tendre, Bet_suc : betterave industrielle, Bet_four : betterave fourragères, Choux_four : choux fourragers, PP : prairies permanentes.....	171
Figure IV-31 : Variation du rendement du blé tendre en Indre-et-Loire à l'échelle de régions agricoles pour l'année 2015. (source des valeurs de rendement : DRAAF région Centre, source des valeurs de surface en blé tendre : RA 2010, https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/). Note : le rendement du blé tendre indiqué par la SAA pour l'année 2010 est 64.97q.ha ⁻¹	172
Figure V-1 : Evolution de l'occupation du sol en France entre 1992 et 2015 (terre agricole, zones artificialisées ou zones boisées, naturelles, humides ou en eau) (source : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/).....	174
Figure V-2 : Evolution et répartition de la surface en céréale en France (source : SAA 1917 à 2015)	176
Figure V-3 : Evolution et répartition du cheptel bovin en France.....	177
Figure VI-1 : Schéma d'évolution des postes de la balance azotée	183
Figure VI-2 : Méthode d'estimation des temps de réponse des systèmes aux modifications de pression azotée	184

Liste des annexes

Annexe 1 : Nomenclature des données agricoles	197
Annexe 2 : Liste d'enquêtes spécifiques menées dans le cadre des enquêtes structure depuis 1955	219
Annexe 3 : Définition de l'exploitation agricole	221
Annexe 4 : Répartition de données régionales : cas du cheptel des canards entre 2005 et 2010 en Poitou-Charentes	223
Annexe 5 : Complétion de catégories détaillées : cas de la répartition des vaches sur les catégories "laitières" et "nourrices dans l'Ain en 1950	224
Annexe 6 : Répartition des engrais minéraux azotés sur les différents types d'engrais : cas de l'Ain en 1971	227
Annexe 7 : Reconstitution de données communales : exemple de la répartition du cheptel porcin pour deux communes de Charente en 1955	228
Annexe 8 : Annual agricultural N-surplus in France over a 70-year period	230
Annexe 9 : Facteurs de contrôle du surplus sur les sous-périodes identifiées sur l'ensemble du territoire	249
Annexe 10 : Liste des cultures prises en compte dans le modèle NOPOLU	269

Introduction :

Au début du siècle, la faible disponibilité de l'azote dans les zones cultivées était un facteur limitant de la productivité des cultures. La fabrication d'engrais minéral grâce à des procédés industriels a modifié cette situation. Dans les années 1950, les pratiques agricoles ont considérablement changé, la généralisation de l'utilisation des engrais minéraux de synthèse, de techniques de protection et de sélection des cultures permettant l'accès à des rendements agricoles de plus en plus importants. Parallèlement à l'augmentation des flux entrants d'azote vers les sols agricoles, les fuites des composés azotés hors des agrosystèmes ont généré des dégradations de l'environnement. La qualité de l'air a été impactée par la formation de particules et de composés nocifs pour la santé tels que le monoxyde et le dioxyde d'azote (Hertel *et al.*, 2011). La capacité tampon des sols vis à vis des composés azotés, tout comme la biodiversité des espèces qui le colonisent, ont été compromises (Dise *et al.*, 2011; Velthof *et al.*, 2011). La partie souterraine des hydrosystèmes a été contaminée par la pollution azotée, générant une augmentation du coût de traitement de l'eau potable, dans le cas d'une ressource exploitée. En réponse à un apport trop important de nutriments par rapport à l'état initial des hydrosystèmes de surface (lacs, rivières et des zones côtières), des végétaux aquatiques se sont développés. Ce phénomène appelé eutrophisation se traduit par la modification des communautés algales (Hilton *et al.*, 2006). La prolifération algale nuit aux activités récréatives et a des impacts économiques reconnus, en particulier dans le cas des marées vertes, identifiées par exemple en Bretagne (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2012). Dans certains cas, le développement algal excessif peut conduire des mortalités piscicoles suite à la mise en place de conditions anoxiques ou de modification de la toxicité algale (Glibert, 2017). Ces phénomènes ont été suspectés pour expliquer la mortalité piscicole récente observée dans le cours d'eau de la Loue (Berrebi *et al.*, 2012). L'utilisation grandissante d'intrants azotés en agriculture depuis la "révolution verte" a été identifiée par de nombreux auteurs comme étant la source diffuse de l'azote excédentaire présent dans l'hydrosystème (Heathwaite *et al.*, 1996; Öborn *et al.*, 2003; Oenema *et al.*, 2003; Aquilina *et al.*, 2012; Peyraud *et al.*, 2012).

En réponse à la constatation de ces pollutions, des améliorations du traitement des rejets ponctuels d'azote (station d'épuration) ont été légiférées, et une directive européenne visant à réduire l'apport d'azote aux zones cultivées a été mise en place (directive "nitrates", 91/676/CEE). Malgré la mise en place de ces directives, les résultats attendus ne sont pas toujours à la hauteur des efforts consentis et l'eutrophisation est toujours visible en France (Passy *et al.*, 2013; Minaudo *et al.*, 2015). Les auteurs s'accordent à dire qu'un certain temps est nécessaire avant de constater les effets d'une baisse de l'apport d'azote au niveau de l'agrosystème sur l'hydrosystème (Cherry *et al.*, 2008; Aquilina *et al.*, 2012; Dupas *et al.*, 2013).

La pression azotée, qui est le risque encouru par l'hydrosystème d'être soumis à une pollution azotée, peut être modélisée à plusieurs niveaux. La quantité d'azote effectivement perdue à partir des agrosystèmes peut être modélisée mais les performances des modèles baissent dès lors qu'ils ne sont pas appliqués dans les conditions pour lesquels ils ont été développés (Groenendijk *et al.*, 2014). À l'heure actuelle, ces modèles sont applicables sur des zones peu étendues (Beaudoin *et al.*, 2005). En

revanche, les quantités d'azote pouvant potentiellement être perdues à partir des agrosystèmes, ont été modélisées sur les 50 dernières années à l'échelle du pays, montrant une tendance à la hausse des pressions azotées entre 1960 et 1990, puis une décroissance des pressions azotées (Bouraoui et Grizzetti, 2011). À fine échelle, ces quantités ont été calculées pour 2007 et 2010 (SOeS, 2013, 2012). La combinaison de ces deux études ne permet toutefois pas de savoir quelles sont les zones à enjeux vis à vis des pressions azotées à une date plus récente que 2010, ni de savoir si les pressions azotées tendent effectivement à la décroissance sur l'ensemble du territoire à une échelle infranationale, si oui depuis quand et quels sont les facteurs de cette amélioration.

D'autre part, dans le but de modéliser les pressions azotées diffuses, des données agricoles sont nécessaires. Il existe de nombreuses sources de données agricoles en France dont une partie est mise à disposition sur le site DISAR du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>). Parmi ces données il s'agit de savoir lesquelles sont adaptées à la modélisation des pressions azotées sur le long terme, à fine échelle et comment gérer les éventuelles lacunes dans les données en vue de l'objectif fixé.

Le but de ce travail est de lever ces différents verrous scientifiques : il vise à quantifier sur le long terme les pressions azotées à l'échelle de la France métropolitaine à l'échelle la plus fine possible et d'identifier les facteurs de contrôle de ces pressions.

Le chapitre 1, "Origine et impact de l'utilisation de l'azote en agriculture", fait état du cycle de l'azote dans les agrosystèmes et présente les pollutions ayant pour origine par les pertes d'azote provenant des agrosystèmes. Ce chapitre détaille aussi les différents types de modélisation du devenir de l'azote dans les agrosystèmes, ce qui permettra d'identifier le type de modèle en adéquation avec les objectifs d'échelle spatiale et temporelle de l'étude.

Le chapitre 2 présente les matériels et méthodes développés pour construire des chroniques de pression azotée par le biais du calcul d'une balance azotée de surface du sol. Ce chapitre est l'occasion de présenter les différentes données agricoles existant en France. Les données existantes vont contraindre l'échelle des résultats à un niveau départemental et communal.

Le chapitre 3, "Les surplus départementaux entre 1917 et 2015", présente les résultats du modèle appliqué à l'échelle départementale, ainsi qu'un travail de fractionnement des chroniques en segments présentant des tendances homogènes. Les facteurs de contrôle des surplus seront identifiés pour chaque segment ayant été délimité. Les limites de l'approche départementale seront discutées.

Le chapitre 4, "Désagrégation des surplus à l'échelle communale", concerne la variabilité des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux et ainsi que leurs facteurs de contrôle.

Le chapitre 5 présente une prospective de l'évolution des pressions azotées en se basant sur la description de facteurs économiques et politiques, pouvant influencer les différents postes du surplus.

La dernière section "Conclusion et perspective" reprend les résultats clés du travail effectué durant la thèse et présente les perspectives de recherche pouvant utiliser le travail effectué lors de cette thèse.

I. Chapitre 1 : Contexte scientifique et problématique de la thèse

I.1. Origine et impact de l'utilisation de l'azote en agriculture

L'azote est un élément chimique indispensable au développement des organismes vivants. Il est en effet nécessaire pour la formation des acides aminés et des bases azotées, constituants de base des protéines et de l'ADN.

Sur Terre, l'azote est un élément abondant, majoritairement présent sous la forme de diazote (N_2) dans l'atmosphère (78% de l'atmosphère terrestre est composé de N_2). Le diazote est une forme stable de l'azote, non utilisable en l'état par la majorité des êtres vivants sauf pour certains organismes procaryotes, dont certains vivent dans le sol. Ce processus, appelé fixation biologique de l'azote ou diazotrophie, constitue une voie d'entrée de l'azote dans le sol. L'azote peut être aussi être apporté au sol lorsqu'il est fixé par les orages. Malgré ces apports naturels d'azote au sol, cet élément est considéré comme est le facteur limitant le plus important pour la production des végétaux (Galloway *et al.*, 2004). Le procédé Haber, découvert en 1909, a permis la mise au point d'une production industrielle d'ammoniac à partir du diazote atmosphérique (procédé Haber-Bosh). L'ammoniac produit sert en particulier à élaborer des engrais azotés minéraux tels que l'urée ou le nitrate d'ammonium et ainsi augmenter les apports d'azote vers les sols, en vue d'améliorer la production agricole destinée à l'alimentation humaine ou animale. Les engrais minéraux ont contribué à l'augmentation de la production de nourriture, la production céréalière mondiale a ainsi triplé entre 1950 (631 millions de tonnes) et 2000 (1840 millions de tonnes) (Mosier *et al.*, 2004).

L'évolution de l'agriculture dans le monde comme en France sur les 60 dernières années, depuis la révolution verte, repose sur une augmentation des flux d'azote entrant (fertilisations) et sortant (récoltes) des agrosystèmes. D'autres flux d'azote non intentionnels, tels que la volatilisation, la dénitrification, la lixiviation des nitrates ont également augmentés. Suivant sa forme chimique, l'azote peut être la cause de plusieurs problèmes environnementaux. Ainsi Sutton *et al.*, (2011) ont listé cinq types de pollution majeures liés aux pertes d'azote à partir des agrosystèmes (Figure I-1) ayant un lien avec :

- la qualité de l'air ;
- l'effet de serre ;
- les écosystèmes terrestres et la biodiversité ;
- la qualité des sols ;
- la qualité des eaux.

- Impact de l'apport d'azote à l'atmosphère : qualité de l'air et effet de serre

L'azote utilisé dans les agrosystèmes peut être émis dans l'atmosphère sous forme réduite : ammonium (NH_3), ou oxydée : dioxyde d'azote (NO_2) et monoxyde d'azote (NO), et protoxyde d'azote (N_2O).

Dans l'atmosphère, l'ammonium est à l'origine de la formation de particules. Certaines de ces particules sont de taille inférieure à 10 μm et sont assez petites pour être inhalées et atteindre les alvéoles pulmonaires. Ces particules présentent des risques pour la santé humaine, tant au niveau pulmonaire (inflammations, détérioration des défenses pulmonaires) que cardiovasculaire (arythmie, infarctus). Le dioxyde d'azote et le monoxyde d'azote peuvent aussi affecter la santé humaine en engendrant des problèmes d'asthme, d'inflammation des voies aériennes, des bronchites ou des cancers (Moldanová *et al.*, 2011).

Le protoxyde d'azote participe à l'effet de serre. En 2011, le protoxyde d'azote est devenu le troisième gaz à effet de serre en terme d'intensité du forçage radiatif¹ ($0.17\text{W}\cdot\text{m}^{-2} \pm 0.03$) après le dioxyde de carbone CO_2 ($1.82\text{W}\cdot\text{m}^{-2} \pm 0.19$) et le méthane CH_4 ($0.48\text{W}\cdot\text{m}^{-2} \pm 0.05$) (Myrhe *et al.*, 2013). D'autre part, le protoxyde d'azote est impliqué dans des réactions de destruction de la couche d'ozone (Myrhe *et al.*, 2013).

- Impact de l'apport d'azote au sol : qualité des sols et écosystèmes terrestres

Une des qualités des sols est sa capacité à filtrer, retenir et transformer les substances azotées. Ces fonctions sont menacées lorsque la quantité d'azote apportée au sol dépasse celle utilisée par les végétaux (Velthof *et al.*, 2011).

L'augmentation de l'apport d'azote sur les sols peut avoir plusieurs impacts selon la durée et la quantité totale d'azote déposée, mais aussi selon les caractéristiques du système recevant l'azote (climat, conditions édaphiques, utilisation du sol passée et présente, sensibilité des végétaux de ce système envers la teneur en azote). Les impacts possibles de l'augmentation d'apport d'azote sur les végétaux peuvent être une hausse de la productivité, un accroissement de la prédation par les herbivores, une augmentation de la sensibilité aux maladies, la défoliation et une modification de la biodiversité accompagnée d'une diminution de la richesse spécifique. Dans les écosystèmes naturels (prairies naturelles, forêts, tourbières, landes à bruyères ...), le dépôt d'azote atmosphérique est surtout reconnu comme une menace pour la biodiversité (Dise *et al.*, 2011). Dans les agrosystèmes, l'effet principal de dépôt d'azote est une augmentation de la productivité (Velthof *et al.*, 2011).

- Impact de l'apport d'azote sur l'hydrosystème

La majorité des composés azotés présents dans les hydrosystèmes provient des agrosystèmes (Heathwaite *et al.*, 1996; Öborn *et al.*, 2003; Aquilina *et al.*, 2012). L'apport d'azote dans les eaux de surface continentales et côtières contribue à l'eutrophisation des masses d'eau, définie par les directives européennes comme "l'enrichissement de l'eau en éléments nutritifs, notamment des composés de l'azote et/ou du phosphore, provoquant un développement accéléré des algues et des végétaux d'espèces supérieures qui entraîne une perturbation dans l'eau et une dégradation de la qualité de l'eau en question" (91/271/CEE). L'eutrophisation peut se traduire par des mortalités piscicoles, des développements d'algues toxiques, des modifications de la composition des communautés algales (Glibert, 2017) ou des marées vertes (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2012). Les eaux souterraines peuvent

¹ Le forçage radiatif est un changement de flux énergétique à la surface d'un corps, ici la surface terrestre. S'il est positif, il tend à réchauffer le corps considéré.

aussi être concernées par un enrichissement en azote. Ainsi lors de la campagne nationale réalisée en 2014-2015 sur 2610 stations de mesure de la qualité des eaux souterraines, les concentrations moyennes de 315 stations dépassaient le seuil de potabilité en nitrate ($> 50 \text{ mg.l}^{-1}$) (Deronzier et Michon, 2016). L'exploitation de ces ressources pour la production d'eau potable nécessite ainsi un traitement supplémentaire, ce qui engendre une augmentation du coût de production de l'eau potable.

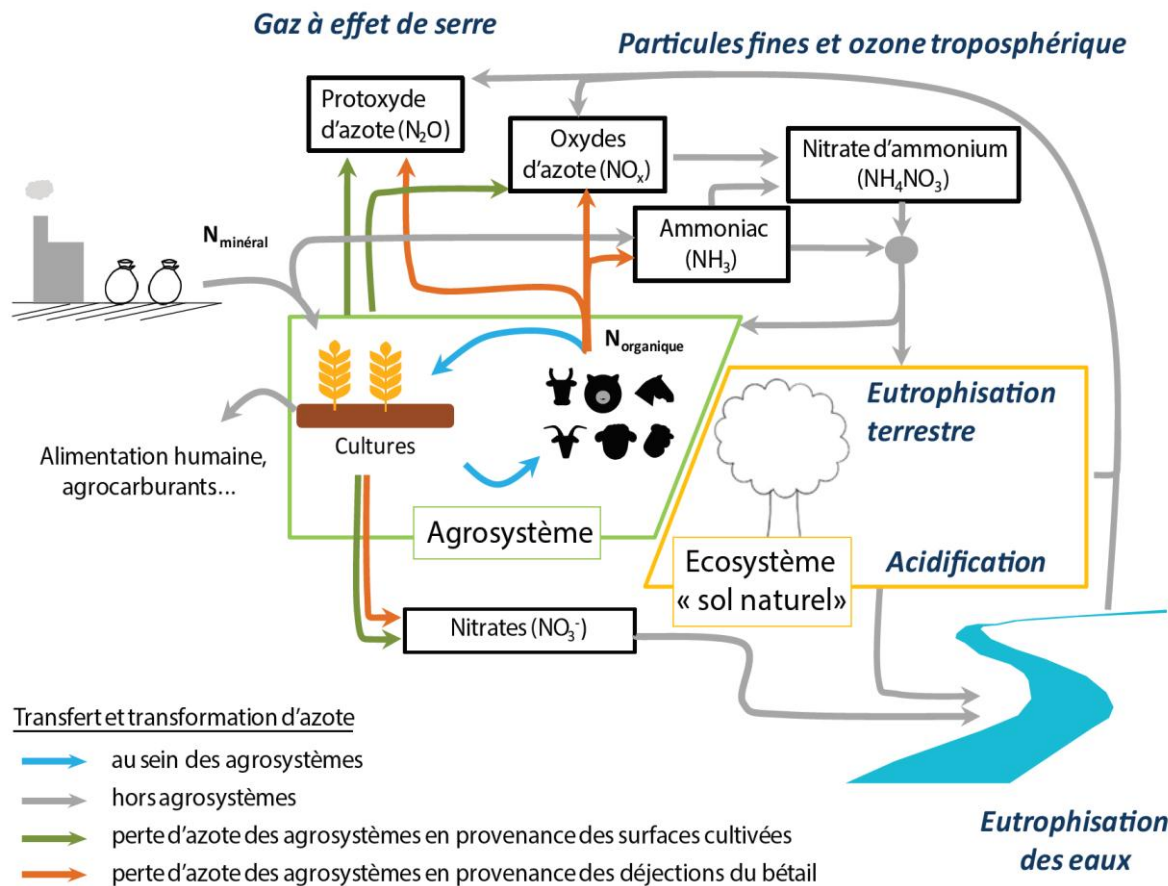


Figure I-1: Transformations et transfert de l'azote dans les agrosystèmes et leurs conséquences environnementales (Sutton *et al.*, 2011b)

Un même atome d'azote pouvant être à l'origine de plusieurs effets dans l'eau, le sol, l'atmosphère ou sur la santé humaine, ce genre d'enchaînement de transformations et d'effets de l'azote a été appelé "cascade de l'azote" par Galloway *et al.*, (2003).

La constatation de ces pollutions au sein de l'hydrosystème a conduit à l'établissement de directives européennes. En 1991, deux directives européennes ont été votées. La première est la directive relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (91/271/CEE) visant à limiter les émissions ponctuelles de nutriment via les stations d'épurations, la deuxième est la directive "nitrates" (91/676/CEE) visant à réduire les émissions diffuses d'origine agricole². Chaque État doit définir les zones dites 'vulnérables'

² La pollution diffuse est définie par opposition à « pollution ponctuelle ». C'est une pollution dont la ou les origines peuvent être généralement connues mais pour lesquelles il est impossible de repérer géographiquement des rejets dans les milieux aquatiques et les formations aquifères. Les pratiques agricoles sur les surfaces cultivées peuvent être à l'origine de pollutions diffuses par entrainement de produits polluants dans les eaux qui percolent ou ruissellent (<http://www.gesteau.fr/concept/pollution-diffuse>).

qui sont les zones connues pour alimenter les eaux atteintes par la pollution azotée. Les États doivent réduire la pollution azotée sur ces zones par le biais de la mise en place de programmes de mesures, spécifiques à chaque Etat. Ces mesures peuvent concerner la gestion de l'occupation du sol, la gestion du bétail, la gestion des fertilisants, la gestion des déjections ou la gestion de l'espace de l'exploitation (Cherry *et al.*, 2008). Tous les 4 ans au moins, la liste des zones vulnérables est réexaminée au cours d'un Etat des lieux. Le prochain état de lieux de la directive nitrate aura lieu en 2019.

La dernière directive entrée en vigueur concernant la pollution azotée diffuse est la directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE), qui a obligé les Etats membres à identifier et quantifier les zones soumises à des pollutions diffuses importantes, notamment de nitrate.

Vingt-cinq ans après la mise en place de la directive nitrates, les effets sont se font attendre par exemple au niveau de grands bassins versants comme ceux de la Loire et de la Seine, qui montrent toujours des signes d'eutrophisation (Passy *et al.*, 2013; Minaudo *et al.*, 2015). Le suivi réglementaire des teneurs en nitrate montre que 65% des stations situées en eaux de surface ne montrent pas de décroissance de ce paramètre entre les années hydrologiques³ 1992-1993 et 2014-2015. Dans la même période, 58% des stations de suivi de mesure des eaux souterraines n'enregistrent aucune baisse malgré la traduction des directives dans la législation française (Deronzier et Michon, 2016). L'effet des mesures prises au niveau des agrosystèmes n'est visible sur l'hydrosystème qu'après une période d'attente qui s'échelonne de quelques années à plusieurs décennies selon les caractéristiques du bassin versant (Cherry *et al.*, 2008; Fovet *et al.*, 2015; Ma et Yamanaka, 2016).

Ce décalage entre le moment de la mise en place de meilleures pratiques agricoles et l'observation de changements mesurables au niveau de l'hydrosystème peut être dû (i) au stockage temporaire de l'azote dans le sol ou la végétation en place, (ii) au temps de transport par les écoulements de subsurface, (iii) à la rétention des nutriments dans les sédiments des rivières ou dans les réservoirs de surface sous forme de matière organique, (iv) aux transferts vers, depuis et au sein des aquifères. La quantification de ces temps de réponse est un facteur clé dans l'évaluation du temps nécessaire à l'observation d'une baisse des concentrations en nitrates dans l'hydrosystème suite à la baisse des pressions agricoles.

Les suivis des concentrations en azote dans les aquifères et les eaux de surface ne montrant pas l'effet des mesures d'atténuation prises au niveau des agrosystèmes avant un certain délai, la modélisation a été utilisée pour prédire l'impact des mesures d'atténuation appliquée au niveau des agrosystèmes sur le devenir de l'azote. Les modèles utilisés varient dans leur complexité, leur difficulté de mise en œuvre et leur puissance explicative mais tous reposent sur la quantification des flux d'azote au sein des agrosystèmes.

³ Période de 12 mois qui débute après le mois habituel des plus basses eaux. En fonction de la situation météorologique des régions, l'année hydrologique peut débiter à des dates différentes de celle du calendrier ordinaire, mais en France, généralement elle débute au mois de septembre (<http://www.glossaire.eaufrance.fr/concept/annee-hydrologique>).

I.2. Le cycle de l'azote dans les agrosystèmes

L'ensemble des transformations au cours desquelles l'azote apparaît sous diverses formes libres ou combinées et des transferts qu'il subit constitue le cycle de l'azote (Figure I-2). Ce cycle peut être subdivisé en trois parties : les entrées d'azote dans le sol agricole, les sorties d'azote et les transformations de l'azote au sein du sol.

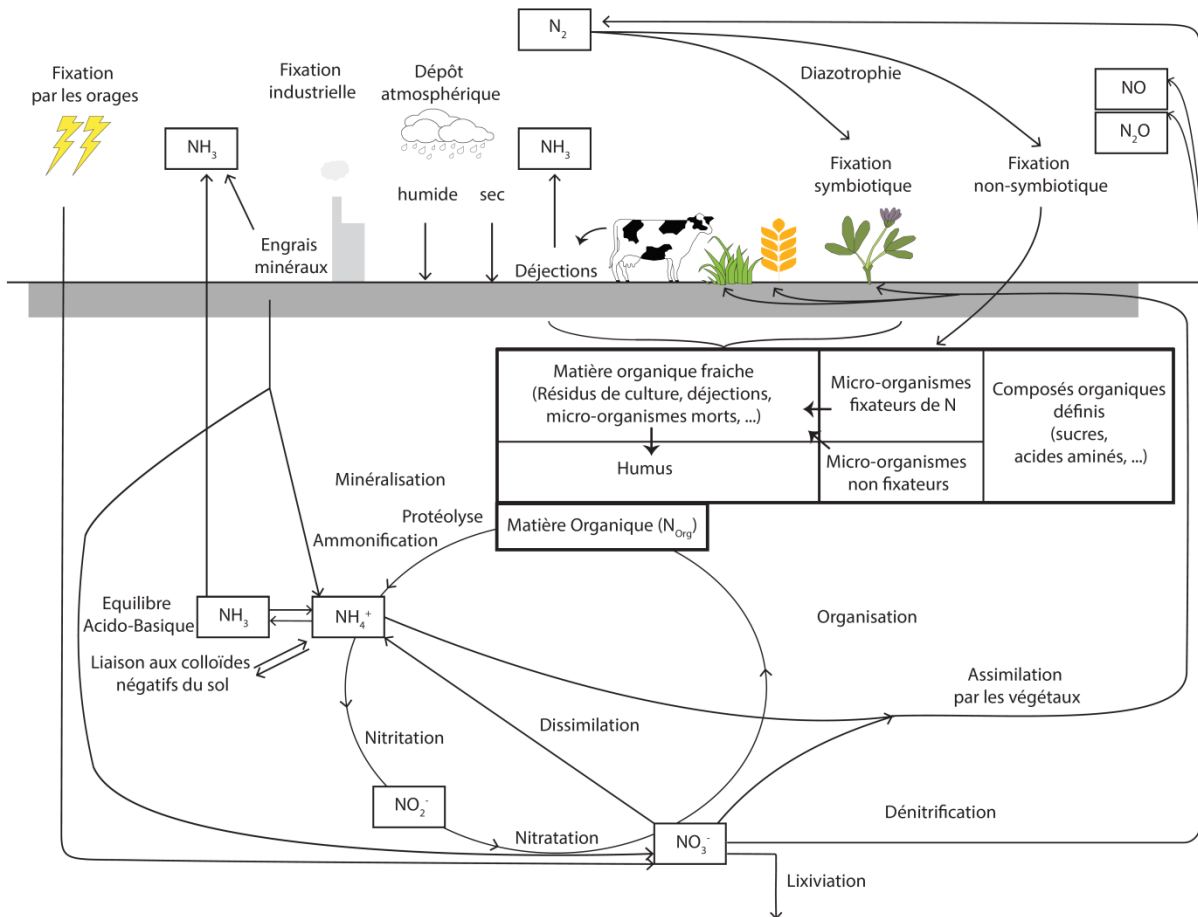


Figure I-2 : Cycle de l'azote au niveau du système plante-sol (modifié d'après Cameron *et al.*, 2013)

I.2.1. Entrées d'azote dans les sols agricoles

L'azote est apporté aux sols agricoles par le biais de la fixation symbiotique, des dépôts atmosphériques et des fertilisations minérales et organiques.

I.2.1.1. Fixation biologique du diazote atmosphérique (diazotrophie)

La fixation biologique est la capacité de prélever l'azote atmosphérique (N_2) pour produire ces propres composants protéiques (Schneider et Huyghe, 2015). La diazotrophie est effectuée par des micro-organismes libres ou par des micro-organismes engagés dans une symbiose avec des végétaux.

Les micro-organismes libres pouvant effectuer la fixation de l'azote sont des bactéries qui sont le plus souvent localisées dans le voisinage des racines des végétaux (Peyraud *et al.*, 2012). Différents groupes de fixateurs libres peuvent intervenir :

- des bactéries aérobies obligatoires hétérotrophes comme *Azotobacter*, *Spirillum*, *Aerobacter* ;
- des bactéries anaérobies facultatives ou obligatoires autotrophes comme *Chromatium*, *Clostridium*, *Desulfovibria* ;
- des bactéries autotrophes telles que certaines cyanobactéries (genre *Anabaena*).

La fixation d'azote peut être effectuée par des micro-organismes vivant en symbiose avec des végétaux. Ces micro-organismes réalisent la fixation symbiotique. Certaines bactéries actinomycètes du genre *Frankia* entrent ainsi en symbiose avec plusieurs genres d'angiospermes ligneux comme *Alnus* (Aulne) ou *Hippophae* (Argousiers), mais la symbiose la plus connue est celle qui lie les espèces de *Rhizobium* et *Bradyrhizobium* avec les plantes légumineuses (plantes de la sous-famille des Fabaceae ou Leguminosae, comme le trèfle, la luzerne, le pois, les lentilles...).

Les *Rhizobium* et les *Bradyrhizobium* sont des bactéries aérobies habituellement présentes dans les sols. Les racines des légumineuses émettent des substances (les flavonoïdes) qui attirent ces procaryotes. Ces derniers pénètrent dans les racines s'y multiplient et forment des bactéroïdes où se déroulera la fixation symbiotique de l'azote. La plante fournit aux bactéries l'énergie nécessaire pour réaliser la fixation de l'azote et reçoit des composés azotés en retour (Figure I-3). Le processus de fixation de l'azote est catalysé par la nitrogénase, enzyme très sensible à la présence d'oxygène. La protection de la nitrogénase vis à vis d'une présence trop importante d'oxygène est assurée par la leghémoglobine, hémoprotéine qui assure la limitation de pression partielle en oxygène dans le bactéroïde. La fixation symbiotique est un processus coûteux pour la plante en terme d'énergie, pour la réaction de fixation en elle-même mais aussi pour l'entretien des bactéroïdes.

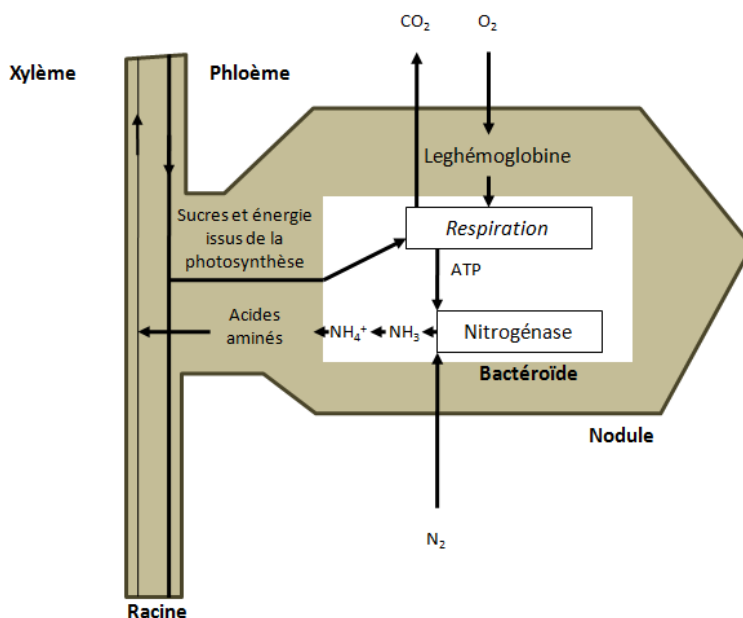


Figure I-3 : La symbiose entre le rhizobium hébergé en bactéroïde dans la plante (d'après Schneider et Huyghe, 2015)

D'après Schneider et Huyghe, (Schneider et Huyghe, 2015) les facteurs qui influencent la fixation sont :

- l'espèce et la variété de la légumineuse. Par exemple, le haricot commun fixe une quantité d'azote inférieure à ses besoins totaux en azote, alors que la féverole ou le soja présentent une fixation symbiotique qui peut couvrir l'ensemble de leurs besoins azotés non pourvu par l'azote minéral du sol.
- les conditions édaphiques. Le pH du sol et la teneur en nutriments (P, K, Mg, Ca, Fe, Mo, Cu, B) peuvent devenir des facteurs limitants, restreindre la croissance de la légumineuse ce qui réduit aussi la quantité d'azote fixé.
- la souche bactérienne entrée en symbiose. Ainsi, les souches de *Rhizobium* associées aux légumineuses comme la luzerne, le trèfle, les vesces, sont à croissance rapide, alors que les *Bradyrhizobium* associées aux espèces comme les lupins ou le soja sont à croissance lente.
- la teneur en azote minéral du sol. Les légumineuses pourront utiliser la fixation symbiotique ou l'absorption de l'azote minéral du sol selon cette teneur. Chez le pois, la quantité d'azote fixée mesurée au champ est inversement proportionnelle à la teneur en azote du sol (nitrate + ammonium). La fixation symbiotique est inhibée chez le pois pour des teneurs en azote supérieures à 380 kgN.ha⁻¹ (Voisin *et al.*, 2002).
- la croissance (ou rendement) de la légumineuse. La quantité d'azote fixée est corrélée positivement avec le rendement de la légumineuse. De façon générale, les niveaux de fixation importants (supérieurs à 80%) sont relevés dans le cas de teneurs en azote du sol faibles et des conditions agropédologiques favorables avec un bon niveau de rendement. Les niveaux de fixation faibles (moins de 60%) correspondent à des teneurs en azote du sol fortes ou des conditions agropédologiques défavorables au rendement.
- les pratiques culturales. L'absence ou la diminution du labour entraînent ainsi une hausse de la quantité de N₂ fixée (van Kessel et Hartley, 2000).

Il est possible de classer les légumineuses cultivées en trois catégories selon leur utilisation pour l'alimentation humaine ou animale et leur stade de récolte.

- Les légumineuses à graines récoltées avant maturité : elles servent dans l'alimentation humaine (pois potagers ou petits pois, haricots verts, fèves fraîches).
- Les légumineuses à graines récoltées à maturité : elles sont utilisées dans l'alimentation humaine et animale (lentilles, pois chiche, haricots secs, soja, lupin, vesces, féverole, pois).
- Les légumineuses fourragères dont toute la partie aérienne est récoltée : elles servent à nourrir les animaux (principalement le trèfle blanc, trèfle violet, sainfoin, lotier corniculé).

Les légumineuses sont donc le plus souvent cultivées pour leur graine et/ou leur partie aérienne⁴. La partie souterraine comportant une partie de l'azote de l'air fixé par les bactéries reste dans le sol et constitue donc une entrée d'azote dans les agrosystèmes via la dégradation des racines.

⁴ Pour les arachides (*Arachis hypogaea*), les fruits sont enterrés après fécondation, le végétal doit donc être entièrement arraché pour pouvoir récolter les graines.

I.2.1.2. Fertilisation organique

Le bétail est constitué d'animaux principalement herbivores. Le rapport entre la quantité d'azote assimilée par ces animaux dans leurs tissus ou leur productions (viande, lait, œufs) et les quantités ingérées (végétaux) est faible : moins de la moitié de l'azote ingéré se retrouve dans les produits animaux. La majeure partie de l'azote ingérée est rejetée dans l'environnement via les urines et les fèces (Delaby *et al.*, 2012). Dans l'urine, l'azote se trouve sous forme d'urée pour les mammifères (bovins, porcins, caprins, ovins, équins, lapins) ou sous forme d'acide urique pour les oiseaux (volaille). Dans les fèces, l'azote se trouve sous forme d'urée, de NH_3 et d'azote organique (Behera *et al.*, 2013). La quantité d'azote excrétée dans les fèces est plutôt liée aux quantités d'aliments ingérées alors que la quantité d'azote excrétée par voie urinaire est liée à la quantité ainsi qu'au coefficient d'utilisation métabolique azoté des aliments (proportion de nutriments absorbés et fixés par l'organisme).

La quantité d'azote excrétée peut être estimée avec une méthode de balance azotée appliquée à l'échelle de l'animal où elle est calculée à partir de la différence entre la quantité d'azote ingérée et la quantité d'azote fixée par le bétail. Cette méthode a été retenue pour l'élaboration par le CORPEN⁵ des standards d'excrétion utilisés en France pour les bovins, les porcins et les volailles (CORPEN, 2006, 2003, 2001, 1999). La définition de l'azote fixé varie selon les catégories de bétail considérées. Dans le cas de bétail élevé pour la viande, l'azote fixé correspond à l'azote nécessaire à l'animal pour sa croissance (vaches de réforme, bovin et porc à l'engrais). Dans le cas de productions autres (portée, œufs, lait), la quantité d'azote fixée par l'animal pour sa croissance est considérée comme faible devant la quantité d'azote fixée nécessaire pour les productions d'intérêt.

La quantité d'azote excrétée varie selon la catégorie du bétail considérée, son stade physiologique et son alimentation. Une augmentation de la productivité (quantité de lait produite, gain de poids corporel) tend à augmenter l'excrétion azotée (Delaby *et al.*, 2012). Une partie de l'azote émis dans le sol via les excréments sera transférée vers l'atmosphère par volatilisation.

À l'échelle mondiale, le nombre de têtes de cheptel tend à augmenter depuis 1960, la quantité d'azote excrétée par le bétail et la perte d'azote par volatilisation vers l'atmosphère continuent donc à augmenter. Au contraire en France, l'évolution du nombre de têtes s'inverse depuis le début des années 2000 (Figure I-4), ce qui devrait engendrer une diminution de la production d'azote par l'élevage et qui devrait correspondre à une baisse de la perte en azote vers l'atmosphère imputable à l'élevage.

⁵ Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement, comité placé sous la tutelle du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) et du ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche (MAAP).

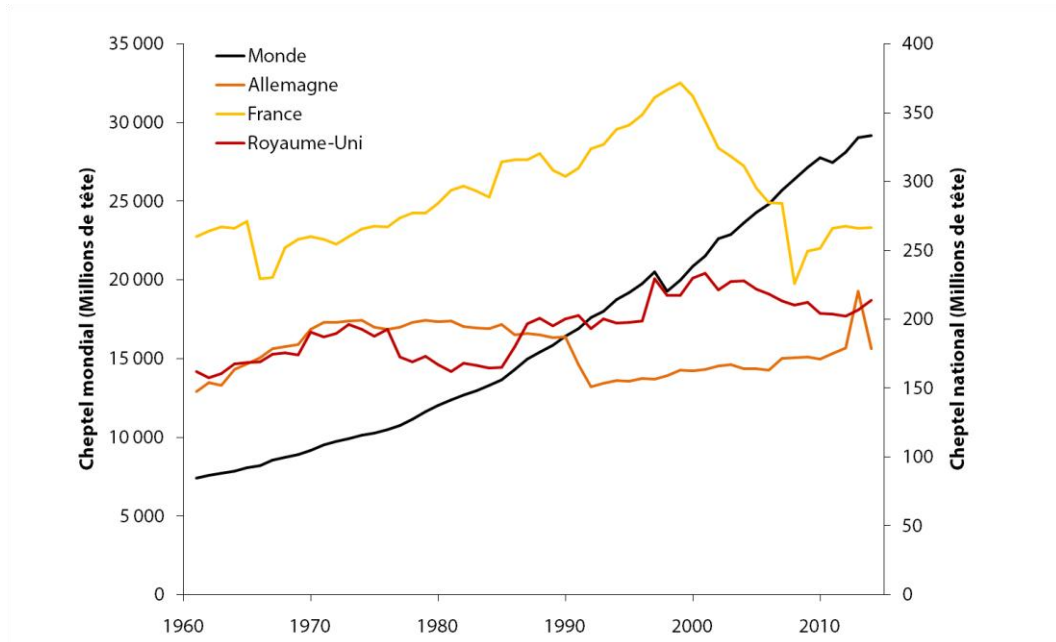


Figure I-4 : Nombre de têtes du cheptel national (France, Allemagne, Royaume-Uni) et mondial (FAO, <http://www.fao.org/home/fr/>, consulté le 04/02/2018)

I.2.1.3. Fertilisation minérale

La synthèse de l'ammoniac est réalisée à partir de la réaction entre le dihydrogène (H_2) et le diazote (N_2) (Équation I-1).



A partir de l'ammoniac, différentes réactions (oxydations, ajout d'oxydes, ...) (Figure I-5) vont permettre la synthèse des différents fertilisants minéraux azotés de composition et de teneur en azote variables (Tableau I-1).

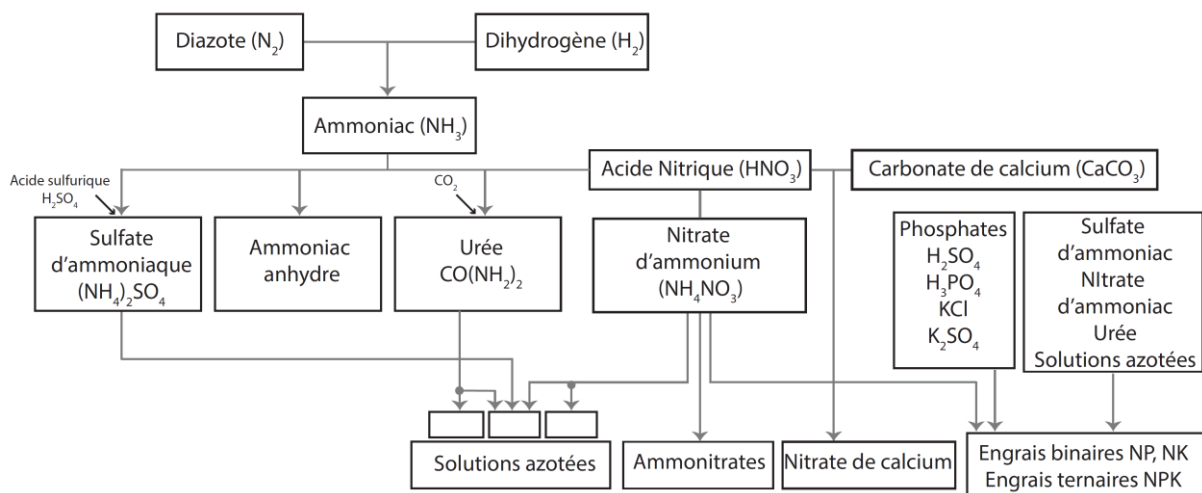


Figure I-5 : Étapes de la fabrication des engrais azotés (Vilain, 1997a)

Tableau I - 1 : Liste des fertilisants minéraux azoté (d'après Behera *et al.*, 2013; Schwartz *et al.*, 2005)

Nom	Genre d'engrais	Forme de l'azote	Formule chimique	Teneur en azote (%)
Nitrate d'ammonium (ou Ammonitrate)	Simple ¹	Nitrique (NO ₃ ⁻) et Ammoniacal (NH ₄ ⁺)	NH ₄ NO ₃	35
Sulfates d'ammonium	Simple	Ammoniacal (NH ₄ ⁺)	(NH ₄) ₂ SO ₄	21
Nitrates de calcium (13 à 15% et 15.5%)	Simple	Nitrique (NO ₃ ⁻)	Ca(NO ₃) ₂	13, 15 ou 15.5
Nitrates de sodium	Simple	Nitrique (NO ₃ ⁻)	NaNO ₃	16
Urée	Simple	Ammoniacal (NH ₄ ⁺)	CO(NH ₂) ₂	46
Ammoniac (anhydre)	Simple	Ammoniacal (NH ₄ ⁺)	NH ₃	82
Solutions azotées ²	Simple	Variable selon composition		20 à 30.7
Cyanamide calcique	Simple	Ammoniacal (NH ₄ ⁺)	CN ₂ Ca	18 à 21
Binaires	Composés ³	Variable selon composition		
Ternaires	Composés	Variable selon composition		

¹ Les engrais simples contiennent une teneur connue en un seul élément nutritif, ici l'azote.

² Les solutions azotées sont un mélange d'urée, de nitrate et de sulfate d'ammonium.

³ Les engrais composés contiennent une teneur connue en plusieurs éléments chimiques.

Le type d'engrais azoté le plus consommé au niveau mondial est l'urée. En France, les types d'engrais les plus consommés sont les solutions azotées et le nitrate d'ammonium (Figure I-6). La consommation mondiale d'engrais croît depuis 1960 (Figure I-7) et est surtout portée par la Chine et l'Inde. La France, 4^{ème} pays le plus consommateur d'engrais azotés en 1980, est passée au 9^{ème} rang mondial, en 2015 (IFA).

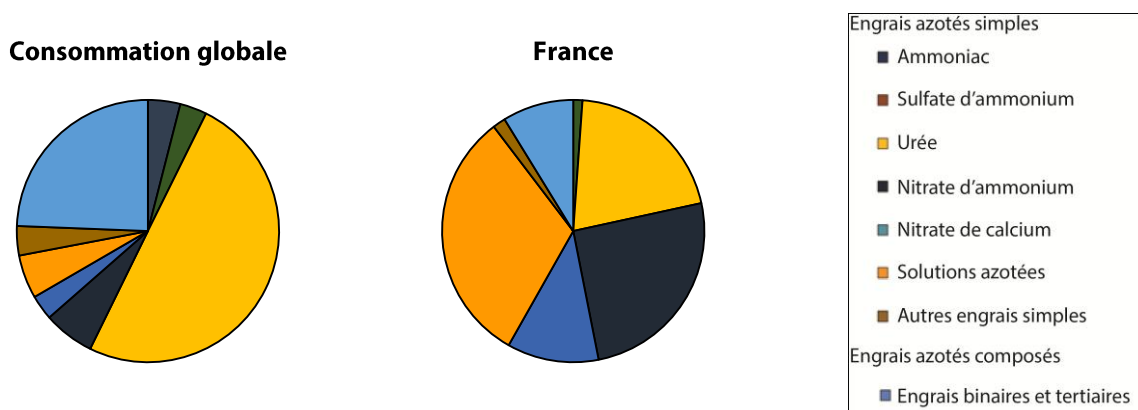


Figure I-6 : Consommation mondiale et française des différents types d'engrais (IFA, <https://www.fertilizer.org/>, consulté le 04/02/2018). (Les chiffres mondiaux ont été calculés à partir des chiffres relevés pour les pays développés et en voie de développement)

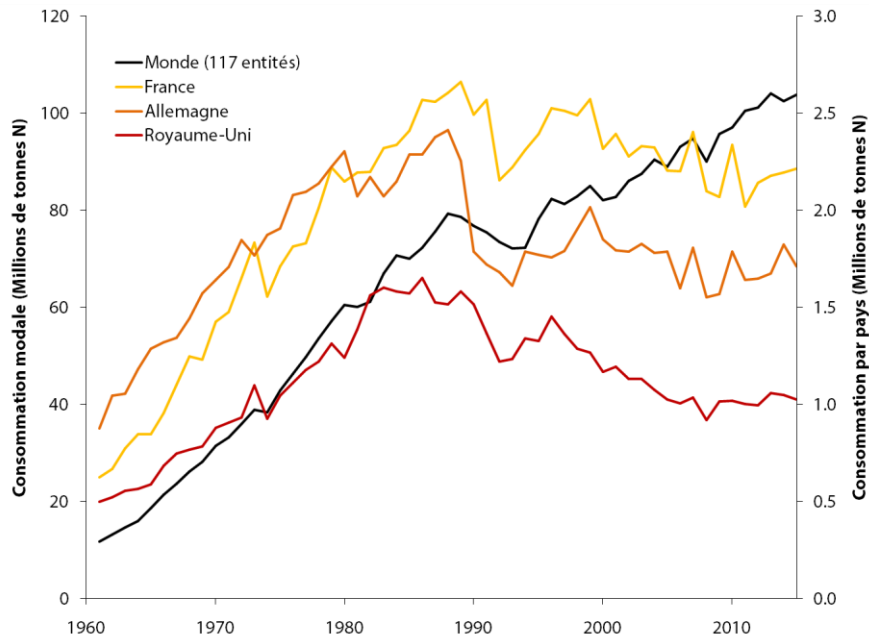


Figure I-7 : Consommation nationale (France, Allemagne, Royaume-Uni) et mondiale d'engrais minéraux azotés (IFA, <https://www.fertilizer.org/>, consulté le 04/02/2018)

L'application en surface des engrais minéraux contenant de l'azote sous forme d'urée ou d'ammonium peut conduire à la formation d'ammoniac qui peut être transféré vers l'atmosphère par volatilisation. Les engrais contenant de l'azote sous forme nitrique peuvent subir la dénitrification, c'est à dire la réduction de nitrates en azote moléculaire.

I.2.1.4. Dépôt atmosphérique

Les dépôts atmosphériques d'azote ont lieu sous forme humide et sèche. Les composés azotés qui sont déposés correspondent aux espèces chimiques telles qu'elles ont été émises (ammoniac (NH_3), oxyde d'azote (NO) et de dioxyde d'azote (NO_2)), ou correspondent à des produits de réactions qui mettent en jeu des formes réduites (NH_3) et des formes oxydées de l'azote (monoxyde d'azote et de dioxyde d'azote) (Figure I-8).

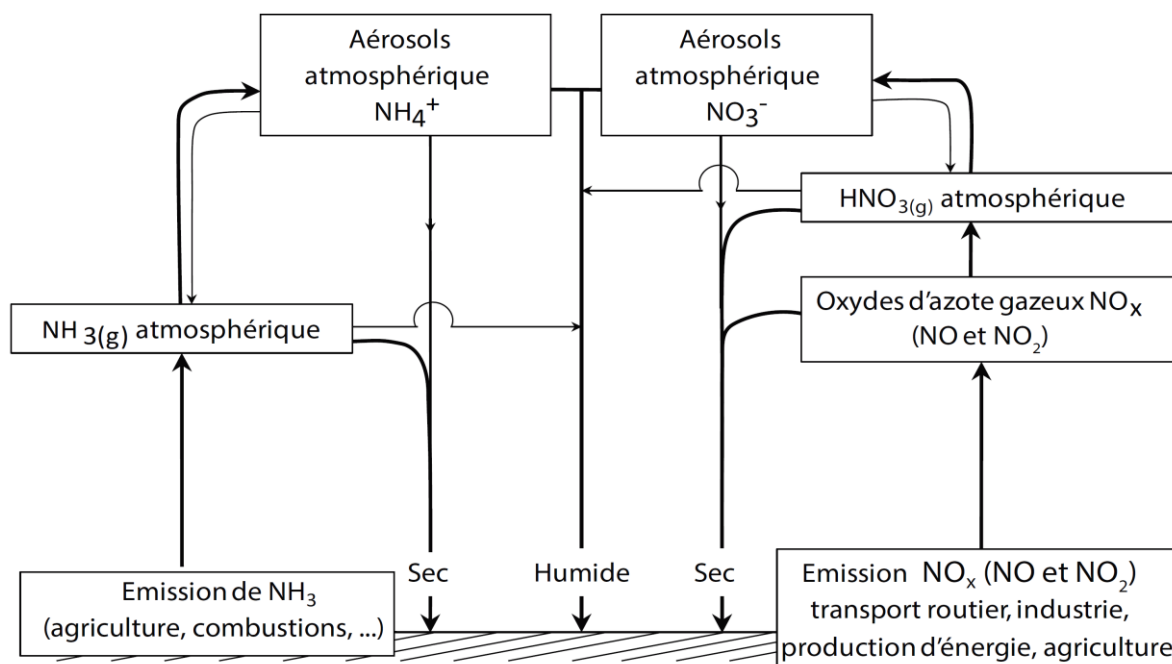
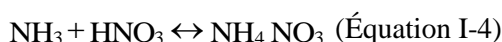


Figure I-8 : Voies principales de formation des dépôts azotés (Hertel *et al.*, 2012)

L'ammoniac est une forme basique de l'azote qui va participer à la neutralisation d'acides présents dans l'atmosphère tels que l'acide sulfurique (H_2SO_4), nitrique (HNO_3) et chlorhydrique (HCl). Ces réactions génèrent des particules de sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) et de chlorure d'ammonium (NH_4Cl) (Équations I-2 à 5) (Behera *et al.*, 2013; Hertel *et al.*, 2011).



L'affinité de l'ammonium pour l'acide sulfurique est supérieure à celle pour l'acide nitrique et l'acide chlorhydrique. C'est donc la réaction de l'ammonium et de l'acide sulfurique qui sera la première à se dérouler. Cette réaction étant considérée comme irréversible, seul l'ammonium non consommé par la réaction avec l'acide sulfurique pourra réagir avec les autres oxydes.

Les dépôts secs d'azote correspondent aux processus de transport des gaz (NH_3 , HNO_3 , NO , NO_2) et des aérosols à la surface du sol ou de l'eau, en l'absence de précipitations. Ce processus est continu et gouverné par les concentrations et les processus de transport (turbulence) dans l'air, par la nature chimique et physique des espèces ainsi que par la capacité de la surface à absorber ou adsorber ces espèces. La taille des particules entre aussi en jeu pour le processus de dépôt de ces dernières. Les gaz NH_3 , HNO_3 , NO_2 peuvent aussi être échangés au niveau de la surface des végétaux, par adsorption sur leur cuticule, ou au niveau de leur stomates (Hertel *et al.*, 2011). D'un point de vue spatial, les dépôts

secs d'ammoniac se concentrent à proximité des zones sources alors que les dépôts humides sont plus homogènes et prennent de l'importance à mesure de l'éloignement à la source (Cellier *et al.*, 2012).

Les dépôts humides d'azote sont les processus de remobilisation des particules et des gaz par le biais de précipitations (neige, pluies, brouillard). Les particules peuvent être captées par les précipitations selon deux processus : soit elles sont interceptées par la pluie ou la neige qui tombe (*washout*), soit ces particules sont intégrées aux nucléi des gouttes d'eau au sein des nuages (Hertel *et al.*, 2011).

I.2.2. Sortie d'azote des sols agricoles : export d'azote

Les cultures puisent de l'azote dans le sol pour assurer leur développement. La quantité d'azote extrait du sol qui est affecté aux parties du végétal qui sont récoltées correspond à l'export d'azote. Les teneurs en azote des différentes cultures vont varier selon l'espèce, la variété, les conditions climatiques lors de la croissance de la plante et la teneur en azote du sol.

Les racines des végétaux absorbent l'azote sous forme de nitrate, d'ammonium ainsi que sous forme de petites molécules organiques (Chaillou et Lamaze, 1997). La proportion d'azote assimilée sous forme organique n'est actuellement pas quantifiable (Näsholm *et al.*, 2009). Les préférences d'absorption entre les différentes formes d'azote varient avec leur concentration respective (Warren, 2009), la préférence d'absorption entre NH_4^+ et NO_3^- étant liée au pH du sol. Selon la forme d'azote présente dans le sol, la plante sera en situation de nutrition ammoniacale (pH bas inférieur à 5), à base de nitrate ou mixte si les deux formes coexistent. La nutrition mixte permettrait d'obtenir une production de matière sèche plus importante de 10 à 20% (Chaillou et Lamaze, 1997). Les préférence d'absorption varie aussi selon l'espèce végétale considérée et même selon les variétés pour le blé (O'Sullivan *et al.*, 2016).

D'après Touraine et Gojon (1997), l'absorption racinaire du nitrate est corrélée à la croissance des parties aériennes. Le contrôle de l'absorption de nitrate est sous-tendu par des signaux issus des parties aériennes vers les racines. Ces signaux sont émis en réponse à l'activité photosynthétique du végétal. La carence en azote de la plante augmente la capacité d'absorption du nitrate par les racines. Le prélèvement en nitrate opéré par les racines est donc déterminé par la demande en azote de la plante mais aussi par la disponibilité de l'azote dans le milieu (Lemaire *et al.*, 2008). Au cours de leur vie, les plantes stockent l'azote, assimilé essentiellement sous forme d'acides aminés et de protéines, dans leurs racines, tiges et graines. Les végétaux mobilisent ces réserves quand la croissance et le développement de nouveaux organes nécessitent des besoins en azote importants. Lors du passage en phase reproductrice, les capacités d'absorption du nitrate baissent fortement. Pour assurer le remplissage du grain, il se met en place un recyclage important de l'azote au sein du végétal. Dans le cas des cultures annuelles, l'essentiel de l'azote du grain provient de la remobilisation des réserves existantes dans les feuilles et les tiges. Dans le cas des plantes fourragères, l'ensemble des parties végétales laissées en place par la coupe ou le pâturage jouent le rôle d'organe-source alors que les parties aériennes en repousse constituent l'organe-puits le plus important (Masclaux-Daubresse *et al.*, 2010). Le prélèvement d'azote est donc variable au cours du développement des végétaux. Au sein de la plante, si l'absorption a lieu sous forme de NO_3^- , l'azote sera transformé en NH_4^+ puis en molécules

organiques. L'ammonium étant un composé toxique à faible concentration, ce dernier n'est pas accumulé dans les cellules végétales (Brugière *et al.*, 1997).

I.2.3. Transformations et transferts d'azote

L'azote intégré au sol va subir une série de transfert et de transformation entre ses différentes formes : la matière organique vivante (champignon, organismes et micro-organismes du sol), la matière organique morte (résidus végétaux et animaux, humus), les formes minérales réduites de l'azote (ammonium et ammoniac), les formes minérales oxydées de l'azote (nitrite, nitrate, monoxyde et protoxyde d'azote) et le diazote. La quantité d'azote disponible sous forme minérale ou organique résulte de la compétition entre plusieurs processus physiques, microbiens et physico-chimiques opposés qui alimentent ou qui consomment ces différentes formes de l'azote : l'organisation, la minéralisation, la dénitrification, la volatilisation et enfin la lixiviation (Roger-Estrade *et al.*, 2006). Les transformations purement chimiques entre les formes minérales de l'azote étant pour la plupart extrêmement lentes, l'essentiel du cycle de l'azote qui se déroule dans le sol est régi par l'action de micro-organismes (Mariotti, 1982).

I.2.3.1. L'organisation

L'organisation correspond à l'assimilation d'azote ammoniacal ou nitrique par les micro-organismes hétérotrophes du sol, dont la croissance et l'activité dépendent de la disponibilité du carbone organique assimilable (Roger-Estrade *et al.*, 2006). La rétention de l'azote au sein des cellules des micro-organismes est temporaire, le renouvellement de la population bactérienne mettant leur matière organique à disposition de la minéralisation rendant ainsi l'azote de nouveau disponible (Benbi et Richter, 2002).

I.2.3.2. La minéralisation

La minéralisation des matières organiques du sol (matière organique humifiée, résidus de cultures, déchets, engrais organiques, corps microbiens...) conduit à la formation d'azote ammoniacal. Elle est constituée de trois étapes : protéolyse, ammonification et nitrification.

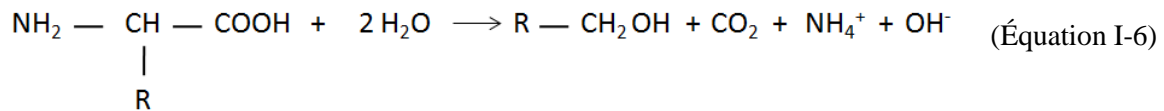
I.2.3.2.1. Protéolyse

La première étape de transformation des produits azotés dans le sol est la protéolyse. Ce processus est la transformation des protéines en polypeptides par la rupture des liaisons peptidiques. Il est réalisé par une microflore variée et peu spécifique. Les polypeptides sont à leur tour assimilés directement par les micro-organismes ou transformés en acides aminés. Une fois individualisés les acides aminés peuvent être désaminés, c'est-à-dire subir l'ammonification.

I.2.3.2.2. Ammonification

Il existe plusieurs voies possibles de désamination des acides aminés : hydrolyse avec ou sans décarbonatation (émission de CO₂) ou la réduction et oxydation avec décarbonatation.

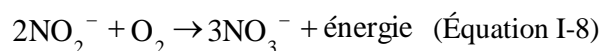
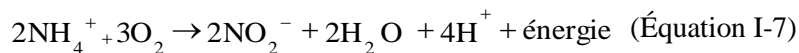
Selon le processus, un alcool (Équation I-6) ou un acide gras apparaît accompagné d'une libération de gaz carbonique et d'ions ammonium.



La microflore ammonifiante comporte de très nombreuses espèces de bactéries, d'actinomycètes et de champignons. Du fait de cette diversité, cette réaction présente peu d'exigences écologiques. Une partie de l'ammonium produit est aussitôt réutilisé par d'autres micro-organismes pour l'élaboration de leurs propres constituants (réorganisation). L'ammonification brute est la quantité d'ammonium réellement dégagée (mais inconnue), l'ammonification nette est la différence entre ammonification brute et la réorganisation. La présence de composés carbonés énergétiques favorise la réorganisation (Vilain, 1997b).

I.2.3.2.3. Nitrification

La nitrification est un phénomène biologique où l'azote ammoniacal est transformé en azote nitreux puis nitrique. Des bactéries chimiolithotrophes oxydent l'ammonium en nitrites (nitritation ou nitrosation, Équation I-7) puis d'autres en nitrates (nitratation Équation I-8). Les bactéries de la nitrification sont très spécifiques et peu nombreuses. La nitratation est réalisée par des bactéries comme *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, la nitratation par des bactéries comme *Nitrobacter*.



Les bactéries nitreuses ont peu d'exigences écologiques alors que les exigences des bactéries nitriques sont plus strictes. La nitrification est optimale pour un pH compris entre 4.5 et 7.5, une température comprise entre 25 et 30°C, une teneur en eau approchant la capacité au champ et une faible concentration en TAN (Total Ammonia Nitrogen : NH₄⁺ et NH₃). Hors des intervalles de ces optimums, la nitrification peut avoir lieu mais à des vitesses moins élevées (Cameron *et al.*, 2013; Haynes, 1986).

Les nitrates formés peuvent connaître différents devenir :

- immobilisation par les micro-organismes
- lixiviation
- dénitrification
- prélèvement par les plantes

La minéralisation et l'organisation, encore appelées "processus brut" interviennent simultanément, ce qui conduit au transfert continu de formes minérales de l'azote à des formes organiques et vice versa, formant le "cycle interne de l'azote" dans les sols (en anglais MIT pour Mineralization-Immobilization Turnover).

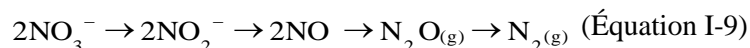
I.2.3.3. Volatilisation

La volatilisation est la perte d'ammoniac sous forme gazeuse. L'ammoniac est présent directement dans les déjections du cheptel ou dans la fertilisation minérale (Tableau I-1), il peut aussi être le produit de la décomposition des déjections animales (acide urique, urée, protéines non digérées) et de fertilisants minéraux contenant de l'azote sous forme ammoniacale comme l'urée ou l'ammonitrate (Tableau I -1). Il existe d'autres sources d'ammoniac mais ce gaz est surtout émis par les activités relatives à l'agriculture (98% en France en 2015 d'après CITEPA, 2017, 87% en 2005 à l'échelle du globe en 2005 d'après Behera *et al.*, 2013).

D'après Cellier *et al.*, (2012), les quantités volatilisées dépendent de trois facteurs principaux. Le premier est la concentration de la solution du sol en TAN (Total Ammonia Nitrogen : NH_4^+ et NH_3) qui va dépendre du type de fertilisant minéral employé ou, dans le cas des déjections du cheptel, des facteurs responsables de la variation de la quantité d'azote excrétée. Le deuxième facteur est la proportion de TAN sous forme d'ammoniac qui dépend de la température, du pH et des caractéristiques du sol. Les concentrations en ammoniac sont plus fortes en condition de pH et de température élevés. Une partie de l'ammonium est adsorbée sur les colloïdes négatifs du sol, ce qui empêche temporairement la transformation en ammoniac. Le dernier facteur est la résistance à la diffusion du gaz dans l'atmosphère qui dépend de la température, et de la concentration relatives des milieux aqueux (NH_3_{aq}) et gazeux (NH_3_{g}).

I.2.3.4. Dénitrification

La dénitrification est une réduction de nitrate en azote moléculaire. Ce processus peut avoir lieu si les conditions sont anoxiques, que le milieu est pourvu en nitrate (accepteur final d'électron) et qu'il présente une source d'un composé réducteur, source d'énergie. Ce processus est majoritairement le fait de bactéries anaérobies facultatives en situation d'anaérobie. Dans le cas où la dénitrification est effectuée par des bactéries hétérotrophes (les composés organiques sont la source d'énergie), comme par *Pseudomonas* ou *Thiobacillus*, le nitrate est réduit selon la séquence suivante dite de Paynes (Paynes, 1981 cité par Curie, 2006) (Équation I-9).



Selon les conditions physico-chimiques du milieu et les capacités des bactéries présentes, la séquence de réduction peut s'arrêter au protoxyde ou au monoxyde d'azote (Hénault et Germon, 1995).

Dans le cas d'une dénitrification autotrophe, la source d'énergie est un composé inorganique, par exemple la pyrite.

La dénitrification est influencée par la teneur en eau du sol. Lorsque cette dernière dépasse la capacité au champ, le potentiel de dénitrification augmente. Actuellement, il est considéré qu'une augmentation de la teneur en azote ammoniacal (NH_4^+ et NO_3^-), de la teneur en carbone du sol et de la température augmentent la dénitrification. Le pH influence surtout la proportion de protoxyde et de monoxyde d'azote émis (Cameron *et al.*, 2013).

I.2.3.5. Lixiviation

La lixiviation des nitrates est l'entraînement d'ions par l'eau de percolation, aussi appelée lame d'eau drainante (Leterme *et al.*, 1997). L'étude des modalités de la lixiviation et des relations avec des systèmes de culture nécessite de considérer simultanément 4 dynamiques (Capillon, 1992 cité dans Leterme *et al.*, 1997) : (i) la minéralisation des matières organiques du sol (partie I.2.3.2.) et des apports de l'agriculteur (engrais minéraux, effluents organiques) (ii) les besoins en azote des peuplements végétaux, fonction de leur nature et de leur stade de développement (iii) l'accessibilité du nitrate liée au développement du réseau racinaire (iv) la circulation des eaux dans le sol, fonction des précipitations, du régime d'évapotranspiration et de la capacité de rétention de l'eau du sol. La dynamique hydrique correspond à l'évolution au cours du temps des différents devenir possibles de l'eau : ruissellement en surface, infiltration dans le sol avec rétention dans les horizons colonisés par les racines si le sol n'est pas saturé ou percolation en profondeur dans le cas contraire.

I.3. Modélisation du devenir de l'azote dans les agrosystèmes

Les modèles numériques peuvent décrire l'ensemble des processus du cycle de l'azote au niveau des agrosystèmes (modèles de cultures) ou seulement les flux entrant et sortant des sols agricoles (balances azotées).

I.3.1. Les modèles de culture : l'exemple de STICS

Les modèles de culture sont des modèles à base physique permettant de simuler la croissance des cultures en tenant compte de l'ensemble des paramètres physiques, chimiques et biologiques ayant un impact sur la croissance du végétal.

Le modèle STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) simule l'évolution du système plante-sol à un pas de temps journalier sur un ou plusieurs cycles culturaux. Ce modèle à base physique repose sur la mise en équation de l'ensemble des processus qui vont pouvoir modifier la croissance du végétal et qui sont relatifs à l'écophysiologie des cultures (phénologie, croissance des pousses, rendement), les relations du végétal avec le compartiment souterrain (croissance des racines, flux et transferts d'eau et d'azote) et les pratiques agricoles (irrigation, calendrier de fertilisation et nature, labour, succession des cultures) (Brisson *et al.*, 2008). En particulier, le modèle STICS va modéliser l'ensemble du cycle de l'azote à l'échelle d'une parcelle considérée (prélèvement de l'azote par les plantes et croissance du végétal, minéralisation de la matière organique, volatilisation...). Le fonctionnement de ce modèle implique de renseigner de nombreuses données (stock d'azote initial du sol, variables météorologiques, caractéristiques pédologiques, ...). En retour, le modèle donne accès à

de nombreux résultats sur le devenir de l'azote dans l'agrosystème comme le rendement des cultures, la quantité d'azote lixiviée, le stockage de l'azote dans le sol. STICS permet une évaluation de mesures d'atténuation de la pollution azotée proposée dans les directives européennes, comme la réduction de la quantité de fertilisants introduit et l'utilisation de CIPAN (Ledoux *et al.*, 2007).

Cependant, les paramètres et les données requis pour le fonctionnement du modèle peuvent être inconnus ou seulement disponibles à une échelle plus large que celle envisagée pour la modélisation. Par exemple, la capacité au champ, le point de flétrissement ou la conductivité hydraulique sont souvent absentes des bases de données de sol. Elles sont alors évaluées à partir de règles de pédotransfert qui peuvent faire varier les valeurs de ces paramètres du simple au triple selon le paramétrage de celle-ci (Silgram *et al.*, 2009).

I.3.2. Les balances azotées

À l'inverse des modèles de cultures qui vont simuler le développement des végétaux à pas de temps régulier par le biais d'équations représentant chaque processus du système sol - plante, les balances azotées sont établies le plus souvent sur une année culturale. Le développement de la culture n'est pas modélisé, le rendement de la culture est issu de données de production. Seuls les flux de nutriments (azote en particulier) sont décrits dans les balances. Les balances azotées sont basées sur le principe de conservation des composés azotés au niveau d'un agrosystème. Elles permettent le calcul de surplus azotés (Équation I-10) qui sont considérés comme de bons indicateurs de la pression azotée agricole (EEA, 2001) et des émissions d'azote vers l'atmosphère et l'hydrosystème (Velthof *et al.*, 2011).

$$N_{\text{entrées}} - N_{\text{sorties}} = \text{Surplus}_N \quad (\text{Équation I-10})$$

Il existe plusieurs types de balances azotées selon la définition des limites du système sur lequel elles sont appliquées :

- le bilan apparent à l'exploitation ;
- les balances azotées de surface du sol ;
- les bilans azotés sol - système.

Ces limites sont importantes car elles définissent les flux d'azote à estimer dans le calcul de la balance.

I.3.2.1. Le bilan apparent à l'exploitation

Les balances azotées à l'échelle de l'exploitation considèrent les limites de l'exploitation comme étant les limites du système. Ce type de balance permet d'estimer une pression globale sur une exploitation donnée (Bockstaller *et al.*, 2012). Les flux d'azote entrant et sortant sont l'azote contenu dans :

- la nourriture achetée ou vendue pour l'alimentation du troupeau ;
- les fertilisants azotés organiques ou minéraux ;
- les litières achetées ou vendue (paille) ;
- les cultures et les productions animales vendues hors de l'exploitation (viande, lait, céréales...) ;
- la fixation symbiotique ;
- les dépôts atmosphériques d'azote.

Les balances azotées à l'exploitation ont été utilisées pour comparer l'efficacité de différents types d'exploitation dédiées à l'élevage, en Italie, montrant une efficacité de l'azote décroissante pour les types d'élevage suivants : élevage de vaches nourrices > élevage de bœufs = élevage de vaches laitières > élevage de porcs (Bassanino *et al.*, 2007). À l'échelle de grands bassins versants, le surplus calculé à partir de cette balance a été appelé "apport net d'azote anthropique" (NANI *Net Anthropogenic Nitrogen Input*) (Howarth *et al.*, 1996 cité dans Billen *et al.*, 2011). Le NANI est un indicateur de la perturbation anthropique du cycle de l'azote qui montre la dépendance d'un bassin versant vis-à-vis des sources extérieures d'azote.

Ce type de balance est aussi utilisé dans une version simplifiée pour laquelle seuls les flux d'azote qui transitent "par la porte de l'exploitation", c'est-à-dire les imports et les exports de nourriture, de fertilisant, de produits animaux ou végétaux, sont pris en compte. Ce type d'approche a permis de montrer l'amélioration de la performance d'élevage de vaches laitières en Irlande entre 2006 et 2012, supportée par la baisse de l'import de fertilisants minéraux et la hausse de la productivité laitière (Buckley *et al.*, 2015).

I.3.2.2. Les balances azotées de surface du sol

Les balances azotées de surface du sol comptabilisent les entrées et les sorties d'azote qui transitent au niveau d'un sol agricole. Le surplus calculé comme le solde entre les entrées et les sorties d'azote correspond à la quantité d'azote introduite dans le sol mais non récupérée par le biais des récoltes (Équation I-11).

$$\text{Surplus} = N_{\text{Fix}} + N_{\text{Org}} + N_{\text{Min}} + N_{\text{Air}} - N_{\text{Exp}} \text{ (Équation I-11)}$$

avec

- Entrées d'azote dans le sol

N_{Fix} , la fixation symbiotique

N_{Air} , le dépôt atmosphérique

N_{Org} , la fertilisation organique

N_{Min} , la fertilisation minérale

- Sorties d'azote du sol

N_{Exp} , l'export d'azote par les récoltes

Les hypothèses nécessaires pour ce calcul les suivantes : estimation des processus de volatilisation et de dénitrification à partir de l'apport d'azote par les fertilisants organiques et minéraux ; estimation de la fixation symbiotique ; estimation de la teneur en azote des cultures et des déjections du cheptel. Les balances azotées de surface du sol ont été utilisées pour estimer les pressions azotées à fine échelle, au niveau des communes d'un länders allemand, permettant ainsi l'identification des surfaces vulnérables à la pollution azotée recommandée par la directive cadre sur l'eau (Bach et Frede, 2005). En France, le

modèle NOPOLU, développé sur les principes des balances azotées de surface du sol, a permis l'estimation de surplus azotée à l'échelle du canton pour les années 2007 et 2010 (SOeS, 2012, 2013).

I.3.2.3. Le bilan azoté sol - système ou bilan de masse

Le bilan sol - système est classé parmi les balances azotées car il ne modélise pas le développement du végétal. À la différence des autres balances azotées, ce modèle ne calcule pas de surplus puisqu'il prend en compte l'ensemble des flux d'azote entrant et sortant sur le système sol - plante et tient compte de l'évolution du stock d'azote du sol (Équation I-12) (d'après COMIFER, 2013, modifié pour la prise en compte de l'érosion).

$$R_f - R_i = \left[M_h + F_s + F_{ns} + M_{hp} + M_r + M_{rCi} + M_{pro1} + M_{pro2} + A + N_{irr} + X + X_{pro} \right] - \left[P_f - P_i + I_x + G_s + G_x + L + E \right]$$

(Équation I-12)

avec

- Caractérisation de l'état initial et final du sol

R_f et R_i , la quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture et à l'ouverture du bilan respectivement.

R_i intègre la quantité d'azote minéral présent à l'ouverture du bilan quelle qu'en soit l'origine

- Entrée d'azote dans le système sol - plante

M_h , la minéralisation nette de l'humus du sol

F_s , la fixation symbiotique

F_{ns} , la fixation non symbiotique

M_{hp} , la minéralisation nette due à un retournement de prairie

M_r , la minéralisation nette des résidus de récolte

M_{rCi} , la minéralisation nette de résidus de cultures intermédiaire

M_{pro1} , la minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO (Produit Résiduaire Organique : déjection du cheptel, boues de station d'épuration, eaux blanches de papeteries...) apporté avant ouverture du bilan

M_{pro2} , la minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO apporté après l'ouverture du bilan

A , les apports atmosphériques secs et humides

N_{irr} , l'azote apporté par l'eau d'irrigation

X , l'apport d'azote sous forme d'engrais minéral de synthèse

X_{pro} , l'azote de la fraction minérale d'un PRO apporté après la date d'ouverture du bilan

- Variables concernant les sorties d'azote du système sol - plante

P_f , la quantité d'azote absorbée par la culture à la fermeture du bilan (= besoin d'azote de la culture)

P_i , la quantité d'azote absorbée par la culture à l'ouverture du bilan

I_x , l'organisation par voie microbienne aux dépens de l'azote minéral apporté sous forme d'engrais de synthèse ou fraction minérale du PRO

G_s , les pertes du sol par voie gazeuse

G_x , les pertes par voies gazeuses (volatilisation, dénitrification) aux dépens de l'engrais minéral (X) et de la fraction minérale du PRO apporté après l'ouverture du bilan (X_{pro})

L, les pertes par lixiviation du nitrate pendant l'ouverture du bilan

E, la perte d'azote par érosion diffuse ou particulière

Les hypothèses et/ou les données nécessaires pour calculer ce type de balance sont nombreuses : le stock d'azote du sol en début et fin de bilan, teneur en azote des cultures et des fertilisants organiques, volatilisation et dénitrification, taux de minéralisation des résidus de culture, fixation symbiotique, lixiviation d'azote... Le calcul de ce type de bilan sol - système nécessite de statuer sur de nombreux paramètres et/ou de mesurer de nombreuses variables. Ce type de bilan est plutôt applicable à fine échelle sur des sites instrumentés où l'ensemble des variables peut être mesurées. Ross *et al.*, (2008) ont ainsi quantifié l'ensemble des flux d'azote (dépôt atmosphérique, fixation symbiotique et non symbiotique, fertilisation minérale et organique, apport par les semences, export d'azote par les cultures, pertes gazeuses, lixiviation, perte d'azote par ruissellement) sur une période de 25 ans pour trois systèmes de culture différents au Canada. Deux de ces bilans ont été validés par la mesure de la variation du stock d'azote du sol, ce qui a permis de montrer que le système de culture basé sur des apports organiques permettait d'augmenter quasiment deux fois plus le stock d'azote du sol que le système basé sur l'apport d'azote par fertilisation minérale.

I.3.2.4. Choix du modèle

Le choix d'un modèle pour l'estimation des pressions azotées dépend à la fois de la puissance explicative recherchée (pression sur l'hydrosystème pour les balances azotées de surface du sol, impacts potentiels dans le cas des modèles de culture), mais aussi de la complexité de mise en œuvre (hypothèses sur les processus, données nécessaires et disponibles). (Figure I-9).

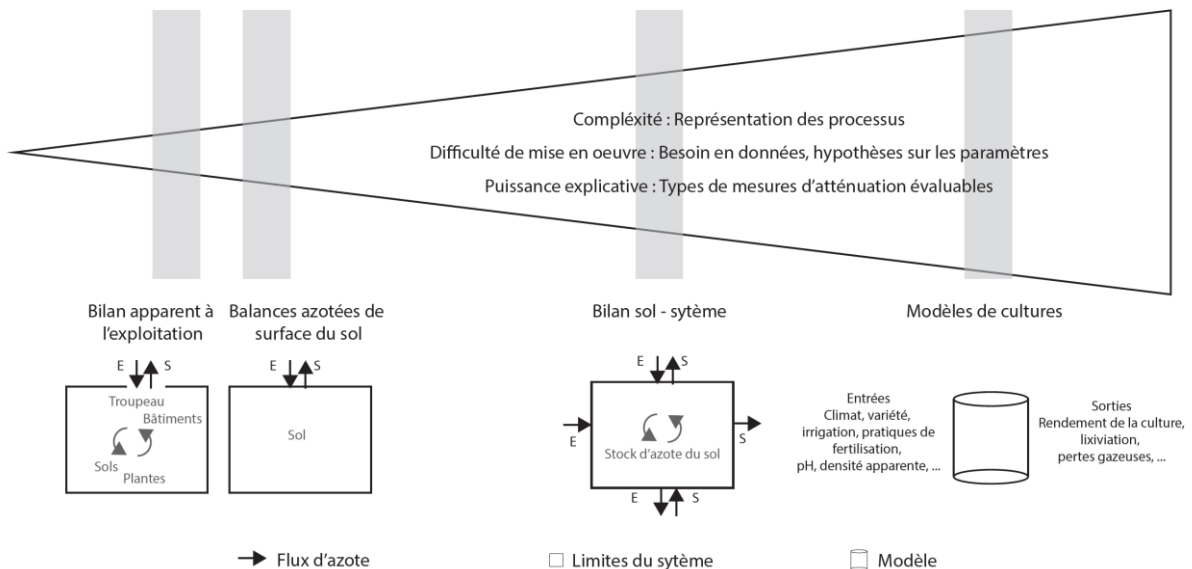


Figure I-9: Différences conceptuelles entre les limites des systèmes et les flux d'azote considérés dans les balances azotées, classement qualitatif des modèles selon leur complexité, leur difficulté de mise en œuvre et leur puissance explicative (modifié d'après Bockstaller *et al.*, 2012; Bouraoui et Grizzetti, 2014)

La thèse présentée ici poursuit plusieurs objectifs. Dans un premier temps, il s'agissait de pouvoir répondre au besoin d'évaluation des pressions azotées sur le territoire national à fine échelle sur la période récente dans le cadre de l'Etat de lieux de la directive nitrates de 2019. Au vu de la couverture spatiale et temporelle visée, le choix d'estimer les pressions via un modèle de balance azotée s'est rapidement imposé. L'équilibre entre les hypothèses à effectuer et la complexité de mise en œuvre a orienté le choix vers les balances azotées de surface du sol.

Un deuxième objectif vise à calculer des chroniques de surplus azoté sur le long terme à l'échelle de masses d'eau afin d'estimer l'évolution des pressions azotées sur l'ensemble du territoire et leurs facteurs de contrôle.

I.4. Problématique de la thèse

Actuellement, les balances azotées de surface du sol qui ont été appliquées au territoire Français ne répondent pas aux objectifs fixés précédemment. Le modèle actuel de référence du calcul des pressions azotées en France, NOPOLU, propose des résultats spatialisés à une échelle relativement fine, les cantons, mais seulement 2 années d'application et de résultats sont connues, 2007 (SOeS, 2012) et 2010 (SOeS, 2013). À l'opposé, des chroniques de surplus azotés calculés à partir de balances azotées de surface du sol sont disponibles à l'échelle du pays entier (Bouraoui et Grizzetti, 2011), occultant ainsi les disparités régionales et leur évolutions. La difficulté principale est donc d'obtenir à la fois des chroniques longues durée tout en visant des échelles spatiales relativement fine. Le choix des données et leur mise en forme se révèle être une étape cruciale pour le calcul de chroniques à fine échelle. D'autre part, la question se pose de savoir comment rendre compte de la variété des situations à fine échelle au travers des paramètres utilisés dans le modèle de balance azotée de surface de sol.

L'évolution de l'agriculture en France au cours du XXe siècle, avec en particulier une modernisation rapide à partir de 1945 (Deléage, 2013) et une législation visant à contrôler l'apport d'azote aux zones agricoles en 1991 avec la directive nitrate, met clairement en avant l'intérêt de regarder l'évolution des pressions sur une chronique de surplus azoté qui engloberait la révolution verte pour aller jusqu'aux années récentes, incluant ainsi la directive nitrates. Avec de telles chroniques, établies à une échelle infranationale, il serait alors possible d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : Quelles sont les tendances suivies par les surplus ? Sont-elles homogènes au sein du territoire ? Est-il possible de considérer que les surplus sont sous l'influence de variables prépondérantes ? Ces facteurs de contrôle de l'évolution des surplus sont-ils restés les mêmes après la modernisation de l'agriculture avec la révolution verte ? Sont-ils les mêmes pour l'ensemble du territoire ?

Pour répondre à ces questions, le mémoire présente le travail effectué en trois grandes parties (Figure I-10). Le chapitre 2 décrit l'architecture d'un modèle de balance azoté de surface du sol, développé au cours de cette thèse, CASSIS_N, dédié au calcul des surplus azotés sur l'ensemble du territoire et sur la période la plus longue possible. La sélection et la mise en forme des données nécessaires au fonctionnement du modèle sont aussi présentées dans ce chapitre. Les deux chapitres suivants présentent les résultats et l'analyse de ces résultats à deux échelles spatiales emboîtées. Le chapitre 3 est consacré à l'analyse des tendances et des facteurs de contrôle des valeurs surplus azotés à l'échelle départementale sur 99 années de résultats. Le chapitre 4 présente les résultats de la modélisation à une

échelle plus fine : la commune, en mettant l'accent sur l'analyse des facteurs de contrôle de la variabilité des surplus azotés communaux ainsi que la comparaison avec le modèle NOPOLU pour l'année 2010. Le chapitre 5 a pour objet les conjectures émises sur l'évolution des facteurs qui jouent sur les pressions azotées. La dernière partie du manuscrit présente la conclusion générale de la thèse ainsi que l'utilisation des résultats du travail réalisé au cours de cette thèse dans des domaines appliqués et pour des perspectives de recherche.

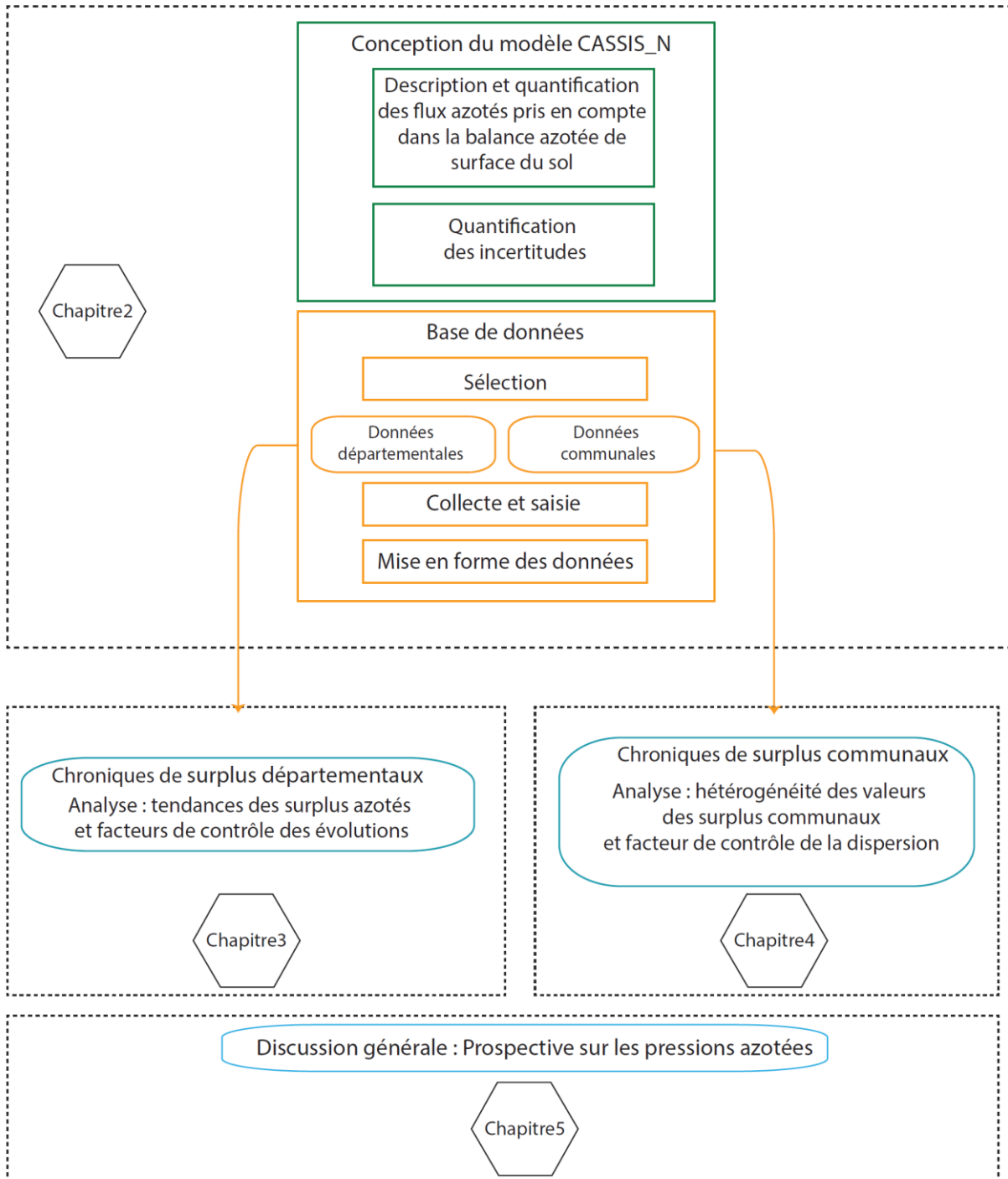


Figure I-10 : Organisation du mémoire

II. Chapitre 2 : Matériels et méthodes

Le modèle développé dans le cadre de cette thèse vise à calculer des surplus azotés d'après le principe des balances azotées de surface du sol (partie II-1). Le modèle ayant pour but d'être appliqué sur l'ensemble du territoire français et sur une période longue, une attention particulière a été apportée quant au choix des valeurs pour les paramètres du modèle de façon à rendre compte, au mieux, de la diversité des situations agricoles (partie II.2.B.). Du fait de cette diversité, il existe une incertitude sur les paramètres du modèle. Les données ont aussi été considérées comme entachées d'incertitude. Une méthode de quantification de l'imprécision sur le résultat, générée par l'incertitude sur les paramètres et les données, d'entrée a été établie (partie II.4).

Les différentes étapes de calcul des chroniques de surplus azotées et leurs incertitudes associées sont récapitulées dans la figure II-1.

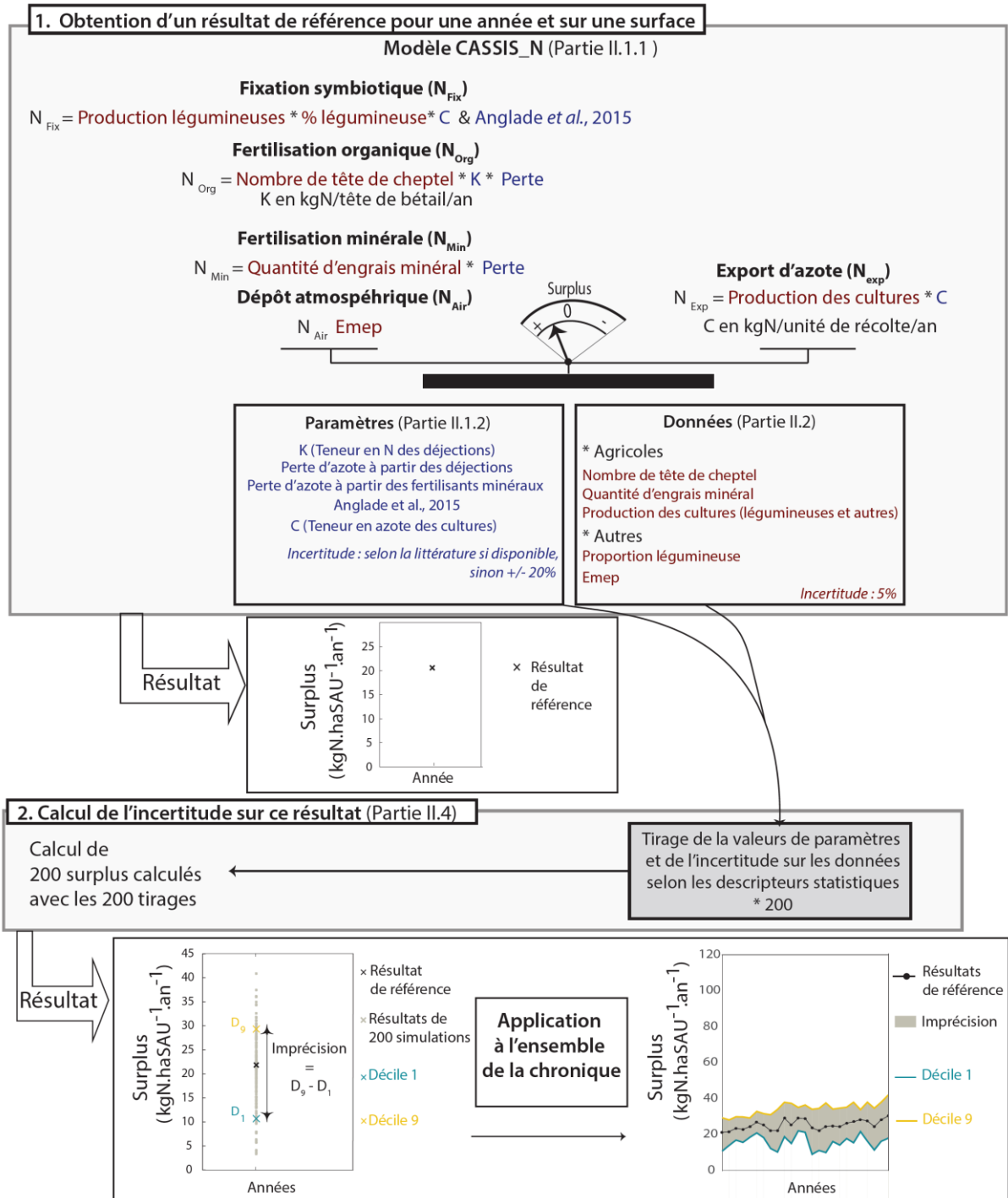


Figure II-1 : Etapes de calcul des chroniques de surplus azotés et leurs incertitudes associées par le modèle CASSIS_N

II.1. Le modèle CASSIS_N

II.1.1. Calcul des postes de la balance azotée de surface du sol

Le modèle CASSIS_N permet de calculer un surplus azoté annuel à l'issue d'une année culturale sans prise en compte de l'effet suivant et de l'effet précédent des cultures (pas de prise en compte des rotations culturales, ni l'évolution du stock d'azote du sol). Le modèle a été codé en C++.

Le surplus est calculé comme le solde entre les entrées et les sorties d'azote du sol (Équation II-1 et Figure II-2).

$$\text{Surplus} = N_{\text{Fix}} + N_{\text{Air}} + N_{\text{Min}} + N_{\text{Org}} - N_{\text{Exp}} \quad (\text{Équation II-1})$$

avec N_{Fix} l'azote fixé par les légumineuses à partir du diazote atmosphérique, N_{Air} la déposition atmosphérique, N_{Min} et N_{Org} l'azote apporté respectivement par la fertilisation minérale et organique et N_{Exp} la quantité d'azote exportée du sol par les récoltes.

L'ensemble des postes (fixation symbiotique, dépôt atmosphérique, fertilisation minérale, fertilisation organique, exportation d'azote) étant normalisé par la Surface Agricole Utile (SAU), exprimée en hectare (notée S_{SAU} par la suite), les valeurs sont donc exprimées en $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \text{SAU} \cdot \text{an}^{-1}$.

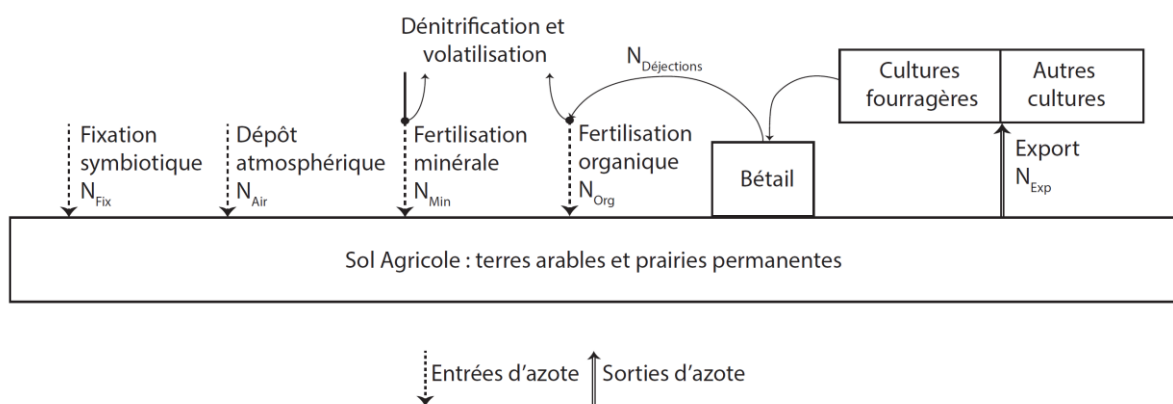


Figure II-2: Flux d'azote pris en compte dans le modèle CASSIS_N

II.1.1.1. Fixation symbiotique (N_{Fix})

La fixation du diazote atmosphérique est effectuée par des plantes de la famille des légumineuses dont certaines sont cultivées pour leur intérêt dans l'alimentation humaine ou animale (Tableau II-1). Leur culture représente un apport d'azote au système agricole par le biais de la fixation symbiotique.

Tableau II-1 : Liste des légumineuses prises en compte dans CASSIS_N

Nom commun	Nom scientifique (genre)	Utilisations principales
Luzerne	<i>Medicago</i>	Affouragement des animaux d'élevage
Trèfle	<i>Trifolium</i>	Affouragement des animaux d'élevage
Sainfoin	<i>Onobrychis</i>	Affouragement des animaux d'élevage
Lotier	<i>Lotus</i>	Affouragement des animaux d'élevage
Fève	<i>Vicia</i>	Alimentation humaine et animale
Féveroles	<i>Vicia</i>	Alimentation humaine et animale
Soja	<i>Glycine</i>	Alimentation humaine et animale
Lupin	<i>Lupinus</i>	Affouragement des animaux d'élevage
Pois protéagineux	<i>Pisum</i>	Alimentation animale
Petit pois	<i>Pisum</i>	Alimentation humaine
Haricot vert	<i>Phaseolus</i>	Alimentation humaine
Haricot secs	<i>Phaseolus</i>	Alimentation humaine
Lentille	<i>Lens</i>	Alimentation humaine
Pois chiche	<i>Cicer</i>	Alimentation humaine

Dans leur article de synthèse sur les mesures de la fixation symbiotique, Anglade *et al.* (2015) proposent une formule de calcul de la quantité de N₂ fixée par les légumineuses, fonction du rendement en azote des cultures considérées et dont les paramètres varient selon l'espèce considérée (Équation II-2).

$$N_{\text{Fix}} = \sum_{\text{cultures_fixatrices}} \left(\left[\alpha_{\text{culture_fixatrice}} * \frac{Y_{\text{culture_fixatrice}}}{\text{NHI}} + \beta_{\text{culture_fixatrice}} \right] * \text{BGN} * S_{\text{culture_fixatrice}} \right) / S_{\text{SAU}}$$

(Équation II-2)

avec $\alpha_{\text{culture_fixatrice}}$ et $\beta_{\text{culture_fixatrice}}$ des coefficients dépendant du type de culture; NHI le *N Harvest Index* c'est à dire le ratio entre le contenu en azote de la partie récoltée d'une plante et le contenu en azote du reste de la partie aérienne de la plante (Tableau II-2) ; BGN un facteur multiplicatif permettant de prendre en compte la contribution de la partie souterraine de la plante à la fixation symbiotique (1.3 pour les légumineuses grain et 1.7 pour les légumineuses fourragères) ; $Y_{\text{culture_fixatrice}}$ le rendement en kgN.ha⁻¹ et $S_{\text{culture_fixatrice}}$ la surface cultivée de la légumineuse considérée.

Tableau II-2: Coefficients utilisés pour le calcul de la fixation symbiotique (d'après Anglade *et al.*, 2015)

Nom commun	$\alpha_{\text{culture_fixatrice}}$		$\beta_{\text{culture_fixatrice}}$		NHI	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Luzerne	0.81	0.03	-13.9	3.35		
Trèfle	0.78	0.02	3.06	2.1		
Autres légumineuses fourragères (sainfoin, lotier)	0.79	0.02	-0.49	1.89		
Fève et féveroles	0.73	0.05	5.45	7.64	0.74	0.06
Pois protéagineux	0.66	0.02	4.32	2.27	0.75	0.04
Lentille	0.64	0.02	3.32	2.41	0.75	0.05
Autres légumineuses graines (petit pois, haricot sec, haricot vert, pois chiche, soja, lupin)	0.7	0.02	1.01	2.46	0.75	0.05

Certaines cultures fourragères associent des légumineuses et des graminées : les prairies temporaires et les prairies permanentes. Les prairies temporaires sont des surfaces en généralensemencées d'un mélange de légumineuses et de graminées fourragères (par exemple luzerne et dactyle - *Dactylis glomerata*-, trèfle violet et ray-grass - *Lolium perenne*-) ou plus rarement d'une culture pure de

graminées. La surface consacrée à cette culture doit être ensemencée depuis moins de 4 ans. Les prairies permanentes sont des surfaces utilisées hors assolement, dédiées à des fins de production fourragère herbacée, auxquelles elles sont consacrées pour une durée de 5 ans ou plus.

L'équation 2 est adaptée au calcul de la fixation symbiotique par des cultures de légumineuses pures. Pour les cultures présentant un mélange de légumineuse et d'un autre type de végétaux, la quantité d'azote fixée est pondérée par la proportion de légumineuse présente dans la culture. D'après les experts du CORPEN, la proportion de légumineuse fourrage dans les prairies permanentes et temporaires est respectivement de 15 et 30%. La production des légumineuses issue des prairies est calculée à partir de la matière sèche récoltée modulée par le coefficient adapté (15 ou 30%).

II.1.1.2. Fertilisations organiques (N_{Org}) et minérales (N_{Min})

La quantité d'azote introduit par les fertilisations minérales (Équation II-3) et organiques (Équation II-4) est calculée en tenant compte des quantités d'azote perdues par volatilisation et dénitrification. La quantité totale de fertilisation est tout d'abord déterminée, puis l'application d'un coefficient multiplicateur (K_j pour la fertilisation minérale et C_i pour la fertilisation organique) permet de soustraire l'azote perdu par les phénomènes de volatilisation et de dénitrification.

II.1.1.2.1. Fertilisation minérale

La quantité d'azote minéral qui entre effectivement dans le sol (N_{Min}) est calculée comme la somme des quantités d'azote sous les différentes formes d'engrais minéral azoté modulée d'un facteur dépendant du type d'engrais et qui représente la perte d'azote vers l'atmosphère (Équation II-3):

$$N_{Min} = \sum_{j=1}^m F_j * K_j / S_{SAU} \quad (\text{Équation II-3})$$

avec N_{Min} exprimée en $kg\ N.ha^{-1}SAU.an^{-1}$; j les différents types d'engrais minéraux (ammonitrate, engrais composés...) ; F_j la quantité des différents types de fertilisants minéraux (en kgN) (Tableau II-3) et K_j un coefficient variable selon le type de fertilisant appliqué représentant la proportion d'azote épandu qui n'est pas perdu par volatilisation.

Tableau II-3 : Engrais azotés minéraux pris en compte dans le modèle

Genre d'engrais	Nom
Simple ¹	Ammonitrate
Simple	Sulfates d'ammonium
Simple	Nitrates de calcium (13 à 15% et 15.5%)
Simple	Nitrates de sodium
Simple	Urée
Simple	Solutions
Simple	Ammoniac
Simple	Cyanamide
Simple	Divers
Composés ²	Binaires
Composés	Ternaires

¹ Les engrais simples contiennent une teneur connue en un seul élément nutritif, ici l'azote.

² Les engrais composés contiennent une teneur connue en plusieurs éléments chimiques

II.1.1.2.2. Fertilisation organique

La quantité d'azote excrété par une catégorie de cheptel est calculée à partir du nombre de têtes de cheptel et de l'excrétion moyenne de cette catégorie. La somme de l'excrétion provenant de toutes les catégories de cheptel permet d'obtenir l'excrétion totale pour la surface considérée. La fertilisation organique (N_{Org}) est calculée à partir de la quantité d'azote totale excrétée par le cheptel, modulée par un coefficient C_i qui représente la proportion d'azote excrété qui n'est pas perdu vers l'atmosphère (Équation II-4).

$$N_{Org} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Nb_j * E_j * C_i / S_{SAU} \text{ (Équation II-4)}$$

avec N_{Org} exprimée en $kg N \cdot ha^{-1} SAU \cdot an^{-1}$; i les différentes catégories de bétail (bovin, caprin...) ; j les différentes classes de bétail (vaches laitières, vaches nourrices, veau...) ; Nb_j le nombre par classe de bétail et E_j l'excrétion (en $kgN \cdot tête^{-1}$) pour chaque classe de bétail.

II.1.1.3. Dépôt atmosphérique (N_{Air})

L'apport d'azote par les dépôts atmosphériques d'azote secs et humides a été calculé à partir des données de l'EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme). Les valeurs brutes de l'EMEP, données au niveau d'une grille de $50 km * 50 km$ ont été agrégées pour obtenir des données départementales qui sont supposées constantes sur la période d'étude.

II.1.1.4. Export d'azote (N_{Exp})

II.1.1.4.1. Principe général

La quantité d'azote exporté (N_{Exp} en $kg N \cdot ha^{-1} SAU \cdot an^{-1}$) est calculée en fonction de la quantité récoltée pour chaque culture ($Pdt_{culture}$) et sa teneur en azote ($N_{culture}$ en $kgN \cdot q^{-1}$) (Équation II-5). Deux types de productions, la production d'herbe par les prairies permanentes et la production de paille, constituent des cas particuliers dont la prise en compte est détaillée ci-dessous.

$$N_{Exp} = \sum_{culture} (Pdt_{culture} * N_{culture}) / S_{SAU} \text{ (Équation II-5)}$$

II.1.1.4.2. Cas particulier de l'estimation de la production par les prairies permanentes

Au contraire des autres cultures, la production réelle des prairies permanentes est difficile à évaluer puisqu'une part relativement importante est exploitée en pâturage (49% en 1929 (Ministère de l'agriculture, 1929) , 57% en 1982 (SCEES, 1984), 56% en pâturage uniquement et 36% par pâturage et fauchage en 1998 (Agreste, 2000a)). Il est difficile d'estimer le prélèvement d'herbe par via ce mode d'exploitation des prairies permanentes.

Des estimations de la productivité potentielle des prairies permanentes peuvent être faite au travers d'estimations dépendant des potentialités agropédoclimatiques, des pratiques culturales (fertilisation par exemple) et des pertes à la récolte et au transport (SCEES, 1981) ou au travers de modèles de culture comme le modèle ISOP (Ruget *et al.*, 2006). Ces méthodes de calcul surestiment la production des prairies permanentes par rapport à ce qu'il est réellement récolté et l'utilisation de ces valeurs dans CASSIS_N conduirait à surestimer l'export d'azote de la balance azotée. La production d'herbe (et donc l'export d'azote) par les prairies permanente est donc estimée à partir de valeurs de production potentielle, ajustées en fonction de l'importance du bétail à nourrir.

La production des prairies permanentes étant exclusivement destinée à l'affouragement du bétail, il est possible de calculer la production des prairies permanentes en fonction de la quantité de matière sèche nécessaire pour nourrir le bétail (besoin fourrager) et de la production des autres fourrages produits sur les terres arables. Les fourrages issus de terres arables possèdent des qualités recherchées en zootechnie mais ils sont aussi plus couteux à produire que les fourrages issus des prairies permanentes (achat de semence, labour et semis, entretien et récolte de la culture fourragère). Ces fourrages produits sur les terres arables sont :

- les fourrages annuels. Ce sont les cultures fourragères récoltées tous les ans. Une culture de fourrage annuel n'occupera une surface qu'une seule année. C'est dans cette catégorie qu'est classé le maïs fourrage dont la valeur énergétique en fait un fourrage particulièrement apprécié.
- les prairies artificielles. Ce sont des prairies constituées exclusivement de légumineuses fourragères (luzerne, sainfoin, trèfle,...). Leur installation sur la même parcelle dure une ou plusieurs années mais toujours moins de 5 ans. Ces cultures sont appréciées pour leur teneur en protéines.
- les prairies temporaires. Ce sont des prairies constituées de graminées (ray grass par exemple) en culture pure ou associées à des légumineuses fourragères. Leur installation sur la même parcelle dure une ou plusieurs années mais toujours moins de 5 ans.
- les racines et tubercules fourragers (RTF). Ce sont des espèces à cycle annuel caractérisées par la production d'organes végétatifs de réserve qui seront distribués au bétail. La betterave et le chou fourrager font partie de cette catégorie.

Les fourrages issus des terres arables étant plus couteux à produire, l'hypothèse que l'ensemble de la production de ces derniers est utilisé pour combler le besoin fourrager semble correcte.

L'estimation de la quantité de matière produite par les prairies permanentes a donc été effectuée en trois étapes.

- Étape 1 : Calcul du besoin fourrager sur une surface considérée à l'aide de la variable UGB_g (Unité Gros Bétail alimentation grossière)

La variable UGB_g permet de comparer les animaux en fonction de leur consommation en aliments grossiers (matière sèche du fourrage) (Agreste, 2010a). Chaque catégorie de bétail a son équivalent en UGB_g (Tableau II-4). Le nombre total d' UGB_g sur la surface considérée est tout d'abord calculé

d'après le nombre de tête de cheptel et les équivalences en UGB_g. Le besoin fourrager est ensuite calculé d'après le postulat qu'un UGB_g nécessite 52 quintaux de matière sèche (MS) à l'année (SOeS, 2013).

Tableau II-4 : Équivalents UGB alimentation grossière (Agreste, 2010b; SOeS, 2013)

Type de bétail	Catégorie	UGB alimentation grossière
Bovin	Vaches laitières	1
	Vaches allaitantes	0.85
	Mâles > 2 ans	0.9
	Femelles > 2 ans	0.8
	Mâles 1 << 2 ans	0.6
	Femelles 1 << 2ans	0.6
	Mâles < 1 an	0.44
	Femelles < 1 an	0.32
	Veaux	0
Ovins	Brebis mères	0.15
	Agnelles	0.09
	Autres ovins	0.04
Caprins	Chèvres mères	0.17
	Chevrettes	0.09
	Autres caprins	0.03
Equins	Equins	0.8

- Étape 2 : Satisfaction du besoin fourrager par les fourrages issus des terres arables

Le besoin fourrager est d'abord comblé par les productions fourragères issues des terres arables (prairies temporaires et artificielles, fourrages annuels, racines et tubercules fourragers) exprimées en matière sèche. Pour les racines et tubercules fourragers, il faut convertir la production récoltée (en quintal) en quantité de matière sèche (Tableau II-5).

Tableau II-5 : Contenu en matière sèche des racines et tubercules fourragers (RTF)

Type de racine ou tubercule	%matière sèche	Notes	Source
Betterave	16		1
Carotte	18		1
Navet	8		1
Rutabaga	15		1
Topinambour	20		1
Panais	18	Même valeur que la carotte	1
Céleris	15	Même valeur que le rutabaga	1
Choux	12		2
Citrouille	10		3
Autres	15	Moyenne de l'ensemble des RTF	

¹ Delteil, 2012, ² INRA, 2007, ³Duval, 1995

- Étape 3 : Satisfaction du besoin fourrager restant en fonction du potentiel de production des prairies permanentes

Dans le cas où le besoin fourrager n'est pas comblé par la production de matière sèche des fourrages issues des terres arables, le besoin fourrager restant est comblé par la matière sèche provenant des

prairies permanentes. La production des prairies permanentes est bornée par une valeur maximum correspondant à leur potentiel de production de matière sèche.

La valeur retenue pour estimer la production en matière sèche des prairies permanentes est donc la quantité de matière sèche issue de ces prairies permettant de combler le besoin fourrager déjà partiellement satisfait par les fourrages issus des terres arables, dans la limite des potentialités de production de ces prairies.

II.1.1.4.3. Cas particulier de l'export par les pailles

La paille peut être définie comme un sous-produit de la culture des céréales. Elle est constituée par la tige de la plante débarrassée de son grain lors de la récolte. En moyenne, en France, sur les 60 dernières années, deux utilisations de la paille de blé et d'orge prédominent : (i) la paille n'est pas exportée et est directement enfouie dans le sol ; (ii) elle est exportée du sol pour servir de litière au bétail et retournera dans les sols agricoles sous forme de fertilisation organique (Figure II-3). Il peut donc être considéré que l'azote des pailles de blé et d'orge ne doit pas être pris en compte comme un export d'azote du sol. Par ailleurs, de façon assez récente, les pailles ont été envisagées en tant que matière première combustible (De Cherisey *et al.*, 2007). En l'absence de données quantifiées sur la quantité de paille utilisée pour la génération d'énergie, ce débouché a été négligé. Le raisonnement qui a conduit à considérer que les pailles de blé et d'orge ne doivent pas être comptabilisées dans l'export d'azote a été appliqué à l'ensemble des pailles des autres cultures. Les pailles n'ont donc pas été prises en compte dans le calcul de l'export d'azote.

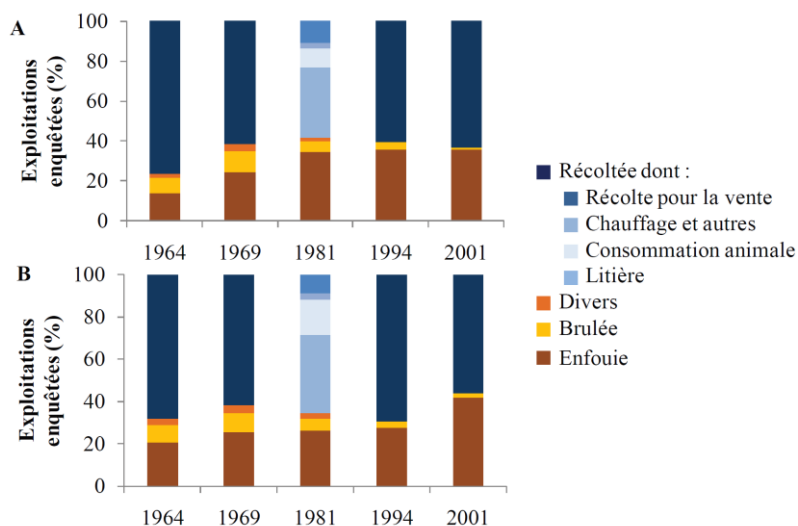


Figure II-3 : Utilisation des pailles A) paille de blé B) paille d'orge (moyennes France entière) d'après Agreste, 1996; SCEES, 1983, 1970, 1965

II.1.2. Les paramètres du modèle

Les paramètres du modèle sont les teneurs en azote des cultures, les teneurs en azote des déjections du bétail, les pertes d'azote vers l'atmosphère à partir des fertilisations et les coefficients déterminés par

Anglade *et al.*, pour le calcul de l'azote fixé par les légumineuses. Du fait de la variabilité naturelle et de la diversité des conditions agricoles, les paramètres peuvent prendre des valeurs différentes suivant les situations géographiques et au cours du temps. Le panel de valeur prises par les différents paramètres peut être (i) renseigné dans des documents de synthèse (par exemple pour la teneur en azote de certaines cultures), (ii) estimé à partir d'hypothèses sur les conditions agricoles et de documents quantifiant l'impact de ces conditions.

II.1.2.1. Export d'azote : Teneur en azote des différentes productions

Dans le cas où un document de synthèse français récent fourni la valeur moyenne et/ou l'écart type d'un paramètre, ces valeurs ont été respectivement utilisées comme "valeurs de références" et descripteur de l'incertitude. Par exemple, la teneur en azote d'un blé tendre en France a été fixée à 1.8 (valeur de référence) ± 0.13 (incertitude sur la valeur) kgN.q⁻¹ (COMIFER, 2013b).

Si l'écart type n'a pas été identifié dans les documents de référence, alors un intervalle de valeurs possibles a été défini à partir de la littérature internationale. Par exemple, les teneurs en azote relevées pour le tabac s'échelonnent de 3 (valeur minimum) à 4.1 (valeur maximum) kgN.q⁻¹ (Bouwman *et al.*, 2009; EEA, 2001). Dans le cas où l'encadrement de la valeur ne peut pas être estimé à partir de la littérature, la variation du paramètre a été estimé à ± 20% la valeur de référence (Oenema *et al.*, 2003). Un écart type (σ) est alors calculé à partir de ces valeurs minimum et maximum (Équation II-6).

$$\sigma = \left[\text{Max}(\text{valeur}_{\text{référence}} - \text{valeur}_{\text{minimum}}, \text{valeur}_{\text{maximum}} - \text{valeur}_{\text{référence}}) \right] / 3 \quad (\text{Équation II- 6})$$

Les valeurs de teneur en azote et leurs incertitudes associées ont été affectées à 116 cultures différentes (Tableau II-6).

Tableau II-6 : Teneur en azote des différentes productions exprimées en kgN.q⁻¹

Cultures	Valeur minimum	Référence	Ecart-type	Valeur maximum	Sources
Céréales					
Blé tendre	1.8	1.8	0.13	2.4	(2)(9)
Blé dur	2.1	2.1	0.06	2.4	(1)(2)(9)
Seigle et Méteil	1.4	1.8	0.24	2.4	(1)(3)(4)(9)
Orge	1.5	1.5	0.08	2.4	(1)(2)(3)(4)(9)
Avoine	1.6	1.6	0.24	2.4	(2)(6)(7)(9)
Maïs	1.2	1.2	0.03	2.4	(2)(9)
Sorgho	<u>1.12</u>	1.4	0.07	2.4	(2)(9)
Triticale	1.5	1.6	0.06	2.4	(2)(7)(9)
Riz	<u>0.96</u>	1.2	0.12	2.4	(2)(9)
Millet	1.7	1.9	<u>0.27</u>	2.4	(3)(9)
Sarrasin	<u>1.52</u>	1.9	0.13	2.4	(9)(13)
Autres céréales	1.6	1.9	<u>0.17</u>	2.4	(7)(9)
Paille	<u>0.4</u>	0.7 (8)	0.2	<u>0.84</u>	(2)(10)
Oléagineux					
Colza et Navette	2.9	3.5	0.18	5.1	(2)(11)(9)
Tournesol	1.9	1.9	0.37	5.1	(1)(3)(9)(11)
Soja	3.5	5.65	<u>0.37</u>	7.1	(3)(7)
Lin	3	3.6	0.4	5.1	(5)(9)(16)
Autres oléagineux	<u>2.8</u>	3.5	<u>0.53</u>	5.1	(9)
Protéagineux					

Pois protéagineux, Lupin	<u>2.5</u>	3.1	0.24	<u>3.7</u>	(2)
Fève, Féverole	<u>3</u>	3.8	0.81	<u>4.6</u>	(2)
Cultures industrielles					
Betteraves industrielles	<u>0.09</u>	0.11	0.02	0.31	(1)(14)
Houblon	<u>2</u>	2.5	<u>0.17</u>	<u>3</u>	(1)
Tabac	3	4	<u>0.33</u>	4.1	(3)(7)
Lin textile	0.5	0.56	<u>2.5</u>	8.1	(4)(7)
Autres cultures industrielles	<u>1.08</u>	1.35	<u>2.25</u>	<u>1.62</u>	(1)
Pomme de terre					
Pomme de terre (toute sorte)	0.3	0.35	0.05	0.35	(3)(6)(7)(12)
Fourrage					
Fourrage annuel	0.35	1.15	0.05	1.5	(2)(3)(4)
Racine et tubercules fourragers	0.24	0.25	0.5	0.3	(1)(2)(7)
Luzerne	<u>2.8</u>	3.5	0.4	4.9	(9)(15)
Trèfle (blanc et violet)	<u>2.8</u>	3.5	0.7	4.9	(9)(15)
Sainfoin	<u>1.9</u>	2.4	0.4	4.9	(9)(15)
Autres Légumineuses fourragères (Vescès)	<u>2.7</u>	3.4	0.5	4.9	(9)(15)
Prairies temporaires	2.25	2.3	0.5	3.5	(2)(3)(4)(10)
Prairies permanentes	2	2.3	0.5	3.5	(2)(3)(4)(10)
Légumes					
Artichauts	0.4	0.41	<u>0.03</u>	<u>0.492</u>	(2)
Asperges	<u>0.32</u>	0.4	<u>0.03</u>	<u>0.48</u>	(2)
Céleris	<u>0.1</u>	0.12	<u>0.09</u>	0.4	(2)
Choux fleurs	<u>0.31</u>	0.39	<u>0.03</u>	0.4	(2)
Brocolis	0.4	0.43	<u>0.03</u>	<u>0.51</u>	(2)
Choux de Bruxelles (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.26</u>	<u>0.33</u>	<u>0.09</u>	0.4	(1)(17)
Choux à choucroute (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.26</u>	<u>0.33</u>	<u>0.02</u>	0.4	(1)(17)
Autres choux (moyenne des choux rouges, verts et blancs)	<u>0.18</u>	<u>0.23</u>	<u>0.06</u>	0.4	(1)(17)
Endives	<u>0.13</u>	<u>0.16</u>	<u>0.08</u>	0.4	(1)(17)
Epinards	<u>0.3</u>	0.37	<u>0.02</u>	0.4	(1)(2)
Poireaux	<u>0.26</u>	0.33	<u>0.02</u>	0.4	(1)(2)
Laitues	<u>0.14</u>	0.18	<u>0.07</u>	0.4	(1)(2)
Chicorées	<u>0.26</u>	0.33	<u>0.02</u>	0.4	(1)(2)
Cressons	<u>0.2</u>	<u>0.26</u>	<u>0.05</u>	0.4	(1)(17)
Mâche	0.4	0.45	<u>0.03</u>	<u>0.54</u>	(1)(2)
Autres salades (salade verte)	<u>0.09</u>	<u>0.11</u>	<u>0.10</u>	0.4	(1)(17)
Bettes	<u>0.26</u>	<u>0.33</u>	<u>0.02</u>	0.4	(1)(17)
Cardons	<u>0.08</u>	<u>0.1</u>	<u>0.10</u>	0.4	(1)(17)
Fenouils	<u>0.14</u>	<u>0.18</u>	<u>0.07</u>	0.4	(1)(17)
Rhubarbes (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.26</u>	<u>0.33</u>	<u>0.09</u>	0.4	(1)(17)
Pissenlit	0.4	<u>0.46</u>	<u>0.03</u>	<u>0.55</u>	(1)(17)
Persil	0.4	<u>0.48</u>	<u>0.03</u>	<u>0.58</u>	(1)(17)
Cerfeuil	0.4	<u>0.53</u>	<u>0.04</u>	<u>0.63</u>	(1)(17)
Estragon	0.4	<u>0.47</u>	<u>0.03</u>	<u>0.56</u>	(1)(17)
Thym	0.4	<u>0.97</u>	<u>0.19</u>	<u>1.17</u>	(1)(17)
Maïs frais	0.4	<u>0.51</u>	<u>0.04</u>	<u>0.61</u>	(1)(17)
Champignons	0.4	<u>0.49</u>	<u>0.03</u>	<u>0.59</u>	(1)(17)
Fraises	<u>0.1</u>	<u>0.12</u>	<u>0.09</u>	0.4	(1)(17)
Aubergines	<u>0.11</u>	<u>0.13</u>	<u>0.09</u>	0.4	(1)(17)
Concombres	<u>0.08</u>	<u>0.1</u>	<u>0.10</u>	0.4	(1)(17)
Cornichons (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.1</u>	<u>0.12</u>	<u>0.09</u>	0.4	(1)(17)
Courgettes	<u>0.18</u>	0.22	<u>0.06</u>	0.4	(1)
Melons	<u>0.11</u>	0.14	<u>0.09</u>	0.4	(1)
Pastèques	<u>0.08</u>	<u>0.09</u>	<u>0.10</u>	0.4	(1)(17)
Poivrons (Poivrons spp.)	<u>0.12</u>	<u>0.14</u>	<u>0.09</u>	0.4	(1)(17)
Piments	<u>0.26</u>	<u>0.33</u>	<u>0.02</u>	0.4	(1)(17)
Citrouilles	<u>0.09</u>	<u>0.11</u>	<u>0.10</u>	0.4	(1)(17)
Tomates	<u>0.12</u>	0.15	<u>0.09</u>	0.4	(1)
Ail	0.4	<u>1.26</u>	<u>0.29</u>	<u>1.52</u>	(1)(17)
Betteraves maraichères	<u>0.29</u>	<u>0.37</u>	<u>0.02</u>	0.4	(1)(17)
Carottes	<u>0.1</u>	0.12	<u>0.09</u>	0.4	(1)
Céleris rave	<u>0.16</u>	0.2	<u>0.07</u>	0.4	(1)
Echalotes	<u>0.18</u>	0.23	<u>0.06</u>	0.4	(1)
Navet	<u>0.12</u>	<u>0.15</u>	<u>0.08</u>	0.4	(1)(17)
Oignons	<u>0.16</u>	0.2	<u>0.07</u>	0.4	(1)
Radis	<u>0.1</u>	<u>0.12</u>	<u>0.09</u>	0.4	(1)(17)

Salsifis	0.4	0.49	<u>0.03</u>	<u>0.588</u>	(1)(2)
Radis noirs	0.4	0.45	<u>0.03</u>	<u>0.5376</u>	(1) (17)
Crosnes (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.1</u>	<u>0.12</u>	<u>0.09</u>	0.4	(1) (17)
Pois verts	0.4	0.98	<u>0.19</u>	<u>1.176</u>	(1)(2)
Haricots demi-secs	0.4	1.5	<u>0.37</u>	<u>1.8</u>	(1)(2)
Haricots verts	<u>0.27</u>	0.34	<u>0.02</u>	0.4	(1)(2)
Haricots secs (moyenne haricots blanc et rouge)	<u>1.04</u>	1.29	<u>0.84</u>	3.8	(1) (17)
Lentilles (moyenne lentille en conserve et cuites)	<u>0.91</u>	1.14	<u>0.89</u>	3.8	(1) (17)
Pois cassés	<u>1.09</u>	1.36	<u>0.81</u>	3.8	(1) (17)
Ers et pois (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.87</u>	1.09	<u>0.90</u>	3.8	(1) (17)
Pois chiches	<u>1.13</u>	1.42	<u>0.79</u>	3.8	(1) (17)
Fèves vertes	<u>0.65</u>	0.82	<u>0.99</u>	3.8	(1) (17)
Féveroles (consommation humaine)	<u>0.87</u>	1.09	<u>0.90</u>	3.8	(1) (17)
Fruits					
Abricots	0.05	0.14	<u>0.03</u>	<u>0.17</u>	(1) (17)
Cerises	0.05	0.21	<u>0.05</u>	<u>0.25</u>	(1) (17)
Pêches, nectarines et brugnon	0.05	0.51	<u>0.04</u>	<u>0.61</u>	(1) (17)
Prunes	0.05	0.21	<u>0.02</u>	<u>0.25</u>	(1) (17)
Olives	0.05	0.16	<u>0.04</u>	<u>0.19</u>	(1) (17)
Poires	0.05	0.06	<u>0.004</u>	<u>0.07</u>	(1) (17)
Pommes	0.05	0.05	<u>0.003</u>	<u>0.06</u>	(1) (17)
Coings	0.05	0.06	<u>0.004</u>	<u>0.07</u>	(1) (17)
Nèfles	0.05	0.11	<u>0.02</u>	<u>0.13</u>	(1) (17)
Kakis	0.05	0.1	<u>0.02</u>	<u>0.12</u>	(1) (17)
Raisins	0.05	0.13	<u>0.03</u>	<u>0.16</u>	(1)(2)
Amandes	0.05	4.9	<u>1.62</u>	<u>5.88</u>	(1) (17)
Châtaigne	0.05	0.45	<u>0.13</u>	<u>0.54</u>	(1) (17)
Noix	0.05	2.77	<u>0.91</u>	<u>3.32</u>	(1) (17)
Noisettes	0.05	3.09	<u>1.01</u>	<u>3.71</u>	(1) (17)
Kiwis	0.05	0.18	<u>0.04</u>	<u>0.21</u>	(1) (17)
Myrtille	0.05	1.63	<u>0.03</u>	<u>1.96</u>	(1) (17)
Framboise	0.05	0.22	<u>0.06</u>	<u>0.27</u>	(1) (17)
Groseille	0.05	0.18	<u>0.04</u>	<u>0.21</u>	(1) (17)
Avocats	0.05	0.29	<u>0.08</u>	<u>0.35</u>	(1) (17)
Figues	0.05	0.21	<u>0.05</u>	<u>0.25</u>	(1) (17)
Angélique (moyenne tous fruits)	0.05	0.11	<u>0.02</u>	<u>0.13</u>	(1) (17)
Oranges	0.05	0.15	<u>0.03</u>	<u>0.18</u>	(1) (17)
Pamplemousse	0.05	0.13	<u>0.03</u>	<u>0.15</u>	(1) (17)
Citrons	0.05	0.13	<u>0.03</u>	<u>0.15</u>	(1) (17)
Cédrats	0.05	0.13	<u>0.03</u>	<u>0.15</u>	(1) (17)
Autres agrumes	0.05	0.13	<u>0.03</u>	<u>0.16</u>	(1) (17)

Les teneurs en azote ont été relevées dans (1) SOeS, 2013, (2) COMIFER, 2013, (3) EEA, 2001, (4) Audouin, 1991, (5) Alvarez *et al.*, 2014, (6) Bach et Frede, 2005, (7) Bouwman *et al.*, 2005, (8) ARVALIS, 2007, (9) Leip *et al.*, 2008, (10) Feedipedia, <https://www.feedipedia.org/> (consulté le 25/11/14), (15) INRA, 2007, (17) (ANSES, 2013). Les valeurs (minimum et maximum) soulignées sont des valeurs estimées telles que 0.8 * valeur de référence (Valeur minimum), 1.2 * valeur de référence (Valeur maximum).

Les incertitudes sur les paramètres sont définies par les écart-types affectées de chaque paramètre. Les écarts-types non soulignés proviennent de (2) COMIFER, 2013, (11) comm. pers. CETIOM, (12) comm. pers. CNTIP, (13) Honda *et al.*, 2005 (14) comm pers. ITB, (16) Sauvart *et al.*, 2004. Les écarts-types soulignés ont été calculés tels que Max ((Valeur de référence-Valeur minimum)/3, (Valeur maximum-Valeur de référence/3)).

II.1.2.2. Azote excrété par le bétail

De façon générale, les caractéristiques physiques, métaboliques et d'alimentation du bétail ont varié au cours du XX^{ème} siècle (Chatzimpiros, 2011) ce qui a entraîné des modifications dans l'excrétion azotée du bétail. Les vaches laitières sont devenues de plus en plus productives (Pflimlin *et al.*, 2009) passant de 4000 litres de lait en moyenne par vache en 1985 à plus de 6000 litres en 2005, ce qui a conduit à une hausse des rejets d'azote par le cheptel laitier (Delaby *et al.*, 1995; Bassanino *et al.*, 2007). A

l'opposé, le cheptel porcin a vu son alimentation modifiée pour la recherche d'une excrétion azotée moins importante (Delaby *et al.*, 2012; Portejoie *et al.*, 2004). Des publications du CORPEN (1999, 2001, 2003) permettent de quantifier l'impact de l'alimentation ou du poids des animaux sur l'excrétion azotée des bovins et les porcins. Cependant, à notre connaissance, il n'est pas possible de retracer l'évolution de ces pratiques à l'échelle départementale sur les 100 dernières années. L'azote excrété par les bovins et les porcins a donc été estimé à partir d'un ensemble d'hypothèses retenues pour chaque stade physiologique d'après la publication du SOeS (2013). Ces hypothèses seront présentées ultérieurement. Les différentes hypothèses sur les caractéristiques de l'animal et son alimentation permettent d'obtenir un intervalle de valeur d'excrétion possible.

- Exemple du calcul de l'excrétion azotée pour les vaches laitières

Les documents du CORPEN (1999) donnent la quantité d'azote mensuelle excrétée par une vache laitière produisant 6000 kg de lait.an⁻¹. Ce même document indique que la variation de rendement de 1000 kg de lait.an⁻¹, autour du niveau de base de production de 6000 kg de lait, entraîne une variation de l'excrétion d'azote de 5% dans le même sens que la variation de la production. L'excrétion azotée ne varie plus en deçà de 4000 kg de lait.an⁻¹ (comm. pers. UMR PEGASE). Le rendement laitier maximum départemental a été relevé pour l'année dans la Marne en 2015 : 8945 kg lait.an⁻¹.vache⁻¹ (SAA 2015). L'excrétion azotée a été calculée jusqu'à un rendement légèrement supérieur (10000 kg lait.an⁻¹) (Tableau II-7).

Tableau II-7 : Excrétion mensuelle azotée en fonction du rendement laitier

Clé de lecture : La valeur calculée pour l'excrétion azotée mensuelle pour une vache nourrie par du maïs ensilage voit son excrétion baisser de 5% par tranche de 1000 kg de lait en moins par rapport à 6000 kg lait. Exemple pour une vache qui produit 4000 kg de lait par an,

$$\text{excrétion mensuelle} = 6.7 * 0.05 * \left(\frac{6000 - 4000}{1000} \right) = 6.03.$$

Rendement laitier (kg lait/an)	Alimentation		
	4000kg lait et moins	6000kg lait/an*	10000kg lait/an
Ensilage de Maïs	6.03	6.7	8.04
Herbe conservée**	8.19	9.1	10.92
Herbe pâturée	10.08	11.2	13.44

*niveau de base, données issues de CORPEN, 1999

** Ensilage, foin, ou autres fourrages conservés à base d'herbe

Afin de représenter la diversité des régimes alimentaires proposés aux vaches laitières, 14 hypothèses de rations simplifiées ont été retenues (SOeS, 2013). Le pourcentage de maïs de la ration est d'abord fixé (0, 25, 50, 75 ou 100%), puis le pourcentage d'herbe conservée est fixé (0, 25, 50, 75 ou 100%). Si la ration n'est pas complète (pourcentage maïs + pourcentage herbe conservée ≠ 100), le reste de la ration est considéré comme étant de l'herbe pâturée (Tableau II-8). Il est considéré que

les vaches destinées à la production alimentaire rentrent à l'étable au moins une partie de l'année et sont nourries de foin ou d'ensilage à ce moment. La ration ne contenant que de l'herbe pâturée (Herbe conservée 0%, maïs 0 %, herbe pâturée 100%) n'est donc pas considérée dans le panel des rations possibles.

Tableau II-8 : Hypothèses des rations simplifiées (pourcentage de la ration) pour les vaches laitières

Clé de lecture : les chiffres au sein du tableau représentent le pourcentage d'herbe pâturée de la ration. Une ration caractérisée par 25% d'herbe conservée, 50% de maïs fourrage comporte donc 25% d'herbe pâturée (100 -25-50 = 25).

Maïs (% ration)	Herbe conservée (% ration)				
	0	25	50	75	100
0		75	50	25	0
25	75	50	25	0	
50	50	25	0		
75	25	0			
100	0				

L'excrétion annuelle des vaches est alors calculée pour l'ensemble des 3 niveaux de production laitiers (4000, 6000 et 10 000 kg lait.an⁻¹) et des 14 régimes alimentaires possibles (Tableau II-8).

L'excrétion annuelle est calculée pour les différents rendements laitiers et les différentes rations simplifiées comme la somme des quantités excrétées avec les différents régimes alimentaires, pondérés par l'importance de ces derniers dans la ration (Équation II-7).

$$E_{an} = \sum_{r_a\ lim} E_{mois} * 12 * \% r_a\ lim \text{ (Équation II-7)}$$

avec :

E_{an} l'excrétion annuelle d'une vache laitière

r_{alim} les régimes alimentaires de la vache (maïs fourrage, herbe conservée, herbe pâturée)

E_{mois} l'excrétion mensuelle

12 le nombre de mois dans l'année

r_{alim} la proportion du régime alimentaire considéré dans la ration (%)

Par exemple, le calcul de l'excrétion d'une vache laitière ayant un rendement laitier de 4000 kg lait.an⁻¹ avec le régime alimentaire précédemment (25% d'herbe conservée, 50% de maïs fourrage, 25% d'herbe pâturée) décrit sera calculé comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Excrétion annuelle} &= \text{Excrétion annuelle}_{\text{maïs_ensilage}} * \text{pourcentage de maïs ensilage dans la ration} + \\ &\quad \text{Excrétion annuelle}_{\text{herbe_conservée}} * \text{pourcentage d'herbe conservée} + \\ &\quad \text{Excrétion annuelle}_{\text{herbe_fraiche}} * \text{pourcentage d'herbe fraîche dans la ration} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Excrétion annuelle} &= 6.03 * 12 * 50 / 100 + \\ &\quad 8.19 * 12 * 25 / 100 + \\ &\quad 10.08 * 12 * 25 / 100 \\ &= 91 \text{ kgN.an}^{-1} \end{aligned}$$

Tableau II-9 : Valeur d'excrétion des vaches laitières pour l'ensemble des cas (rendement laitier et régimes alimentaires) possibles

Clé de lecture : chaque tableau reprend la structure du tableau des rations simplifiées présenté dans le tableau II-8. Les chiffres indiqués dans le tableau correspondent à l'excrétion calculée selon les hypothèses retenues et indiquées en gris dans les tableaux.

Vaches laitières avec un rendement laitier de 4000 kg.an⁻¹					
		Herbe conservée (% ration)			
Maïs (% ration)	0	25	50	75	100
0		115	110	104	98.3
25	109	103	97	92	
50	97	91	85		
75	85	79			
100	72				
Vaches laitières avec un rendement laitier de 6000 kg.an⁻¹					
		Herbe conservée (% ration)			
Maïs (% ration)	0	25	50	75	100
0		128	122	116	109
25	121	115	108	102	
50	107	101	95		
75	94	88			
100	80				
Vaches laitières avec un rendement laitier de 10 000 kg.an⁻¹					
		Herbe conservée (% ration)			
Maïs (% ration)	0	25	50	75	100
0		154	146	139	131
25	145	138	130	122	
50	129	121	114		
75	113	105			
100	96				

La valeur moyenne de l'excrétion pour une vache laitière, estimée à partir de l'ensemble des résultats possibles (Tableau II-9), est de 110 kgN.an⁻¹, la valeur minimum d'excrétion à 72 kgN/an (rendement laitier de 4000 kg de lait.an⁻¹, 100% de maïs fourrage dans la ration), la valeur maximum à 154 kgN.an⁻¹ (rendement laitier de 10000 kg de lait.an⁻¹, 75% de d'herbe fraîche et 25% d'herbe conservée dans la ration).

- Cas des autres catégories de cheptel

Les équins, les lapins et les volailles comportent des sous-catégories diverses. Par exemple, la catégorie "équidé" regroupe les sous catégories "cheval" (lourd ou non), "jument" (suitée, lourde ou non), "poulain" (entre 6 mois et 1 an, lourd ou non, entre 1 an et 2 ans, lourd ou non), qui excrètent une quantité d'azote variable ("Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole | Legifrance," 2011).

La valeur d'excrétion pour les volailles tient compte à la fois de la diversité des sous catégories d'animaux (catégorie "dinde" qui renferme les "dindes à rôtir bio ou non", et "dinde de découpe") mais aussi du nombre d'animaux pouvant se succéder à une même place d'élevage pendant une même année (nombre de bande par an).

La valeur de référence d'excrétion a été estimée comme la moyenne des valeurs relevées pour les sous-catégories (exemple : 'dindes à rôtir bio ou non', 'dindes de découpe', les valeurs minimum et

maximum d'excrétion sont celles relevées pour les sous catégories. Les valeurs minimum et maximum d'excrétion permettront de calculer un écart type qui caractérise l'incertitude sur cette valeur selon l'équation II-6.

Les références sur l'excrétion des ovins et des caprins sont peu nombreuses et il n'a pas été possible d'estimer la variation de l'excrétion à partir de publications. L'hypothèse d'une variation de l'excrétion par rapport à l'excrétion moyenne de $\pm 20\%$ a été retenue (Oenema *et al.*, 2003).

Tableau II-10 : Excrétion azotée pour les différentes catégories de bétail

Catégorie de bétail	Excrétion azotée (kgN/an)			Source	Hypothèses de calcul	
	Moy.	Min.	Max.			
Bovin						
+ 2 ans	Vaches laitières	109.7	72.4	153.7	(1)	Rendement laitier (4000 - 10000kg.an ⁻¹) ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
	Vaches nourrice + veau	79.5	47.3	125.0	(2)	Poids de l'animal (600 à 740 kg) ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
	Animal de travail	101.6	62.6	147.4	(2)	Poids de l'animal 900kg \pm 20%
	Génisses laitières de renouvellement	50.8	31.3	73.7	(2)	Animal en croissance ; poids de l'animal 450kg \pm 20% ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
	Génisses nourrices de renouvellement	62.1	38.3	90.1	(2)	Animal en croissance ; poids de l'animal 550kg \pm 20% ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
	Génisses de boucherie	56.5	31.3	90.1	(2)	Moyenne des deux précédents
	Vaches de réforme	24.2	13.8	37.6	(2, 7)	Origine des vaches de réforme (troupeau laitier ou allaitant) ; alimentation (ensilage d'herbe ou de maïs) ; durée d'engraissement (2 à 4 mois)
	Mâle	80.0	54.6	106.5	(2)	Animal à l'engraissement ; poids de l'animal 650 kg \pm 20% ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
	Taureau	101.6	62.6	147.4	(2)	Animal en croissance ; poids de l'animal 900 kg \pm 20% ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
	1 à 2 ans	Génisses laitières de renouvellement	45.2	27.8	65.5	(2)
Génisses nourrices de renouvellement		50.8	31.3	73.7	(2)	Poids de l'animal 450 \pm 20% ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
Génisses de boucherie		48.0	27.8	73.7	(2)	Moyenne des deux précédents
Mâle		67.7	46.2	90.1	(2)	Animal à l'engraissement ; poids de l'animal 550 \pm 20% ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
Taureau		56.5	34.8	81.9	(2)	Animal en croissance ; poids de l'animal 500 \pm 20% ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
- d'1 an	Veau de boucherie	7.2	5.8	8.6	(2)	Nourri à la poudre de lait
	Autre bovin	23.2	7.0	39.0	(2)	Animal en croissance ou à l'engraissement ; poids de l'animal 250 kg \pm 20% et 300 \pm 20% ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
Ovin						
+ d'1 an	Adulte	14.3	11.4	17.1	(3)	
- d'1 an	Jeune de moins d'un	5.7	4.3	7.1	(3)	

an					
Caprin					
+ d'1 an	Adulte	14.3	11.4	17.1	(4)
- d'1 an	Jeune de moins d'un an	5.7	4.3	7.1	(4)
Equins					
	Cheval, mule, âne	56.0	26.0	73.0	(4)
Volaille					
	Ensemble des gallus	0.22	0.02	0.39	(5)
	Canard	0.48	0.11	2.24	(5)
	Dindon	0.48	0.14	1.17	(5)
	Oie	0.97	0.18	2.48	(5)
	Pintade	0.23	0.09	0.41	(5)
	Caille	0.09	0.025	0.15	(5)
	Pigeon	0.83	0.67	0.99	(5)
Porcin					
	Jeunes après sevrage (20 - 50 kg)	0.59	0.56	0.62	(6)
	Truie (plus de 50 kg)	22.5	20.4	24.6	(6)
	Verrat (plus de 50 kg)	4.2	3.8	4.6	(6)
	Animaux à l'engrais	4.2	3.8	4.6	(6)
Clapier					
	Adulte	3.3	1.9	4.6	(5)
	Jeune	0.06	0.05	0.08	(5)

Tous types de labels et tous types d'animaux, facteur de bande compris entre 1 et les valeurs indiquées dans CORPEN, 2006

Alimentation (simple ou biphase)

Excrétion azotée du bétail par catégorie et stade physiologique (kgN.tête⁻¹an⁻¹). Les valeurs proviennent des références suivantes: (1) CORPEN, 1999, (2) CORPEN, 2001, (3) CORPEN, 1988, (4) Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole | Legifrance, 2011, (5) CORPEN, 2006, (6) CORPEN, 2003, (7) SCEES, 1971.

Les valeurs de teneur en azote et leurs incertitudes associées ont ainsi été affectées à 33 catégories de cheptel (Tableau II-10).

II.1.2.3. Perte d'azote à partir des déjections du bétail

Les changements des conditions d'élevage ont aussi modifié l'importance des pertes d'azote vers l'atmosphère en provenance des déjections du bétail. Les pertes d'azote à partir des déjections bovines, porcines et avicoles ont été calculées selon la nature sous laquelle se trouvent les déjections (lisier, fumier, fiente), et le temps passé en extérieur en accord avec Gac *et al.*, (2006). L'ensemble des cas possibles (nature des déjections croisée au temps passé à l'extérieur) a été construit et testé, permettant ainsi d'obtenir une valeur minimum, moyenne et maximum de perte d'azote vers l'atmosphère en provenance des déjections, pour les cheptels bovins, porcins et avicoles (Tableau II-11). Pour les autres catégories de cheptel (ovins, caprins, équins), la valeur a été fixée à 30% de perte ($\pm 20\%$) (comm.pers. UMR PEGASE) (Tableau II-11).

Tableau II-11 : Perte d'azote vers l'atmosphère selon l'origine des fertilisations organiques

Type	Source	Perte d'N (% N excrété)		
		Minimum	Référence	Maximum
Bovin	1	9.1	19.8	37.1
Porcins	1	14.7	31.2	88.3
Ovins, Caprins	2	10	30	50
Volaille et clapier	1	11.6	27.9	51.1
Equins	2	10	30	50

¹Gac *et al.*, 2006, ²comm.pers. UMR PEGASE

II.1.2.4. Fertilisation minérale

Les valeurs de perte d'azote vers l'atmosphère ont été fixées par type d'engrais azotés (Tableau II-12).

Tableau II-12 : Volatilisation des différents types d'engrais azotés minéraux (adapté d'après EMEP-Corinair cité dans CORPEN, 2006)

Fertilisant	NH ₃ émis (% N épandu)
Ammonitrate	2
Solutions	8
Urée	15
Autres (Nitrates de calcium, Nitrates de sodium, Ammoniac, Cyanamide, Divers)	2
Engrais azotés composés	2

L'incertitude attachée à ce coefficient est de 20% (Oenema *et al.*, 2003).

II.2. Les données agricoles en France

Le modèle CASSIS_N nécessite l'emploi de données agricoles pour le calcul des balances azotées. Il existe plusieurs sources de données agricoles qui sont soit le fruit d'enquêtes exhaustives (recensement agricole), soit le résultat d'enquêtes faites sur des échantillons (enquêtes structure hors recensement agricole, TerUti, RPG, RICA), ou qui sont la synthèse d'autres données (SAA, Eurostat). Les avantages et les inconvénients de ces données en vue de l'objectif de calcul des balances azotées à fine échelle et sur une longue période sont soulevés. Le choix final des données agricoles pour leur utilisation dans CASSIS_N est indiqué à la partie II.2.3.3.

II.2.1. Données d'occupation du sol et de production agricole

La collecte et la publication de données agricoles régulières existent en France depuis la fin du 19^{ème} siècle mais la nature de l'information collectée, les types de collecte et les unités ciblées ont évolué au cours du temps.

Les informations collectées portent sur :

- les moyens de productions (importance des surfaces cultivées, nombre de têtes de cheptel, infrastructures et outillage agricole, ...);
- le type d'occupation du sol (occupation biophysique du sol, type de culture);
- les informations comptables.

Les données ont été recueillies par suivant des méthodes différentes :

- enquêtes exhaustives;
- enquêtes sur des échantillons jugés représentatifs;
- utilisation de données administratives (demandes de subventions européennes au titre de la Politique Agricole Commune (PAC));
- utilisation de données géographiques (images satellites, orthophotos);
- croisement de données diverses (enquêtes déjà existantes, dires d'experts, organismes divers,...).

Enfin, les enquêtes ont ciblé différentes unités :

- Des unités administratives (commune, département) ;
- Des unités de production (exploitations agricoles) ;

Afin de garantir la confidentialité aux personnes interrogées pour ces différentes enquêtes, et pour assurer le secret commercial aux entreprises (*e.g.* les exploitations agricoles), des règles de diffusion des données issues de ces enquêtes ont été inscrites dans la loi. Deux lois, une Française (Loi n° 51-711 du 7 juin 1951), et une européenne (règlement (CE) N°223/2009 du parlement européen et du conseil du 11 mars 2009) définissent le secret statistique qui interdit la communication de résultats hormis dérogation par une commission (INSEE, 2010).

- Des unités de surfaces (parcelles, maillages variés du territoire).

II.2.1.1. CORINE Land Cover (CLC)

La base de données géographique CLC est produite dans le cadre du programme européen d'observation de la planète Terre Copernicus. Les données de type CLC renseignent sur la nature de l'occupation du sol (forêt, cultures, surfaces en eau, roches affleurantes,...) sur des surfaces homogènes d'au moins 25 ha (CGDD et SOeS, 2009) à partir de la photo interprétation humaine d'images satellites. Les images satellites sont relevées par des satellites Landsat, SPOT ou IRS (Copernicus Global Land Service, <http://land.copernicus.eu/global>) qui ont une haute résolution (50 m en 1990, 25 m de résolution à partir de 2000). Quatre versions de CLC sont actuellement disponibles : 1990, 2000, 2006 et 2012.

II.2.1.2. Le Registre Parcellaire Graphique (RPG)

Le RPG est une base de données géographique mettant en relation des cartes d'îlots de culture (ensemble de parcelles culturales attenantes exploitées par un même agriculteur), sur lesquels sont renseignées les surfaces occupées par les différentes cultures de chaque îlot. Ces données ont une origine administrative : elles proviennent des déclarations que les agriculteurs effectuent afin d'obtenir les aides de la PAC⁶. Les types de cultures du RPG sont décrits en 28 postes (Annexe 1).

Le système RPG a été mis en place suite au règlement communautaire (*Règlement (CE) N° 1593/2000 du conseil du 17 juillet 2000 modifiant le règlement (CEE) n°3508/92 établissant un système intégré de gestion et de contrôle relatif à certains régimes d'aides communautaires*) qui demande aux états membres de l'Union Européenne de localiser et d'identifier les surfaces agricoles ayant accès à un régime de soutien de la PAC. Le RPG anonymisé est disponible annuellement à partir de 2007.

⁶ Lors des déclarations PAC, les exploitants déclarent le contour des îlots composant leur exploitation, la liste et la surface des cultures implantés dans chaque îlot. La répartition spatiale des cultures au sein de l'îlot n'est pas renseignée.

II.2.1.3. L'enquête TerUti-LUCAS (Utilisation du territoire - Land Use/Cover Area frame Statistical Survey)

TerUti-LUCAS est une enquête par sondage effectuée sur un échantillon de points jugés représentatifs du territoire. Elle permet la quantification des différents types de surface, dont les cultures. Les résultats sont fournis à des échelles administratives (département, région, pays). TerUti-LUCAS est le résultat du couplage de données géoréférencées (photographies aériennes) avec des enquêtes de terrain, ces dernières permettent d'affecter un type de surface (blé, orge, avoine, tournesol, vigne, forêt de résineux, glaciers...) aux points échantillonnés (Annexe 1). L'origine de cette enquête se trouve dans l'enquête dite "contrôle de surface" basée sur l'utilisation des plans cadastraux à partir de 1946. Le premier échantillon TerUti permettant de rendre compte de l'ensemble du territoire national a été constitué en 1982. L'échantillon a été renouvelé en 1990 et 1991 afin de corriger certains biais de représentativité. En 2005, l'enquête TerUti a été révisée pour permettre une harmonisation avec l'enquête européenne Lucas (basée sur les mêmes principes que TerUti). Depuis 2005, les points à enquêter sont déterminés à partir du Scan 25 de l'IGN et des orthophotographies. Pour diminuer les coûts liés aux enquêtes de terrains, les déclarations nécessaires pour accéder aux aides de la PAC, consignées dans le Registre Parcellaire Graphique (RPG) sont utilisées depuis 2012 pour affecter une occupation du sol aux points à échantillonner. Les données ponctuelles d'occupation du sol sont extrapolées à différentes échelles (département, région, pays). En 2014, un point TerUti-LUCAS représentait ainsi 178 ha de surface relevée en France métropolitaine (hors Paris, Ile-de-France et le territoire de Belfort où un point est estimé à 94 ha)(Agreste, 2015a). Une force de la méthode de l'enquête TerUti est de définir et d'estimer l'erreur aléatoire et l'intervalle de confiance sur la surface extrapolée. Cette erreur est fonction de la superficie sur laquelle on souhaite extrapoler le résultat et du nombre de points échantillonnés. Depuis la prise en compte de données issues du RPG pour l'affectation de l'occupation du sol aux points échantillonnés, l'intervalle de confiance est absent pour les occupations du sol relevant du domaine de l'agriculture.

Les points échantillonnés étant les mêmes sur les périodes 1982 - 1990, 1991 à 2005 et 2006 à aujourd'hui, il est possible d'utiliser cette enquête pour la quantification des changements d'occupation du sol au fil du temps. La perte des surfaces en prairies permanentes vers les terres arables entre 1982 et 1990 a ainsi été quantifiée à 1,233 millions d'hectares (SCEES, 1991).

II.2.1.4. Le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA)

Le RICA est une enquête annuelle, harmonisée au niveau de l'Union Européenne, qui collecte des données technico-économiques (superficies et rendement de différentes cultures, effectifs d'animaux, Annexe 1) et comptables (résultats monétaires) détaillées auprès d'un échantillon d'exploitations agricoles. Une partie des résultats comptables concerne les charges dues à l'approvisionnement telles que les dépenses pour l'achat d'engrais et d'amendement.

Le RICA vise à fournir des résultats moyens selon trois critères : l'emprise géographique (version des régions antérieure à 2016), la dimension économique (Cdex) et l'orientation technico-économique (classement des exploitations selon leurs productions principales ou Otex). Les Otex constituent un classement des exploitations selon leur production principale (par exemple "grande culture",

"maraîchage et horticulture" ou "bovin lait",...). Les Cdex constituent un classement des exploitations selon leur taille, les plus petites exploitations étant regroupées dans la Cdex 1, et les plus importantes dans la Cdex 10. La détermination de l'Otex et de la Cdex d'une exploitation se fait à partir de données physiques, telles que les surfaces des différentes productions végétales et les effectifs des différentes catégories d'animaux. A chaque hectare de culture et à chaque tête d'animal est appliqué un coefficient indicateur normatif unitaire. Ces coefficients sont établis par régions. Ils permettent ensuite de calculer une Production Brute potentielle Standardisée (PBS), valeur estimée de tous les produits agricoles susceptibles d'être vendus ou consommés par l'exploitation productrice, qui sera la base de la classification par Cdex et Otex. Le croisement de la Cdex, de l'Otex et de la région permet de définir des classes d'exploitations agricoles reflétant la diversité des exploitations en France. L'enquête ne couvre pas la totalité des exploitations agricoles de l'Union Européenne mais uniquement celles qui ont une dimension suffisante pour pouvoir être considérée comme professionnelle (seuil PBS minimum égal à 25 000 euros par exploitation pour les départements du territoire métropolitain) (Agreste, 2014a).

Le RICA a été mis en place en 1968 par le règlement 79/65/CEE du Conseil de la Communauté Economique Européenne du 15 juin 1965, remplacé depuis par le règlement (CE) n°1217/2009 du conseil du 30 novembre 2009. Les données collectées au sein du RICA permettent notamment de dresser des diagnostics économiques et financiers, et de simuler l'impact des politiques publiques.

II.2.1.5. Les enquêtes structures des exploitations dont les Recensements Agricoles (RA)

En France, à partir de 1955, l'étude des exploitations agricoles est organisée autour de deux sortes d'enquêtes (SCEES, 1969a) : les enquêtes structures et les enquêtes spécifiques à un domaine.

Les enquêtes structures sont réalisées à des intervalles de temps variables selon deux modalités, (i) auprès de toutes les exploitations agricoles, ce sont les Recensements Agricoles ou RA, (ii) sur des échantillons d'exploitation relativement importants.

II.2.1.5.1. Les enquêtes structures basées sur des échantillons

Ces dernières sont prévues par le règlement européen n°1166/2008. Elles doivent être statistiquement représentatives au niveau des régions (NUTS 2) et des agrégations nationales de zones défavorisées (*Règlement (CE) n°1166/2008 du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relatif aux enquêtes sur la structure des exploitations et à l'enquête sur les méthodes de production agricole, et abrogeant le règlement (CEE) n°571/88 du Conseil (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*). En France, le taux d'échantillonnage pour ces enquêtes se situe entre 1/10^{ème} des exploitations environ (pour les années 1963, 2003, 2005, 2007, 2013, 2016) et 1/5^{ème} environ (1967, 1983, 1985 1987). Au total, on dénombre actuellement 15 enquêtes de ce type depuis 1963 (1963, 1967, 1975, 1976, 1977,

1983, 1985, 1993, 1995, 1997, 2003, 2005, 2007, 2013, 2016). A partir de 1967, ces enquêtes sont effectuées dans un cadre communautaire européen⁷.

Les enquêtes spécifiques touchant des échantillons plus restreints (taux de sondage de 1/50^{ème} à 1/200^{ème}) touchent à un aspect particulier de l'agriculture (Tableau II-13, Annexe 2).

Tableau II-13: Exemple de thèmes abordés dans les enquêtes de structure relatives au domaine agricole

Produits phytopharmaceutiques
Traitements phytosanitaires en arboriculture, viticulture ou grande culture
Pratiques culturales
Pratiques culturales sur les légumes, les prairies, les productions d'orge et blé, les productions de maïs, les productions de pomme de terre et dans les bassins versants des programmes Bretagne Eau Pure et Pro-littoral
Inventaire et structure des vergers et de la production de légume
Cheptel
Bâtiments d'élevage porcin, bovin, ovin, caprin, aviculture
Enquête sur la structure du cheptel porcin, bovin
Enquête annuelle laitière
Enquête sur l'aviculture, sur la cyniculture
Pratiques d'élevage
Enquête sur les matières premières utilisées pour la fabrication d'aliments composés pour animaux de ferme

II.2.1.5.2. Les Recensement agricoles

Les RA "modernes" (1955, 1970, 1979, 1988, 2000, 2010 en France) collectent, tous les 10 ans environ, une très grande quantité d'informations dans tous les domaines de la production agricole, dont la surface des principales cultures et le nombre de têtes de bétail. Les données du RA sont acquises par une enquête publique confidentielle et obligatoire (Loi n° 51-711 du 7 juin 1951). Ils concernent toutes les exploitations agricoles (Annexe 3 : Définition de l'exploitation agricole) et toutes les productions situées en métropole, dans les départements d'outre-mer et dans les collectivités d'outre-mer de Saint-Martin et Saint Barthélemy pour les 3 dernières années (1988, 2000, 2010). Ils s'effectuent dans le cadre de la réglementation statistique de l'Union européenne et selon les recommandations des Nations unies (règlement (CE) N°223/2009 du parlement européen et du conseil du 11 mars 2009). Les RA sont communs à l'ensemble des pays de l'union européenne.

Les RA "modernes" font suite à une série de grandes enquêtes agricoles qui existaient en France depuis le 19^{ème} siècle (1836, 1852, 1862, 1882, 1892, 1929, 1942). Lors de ces enquêtes, les données étaient collectées à l'échelle des communes, par des questionnaires envoyés aux présidents des commissions de statistique des communes (le plus souvent le maire). Ces résultats étaient agrégés à l'échelle cantonale puis départementale après différentes étapes de vérification (commissions cantonales, professeurs départementaux d'agriculture, préfets) (Alfroy, 1976; Lenco, 1973). Le recensement agricole français de 1955 a marqué un tournant dans la statistique agricole française puisqu'il a été le premier à être constitué selon les recommandations de la F.A.O. (Food and Agriculture Organisation, organisation des Nations Unies) pour l'établissement de recensement agricole à l'échelle mondiale (Laurent, 1966). D'après la F.A.O., les recensements agricoles doivent être établis à partir d'enquêtes exécutées dans chaque exploitation agricole sur la base de questionnaires individuels remplis par des enquêteurs sélectionnés pour leurs compétences sur la

⁷ L'enquête de 1963 est la seule à ne pas faire partie d'une série d'enquête concernant l'ensemble des pays européens.

collecte des informations statistiques. Les structures agricoles sont définies comme des exploitations agricoles si elles remplissent un des critères suivant (détail en Annexe 3): (i) avoir une SAU supérieure ou égale à 1 hectare, (ii) posséder une superficie en cultures dites "spécialisée" (tabac, houblon,...), supérieure ou égale à 0.2 hectares, (iii) présenter une activité suffisante de production agricole estimée en nombre d'animaux (bovins, truies mères, ...), en surface (asperges, vignes, ...) ou en volume de production (cresson, endive, ...) (Agreste, 2008a). Le RA de 1955 est aussi le premier à avoir pris un caractère obligatoire et confidentiel du fait de l'entrée en vigueur de la loi n° 51-711 du 7 juin 1951. Le recensement agricole de 1955, bien que jugé à peu près satisfaisant sur les principales données de structure et les facteurs de production, a été critiqué en particulier pour le manque d'expérience des enquêteurs (Lenco, 1973; Richard-Schott, 2009). Pour d'autres causes (lourdeurs administratives, refus des agriculteurs de répondre aux questionnaires), les délais de rendus n'ont pas été tenus et la majorité des tableaux n'ont finalement pas été publiés. En 1983, les tableaux du RA 1955 existants ont été consignés sur des microfiches et les originaux ont été détruits (Richard-Schott, 2009).

Les RA et les enquêtes structures étant construits sur l'utilisation d'enquêtes publiques, les résultats sont soumis au secret statistique. Le secret statistique a pour but d'empêcher la diffusion de données individuelles. Deux des règles majeures pour respecter le secret statistique sont que chaque résultat publié doit être calculé à partir d'au moins trois données individuelles et qu'aucune valeur publiée ne doit contenir de données pour laquelle un individu (ici une exploitation) représente plus de 85% du total. Plus l'échelle de restitution de l'enquête est petite, plus le nombre de données sous le secret statistique risque d'être important. Actuellement, il est possible de demander une dérogation pour accéder à l'ensemble des données issues d'enquêtes, par exemple celles du RA (Encadré 1 : démarches nécessaires pour l'accès aux données complètes des RA sous secret statistique). La consultation des données s'effectue alors au sein d'un espace informatique sécurisé où tous les flux entrants et sortants sont contrôlés vis à vis des règles du secret statistique.

Encadré 1 : les démarches nécessaires pour l'accès aux données du RA sous secret statistique

<p>Dérogation au secret statistique et accès aux données complètes issues des enquêtes du RA</p> <ul style="list-style-type: none"> - Accord du service producteur de la donnée (SSP pour les données des RA) - Dossier de demande d'accès à des données confidentielles avec lettre d'appui des directeurs de recherche (CNIS, Conseil National de l'Information Statistique) - Passage en comité du secret (présentation du projet sur environ 3 minutes devant un comité d'experts) (CNIS) - Signature des engagements de confidentialité (engagement de responsabilité pénale) - Déclaration à la CNIL (Commission nationale de l'informatique et des libertés) - Participation à une séance d'enrôlement au CASD (Centre d'accès sécurisé aux données) : explication du fonctionnement du CASD, récupération des empreintes digitales nécessaires au fonctionnement du boîtier d'accès aux données, signature du contrat utilisateur des boîtiers - Montage du dossier de financement en fonction des besoins utilisateur au sein de l'espace d'accès aux données (logiciels spécifiques à installer, données à faire pénétrer dans l'espace sécurisé, quantités et types de fichier de sortie prévus) (CASD)

- Signature du contrat hébergeur du boîtier et du contrat de financement et bon de commande des données (CASD)
- Préparation de l'espace de travail au sein du CASD (version des logiciels à installer)
- Réception du boîtier, exploitation des données au sein de l'espace sécurisé et export des résultats.

II.2.1.6. Données Européennes (Eurostat)

A l'échelle européenne, les statistiques de production fournies par EUROSTAT sont le résultat d'enquêtes déjà effectuées par les États membres, croisées avec des données administratives et des estimations d'experts. Par exemple, les données EUROSTAT de l'année 2013 pour les cultures annuelles en France ont été constituées à partir du RA 2010 pour les fruits et légumes, de l'enquête sur les terres arables (pas d'année ni de référence indiquée), de données administratives provenant du SIGC⁸ (Système Intégré de Gestion et de Contrôle), de données de ventes provenant de FranceAgriMer, de renseignements en provenance d'organisation de producteurs, d'avis d'expert et de l'enquête TerUti-LUCAS (EUROSTAT, 2014). Ces données doivent être transmises aux instances européennes selon un calendrier défini pour chaque type de données selon la législation européenne (calendriers différents pour les cultures annuelles, cultures permanentes, cheptel hors volaille et les volailles).

L'échelle spatiale des données EUROSTAT est variable selon les années et les catégories considérées mais la plupart des résultats (hormis le cheptel de poules pondeuses) après 1974 sont disponibles à l'échelle régionale (Annexe 1).

II.2.1.7. La Statistique Agricole Annuelle (SAA)

La France dispose de statistiques sur les surfaces agricoles, les productions et les nombres de têtes de cheptel annuels depuis 1852, date à laquelle naît la SAA. Les modalités d'établissement de la SAA ont changé au cours du temps mais le principe reste le même : la synthèse de données agricoles de types disparates (enquêtes, opérations administratives, dires d'experts locaux) afin d'obtenir des résultats statistiques à l'échelle départementale.

De ses débuts jusque dans les années 1950, la statistique agricole est construite à partir de données élaborées à l'échelle communale puis agrégées à plus large échelle après vérifications. A partir de 1956, la statistique agricole annuelle est établie directement à l'échelle départementale à l'aide des techniques d'évaluation en vigueur (évaluations de correspondants et d'experts, données chiffrées par les organismes techniques professionnels, correspondants agricoles, constatations personnelles) mais aussi à l'aide de nouvelles techniques d'investigation statistique d'enquêtes par sondage. Ces enquêtes par sondage se sont développées à partir de l'enquête dite "contrôle de surface", dont les prémices ont vu le jour en 1946, d'abord basée sur l'utilisation des plans cadastraux, puis sur des photographies aériennes en 1969.

⁸ Ce système appelé IACS (Integrated Administration and Control System) est un système qui permet de veiller à ce que les paiements en provenance du FEAGA (Fond Européen Agricole de Garantie), un des deux systèmes de financement de la PAC, soient correctement effectués.

Aujourd'hui, la SAA est établie chaque année par les services statistiques (SSP) des directions régionales de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF). Elle est publiée sous forme de tableaux où apparaissent les résultats nationaux, régionaux ou départementaux. La SAA fournit des renseignements sur l'utilisation des terres, les productions végétales et animales à partir de synthèses utilisant l'ensemble des informations disponibles sur un sujet donné :

- des enquêtes déjà effectuées par ailleurs, exhaustives ou non (par exemple l'enquête TerUti) ;
- des sondages aléatoires sur des échantillonnages représentatifs utilisant des réseaux d'enquêteurs spécialisés ;
- des avis de correspondants et experts ;
- des données chiffrées fournies par les organismes techniques professionnels (ONIGC - Office national interprofessionnel des céréales - DGDDI - Direction générale des douanes et droits indirects, ...), l'UNIFA, ... ;
- des données d'autres administrations (INSEE, Institut national des Statistiques et des Etudes économiques, Office national météorologique, Service des Haras...).

Les résultats finaux sont arrêtés en fonction de la cohérence générale des données dans le temps et l'espace, et en accord avec les résultats des recensements et des enquêtes agricoles disponibles (recensements agricoles en particulier) (Agreste, 2017a).

Le détail de la nomenclature utilisée pour décrire l'agriculture départementale varie au cours du temps avec, par exemple, l'emploi d'une nomenclature très détaillée entre 1960 et 1980, puis une simplification visant à alléger le travail de collecte, d'arbitrage et de vérification des données (Béraud et Démotes-Mainard, 1998).

II.2.1.8. Eléments de comparaison des sources de données

Les estimations des surfaces peuvent être différentes du fait des modalités de collecte de l'information et l'échantillon enquêté. Par exemple, pour l'année 2017, l'enquête structure repose sur les réponses de 74 220 exploitations (Agreste, 2008a), TerUti sur le relevé d'occupation des sols de 322 446 points d'observations (Agreste, 2008b), le RICA sur les relevés effectués sur 7465 exploitations (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>) et la valeur de la SAA est construite à partir d'un ensemble de données. La différence dans les sources et les modalités d'enquête entraîne une variation d'au plus 8% dans l'estimation de valeur de la SAU nationale française, entre TerUti-LUCAS et le RICA (Figure II-4).

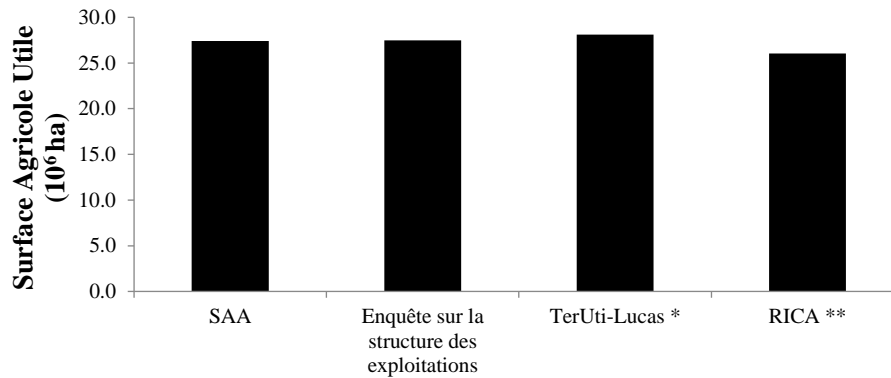


Figure II-4 : Estimation de la SAU en France métropolitaine pour l'année 2007 selon différentes sources de données

* Calculé à partir des catégories "Sols cultivés" et "Surface toujours en herbe"

** Calculé à partir des données : nombre d'exploitation représentée × SAU moyenne (ensemble des types d'exploitation)

Sources : SAA et Enquête sur la structure des exploitations : DISAR (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>), TerUti-LUCAS : Agreste, 2008, RICA : Agreste, 2009

Aux vues de l'échantillon plus restreint enquêté par le RICA, il est possible de penser que ce chiffre est le moins fiable.

II.2.2. Données de fertilisation minérale

Il existe plusieurs sources d'information sur les fertilisations minérales : les enquêtes effectuées auprès d'un échantillon d'agriculteurs et les données statistiques fournies par les organismes de vente d'engrais minéral.

II.2.2.1. Les enquêtes sur les pratiques agricoles

Des enquêtes ont été menées par le SCEES (Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques) puis le SSP (Service de la Statistique et de Prospective) sur les pratiques agricoles pour différentes cultures depuis les années 1960. Ces enquêtes fournissent en particulier des résultats sur la fertilisation minérale, le plus souvent exprimés en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ de culture. Connaissant les surfaces occupées par les différentes cultures, il est alors possible d'utiliser ces données pour calculer la fertilisation minérale totale. Les cultures et les surfaces enquêtées ne sont pas les mêmes d'une année à l'autre (Tableau II-14). Ainsi, l'enquête sur le blé tendre a porté sur 21 départements en 1964, sur 60 en 2006 (SCEES, 1966; Agreste, 2008), les premières données sur la betterave sucrière n'apparaissent qu'en 2001 (Agreste, 2004). Ces enquêtes présentent le désavantage de fournir des résultats irréguliers dans le temps pour la majorité des cultures.

II.2.2.1.1. Enquêtes sur les cultures annuelles

Les préoccupations auxquelles les enquêtes tentent d'apporter des réponses, les cultures ciblées et le nombre de départements visés par les enquêtes sur les cultures annuelles ont évolué au cours du temps (Tableau II-14).

Des années 1960 aux années 1980, les enquêtes visent à (i) mesurer la superficie et le rendement des cultures, (ii) analyser les techniques culturales (variétés utilisées, précédent cultural, dose d'engrais minéral, type de fertilisation organique...), en liaison avec les rendements. Le panel de culture couvert par les enquêtes a varié entre les années. Les enquêtes effectuées avant 1980 concernent surtout quatre cultures : le blé tendre, l'orge, le maïs grain et les pommes de terre. A partir de l'année 1981, ces enquêtes portent sur le blé tendre, l'orge, le maïs grain, le colza, le tournesol. Sur cette période, le nombre de départements pour lesquels les résultats sont disponibles peut aller du simple au triple (par exemple 5 en 1964 à 15 en 1968 pour le maïs grain).

L'enquête menée en 1994 concerne (i) la description des pratiques culturales à l'échelle de la parcelle, (ii) l'identification des stratégies de l'exploitant dans le contexte de limitation de certaines productions agricoles (quota laitier instauré en 1984, prime annuelle pour le boisement des terres agricoles en 1991, jachère obligatoire pour le droit aux aides PAC de 1992), (iii) l'éclairage sur la démarche des agriculteurs face à la nécessité de préserver l'environnement. De nouvelles cultures sont ajoutées à la liste de celles présentes dans l'enquête de 1981 : le blé dur, le maïs fourrage et la jachère agronomique. A partir de 1994, les résultats sont disponibles à l'échelle régionale.

Les enquêtes de 2001, 2006 et 2011 sont le reflet des préoccupations environnementales (directive nitrates et plan Ecophyto). Les objectifs sont d'une part, de collecter de l'information afin de décrire et caractériser les pratiques des agriculteurs dans un contexte de limitation des pollutions et de préservation de l'environnement, d'autre part d'établir des indicateurs agri-environnementaux, permettant d'évaluer et de suivre l'incidence des programmes d'action, mis en œuvre dans le cadre de la directive nitrates, sur les pratiques des agriculteurs (Agreste, 2004). Le panel des cultures enquêtées est quasiment le même entre les 3 années (seule la pomme de terre est ajoutée dans le panel des cultures enquêtées en 2006). Les résultats sont disponibles à l'échelle régionale.

II.2.2.1.2. Enquêtes sur les prairies

Les cultures fourragères ne constituent pas véritablement une filière de production mais sont majoritairement des productions intermédiaires à la production de viande ou de lait. L'augmentation de l'activité d'élevage et les problèmes d'approvisionnement en fourrages (sécheresse) ont donné de l'intérêt à ces productions. Les premières tentatives de description et de classification des productions fourragères par les services de la statistique datent de 1964-65, lors d'une enquête expérimentale effectuée auprès des agriculteurs (SCEES, 1965b). Par la suite, des enquêtes ont été menées pour améliorer la quantification du potentiel de production des prairies et mieux connaître les techniques culturales relatives à ces dernières. La première enquête sur les prairies de 1968 porte sur le seul département de la Haute-Vienne (SCEES, 1969b). L'enquête de 1978 présente des résultats, en

particulier pour la fumure minérale, pour 17 zones agro-climatiques dans 6 départements (4 dans les Pyrénées Atlantiques, 3 dans l'Oise, 1 pour la Meurthe-et-Moselle, 3 dans le Jura, 1 dans les Côtes-du-Nord, 5 en Ardennes) (SCEES, 1981). Celle de 1982 couvre la quasi-totalité du territoire (200 zones agro-climatiques dans 82 départements) mais l'information sur la fumure minérale n'est restituée qu'à l'échelle de la région et pour l'ensemble de prairies, qu'elles soient des prairies temporaires, artificielles ou permanentes (SCEES, 1984). L'enquête prairie effectuée en 1998 (Agreste, 2000a) couvre le même territoire que l'enquête de 1982 mais les résultats sont donnés à l'échelle de 200 régions fourragères par type de prairie : temporaire, artificielle et prairies permanentes productives (qui produisent plus de 1500 unités fourragères). Les enquêtes de 2001, 2006 et 2011 ont été effectuées sur un échantillon de 19 départements, les résultats sont disponibles à l'échelle régionale sur le site DISAR (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>).

Tableau II-14 : Nombre de départements ou régions par culture et par an pour lesquels les résultats des enquêtes de fertilisation minérale sont disponibles

Année		64	65	66	67	68	69	71	72	73	75	78	81	82	94	2001	2006	2011	
Echelle départementale	Blé Tendre	21	20	30	28	27	27	2	2	1	11		38						
	Blé dur																		
	Orge	20	19	29	26	12	23	1	1		6		43						
	Maïs grain	5	11		11	15	10	3	3	1	9		30						
	Colza												20						
	Tournesol												8						
	Pomme de terre	3	4	5															
	Betteraves Industrielles																		
	Prairies temporaires					1							6						
	Prairies permanentes intensives																		
	Prairies (temporaires, artificielles, permanentes ensemble)																		
	Surface toujours en herbe												6						
Nombre de département en France		89 (hors Corse)				94 (hors Corse)													
Echelle régionale	Blé Tendre			1	5	7	4	2	2	2	2				12	18	18	18	
	Blé dur														4	4	4	7	
	Orge			1	5	4	5	1	1	1	1				9	12	12	15	
	Maïs grain		1		1	1	2	3	3	2	1				8	16	13	16	
	Colza														7	9	9	14	
	Tournesol														8	5	5	8	
	Pomme de terre		1	1													2	8	
	Betteraves Industrielles															4	4	7	
	Prairies temporaires															13	12	5	
	Prairies permanentes intensives															6	5	6	
Prairies (temporaires, artificielles, permanentes ensemble)														21					
Nombre de région en France		21 (hors Corse)																	

Sources : (Agreste, 2004, 2000b, 1996; DISAR; SCEES, 1984, 1970a, 1970b, 1969a, 1969b, 1969c, 1968a, 1968b, 1967, 1966a, 1966b, 1966c, 1965c, 1965d, 1975)

II.2.2.2. Données d'organismes techniques

Les organismes techniques et professionnels peuvent collecter des informations sur les pratiques de fertilisation directement auprès des agriculteurs. L'institut technique des céréales ARVALIS – Institut du végétal collecte les pratiques annuelles de fertilisation azoté sur le blé tendre sur une base de 200 agriculteurs dans plus de 40 départements depuis 2000 (Le Souder, 2007).

II.2.2.3. Vente d'engrais de l'Eurostat

Eurostat compile les données de quantité de fertilisant minéral (azoté, potassique et phosphaté) fournies par "Fertilizers Europe" (anciennement appelée 'European Fertilizer Manufacturers Association', EFMA), le plus gros producteur de fertilisant inorganique d'Europe. Les membres de cette organisation représenteraient 81% de la capacité de production des fertilisants minéraux azotés en Europe. (http://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/aei_fm_manfert_esms.htm#annex1497272073622). Les données sont disponibles à l'échelle du pays pour les années 1985 à 2015.

II.2.2.4. Données de livraison d'engrais départementale de l'Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA)

L'agrément octroyé par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) et par le Ministère de l'industrie (*Arrêté du 9 juillet 2009 portant agrément d'un organisme professionnel pour l'exécution d'enquêtes statistiques publiques dans l'industrie*) autorise l'UNIFA à interroger toutes les entreprises de production, adhérentes ou non à l'UNIFA, ainsi que les importateurs d'engrais, les grossistes sur le territoire national et les grands groupements d'achat de la distribution agricole sur leur vente d'engrais minéraux. Les résultats de ces enquêtes sont rendus publics dans le respect des règles du secret statistique. Les résultats sont enregistrés mensuellement avec le détail de chaque formule d'engrais permettant de traduire les quantités de produits vendus en tonnes pour chaque élément nutritif : azote, phosphore, potassium, soufre et magnésium (Union des Industries de la Fertilisation, site Web : <http://www.unifa.fr/>). Ces données sont collectées depuis plus de 60 ans et des résultats sont disponibles pour l'ensemble des départements français, sauf les départements de la grande couronne parisienne où les livraisons sont regroupées sous l'appellation "île de France" ou "région Parisienne", et pour la Corse, où les données sont fournies pour l'île entière (pas de données distinctes pour les deux départements de la Corse).

II.2.3. Sélection des données en vue de leur utilisation dans les balances azotées

L'objectif de la thèse est de calculer des chroniques de surplus azotés au moyen de balances azotées de surface du sol en France pour étudier leur évolution et leur répartition spatiale. Pour cela, les balances azotées devaient être calculées :

- sur une période qui engloberait si possible la révolution verte et qui s'étendrait jusqu'à nos jours ;
- à une échelle spatialisée la plus fine possible.

Cet objectif impose de sélectionner des données concernant les différentes productions agricoles (végétale et animale), des données de fertilisation minérale et de dépôt atmosphérique disponibles à la fois sur une période longue, à fine échelle, et sur l'ensemble du territoire métropolitain. L'objectif de calculer des chroniques rajoute le critère d'annualité aux données agricoles.

II.2.3.1. Données d'occupation du sol et de production agricole

Les données CORINE Land Cover (CLC) et les Registres Parcellaires Graphiques (RPG) sont intéressantes du fait de leur fine résolution. Ces données ne peuvent toutefois pas être utilisées comme seule source pour calculer les balances azotées de surface du sol pour deux raisons majeures (i) elles ne renseignent pas sur le nombre de tête de cheptel, (ii) elles ne permettent pas d'obtenir la production des différentes cultures. Cependant, couplées à d'autres sources de données telles que le Recensement Agricole (RA) et la Statistique Agricole Annuelle (SAA), CLC et les RPG pourraient permettre de calculer des balances azotées à fine échelle. CLC a déjà été utilisé pour la spatialisation des postes de la balance à l'échelle de bassins versants (Campling *et al.*, 2005; SOeS, 2013). L'utilisation de CLC comporte toutefois des biais de type sémantique et spatial car l'occupation biophysique (Annexe 1) fournie par la donnée CLC est sujette à interprétation (Campling *et al.*, 2005). De surcroît, seules quatre versions de CLC (1990, 2000, 2006 et 2012) sont disponibles, ce qui limiterait l'obtention de résultats à une période relativement récente. Les RPG ont été utilisés pour préciser l'occupation du sol et les successions culturales au niveau d'aire d'alimentation de captage (Martin et Scheurer, 2017) mais à notre connaissance ces données n'ont pas été utilisées pour le calcul de balance azotées. L'utilisation du RPG poserait un biais majeur dans le calcul des balances azotées puisque seule l'information provenant des déclarants PAC est recensée. De plus, le RPG n'est disponible que sur la période récente ce qui ne permettrait pas d'obtenir une chronique longue de résultats.

L'enquête TerUti-LUCAS présente des avantages quant à son utilisation pour le calcul des balances azotées de surface du sol (enquête annuelle, nomenclature assez détaillée, estimation de l'incertitude sur les données de surface par culture avant 2012) mais ne peut être utilisée seule car elle ne renseigne pas sur la production et le nombre de têtes de cheptel. Couplée à d'autres sources de données telles que le Recensement Agricole (RA) et la Statistique Agricole Annuelle (SAA), l'enquête TerUti-LUCAS pourrait permettre de calculer des balances azotées à échelle départementale avec quantification de l'incertitude sur l'importance des surfaces cultivées de 1982 à 2012. L'échelle départementale reste cependant une échelle de résultats assez large. D'autre part, l'enquête TerUti-LUCAS n'est disponible sur l'ensemble du territoire qu'à partir de 1982, ce qui ne convient pas à l'objectif d'englober la révolution verte dans la période d'étude.

Le RICA donne des chiffres moyens de surface et de nombre de têtes de cheptel par type d'orientation agricole, par importance économique et par région. Les données du RICA pourraient donc permettre de calculer des balances azotées "moyennes" par région, orientation agricole et importance économique. Les critères d'orientation agricole et d'importance économique n'étant pas spatialisés, les surplus azotés par région, orientation agricole et importance économique ne pourraient pas être attribués à une échelle spatiale plus fine que la région. Des surplus azotés "moyens" régionaux (type d'orientation agricole et importance économique agrégés) pourraient être obtenus mais cette échelle de résultat est trop large vis à vis des objectifs fixés. D'autre part, la donnée du RICA présente un biais important puisqu'elle ne renseigne que sur les exploitations agricoles d'une certaine importance économique.

Les RA localisent leurs informations au niveau de la commune du siège social de l'exploitation. Cela entraîne que (i) la commune est donc le niveau spatial le plus fin de restitution des données du RA, (ii) les productions des parcelles situées hors de la commune du siège de l'exploitation peuvent être mal localisées. Il ne semble toutefois pas possible de quantifier le biais relatif à la présence de parcelles situées hors de la commune du siège social de l'exploitation. D'autre part, les données du RA sont construites à partir d'enquêtes effectuées sur unités de production (exploitations agricoles) dépassant une certaine superficie (Annexe 2).

En posant les hypothèses que (i) les parcelles exploitées doivent être regroupées autour du siège social de l'exploitation dans le but de minimiser les coûts d'exploitation, (ii) les valeurs seuils pour la prise en compte des exploitations dans les RA sont relativement faibles, alors les données des RA permettent d'obtenir des données de surface et de nombre de têtes de cheptel à l'échelle spatiale de la commune, une échelle spatiale relativement fine. L'incertitude liée à ces données peut alors être considérée comme faible.

Les informations contenues dans les RA ne permettent pas de calculer directement les balances azotées de surface du sol (pas de données de production) et sont ponctuelles dans le temps. L'accès à l'intégralité des données des RA pose des problèmes pour l'année 1955 puisque celle-ci n'est actuellement disponible qu'à l'état non numérisé de microfiches, et pour les autres années (1970, 1979, 1988, 2000, 2010) du fait de la présence du secret statistique. Le secret statistique impacte le calcul des balances azotées de surface de sol. Si les données manquantes concernent le cheptel, les entrées d'azote au niveau du sol seront sous-estimées. Le surplus azoté sera alors aussi sous-estimé. En revanche, si les données manquantes concernent les surfaces cultivées, l'export d'azote à partir du sol sera sous-estimé et le surplus sera surestimé par rapport à sa valeur réelle. L'accès aux données exemptes de secret statistique permet donc de minimiser l'erreur possible sur les résultats de surplus. L'accès aux données complètes issues des enquêtes du RA 1970, 1979, 1988, 2000, 2010 étant relativement complexe et coûteux, certains auteurs ont choisi d'autres stratégies pour s'affranchir du secret statistique :

- L'utilisation d'une échelle de résultats où le secret statistique entacherait assez peu de données, les données encore sous secret statistique étant alors considérées comme nulles (SOeS, 2013);
- Le remplacement des données sous le secret avec des estimations qui utilisent la comparaison des données à différentes échelles. Le biais introduit par l'utilisation de ces techniques ne peut pas être prédit mais cette méthode semble générer les plus fortes erreurs relatives pour les surplus les plus faibles (Bach et Frede, 2005).

Les données EUROSTAT pourraient être utilisées dans le calcul de balance azotée et permettre l'obtention de résultats à l'échelle régionale à partir de 1974. L'étendue de disponibilité des données et les échelles de résultats possibles ne correspondent pas aux objectifs fixés.

La statistique agricole annuelle (SAA) annuelle offre un triple avantage (i) elle couvre le territoire métropolitain entier, (ii) elle est disponible annuellement depuis au moins le début du 20^{ème} siècle, (iii) elle renseigne à la fois sur les productions, les surfaces et le nombre de têtes de cheptel.

La SAA présente toutefois trois défauts au vu de l'objectif final : (i) La SAA s'est maintenue au cours du temps mais ses sources ne sont pas homogènes, (ii) la nomenclature de restitution des résultats à

elle aussi évoluée au cours du temps, (iii) l'échelle spatiale minimale de restitution de la SAA étant le département, les balances azotées de surface du sol utilisant ces données seraient calculées à l'échelle du département. Cette échelle reste une échelle de résultats assez large.

II.2.3.2. Données de fertilisation minérale

L'utilisation des valeurs issues des enquêtes sur les pratiques agricoles comporte plusieurs limites pour leur utilisation dans le calcul de balance azotées sur la période étudiée :

- le nombre et le type de cultures soumises aux enquêtes n'englobent pas l'ensemble des productions ;
- la zone géographique soumise n'englobe pas forcément l'ensemble du bassin de production de la culture, en particulier pour les années anciennes ;
- l'échelle de significativité des enquêtes ;

Du fait de l'échantillon interrogé pour ces enquêtes, les résultats sont le plus souvent significatifs à l'échelle régionale mais rien n'indique que ces chiffres seraient toujours significatifs à une échelle plus locale et qu'ils seraient en accord avec des pratiques culturelles locales. En première approche, cela restreindrait leur utilisation à des échelles assez larges (région) et surtout à des usages ponctuels dans le temps, puisque ces enquêtes sont conduites de façon occasionnelle.

- l'absence de quantification de la variabilité des résultats ;

Les résultats fournis ne sont pas caractérisés par un indicateur de la dispersion (écart-type, étendue, ...). De ce fait, l'erreur faite en utilisant les données moyenne fournies devrait être estimée à dire d'expert, les données brutes n'étant pas disponibles. De surcroit il faudrait intégrer une erreur liée aux mésestimations (cf. point suivant).

- les erreurs d'observation inhérentes à toutes investigations scientifiques (oublis, sous-déclarations, interprétations défectueuses des définitions de l'enquête, ...)(SCEES, 1969a) peuvent fausser certains résultats ;

- les limites temporelles.

Les enquêtes sont réalisées ponctuellement (Figure II-5) et les enquêtes contenant des informations sur la fertilisation minérale ne semblent pas remonter avant 1962.

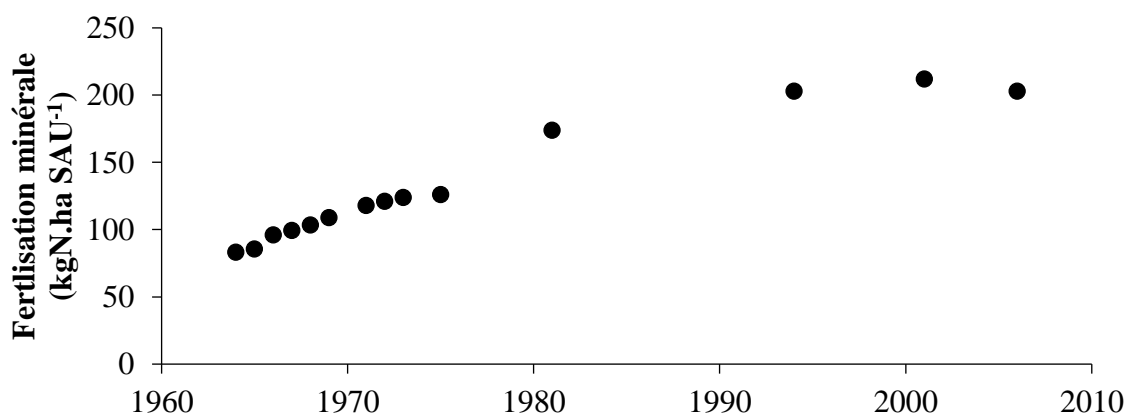


Figure II-5 : Fertilisation minérale sur le blé tendre dans le département de l'Aube

Sources : (Agreste, 2004, 1996; DISAR; SCEES, 1983, 1977, 1970a, 1969c, 1968b, 1967, 1966a, 1965d, 1975)

Le nombre de données de fertilisation minérale azotée sur les différentes cultures en France étant peu important, il serait alors tentant d'utiliser d'autres sources de données pour compléter ces valeurs, comme les données fournies par les organismes professionnels et techniques. Ces données comportent plusieurs biais (i) la collecte de ces données est relativement récente, (ii) il n'y a pas d'information sur la représentativité du réseau d'agriculteurs participants à ces collectes et donc pas d'indication de la représentativité des résultats. Dans le cas où la fertilisation minérale n'est pas disponible pour une culture, la quantité d'azote minéral nécessaire au calcul des balances azotées a pu être estimée à partir de l'utilisation de préconisations techniques (Duthion, 1999; Lassaletta *et al.*, 2012). Les valeurs de préconisation comportent des biais puisqu'elles sont données par rapport à une situation se référant à des conditions idéales, qui permettraient l'obtention d'un rendement optimal, ce qui conduit le plus souvent à surestimer la fertilisation. Des valeurs manquantes de fertilisation minérale ont aussi été estimées avec l'utilisation de valeurs de fertilisation pour les cultures "les plus proches". Par exemple, le modèle NOPOLU estime la fertilisation de l'avoine à partir du ratio de la quantité d'azote par unité de rendement du blé tendre, multiplié par le rendement de l'avoine (SOeS, 2013).

Malgré l'utilisation de sources de données annexes de fertilisation minérale, il semble probable que les chroniques de fertilisation ne soient pas complètes. Il serait alors nécessaire de déterminer comment les compléter. Serait-il plus juste de compléter les chroniques de fertilisation minérale en utilisant une interpolation linéaire ou en suivant le taux de variation de la chronique de vente? Comment gérer l'extrapolation de ces valeurs pour les années qui sortent de l'intervalle couvert par les enquêtes?

L'utilisation des statistiques de livraison d'engrais à l'échelle départementale (UNIFA) est sujette à caution. En effet, il existe des "perméabilités géographiques" entre les départements. Certaines ventes se font à des acheteurs utilisant les fertilisants hors du département de vente. Du fait de ces "effets de bord", il n'est pas possible de certifier que le chiffre de la livraison d'engrais au département est égal au chiffre utilisé au sein du département. De plus, il est possible que les agriculteurs constituent des stocks d'engrais d'une année à l'autre, bien que l'on puisse penser que la gestion financière des exploitations agricoles ne permette pas une immobilisation importante de capitaux sous la forme de stock d'engrais minéraux. Pour ces raisons, il n'y a pas identité entre le chiffre de livraison des engrais minéraux et la consommation d'engrais minéral sur un département.

II.2.3.3. Choix et stratégie d'utilisation des données dans les balances azotées de surface du sol

La comparaison des caractéristiques des données agricoles disponibles en France a permis d'identifier la combinaison de deux sources de données pouvant répondre aux critères précédemment établis (données annuelles sur les différentes productions agricoles et données de fertilisation minérale à la fois sur une période longue à fine échelle, sur l'ensemble du territoire métropolitain).

La SAA remplit les critères d'annualité et d'étendue de disponibilité de la donnée (Figure II-6). Le mode d'établissement de la SAA est resté globalement identique au cours du temps même si le nombre d'échelles administratives intermédiaires à la production du résultat a évolué. Il semble difficile de statuer sur la quantification de l'impact de ce changement. L'ensemble des données agricoles

nécessaires au calcul se trouve dans la SAA (Tableau II-15). La nomenclature de restitution des données a évolué et un travail sur les catégories de données sera nécessaire afin d'obtenir les catégories requises au fonctionnement du modèle CASSIS_N tout au long de la période d'étude.

Les RA permettent l'obtention de données à fine échelle, sur une étendue relativement longue et qui intègre la révolution verte. De plus, cette donnée est la seule qui puisse être qualifiée d'exhaustive (Tableau II-15) ce qui assure la robustesse des valeurs fournies par cette source. Les données de la SAA seront utilisées pour combler les lacunes des données du RA en vue d'obtenir les chroniques de données agricoles (production, nombre tête de cheptel) nécessaires au fonctionnement du modèle CASSIS_N.

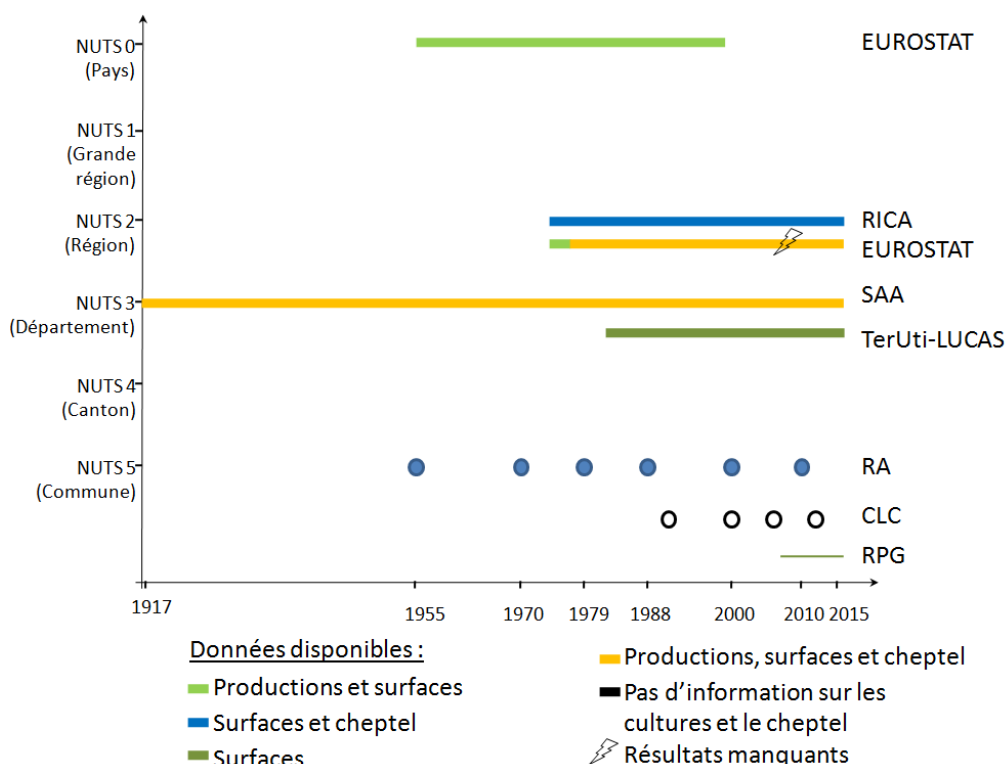


Figure II-6 : Disponibilité et échelle de restitution des données agricoles en France

Sources : Deronzier, 2013 ; Eider - Métadonnées - OC-LUCAS - Occupation du territoire en nomenclature LUCAS ; SOeS, 2009 ; Agreste, 2016 ; Agreste, 2015 ; Page Web : Home - Eurostat ; European Commission, 2000 ; SCEES, 1965; Alfroy, 1979 ; Agreste, 1993 ; Agreste, 2000; Agreste, 2010, IGN et ASP, 2017, EUROSTAT, 2017

Tableau II-15 : Synthèse sur les types d'information, modes et échelles de collecte des données agricoles en France

Source de données	Type de donnée					Source de données					Echelle d'acquisition de la donnée		
	Production	Surface	Nombre de tête de cheptel	Occupation géophysique	Comptable	Enquête exhaustive	Echantillon	Données administratives	Données géographique	Mixte (Enquêtes déjà effectuées, experts, organismes divers ...)	Unité administrative	Unité de production	Unité de surface
CLC													
Enquête structure													
RA													
TerUti													
SAA													
RPG													
Eurostat													
RICA													

Les données de livraison de l'UNIFA sont les seules qui permettent l'accès à une chronique de fertilisation minérale sur l'ensemble de la période d'étude et à un niveau relativement fin (départemental). Ces données ont donc été retenues estimer la fertilisation minérale malgré les limites les biais connus et à ce jour non quantifiables, évoqués précédemment (perméabilités géographiques et temporelles).

II.3. Mise en forme des données départementales et communales

Les données agricoles de la SAA et des RA ne sont pas exploitables directement dans le modèle CASSIS_N. Des étapes de collecte et de mise en forme ont été nécessaires pour les deux types de données. Cette partie décrit ces étapes pour les données de la SAA concernant l'échelle départementale (partie II.3.1) et les données du RA concernant l'échelle communale (partie II.3.2).

II.3.1. Application du modèle CASSIS_N à l'échelle départementale : données de la SAA et de l'UNIFA

Les données de la SAA sont essentiellement disponibles sous format papier. Des volumes devraient être disponibles depuis les années 1852. En pratique, le volume le plus ancien consulté date de 1882. Le dernier volume papier connu est daté de 2005. Une partie des valeurs de la SAA a est déjà disponible sous format informatique. Les données des années 1989 à 2015 sont consultables et téléchargeables sur le site DISAR (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>). L'ensemble formé par la totalité de ces données est décrit dans la partie II.3.1.1. La nomenclature de la SAA a évolué au cours du temps et les catégories renseignées dans la SAA ne correspondent pas forcément aux données nécessaires au fonctionnement de CASSIS_N. Le travail de mise en forme et de comblement des données agricoles est détaillé dans la partie II.3.1.2. Un travail de collecte et de saisie a aussi été

nécessaire pour les données de fertilisation minérale. La partie II.3.1.4. présente les méthodes d'homogénéisation des données de fertilisation minérale.

II.3.1.1. Description de la base de données brute

La SAA est disponible sous deux formats : sous forme d'annuaires papier de son établissement jusqu'à 2005 et sous forme numérique sur le site DISAR pour les années 1989 à 2016. Entre 1989 et 2005, une partie des données est issue de DISAR et lorsque cela a été possible, un complément d'information issu des annuaires papier a été saisi (détail des prairies artificielles entre 2000 et 2005 par exemple). Il est important de noter que les valeurs indiquées sur le site DISAR ont parfois évolué. Ainsi, les valeurs de certaines catégories ont été modifiées entre la date du téléchargement des données (données de 2013 actuellement utilisées dans CASSIS_N) et maintenant (Tableau II-16). Contacté à ce sujet, le responsable de la diffusion des données du SSP a pu confirmer la modification des données fournies par DISAR mais les dates de modification ainsi que les calculs ayant effectués n'ont pas été fournis. Ce genre de problème soulève la question de l'origine et de la traçabilité des données. Tant que la SAA est disponible sur annuaire papier, il est possible d'y accéder pour retrouver la donnée initiale, ce qui ne semble plus faisable depuis 2005. Une note semble toutefois indiquer que les fichiers de données et les dossiers relatifs à la SAA seraient conservés aux archives nationales de Fontainebleau (Ministre de l'Agriculture, de la Pêche, de l'Alimentation et des Affaires rurales et Ministre de la Culture et de la Communication, 2006).

Tableau II-16 : Modifications des valeurs de la SAU fournie par DISAR dans le département de la Corse

Détail sur le téléchargement	SAU en Corse en 2000 (ha)
Téléchargé le 20/10/2012	308 661
Téléchargé le 18/11/2013	308 285
Chiffres actuels sur DISAR (série de valeurs allant de 1989 à 2000)	308 285
Chiffres actuels sur DISAR (série de valeurs allant de 2000 à 2016)	286 268

Le travail de collecte et de saisie a permis de constituer une base de données agronomique d'environ $1.2 \cdot 10^6$ chiffres portant sur les productions agricoles, les surfaces occupées par les cultures, les différentes catégories de cheptel et les livraisons d'engrais azoté à l'échelle départementale à partir du site DISAR et des annuaires de la SAA (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/> ; SSP, Service de la statistique et de la prospective, 1917 - 2015). La base de données s'étend de 1917 à 2015. Le nombre de catégories saisies, reflète de la variation de la nomenclature de la SAA au cours du temps, est variable elle aussi (Figure II-7). De 1917 à 1945, la nomenclature est relativement stable, hormis pour l'année 1929 où a lieu une enquête décennale qui donne des résultats pour des catégories très détaillées. En 1945, le nombre de catégories augmente surtout pour les types de cultures, avec l'apparition de renseignement sur les cultures dérobées. Les cultures dérobées sont des cultures de courte durée, intercalée entre deux autres cultures, dans des régions où on ne pratique d'ordinaire qu'une seule culture par an (culture principale). Les cultures dérobées sont le plus souvent des cultures fourragères. Cette pratique est surtout développée sur la façade atlantique qui bénéficie, grâce à la douceur de son climat, d'une longue période végétative (Mazoyer *et al.*, 2002). Le niveau de détail de la nomenclature augmente encore en 1960, avec l'ajout de nouvelles cultures et légumes cultivés sous

des modalités différentes (culture maraîchère, principale, associée, sous serre). En 1980, la nomenclature est simplifiée et les modalités de cultures sont toutes regroupées, les surfaces de légumes ne sont plus indiquées. Certaines catégories de cultures sont renseignées avec un "top 20" où seuls les départements les plus productifs sont renseignés. À partir de 1989, la nomenclature ne varie plus beaucoup et ce jusqu'à 2016.

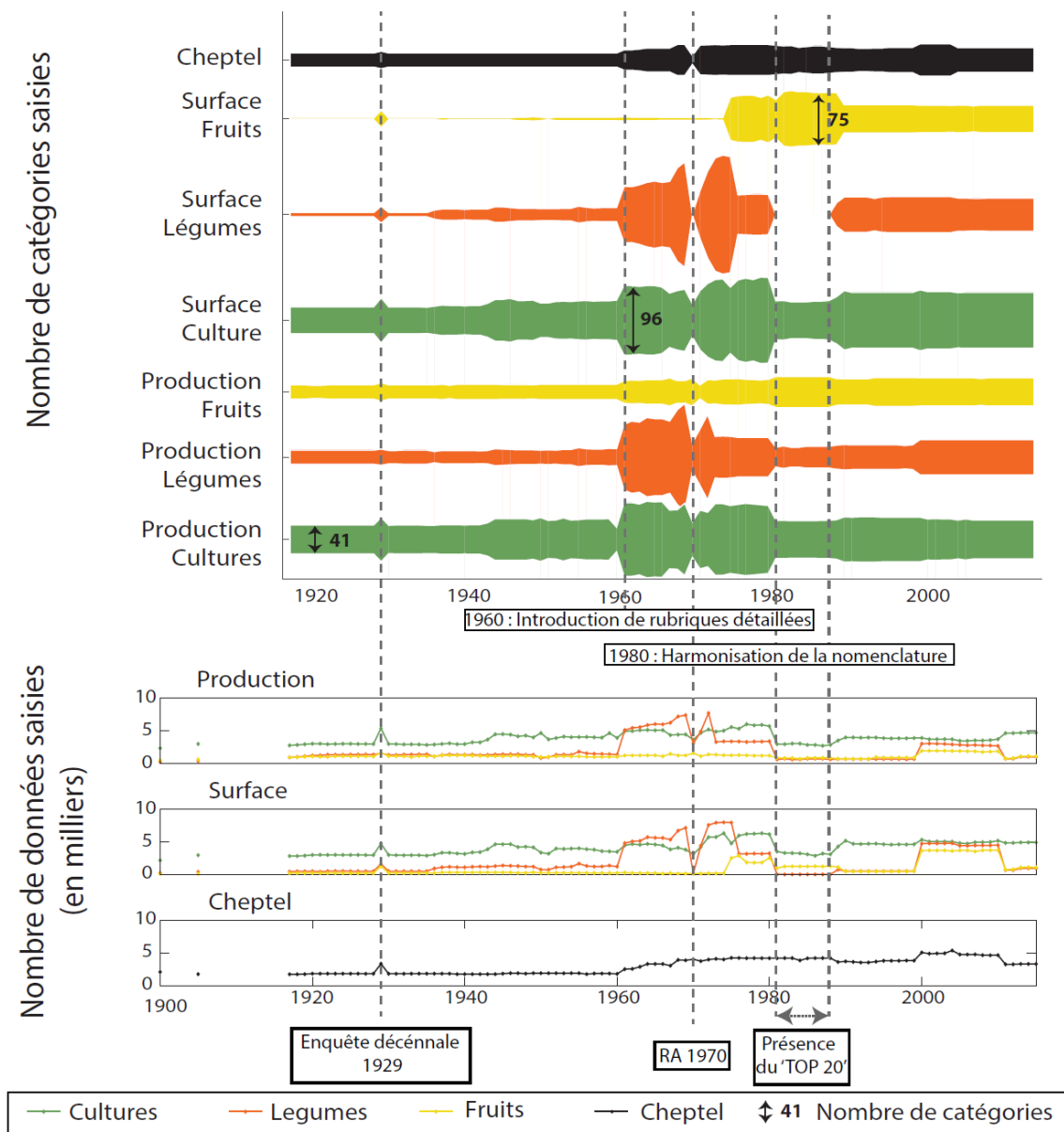


Figure II-7 : Nombre de données et de catégories saisies par an à partir de la SAA sur les productions, les surfaces végétales, et le nombre de tête de cheptel

II.3.1.2. Reconstitution de chroniques de données départementales homogènes

L'application du modèle CASSIS_N aux données départementales nécessite que ces dernières soient travaillées pour constituer les chroniques complètes de données nécessaires au fonctionnement du modèle. Les chroniques de la SAU, des productions agricoles, du nombre de tête de cheptel et des données de fertilisation minérale ont été reconstituées pour obtenir des séries continues dans le temps.

II.3.1.2.1. Reconstitution de la chronique de la SAU

Les résultats de CASSIS_N sont calculés par rapport à la surface dédiée à l'agriculture des départements, qui est représentée par la SAU. Le concept de SAU définie comme la "surface totale diminuée des bois et du territoire non agricole ainsi que des sols des bâtiments, des cours et des landes non productives" (SCEES, 1969a) n'apparaît comme donnée dans les volumes de la SAA qu'en 1965, à la suite de l'adoption de cette définition par la CEE. Pour les années antérieures à 1965, la SAU a été reconstituée à partir des données d'utilisation du territoire disponibles (Tableau II-17).

Tableau II-17 : Modalités de calcul de la SAU

Période	Données utilisées pour le calcul de la SAU
1917 à 1936	Terres arables + Surface toujours en herbe + Surface maraichère + Surface en vigne
1937 à 1945	Terres arables + Surface toujours en herbe + Surface maraichère + Surface en vigne + Surface arbres fruitiers
1945 à 1964	Terres arables + Surface toujours en herbe + Surface maraichère + Surface en vigne + Surface arbres fruitiers + Surface en culture permanentes (oliviers, noyers, châtaigniers)
1965 à 2015	Pas de calcul : SAU disponible

II.3.1.2.2. Répartition de quantités régionales sur les départements

Dans le cas de la présence de données régionales, la répartition sur les départements concernés se fait au prorata de la répartition département/région pour la donnée observée sur une période de référence de 5 ans, proche de l'année à compléter. Si aucune donnée ne renseigne la répartition département/région dans la période de référence des 5 ans, la valeur départementale n'est pas estimée et sera complétée par d'autres traitements. Un exemple détaillé des étapes suivies pour la reconstitution de données départementales du cheptel de canard entre 2005 et 2010 à partir des données régionales est présenté en annexe 4.

En 1970 et entre 2005 et 2015, des catégories de productions, de surfaces et de cheptel sont données à l'échelle régionale. Leur nombre est consigné dans le tableau II-18 ainsi que la période de 5 ans qui a permis le calcul de la répartition.

Tableau II-18 : Nombres de catégories fournies à l'échelle régionale par la SAA

Type de données	Année	1970	2005 à 2015
Production	Cultures	12	3 (Plantes sarclées fourragères)
	Légume	24	
Surface	Cultures	3	3 (Plantes sarclées fourragères)
Cheptel		32 (Tout le cheptel hors bovins)	10 (Equins et volailles-clapier)
Période de référence		1971 - 1975	2000 - 2004

II.3.1.2.3. Comblement des lacunes des chroniques de données

Certaines chroniques de données présentent des vides en début, en fin ou au sein des chroniques. Les données manquantes de début de chronique sont complétées avec la première valeur connue, les données manquantes en fin de chronique sont complétées avec la dernière valeur connue, les valeurs

manquantes en milieu de chronique sont complétées par interpolation linéaire entre les valeurs connues (Figure II-8).

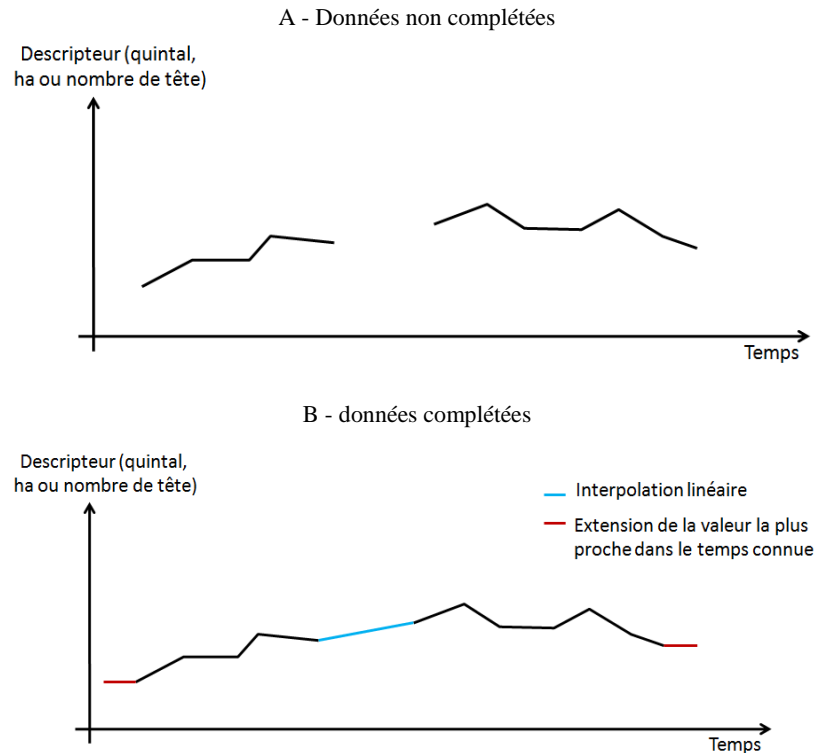


Figure II-8 : Méthodes de comblement des vides dans les séries de données

Ce genre de méthode pose le postulat que les catégories non renseignées dans les annuaires de la SAA sont tout de même produites en réalité, mais que les informations ne sont pas consignées.

II.3.1.2.4. Homogénéisation des catégories de productions et cheptel

Les catégories de production et de cheptel ne sont pas homogènes dans le temps, trois cas de figure peuvent se présenter : (i) l'abondance de catégories pour lesquelles aucune information sur les teneurs en azote n'est disponible, (ii) le manque de détail au sein d'une catégorie pour laquelle une distinction est nécessaire, (iii) la production de la culture n'est pas donnée dans la bonne unité.

Pour le cas (i), un exemple simple concerne la présence d'informations sur la production selon le mode de culture (production en plein champ ou en maraîchage). Dans ce cas, les productions et les surfaces sont sommées afin de réduire le nombre de catégories.

Pour le cas (ii), un exemple est celui de la variation des catégories du cheptel des vaches (Annexe 5). La teneur en azote de l'excrétion des vaches laitières et nourrices est différente (109.7 vs. 79.5 kgN.an⁻¹). Cependant, avant 1966, la seule catégorie renseignée dans les annuaires de la SAA concerne le nombre de vaches (sans distinction). Les catégories des vaches laitières et nourrices ont donc été recrées à partir du nombre de vaches total de chaque département et du ratio observé sur les autres années (1966 à 2015) entre vaches nourrices et vaches laitières pour le même département. Les nombres de tête des vaches laitières et nourrices sont ainsi reconstitués afin de pouvoir prendre en compte les différences d'excrétion.

Le cas (iii) n'arrive que pour la production de raisin destinée au vin. Cette production est exprimée en hectolitre dans la SAA alors qu'il est nécessaire d'avoir la quantité de raisin produite pour le vin en unité de poids pour pouvoir déterminer la quantité d'azote exportée par la production de raisin. Un facteur de conversion de 1.3 a été retenu pour calculer la production de raisin correspondant à la production viticole (valeur basse de l'intervalle relevé sur le site de l'Institut Français de la vigne et du vin (IFV, <https://www.vignevin-sudouest.com/>).

II.3.1.3. Modification des limites départementales

Entre 1917 et 2015, certaines limites administratives ont évolué, celles de la Corse et de la région parisienne.

La Corse a été monodépartementale entre 1811 et 1976, date à laquelle elle a été séparée en Haute-Corse et Corse-du-Sud. La Corse a été considérée dans son ensemble sur toute la période d'étude, c'est à dire que les données agricoles de la période où la Corse était bidépartementale (1976 - 2015) ont été sommées. Les résultats sont donc donnés à l'échelle de l'île entière.

La région parisienne a subi une profonde mutation en 1968. Une loi de 1964 entrée en vigueur en 1968 a entraîné la subdivision des départements Seine-et-Oise et Seine. Ces départements ont été remplacés par 7 autres : Paris, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, Val-de-Marne, Val-d'Oise, Yvelines et Essonne (Figure II-9).

Ce redécoupage ne suit pas exactement les limites des départements précités mais en l'absence de renseignements permettant d'améliorer la spatialisations, il a été considéré que le département Seine a été remplacé par les départements Paris, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne, et que le département Seine-et-Oise a été remplacé par les départements Val-d'Oise, Yvelines et Essonne.

Pour recréer les différentes chroniques pour ces 7 départements avant 1968, les différentes catégories renseignées pour les départements Seine et Seine-et-Oise ont donc été réparties sur les 7 autres départements selon le ratio calculé pour chaque catégorie sur les années 68 à 73.



Figure II-9 : Évolution territoriale de la région Parisienne en 1968 (source : <https://fr.wikipedia.org/>)

II.3.1.4. Homogénéisation des données de fertilisation minérale

Le calcul détaillé de la volatilisation à partir des engrais minéraux nécessite de connaître la quantité d'azote utilisée par catégorie d'engrais simple afin de pouvoir appliquer les coefficients de volatilisation adaptés à chaque type d'engrais (Ammonitrate, Solution, Urée, Autres). Selon les périodes, les livraisons d'engrais sont renseignées en quantité d'azote sans le détail de la livraison par type d'engrais simple (1929 et de 1944 à 1971) ou avec ce détail (1972 à 2015) (Tableau II-19). Le détail des catégories d'engrais pour 1929 et entre 1944 et 1971 doit donc être reconstitué. L'estimation des quantités d'azote livrées par catégorie d'engrais simple est calculée à partir du ratio des quantités d'engrais simple par catégorie sur les 5 années de données disponibles les plus proches (1972 à 1976) et le total des engrais simples livré au département.

D'autre part, les engrais minéraux livrés à la région parisienne ne sont pas détaillés par département. La quantité de chaque engrais livré a été répartie sur les 6 départements concernés (Yvelines, Essonne, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, Val-de-Marne, Val-d'Oise) au prorata de la SAU de ces départements.

Au final, pour les années 1929, 1944 à 2015, $3.3 \cdot 10^4$ données d'engrais simple et composés étaient nécessaires pour calculer la fertilisation minérale. Environ 34% de ces valeurs de livraison ont été reconstituées par la répartition du total des engrais simples vers les types d'engrais ou par la répartition des engrais livrés à la région parisienne vers les départements qui la composent.

Tableau II-19 : Détail des données de livraison d'engrais minéral disponibles (sources : SSP et UNIFA)

Données disponibles		Méthode d'homogénéisation
de 1917 à 1928	x	x
1929	Engrais simple et engrais composés	Répartition des engrais simple vers les différents types d'engrais simple
1930 à 1943	x	x
1944 à 1971	Engrais simple et engrais composés	Répartition des engrais simple vers les différents types d'engrais simple
1972 à 2015	Quantité des engrais simples par type et quantité des engrais composés disponibles	x

Un exemple détaillé de la reconstitution de la quantité des différents types d'engrais azotés livrés est détaillé en annexe 6.

II.3.2. Application du modèle CASSIS_N à l'échelle communale : données des RA

La base de données communale brute a été constituée par deux méthodes différentes. Les données communales du RA 1955, qui ne sont pas accessibles directement puisque l'année 1955 est actuellement uniquement disponible sous forme de microfiche, ont été saisies. Les données des RA des années 1970, 1979, 1988, 2000, 2010 sont disponibles au sein d'un serveur sécurisé (partie II.3.2.1). L'exploitation des données communales présente un problème d'évolution des limites administratives qui seront traités par les méthodes développées au sein de la partie II.3.2.2. La nomenclature des RA a aussi évolué au cours du temps et un travail d'homogénéisation des catégories a été nécessaire pour pouvoir appliquer le modèle CASSIS_N sur ces données. Enfin, les données des

RA sont ponctuelles et il a été nécessaire de procéder à une reconstitution de chroniques de données. La partie II.3.2.3 présente les étapes de mise en forme des données communales pour leur utilisation dans CASSIS_N.

II.3.2.1. Description de la base de données brute

Les données du RA 1955 n'étant actuellement pas numérisées, environ 800 000 chiffres concernant le nombre de têtes de cheptel et les surfaces communales ont été saisis à partir de scan de microfiches fournies par le Ministère de l'Agriculture. Certaines données indiquées sur les microfiches étaient illisibles⁹. Dans ce cas, le fichier est rempli de façon à indiquer que la culture ou la catégorie de cheptel concernée est bien présente dans la commune mais que le chiffre n'est pas exploitable. Le chiffre illisible sera estimé à l'aide de règles de complétion détaillées par la suite (partie II.3.2.3). Les données qui n'ont pas pu être saisies représentent 2.7% des données saisies du RA 1955.

Le choix a été fait d'effectuer la levée du secret statistique pour les RA 1970, 1979, 1988, 2000, 2010. Les données complètes de ces RA ont été accessibles au sein d'un espace informatique personnel appelé "bulle" au sein du CASD. Pour les années 1970, 1979, 1988 et 2000, trois fichiers sont fournis : (i) le nombre de tête de cheptel, (ii) les surfaces en culture et fruit, et (iii) les surfaces en légumes. Chaque ligne du fichier donne le type de catégorie (type de culture de cheptel) renseignée, la surface ou le nombre de tête de cheptel et le code postal de l'exploitation. Les données concernant les légumes, les cultures et les fruits sont regroupés pour l'année 2010, il n'y a donc plus que deux fichiers fournis pour cette année. Chaque ligne des fichiers de 2010 donne l'ensemble des informations de surface ou de nombre de tête de cheptel par exploitation ainsi que son code postal.

Le nombre de catégories saisies du RA 1955 et le nombre de catégories retenues pour les autres RA est variable selon les années (Figure II-10). Un travail sur les catégories existantes a été nécessaire pour reconstituer les catégories permettant le fonctionnement de CASSIS_N.

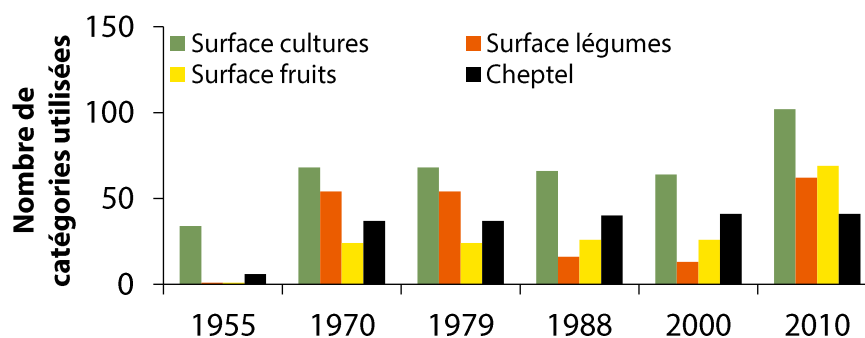


Figure II-10 : Nombre de catégories utilisées au sein des RA

⁹ Les microfiches originales sont stockées aux archives de Fontainebleau. Ce site a été inaccessible durant la durée de la thèse pour cause d'insalubrité des bâtiments. Les archives départementales ont été contactées pour tenter d'accéder aux documents des RA 1955. Sur 71 demandes, seules 3 ont donné lieu à la récupération de données en meilleur état que les données présentes dans les microfiches.

II.3.2.2. Gestion de l'évolution des limites communales

II.3.2.2.1. Position du problème

L'objectif de l'application du modèle CASSIS_N aux données du RA est d'obtenir des résultats de surplus azotés spatialisés à l'échelle de la commune. Hors les limites communales ont évolué au cours du temps et ces dernières ne sont pas connues pour chaque année de la période étudiée. Cela pose des problèmes de spatialisation des résultats pour les communes et les années dont les limites administratives ne sont pas connues (Figure II-11).

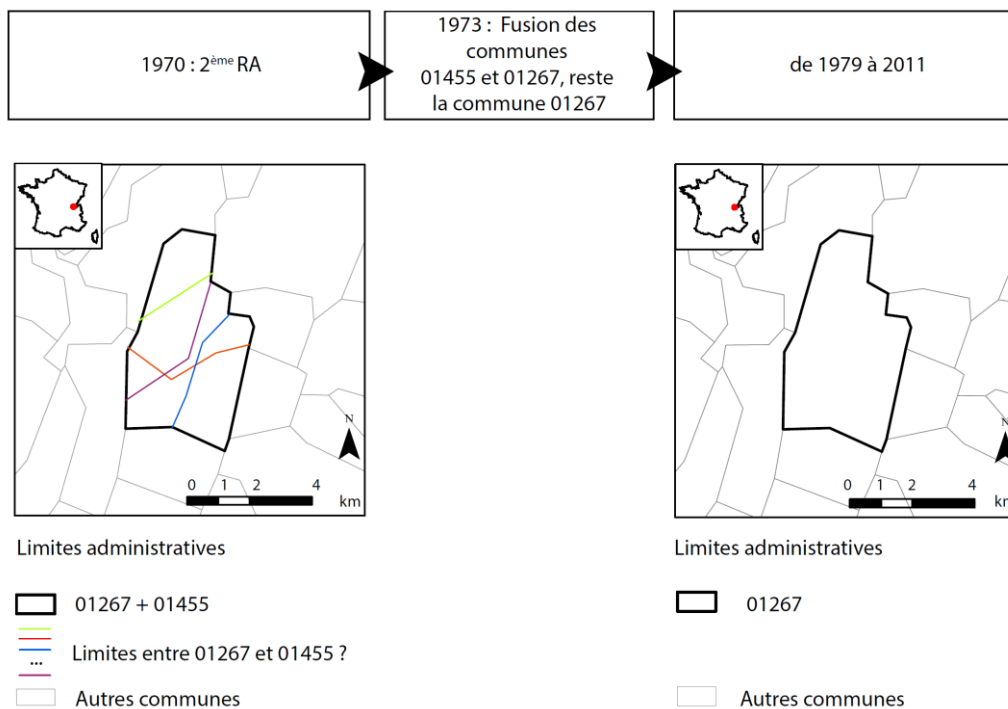


Figure II-11 : Problème de spatialisation résultant de l'évolution des limites communales, exemple de la commune 01455, absorbée par la commune 01267 (commune absorbante)

Pour pallier ce problème, la méthode retenue consiste à réaffecter les valeurs concernant les communes aux limites inconnues, du fait de leur(s) modification(s) et de l'absence de spatialisation de leurs limites (ex: commune 01455 Figure II-11), aux communes résultantes de la modification et ayant des limites connues (ex : commune 01267 Figure II-11).

Les limites communales retenues doivent être datées de façon postérieure au dernier RA (2010) et être les plus anciennes possibles. La version des limites communales de 2011 (libre d'accès selon la directive INSPIRE par le biais de l'IGN <http://professionnels.ign.fr/enseignement-recherche>) a donc été retenue. Le site de l'INSEE fournit aussi un fichier (INSEE, 2017) qui détaille les 12325 modifications qui ont affecté les communes sur une période allant de 1942 à 2016. Chaque type de modification communale recensée est indiqué sous forme d'un code fourni avec des informations complémentaires qui permettent de retracer plus ou moins précisément l'histoire des limites de la commune.

Les différents types de modification qui peuvent influencer les limites communales sont les fusions de communes et les échanges de parcelles. Le transfert de parcelles ne peut être pris en compte car il concerne une échelle géographique trop fine. En outre car il n'y pas d'indications sur la localisation des parcelles échangées ou transférées dans le fichier mis à disposition par l'INSEE. Les fusions de communes sont traitées dans la partie II.3.2.1.2. Un autre type de modification qui n'affecte pas les limites de communes mais influence le calcul du surplus, doit être traité. Il s'agit de la modification du département de rattachement de la commune qui sera traité en partie II.3.2.1.3. Dans les cas de fusion ou de modification de département, la méthode retenue est la même : (i) retracer l'historique de la commune X, (ii) s'il y a eu modification des limites communales, affecter les valeurs de la commune X à la commune Y qui englobe la commune X ou y correspond en 2011. Le modèle CASSIS_N pourra alors calculer des résultats pour l'ensemble des années sur une entité aux limites connues : la commune Y.

II.3.2.2.2. Gestion de la fusion de communes

Dans le cas où une fusion a lieu avant 2011, les limites de la commune absorbée ne sont pas connues. Les valeurs des RA de la commune absorbée ont donc été réaffectées à la commune absorbante pour les années où ces limites ne sont pas connues. Par exemple, les valeurs du RA pour la commune 01455 ont été sommées à celle de la commune 01267, pour avoir des valeurs qui se rapportent à une entité aux limites connues (Tableau II-20).

Tableau II-20 : Gestion des données des RA en cas de fusion de commune

Dates des RA	1955		1970		1973	1979	1988	2000	2010
Données brutes					Fusion 01267 et 01455				
Découpage communal	01267	01455	01267	01455		01267	01267	01267	01267
Descripteur (ex : surface en ha)	X ₁₉₅₅	Y ₁₉₅₅	X ₁₉₇₀	Y ₁₉₇₀		X ₁₉₇₉	X ₁₉₈₈	X ₂₀₀₀	X ₂₀₁₀
Données mises en forme									
Découpage communal	01267		01267			01267	01267	01267	01267
Descripteur (ex : surface en ha)	X ₁₉₅₅ + Y ₁₉₅₅ = Z ₁₉₅₅		X ₁₉₇₀ + Y ₁₉₇₀ = Z ₁₉₇₀			X ₁₉₇₉	X ₁₉₈₈	X ₂₀₀₀	X ₂₀₁₀

Les communes peuvent voir leur fusion annulée (Figure II-12).

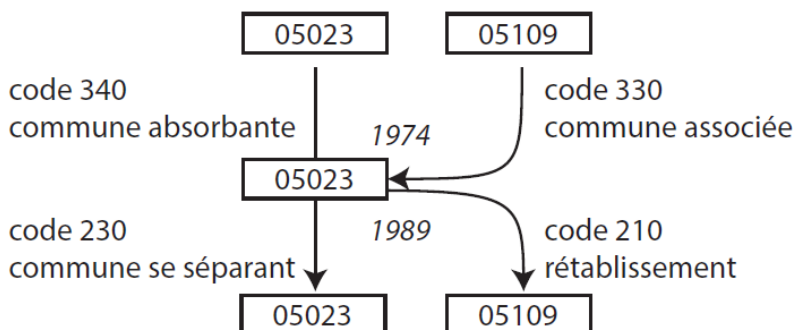


Figure II-12 : Schéma de l'annulation de la fusion entre deux communes, exemple des communes 05023 et 05109

Dans le cas où il y a rétablissement des limites communales, deux cas sont distingués. Si la fusion et le rétablissement ont lieu entre deux années du RA alors les données des RA se rapportent à des surfaces aux limites connues. Il n'y a pas besoin de mise en forme. Si le rétablissement advient alors qu'un RA a eu lieu, il n'y aura pas de spatialisation possible des données pour l'année ou les années du RA entre les dates de fusion et de rétablissement. Les données sont sommées pour toutes les années de RA (Figure II-13).

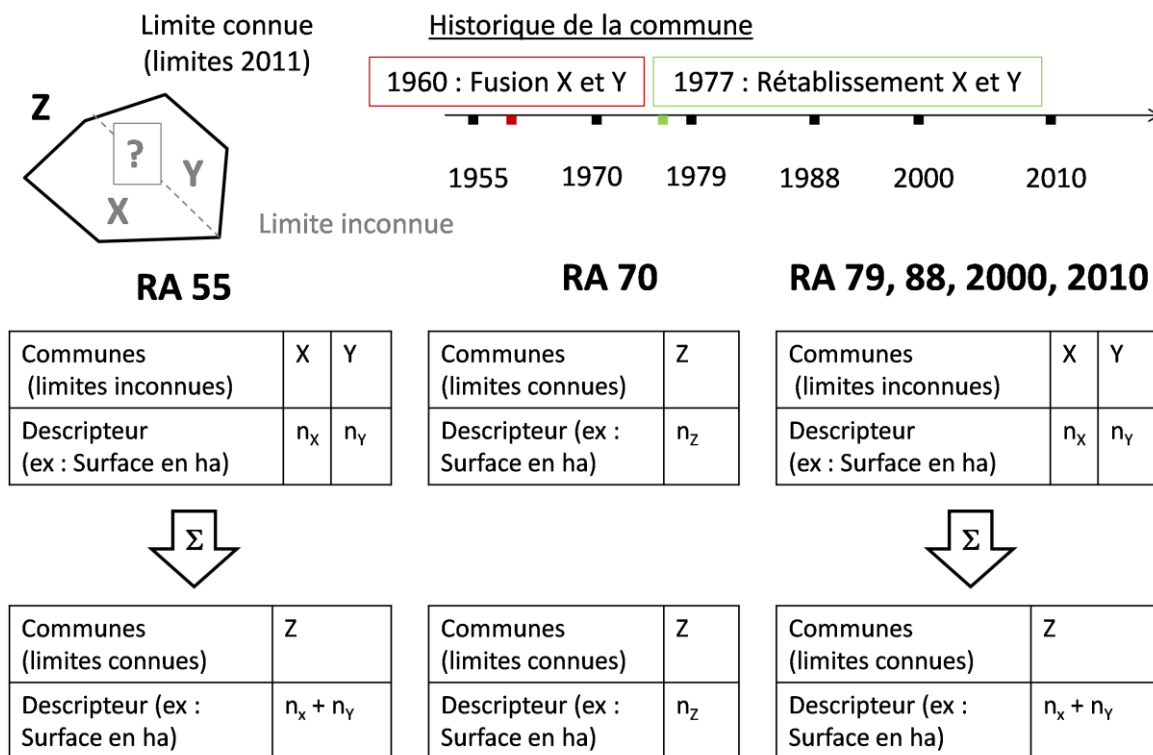


Figure II-13 : Schéma de la gestion des données des RA en cas d'annulation de la fusion de communes

Trois cas particuliers se présentent : trois communes sont supprimées et réparties sur d'autres (08227, 45117, 51606). Le fichier d'historique ne donne pas d'informations spatialisées sur cette répartition. N'ayant aucune information sur les limites communales de ces trois communes avant leur répartition, les valeurs du ou des RA concernant les communes "réparties" sont sommées aux communes qui les absorbent sur l'ensemble de la période.

II.3.2.2.3. Gestion du changement de département

Dans le cas où une commune a changé de département, le numéro de la commune a été modifié pour correspondre au numéro qu'elle possède en 2011 et ce, depuis le début de la période d'étude.

Les changements de département n'influencent pas les limites communales mais ils modifient le département de référence de la commune, ce qui influence les données départementales utilisées pour le calcul de la production (rendement départemental cf. partie II.3.2.5.) et l'estimation du poste de fertilisation minérale. Dans plus de 96% des cas, le changement de département est lié à la séparation

du département de la Seine et Oise en 1968 en plusieurs départements et à la séparation de la Corse en deux départements en 76. Dans les 4% des cas restant, le changement du département de référence va entraîner l'affectation de valeurs départementales erronées pour le calcul de la production et l'estimation de la fertilisation minérale.

II.3.2.3. Reconstitution des catégories

Les limites de communes étant maintenant fixées de façon à être connues pour toute la période, il s'agit maintenant d'affecter les valeurs des variables agricoles aux communes puis de reconstituer les catégories nécessaires au fonctionnement de CASSIS_N. Les données brutes étant données au niveau de l'exploitation, elles ont tout d'abord été regroupées par commune grâce à leur code postal (étape nécessaire pour obtenir des données pouvant être spatialisées). Une première étape de regroupement des catégories a été effectuée au moment de l'agrégation des résultats fournis à l'échelle de l'exploitation vers les résultats communaux. Par exemple, les différentes catégories de pommes de terre en 1970 et 1979 (pomme de terre de conservation, pomme de terre nouvelle et primeur, pomme de terre pour l'industrie, plants de pomme de terre) (Annexe 1) ont été regroupés à ce moment pour obtenir la surface en pomme de terre totale. Par la suite, dans le cas général, un regroupement ou une répartition de catégories suffiront à reconstituer les catégories nécessaires (partie II.3.2.3.1.). Deux cas particuliers doivent être mentionnés : la reconstitution de la catégorie "vaches de réforme" pour l'ensemble des années du RGA (partie II.3.2.3.2.) et les catégories de cultures fourragères issues des terres arables telles que les prairies artificielles, les prairies temporaires, les fourrages annuels ainsi que la jachère pour l'année 1955 (partie II.3.2.3.3.).

II.3.2.3.1. Cas général

Certaines catégories pour lesquelles les paramètres du modèle sont fixés (teneur en azote des différentes cultures, excrétion azotée des différentes catégories de cheptel...) ont dû être reconstituées à partir des catégories présentes dans chaque RA. Dans le cas (i) les catégories présentes dans les RA sont trop détaillées par rapport aux catégories pour lesquelles les teneurs en azote sont définies. Les valeurs des catégories détaillées (surface ou nombre de tête de cheptel) sont alors sommées pour obtenir la catégorie voulue. Par exemple pour les légumes en 1970 et 1979 (Annexe 1), les surfaces en "ail de plein champ" ou en "ail issu de surface maraîchères" ont été sommées pour obtenir la surface en "ail". Pour le cas (ii) concernant le manque de détail dans les catégories disponibles dans le RA. La répartition d'une catégorie du RA sur plusieurs autres est alors nécessaire afin de reconstituer les catégories pour lesquelles les teneurs en azotes sont définies. La répartition se fait en fonction de la répartition calculée au niveau du département auquel appartient la commune. L'exemple de la répartition du cheptel de cochon sur les différentes catégories de porc en 1955 est détaillé en annexe (Annexe 7).

II.3.2.3.2. Cas particulier des vaches de réforme

Les RA n'indiquent pas le nombre de tête de vaches destinées à la réforme. Pour les années 1970, 1979, 1988, 2000, 2010¹⁰, le nombre de tête de vaches de réforme du troupeau laitier et du troupeau allaitant est compris dans les catégories vaches laitières et allaitantes. Hors les vaches de réformes sont vouées à l'abattoir dans un temps relativement court (2 à 4 mois selon CORPEN, 2001, SCEES, 1971). Les comptabiliser parmi le cheptel de vache laitière ou allaitante dont l'excrétion est déterminée sur l'année conduirait à une surestimation de l'excrétion azotée par les vaches de réforme. Pour chaque commune, le nombre de vache total est calculé à partir du nombre de vaches laitières et allaitantes. La reconstitution du nombre de vache laitières hors réforme, vaches allaitantes hors réforme et vaches de réforme au niveau communal est calculée à partir du nombre de vaches total et le ratio entre les différents types de vaches observé à l'échelle départementale.

II.3.2.3.3. Cas particulier des fourrages issus des prairies labourées en 1955

Le RA 1955 ne donne aucune indication sur les surfaces en prairies artificielles et temporaires, les fourrages annuels et la jachère. Pour chaque commune, la surface des différentes prairies est estimée à partir de la surface en terres arables de la commune moins les surfaces en céréales, cultures industrielles, plantes oléagineuses, plantes sarclées, légume secs et verts et cultures diverses. Le restant est réparti entre les différentes prairies artificielles, temporaires, les fourrages annuels et la jachère suivant la proportion de la surface de ces différentes cultures calculée au niveau départemental.

II.3.2.4. Calcul de chroniques de données agricole à l'échelle communale

A l'issue des étapes précédentes, l'ensemble des catégories nécessaires au calcul de la fertilisation organique et l'ensemble des surfaces des différentes cultures entrant dans le calcul de l'export et de la fixation symbiotique sont reconstituées pour l'ensemble des années des RA. L'étape suivante est de passer de l'information ponctuelle à des chroniques de données. Pour chaque catégorie, la reconstitution des chroniques de données communale se base sur l'évolution de cette catégorie à l'échelle départementale.

Deux méthodes différentes sont appliquées suivant le type d'année pour laquelle la reconstitution doit être effectuée. Deux types d'années sont distingués : les années qui sont situées entre deux années du RA, (1956-1969, 1971-1978, 1980-1987, 1989-1999, 2001-2009) et les années qui ne sont pas encadrées par deux années du RA (1917 - 1954, 2011-2015).

Pour les années situées entre deux années du RA, pour chaque commune et chaque catégorie (surface ou cheptel), le calcul de la quantité pour chaque catégorie (surface ou cheptel) pour l'année va s'effectuer en fonction des valeurs relevées pour les années des deux RA et de l'évolution de la quantité départementale, selon 3 étapes :

¹⁰ Pour l'année 1955, seules les données du nombre total de bovin et le nombre de vaches laitières sont disponibles, le nombre de vache de réforme est calculé à partir de la répartition du cheptel bovin total sur les catégories de bovins sont les vaches de réforme selon la méthode détaillée à la partie précédente (II.3.2.3.1).

- les ratios entre les valeurs communales et départementales (SAA) sont calculés pour les deux années des RA ;
- une interpolation linéaire entre les ratios précédemment obtenus permet de calculer les ratios pour toutes les années entre celles des RA ;
- ces ratios annuels sont appliqués aux valeurs départementales des années correspondantes pour reconstituer une chronique de valeurs communales.

Pour les années qui ne sont pas comprises entre deux années du RA, la reconstitution des données communales s'effectue uniquement en fonction de l'évolution des valeurs départementales. Pour les années avant 1955, le ratio entre les valeurs communales et départementales calculé en 1955 est appliqué aux valeurs départementales de chaque année antérieure à 1955 permettant ainsi la reconstitution des valeurs communales entre 1917 et 1954. La même méthode est utilisée pour reconstituer les valeurs communales entre 2011 et 2015 en utilisant le ratio entre les valeurs communales et départementales calculé en 2010.

II.3.2.5. Estimation des productions communales

Les productions communales pour chaque catégorie sont estimées à partir des surfaces communales et du rendement départemental (cela revient à répartir la production départementale sur les communes au prorata de la surface communale) (Equation II-8).

$$\text{Production}_{\text{communale}} = \text{Surface}_{\text{communale}} * \frac{\text{Production}_{\text{départementale}}}{\text{Surface}_{\text{départementale}}} \quad (\text{Équation II-8})$$

Cette méthode suppose que le rendement est le même sur l'ensemble du département.

II.3.2.6. Estimation de la fertilisation minérale communale

La fertilisation minérale communale est calculée à partir de valeurs de la fertilisation départementale totale répartie sur les communes au prorata de la SAU (Equation II-9). Le coefficient de volatilisation qui est appliqué à la fertilisation minérale à l'échelle communale est de 0.94 ce qui correspond à la moyenne des coefficients de volatilisation des catégories d'engrais minéral.

$$\text{Fertilisation}_{\text{min}}_{\text{communale}} = \text{Fertilisation}_{\text{min}}_{\text{départementale}} * \frac{\text{SAU}_{\text{communale}}}{\text{SAU}_{\text{départementale}}} \quad (\text{Équation II-9})$$

Cette répartition pose l'hypothèse que les différentes cultures qui constituent la SAU soient fertilisées en quantité égale.

II.4. Calcul des incertitudes

Le modèle CASSIS_N a été construit de façon à prendre en compte l'incertitude qui pèse sur la majorité des paramètres et données du modèle (Équations II-2, II-3, II-4, II-5). Seuls les facteurs de

conversion de la production des racines et tubercules fourragers en matière sèche et l'équivalent UGB (partie II.1.1.4.2) n'ont pas d'incertitude associée.

Une valeur moyenne dite valeur de référence et un écart-type, calculé d'après les valeurs minimum et maximum relevés dans la littérature a été attribué à chaque paramètre (Équation II-6). L'incertitude sur les données de production, de surface, de nombre de tête de cheptel, de dépôt atmosphérique ou de quantité d'engrais minéral utilisé a été fixée à 5% (Oenema *et al.*, 2003). Le modèle CASSIS_N considère que la distribution de chaque paramètre suit une loi normale.

Une approche statistique par tirage de Monte Carlo a été retenue pour prendre en compte l'incertitude sur les données en entrée et les paramètres sur les résultats finaux qui constituent les surplus azotés. Pour chaque surplus, 200 jeux de paramètres ont été créés, le choix de la valeur pour chaque paramètre se faisant au hasard selon les descripteurs statistiques (moyenne, écart-type et distribution normale) qui le caractérise. Le modèle CASSIS_N est ensuite appliqué à chaque jeu de paramètres. L'imprécision sur le résultat a été définie comme l'écart entre le décile 9 et le décile 1 des 200 valeurs de surplus obtenues.

II.5. Synthèse

Le modèle CASSIS_N a été développé afin de répondre au besoin d'estimation de l'évolution des pressions agricoles. Ce modèle est construit à partir d'un modèle simple des balances azotées de surface du sol qui requiert peu d'hypothèses ce qui permet son application sur une période longue. La combinaison de données agricoles disponibles à l'échelle départementale (SAA) et communales (RA) vont permettre l'obtention de chroniques de pression azotées sur le long terme.

Les deux chapitres suivants présentent l'application du modèle CASSIS_N à deux échelles d'espace emboîtées : le département et la commune. Dans le chapitre 3 présentera 99 ans de résultats obtenus à l'échelle départementale. L'identification et la rupture de tendance dans les chroniques seront étudiées à ce moment, permettant ainsi la distinction des facteurs de contrôle des surplus départementaux.

Les résultats de 61 années de surplus communaux seront présentés dans le chapitre 4 au travers de l'étude de leur variabilité par rapport aux valeurs départementales et par le biais de la comparaison à un autre modèle de balance de modèle de balance azotée à l'échelle cantonale pour l'année 2010.

III. Chapitre 3 : Les surplus départementaux entre 1917 et 2015

Les surplus azotés étant un indicateur des pressions azotées, il existe un enjeu sur l'analyse de l'évolution de ces derniers. Les surplus sont-ils en décroissance ? Ont-ils toujours suivi la même évolution ? Quels sont les facteurs de contrôle de l'évolution des surplus ?

Ce chapitre présente les résultats de surplus azotés départementaux et leurs incertitudes, obtenus pour l'ensemble du territoire métropolitain (hors département de la Seine) pour les années 1917 à 2015 ainsi que des analyses temporelles au cours desquelles il a été possible d'identifier des tendances sur l'évolution des surplus azotés départementaux. L'étude de l'efficacité de l'azote est présentée comme un premier pas dans l'étude de l'identification des facteurs majeurs influençant les surplus azotés. La systématisation de l'étude de l'évolution des surplus a été mise en place par le biais de méthode d'identification des ruptures dans les séries temporelles.

Une partie de ces résultats a été publiée dans *Nutrient Cycling In Agrosystems* en janvier 2017 (Poisvert *et al.*, 2017). La période d'étude ayant été étendue depuis la publication de l'article (99 ans de résultats présentés ici contre 62 ans présentés dans l'article), et la méthode de calcul de la balance azotée ayant varié sur la prise en compte de l'export des pailles et la prise en compte du renouvellement du bétail annuel pour les volailles, les résultats ne seront pas présentés sous la forme de l'article publié (Annexe 8). Les analyses présentées dans l'article ont été réappliquées à l'ensemble des résultats maintenant disponibles et complétées par un travail sur les facteurs de contrôle du surplus.

III.1. Analyse des chroniques de surplus départementaux

Les surplus azotés sont des indicateurs des pressions azotées, identifier les tendances sur les surplus permettrait de connaître l'évolution de ces pressions. Cependant, l'identification de tendances n'est pas un résultat immédiat car les séries temporelles présentent souvent un bruit qu'il faut distinguer d'une tendance.

III.1.1. Méthode de détection des tendances

Les données agricoles en entrée du modèle CASSIS_N comprennent des valeurs de productions végétales, de nombre de tête de cheptel et des données de livraison d'engrais. Ces données sont soumises à des variations interannuelles. En particulier, les productions sont variables du fait des conditions climatiques. Les surplus azotés forment donc aussi une chronique bruitée, dont les variations interannuelles peuvent occulter la (ou les) tendance(s) long terme. D'autre part, par suite des incertitudes sur l'ensemble des données utilisées pour leur calcul, les surplus azotés sont entachés d'une certaine incertitude et il est possible que cette dernière puisse impacter la robustesse des tendances identifiées au sein des chroniques.

Deux approches d'identification des tendances ont été mises en place. Dans un premier temps, les tendances ont été évaluées sur deux périodes fixes, délimitées par la date de l'entrée en vigueur de la

directive nitrate (1917 -1991 et 1991 - 2015). La robustesse des tendances identifiées a été testée, à cette occasion, grâce à la construction de chroniques tenant compte de l'incertitude sur les surplus. Dans un deuxième temps, une méthode d'identification des ruptures de tendances a été mise en œuvre. L'identification des facteurs de contrôles du surplus ont été réalisées sur ces segments de chroniques.

III.1.1.1. Détection de tendances et évaluation de leur robustesse sur une période fixée

La présence de tendances statistiques a été testée sur les surplus azotés obtenus à l'échelle départementale sur les périodes 1917 à 1991 et 1991 à 2015. L'année 1991 a été choisie comme année de rupture pour deux raisons. D'une part, cette année est celle de l'entrée en vigueur de la directive nitrate. Cette directive européenne a été mise en place dans le but de réduire l'apport d'azote aux zones agricoles et l'entrée en vigueur de ce texte devrait logiquement se traduire par une diminution du surplus azoté. D'autre part, la courbe de livraison des engrais minéraux à l'échelle de la France montre une inflexion vers le début des années 90 (Figure III-1).

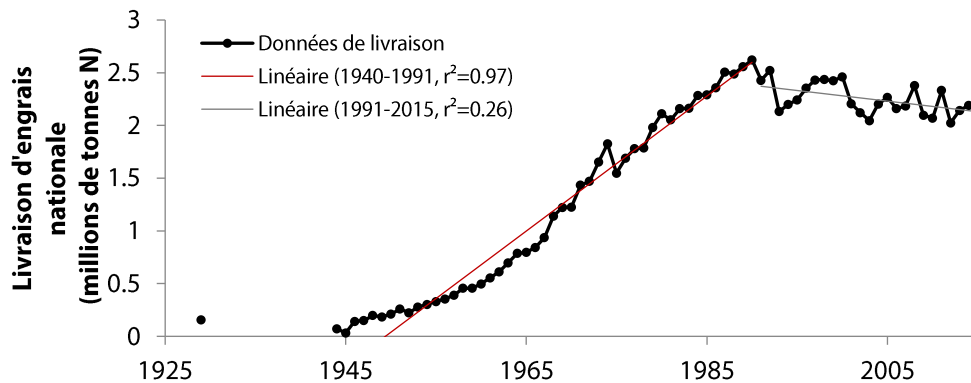


Figure III-1: Livraison des engrais minéraux azoté à l'échelle de la France (source : <http://www.unifa.fr/>)

III.1.1.1.1. Création de chroniques de références et de chroniques de Monte Carlo

Des chroniques de surplus dites "de référence", ont été créés en utilisant les valeurs moyennes (ou de référence) de chaque paramètre. D'autres chroniques, dites "de Monte Carlo" ont été construites en sélectionnant au hasard un des 200 résultats de surplus, issus des simulations effectuées pendant l'étape de calcul de l'incertitude sur les résultats, pour chaque année (Figure III-2). Deux cents chroniques de Monte Carlo sont ainsi construites.

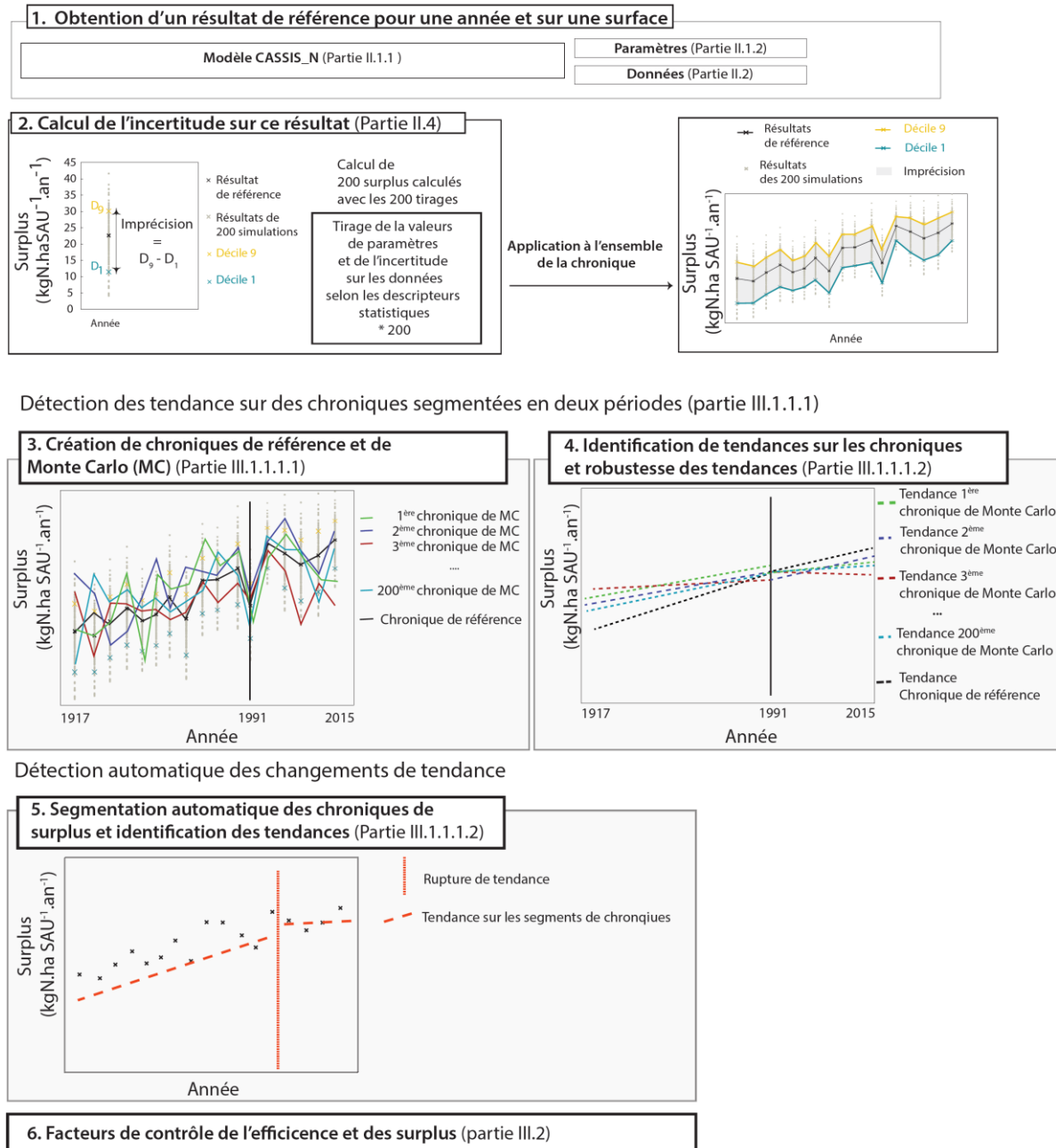


Figure III-2 : Analyse des tendances des surplus départementaux

III.1.1.1.2. Test statistiques

La présence de tendances statistiques sur une période a été évaluée grâce au test du rho (ρ) de Spearman ($\alpha < 0.05$). Le test du rho de Spearman (ρ) a été privilégié car il ne pose pas l'hypothèse de la normalité des données. Le coefficient de corrélation de Spearman indique la présence et la force d'une relation monotone entre deux variables, ici le temps et les surplus azotés. Plus la valeur absolue du coefficient de Spearman est forte, plus la liaison entre les deux variables est forte. Les tendances identifiées sur les chroniques de références seront appelées les "tendances de référence". La détection

de tendances statistiques sur les chroniques de Monte Carlo a aussi été testée avec l'application du test du rho de Spearman sur les mêmes périodes que pour les chroniques de référence.

La robustesse de la tendance identifiée sur la chronique de référence est estimée en comparant les tendances identifiées sur les chroniques de Monte Carlo et celles détectées sur les chroniques de référence. Plus le nombre de chroniques de Monte Carlo présentant les mêmes tendances que la chronique de référence est important, plus la tendance est considérée comme robuste.

III.1.1.2. Détection automatique des changements de tendances

Les variables servant à calculer les surplus évoluent au cours du temps. Si ces variables sont des facteurs de contrôle, c'est à dire qu'elles déterminent de façon prépondérante la valeur du surplus, alors une modification des tendances de ces variables entrainera une modification de la tendance suivie par le surplus. A l'inverse, l'identification des facteurs de contrôles est plus facilement réalisable sur périodes où la tendance des surplus est homogène.

L'identification de points de rupture entre des sous-périodes présentant des tendances homogènes et la distinction de tendances par rapport au bruit existant au sein de chroniques est un problème qui a été soulevé en économie, en climatologie, ou en hydrologie (Lloyd *et al.*, 2014; Kleiber, 2017). Une méthode d'analyse développée récemment au sein d'un package développé sous R, BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) combine la détection de changement de tendance et la datation des points de rupture dans la chronique (Zeileis *et al.*, 2003).

Le principe de fonctionnement de ce package est de segmenter la chronique en sous-périodes présentant des tendances homogènes (tendances linéaires), sans avoir à préjuger de la définition d'une ou plusieurs années supposées être les points de rupture de la chronique. Dans notre cas BFAST, suit 2 grandes étapes :

- détection de la présence d'un changement de tendance dans la chronique
- datation des éventuels points de rupture qui séparent les changements de tendance

Les paramètres à fournir en entrée sont le nombre d'année minimum qui doit séparer deux dates de ruptures, la méthode de détection des changements de tendance et le niveau de confiance qui va influencer la sensibilité du modèle à la détection des tendances.

En sortie du package, BFAST fourni le nombre de points de rupture identifiés dans la chronique, les dates associées à ces points de rupture ainsi que leur intervalle de confiance. BFAST segmente ainsi la chronique en sous-ensembles présentant des tendances linéaires homogènes. Les ruptures détectées par BFAST concernent les coefficients des tendances linéaires. Les ruptures peuvent être détectées suite à des inversions de signe de pente (par exemple tendance croissante - pente positive - à tendance décroissante - pente négative -) mais aussi des changements de pente (variable qui croit très vite, modélisée par une pente forte, puis moins vite, modélisée par une pente moins forte) ou des modifications d'ordonnées à l'origine.

Ce type de méthode a par exemple été appliqué à la détection de changement de tendances d'indicateurs de végétation construits à partir de données satellites pour surveiller l'état sanitaire des forêts en Australie (Verbesselt *et al.*, 2010) mais n'a pas été, à notre connaissance, appliquée directement des données annuelles en environnement. Pour valider l'utilisation de ce package, une

étape d'identification des points de rupture et des tendances a été faite visuellement. Les résultats de BFAST et de l'identification visuelle ont été confrontés.

III.1.2. Facteurs de contrôle du surplus

L'identification des facteurs de contrôle est complexifiée par le fait que ces derniers changent au cours du temps. Une première approche d'analyse de l'évolution de l'efficacité de l'azote ou "trajectoires de l'azote", présente une analyse assez descriptive de l'évolution des surplus en lien avec l'évolution de l'agriculture (partie III.1.2.1). La deuxième approche consiste à identifier de façon systématique les facteurs de contrôle de l'évolution des surplus pour chaque département sur des segments identifiés comme étant homogènes (partie III.1.2.2).

III.1.2.1. L'efficacité de l'azote

L'efficacité de l'azote (E_N) est définie comme étant le rapport entre la quantité d'azote exportée d'un sol et la quantité d'azote introduite dans ce même sol (Équation III-1). Exprimée en pourcentage, la valeur de l'efficacité représente la quantité d'azote introduite dans le sol qui a été utilisée par les cultures pour leur croissance, et récupérée par le biais des récoltes.

$$E_N = \frac{N_{Exp}}{F_N} \text{ (Équation III-1)}$$

avec

N_{Exp} ($\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ SAU}$) la quantité d'azote exportée par l'ensemble des cultures

F_N ($\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ SAU}$) la somme de toutes les entrées d'azote (fertilisation organique N_{Org} , fertilisation minérale N_{Min} , dépôt atmosphérique N_{Air} , fixation symbiotique N_{Fix})

La valeur $1-E_N$ correspond à la proportion d'azote introduit dans le sol et non récolté, qui pourra être stockée au sein du sol, transféré à l'hydrosystème via des transferts hors du sol (lixiviation) ou perdue vers l'atmosphère par dénitrification ou volatilisation.

L'efficacité de l'azote est calculée à partir des mêmes variables que le surplus azoté, qui a été défini comme étant la différence entre les entrées (F_N) et les sorties (N_{Exp}) d'azote (Chapitre II). Les valeurs l'efficacité et du surplus sont donc liées (Équation III-2).

$$\text{Surplus}_N = F_N * (1 - E_N) \text{ (Équation III-2)}$$

Une efficacité égale à 1 signifie que le surplus est nul, une efficacité supérieure à 1 que le surplus est négatif et une efficacité inférieure à 1 que le surplus est positif (Figure III-3 A). Plus l'efficacité sera faible et les entrées d'azote fortes, plus le surplus sera fort (Figure III-3 B). L'étude de l'efficacité permet d'identifier un premier niveau de contrôle de la variation du surplus en déterminant si son évolution est sous tendue par une variation des entrées et/ou des sorties d'azote.

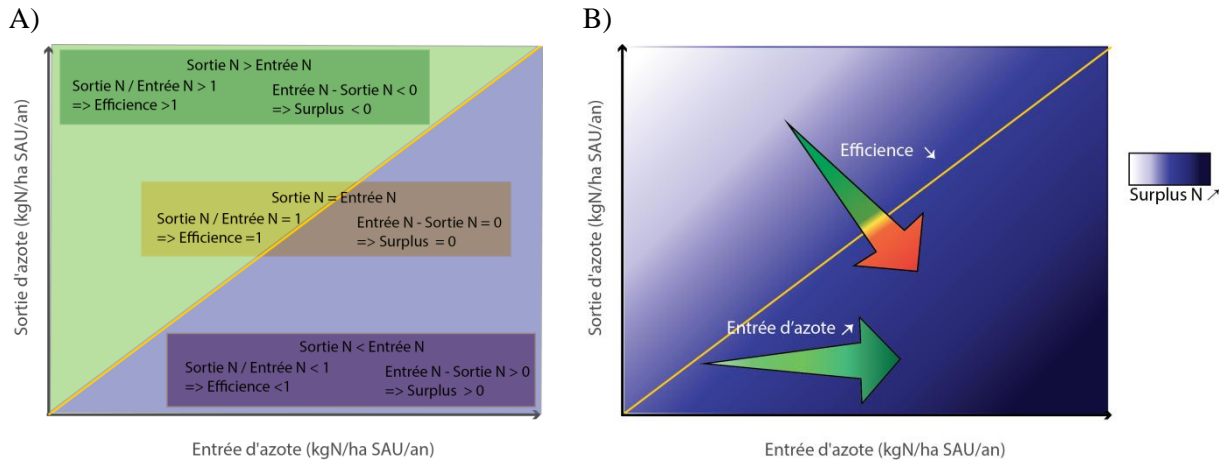


Figure III-3 : Clé de lecture des graphiques de l'efficacité A) domaines remarquables des graphiques B) relation entre entrées d'azote, efficacité et surplus

Pour identifier les facteurs de contrôle de l'efficacité (et donc du surplus), la première étape est de déterminer si les entrées ou les sorties d'azote sont responsables de la trajectoire de l'azote, en comparant la forme du signal¹¹ de l'efficacité, à celle des entrées et des sorties d'azote (Figure III-4). Si le signal le plus ressemblant concerne les entrées d'azote, il est possible d'identifier la ou les cultures responsables de l'évolution de l'export d'azote et donc de l'efficacité. Si le signal le plus ressemblant concerne les entrées d'azote, une comparaison entre les signaux des fertilisations minérales et organiques ainsi que de la fixation symbiotique avec le signal des entrées d'azote permet d'identifier le poste responsable de l'évolution des entrées d'azote et donc de l'efficacité. Si le poste prépondérant est la fertilisation organique, il est possible d'identifier la catégorie de cheptel qui influence l'évolution de l'efficacité.

¹¹ Le "signal" est entendu ici comme la forme générale de la courbe et la date de leur changement de tendance.

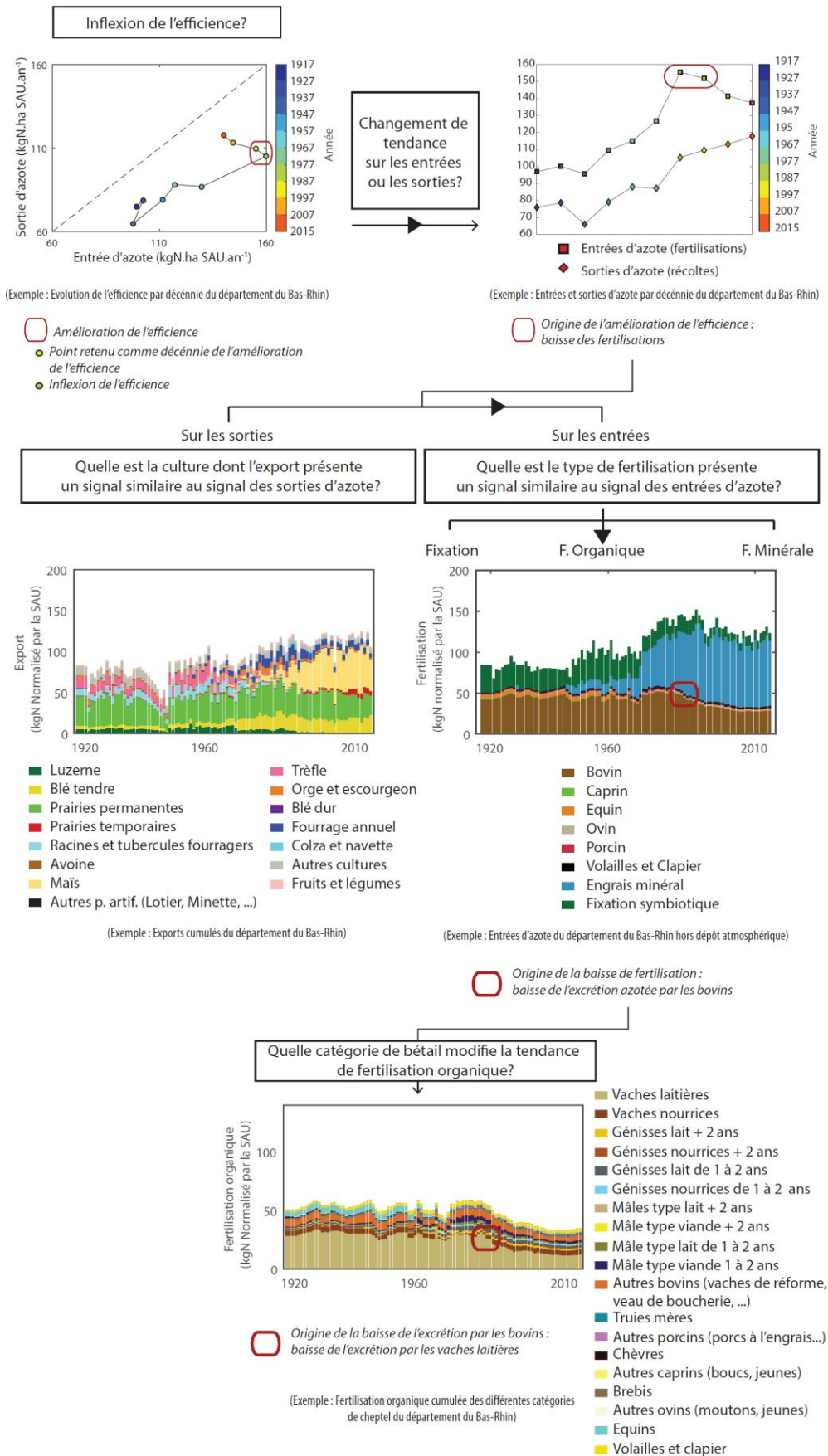


Figure III-4 : Étape d'identification des facteurs de contrôle de l'efficience

III.1.2.2. Généralisation de la méthode d'identification des facteurs de contrôle du surplus à l'ensemble des départements et de la période d'étude

La chronique de surplus a été segmentée en sous-ensembles présentant des tendances homogènes à l'aide du package BFAST, puis les facteurs de contrôles ont été déterminés pour chaque segment de la chronique (Figure III-5). Une étape de validation de BFAST a été réalisée par la confrontation des résultats issus du package à une interprétation visuelle de la chronique, c'est à dire une identification des points de changement de tendance et de la tendance (croissante, décroissante, stable) des surplus sur ces segments.

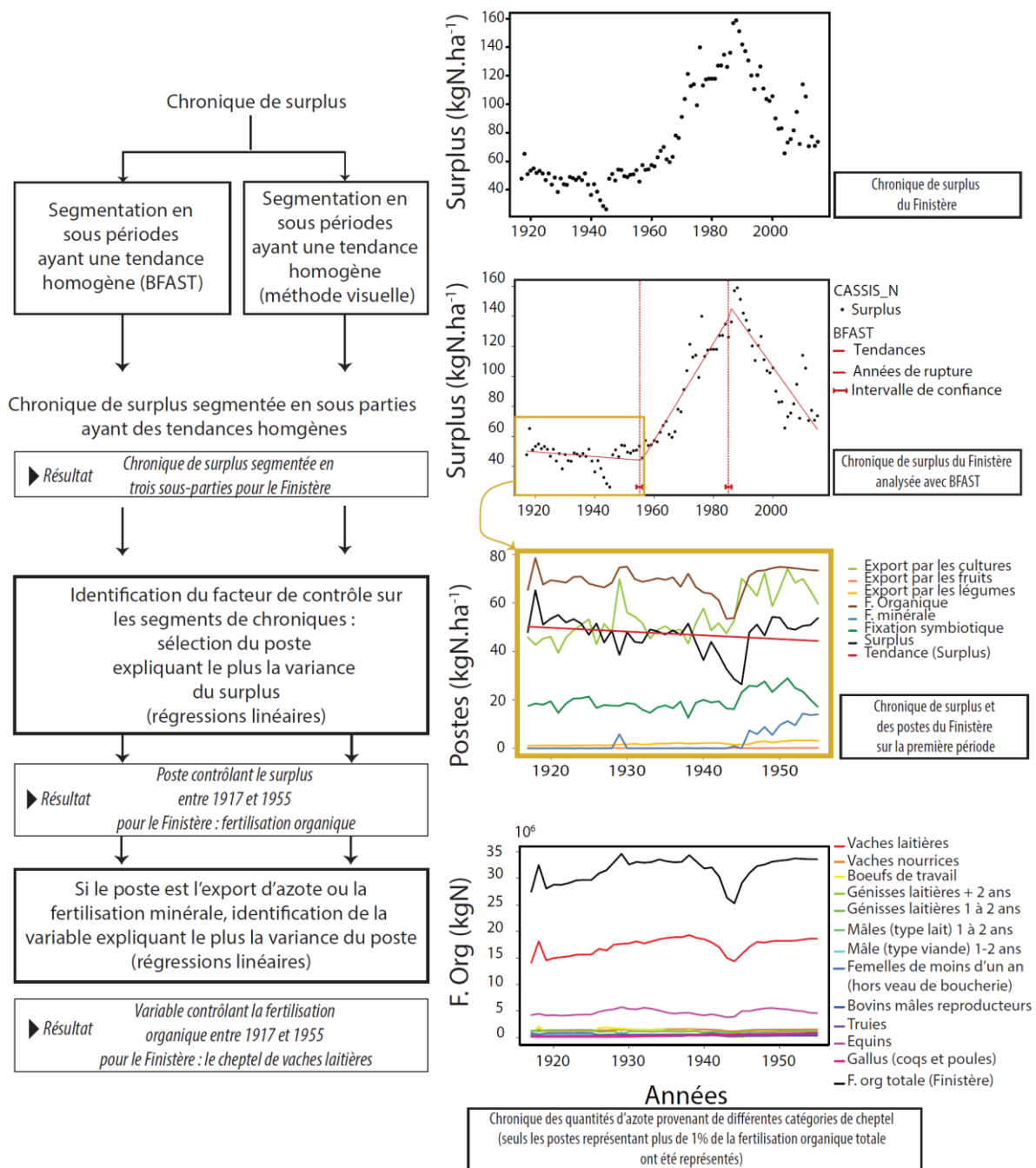


Figure III-5 : Etapes d'identification des facteurs de contrôles des surplus départementaux

III.1.2.2.1. Paramétrisation et validation de BFAST

Le package BFAST nécessite de paramétrer le seuil de confiance, la méthode de détection des changements de tendance et la période minimale possible entre deux dates de rupture. Le choix d'un nombre d'année important entre deux dates de rupture favorisera la détection de tendances générales mais interdit la détection de ruptures près des extrémités de la chronique. Le nombre d'année minimum entre deux dates de rupture a donc été fixé à 10 ans afin de pouvoir détecter les changements de tendance les plus récents. En revanche, en fixant cette durée, la chronique pourra être divisée au maximum en 9 segments (99 ans de résultats). Les méthodes de détection des changements de tendance étant sensibles à plusieurs types de modifications de tendances (lente ou rapide par exemple), quatre méthodes ont été appliquées successivement pour détecter d'éventuels changements. Si une de ces quatre méthodes détecte un changement de tendance, BFAST commence la datation des points de rupture. Les points de rupture ainsi que les tendances obtenues par BFAST sont comparés à la segmentation visuelle de la chronique.

III.1.2.2.2. Identification des facteurs de contrôle

Sur chacune des sous périodes identifiées d'après BFAST et par identification visuelle, les chroniques des postes (i) export par les cultures, (ii) fertilisation organique, (iii) fertilisation minérale et (iv) fixation symbiotique sont mises en relation avec la chronique de surplus par régression linéaire (le dépôt atmosphérique ayant été fixé comme une constante, il n'est pas pris en compte dans la liste des facteurs de contrôle possibles). Le poste contrôlant l'évolution du surplus sur chacune des sous périodes a été identifié comme étant celui qui expliquait le plus la variance du surplus (coefficient de détermination r^2 le plus fort) et qui présentait une échelle de valeurs au moins 5 fois moins forte que le surplus (pente de la régression linéaire inférieure à 5). Si le poste qui contrôle le surplus est l'export ou la fertilisation organique, la culture ou la catégorie de cheptel contrôlant l'évolution de ce poste a été identifiée suivant les règles suivantes : variable (i) expliquant le plus la variance du poste (r^2 le plus fort), (ii) variant dans le même sens que le poste et (iii) présentant une échelle de valeur au moins 5 fois moins forte que le surplus (pente de la régression linéaire inférieure à 5). La tendance des surplus sur chaque sous période a aussi été caractérisée selon trois modalités : stable si la relation n'est pas significative ($p\text{-value} > 0.05$), croissante ($p\text{-value} < 0.05$ et coefficient directeur > 0) ou décroissante.

Un intérêt particulier est porté aux inversions de tendances qui correspondraient à une diminution des pressions azotées en fin de chronique, c'est à dire le passage d'une tendance croissante à stable ou décroissante. Le poste responsable d'une réduction des surplus a été identifié par la comparaison des signaux du surplus et des différents postes. Le (ou les) poste(s) a (ont) été retenu(s) selon deux critères : (i) changement de tendance du poste synchrone au changement de tendance du surplus, (ii) changement de tendance pouvant expliquer le changement de tendance du surplus.

III.2. Tendances statistiques sur les surplus entre 1917 et 2015

III.2.1. Evolution et répartition des surplus départementaux en France

Les surplus à l'échelle de la France entière peuvent être calculés à partir de l'agrégation des résultats obtenus à l'échelle départementale. Sur la période 1917 à 2015, la moyenne des surplus nationaux est de 39 kgN.ha^{-1} sur la France entière (écart type de 15 kgN.ha^{-1}), avec des valeurs comprises entre 18 kgN.ha^{-1} en 1925 et 73 kgN.ha^{-1} en 1990. Les surplus ne présentent pas de tendance significative entre 1917 et 1940, de 1940 à 1960, ils amorcent une augmentation ($+0.42 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en moyenne) qui se confirme après 1960. Sur la période allant de 1960 à 1990, ils augmentent plus fortement ($+1.42 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en moyenne) puis décroissent après 1990 ($-1.17 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en moyenne) (Figure III-6). Cette tendance à la baisse depuis 1990 a aussi été enregistrée dans d'autres pays européens comme l'Allemagne, l'Italie ou le Portugal (Bouraoui et Grizzetti, 2011; OECD Compendium of Agri-environmental Indicators, 2013).

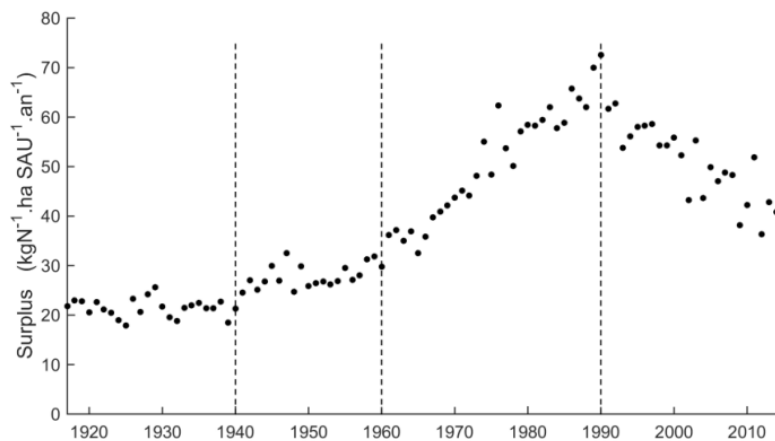


Figure III-6 : Surplus azotés en France métropolitaine (département de la Seine non inclus) sur la période 1917 à 2015

L'évolution des surplus n'est pas homogène sur l'ensemble du territoire. Si les valeurs sont assez homogènes sur l'ensemble du territoire dans le début de la chronique, l'augmentation moyenne enregistrée à partir des années 1940 correspond à des évolutions contrastées d'un département à l'autre (Figure III-7). Certains départements, notamment ceux en zone de montagne, ne présentent pas d'augmentation. Les augmentations les plus importantes sont situées dans l'ouest du pays et dans la région Parisienne, zones où les surplus départementaux les plus importants ont été calculés.

Après 1990, hors zone de montagne, les surplus départementaux baissent de façon hétérogène. Dans la dernière décennie, la répartition des surplus montre une situation contrastée entre le sud est avec des surplus généralement plus faibles et des surplus importants dans l'ouest. Le bassin parisien est la zone qui présente les plus fortes hétérogénéités : des surplus moyens négatifs dans les départements de la grande couronne parisienne (Seine-et-Marne, Essonne) côtoient des surplus ayant des valeurs parmi les plus fortes observées (Aube, Marne) en France.

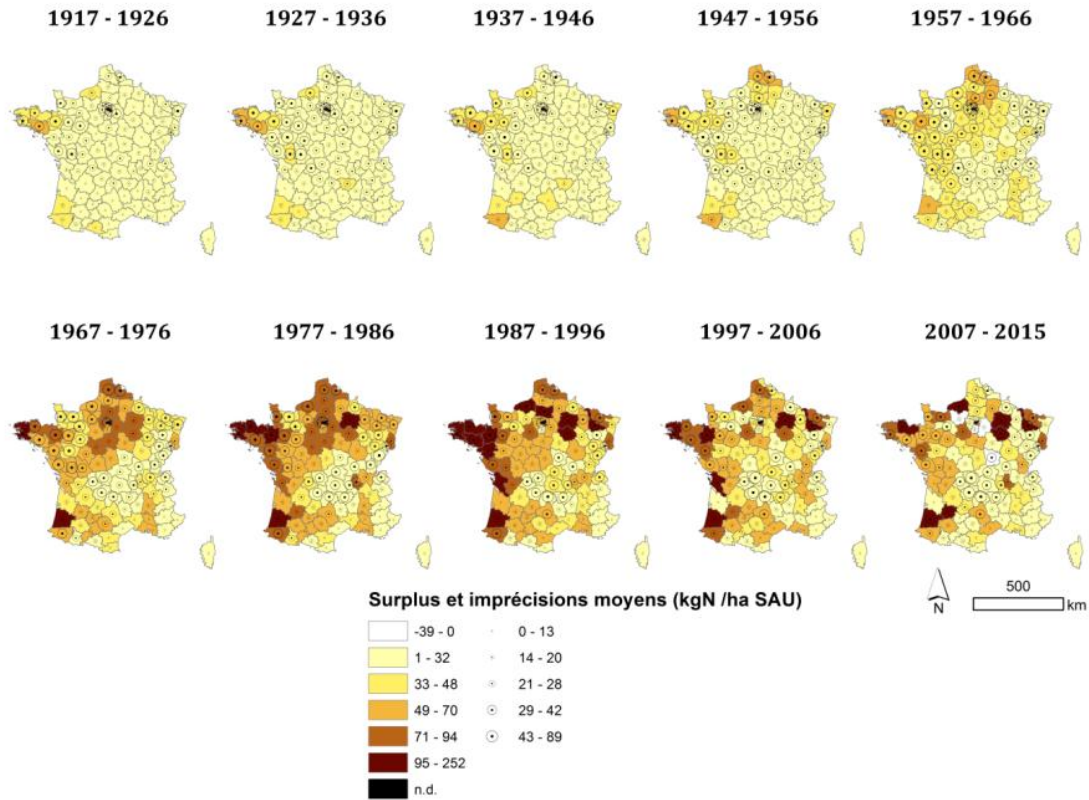


Figure III-7 : Évolution et répartition des surplus départementaux moyens (moyenne sur 10 ans) et leurs imprécisions associées

III.2.2. Tendances statistiques sur les surplus départementaux

Les tendances identifiées sur les chroniques de surplus de référence montrent que plus des trois-quarts des départements en France présentent une augmentation de la pression azotée sur la période allant de 1917 à 1991. Durant la seconde période (1991-2015), seulement 8 départements montrent une croissance significative des surplus azotés, ce qui indiquerait une baisse ou une stabilité des pressions azotées pour la majorité du territoire, soit 86 départements (Figure III-8). Le pattern d'évolution des surplus départementaux le plus rencontré est une hausse des surplus durant la première période, puis une baisse des surplus durant la deuxième période (45 départements). Le second est une hausse des surplus durant la première période, puis une stabilisation des surplus durant la deuxième période (27 départements).

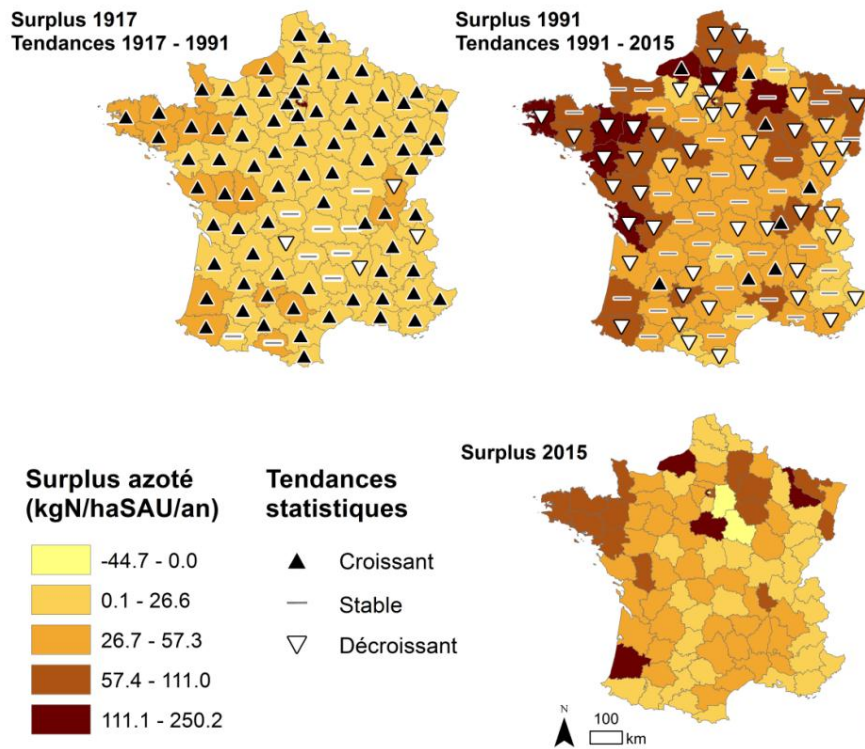


Figure III-8 : Tendances statistiques des surplus azotés à l'échelle départementale sur les périodes 1917 à 1991 et 1991 à 2015

L'identification de tendances sur les chroniques de Monte Carlo permet d'estimer la robustesse des tendances identifiées sur les chroniques de référence. Si les tendances identifiées sur les chroniques de Monte Carlo sont les mêmes que celles identifiées sur les chroniques de référence alors la tendance peut être considérée comme robuste.

Sur l'ensemble des chroniques de Monte Carlo les tendances sont différentes de celles identifiées sur les chroniques de référence dans 10.8% des cas. Les tendances ne sont "perdus" (tendance croissante ou décroissante sur les chroniques de référence devenant une tendance stable sur les chroniques de Monte Carlo) que dans environ 9.6% des cas et un gain de significativité (tendance stable sur les chroniques de référence devenant une tendance croissante ou décroissante sur les chroniques de Monte Carlo) n'est observée que dans 1.2% des cas environ. Dans 89.2% des cas environ, les tendances identifiées sur les chroniques de surplus azoté de référence ou de Monte Carlo restent les mêmes. Les tendances identifiées sur la première période sont toutefois plus robustes que celles identifiées sur la deuxième période puisque seulement 5.6% des tendances sont perdues sur la première période contre 13.6% sur la deuxième période (Tableau III-1).

Tableau III-1: Comparaison des tendances identifiées sur les chroniques de surplus azoté de référence et les chroniques de Monte Carlo

Types	Nombre de cas	Echantillon total *	%
Changement de tendance (Tendances modifiées entre la chronique de référence et les chroniques de MC)	4046	37600	10.8
Perte de significativité	3606	37600	9.6
Perte de significativité (décroissant à stable) période 1	526	18800	2.8
Perte de significativité (décroissant à stable) période 2	1987	18800	10.6
Perte de significativité (décroissant à stable) toute période	2513	37600	6.7
Perte de significativité (croissant à stable) période 1	520	18800	2.8
Perte de significativité (croissant à stable) période 2	573	18800	3.0
Perte de significativité (croissant à stable) toute période	1093	37600	2.9
Perte de significativité période 1	1046	18800	5.6
Perte de significativité période 2	2560	18800	13.6
Gain de significativité	440	37600	1.2
Inversement de tendance	0	37600	0.0
Pas de changement de tendance	33554	37600	89.2
Total			100

III.3. Les facteurs de contrôle du surplus

Le modèle CASSIS_N permet d'identifier des évolutions de surplus azotés départementaux différentes selon les départements. La question se pose alors de savoir quels sont les facteurs qui contrôlent cette évolution. L'analyse de l'efficacité de l'azote est une première étape dans l'identification des facteurs de contrôle du surplus. Une analyse des postes du surplus de quatre départements présentant des évolutions de l'efficacité différentes a permis de relier ces évolutions à des variables agricoles (partie III.3.1). Les résultats de la méthode généralisée de détection de ruptures dans les chroniques de surplus et l'identification des facteurs de contrôle sont présentés dans la partie III.3.2. Cette section montre aussi les facteurs contrôlant l'amélioration des pressions azotées identifiées en fin de chronique.

III.3.1. L'efficacité de l'azote

L'efficacité de l'azote peut être calculée à l'échelle de la France par l'agrégation des résultats départementaux. La trajectoire de l'azote nationale, présente 4 phases, tout comme la chronique des surplus. La première est caractérisée par une évolution de l'efficacité relativement croissante (1917 jusqu'aux années 1940), puis elle commence à décroître des années 1940 aux années 1960, cette décroissance s'accélère des années 1960 jusqu'aux années 1990 (Figure III-9). Dans un dernier temps (des années 1990 jusqu'à 2015), l'efficacité s'améliore. Ce genre de trajectoire de l'azote a été aussi caractérisé à l'échelle du pays pour les années 1961 à 2010, avec une inversion de tendance identifiée dans les années 90 par Anglade (Anglade, 2015). La trajectoire de l'azote dessinée par les résultats obtenus dans CASSIS_N présente deux années qui se distinguent des autres : 1976 et 2003. Il s'agit d'années caractérisées par deux sécheresses sévères qui ont touché l'Europe entière (Klein, 2009).

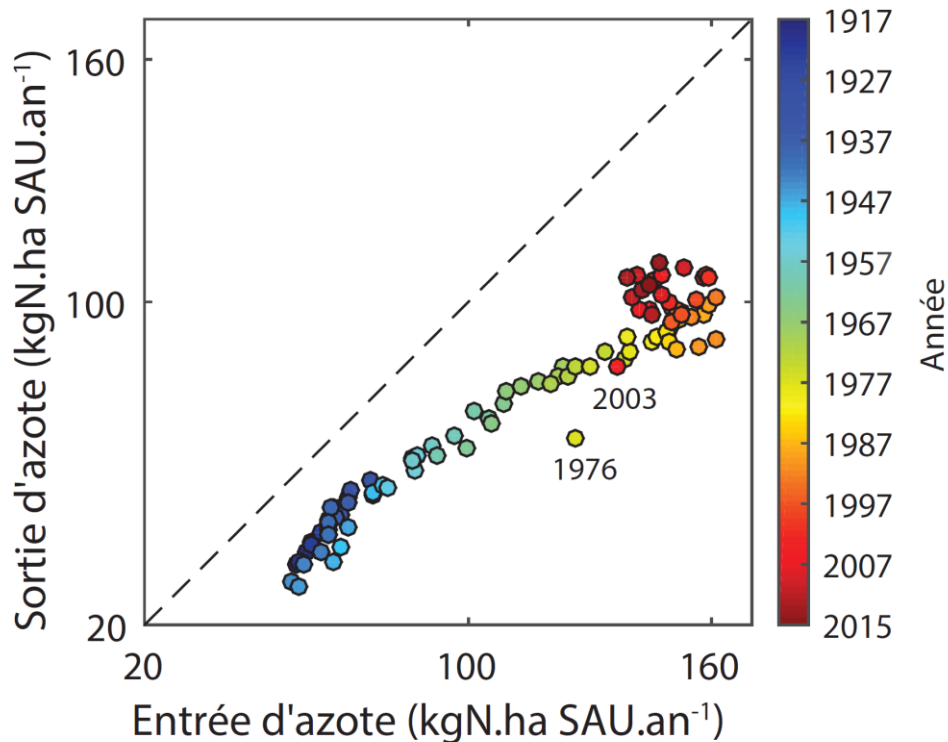


Figure III-9 : Trajectoire de l'azote à l'échelle de la France entière

Il est possible de distinguer quatre grands patterns de l'évolution de l'efficacité de l'azote pour les départements français (Figure III-10). Dans les deux premiers cas, la trajectoire de l'azote est relativement monotone.

- Cas 1 : L'efficacité de l'azote décroît sur l'ensemble de la période. Dans ce cas, les sorties d'azote augmentent sur l'ensemble de la période mais de façon moins importante que les entrées d'azote : les surplus vont augmenter tout au long de la période.
- Cas 2 : l'efficacité de l'azote s'améliore sur l'ensemble de la période. Cela se produit dans deux cas : lorsque les sorties d'azote augmentent à peu près autant que les entrées d'azote, les surplus restant alors relativement constants, ou bien lorsque les sorties augmentent plus que les entrées, le surplus étant alors décroissant.

Dans les deux derniers cas, l'efficacité de l'azote présente une évolution en deux temps : elle décroît dans un premier temps puis s'améliore. La décroissance de l'efficacité observée dans la première période est le résultat des mêmes évolutions que pour le cas 1 : les sorties d'azote augmentent mais de manière moins importante que les entrées d'azote. Dans un deuxième temps, la trajectoire de l'azote s'infléchit et s'inverse : l'efficacité de l'azote s'améliore.

- Cas 3a : L'amélioration de l'efficacité est discontinue et présente des oscillations. Dans ce cas, les surplus ne montrent pas de tendance nette.
- Cas 3b : L'efficacité montre une amélioration continue qui se traduit par une décroissance des surplus.

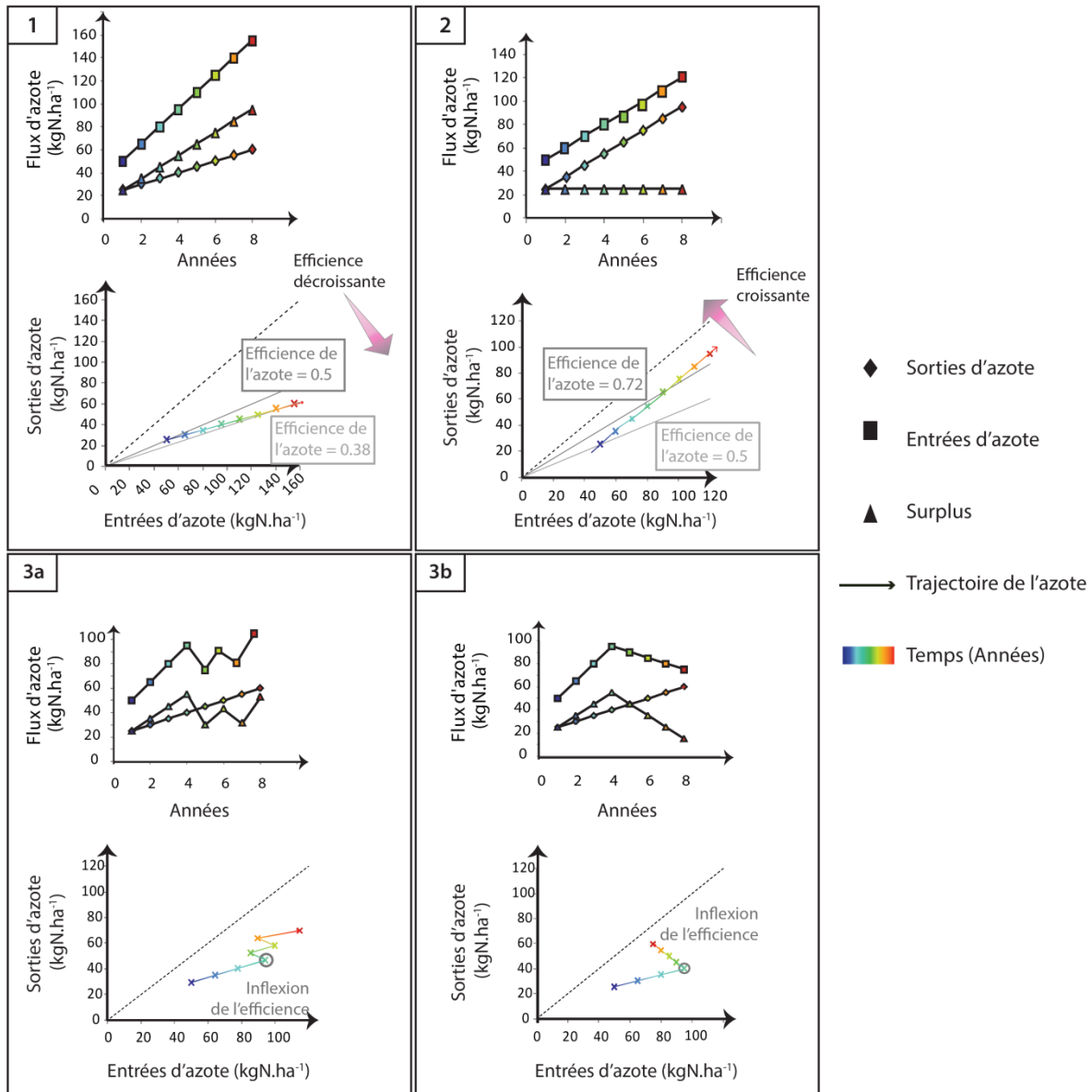


Figure III-10 : Schéma des trajectoires de l'azote les plus rencontrées au niveau des départements français. (Voir le texte pour la légende)

La majorité des 94 départements étudiés (69 départements) présente une trajectoire de l'azote qui évolue au cours du temps (Figure III-11). Parmi ces départements, 28 d'entre eux montrent une inflexion de l'efficiency de l'azote pendant la décennie allant de 1987 à 1996, décennie qui comprend l'année de la mise en place de la directive nitrates. Plus de la moitié des départements présentant une efficiency de l'azote variable montrent une inflexion à une date postérieure.

Parmi les départements présentant une efficiency monotone (28%), environ la moitié présentent une efficiency toujours décroissante. Pour ces départements, le surplus et donc la quantité d'azote pouvant être perdue vers l'hydrosystème sont croissants sur l'ensemble de la période. Pour l'autre moitié de ces départements, le surplus reste stable ou décroissant. Ces départements sont spatialement groupés au niveau du Massif Central, alors qu'il ne semble pas y avoir d'organisation spatiale pour les départements caractérisés par les autres trajectoires de l'azote.

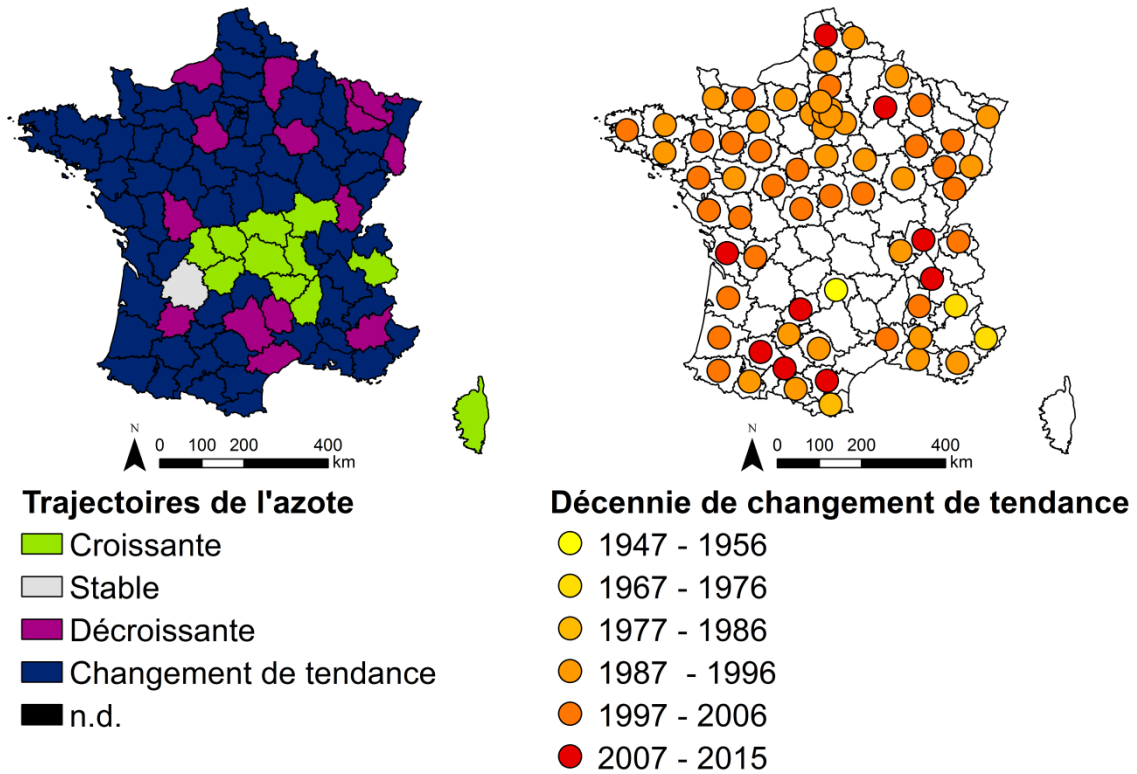


Figure III-11 : Types de trajectoires de l'azote à l'échelle des départements français

III.3.1.1. Cadre historique

La trajectoire de l'azote est la résultante de l'évolution conjointe des sorties et des entrées d'azote. Plusieurs facteurs peuvent expliquer les variations des entrées et des sorties d'azote selon la période considérée. Les explications de ces variations (présentées dans le paragraphe suivant) sont volontairement non quantifiées et non datées pour décrire un cadre général. Un descriptif plus précis et quantifié sera proposé pour 4 départements par la suite.

- Première période : du début du siècle jusqu'à la fin de seconde guerre mondiale (1917 à 1946)

Les premières décennies sont caractérisées par une efficacité de l'azote relativement bonne (proche de 1), avec des entrées et des sorties d'azote relativement faibles. Durant ces premières décennies, il existe un lien fort entre la culture et l'élevage. Le bétail est à la fois un moyen de production (force de traction, engrais organique) et une production (viande, lait, cuir, laine). Bien que certaines régions présentent un élevage plus développé, le bétail est présent sur l'ensemble du territoire et la fertilisation organique est la principale entrée d'azote en moyenne pour 86% des départements entre 1917 et 1933 (Figure III-12-A). Le nombre de tête de cheptel et la fertilisation organique progressent peu à cette époque. La fixation symbiotique étant effectuée principalement par des espèces fourragères cultivées, leur importance suit plus ou moins les variations du nombre de tête de cheptel. Au total, les entrées d'azote augmentent peu durant cette première période.

Malgré les progrès de la mécanisation (26800 tracteurs en 1929 contre 59879 en 1946 en France d'après SAA, 1929 et 1946), les rendements agricoles progressent peu. Les deux guerres mondiales et

l'agrarisme¹² empêchent l'installation et la progression de nouvelles techniques agricoles (Deléage, 2013). Cette première période est donc marquée par une efficacité stable du fait d'entrée et de sorties d'azote qui évoluent peu.

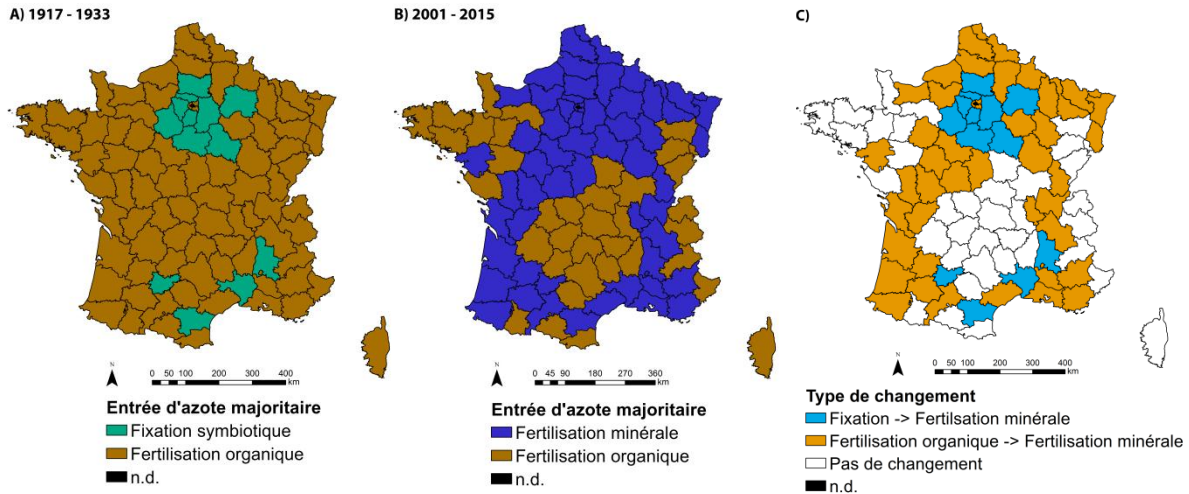


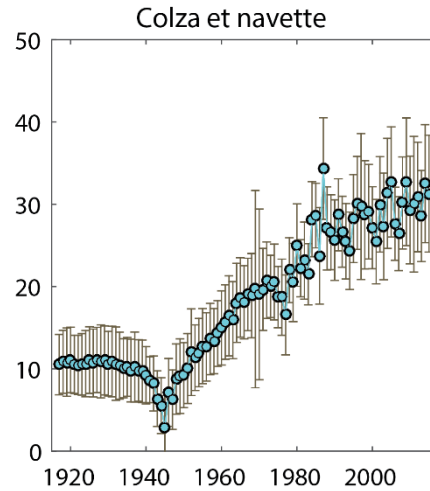
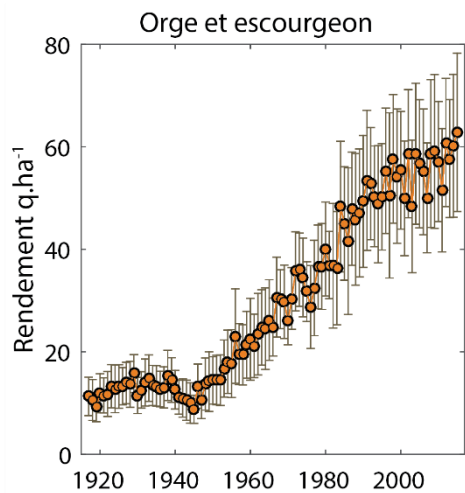
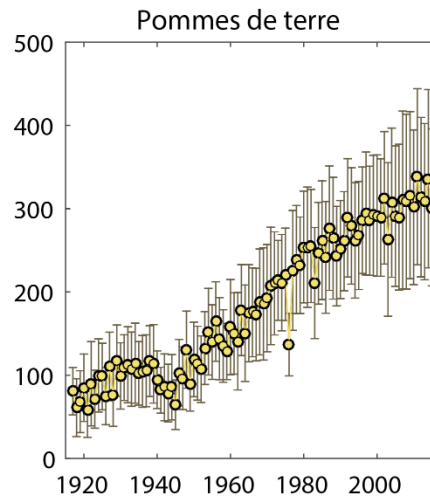
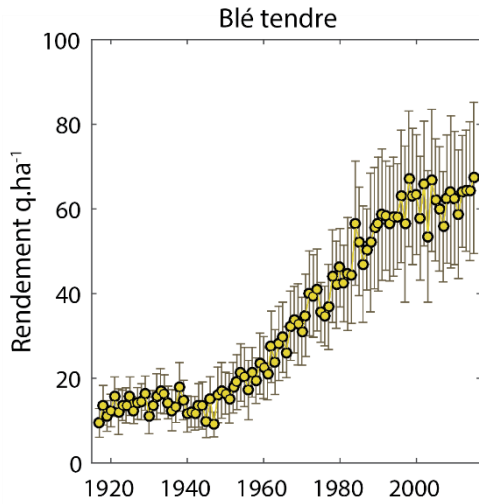
Figure III-12 : Entrées d'azote majoritaires dans les balances azotées départementales parmi la fixation symbiotique, la fertilisation organique et la fertilisation minérale (le dépôt atmosphérique étant considéré constant au cours du temps, il n'est pas considéré dans la comparaison) A) en début de la période d'étude (moyenne 1917 - 1933), B) en fin de la période d'étude (moyenne 2001 - 2015), C) type de changement d'entrée majoritaire

- Seconde période : fin de la seconde guerre mondiale aux années 1990 (1946 à 1990)

A la fin de la seconde guerre mondiale, le plan Marshall (aide des Etats Unis destinée à la reconstruction des pays européens dont une partie a été consacrée à l'agriculture) et le plan Monnet mis en place en 1947 ont été des instruments importants de la modernisation de l'agriculture et du machinisme agricole. Par exemple, le nombre de tracteur a été multiplié par 10 entre 1946 et 1960. L'augmentation de la puissance de traction a été couplée à l'emploi de machines de plus en plus perfectionnées (SCEES, 1968c) permettant de mieux gérer les cultures à chaque stade du cycle de vie de la plante, de son semis à sa récolte. D'autre part, l'emploi des engrais de synthèse s'est généralisé, la consommation française d'engrais azoté a été multipliée par 3.5 entre 1946 et 1960 (SAA 1946 et 1960). Enfin, l'utilisation de produits phytopharmaceutiques a permis une meilleure gestion des ravageurs des cultures et la sélection variétale a permis l'amélioration des espèces végétales. Par exemple des variétés hybrides de maïs fourrage (Inra258 ou LG11) plus adaptés au climat frais ont été créés (Huyghe, 2009) et des variétés de graminées fourragères destinées à la fauche sous fertilisation importante ont été développées (Rebischung et Desroches, 1960). L'utilisation de l'ensemble de ces techniques a permis une augmentation des rendements de la majorité des cultures annuelles (Figure III-13). Le panel et la proportion des différentes cultures départementales ont évolué dans le temps. Pour la moitié des départements français (51%), la culture qui exporte le plus d'azote a changé entre le début de la période d'étude et la fin de celle-ci (Figure III-14). Les sorties d'azote ont augmenté sur cette période dans la grande majorité des départements (87 départements sur 94, la Seine

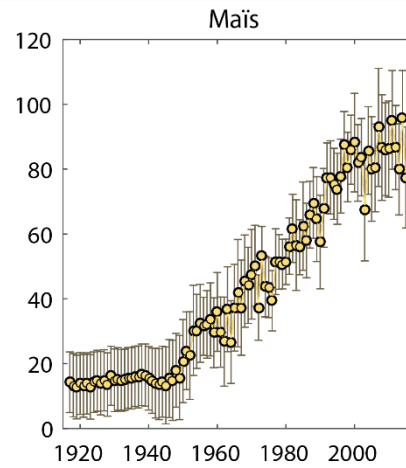
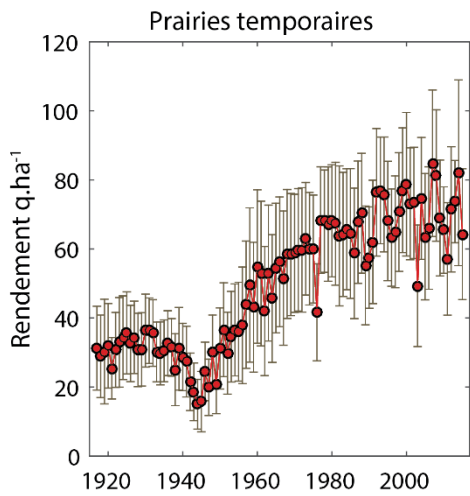
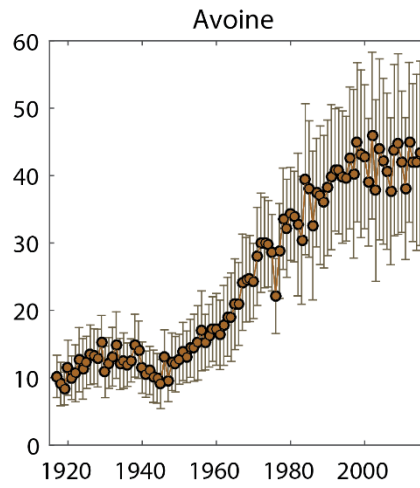
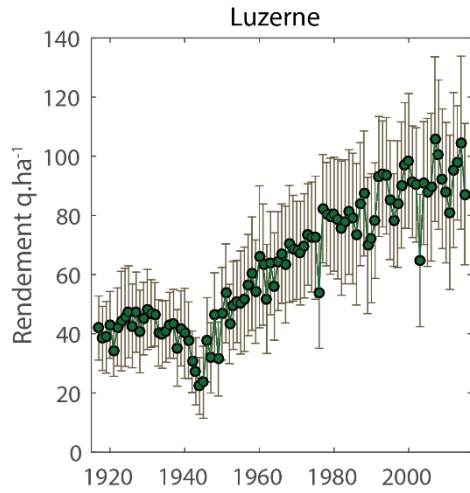
¹² L'agrarisme est un courant politique avec de fortes orientations protectionnistes qui a prôné le "retour à la terre" en réponse à la modernisation de l'agriculture et à l'exode rural.

n'étant pas étudiée). Au niveau européen, la PAC (Politique Agricole Commune), est mise en place en 1962. À sa création, deux des buts de la PAC sont d'augmenter la productivité de l'agriculture et de sécuriser l'approvisionnement en denrées agricoles. Par la mise en place de marchés uniques européens et de systèmes de prix garantis, la PAC va inciter le monde agricole à augmenter la production végétale et animale.



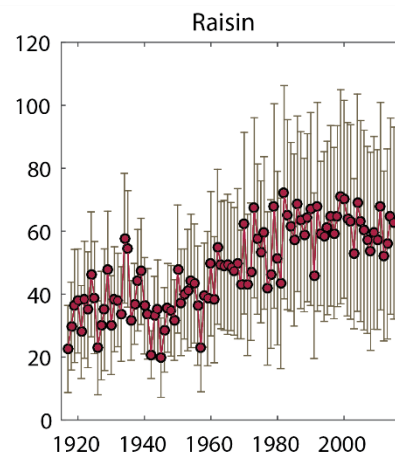
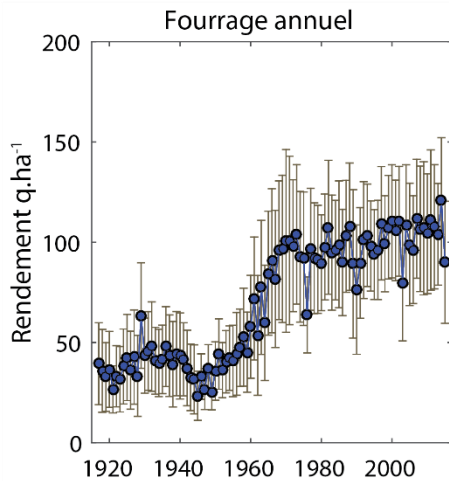
Le rendement des Hauts-de-Seine a été écarté.

Le rendement de la Seine-Saint-Denis, du Val-de-Marne et de la Moselle ont été écartés.



Le rendement de la Seine-Saint-Denis a été écarté.

Le rendement des Hauts-de-Seine a été écarté.



Le rendement des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne ont été écartés.

Le rendement des Yvelines, de l'Essone, des Hauts-de-Seine, et du Val-d'Oise ont été écartés.

Figure III-13 : Évolution des rendements moyens de différentes cultures. Les moyennes sont indiquées en couleur, les écart-type en gris. Les calculs ont été faits à partir des résultats de la mise en forme des données départementales de l'ensemble des départements français hors Seine, hormis dans le cas où les rendements étaient aberrants -cf. partie limites de la méthode III.4.2.3-. Les départements écartés sont alors mentionnés sous la figure.

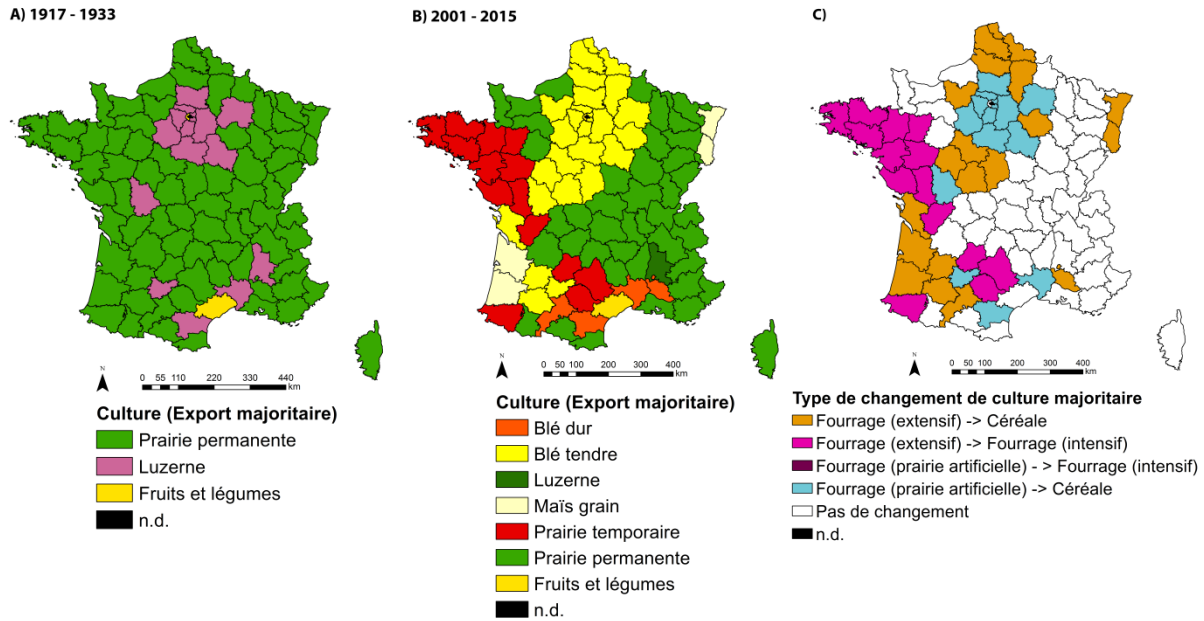


Figure III-14 : Cultures les plus exportatrices d'azote en moyenne sur A) les quinze premières années (1917- 1933); B) les quinze dernières années de la période étudiée (2001 - 2015), C) type de changement de culture exportant le plus entre les 15 premières années et les 15 dernières années de la période étudiée.

La combinaison de facteurs de nature variable a conduit à l'orientation de régions agricoles vers des productions agricoles diverses. Les avantages naturels ou écologiques (climat, sol et pente) mais aussi techniques et économiques, l'accroissement différencié de la productivité selon les branches des productions agricoles, ainsi que la disponibilité en main d'œuvre ont engendré une spécialisation géographique des productions agricoles (Reboul, 1977). Le corollaire de la mécanisation de l'agriculture a été que l'animal de ferme est passé du statut d'auxiliaire de la production céréalière à celui d'animal rentable en tant que production (Jussiau *et al.*, 1999). Dans les régions spécialisées dans l'élevage, la fertilisation organique restera une entrée d'azote importante voire majoritaire. En revanche, la fertilisation minérale va progresser dans l'ensemble des départements jusqu'à s'imposer comme l'entrée majeure d'azote pour 61% d'entre eux sur les 15 dernières années (Figure III-12). Les engrais azotés, peu onéreux après la deuxième guerre mondiale, remplacent l'apport d'azote par la fixation symbiotique des prairies artificielles dont la sole régresse sur l'ensemble du territoire (Huyghe, 2009).

Au final, durant cette période, les sorties d'azote augmentent mais de façon moins importante que les entrées d'azote, l'efficacité de l'azote décroît.

○ Troisième période : des années 90 à nos jours (1990 à 2015)

Durant cette dernière période, les sorties d'azote continuent à augmenter dans la majorité des départements mais de façon moins importante que pendant la période précédente.

En revanche, l'évolution des entrées d'azote varie selon les départements. Pour presque trois quarts des départements, les entrées d'azote sont en baisse plus ou moins sensible. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette baisse des entrées d'azote, sans qu'il y ait de réel consensus à ce sujet.

- Le prix des engrais minéraux de synthèse a augmenté, par exemple le prix des engrais azotés simple a doublé en France entre 2000 et 2009 (GCL développement durable, 2010).

- Une meilleure maîtrise des doses apportées à l'hectare par rapport au rendement visé pour la plupart des grandes cultures (Casagrande et Chapelle, 2001).
- Dans les années 80, l'agriculture européenne a atteint ces objectifs de productivité sur plusieurs productions agricoles dont le lait, et l'Europe se trouve en surproduction de produits laitiers. Cette situation pousse à instaurer des quotas laitiers en 1984 dans le cadre de la PAC. De plus les rendements laitiers continuent à augmenter et le nombre de vaches nécessaires pour maintenir le niveau de production de lait est moins important. Ces deux facteurs ont amené les éleveurs laitiers à réduire leur cheptel laitier, ce qui va générer une baisse de la fertilisation organique.
- L'évolution de la politique européenne en matière agricole et environnementale par le biais de la PAC. Le survol de l'historique de la PAC qui va suivre est essentiellement basé sur le livre de Morhain (Morhain, 2015). À sa création, la PAC était basée sur un système d'aide qui assurait un prix garanti au producteur quelque soit le volume produit. Cette politique assurait donc que toute production agricole allait recevoir un paiement rémunérateur. Les aides étaient reliées à la production, ce qui était très coûteux et qui était très critiqué par les instances du commerce international. Avec l'avènement des surplus de production, la PAC a été réformée de façon à ce que les aides soient moins basées sur les prix de production, et davantage liées aux facteurs de productions (surfaces, nombre de tête de bétail). En 1992, la réforme dite "Mac Sharry" va mettre en place un système d'aides dites "directes" qui ne favorise plus une production effrénée mais plutôt la recherche d'un optimum entre dépense et recette par la vente des productions. Cela pourrait conduire à la réduction de l'emploi des engrais en particulier des engrais azotés. En 2003, la réforme de la PAC, appelée "Accords du Luxembourg", va plus loin en transformant progressivement la majorité des aides couplées en aides découplées vis à vis des facteurs de productions. Ce nouveau soutien financier est basé sur les références historiques des paiements reçu par l'exploitation de 2000 à 2002. En 2003, le découplage est presque total et l'obtention des subventions est conditionnée au respect de certaines règles, dont le respect de certains points évoqués dans la directive nitrates de 1991 (existence d'un plan de prévisionnel de fumure, l'existence d'un cahier d'enregistrement des pratiques d'épandages) qui visent à équilibrer les apports d'azote par fertilisation et les exports d'azote. Le principe de cette réforme consiste ainsi à rompre le lien entre le paiement des aides directes et l'acte de production tout en conditionnant cette aide des normes en matière d'environnement, de bien-être des animaux ainsi qu'au maintien des terres dans de bonnes conditions agronomiques et environnementales (Butault *et al.*, 2005).
- La mise en place des jachères obligatoire pour l'obtention des aides de la PAC en 1993. Les terres en jachères (terres dites 'gelées') sont comptabilisées dans la surface de terre arables en donc dans la SAU mais ne reçoivent aucun engrais.
- L'augmentation des rendements de la période précédente ne s'est pas faite sans dommage puisque l'efficacité de l'azote a baissé et que le surplus azoté a augmenté. Cela a généré de nombreux problèmes environnementaux (eutrophisation, pollution azotée des aquifères, ...) qui ont été pris

en compte au niveau européen. La directive "nitrates" mise en place en 1991 vise à baisser les apports d'azote au niveau des agrosystèmes afin de réduire la pollution azotée de l'hydrosystème.

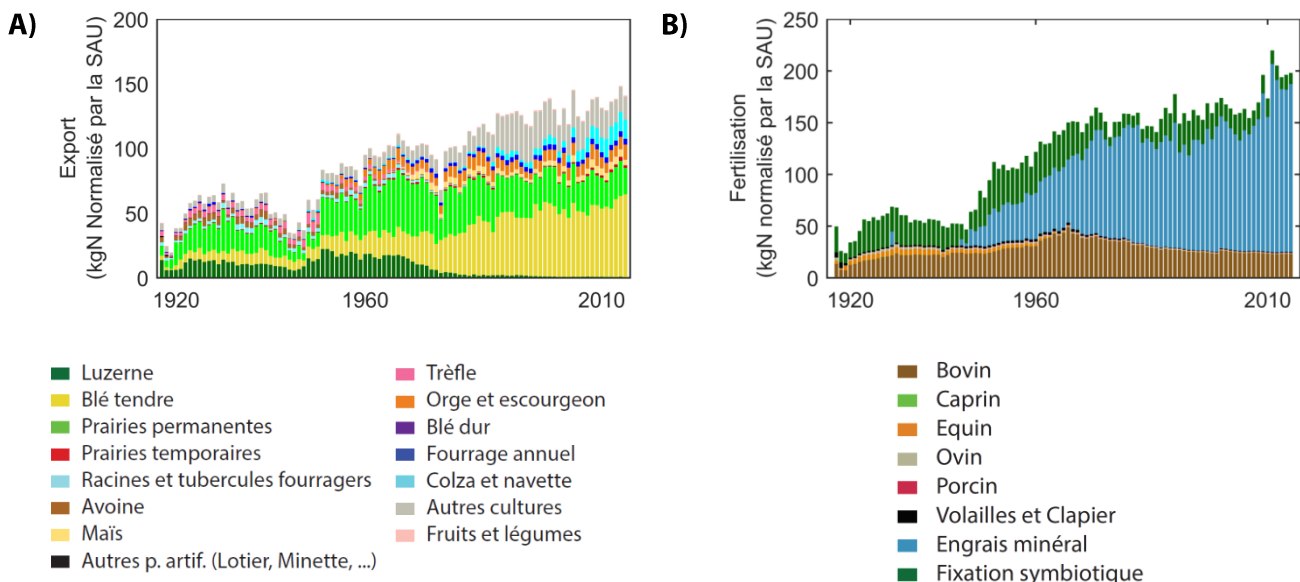
Dans les départements où il y a baisse des entrées d'azote au cours de cette période, la combinaison d'un export à la hausse et des entrées d'azote à la baisse améliore l'efficacité.

Pour d'autres départements, il n'y a pas d'inflexion au niveau des entrées d'azote et l'efficacité continue de diminuer.

III.3.2. Évolution de l'efficacité de l'azote dans 4 départements

Les trajectoires de l'azote étant de trois grands types mais présentant de multiples variations, le choix s'est porté sur quatre départements illustrant les trajectoires de l'azote les plus fréquentes. La première trajectoire présente une décroissance constante de l'efficacité (surplus croissant sur l'ensemble de la période) (partie III.3.2.1. département de l'Aisne). Les trajectoires deux et trois présentent deux départements caractérisés par deux contextes agricoles différents, l'un en zone de culture intensive (partie III.3.2.2. département de la Somme), l'autre en zone d'élevage intensif (partie III.3.2.3. département du Finistère), mais montrant tous les deux un changement de tendance de l'efficacité (surplus croissant puis décroissant). Le dernier exemple présente un département caractérisé une efficacité croissante et des surplus constants sur l'ensemble de la période (partie III.3.2.4. département du Cantal).

III.3.2.1. Trajectoire d'une efficacité monotone et décroissante : l'Aisne



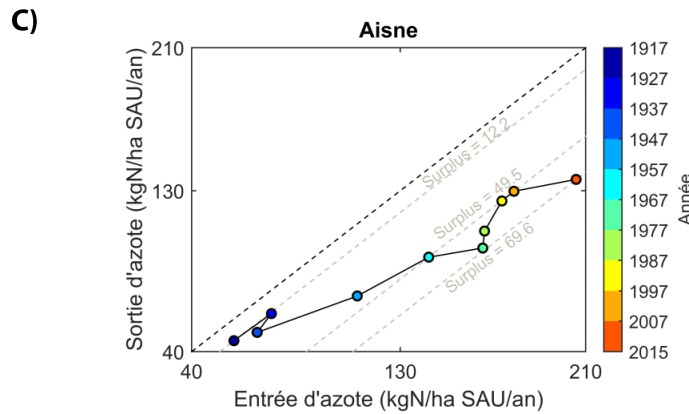


Figure III-15 : Efficience de l'azote et ses composants dans le département de l'Aisne entre 1917 et 2015 A) chronique d'exports cumulés, B) chroniques de fertilisations, C) Trajectoire de l'azote (un point est la moyenne de 10 ans)

Au début de la période d'étude, les sorties d'azote du département de l'Aisne sont principalement issues des prairies permanentes et d'une espèce de prairie artificielle : la luzerne (Figure III-15-A). Ces deux cultures représentent en moyenne 55% de l'export total sur les 15 premières années étudiées. Les deux céréales les plus exportatrices sont le blé tendre et l'avoine mais elles ne représentent que 19.4% en moyenne sur les 15 premières années. La fertilisation majoritaire est la fertilisation organique apportée surtout par les bovins puis par les équins (66.5% et 17.8% en moyenne de la fertilisation organique sur les 15 premières années). La fixation symbiotique apporte quasiment la même quantité d'azote que la fertilisation organique (21.8 kgN.ha⁻¹ SAU apportés en moyenne sur les 15 premières années par la fixation symbiotique contre 25.8 kgN.ha⁻¹ SAU pour la fertilisation organique) (Figure III-15-B). Les entrées et sorties d'azote évoluent peu pendant les 3 premières décennies et les surplus restent faibles (14.3 kgN.ha⁻¹ SAU en moyenne et l'efficience assez bonne (0.79 en moyenne) (Figure III-15-C).

A partir des années 45, les exports par les céréales (blé et orge) vont peu à peu se substituer aux cultures fourragères et devenir les cultures les plus exportatrices d'azote. Ainsi en 1945, les exports par le blé et l'orge représentent 6.8% des exports (soit 7.3 kgN.ha⁻¹ SAU exporté), en 1970, 19.5% (soit 24.6 kgN.ha⁻¹ SAU exporté) et 64.1% en 2015 (soit 75.6 kgN.ha⁻¹ SAU exporté). Cette augmentation des sorties n'est pas aussi importante que l'augmentation des entrées d'azote (+1.14 kgN.ha⁻¹SAU.an⁻¹ en moyenne pour les sorties contre + 1.4 kgN.ha⁻¹SAU.an⁻¹ pour les entrées entre 1945 et 2015). Cette augmentation des entrées d'azote est majoritairement supportée par la fertilisation minérale qui devient définitivement l'entrée d'azote majeure en 1958 et ne cesse de croître jusqu'en 2015. Les surplus augmentent donc jusqu'à la fin de la période d'étude.

III.3.2.1. Trajectoire d'une efficacité présentant une inflexion : la Somme et le Finistère

III.3.2.1.1. Trajectoire d'un département aujourd'hui orienté vers la production de grandes cultures : la Somme

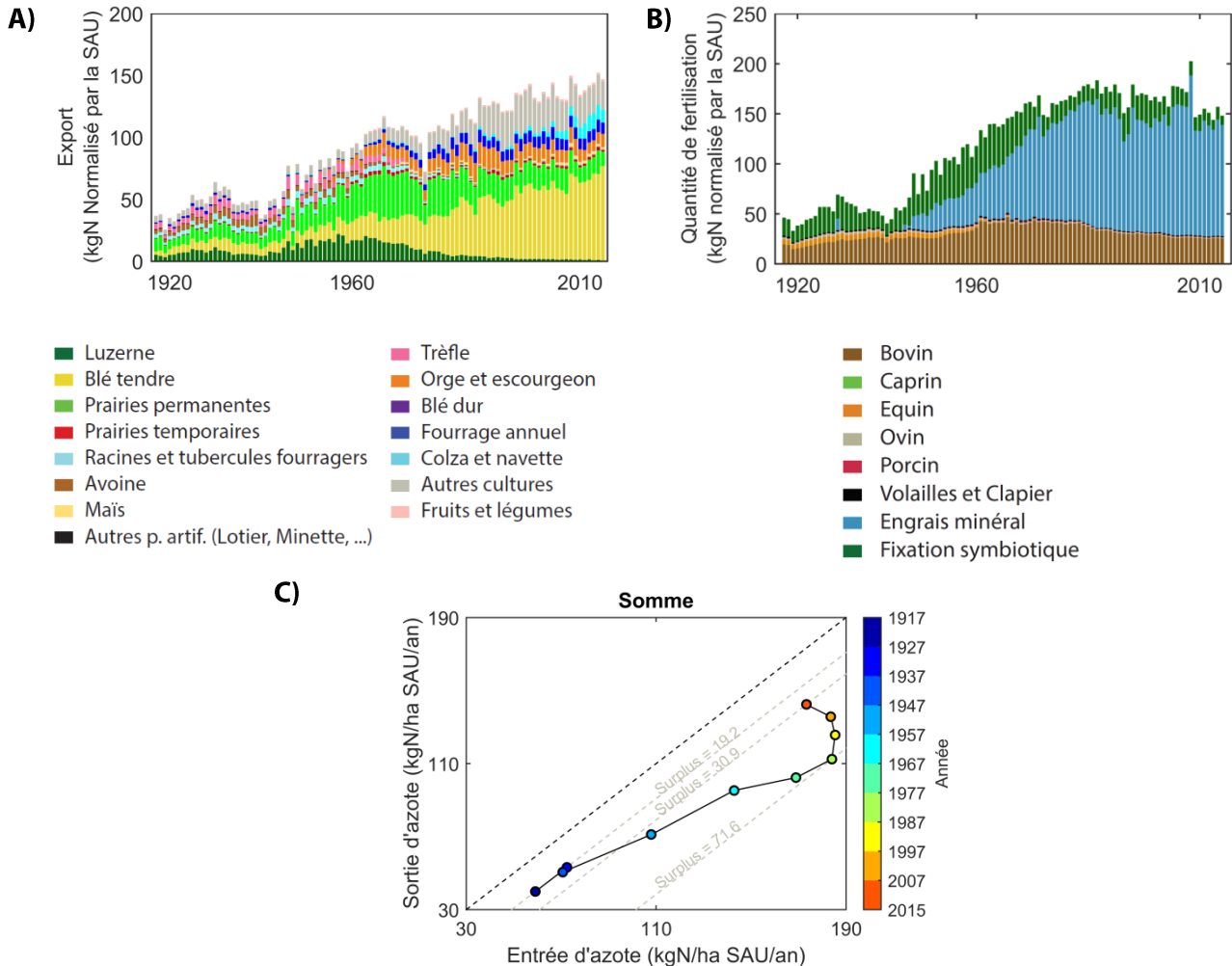


Figure III-16 : Efficacité de l'azote et ses composants dans le département de la Somme entre 1917 et 2015 A) chronique d'exports cumulés, B) chroniques de fertilisations, C) Trajectoire de l'azote (un point est la moyenne de 10 ans)

L'évolution de l'export dans la Somme est sensiblement la même que dans l'Aisne. Aujourd'hui le département de la Somme, tout comme celui de l'Aisne, est majoritairement dévoué à la production de grandes cultures (blé tendre, orge, betteraves industrielles comprises dans "autre cultures") (Figure III-16-A). La fertilisation minérale est aussi l'entrée d'azote majoritaire pour le département de la Somme et ce depuis 1963. En revanche, l'évolution de la fertilisation minérale change entre les deux départements. La fertilisation minérale du département de la Somme présente une inflexion dès la fin des années 1980 et décroît globalement jusqu'à la fin de la période d'étude (Figure III-16-B). De plus, même si elles représentent une part moins importante de la fertilisation totale, la fertilisation organique

et la fixation symbiotique continuent de diminuer. Cette baisse des entrées d'azote couplée aux sorties d'azote en augmentation permet une amélioration de l'efficacité de l'azote depuis les années 90 (Figure III-16-C).

L'étude de l'efficacité et des facteurs de contrôle de la Somme et de l'Aisne permet de montrer que deux départements ayant des productions agricoles similaires peuvent montrer une évolution de l'efficacité et du surplus différente. Dans ce cas, la différence de trajectoire de l'azote est due à la l'évolution de la fertilisation minérale.

III.3.2.1.2. Trajectoire d'un département aujourd'hui orienté vers l'élevage intensif : le Finistère

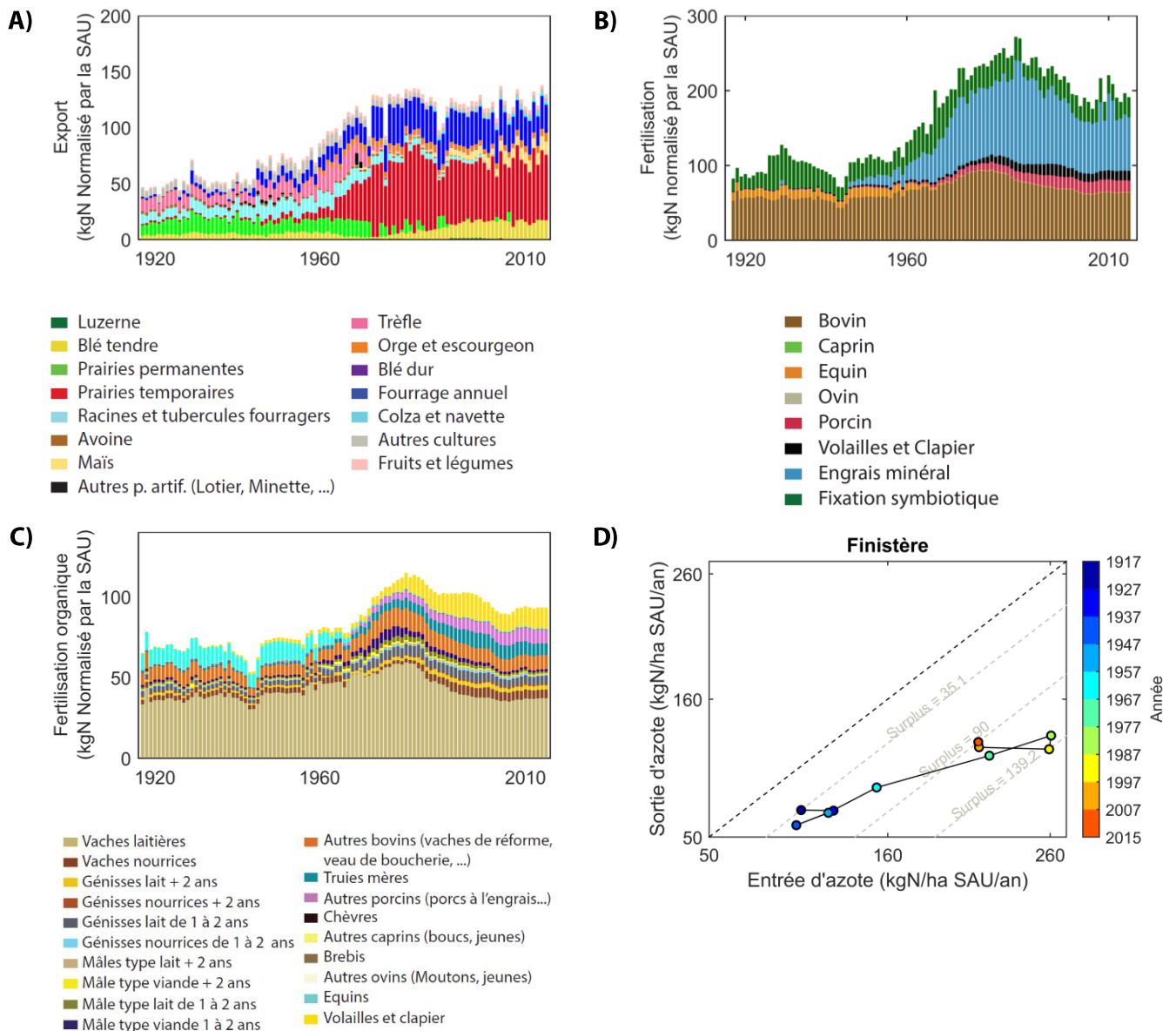


Figure III-17 : Efficacité de l'azote et ses composantes dans le département du Finistère entre 1917 et 2015 A) chronique d'exports cumulés, B) chroniques de fertilisations, C) chronique de fertilisation organique cumulé par type de cheptel, D) Trajectoire de l'azote (un point est la moyenne de 10 ans)

Au début de la période d'étude, les sorties d'azote du département du Finistère sont majoritairement le fait des fourrages : les prairies artificielles, les prairies permanentes, les fourrages annuels et les racines et tubercules fourragers représentent en moyenne 68.6% de l'export moyen des 15 premières années (Figure III-17-A). Les deux céréales les plus exportatrices sont le blé tendre et l'avoine mais elles ne représentent que 13.7% de l'export moyen d'azote sur les 15 premières années. La fertilisation majoritaire est la fertilisation organique apportée en majorité par les bovins puis par les équins (82.6% et 14.5% en moyenne de la fertilisation organique sur les 15 premières années). La fixation symbiotique est 2.5 fois moins importante que la quantité d'azote apportée par la fertilisation organique (29.7 kgN.ha SAU⁻¹ apportés en moyenne sur les 15 premières années par la fixation symbiotique contre 73.2 kgN.ha SAU⁻¹ pour la fertilisation organique) (Figure III-17-B). La balance entre les entrées et les sorties d'azote est déjà déséquilibrée et le surplus de la première décennie est relativement important (35.1 kgN.ha SAU⁻¹ en moyenne). L'efficacité moyenne de la première décennie est de 0.67 (Figure III-17-D).

Les cultures fourragères des prairies artificielles et des prairies permanentes sont peu à peu remplacées par d'autres fourrages : les prairies temporaires et les fourrages annuels (dont le maïs fourrage) et les exports par ces deux cultures fourragères vont devenir majoritaires. Les exports par les céréales (blé, orge, maïs grain) vont aussi augmenter mais restent moins importants que les exports par les fourrages. Ainsi en 1945, les exports par les prairies temporaires et les fourrages annuels représentent 17.2% des sorties d'azote (soit 12.3 kgN.ha SAU⁻¹ exporté), 44.4% en 1970 (soit 50.4 kgN.ha SAU⁻¹ exporté) et 64.3% en 2015 (soit 83.4 kgN.ha SAU⁻¹ exporté). Les céréales (blé, orge et maïs grain) exportent 3.8 kgN.ha SAU⁻¹ en 1945, 8.4 kgN.ha SAU⁻¹ en 1970 et 36.6 kgN.ha SAU⁻¹ en 2015 (Figure III-17-A). Les entrées d'azote évoluent de façons différentes : la fertilisation organique, majoritairement composée des déjections émises par les bovins (vaches laitières en particulier, Figure III-17-C), augmente jusque dans les années 1980 puis diminue, probablement du fait de l'entrée en vigueur des quotas laitiers. La fertilisation minérale augmente jusqu'à la fin des années 1980, devient même la principale entrée d'azote entre 1987 et 1992, puis diminue (Figure III-17-B). Au total, les entrées d'azote s'infléchissent et commencent à décroître à la fin des années 80. Après avoir atteint un surplus moyen maximum d'environ 140 kgN/ha SAU vers la fin des années 80, les surplus décroissent pour atteindre une valeur moyenne encore relativement élevée de 90 kgN/ha SAU environ (Figure III-17-D).

Sur l'ensemble de la période, l'efficacité de l'azote dans le département du Finistère est comprise entre 0.38 (1989) et 0.74 (1925). Chaque année, entre 26 (1925) et 62% (1989) de l'azote introduit a donc été stocké dans le sol ou dans les aquifères, ou perdus vers l'atmosphère ou les eaux superficielles.

III.3.2.1. Trajectoire d'une efficacité monotone et stable : le Cantal

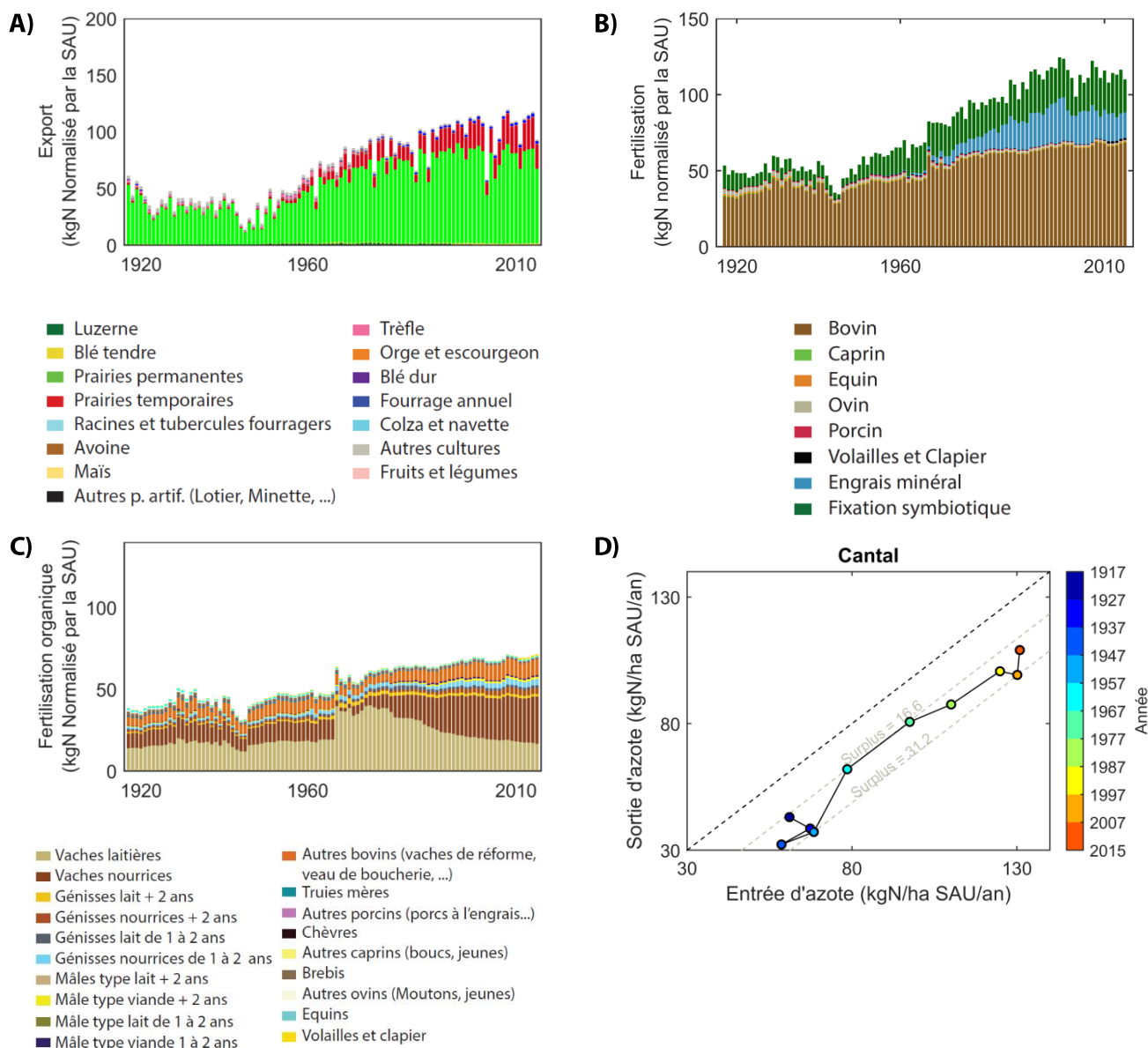


Figure III-18 : Efficacité de l'azote et ses composantes dans le département du Cantal entre 1917 et 2015 A) chronique d'exports cumulés, B) chroniques de fertilisations, C) chronique de fertilisation organique cumulé par type de cheptel, D) Trajectoire de l'azote (un point est la moyenne de 10 ans)

Le département du Cantal est tourné vers un élevage de bovin nourri principalement grâce à l'exploitation des prairies permanentes (Figure III-18-A). Le nombre de bovin augmente régulièrement depuis 1945 entraînant une hausse de la fertilisation organique (Figure III-18-B et Figure III-18-C). Les exports par les cultures fourragères augmentent aussi et équilibrent les entrées d'azote. Au final, les surplus restent relativement stables tout au long de la période d'étude (Figure III-18-D).

La chronique de la fertilisation organique montre une discontinuité pour les vaches laitières et nourrices en 1966, due à la mise en forme des données départementales pour leur utilisation dans CASSIS_N. Ce point est soulevé par la suite dans la partie III.4.2.2.

III.3.3. Les facteurs de contrôle des surplus départementaux de 1917 à 2015

L'identification des facteurs de contrôle a été effectuée sur des segments de chroniques de surplus homogènes du point de vue de leur tendance. La première partie présente de façon synthétique l'évolution des surplus azotés départementaux d'après la segmentation effectuée par BFAST, comparée aux résultats obtenus par une segmentation effectuée visuellement. La deuxième partie présente les facteurs de contrôle des surplus sur ces sous-périodes déterminées d'après BFAST et la segmentation effectuée visuellement. Le tableau détaillé des résultats par département et par sous-période est disponible en Annexe 9.

III.3.3.1. Évolution des pressions azotées

La segmentation de l'ensemble des 94 chroniques de surplus via BFAST a permis l'identification de 335 sous-périodes présentant des tendances homogènes, alors que l'analyse par interprétation visuelle n'a permis d'identifier que 249 sous-périodes. Selon les départements, le nombre de sous-période peut varier de 1 (pas de changement de tendance) à 6 dans le cas de l'analyse par BFAST, et de 1 à 4 dans le cas de l'interprétation visuelle. Pour BFAST, la plupart des chroniques sont segmentées en 4 sous périodes, contre 3 pour l'interprétation humaine (Tableau III-2).

Le paramétrage de BFAST a été effectué de façon à pouvoir identifier les changements de tendances récents et cela entraîne la détection de changement de tendances assez fin, contrairement à l'interprétation humaine qui semble ne conserver que les tendances les plus générales.

Tableau III-2 : Nombre de départements selon le nombre de sous périodes sur les chroniques de surplus azoté départementales

Nombre de périodes	Nombre de départements	
	BFAST	Interprétation visuelle
1	4	6
2	9	24
3	24	61
4	31	3
5	19	
6	7	
TOTAL	94	94

A première vue, seulement quatre départements présentent une chronique de surplus sans changement de tendance d'après BFAST. Cependant, BFAST détectant les changements dans les coefficients des régressions linéaires qui sont la mise en équation des tendances, certaines chroniques segmentées en deux sous périodes peuvent avoir la même tendance générale (croissante, décroissante ou stable sur les deux sous-périodes). Par exemple, deux sous-périodes ont été détectées sur la chronique de surplus de la Lozère mais le surplus est croissant sur chacune d'entre elles (Figure III-19).

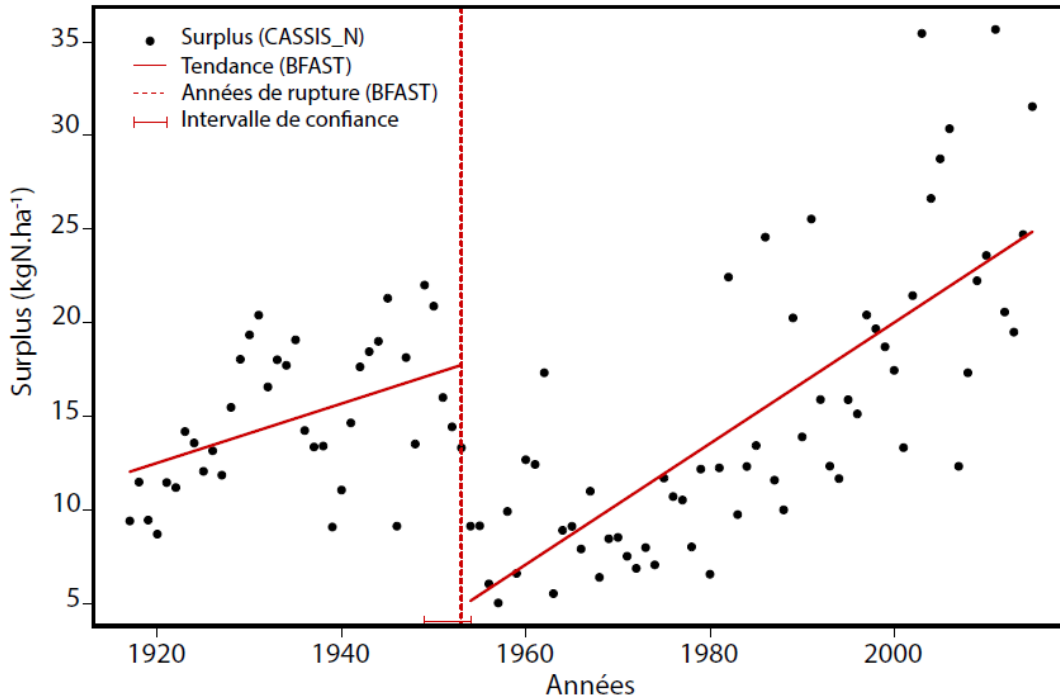


Figure III-19 : Chronique des surplus en Lozère segmentée en sous période selon BFAST

Au final, 9 départements présentent une évolution des surplus présentant la même tendance générale tout au long de la chronique (avec ou sans rupture de tendance) selon BFAST et 7 selon l'interprétation visuelle. Parmi ces départements, 4 présentent des surplus croissants sur l'ensemble de la chronique d'après BFAST, et 2 selon l'interprétation humaine (Tableau III-3).

La majorité des départements présentent des surplus dont l'évolution est hétérogène au cours du temps, ce qui est en accord avec l'analyse effectuée sur les périodes antérieures et postérieures à la directive nitrate (partie II.2.2). La majorité des chroniques (65 ou 69 départements selon la méthode d'identification des sous-périodes) montrant une modification de tendance du surplus présentent une baisse ou une stabilisation du surplus azoté en dernier changement de tendance, ce qui correspond à une baisse des pressions azotées (Tableau III-3).

Tableau III-3 : Types de changement de tendance identifiés sur les chroniques de surplus azoté départementales et nombre de départements concernés (D : décroissant, S : stable, C : croissant)

Types de changement de tendances	Nombre de départements	
	BFAST	Interprétation visuelle
Modification de tendance		
Dernier changement = amélioration (C -> D, C -> S)	65	69
Dernier changement = détérioration (D -> C ou S -> C)	6	11
Autre (D -> S ou S -> D)	14	7
Tendance conservée mais rupture dans les coefficients		
Croissant	3	1
Stable	1	
Décroissant	1	
Homogène (pas de changement de coefficients)		
Croissant	1	1
Stable	2	4
Décroissant	1	1
Total	94	94

Après des modifications de tendances variables, les surplus sont en hausse en fin de chronique pour 6 départements selon BFAST et 11 selon l'interprétation humaine. Les départements présentant ce type de tendance sont moins nombreux d'après BFAST car des inversions de tendance correspondant à des améliorations ont été détectées par BFAST en fin de chronique pour certains départements, alors que l'interprétation humaine ne les a pas perçues. Par exemple, pour l'Aube, BFAST a détecté une amélioration du surplus dès 1985 (Figure III-20-A), alors que l'interprétation visuelle identifie des surplus croissants de 1940 à 2015 (Figure III-20-B). Dans le cas de l'Aube, les résultats de surplus très dispersés à partir des années 1990 et qui sont à l'origine de la différence d'interprétation des deux méthodes, reflètent le signal de la fertilisation minérale (Figure III-21).

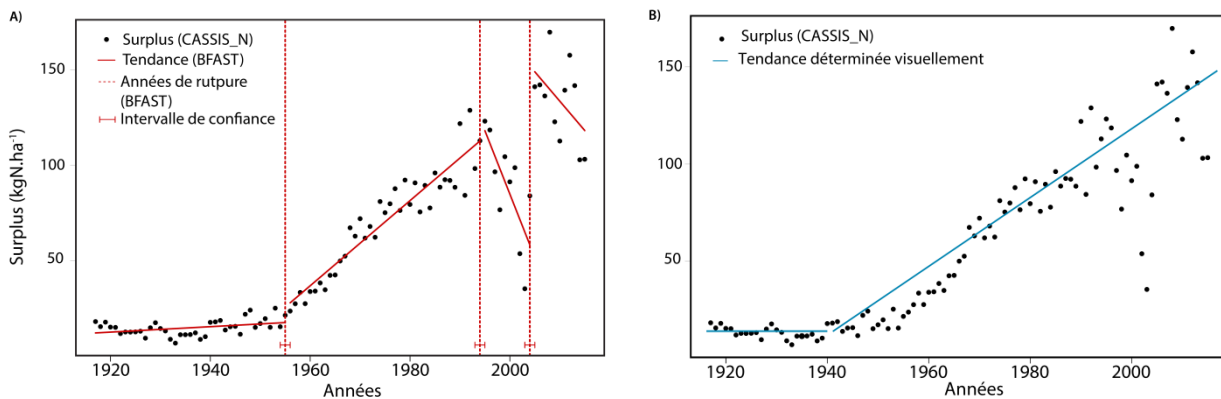


Figure III-20 : Segmentation de la chronique des surplus de l'Aube A) segmentation obtenue d'après BFAST B) segmentation visuelle

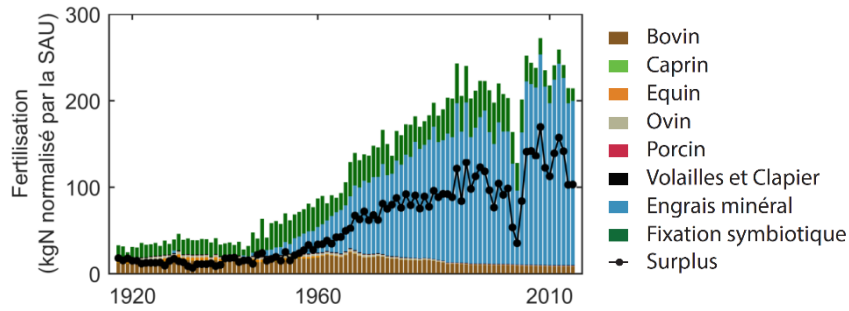


Figure III-21 : Fertilisation organique, fertilisation minérale et surplus azotés dans le département de l'Aube

Les améliorations de pression azotée sont comprises entre 1949 et 2005 selon BFAST et entre 1950 et 2005 selon l'interprétation humaine (Figure III-22). Les dates identifiées par BFAST sont mieux réparties dans le temps alors qu'elles sont concentrées sur 4 années pour l'autre méthode (1980, 1985, 1990 et 2000).

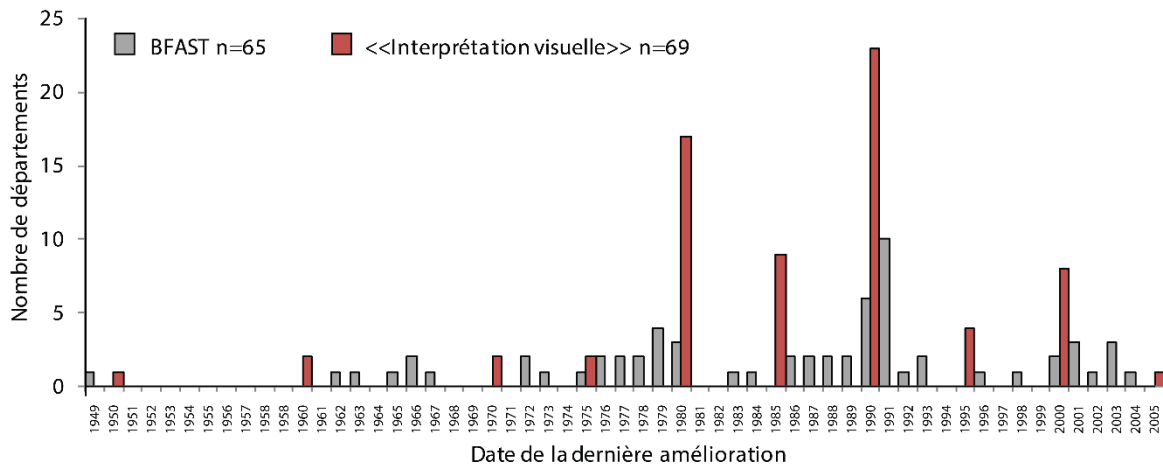


Figure III-22 : Dates de l'amélioration de la pression azotée

Dans la majorité des départements où une amélioration est constatée, un changement dans la fertilisation minérale est à l'origine de l'amélioration des pressions azotées. Plus rarement, d'autres changements sont à l'origine de l'amélioration des surplus : la fertilisation organique, l'export, la fixation symbiotique ou une modification synchrone de plusieurs postes (Figure III-23). La proportion des facteurs à l'origine de l'amélioration est légèrement différente entre les deux méthodes de segmentation des chroniques du fait de la datation des points de rupture qui peut coïncider avec des changements de tendances sur des facteurs différents.

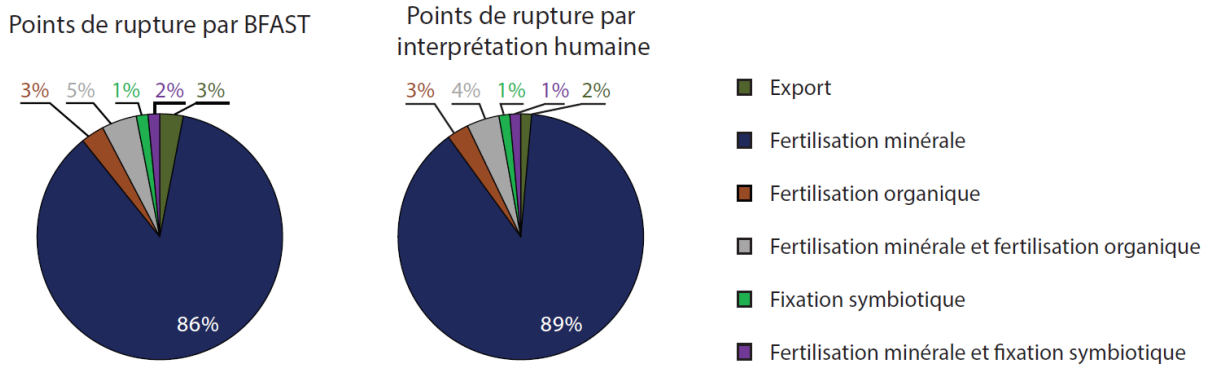


Figure III-23 : Facteurs de contrôle de l'amélioration des pressions azotées (N = 65 avec BFAST, N = 69 pour l'interprétation visuelle)

III.3.3.2. Facteur de contrôle des surplus

Les postes (fertilisation organique ou minérale, fixation symbiotique ou export) contrôlant les surplus ont été identifiés pour chaque sous période et chaque département. L'analyse peut être poursuivie jusqu'à la variable agricole (type de culture ou de cheptel) si le poste contrôlant le surplus est l'export d'azote ou la fertilisation organique. L'analyse a été faite sur les segments de chroniques identifiés (n=355) par BFAST et par l'interprétation humaine (n=249).

Dans la majorité des cas (~60% des sous périodes), le poste qui contrôle le surplus est la fertilisation minérale, suivi par l'export par les cultures (24%) (Tableau III-4). Dans 65% des cas, la culture qui contrôle l'export d'azote est la production d'herbe par les prairies permanentes. L'azote apporté au sol par les vaches nourrices et laitières contrôle la fertilisation organique dans 66% des cas où la fertilisation organique est le poste qui contrôle le surplus sur les sous-périodes identifiées par BFAST et 71 % pour l'autre méthode.

Tableau III-4 : Facteurs de contrôle de l'évolution des surplus départementaux. Les valeurs indiquées dans le tableau représentent le pourcentage des sous périodes contrôlées par le facteur indiqué à gauche

Postes et variables de contrôle	BFAST (n=355)	Interprétation visuelle (n=249)
Fertilisation minérale	59.7	60.2
Fixation symbiotique	7.3	6.8
Fertilisation organique	9.0	8.4
Détail :		
Vaches laitières	4.2	4.0
Vaches nourrices	1.7	2.0
Bovins mâles de 1 à 2 ans (type viande)	0.6	
Equins	1.1	0.8
Lapines mères	0.3	0.4
Brebis mères	0.6	0.8
Ovins adulte (boucherie)	0.3	0.4
Ovins de mois de 1 an	0.3	
Export	23.9	24.5
Détail :		
Prairies permanentes	15.8	16.1
Prairies temporaires	2.8	2.8
Blé tendre	2.0	1.2
Luzerne	1.7	2.4
Sarclées fourragères	0.8	1.2
Maïs grain	0.8	0.4
Trèfle		0.4
TOTAL	100	100

III.4. Limites du modèle et perspectives d'amélioration

III.4.1. Flux d'azote non considérés

Le modèle CASSIS_N ne prend pas en compte les flux d'azote apportés par :

- les boues de station d'épuration. Le volume de boues épandu sur les terres agricoles en 1999 serait de 850 000 tonnes de matière sèche (ifen, 2001). En considérant que les boues peuvent contenir entre 3 et 9% de teneur en azote (Dudkowski, 2000), l'apport supplémentaire d'azote représenterait de 1 à 4% du total de la fertilisation organique en 1999 (valeur France entière calculée avec le modèle CASSIS_N). La quantité d'azote mis en jeu est donc relativement faible au regard des quantités apportées par la fertilisation organique issue du cheptel. Cependant, localement, l'apport par les boues pourrait corriger des surplus azotés calculés comme étant négatifs sur plusieurs années (Seine et Marne à partir 2007 à 2015) selon CASSIS_N.

- les résidus de l'industrie. De nombreux procédés industriels (amidonnerie, féculerie, transformation de la pomme de terre, fabrication du sucre, industrie de la viande, brasserie, cidrerie, production de vin, laiteries, ...) génèrent des coproduits pouvant être valorisés en agriculture pour leur valeur fertilisante. Un rapport du réseau RESEDA et de l'ADEME de 2008, fait état de la production de 9.1 millions de tonnes de coproduits de l'industrie alimentaire française pour l'année 2007, dont environ 3/4 sont produits par la sucrerie, l'huilerie, l'amidonnerie, la meunerie. Selon cette étude, 7.8% du volume des coproduits seraient utilisés dans la valorisation agronomique par épandage, compostage ou après un processus de transformation par les industries de la fertilisation. N'ayant pas d'information sur la composition moyenne des différents coproduits, il est difficile d'estimer la quantité d'azote pouvant être apporté au sol par ces résidus et l'impact de la non prise en compte de ce flux dans les balances azotées.

- les semences : les semences contiennent de l'azote dans leurs tissus. Lors du semis, il y a donc un flux d'azote entrant dans le sol qui n'est actuellement pas considéré dans CASSIS_N. Il est possible d'estimer le flux représenté par certaines semences à partir de la densité de semis et de l'azote contenu dans les semences. En 1964, la densité de semis de blé tendre pour l'ensemble formé par les départements du Cher, de l'Eure-et-Loir, de l'Indre, du Loir-et-Cher et du Loiret est de 173 kg.ha⁻¹ et de 150 kg.ha⁻¹ pour l'orge (SCEES, 1965a). En considérant que les semences contiennent autant d'azote que les grains de la culture correspondante (1.8 kgN.q⁻¹ pour le blé tendre et 1.5 kgN.q⁻¹ pour l'orge, (Tableau II-6), l'apport d'azote via ces semences représenterait augmenterait la balance azotée de 2.3%. L'apport d'azote cumulé de l'ensemble des semences pourrait finalement représenter une partie non négligeable de la balance. La quantification complète de l'entrée d'azote par les semences nécessiterait des données sur les densités de semis par département, par culture, par année ainsi que la teneur en azote des semis dont les semences ne correspondent pas à la partie récoltée des végétaux comme la betterave, les prairies artificielles, les prairies temporaires ou les légumes.

- l'apport de nitrate par l'irrigation avec l'eau en provenance des nappes. Par exemple, des mesures de teneur en nitrates dans la nappe superficielle des calcaires lacustres de Touraine indiquaient des valeurs supérieures à 50 mg.l⁻¹ en 2011 (DREAL Centre, 2012) or cette nappe n'est quasiment plus utilisée pour l'adduction d'eau potable mais est exploitée pour l'irrigation (BRGM, 2016).

- les destructions de prairies. Dans leur article de synthèse de 2007, Vertès *et al.* ont relevé des apports d'azote par minéralisation de la matière organique suivant la destruction de prairies allant de 50 à 250 kgN.ha⁻¹.

- les mouvements de fourrages et de fertilisation organique entre les départements. Bien que les déjections et les fourrages représentent des charges lourdes et soient donc chers à transporter, des échanges entre département existent. En particulier, les échanges de fertilisation organique sont des pratiques connues entre les départements dont les sols manquent de matière organique (départements du bassin parisien par exemple) et les départements en excédent d'azote (département de la Bretagne). Les chiffres manquent actuellement pour quantifier cette pratique (Aubert et Levasseur, 2005). Les échanges de fourrage entre départements influencent la balance azotée par le biais du calcul de la production d'herbe à partir des prairies permanentes, le modèle CASSIS_N faisant intervenir la donnée de fourrage disponible sur le département pour ajuster de la quantité d'herbe prélevée sur les prairies permanentes. Plus la quantité de fourrage disponible sur un département est importante, moins la quantité d'herbe prélevée à partir des prairies permanentes est importante. Les échanges commerciaux de fourrages entre les départements pourraient donc impacter la quantité d'herbe produite et donc l'azote exporté par les prairies permanentes.

III.4.2. Complétion des données

III.4.2.1. Répartition de catégories sur des sous catégories

Le modèle CASSIS_N est conçu pour s'appliquer à des catégories de productions végétales ou des catégories de cheptel bien définies afin de calculer au mieux des flux d'azote. Par exemple, le calcul de la fertilisation organique nécessite le nombre de vaches laitières (109.7 kgN.an⁻¹ excrété) et de vaches nourrices (79.5 kgN.an⁻¹ excrété). Avant 1966, seul le nombre de vaches total (laitières et nourrices confondues) est disponible. Le nombre de vaches laitières et de vaches nourrices est alors reconstitué à partir de la répartition entre ces deux catégories sur les années postérieures à 1966, hors la proportion des deux types de vaches a évolué au cours du temps. Dans le Cantal, en 1970 les vaches laitières étaient plus nombreuses que les vaches nourrices (Figure III-18-C), alors que la situation inverse est vraie pour les années récentes. Le cheptel de vache est réparti selon la répartition moyenne de toutes les années disponibles, ce qui donne lieu à une discontinuité dans la chronique d'excrétion azotée des vaches laitières et nourrices.

Cette répartition a un impact sur le calcul du surplus azoté. Par exemple, en Indre et Loire, en 1928, si l'ensemble des vaches étaient des vaches laitières (et non des vaches nourrices et laitières) alors le surplus serait plus important de 1.9 kgN.ha SAU⁻¹ (Tableau III-5) (valeur du surplus : 23.8 kgN.ha SAU⁻¹).

Tableau III-5: Influence de la répartition des vaches en sous catégories dans le département de l'Indre-et-Loire en 1928

	Nombre de tête en 1928 en Indre-et-Loire après le travail sur les données	Excrétion azotée (kgN.an ⁻¹)	Excrétion par catégorie (avec répartition)	Si toutes les vaches étaient des vaches laitières
Vache laitières	76090.9	109.7	8343475.9	102390
Vache allaitante	26299.1	79.5	2090090.9	
Vaches totales (valeur SAA)	102390			
			10 433 567	11 227 210
Variation par rapport à la valeur issue de CASSIS_N				+8%
SAU (valeur SAA)	421350	Impact sur la fertilisation azotée (kgN.ha SAU ⁻¹)		+1.9

III.4.2.2. Complétion de chroniques sans informations sur le début de la période

Le travail de comblement des données complète les chroniques de production, de surface ou de nombre de tête de cheptel de façon à ce qu'elles soient continues sur l'ensemble de la période d'étude. Dans le cas de productions recensées seulement à partir d'une certaine date, cela implique de compléter toute la série avant l'apparition des renseignements. Les productions étant recensées à partir d'une quantité relativement faible, ce genre de complétion ne semble pas modifier beaucoup l'export d'azote et donc le surplus azoté. Par exemple, le blé dur n'apparaît dans les volumes de la SAA qu'à partir de 1961. La méthode de complétion des données va affecter la première valeur de surface et de production rencontrée (1961) pour le blé dur à l'ensemble des années antérieures. Pour le département du Gard, l'export ainsi calculé pour le blé dur va représenter entre 0.8 et 2% des exports du département entre 1917 et 1960.

III.4.2.3. La double répartition en Seine et Oise

Un double travail de répartition doit être effectué pour le département de la Seine et Oise. Dans un premier temps, les différentes productions agricoles de ce département doivent être réparties sur les départements de la grande couronne parisienne pour les dates antérieures à 1968. Dans un deuxième temps, en 1970, certaines surfaces et productions régionales comme les prairies temporaires doivent aussi être réparties sur les départements. Pour les cultures présentes mais peu représentées après 1970 dans ces départements, il y a peu de valeurs de référence pour que la répartition se fasse correctement. La répartition donne des résultats qui ne sont pas cohérents pour certaines cultures de départements en voie d'artificialisation (prairies temporaires dans les Hauts de Seine par exemple).

III.4.3. Fertilisation minérale

Pour estimer le poste fertilisation minérale, les données de livraison d'engrais de l'UNIFA ont été privilégiées du fait de leur homogénéité. L'emploi de cette donnée est cependant sujet à caution du fait des perméabilités géographiques (flux d'engrais interdépartementaux) et temporelles (présence de stocks d'engrais) non pris en compte. D'autres modèles comme NOPOLU ont privilégié le calcul de la fertilisation minérale d'après les enquêtes sur les pratiques agricoles. D'autre part, le RICA contient des

informations sur les dépenses monétaires moyennes effectuées pour l'achat de d'engrais et d'amendement à l'échelle régionale (partie II.2.1.4).

Une méthode de spatialisaton de la fertilisation minérale grâce aux données du RICA a été testée. Cette méthode consiste à désagréger la donnée de livraison d'engrais minéral azoté du pays, valeur non entachée par les perméabilités géographiques entre département (source : UNIFA), grâce aux données présentes dans le RICA.

La quantité d'azote utilisée par hectare de SAU peut être déterminée à partir des données du RICA et de l'UNIFA (Équation III-3).

$$N_{\min} = \frac{N_{\text{France}} * D_{\text{Engrais_Amendement_regional}}}{D_{\text{Engrais_Amendement_France}} * SAU_{\text{RICA}}} * SAU_{\text{fertilisable}} \quad (\text{Équation III-3})$$

avec

N_{\min} la fertilisation azotée par région (kgN) ;

N_{France} les livraisons d'engrais azotés à l'échelle de la France entière (UNIFA, kgN) ;

$D_{\text{Engrais_Amendement_regional}}$ la dépense en euros pour les engrais et les amendements calculée à partir de la dépense moyenne par exploitation pour les engrais et les amendements, fournie par le RICA, et le nombre d'exploitations représentées par l'enquête RICA à l'échelle de la région ;

$D_{\text{Engrais_Amendement_France}}$ la dépense en euros pour les engrais et les amendements calculée à partir de la dépense moyenne par exploitation pour les engrais et les amendements, fournie par le RICA, et le nombre d'exploitations représentées par l'enquête RICA à l'échelle de la France entière ;

SAU_{RICA} la surface moyenne des exploitations représentées dans l'enquête RICA ;

$SAU_{\text{fertilisable}}$ la surface considérée comme étant fertilisée à l'échelle du département c'est à dire la SAU moins les prairies permanentes peu productives. Ces valeurs sont disponibles à l'échelle départementale sur DISAR (valeurs de la SAA).

La comparaison des valeurs obtenues par le biais de l'utilisation du RICA par rapport aux données de livraison fournies par l'UNIFA, utilisées dans CASSIS_N, tendraient à montrer que l'estimation de la fertilisation est bien estimée pour certains départements comme le Finistère (Figure III-24-A), mais que les données de livraison sous estimerait la fertilisation pour d'autres comme les Alpes-de-Haute-Provence (Figure III-24-B), ou les surestimerait comme dans les Landes (Figure III-24-C), ou encore surestimerait puis les sous estimerait (Figure III-24-D : Pyrénées- Atlantiques).

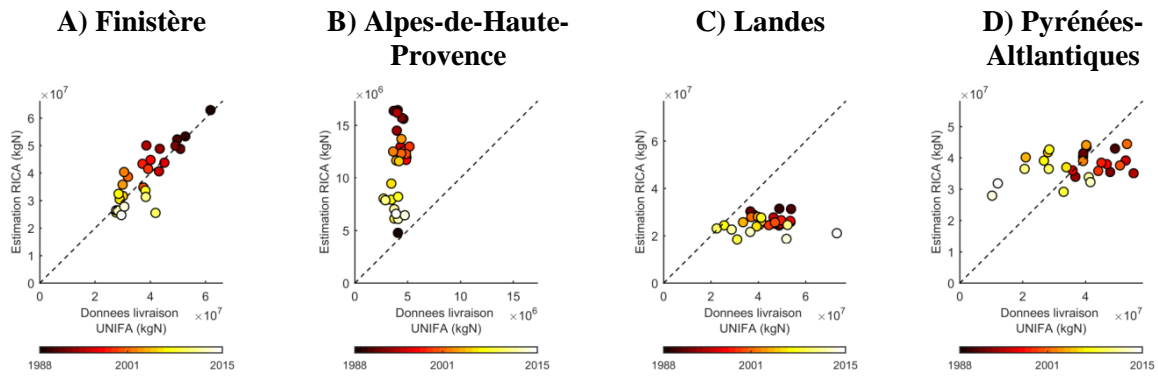


Figure III-24 : Comparaison des quantités de fertilisation minérale utilisées à l'échelle des départements estimées via la désagrégation des données d'engrais national par le biais des données du RICA et les livraisons d'engrais de l'UNIFA.

Il est difficile de statuer sur la pertinence d'une telle méthode car cette méthode de spatialisation de la fertilisation azotée comporte de nombreux biais. Ces biais sont liés à :

- l'échantillon utilisé pour mener l'enquête RICA. L'enquête RICA n'est représentative que d'une partie des exploitations agricoles présentant une marge d'exploitation supérieure à un seuil prédéfini. La proportion des exploitations non représentées dans le RICA n'est pas la même suivant les régions. Pour l'Aquitaine, le nombre des exploitations représentées par le RICA est de 24500 alors qu'il existe 43055 exploitations effectivement présentes dans la région d'après le RGA 2000 (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>). Selon les régions entre 53% (Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon) et 83% (Ile-de-France) des exploitations sont représentées. La faible représentativité des exploitations pourrait être une des raisons pour laquelle la comparaison des valeurs de fertilisation minérale obtenues à partir des deux méthodes n'est pas bonne pour les Landes, les Pyrénées-Atlantiques (région Aquitaine), et les Alpes-de-Haute-Provence (région Provence-Alpes-Côte d'Azur).

- la variable utilisée pour la désagrégation. La valeur donnée par le RICA est une valeur monétaire qui est donc dépendante de la quantité d'engrais utilisée mais aussi de son prix qui a varié au cours du temps. Par exemple le prix des engrais azotés simple a doublé en France entre 2000 et 2009 (GCL développement durable, 2010).

La valeur donnée par le RICA ne comprend pas que la dépense pour les engrais minéraux azotés mais aussi les dépenses pour les amendements et les autres engrais minéraux, potassiques et phosphatés, hors la proportion d'engrais de différente nature (azoté, potassique et phosphaté) livrée aux différents départements est variable selon ces derniers. Par exemple, pour la campagne 2009-2010, la livraison d'azote représente respectivement 13,8, 67,7 et 74,7 % des éléments fertilisants N, P, K et Mg livrés aux départements de la Corse de l'Indre-et-Loire et des Côtes d'Armor (<http://www.unifa.fr/>).

- la période de temps sur laquelle l'enquête RICA. Cette dernière ne couvre pas la totalité de la période d'étude ciblée.

La mise en parallèle des méthodes d'évaluation de la fertilisation minérale par le biais de l'UNIFA, de l'estimation par les enquêtes (via l'utilisation des données de NOPOLU) et de l'estimation par le biais de l'utilisation du RICA peut être faite pour l'année 2010 (Figure III-25). De façon générale, les

valeurs de l'UNIFA ont tendance à être supérieure pour les départements présentant les valeurs de fertilisation les plus fortes, et plus faible pour les autres départements.

Les données de validation pour ce poste sont inexistantes et cette comparaison met en évidence la disparité des valeurs de fertilisation estimée par département suivant les méthodes employées.

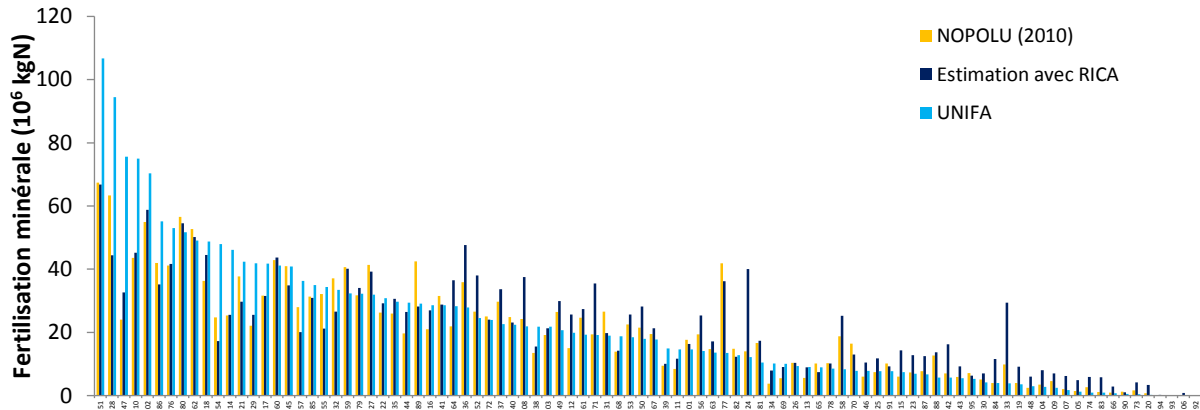


Figure III-25 : Comparaison de la valeur de fertilisation minérale départementale estimée selon les enquêtes de pratiques agricoles (sorties du modèle NOPOLU 2010), les résultats obtenus par le biais de l'utilisation du RICA et par les données de livraison de l'UNIFA

L'estimation de la fertilisation minérale reste délicate alors que c'est le poste qui contrôle le plus souvent à la fois l'évolution des surplus et les améliorations récentes des pressions azotées départementales.

III.4.4. Origine des imprécisions

Afin de déterminer l'origine des imprécisions qui pèsent sur les résultats, le lien entre les valeurs de chaque variable agricoles (ensemble des départements et des années) ont été mises en relation avec les imprécisions, par régression linéaire. Les variables étant le plus liées à l'imprécision ont été identifiées comme celles ayant le plus fort coefficient de corrélation (r^2).

Sur l'ensemble de la période d'étude, les imprécisions sont majoritairement liées à la fertilisation organique ($r^2 = 0.42$), puis à l'export d'azote par les cultures ($r^2=0.31$) et à la fixation symbiotique ($r^2=0.3$). La fertilisation minérale est peu corrélée aux valeurs des imprécisions ($r^2=0.02$) (Figure III-26). Les imprécisions sont surtout sous l'influence de productions (culture ou cheptel) ayant une incertitude assez relativement forte (Tableau II-6 et II-10) et présentant une quantité produite (quintaux ou nombre de têtes) relativement importante. Ainsi, parmi les cultures, les imprécisions sont liées surtout à la production des racines et tubercules fourragers, ($r^2=0.52$). La corrélation entre imprécision et production de racines et tubercules fourrager est encore plus forte pour les années comprises entre 1917 et 1960 ($r^2 = 0.73$), période où la production de racines et tubercules fourragers a pu être importante, en particulier pour certains départements comme le Finistère (29), le Morbihan (56) ou les Deux Sèvres (79). Les imprécisions sont aussi liées de façon importante au nombre de vaches laitières ($r^2=0.45$).

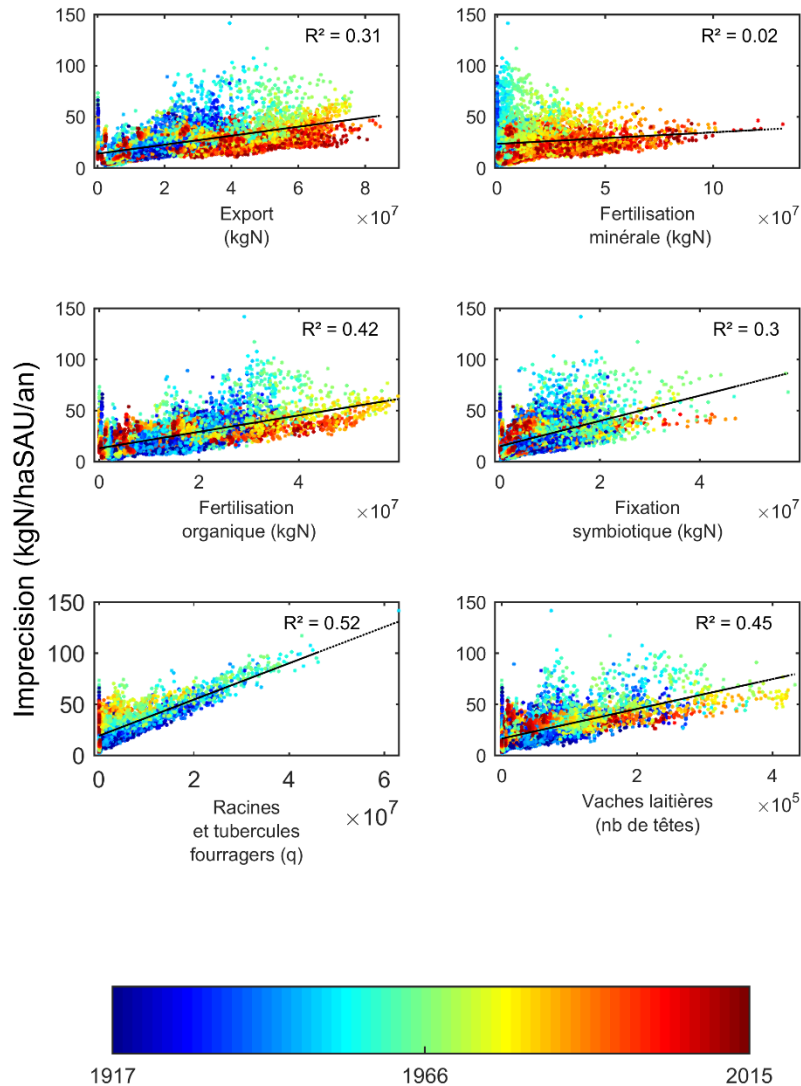


Figure III-26 : Facteurs de contrôle de l'imprécision

III.4.5. Identification des tendances et facteurs de contrôle

L'identification de tendances sur des périodes sans préjuger des dates de rupture laisse des questions en suspens. L'identification visuelle des modifications de tendance laisse à l'utilisateur le choix dans la date de rupture et l'identification de la tendance sans critères précis. La méthode n'est alors pas reproductible. Au contraire, les méthodes de détection automatique de tendance sont des techniques reproductibles basées sur des critères statistiques. BFAST présente l'avantage de fournir des dates précises de rupture ainsi qu'un intervalle de confiance sur ces dates (Tableau III-6). Cependant, les ruptures identifiées ne semblent pas toujours pertinentes, en particulier pour les ruptures concernant les années récentes (département de l'Aube par exemple, figure III-20).

Tableau III-6 : Avantages et inconvénients des méthodes de détection des tendances utilisées

	BFAST	Interprétation visuelle humaine
Reproductible	Oui	Non
Précis (date de rupture)	Oui	Non
Intervalle de confiance	Oui	Non
Type de rupture favorisée	Brutale	Installée sur une période longue
Temps de prise en main	Moyen (Prise en main des packages ou des logiciels)	Moyen (Temps de traitement des chroniques)
Interprétation "experte"	Non	Oui

III.4.6. Synthèse

Les enjeux pour la modélisation du surplus azoté portent à la fois sur les données et la robustesse des équations utilisées pour décrire les flux d'azote. Le modèle CASSIS_N a été développé sur des équations simples, en tenant en compte au mieux de l'incertitude sur l'ensemble des paramètres et données d'entrées disponibles, ce qui en a fait un modèle pouvant être appliqué sur l'ensemble du territoire sur le siècle passé.

L'identification des tendances sur les surplus et ces facteurs de contrôle est une nécessité pour l'identification des obstacles à la baisse des pressions azotées. Les résultats montrent une baisse des pressions azotées pour la majorité du territoire, principalement basée sur une baisse de la fertilisation minérale. Pour autant, la fertilisation minérale reste délicate à estimer et les changements de tendances basés sur une modification de tendance pourraient être mal datés ou mal détectés. Les méthodes de détection automatique des tendances sont intéressantes du point de vue de leur reproductibilité mais elles ont montré des limites dans l'identification de changement de tendances. Pour certains départements, les pressions azotées continuent de croître sur la période récente. Il serait intéressant de croiser ces résultats avec des analyses sociologiques et économiques qui permettraient d'identifier les raisons sous-jacentes des modifications de l'utilisation des engrais minéraux.

L'échelle départementale étant relativement large, il s'agit maintenant d'appliquer CASSIS_N à l'échelle communale.

IV. Chapitre 4 : Désagrégation des surplus à l'échelle communale

Les surplus azotés doivent être calculés à l'échelle la plus fine possible, à la fois pour répondre à l'objectif d'identification des zones de fortes pressions azotées, et dans l'optique d'une réagrégation des résultats la plus fiable possible. La désagrégation de l'information agricole basée sur l'utilisation des données des RGA a permis l'obtention de chroniques de surplus azotées à l'échelle communale sur la période allant de 1917 à 2015. L'année 1955 étant la première année où le RGA est disponible, seuls les résultats obtenus à partir de cette année sont présentés par la suite.

Une première partie est consacrée à l'étude de la dispersion des résultats obtenus à l'échelle communale. Un premier objectif a été d'évaluer l'hétérogénéité des résultats de surplus communaux par rapport à la valeur départementale et d'identifier les variables responsables de cette dispersion.

Dans un deuxième temps, les résultats issus de CASSIS_N ont pu être comparés à ceux obtenus par le modèle de balance azotée de surface du sol NOPOLU pour l'année 2010, à l'échelle cantonale.

Les limites du modèle CASSIS_N à l'échelle communale seront discutées en dernière partie.

IV.1. Dispersion des résultats communaux

La répartition hétérogène des surplus à l'échelle cantonale a été montrée par le modèle NOPOLU pour les années 2007 et 2010. Les surplus communaux calculés avec CASSIS_N devraient donc aussi être le reflet de cette variabilité spatiale sur les années récentes. Qu'en est-il des années passées ? Comment a évolué cette la variabilité des surplus communaux ? Est-elle sous-tendue par les mêmes facteurs de contrôle tout au long de la période ? Ce chapitre présente dans un premier temps l'évolution de la dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux obtenus précédemment. Dans un deuxième temps, les méthodes d'analyse en composantes principales (ACP) ont été utilisées pour identifier les facteurs de contrôle de la dispersion des surplus communaux par rapport aux surplus départementaux de 3 départements, pour 2 années. Ces dernières situées en début et fin de chronique de résultat, correspondant aussi à des dates de RA, ce qui a permis la représentation cartographique des résultats.

IV.1.1. Analyse des résultats

IV.1.1.1. Caractérisation de la dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux

Les résultats communaux étant obtenus par désagrégation de l'information départementale, la quantification de la dispersion des résultats communaux a été effectuée par rapport aux résultats départementaux. Une dispersion peu importante des résultats communaux sur un département indiquerait que l'étape de désagrégation des résultats n'est pas nécessaire pour ce département.

La comparaison des résultats obtenus à l'échelle départementale et communale met en jeu des surfaces de tailles différentes. Pour obtenir des variables comparables entre elles, l'ensemble des valeurs utilisées pour les comparaisons ont donc été normalisées par la SAU de l'entité géographique à laquelle se rapportent les résultats.

L'écart entre la valeur communale et la valeur départementale peut être caractérisé par leur différence absolue, exprimée dans l'unité des variables considérées (Équation IV-1), et/ou leur différence relative, exprimée en pourcentage (Équation IV-2).

$$d_{abs} = v_{com} - v_{dp} \quad (\text{Équation IV-1})$$

$$d_{rel} = \frac{v_{com} - v_{dp}}{v_{dp}} \quad (\text{Équation IV-2})$$

avec

d_{abs} la différence absolue entre la valeur communale et départementale exprimée en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU ;
 v_{com} le flux d'azote généré par la variable agricole considérée (export d'azote par le blé tendre, azote introduit au sol provenant des vaches laitières,...) ou les surplus azotés exprimés en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU de la commune ;

v_{dp} le flux d'azote généré par la variable agricole considérée (export d'azote par le blé tendre, azote introduit au sol provenant des vaches laitières,...) ou les surplus azotés exprimés en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU du département ;

d_{rel} la différence absolue entre les valeurs communales et départementales exprimée en %.

Les étendues absolues et relatives de la dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux peuvent être déterminées pour l'ensemble des départements comme la différence entre le 95^e centile et le 5^e centile (Équation IV-3 et Équation IV-4).

$$E_{abs} = d_{95_abs} - d_{5_abs} \quad (\text{Équation IV-3})$$

$$E_{rel} = d_{95_rel} - d_{5_rel} \quad (\text{Équation IV-4})$$

avec

E_{abs} l'étendue en valeur absolue exprimée en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU ;

d_{95_abs} le 95^e centile des différences absolues entre les valeurs communales et la valeur départementale exprimée en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU ;

d_{5_abs} le 5^e centile des différences absolues entre les valeurs communales et la valeur départementale exprimée en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ SAU

E_{rel} l'étendue en valeur absolue exprimée en % ;

d_{95_rel} le 95^e centile des différences relatives entre les valeurs communales et la valeur départementale exprimée en % ;

d_{5_rel} le 5^e centile des différences relatives entre les valeurs communales et la valeur départementale exprimée en %.

L'utilisation de différences sous forme absolue est plus compréhensible car elles sont exprimées dans la même unité que les variables. L'utilisation de variables exprimées sous forme relative permet de prendre en compte la valeur de la variable par rapport à laquelle on se réfère. Par exemple, un surplus communal de 105 kgN.ha⁻¹ SAU par rapport à une valeur départementale de 100 kgN.ha⁻¹ SAU et un surplus communal de 6 kgN.ha⁻¹ SAU par rapport à un surplus départemental de 1 kgN.ha⁻¹ SAU présentent tous les deux un écart absolu de 5 kgN.ha⁻¹ SAU. En revanche, l'écart relatif est de 5% dans le premier cas alors que dans le second, il est de 500%.

Plus l'étendue (E_{rel} ou E_{abs}) est grande, plus les valeurs des variables communales sont dispersées par rapport aux variables départementales. L'étendue en valeur relative prenant en compte les valeurs des variables départementales, une valeur départementale faible pourra engendrer le calcul d'une étendue relative importante (Figure IV-1).

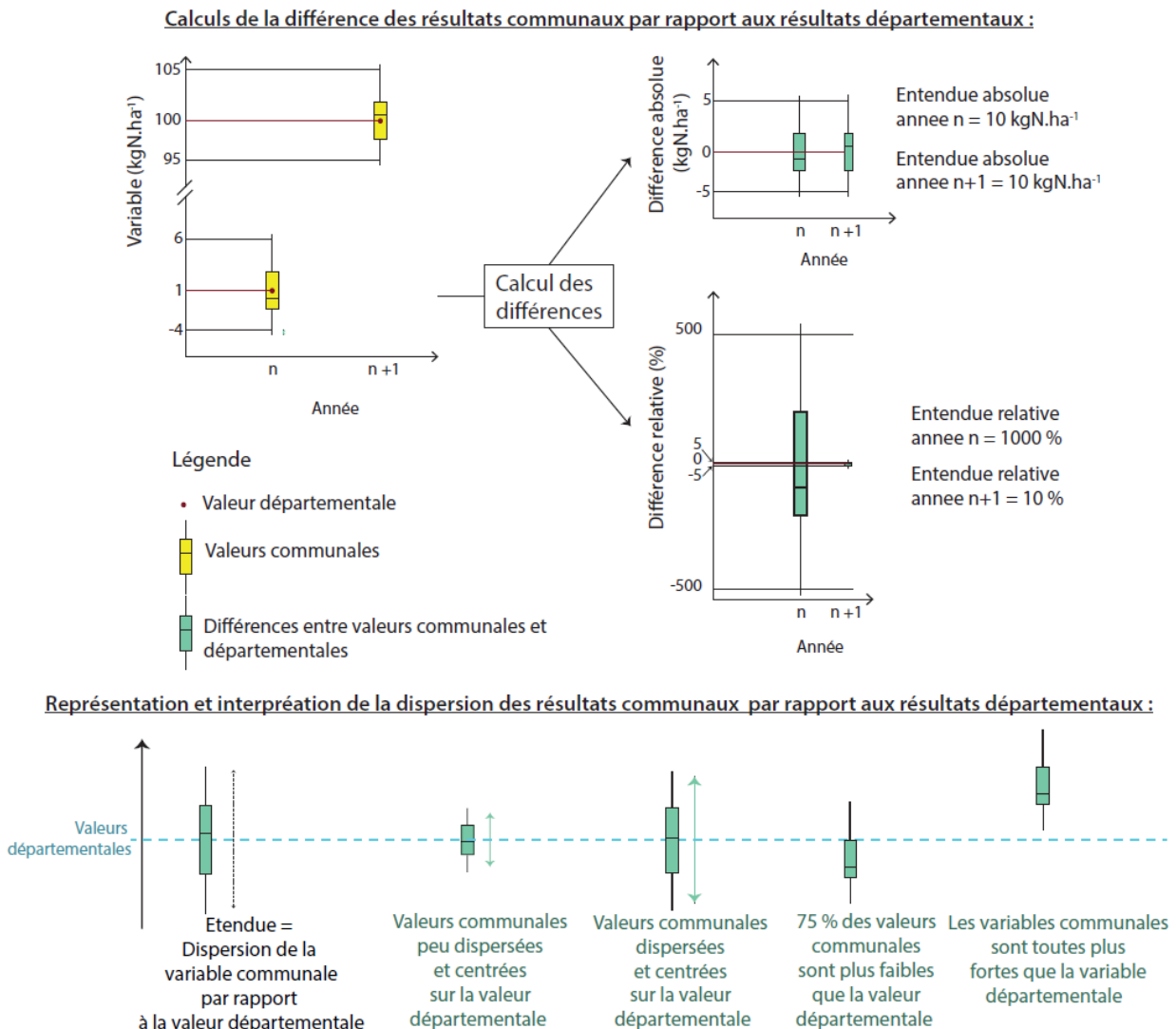


Figure IV-1 : Méthode de calcul et interprétation des descripteurs de la dispersion des valeurs communales par rapport aux valeurs départementales

IV.1.1.2. Identification des facteurs de contrôle de la dispersion

L'objectif de cette analyse est d'expliquer la répartition spatiale des différences entre les surplus communaux et départementaux en fonction d'une ou plusieurs variables agricoles. La fertilisation minérale étant désagrégée au prorata de la SAU communale, les différences absolues ou relatives seront les mêmes pour l'ensemble des communes d'un même département. Dans le modèle appliqué à l'échelle communale, la fertilisation minérale ne constitue pas un facteur de variabilité de la répartition des différences entre les surplus communaux et départementaux. Il reste donc à identifier la ou les variable(s) à l'origine de la dispersion parmi les différentes variables agricoles (production de blé, d'orge, de fourrage annuel, nombre de tête de vaches laitières, de truies, de canard...).

Cette analyse a été menée grâce à l'utilisation d'ACP. Les ACP peuvent être effectuées sur des variables centrées (la moyenne des valeurs est retirée chaque valeur) ou peuvent être appliquées à des variables centrées et réduites (la moyenne des valeurs est retirée à chaque valeur puis est divisée par l'écart type des variables). La transformation en variable centrées-réduites donne le même poids à toutes les variables pour la construction des axes factoriels. Dans le cadre de cette étude, l'identification des facteurs de contrôle de la dispersion des surplus communaux par rapport à la valeur départementale, les variables ne seront pas réduites pour conserver un poids plus important aux variables qui génèrent les flux d'azote les plus importants et qui pèsent le plus dans le calcul du surplus.

Les ACP ont été appliquées à 3 départements caractérisés par des orientations agricoles différentes en 2010 (classement d'après les OTEX du RA 2010, <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>):

- le Finistère, caractérisé par une orientation agricole principale "Bovins lait" ;
- l'Indre-et-Loire, caractérisé par une orientation agricole principale "Grande culture" ;
- la Lozère, caractérisée par une orientation agricole principale "Bovins viande".

Les communes de chaque département représentent les n individus, et les p variables sont les différences absolues entre les flux d'azote générés par les différentes variables (export d'azote par le blé tendre, le maïs, les prairies temporaires, fertilisation organique des vaches laitières, des chevaux... en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$) aux échelles communales et départementales. La différence entre les surplus communaux et le surplus départemental est introduit dans l'ACP comme une variable supplémentaire, c'est à dire qu'elle ne participe pas à la construction des axes mais est représentée dans le résultat final. Les sorties graphiques des ACP sont de deux grands types : soit elles représentent les individus (ici les communes) sous forme de points, soit elles représentent les variables (les variables agricoles et le surplus) sous forme de flèches partant du centre du repère et dont la longueur est égale à la variance. Cette dernière représentation permet d'identifier les variables les plus corrélées entre elles. Dans le cas où deux variables seraient parfaitement corrélées entre elles, leurs représentations (les flèches) se chevaucheraient, ce qui n'arrive quasiment jamais. Plus les variables sont corrélées, plus l'angle entre leurs représentations est faible. Si l'angle entre leur représentation est de 90° , alors ces variables sont indépendantes. Si elles sont dirigées en sens opposés, les variables sont anti-corrélées. C'est d'après la

représentation graphique des variables que le (ou les) facteur(s) de contrôle de la dispersion des surplus a (ont) été identifié(s).

Une attention particulière doit être apportée à la représentation des individus dans les différents plans factoriels, car l'ACP est sensible aux individus présentant des valeurs extrêmes. En effet, les valeurs caractérisant un individu extrême vont "tirer" le nuage de point vers cet individu alors qu'il n'est pas représentatif du comportement des autres individus. Dans l'exemple ci-dessous, la commune 29155, représentée dans le plan factoriel des axes 1 et 2 (Figure IV-2-A), est écartée du reste du nuage de point. Cette commune (ou *individu*) va générer la définition de l'axe factoriel pour lui seul (axe "herbe" sur la Figure IV-2-B), ce qui n'est pas représentatif de l'ensemble du reste du nuage de points. Cette commune correspond à l'île d'Ouessant qui est la seule commune à présenter plus 60% de sa SAU en prairies permanentes en 1955, les communes du Finistère présentant en moyenne 16.5 % de leur SAU en prairies permanentes (écart type : 6.7%). Ce genre d'individu doit être retiré de la composition du set de variable servant à construire les axes factoriels.

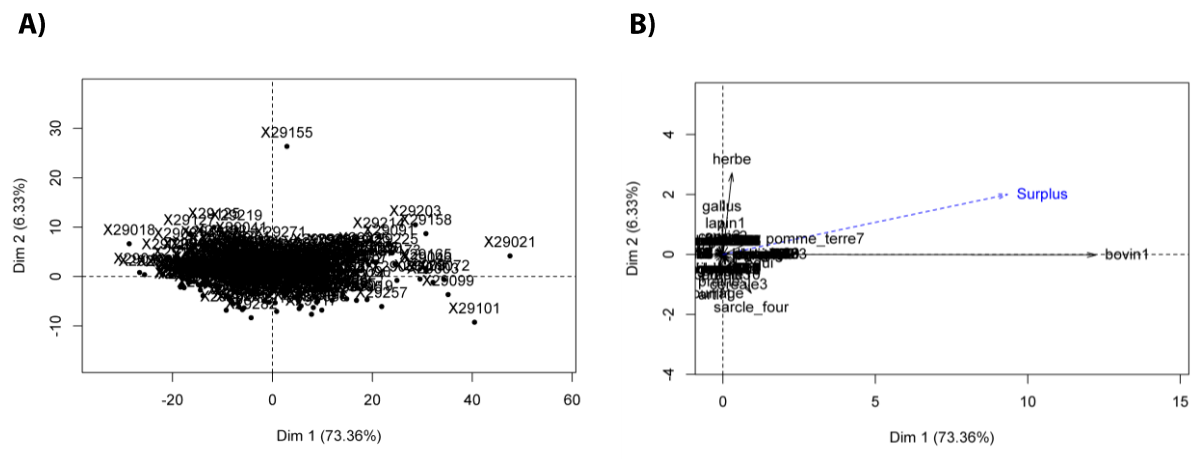


Figure IV-2 : Sensibilité des ACP à un individu extrême, exemple du Finistère en 1955 A) graphique des individus, B) graphique des variables

Les ACP sont utilisées ici comme un moyen de synthétiser l'information contenue dans le jeu de données afin d'expliquer la variabilité des surplus communaux. Le but n'étant pas de réduire le nombre de variables décrivant l'information par le biais de la définition d'axe factoriels, la signification des axes n'est pas évoquée. Seule la variance expliquée par ces axes est prise en compte.

IV.1.2. Evolution et répartition de la dispersion des résultats communaux à l'échelle départementale

L'objectif est d'analyser la dispersion des résultats de surplus communaux par rapport aux surplus départementaux sur l'ensemble des années de résultats afin de savoir si l'étape de calcul des résultats à l'échelle communale est nécessaire pour l'ensemble des départements et des années. D'autre part, cette étape permet de savoir quels sont les départements présentant la dispersion la plus importante, et si ces derniers ont changé au cours du temps.

IV.1.2.1. Répartition spatiale

Les valeurs des surplus communaux présentent tous une dispersion vis à vis des surplus départementaux, mais cette dispersion n'est pas la même suivant les départements. Cette dispersion peut être caractérisée par l'étendue des valeurs prises, exprimée en différence absolue ou relative (Tableau IV-1). L'étendue en valeur absolue la plus faible est de 9.63 kgN.ha⁻¹ (département de l'Hérault, année 1957), la plus forte pour les Hauts-de-Seine (2798.44 kgN.ha⁻¹). Les départements de la petite couronne parisienne sont caractérisés par une très petite SAU : les Hauts-de-Seine, la Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne correspondent chacun à moins de 0.02% de la SAU de la France métropolitaine en 1955, et moins de 0.004% en 2015, alors que les autres départements représentent en moyenne 1% de la SAU (RA 1955 et 2010). Les résultats pour ces départements peuvent être considérés comme non représentatifs. Si on néglige les départements de la petite couronne, l'étendue maximum est relevée en Corse pour l'année 1955 (386.91 kgN.ha⁻¹).

L'étendue en valeur relative la plus faible est de 13.63 % (département des Hauts-de-Seine, année 1990). De la même façon, si on néglige les départements de la petite couronne, l'étendue relative la plus faible est 25.68 % (département des Landes pour l'année 2015). L'étendue relative la plus forte est relevée pour la Savoie en 2001 (1997700.75 %).

Tableau IV-1 : Étendue minimum et maximum, absolue et relative, de la différence des surplus communaux par rapport aux surplus départementaux

	Étendue absolue	Étendue relative	Département	Année
Minimum étendue absolue	9.63	82.03	Hérault	1957
Maximum étendue absolue	2798.44	2184.92	Hauts-de-Seine	1968
Sans petite couronne	386.61	1730.95	Corse	1955
Minimum étendue relative	29.7	13.63	Hauts-de-Seine	1990
Sans petite couronne	64.23	25.68	Landes	2015
Maximum étendue relative	120.06	1997700.75	Savoie	2001

En 1955, il ne semble pas y avoir de d'organisation spatiale dans la dispersion des valeurs communales (Figure IV-3). En 2015, la dispersion absolue des valeurs communales semble plutôt organisée avec des valeurs plus importantes au Nord qu'au Sud. Les valeurs des différences relatives sont le reflet de la répartition des valeurs des différences absolues et de la valeur du surplus départemental, les valeurs départementales proches de zéro, négatives ou positives, auront tendance à générer de fortes différences relatives.

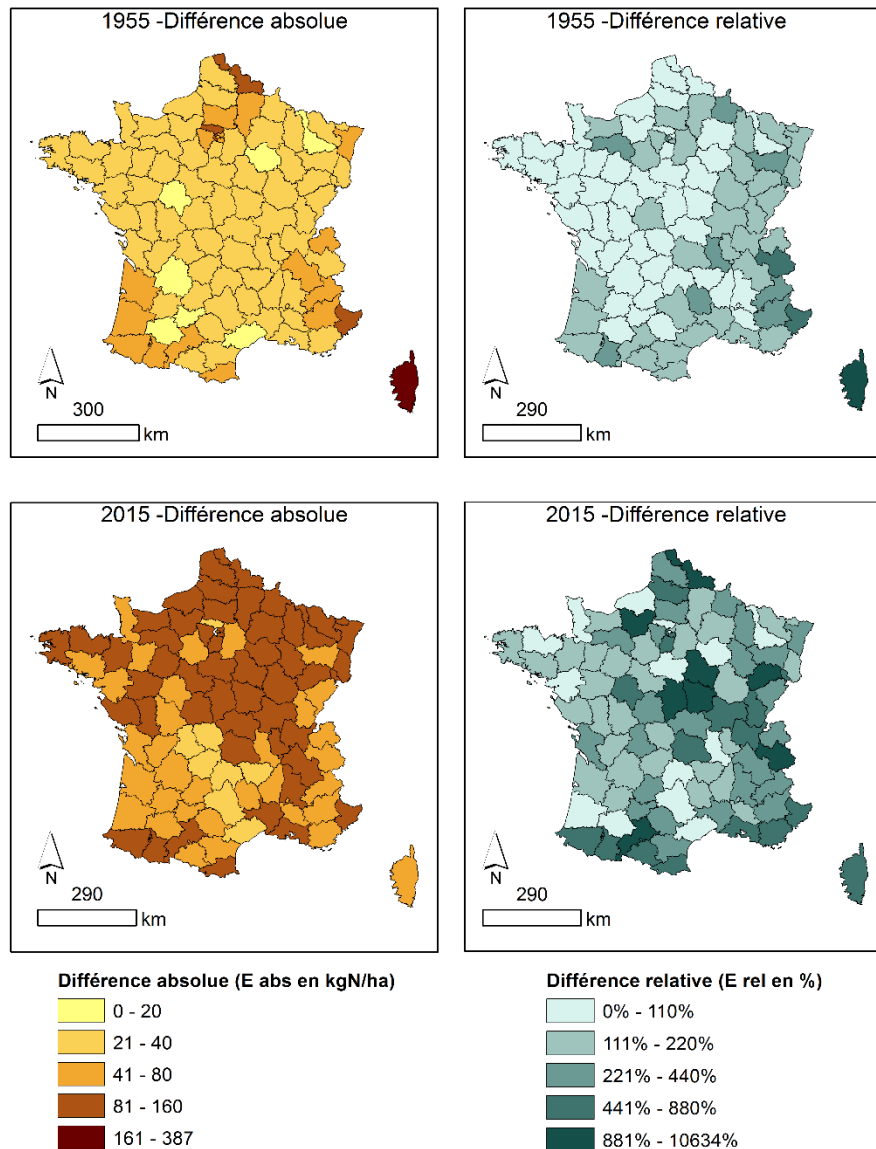


Figure IV-3 : Dispersion des valeurs de surplus communaux par rapport à la valeur des surplus départementaux

Hormis les départements où la SAU est relativement faible (Seine-Saint-Denis, Hauts-de-Seine, Val-de-Marne), la dispersion absolue de $38.4 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ en moyenne (écart-type : $41.1 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$) en 1955 et de $82.7 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ en moyenne (écart-type : $27.9 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$) en 2015. La dispersion des surplus communaux par rapport aux surplus départementaux montre clairement l'intérêt de la désagrégation pour l'ensemble de départements.

IV.1.2.2. Evolution temporelle

Les résultats de l'étude temporelle de la dispersion des résultats par rapport à la valeur départementale, montrent que la dispersion des valeurs communales par rapport aux valeurs départementales augmente entre 1955 et 2015 pour 74 départements, en se basant sur l'étude des différences relatives, et 85 départements en se basant sur l'étude des différences absolues (Figure IV-3).

L'évolution temporelle de la dispersion des surplus communaux peut être caractérisée selon 4 modalités (Figure IV) : (i) les surplus communaux sont répartis de façon homogène autour du surplus départemental (Figure IV-A), (ii) les surplus communaux sont répartis de façon homogène et majoritairement supérieurs à la valeur départementale (Figure IV -B), (ii) les surplus communaux sont répartis de façon homogène et majoritairement inférieurs à la valeur départementale (Figure IV-C), (iv) les surplus communaux sont répartis de façon hétérogène par rapport au surplus départemental au cours du temps (Figure IV-D).

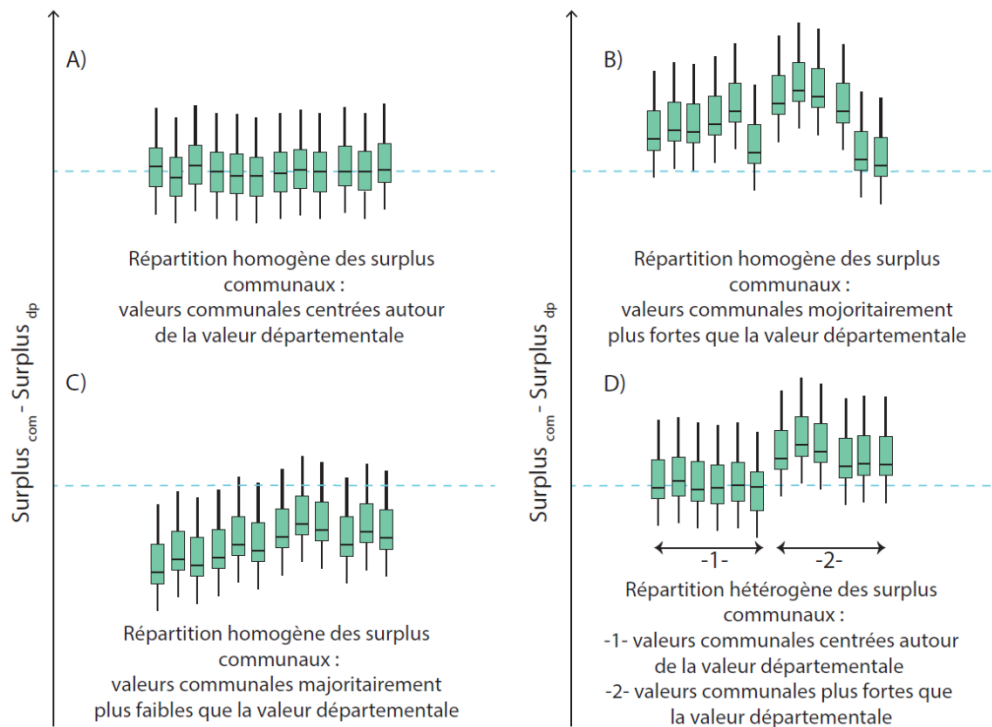


Figure IV-4 : Modalités possibles de répartition des surplus communaux par rapport au surplus départemental

- Surplus communaux répartis de façon homogène sur la période d'étude par rapport aux surplus départementaux

Les surplus communaux peuvent être répartis relativement équitablement de part et d'autre des surplus départementaux. Par exemple, tout au long de la chronique, la proportion des surplus communaux de l'Yonne qui sont plus faibles et plus fort que les surplus départementaux, reste sensiblement la même. Les valeurs de surplus communaux sont réparties relativement équitablement autour des valeurs départementales (Figure IV-5-A). La différence relative très forte de 2012 (Figure IV-5-B), est due à un surplus départemental quasi nul (-0.1 kgN.ha^{-1}). Cette valeur, utilisée au dénominateur pour le calcul de la différence relative génère de très fortes différences. C'est également un surplus départemental très faible qui génère l'étendue relative la plus importante en 2015 (10634 %, Figure IV-3) pour l'année 2015 en Savoie alors que les différences des surplus communaux par rapport au surplus départemental s'échelonnent de -60.5 à $191.4 \text{ kgN.ha}^{-1}$.

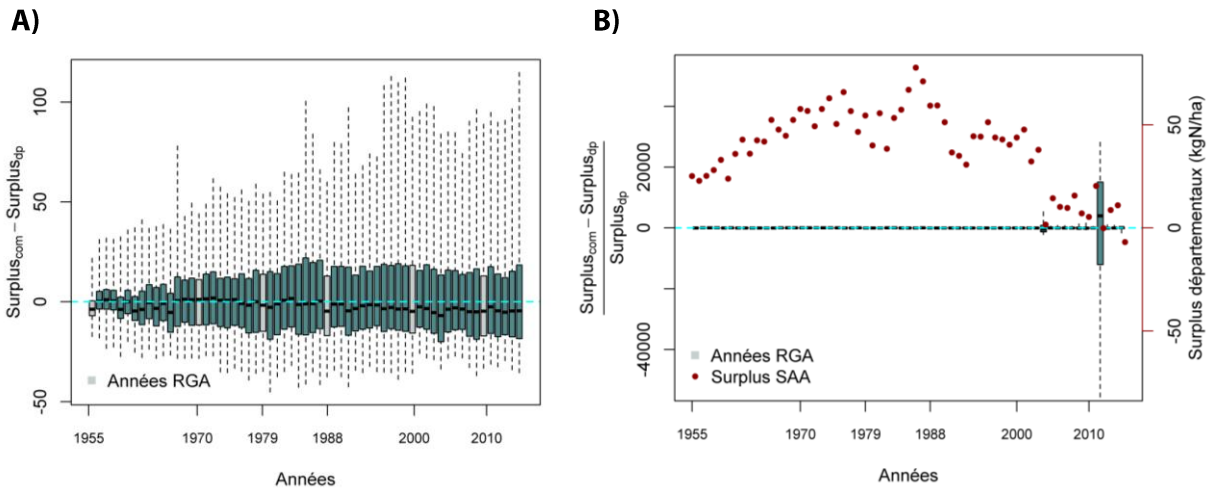


Figure IV-5 : Dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux exprimés en valeur absolue ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$) (A) et relative (%) (B) pour le département de l'Yonne

Les années où les données des RGA sont disponibles sont représentées en gris clair.

Les surplus communaux de la Corse (Figure IV-6) des Hautes Pyrénées, les Pyrénées-Orientales ou les Alpes-de-Haute-Provence sont repartis de façon relativement homogène par rapport aux valeurs départementales : ils sont majoritairement supérieurs aux surplus départementaux tout au long de la chronique. Ce décalage entre les valeurs communales et départementales vient principalement de la différence entre les valeurs de la SAU départementale fournie par la SAA et la valeur de la SAU fournie par les RA (somme des SAU communales). La SAU départementale peut être jusqu'à 82 % moins importante dans le RA par rapport à la SAA (Figure IV-7).

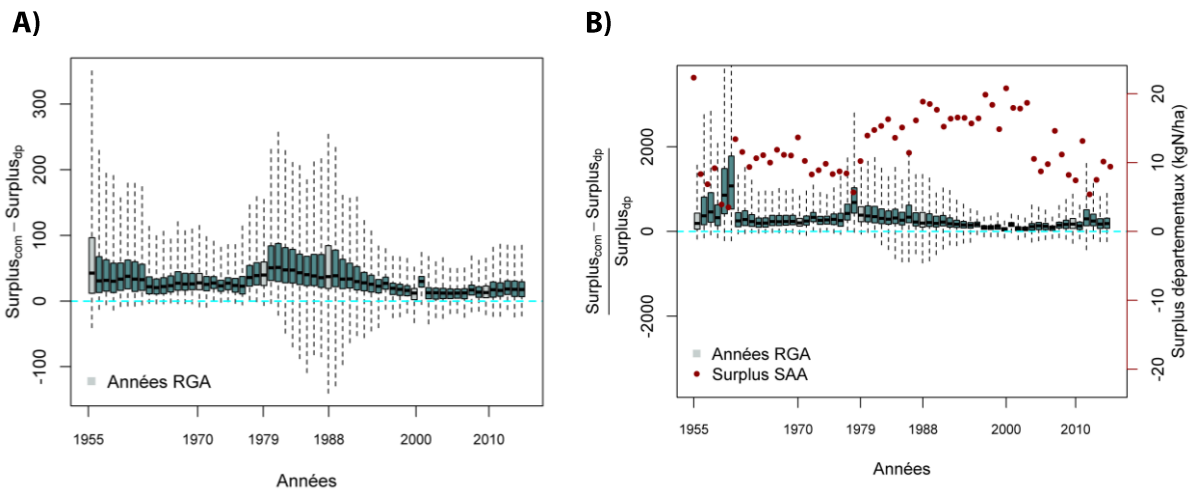


Figure IV-6 : Dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux exprimés en valeur absolue ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$) (A) et relative (%) (B) pour le département de la Corse

Les années où les données des RGA sont disponibles sont représentées en gris clair.

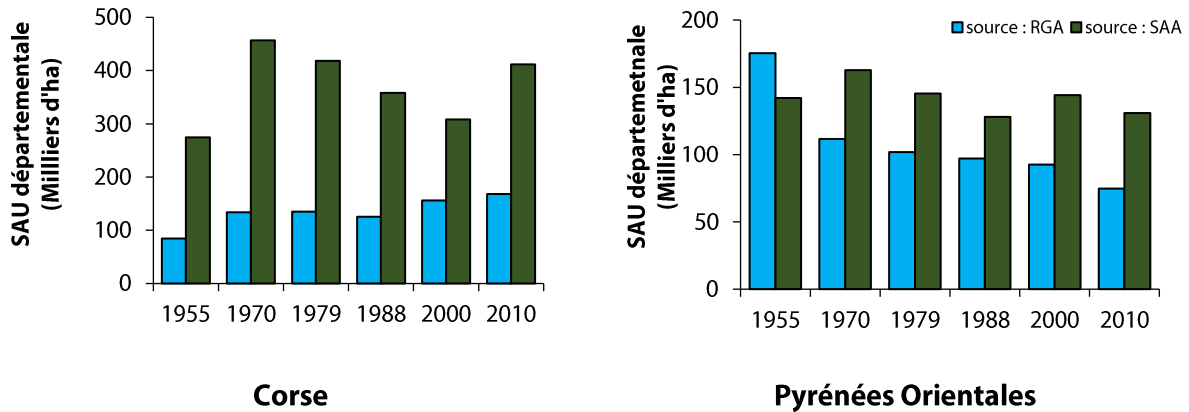


Figure IV-7 : Différence de valeurs pour la SAU dans les départements de la Corse et des Pyrénées-Orientales selon la source des données : RA ou SAA

Cette différence impacte le taux de fertilisation minérale calculé à l'échelle communale. En effet, que CASSIS_N soit appliqué à l'échelle départementale ou communale, la même quantité d'engrais minéral est appliquée au sol du département. En revanche, si la valeur de la SAU fournie par les RA est plus petite que la valeur fournie par la SAA, la fertilisation minérale exprimée en $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ est donc plus importante. La fertilisation minérale augmentant le surplus azoté, les surplus en $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ seront donc aussi plus importants à l'échelle communale (calculs basés sur les données des RA) qu'à l'échelle départementale (basé sur les données de la SAA).

- Surplus communaux répartis de façon hétérogène par rapport au surplus départemental

Dans le département de la Manche (Figure IV-8), les valeurs communales sont réparties de façon hétérogène au cours du temps par rapport aux valeurs départementales : les valeurs des surplus communaux sont en majorité plus faibles que le surplus départemental pour les années 1955 à 1963, puis les surplus communaux deviennent plutôt plus forts que les surplus départementaux entre 1963 et 1965 puis prennent des valeurs autour de la valeur départementale.

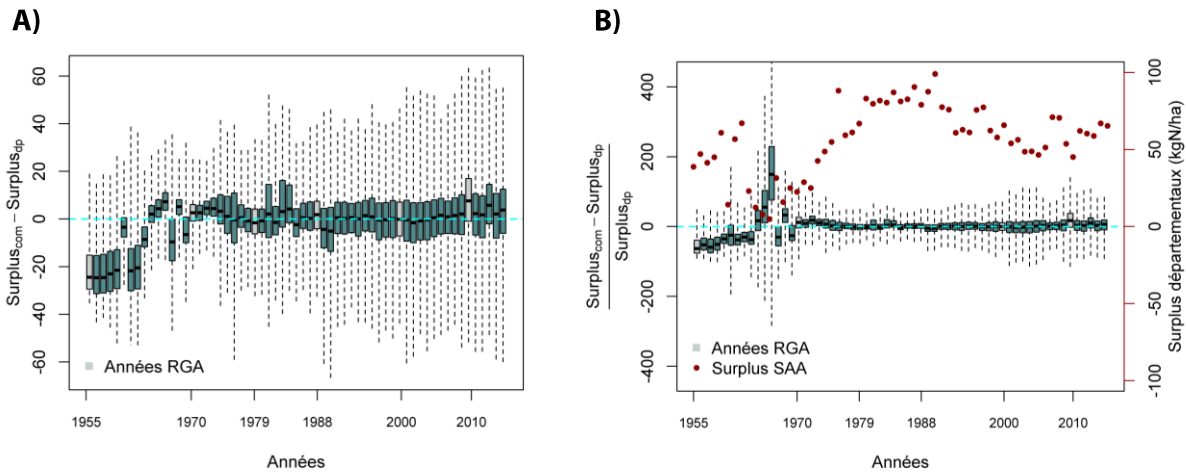


Figure IV-8 : Dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux exprimés en valeur absolue ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$) (A) et relative (%) (B) pour le département de la Manche

Les années où les données des RGA sont disponibles sont représentées en gris clair.

Pour comprendre cette évolution de la répartition des surplus communaux par rapport aux surplus départementaux, la première étape est d'identifier le ou les poste(s) qui génèrent une différence entre les résultats départementaux et communaux au niveau des années des RGA. Dans le cas de la Manche, la fertilisation organique départementale est supérieure à la médiane des valeurs communales d'environ $24 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'année 1955. Cet écart est dû essentiellement à des différences concernant le nombre de tête de cheptel, en particulier de bovins. À l'échelle du département, le nombre de bovin est 1.5 fois plus important dans la SAA que dans le RGA en 1955. Cet écart est quasiment résorbé en 1970 (Figure IV-9-A), les valeurs des surplus communaux se rapprochent d'une dispersion autour de la valeur départementale en 1970. À cet écart constaté au niveau du cheptel s'ajoute un écart constaté au niveau des exports d'azote et de la fixation symbiotique (Figure IV-9-B et Figure IV-9-C). Cet écart est dû à une estimation plus forte des surfaces et donc pour les productions communales pour le trèfle et la luzerne au niveau départemental (Figure IV-10 A et B). Le trèfle et la luzerne, qui sont deux cultures de légumineuses fourragères, participent à la fois à l'export d'azote (entrée) et à la fixation symbiotique.

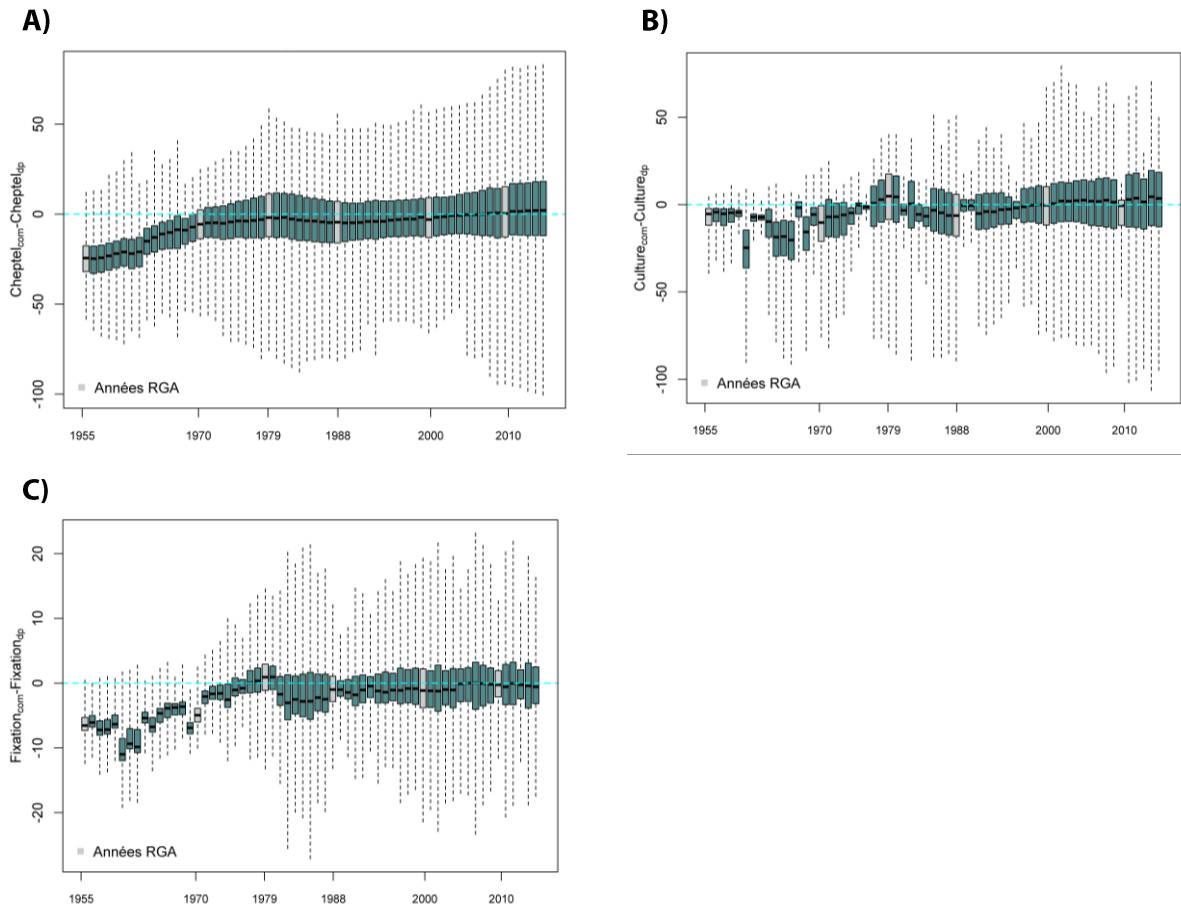


Figure IV-9 : Dispersion des résultats communaux (kgN.ha⁻¹) dans le département de la Manche pour la fertilisation organique (A), pour l'export d'azote (B), et pour la fixation symbiotique (C)

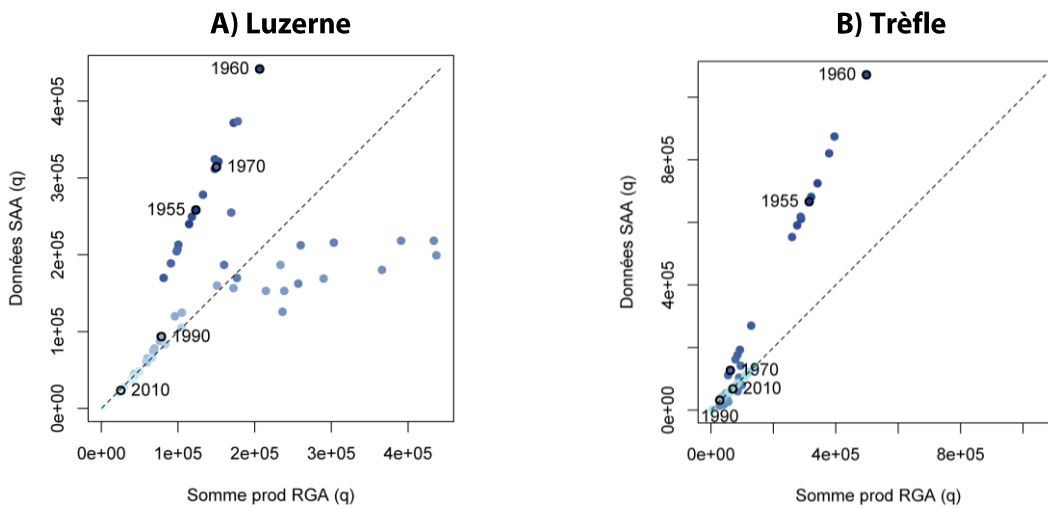


Figure IV-10 : Différence d'estimation de la production à l'échelle du département pour le trèfle et la luzerne d'après les données utilisées : RA ou SAA (département de la Manche)

IV.1.2.3. Synthèse

La dispersion minimum observée en valeur absolue étant de 9.63 kgN.ha^{-1} , et pouvant aller jusqu'à $386.61 \text{ kgN.ha}^{-1}$, l'étape de désagrégation du modèle CASSIS_N est nécessaire pour appréhender la disparité des surplus communaux sur l'ensemble de la période d'étude et pour l'ensemble des départements. Dans 74 départements, la dispersion des surplus communaux à tendance à augmenter avec le temps. Dans la prochaine partie, les facteurs de contrôles de la dispersion des surplus communaux seront identifiés en début et en fin de période, afin de savoir s'ils restent les mêmes au cours du temps.

L'étude de la dispersion des résultats communaux par rapport aux résultats départementaux met aussi en lumière la différence entre les valeurs de la SAA et du RA. Le RA étant exhaustif, ces données peuvent être considérées comme plus robustes que celle de la SAA. Dans cette étape de désagrégation, la SAA intervient principalement pour influencer l'évolution des chroniques communales entre les RA. Les résultats du modèle CASSIS_N dans sa version désagrégée peuvent donc être considérés comme plus robustes que ceux obtenus avec la SAA.

IV.1.3. Facteur de contrôle de la dispersion des surplus communaux

Les facteurs de contrôle de la dispersion des surplus communaux ont été identifiés par ACP sur les n communes de 3 départements et les p écarts des variables agricoles communales par rapport à la valeur départementale. L'étude a été menée sur 3 départements (Finistère, partie IV.1.3.1, Indre-et-Loire, partie IV.1.3.2. et Lozère, partie IV.1.3.3) pour les années 1955 et 2010. Ces deux années ont été choisies car étant des années où les RA ont été effectuées, il est possible de présenter des résultats en utilisant les données des RA saisies (1955) et les données disponibles sur DISAR (2010) pour représenter les résultats sous forme cartographique.

IV.1.3.1. Facteurs de contrôle de la dispersion dans un département orienté dans la production laitière : cas du Finistère

- Facteurs de contrôle en 1955 dans le Finistère

Deux communes ont été écartées du jeu de données servant à construire les axes factoriels : la commune 29155 (cf. partie IV-1-1-2 et Figure IV-2) et la commune 29129 (flux d'azote généré par les gallus supérieur de $222.2 \text{ kgN.ha}^{-1}$ par rapport à la valeur départementale pour cette commune contre un flux de $+12.263 \text{ kgN.ha}^{-1}$ généré par les gallus en moyenne pour les autres communes). Ces communes sont indiquées en bleu dans le graphique des individus (Figure IV-11-A).

L'écart entre les surplus communaux et le surplus départemental est surtout corrélé à l'écart de la variable "vaches laitières" (Figure IV-11-B) : la différence entre les surplus communaux et départementaux est donc surtout liée à l'écart entre commune et département des flux d'azote générés par les vaches laitières. Les axes 1 et 2 expliquant plus de 80% de la variance totale, il ne semble pas

nécessaire d'étudier le plan factoriel formé par les autres axes, qui n'ajouteront peu d'information supplémentaire.

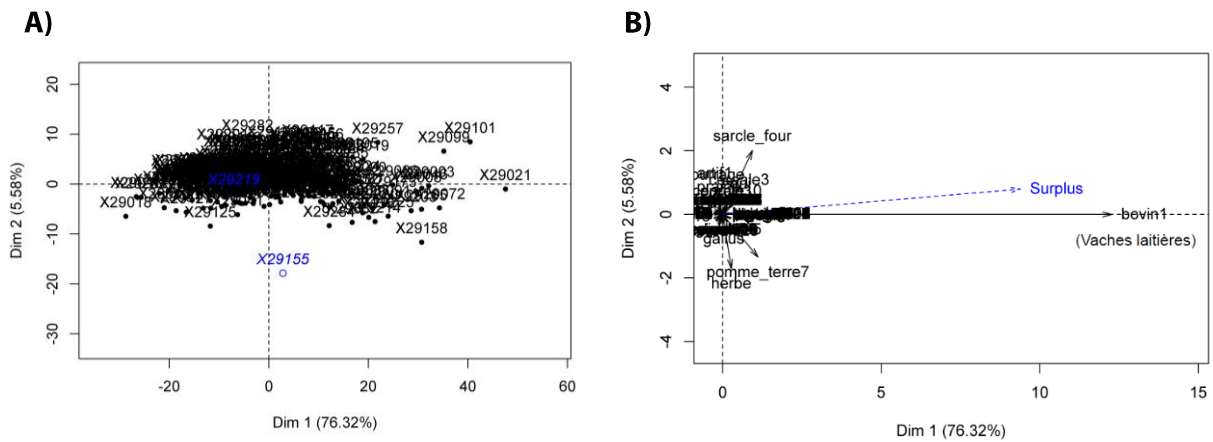


Figure IV-11 : Représentation des variables et des individus en sortie de l'ACP pour le département du Finistère en 1955 A) graphique des individus, B) graphiques des variables

- Facteur de contrôle de dispersion en 2010 dans le Finistère

Deux communes ont été écartées pour l'ACP concernant le jeu de données de 2010 (Figure IV-12-A), les communes 29235 du fait de son export particulier par les cultures de tomates (+392.3 kgN.ha⁻¹ exporté par les tomates par rapport à la valeur départementale, les autres communes étant en moyenne à +0.42 kgN.ha⁻¹ avec un écart-type de 5.4 kgN.ha⁻¹) et 29129 du fait flux d'azote généré par les gallus (+157.1 kgN.ha⁻¹ apporté par les gallus par rapport à la valeur départementale, les autres communes étant en moyenne à -1.6 kgN.ha⁻¹ avec un écart-type de 10.9 kgN.ha⁻¹).

Le premier axe factoriel n'explique que 44.7% de la variance du nuage de point original. Il est donc nécessaire de prendre en compte les informations apportées par les axes 2 et 3 pour décrire de façon satisfaisante le nuage original de point avec 73% de la variance expliquée en cumulant la variance expliquée par ces 3 axes (Figure IV-12-B).

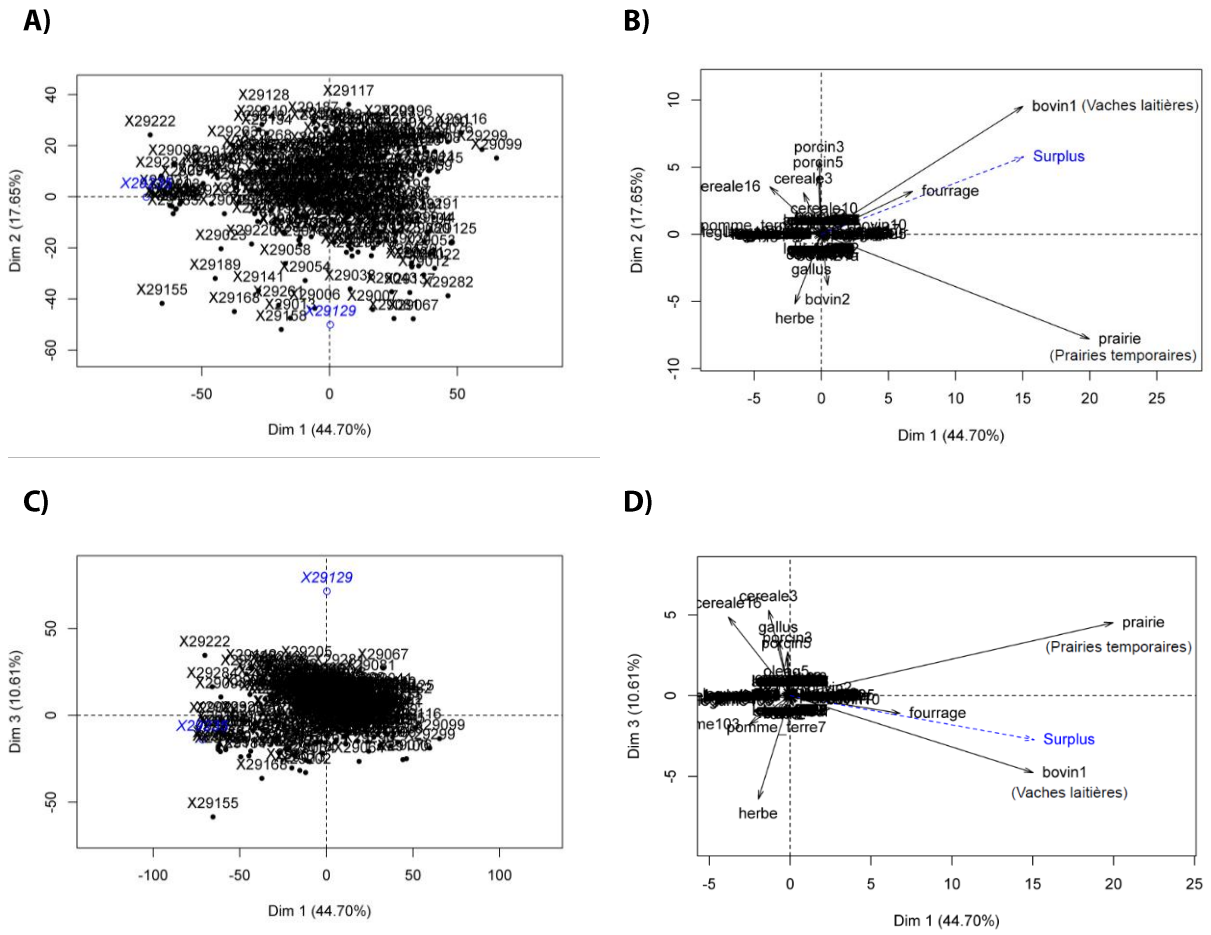


Figure IV-12 : Représentation des individus et des variables pour le Finistère en 2010 A) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 2, B) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 2, C) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 3, D) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 3

L'examen de la dispersion des surplus communaux dans ces deux plans factoriels montre que cette dernière est corrélée à la fois à la variable "vaches laitières" mais aussi, à la variable "fourrage annuel" et dans une moindre mesure, à la variable "prairie temporaires".

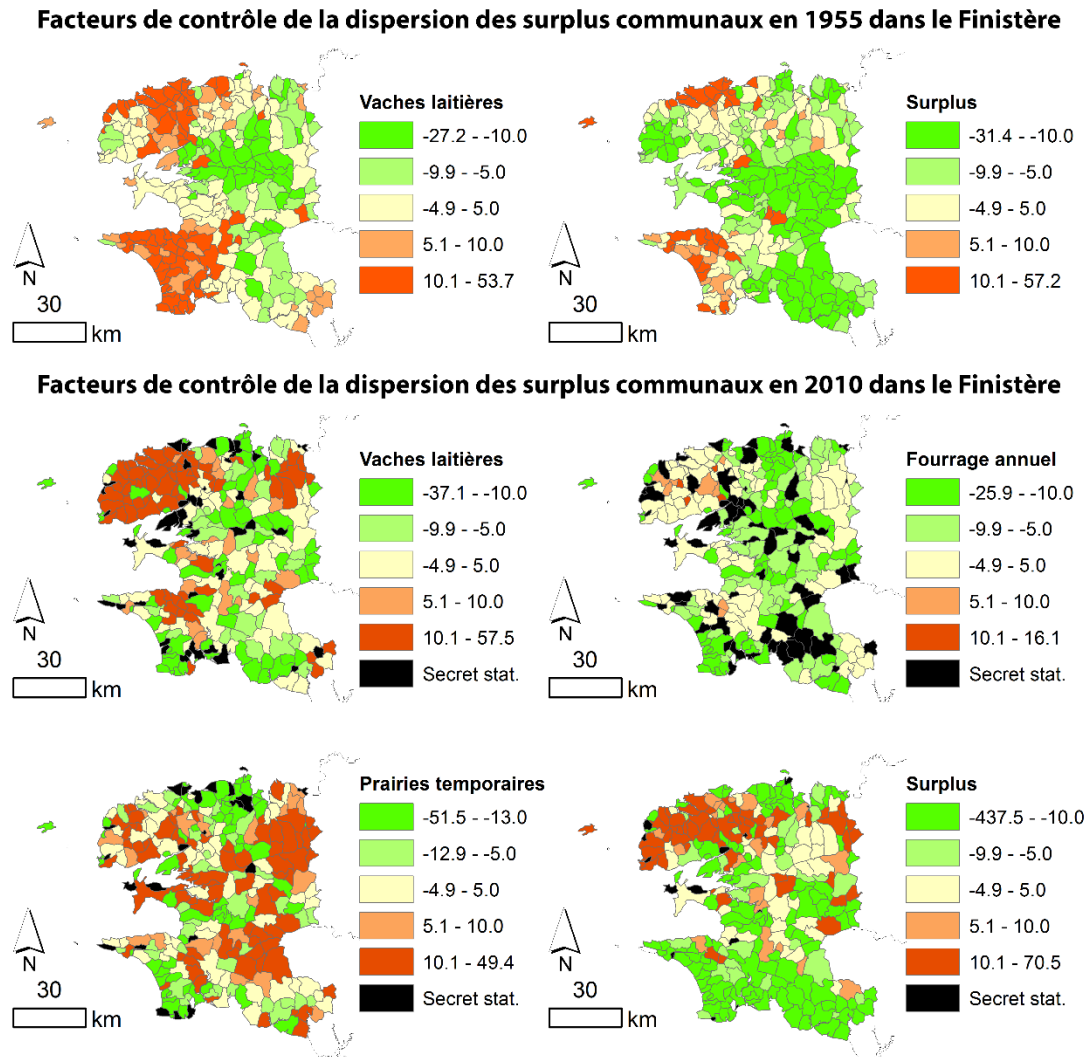


Figure IV-13 : Représentation spatiale des facteurs de contrôle de l'écart des valeurs communales aux valeurs départementales pour le Finistère en 1955 et 2010 (valeurs en kgN.ha⁻¹)

La représentation cartographique des facteurs de contrôle (Figure IV-13) confirme visuellement l'analyse construite à partir des ACP. La liaison spatiale entre l'écart des flux d'azote communaux et départementaux généré par les vaches laitières en 1955 et l'écart des surplus communaux au surplus départemental se distingue. La liaison est un peu plus complexe à discerner pour l'année 2010 car trois facteurs de contrôle sont représentés. Cependant, la comparaison de la répartition du principal facteur de contrôle : les vaches laitières et la répartition du surplus confirme la liaison établie par le biais de l'ACP entre ces deux valeurs.

IV.1.3.2. Facteurs de contrôle de la dispersion dans un département orienté dans la production de grandes cultures : cas de l'Indre-et-Loire

- Facteurs de contrôle en 1955 dans l'Indre-et-Loire

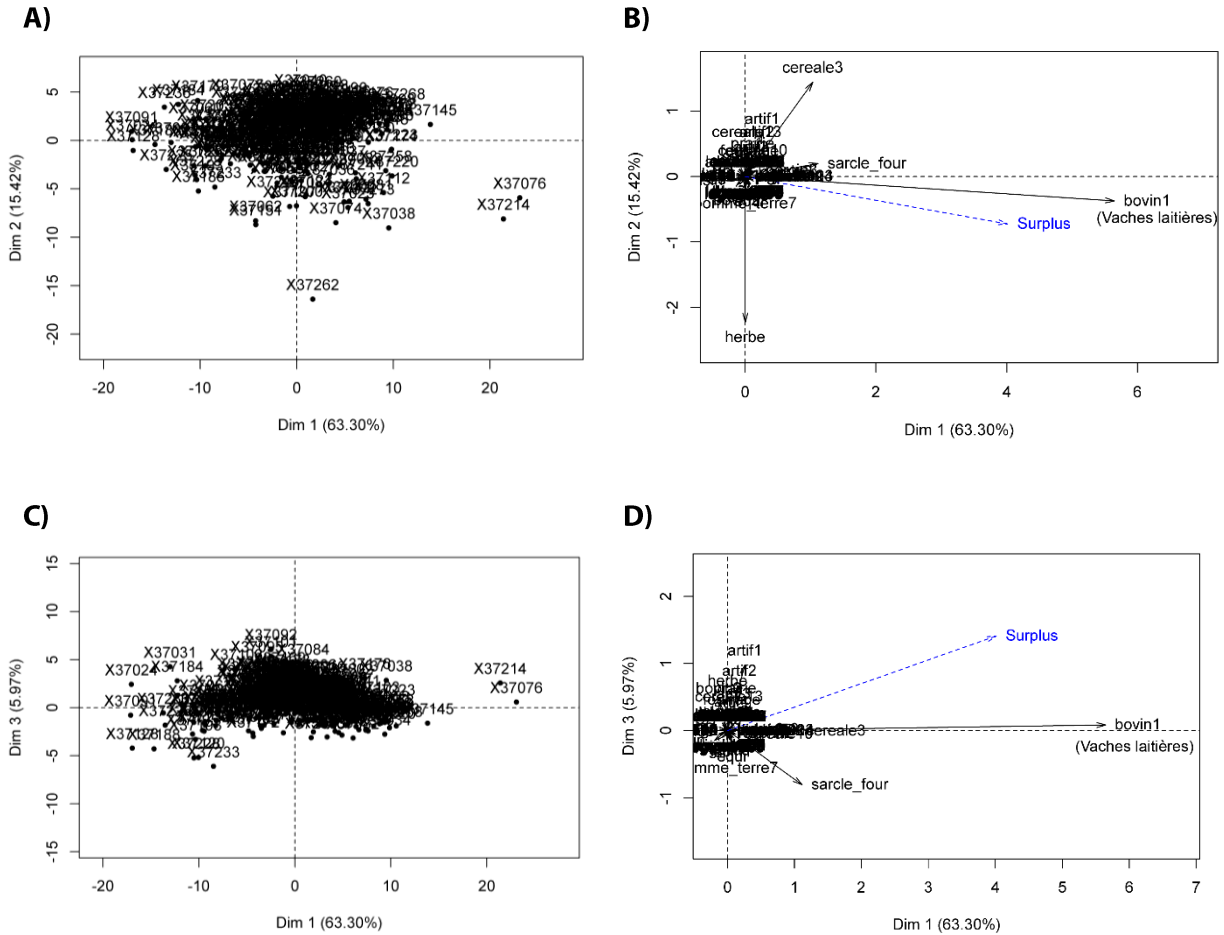


Figure IV-14 : Représentation des individus et des variables pour l'Indre-et-Loire en 1955 A) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 2, B) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 2, C) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 3, D) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 3

La commune 37262 semble s'écarter du jeu de donnée, mais le retrait de cet individu pour la construction des axes change très peu la définition des axes. L'ensemble des communes ont été conservées pour la construction de l'ACP. Les axes factoriels 1, 2 et 3 expliquent 84.69% de la variance. Sur ces deux plans factoriels, la dispersion des surplus communaux est liée en majorité à la dispersion des vaches laitières (Figure IV-14).

○ Facteurs de contrôle en 2010 dans l'Indre-et-Loire

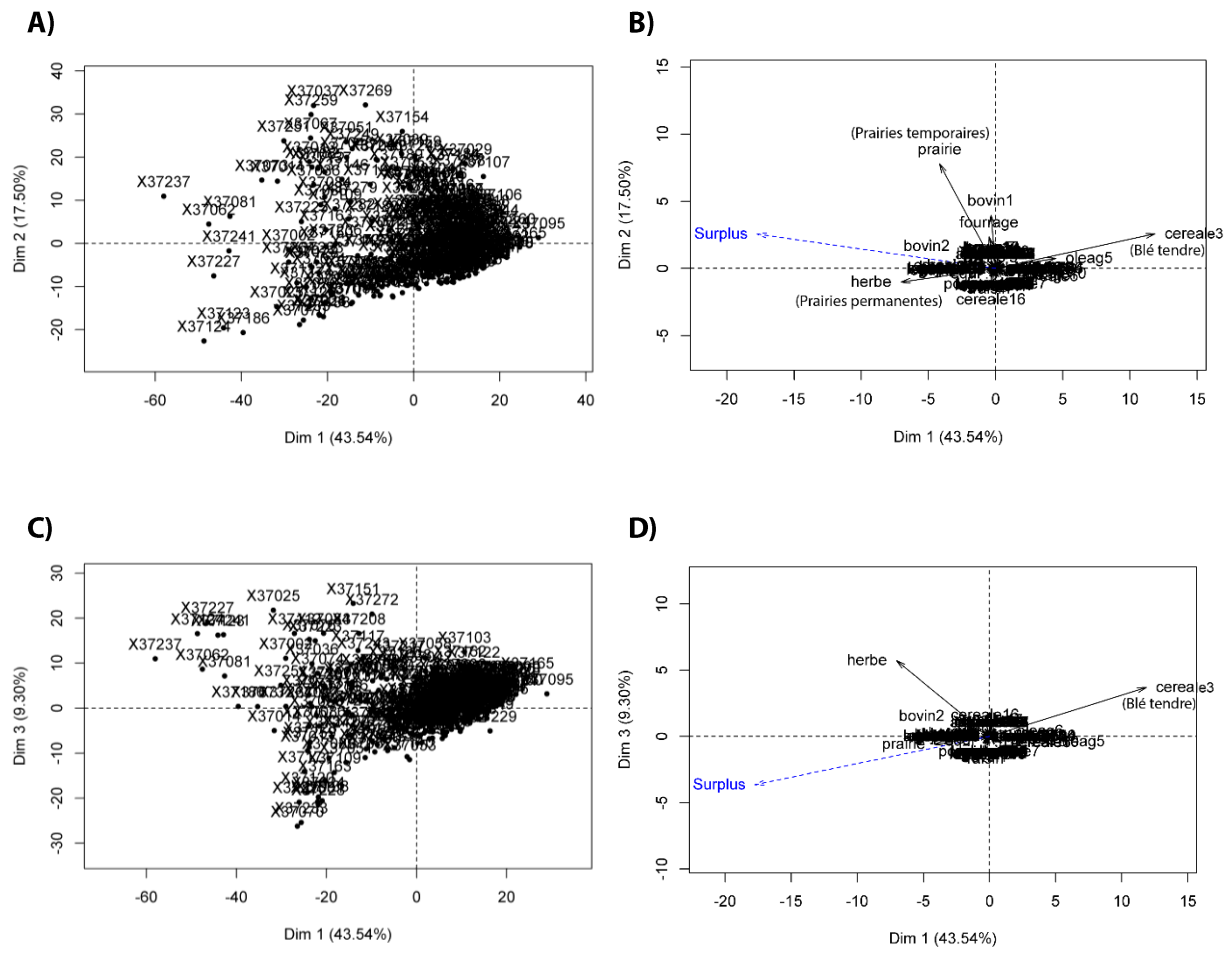
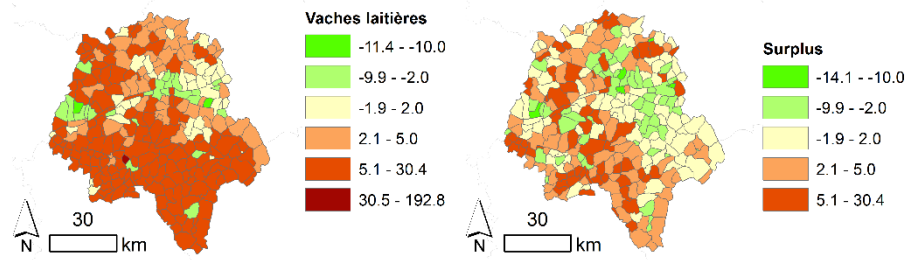


Figure IV-15 : Représentation des variables et des individus pour l'Indre-et-Loire en 2010 A) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 2, B) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 2, C) représentation des individus selon les axes factoriels 1 et 3, D) représentation des variables selon les axes factoriels 1 et 3

Les 3 axes expliquent 70.34% de la variance totale. Sur les deux plans factoriels, la répartition des surplus est assez nettement anti-corrélée à la répartition du blé tendre (Figure IV-15). Le blé tendre devrait présenter des valeurs d'export (normalisée par la SAU communale) supérieure à la valeur départementale dans les communes qui présentent des surplus plus faibles que le surplus départemental, ce qui est confirmé par la représentation cartographique de ces variables (Figure IV-16). Les autres variables qui contrôlent la répartition des surplus communaux en 2010 sont une moindre mesure les prairies permanentes et les prairies temporaires.

Facteurs de contrôle de la dispersion des surplus communaux en 1955 dans l'Indre-et-Loire



Facteurs de contrôle de la dispersion des surplus communaux en 2010 dans l'Indre et Loire

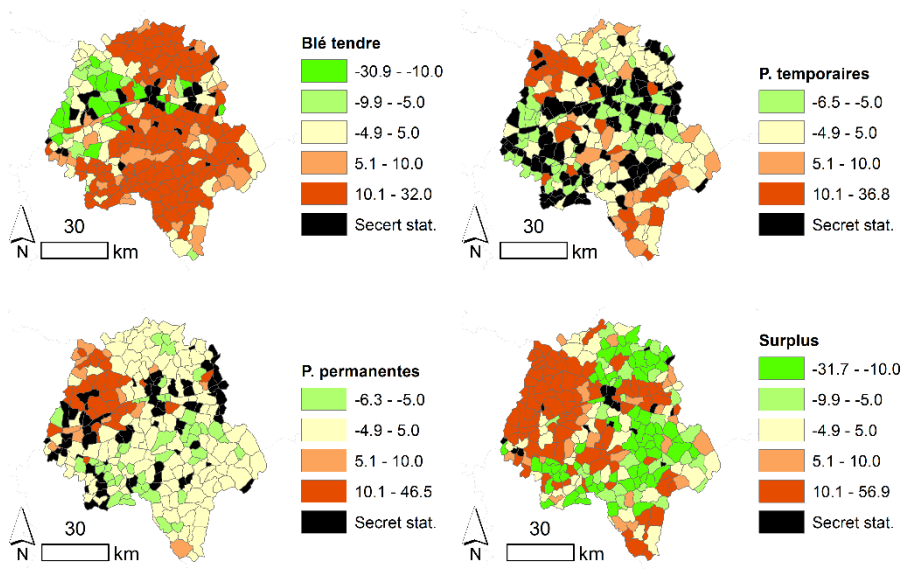


Figure IV-16 : Représentation spatiale des facteurs de contrôle de l'écart des valeurs communales aux valeurs départementales pour l'Indre-et-Loire en 1955 et 2010 (valeurs en kgN.ha⁻¹)

IV.1.3.3. Facteur de contrôle de dispersion dans un département orienté dans la production de bovins viande : cas de la Lozère

- Facteur de contrôle en 1955 dans la Lozère

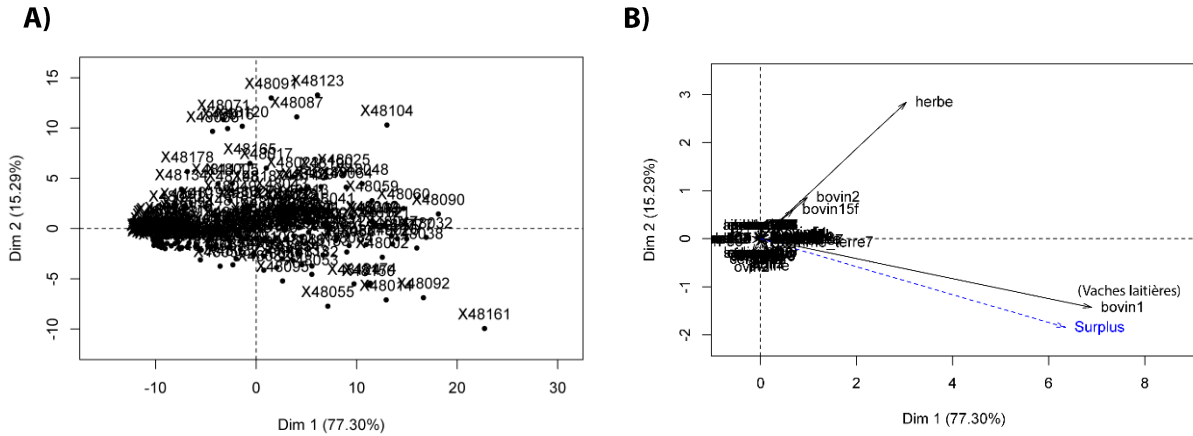


Figure IV-17 : Représentation des individus (A) et variables (B) pour la Lozère en 1955 selon les axes factoriels 1 et 2

La commune 48161 paraît excentrée du nuage de point (Figure IV-17-A) mais son retrait du jeu d'individus permettant la construction des axes ne change par ces derniers. L'ensemble des communes ont donc été conservées pour la définition des axes par l'ACP. Les axes 1 et 2 expliquant 93.22% de la variance du nuage, il n'est pas nécessaire d'étudier l'axe factoriel 3. La dispersion du surplus en 1955 est majoritairement liée à la répartition des vaches laitières (Figure IV-17-B).

- Facteur de contrôle en 2010 dans la Lozère

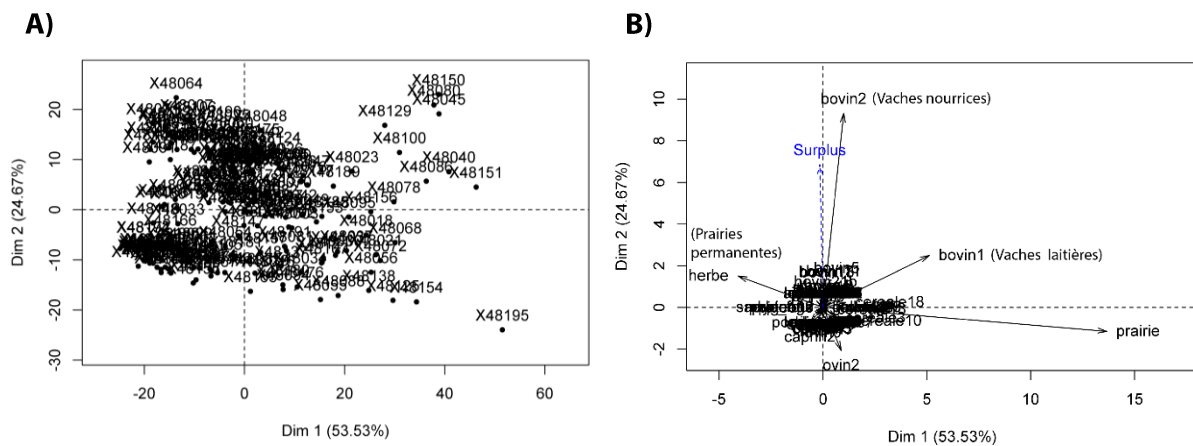


Figure IV-18 : Représentation des variables pour la Lozère en 2010 selon A) les axes factoriels 1 et 2, B) les axes 1 et 3

La commune 48195 paraît excentrée du nuage de point (Figure IV-18-A) mais son retrait du jeu d'individus permettant la construction des axes ne change pas ces derniers. L'ensemble des communes

ont donc été conservées pour la définition des axes par l'ACP. Les deux premiers axes permettent de décrire plus de 78% (Figure IV-18-B) de la variance du nuage de point. Les facteurs de contrôle de la dispersion du surplus en Lozère pour l'année 2010, identifiées sur le plan factoriel représenté par les axes 1 et 2, sont principalement les vaches nourrices, laitières et dans une moindre mesure les prairies permanentes.

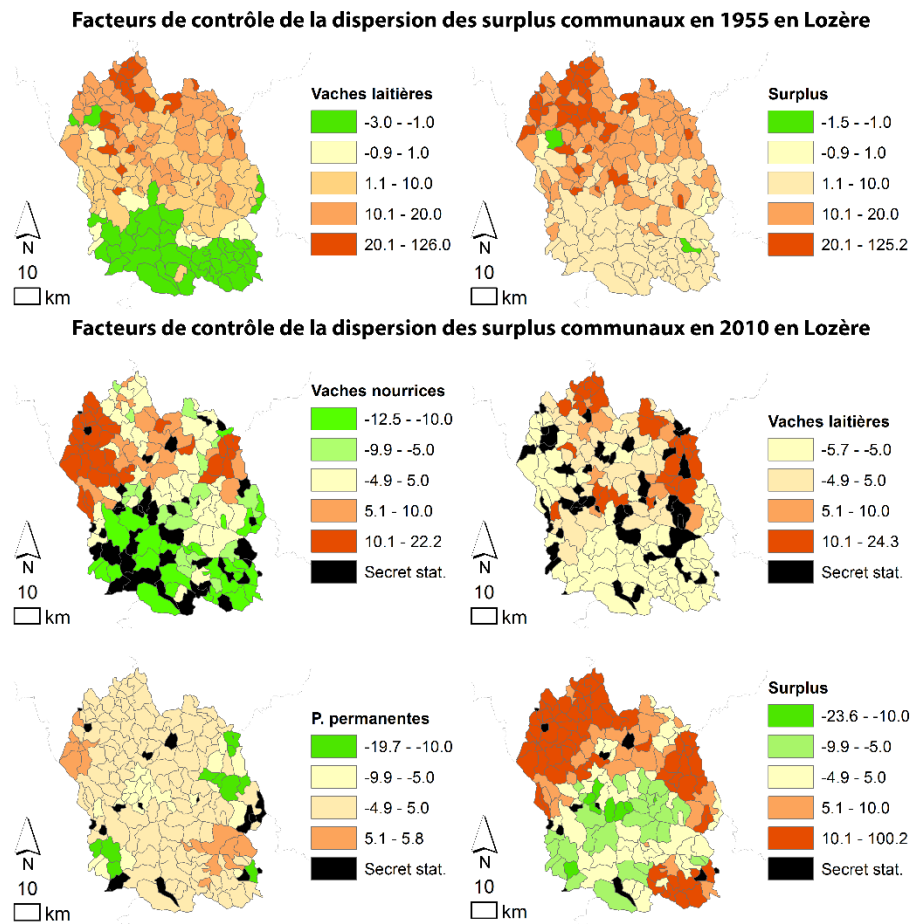


Figure IV-19 : Représentation spatiale des facteurs de contrôle de l'écart des valeurs communales aux valeurs départementales pour la Lozère en 1955 et 2010 (valeurs en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$)

IV.1.3.4. Synthèse

L'analyse par ACP sur les variables non réduites permet d'identifier les facteurs de contrôle de la répartition des surplus communaux. La répartition des surplus communaux des trois départements étudiés est contrôlée par la répartition des vaches laitières en 1955, et par une variable en lien avec leur orientation agricole pour l'année 2010 : les vaches laitières pour le Finistère, le blé tendre pour l'Indre-et-Loire, les vaches nourrices pour la Lozère. Cette analyse est cependant à tempérer par le fait que la dispersion de la fertilisation minérale communale en valeur absolue est considérée comme constante, ce qui ne reflète pas forcément la réalité.

IV.2. Comparaison avec le modèle NOPOLU

IV.2.1. Principe de la comparaison

Les deux modèles reposent sur le principe de la balance azotée de surface du sol qui permet le calcul d'un surplus azoté défini comme le solde entre entrées et sorties d'azote. Les postes (fertilisation organique, fertilisation minérale, fixation symbiotique, dépôt atmosphérique, export d'azote) devant être estimés pour le calcul du surplus azoté sont les mêmes pour les deux modèles. Une comparaison poste à poste peut donc être effectuée entre les deux modèles. Les différences seront présentées en valeurs relatives et absolues.

Les résultats issus de NOPOLU ont été fournis à l'échelle cantonale par l'INRA de Rennes et par M. Le Gall (concepteur et développeur du modèle NOPOLU). La comparaison entre les deux modèles a donc été faite à cette échelle dans le respect du secret statistique lorsque la comparaison mettait en jeu des données sous le secret. Certaines données d'entrées ont pu être comparées grâce à la mise à disposition par M. Le Gall de valeurs de surface utilisées dans le modèle NOPOLU (SAU cantonale des exploitations, SAU cantonale collective, surfaces des différentes cultures).

Les différences entre les deux modèles ont été calculées sous forme de différences absolues (D_A) exprimées en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ de SAU (Équation IV-5).

$$D_A = \frac{C}{\text{SAU}_C} - \frac{N}{\text{SAU}_N} \quad (\text{Équation IV-5})$$

avec

C la valeur cantonale calculée d'après CASSIS_N

N la valeur cantonale calculée d'après NOPOLU

SAU_C la valeur de la SAU cantonale issu du RA 2010

SAU_N la valeur de la SAU cantonale utilisée par NOPOLU

La source de la donnée de la SAU utilisée dans les deux modèles est différente, la valeur de SAU n'est donc pas la même dans les deux modèles. La SAU du modèle NOPOLU (SAU_N) est calculée comme étant la somme des différentes cultures prises en compte dans ce modèle (Annexe 10) alors que CASSIS_N utilise la valeur de SAU fournie dans la base de données du RA 2010. NOPOLU intègre la surface en bois et forêt dans le calcul de la SAU (SOeS, 2013) ce que ne comprend pas la valeur de la SAU utilisée dans CASSIS_N. Dans le cas où les valeurs de surface de bois et forêt ne sont pas nulles, les valeurs de SAU de NOPOLU seront donc plus fortes que celles de CASSIS_N. D'autre part, les cultures soumises au secret statistique ne participent pas au calcul de la SAU de NOPOLU (Tableau IV-2). Dans ce cas, la surface de la SAU retenue par NOPOLU pourra être inférieure à celle employée par CASSIS_N. Cependant, même s'il n'y a pas de surface en bois et forêt et qu'aucune culture n'est soumise au secret statistique, il peut y avoir une différence entre la SAU et la somme des superficies

(SAU_N) liées à la somme de petites erreurs sur chaque culture. Les indications aux enquêteurs effectuant le RA indiquent ainsi que le questionnaire mené à l'échelle de l'exploitation est jugé bon si la différence entre la somme des cultures et la SAU totale indiquée dans le questionnaire est inférieure à 0.5% et à 1 hectare.

Les différences entre les deux modèles n'ont pu être calculées pour 587 cantons des 3807 cantons de la France métropolitaine, dans les cas où la SAU issue du RA est sous le secret statistique et dans les cas pour lesquels NOPOLU indique une SAU nulle (Figure IV-19). Les différences de surface s'échelonnent de -4910,8 à 4376,3 ha avec une moyenne d'environ -239.3 ha. La valeur de la SAU est plus forte pour NOPOLU que pour CASSIS_N dans environ 65% des cantons où la différence est calculable (3121 cantons) (Figure IV-20A). Les valeurs de la SAU sont supérieures pour NOPOLU essentiellement dans le sud de la France (Figure IV-20B).

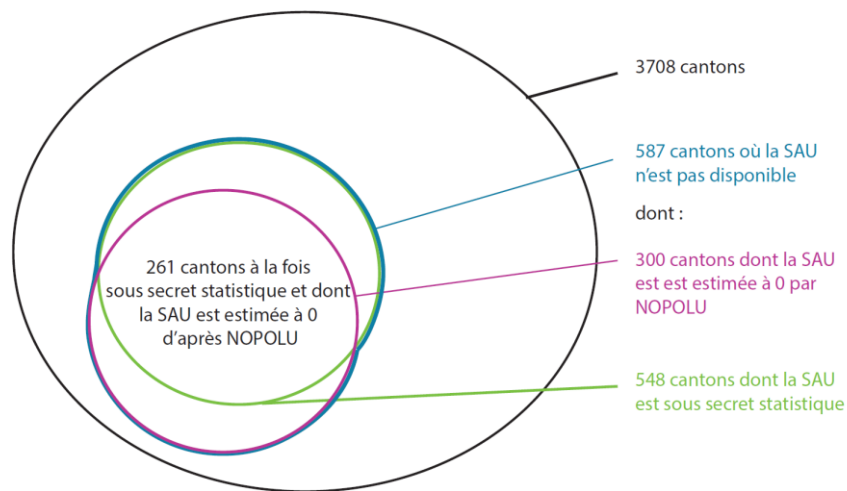


Figure IV-20 : Sélection des cantons pour la comparaison entre NOPOLU et CASSIS_N suivant les valeurs de la SAU

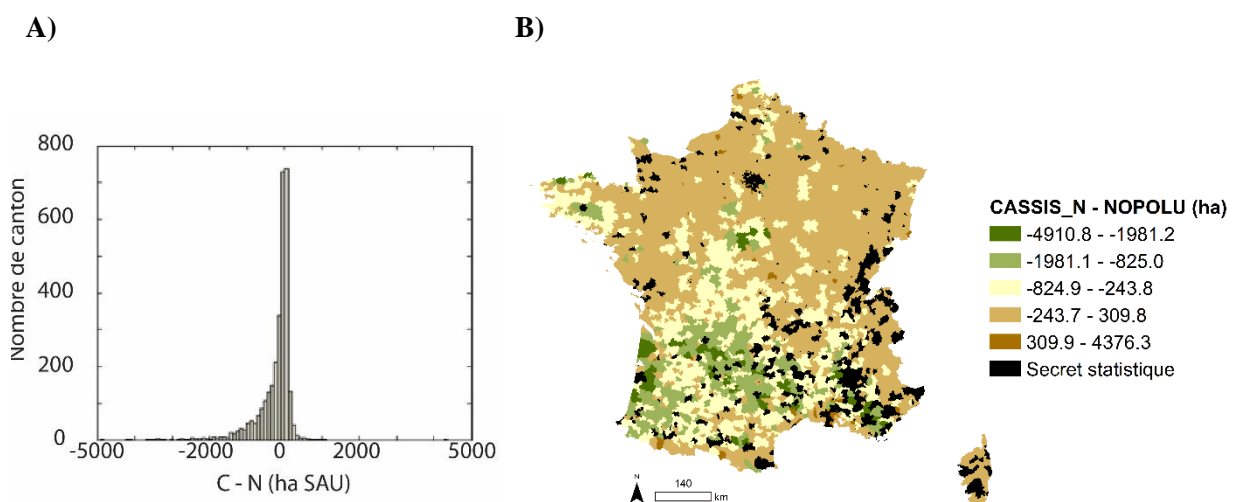


Figure IV-21 : Répartition des différences de SAU cantonale (ha) utilisées par NOPOLU (N) et CASSIS_N (C), A) sous forme d'histogramme, B) sous forme de carte

IV.2.2. Eléments de comparaison méthodologique entre les deux modèles

Les données utilisées dans les deux modèles sont différentes (Tableau IV-2), hormis pour les rendements. En particulier, les données de surfaces et de nombre de tête de bétail sont issues de la même source (RA 2010) mais fournies à deux échelles différentes (échelle cantonale pour NOPOLU, communale pour CASSIS_N). D'autre part, les données cantonales utilisées par NOPOLU sont entachées du secret statistique, alors que CASSIS_N utilise des données exemptes du secret statistique. La présence du secret statistique pourrait impacter l'estimation des postes concernés par l'utilisation de ces données (fertilisation organique, export d'azote).

Tableau IV-2 : Comparaison des données utilisées dans NOPOLU 2010 et CASSIS_N 2010 (échelle communale)

Variables et Postes	NOPOLU 2010	CASSIS_N 2010
Echelle d'entrée : échelle des résultats bruts	Echelle cantonale Utilisation des unités CLC (Corine Land Cover) pour la spatialisation des résultats à l'échelle infra cantonale ¹	Résultats communaux
Echelle de sortie : échelle de comparaison	Echelle cantonale	Echelle cantonale
Surfaces (hors surfaces collectives)	RGA2010 ¹ – extraction échelle cantonale (soumis au secret statistique)	RGA 2010 ² - extraction échelle communale (avec levée du secret statistique)
Surfaces collectives	RGA2010 ¹ – questionnaire surfaces collectives (prairies temporaires et permanentes) - extraction échelle cantonale (soumis au secret statistique)	
Cheptels	RGA2010 ¹ – extraction échelle cantonale (soumis au secret statistique)	
Rendements	SAA ³ 2010	SAA ³ 2010
Gestion des déjections (y compris pâturage)	RGA2010 échelle cantonale	
Adaptation de la fertilisation organique en fonction des pratiques agricoles	Temps de pâturage régional (PMPOA, dans SOeS, 2013 ³)	Intégrée aux incertitudes sur l'excrétion azotée du bétail et la perte d'azote vers l'atmosphère
Fertilisation minérale	Enquêtes PK 2011 et surfaces	Désagrégation de la donnée de livraison d'engrais minéraux azoté (UNIFA)
Coefficient de fixation symbiotique	70% N export	Anglade <i>et al.</i> , 2015
Déposition atmosphérique	EMEP 2010	moyenne EMEP (années 1980, 1985, 1993, 2000, 2003 à 2010)
Incertitudes	x	Tirage de Monte Carlo
Transferts d'N entre départements	x	x
Variation de l'excrétion azotée	Temps de pâturage régional (PMPOA, dans SOeS, 2013 ⁴) Production laitière départementale (SAA ² 2006)	Intégrée aux incertitudes sur l'excrétion azotée du bétail

¹ Non utilisée pour le calcul des valeurs à l'échelle cantonale, cette méthode est utilisée pour le calcul des balances azotées sur des surfaces ayant des limites différentes de celles du canton (limites communales, limites de bassins versants...).

² RGA 2010 : recensement général agricole de 2010

³ SAA : Statistique Agricole Annuelle

⁴ La source de ces données n'est pas indiquée dans le document de référence de NOPOLU 2010 (SOes, 2013 p.58), mais un précédent rapport méthodologique (Solagro, 2009) fait mention de l'origine de cette variable qui indiquée dans ce tableau.

Lorsque cela est possible, des pistes sont proposées pour expliquer les différences observées entre les résultats des deux modèles. Le calcul des postes "export d'azote" et "fertilisation organique" repose sur l'utilisation de formules semblables et permettent des hypothèses quant aux différences observées. Le calcul de la quantité d'azote fixée par les légumineuses (poste "fixation symbiotique") et la quantité d'azote minéral appliqué par canton (poste "fertilisation minérale") étant effectués sur la base

d'utilisation d'équations ou de données différentes, seules les différences entre les valeurs des postes sont présentées.

IV.2.3. Résultats

IV.2.3.1. Différences postes à poste entre CASSIS_N et NOPOLU à l'échelle cantonale

IV.2.3.1.1. Fertilisation organique

Dans 53% des cantons, la fertilisation organique calculée par CASSIS_N est inférieure à celle calculée par NOPOLU. Les différences en valeur absolue sont comprises entre -105 et 170 kgN.ha⁻¹ SAU et 95% des valeurs sont comprises entre -20.6 et 26.6 kgN.ha⁻¹ SAU (Tableau IV-3 et Figure IV-3).

Tableau IV-3 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour la fertilisation organique (échelle cantonale)

Quantile	2.5	25.0	50.0	75.0	97.5
Poste Fertilisation organique (kgN.ha ⁻¹ SAU)	-20.6	-2.3	0.4	2.4	26.6

La répartition des différences semble spatialement organisée. De façon générale, les valeurs calculées par CASSIS_N sont inférieures aux valeurs calculées par NOPOLU dans la région de la Bretagne et en Corse alors qu'elles sont sensiblement les mêmes dans les autres cantons (Figure IV-21).

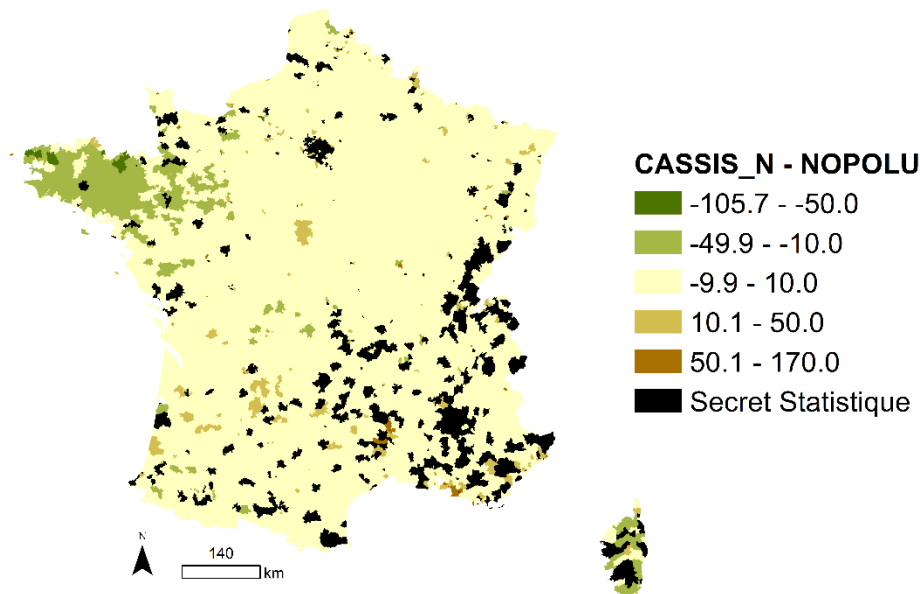


Figure IV-22 : Répartition spatiale des différences absolues (kgN.ha⁻¹ SAU) pour les valeurs de fertilisation organique calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale

Les valeurs de fertilisation organique calculées par CASSIS_N peuvent différer de celles calculées par NOPOLU du fait de différences sur les coefficients d'excrétion et le nombre de tête de cheptel.

Les coefficients d'excrétion azotée employés par les deux modèles ne sont pas les mêmes (Tableau IV-4).

- Cas des bovins :

Les coefficients d'excrétion considérés dans NOPOLU varient régionalement pour refléter l'impact du temps de pâture des bovins. Plus le temps de pâture est important, plus l'excrétion azotée calculée par NOPOLU est importante pour les bovins. Les coefficients d'excrétion des vaches laitières vont aussi varier au niveau départemental afin de rendre compte de l'impact de la production laitière sur l'excrétion (+5% par tranche de 1000 litres).

Les vaches réformées laitières sont engraisées environ 60 jours (~2 mois) avant d'être abattues, les vaches allaitantes de réforme environ 100 jours (entre 3 et 4 mois)(CORPEN, 2001). Le modèle NOPOLU ne semble pas prendre en compte la distinction entre les vaches laitières et nourrices en cours d'exploitation ou réformées. La valeur d'excrétion pour les vaches de réforme serait celle attribuée aux vaches en cours d'exploitation, valeur basée sur 12 mois d'existence. Au contraire, la durée d'engraissement des vaches de réforme est prise en compte dans le calcul de l'excrétion pour CASSIS_N. La valeur retenue pour l'excrétion des vaches de réforme pour CASSIS_N est donc moins forte que la valeur utilisée par NOPOLU. Cette différence d'excrétion pourrait expliquer en partie les valeurs de fertilisation organique moins fortes estimées par CASSIS_N en Bretagne, région où l'élevage laitier et par conséquent le cheptel de vache de réforme est important.

- Cas des caprins et des ovins :

Les pratiques d'élevage fréquemment employées en 2010 font suivre plusieurs groupes d'animaux, appelés "bandes", au sein d'un même bâtiment d'élevage dans l'année. Afin de prendre compte le nombre d'animaux se succédant sur une même place d'élevage au cours d'une année culturale, un facteur "bande" est intégré au calcul de l'excrétion de NOPOLU. Les valeurs d'excrétion azotée sont alors renseignées en kgN.place^{-1} et non en kgN.animal^{-1} . Le rapport de NOPOLU (SOeS, 2013) donne les valeurs de certains coefficients d'excrétion azotée uniquement *par place d'élevage*. Ces valeurs d'excrétion ne sont ainsi pas comparables à celles utilisées par CASSIS_N qui estime l'excrétion azotée à partir d'excrétion *par tête de bétail*. Cette différence d'estimation ne semble avoir d'impact que dans le cas des jeunes ovins et caprins, ainsi que pour les mâles des deux catégories.

- Cas des volailles :

Les valeurs d'excrétion retenues dans CASSIS_N intègrent l'ensemble des types de volailles produites possibles (label ou non, espèce, poids, mode de vie...) et un nombre de bande variable compris entre au minimum 1 bande par an et au maximum le nombre de bande indiqué dans le rapport du CORPEN de 2006. Le modèle NOPOLU semble privilégier la sélection de certains coefficients correspondant aux catégories de volaille se rapprochant le plus, selon eux, des catégories détaillées dans le RGA.

Les données du RGA, utilisées à l'échelle cantonale par NOPOLU, sont des données entachées du secret statistique. Ainsi, le nombre de tête de bétail pourrait être sous-estimé dans NOPOLU. Par exemple, NOPOLU indique un nombre de tête de bétail pour le canton d'Issoudun égal à 30. Par croisement avec les données cantonales du RGA téléchargeable sur DISAR (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>), il s'avère effectivement que ce canton compte 30 volailles mais aussi des bovins et des caprins dont le nombre est soumis au secret statistique. CASSIS_N intègre les données communales exemptes du secret statistique et prend bien en compte le cheptel bovin et caprin présent sur ce canton. Au final pour ce canton, la fertilisation organique calculée par CASSIS_N est 345344 % plus importante que celle calculée par NOPOLU et cela semble largement imputable à la prise en compte de la totalité du cheptel présent sur ce canton.

Tableau IV-4 : Valeurs d'excrétion azotée pour les différents types de bétail pour les modèles CASSIS_N et NOPOLU

Type de bétail	Catégories CASSIS_N	Excrétion CASSIS_N	Catégories NOPOLU	Excrétion NOPOLU
Vaches laitières		109.7	Vache laitière 6000l/an + veau	113
Vaches nourrices		79.5	Vache allaitante + veau (format 670 kg)	100
Bœufs (Animaux de travail de plus de 2 ans)		101.6		
Génisses laitières de renouvellement de plus de 2 ans		50.8	Femelles de plus de 2 ans	60
Génisses nourrices de renouvellement de plus de 2 ans		62.1		
Génisses de boucherie de plus de 2 ans		56.5		
Femelles de réforme 36 mois et plus	Vache de réforme abattues dans les 2 à 4 mois	24.2	Réforme lait ou réforme viande	113 ou 100 (suivant le type laitier ou nourrice)
Mâles de type laitier ou viande de plus de 2 ans		80.0	Engraissement > 2 ans	91
Génisses laitières de renouvellement de 1 à 2 ans		45.2	Femelles de 1 à 2 ans	52
Génisses nourrices de renouvellement de 1 à 2 ans		50.8		
Génisses de boucherie de 1 à 2 ans		48.0		
Mâles de type laitier ou viande de 1 à 2 ans		67.7	Engraissement 1 >> 2 ans	74
Veaux de boucherie		7.2	Veaux de boucherie	6
Autres femelles de moins de 1 an		23.2	Croissance lait < 1 an, Croissance viande < 1 an	20
Autres mâles de moins de 1 an		23.2	Engraissement < 1 an	12
Mâles reproducteur (mâles entre un et deux ans)		56.5		
Mâle reproducteur (mâles plus de deux ans)		101.6		
Jeunes porcs de 20 à 50 kg		0.59	Porcelets en post sevrage : animaux de moins de 20 kg	0.59
Truies de 50 kg et plus		22.5	Truies mères : regroupant les mères en production et les jeunes truies de 50 kg et plus (non saillies ou en première gestation)	22.38
Verrats et porcs à l'engrais de 50 kg et plus		4.2	Porcs à l'engrais : animaux de plus de 20 kg, réformes et verrats	4.12
Chevrettes	Jeunes caprins	5.7	Chevrettes pour la reproduction	7.02
Chevreaux de moins d'un an			Autres caprins : regroupant les chevreaux et les boucs	2.6
Chèvres d'un an et plus		14.3	Chèvres mères : regroupe les mères et les réformes des troupeaux lait et viande	14.04
Caprins mâles d'un an et plus		14.3	Autres caprins : regroupant les chevreaux et les boucs	2.6
Ovins de moins de 1 an (Agneaux)	Jeunes ovins	5.7	Autres ovins : regroupant les agneaux et béliers	2.6
Ovins de moins de 1 an (Agnelles)			Agnelles pour la reproduction	7.02
Brebis-mères		14.3	Brebis mère : regroupant mères et réformes des troupeaux lait et viande	14.04
Bélier d'un an et plus		14.3	Autres ovins : regroupant les agneaux et béliers	2.6
Ovins adultes destinées boucherie		14.3	Brebis mère : regroupant mères et réformes des troupeaux lait et viande	14.04
Total équins		56.0	Chevaux de selle, chevaux lourds, ânes, bardots, mulets	57
Poules	Ensemble gallus	0.22	Poules	0.713
Poulettes			Poulettes	0.136
Poulets			Poulets	0.051
Canards	Ensemble des canards	0.48	Canards	0.296
Canards gavage			Canards gavage	0.118
Dindes et dindons		0.48	Dindes	0.143

Oies	0.97	Oies	0.408
Pintades	0.23	Pintades	0.087
Cailles	0.09	Cailles	0.025
Pigeons	0.83	Pigeons	0.148
Lapines mères	3.3	Lapins	0.97
Lapins produits	0.06		

valeurs en kgN excrété par place

valeurs moyennes établies à partir de moyennes établies au niveau national, le modèle NOPOLU utilisant des coefficients variables selon les conditions d'élevage du bétail bovin

IV.2.3.1.2. Export d'azote

Quatre-vingt-six pourcents des cantons présentant un export d'azote plus faible pour CASSIS_N que pour NOPOLU. Les différences en valeur absolue s'échelonnent de -120.8 à 125 kgN.ha⁻¹ SAU et 95% des différences sont comprises entre -36.4 et 20,4 kgN.ha⁻¹ SAU (Tableau IV-5).

Tableau IV-5 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour l'export d'azote (échelle cantonale)

Quantile		2.5	25	50	75	97.5
Poste	Export (kgN.ha ⁻¹ SAU)	-36.4	-18.8	-12.0	-3.8	20.4

Les différences d'export d'azote présentent une organisation spatiale (Figure IV-22). De façon générale, l'export d'azote calculé par CASSIS_N est inférieur à celui calculé par NOPOLU dans les massifs montagneux comme les Pyrénées, le Massif Central et le Massif Armoricain ainsi qu'au Nord du Pays.

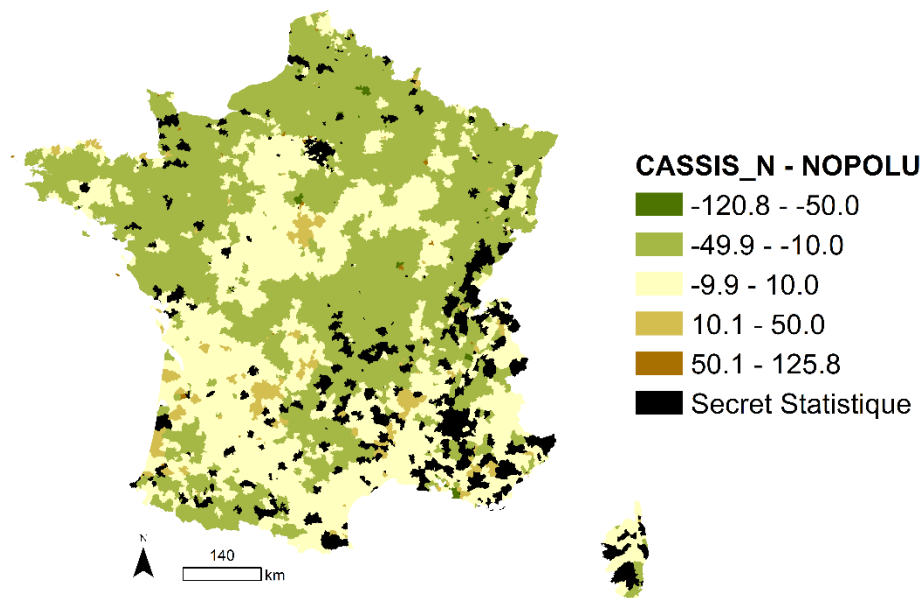


Figure IV-23 : Répartition spatiale des différences absolues (kgN.ha⁻¹ SAU) pour les valeurs d'export d'azote calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale

Les variations entre les résultats d'export de CASSIS_N et NOPOLU peuvent aussi être dues aux facteurs suivants :

- L'influence du cheptel sur l'export d'azote par l'herbe : pour les deux modèles, la récolte d'herbe est liée au nombre et au type de bétail présent sur la surface considérée. Sur une surface considérée, plus le nombre d'herbivore est important plus le besoin et la récolte d'herbe augmente, dans la limite de

la production d'herbe possible sur cette surface. Un nombre croissant d'herbivore va donc augmenter l'export d'azote. Hors, la partie précédente fait état de valeurs de cheptel différent entre les deux modèles, ce qui peut au final influencer l'export d'azote.

- Les coefficients d'export d'azote : en moyenne, les valeurs de teneur en azote des cultures retenues par NOPOLU sont plus importantes (2.4% pour les grandes cultures pour NOPOLU contre 2.2% pour CASSIS_N) (Tableau IV-6). En particulier, NOPOLU a retenu une valeur de teneur en azote plus importante pour le blé tendre et pour l'herbe des prairies permanente. Les différences entre les valeurs de teneur en azote de ces cultures peuvent paraître faibles (1.9 contre 1.8 pour le blé tendre et 2.71 contre 2.3 pour les surfaces toujours en herbe) mais du fait de l'importance que représentent ces cultures en terme de surface (13 et 37% de la SAU nationale respectivement en France en 2010), les différences d'exportation générées peuvent être importantes. Ces différences de teneur en azote tendraient vers un export d'azote plus important pour le modèle NOPOLU. Ces différences pourraient expliquer les valeurs moins importantes d'export d'azote pour les zones dominées par l'exploitation de l'herbe (zone d'élevage extensif : Massif Central, Pyrénées, Normandie) et les zones de grandes cultures où est produit le blé tendre (bassin parisien par exemple) (Figure IV-22).

Tableau IV-6 : Teneur en azote des végétaux récoltés pour les modèles CASSIS_N et NOPOLU

Types de culture	CASSIS_N	NOPOLU
Total blé tendre	1.8	1.9
Total blé dur	2.1	2.1
Seigle et méteil	1.8	1.4
Total orge et escourgeon	1.5	1.5
Total avoine	1.6	1.9
Maïs (grain et semence)	1.2	1.4
Triticale	1.9	1.9
Riz	1.2	1.4
Total Sorgho	1.4	2
Autres céréales non mélangées	1.9	1.9
Mélanges de céréales (hors méteil)	1.9	
Millet	1.9	
Total sarrasin	1.9	
Colza et navette	3.5	3.5
Tournesol	1.9	1.9
Soja	5.65	5.65
Lin oléagineux	3.6	3.5
Moutarde	3.5	
Éillette	3.5	
Autres oléagineux	3.5	
Pois protéagineux	3.1	3.25
Total pailles de céréales	0.7	x
Betteraves industrielles (sucre + alcool)	0.11	0.31
Fibre de Chanvre (pour papier ou textile)	1.35	1.35
Graine de chanvre (chènevis)	4	?
Lin textile (roui non battu)	0.56	1.35
Tabac (sec non fermenté)	4	4
Houblon en production	2.5	2.5
Chicorée à café (racines)	1.35	1.35
Pommes de terre	0.35	0.35
Maïs fourrage	1.15	1.25
Prairies temporaires	2.3	2.92
Trèfle	3.5	3.9
Luzerne	3.5	3.9
Sainfoin	2.4	3.9
Autres prairies artificielles	3.4	3.9
Surface toujours en herbe	2.3	2.71
Plantes sarclées fourragères	0.25	0.24
Haricot sec	1.29	3.8

Lentille	1.14	
Pois et pois de casserie	1.36	
Ers et pois	1.09	
pois chiches	1.42	
Fèves vertes	0.82	
Fèveroles	1.09	
Raisins	0.130	
Abricots	0.144	
Cerises	0.208	
Total pavies, pêches, nectarines et brugnons	0.184	
Prunes	0.122	
Olives	0.155	
Poires à cidre	0.062	
Pommes à cidre	0.050	
Poires de table	0.062	
Pommes de table	0.050	
Coings	0.059	
Nèfles	0.106	
Kakis	0.003	
Total amandes	4.896	
Châtaignes	0.451	
Noix	2.768	
Noisettes	3.088	
Actinidia (Kiwi)	0.176	
Cassis	0.144	
Myrtilles et mures	0.156	
Framboises	0.224	
Groseilles	0.176	
Avocats	0.288	
Figues	0.208	
Angéliques	0.106	
Clémentines, mandarines	0.128	
Oranges	0.153	
Pamplemousses	0.128	
Citrons	0.128	
Cédrats	0.128	
Agrumes divers	0.133	
Artichauts	0.41	
Asperges	0.4	
Céleris branches	0.12	
Choux-fleurs	0.39	
Choux brocolis à jets	0.425	
Choux de Bruxelles	0.12	
Choux à choucroute	0.3312	
Choux autres	0.225	
Endives	0.1648	
Epinards	0.37	
Poireaux	0.33	
Laitues (romaines + pommées)	0.18	
Chicorées (frisées + scaroles)	0.33	
Cresson	0.256	
Mâche	0.45	
Autres salades	0.112	
Bettes et cardes	0.3308	
Cardons	0.096	
Fenouil	0.18	
Rhubarbe	0.1213	
Pissenlits	0.456	
Persil	0.48	
Cerfeuil	0.528	
Estragon	0.4656	
Thym	0.9712	
Maïs doux	0.5088	
Champignons tout type	0.4944	
Fraises	0.12	
Aubergines	0.1328	
Concombres	0.0994	
Cornichons	0.1213	
Courgettes	0.22	
Melons	0.14	
Pastèques	0.0948	

0.05

0.4

Poivrons	0.144
piments	0.3312
Potirons, courges, citrouilles, giraumon	0.108
Tomates	0.128
Ail	1.264
Betteraves potagères	0.368
Carottes	0.12
Céleris raves	0.2
Echalotes	0.23
Navets potagers	0.1512
Oignons	0.2
Radis	0.1213
Salsifis et scorsonères	0.49
Radis noirs	0.448
Crosne	0.1216
Petit pois (grains)	0.98
Haricot à écosser+1/2-secs (grains)	1.5
Haricots verts(+beurre)	0.34

IV.2.3.1.3. Fixation symbiotique

La valeur de fixation symbiotique calculée par CASSIS_N est inférieure à la valeur calculée par NOPOLU dans seulement 3.4% des cas. Les différences en valeurs absolues s'échelonnent de -27.6 à 162 kgN.ha⁻¹ SAU avec 95% des valeurs comprise entre -0.8 et 15.9 kgN.ha⁻¹ SAU (Tableau IV-7).

Tableau IV-7 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour la fixation symbiotique (échelle cantonale)

Quantile		2.5	25.0	50.0	75.0	97.5
Poste	Fixation symbiotique (kgN.ha ⁻¹ SAU)	-0.8	2.6	4.5	7.3	15.9

La valeur de fixation symbiotique calculée par CASSIS_N est supérieure à celle de NOPOLU sur quasiment l'ensemble du territoire. L'écart entre les valeurs calculées par les deux modèles est moins important dans les zones de montagnes (Figure IV-23). Malgré une méthode d'estimation de la fixation différente par les deux modèles, les différences de valeur de fixation symbiotiques sont relativement faibles sur la majorité du territoire.

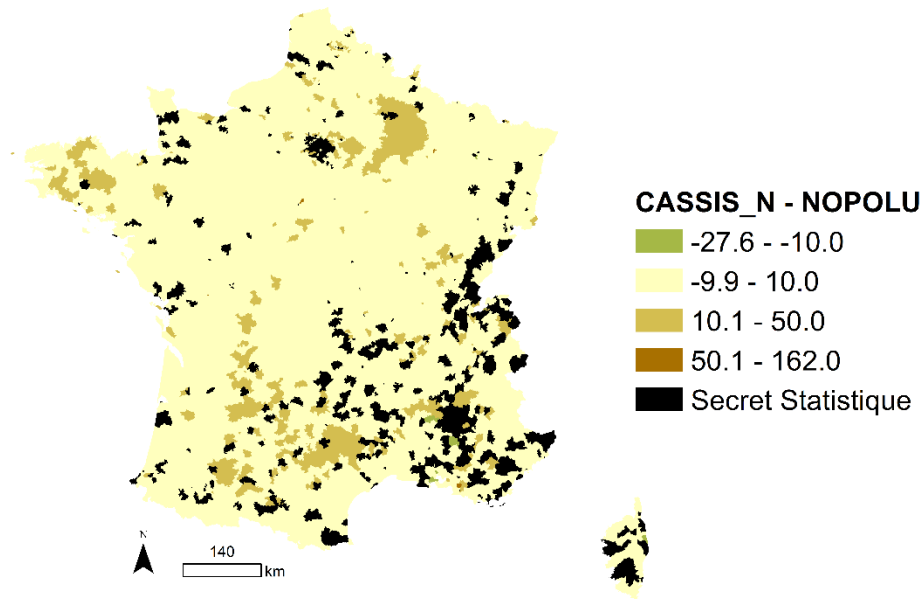


Figure IV-24 : Répartition spatiale des différences absolues (kgN.ha^{-1} SAU) pour les valeurs de fixation symbiotique calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale

IV.2.3.1.4. Fertilisation minérale

La valeur de fertilisation minérale calculée par CASSIS_N est inférieure à celle de NOPOLU dans environ 51% des cantons. Les différences en valeur absolue s'échelonnent de -139.1 à 251 kgN.ha^{-1} SAU avec 95 % des valeurs comprises entre -62.6 et 85.9 kgN.ha^{-1} SAU (Tableau IV-8).

Tableau IV-8 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour la fertilisation minérale (échelle cantonale)

	Quantile	2.5	25.0	50.0	75.0	97.5
Poste	Fertilisation minérale (kgN.ha^{-1} SAU)	-62.6	-18.0	0.1	17.6	85.9

La répartition spatiale des variations entre les deux modèles (Figure IV-24) traduit la différence d'estimation du poste de fertilisation minérale (Tableau IV-2). Les méthodes employées par les deux modèles pour estimer la fertilisation minérale sont connues pour avoir des biais. La méthode utilisée par CASSIS_N (utilisation des données de livraison), ne prend pas en compte les perméabilités géographiques ni l'éventuelles constitution de stock d'engrais. D'autre part, la méthode employée par NOPOLU (utilisation des enquêtes pratiques culturales) ne renseigne pas sur toutes les cultures et peut comporter des biais d'échantillonnage (l'ensemble des cultures de toutes les entités géographiques n'est pas enquêté).

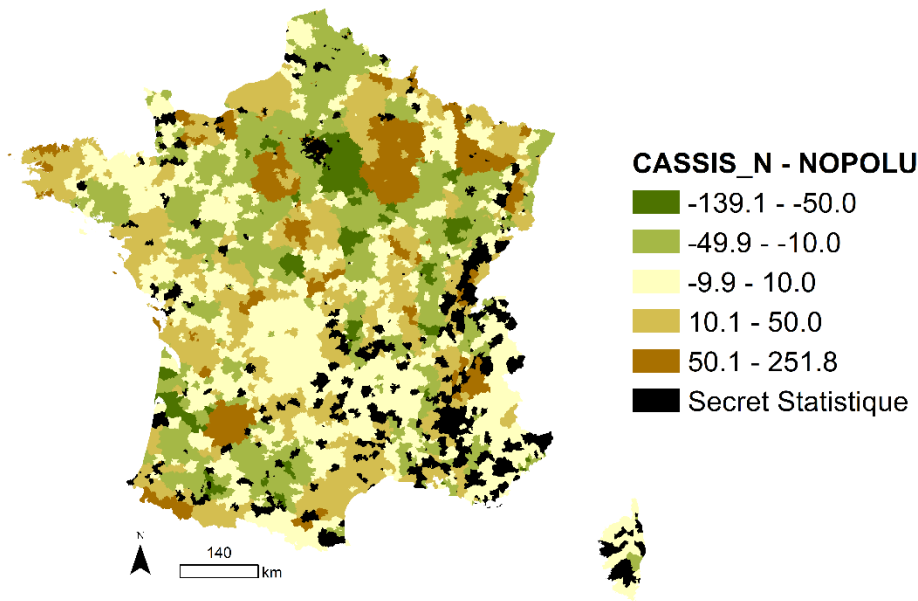


Figure IV-25 : Répartition spatiale des différences absolues (kgN.ha^{-1} SAU) pour les valeurs de fertilisation minérale calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale

IV.2.3.1.5. Dépôt atmosphérique

La valeur du dépôt atmosphérique calculée par CASSIS_N est inférieure à celle calculée par NOPOLU pour environ 22% des cantons. Les différences en valeur absolue s'échelonnent de -3.8 à 10.8 kgN.ha^{-1} SAU avec 95% des valeurs comprises entre -0.9 et 4.3 kgN.ha^{-1} SAU (Tableau IV-9). Les différences entre les valeurs des deux modèles sont dues à la façon dont est estimé ce poste : les valeurs utilisées par CASSIS_N sont des valeurs moyennes alors que NOPOLU utilise les valeurs relatives à l'année 2010 (Tableau IV-2)

Tableau IV-9 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour le dépôt atmosphérique (échelle cantonale)

Quantile		2.5	25.0	50.0	75.0	97.5
Poste	Dépôt atmosphérique (kgN.ha^{-1} SAU)	-0.9	0.7	1.4	2.1	4.3

Les valeurs de dépôt atmosphérique calculées par CASSIS_N sont généralement inférieures à celle calculées par NOPOLU au sud et supérieures au nord (Figure IV-25).

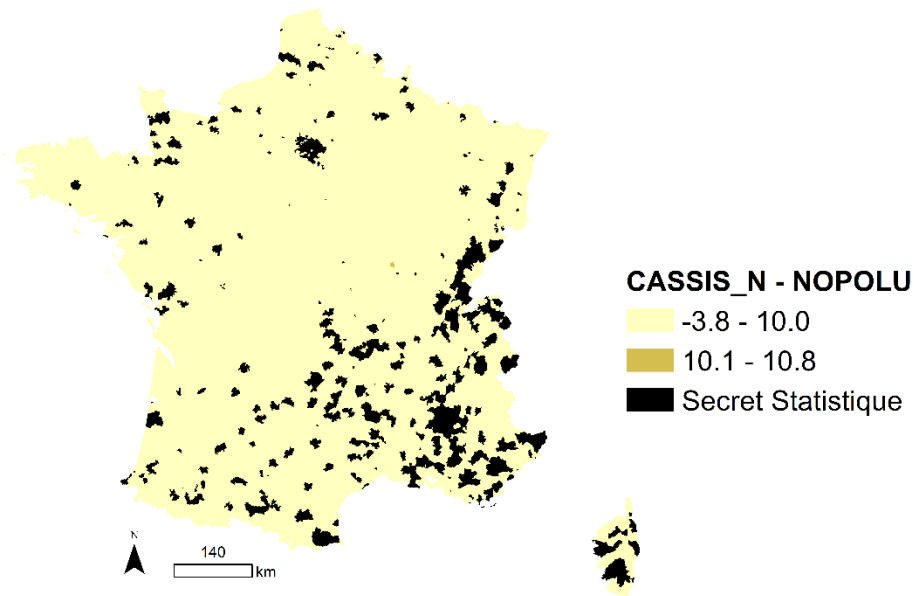


Figure IV-26 : Répartition spatiale des différences absolues (kgN.ha^{-1} SAU) pour les valeurs de dépôt atmosphérique calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale

IV.2.3.2. Différences entre les valeurs cantonales du surplus azoté

IV.2.3.2.1. Influence des différences entre les postes sur la valeur du surplus

Le surplus est calculé comme la différence entre les entrées (fertilisations minérale et organique, fixation symbiotique, dépôt atmosphérique) et les sorties (export d'azote des récoltes). Ainsi, le calcul de valeurs relativement proches pour les différents postes de la balance azotée de surface du sol par NOPOLU et CASSIS_N pourra déboucher sur des surplus azotés relativement différents (Figure IV-26-A). Au contraire, les différences entre les postes peuvent se compenser et conduire à l'estimation de surplus relativement proche (Figure IV-26-B).

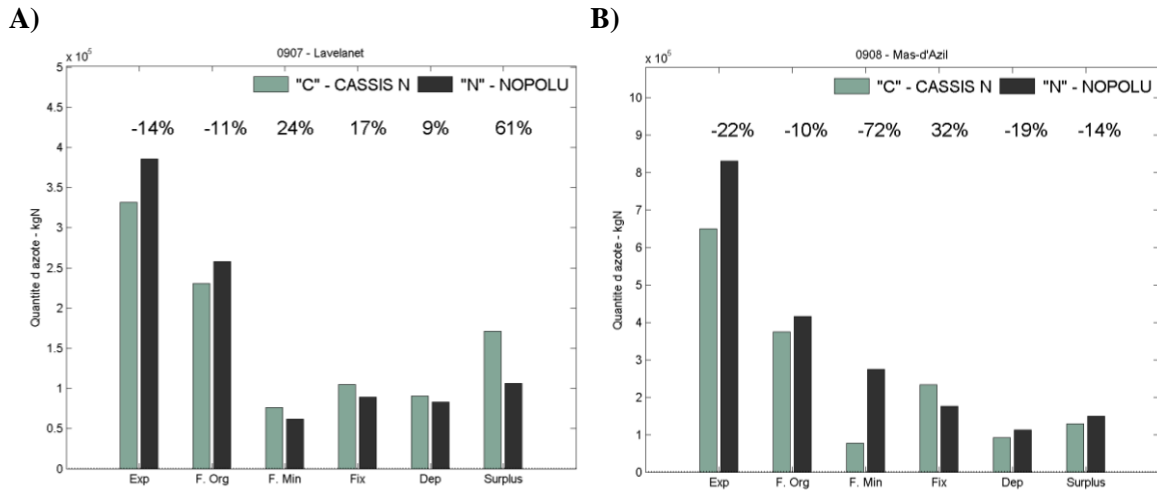


Figure IV-27 : Valeur des postes de la balance azotée de surface du sol et du surplus azoté pour deux cantons de l'Ariège (09), A) Lavelanet, B) Mas-d'Azil. Le pourcentage de variation entre les valeurs obtenues par CASSIS_N et par NOPOLU est indiqué au-dessus de chaque poste de la balance et pour le surplus azoté.

IV.2.3.2.2. Répartition des différences entre les surplus azotés calculés par CASSIS_N et NOPOLU

Parmi les 300 cantons pour lesquels la valeur de surplus indiquée par NOPOLU est nulle du fait de l'absence de SAU, CASSIS_N calcule un surplus sur 55% de ces cantons. Cette différence semble due à l'utilisation de données cantonales soumises au secret statistique (NOPOLU) ou non (CASSIS_N). Pour les cantons où la différence a pu être calculée, les différences en valeur absolue s'échelonnent de -113.6 à 242.9 kgN.ha⁻¹SAU avec 95 % des valeurs comprises entre -44.9 et 122.8 kgN.ha⁻¹SAU (Tableau IV-10).

Tableau IV-10 : Répartition des différences absolues entre CASSIS_N et NOPOLU pour le surplus azoté (échelle cantonale)

Quantile		2.5	25.0	50.0	75.0	97.5
Poste	Surplus azoté (kgN.ha ⁻¹ SAU)	-44.9	-2.2	16.0	37.5	122.8

La combinaison des différences observées pour les différents postes fait émerger une répartition spatiale hétérogène des variations entre les valeurs du surplus (Figure IV-27). L'organisation spatiale des valeurs du surplus en sortie des deux modèles est sensiblement la même (surplus plus importants de l'est vers l'ouest) bien que CASSIS_N fasse cependant apparaître des zones de surplus plus importantes que NOPOLU dans les départements de la Marne, de l'Aube, de l'Eure-et-Loir et du Lot-et-Garonne (Figure IV-28). Ces valeurs plus importantes sont le fait des valeurs de fertilisation minérales plus importantes pour CASSIS_N (Figure IV-24).

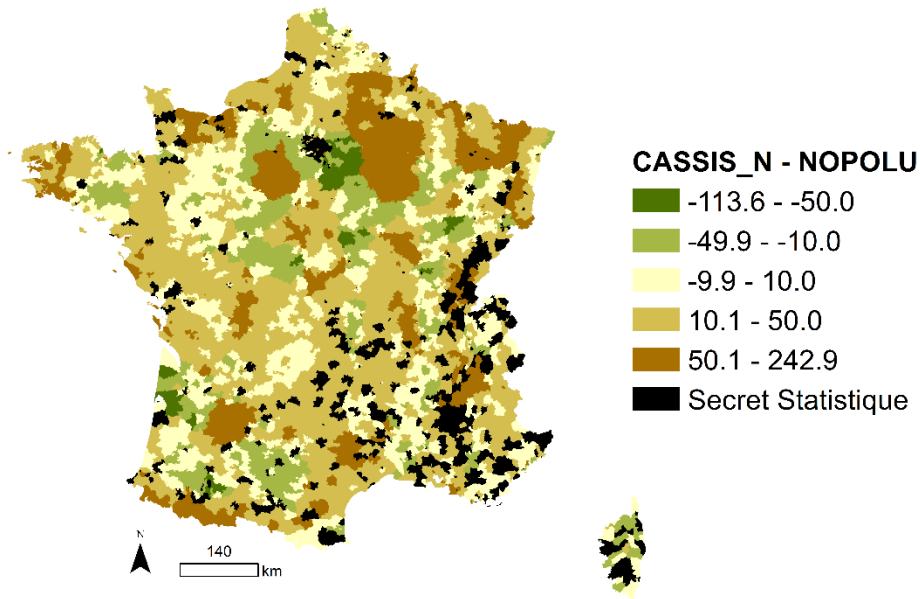


Figure IV-28 : Répartition spatiale des différences absolues (kgN.ha^{-1} SAU) pour les valeurs de surplus azoté calculées par CASSIS_N et NOPOLU, à l'échelle cantonale

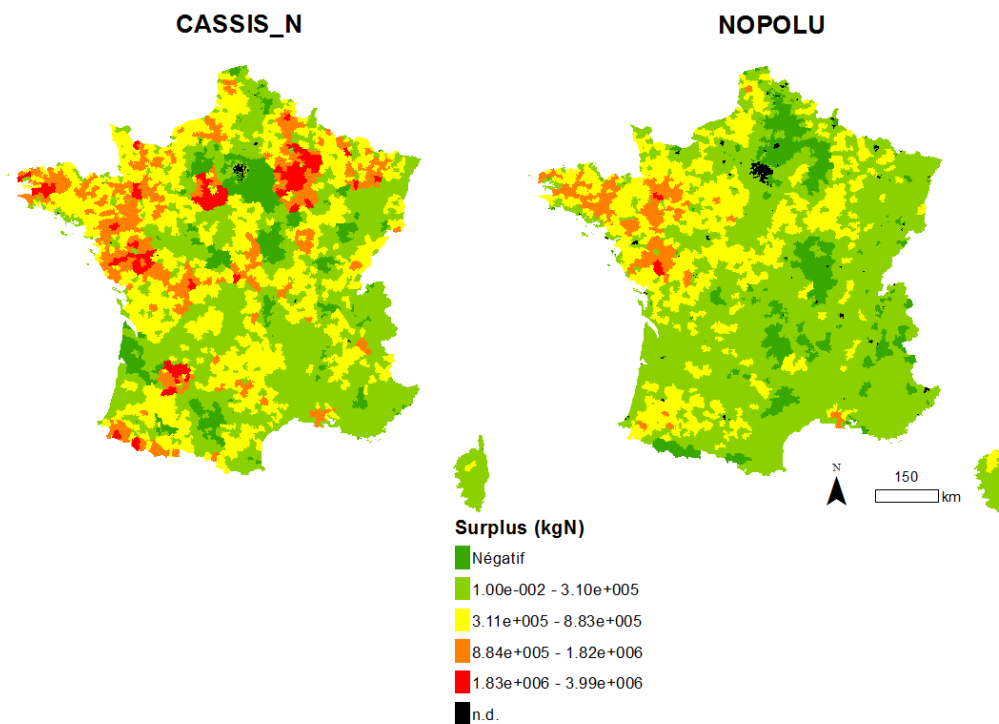


Figure IV-29 : Valeurs cantonales de surplus pour l'année 2010 (kgN) calculées d'après CASSIS_N et NOPOLU. Les valeurs notées n.d. (non disponibles) obtenues pour les deux modèles sont les cantons où la SAU est égale à zéro.

IV.2.4. Synthèse de la comparaison entre les deux modèles

Les différences obtenues entre les modèles NOPOLU et CASSIS_N, appliqués à l'échelle des cantons français pour l'année 2010, sont dues à des différences entre les valeurs obtenues pour les postes de la balance azotée. L'influence de chaque poste sur le surplus peut être classée par ordre décroissant selon l'intervalle de valeur que prennent les différences en valeur absolues (Tableau IV-11). Plus un poste présentera un intervalle de différence large plus il aura d'impact sur les différences obtenues sur le surplus. Les postes influençant le plus la différence de surplus entre les deux postes sont, par ordre décroissant :

- la fertilisation minérale,
- l'export d'azote,
- la fertilisation organique,
- la fixation symbiotique,
- le dépôt atmosphérique.

Tableau IV-11 : Tableau récapitulatif des différences pour les postes de la balance azotée calculés d'après CASSIS_N et NOPOLU

	Export	Fertilisation organique	Fertilisation minérale	Fixation symbiotique	Dépôt atmosphérique	Surplus azoté
Pourcentage de cantons où la valeur calculée par CASSIS_N est plus faible que celle calculée par NOPOLU	86.3	53.0	51.0	3.4	21.8	36.6
En valeur absolue (kgN.ha ⁻¹ SAU), 95% des différences se situent entre	[-36.4 : 20.4]	[-20.6 : 26.6]	[-62.6 : 85.9]	[-0.8 : 15.9]	[-0.9 : 4.3]	[-44.9 : 122.8]

Les sources de différences entre les deux modèles sont les suivantes :

- les formules utilisées pour l'estimation des postes (fixation symbiotique et fertilisation minérale)
- les sources de variation des coefficients prises en compte pour NOPOLU (temps de pâture pour la fertilisation organique)
- les différences entre les coefficients utilisés (export d'azote, fertilisation organique)
- la présence du secret statistique (export d'azote, fertilisation organique).

Au final, 36.6% des valeurs de surplus cantonal calculées par CASSIS_N sont inférieures à celles calculées par NOPOLU mais l'échelle de valeur obtenue par les deux modèles est la même. La spatialisation des surplus montre une organisation relativement similaire bien que CASSIS_N fasse état de zones de forts surplus dans des zones non identifiées par NOPOLU.

IV.3. Limites du modèle désagrégé

IV.3.1. Fertilisation minérale

La désagrégation de la quantité de fertilisation minérale départementale à l'échelle des communes a été effectuée au prorata de la SAU communale. Cette méthode suppose que l'ensemble des cultures sont fertilisées en quantité égale. Hors, les enquêtes sur les pratiques agricoles, malgré les biais qu'elles peuvent comporter, ont montré que les différentes cultures sont fertilisées avec des taux variables et ce, dès les années 1960. Par exemple, en Eure-et-Loir en 1964, le blé tendre, l'orge et le maïs sont fertilisés à des taux de 91.8, 70.6 et 104 kgN.ha⁻¹ respectivement (SCEES, 1965c, 1965a). Les pratiques de fertilisation minérale varient donc selon les cultures, mais aussi spatialement. Ainsi dans le Gers, en 1964, le blé tendre, l'orge et le maïs sont fertilisés à des taux de 69.1, 52.1 et 71 kgN.ha⁻¹ (SCEES, 1965c, 1965a). D'un point de vue temporel, en 2011 en région Centre, ces mêmes cultures sont fertilisées avec des taux respectifs de 160, 130 et 150 kgN.ha⁻¹ (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>), montrant que les pratiques de fertilisation sont aussi variables dans le temps.

D'autres méthodes de désagrégation du poste de fertilisation minérale ont été éprouvées. Le principe général de ces méthodes était d'établir une relation de type régression linéaire multiple entre la quantité de fertilisation minérale appliquée à l'échelle du département et les surfaces occupées par les cultures et d'appliquer cette relation à l'échelle communale pour calculer une fertilisation minérale à l'échelle de la commune. Afin de tenir compte des trois facteurs de variabilité de la fertilisation minérale (selon les cultures, selon le temps et selon les départements), deux approches privilégiant l'aspect de variation de la fertilisation minérale entre les départements ou entre les années ont été mises en place.

Dans le premier cas, les variables (surfaces) mises en relations concernent un département et toutes les années (méthode "géographique"), dans le deuxième cas, les régressions ont été construites à partir des variables concernant une année et tous les départements (méthode "temporelle").

Plusieurs ensembles de surfaces ont été testées pour construire la relation linéaire, allant de 1 culture (culture présentant la relation la plus forte entre les surfaces et la fertilisation à l'échelle départementale) à l'ensemble des cultures présentes sur le département. Dans le cas de la relation construite avec une seule culture, l'hypothèse sous-jacente est que la fertilisation minérale est destinée à une seule culture, ce qui n'est pas justifiable. Dans le cas de relations construites entre l'ensemble des cultures et la fertilisation minérale, les cultures minoritaires en terme de surface servent de variables d'ajustement et prennent un poids prépondérant (coefficient affecté à ces variables plus fort que les autres), ce qui traduirait une situation où la fertilisation minérale est contrôlée par des cultures avec de faibles surfaces. Cette hypothèse ne pourrait se justifier que dans le cas où les cultures minoritaires en terme de surface (par exemple les légumes) seraient fertilisés de façon beaucoup plus importante que les autres cultures. Un autre type de jeu de culture, comportant les cultures les plus importantes en terme de surface à l'échelle départementale (blé tendre, orge, prairies permanentes, ...) a été mis en relation avec la fertilisation minérale. Différentes contraintes ont été appliquées à l'estimation des

coefficients de régression : absence de constante dans la régression (ce qui contraignait une fertilisation égale à zéro dans le cas où les surfaces des cultures introduites dans le jeu de cultures testées étaient nulles), positivité des coefficients. L'ensemble de ces régressions montraient des résidus des erreurs d'estimations qui ont conduit à écarter le calcul de la fertilisation minérale par ces méthodes. Par exemple, la méthode "géographique" appliquée sur un jeu de 13 surfaces cultivées (blé tendre, maïs, avoine, orge, seigle et méteil, tabac, betterave, colza, pomme de terre, vigne, betterave et choux fourragers, prairies permanentes) avec une contrainte sur l'absence de constante dans la régression peut modéliser des fertilisations départementales différentes de la valeur fournie par l'UNIFA de -63 à 62 kgN.ha⁻¹ (Figure IV-29-A). La méthode "temporelle", appliquée sur le même panel de culture, montre que les différentes cultures sont mieux prises en compte, l'équation développée à partir de cette méthode étant basée sur 9 cultures au lieu de 3 dans le cas de la méthode précédente. Cependant, les valeurs modélisées avec l'utilisation de l'équation développée avec la méthode "temporelle" peuvent différer de la valeur réelle de -145 à +68.7 kgN.ha⁻¹ (Figure IV 29-B).

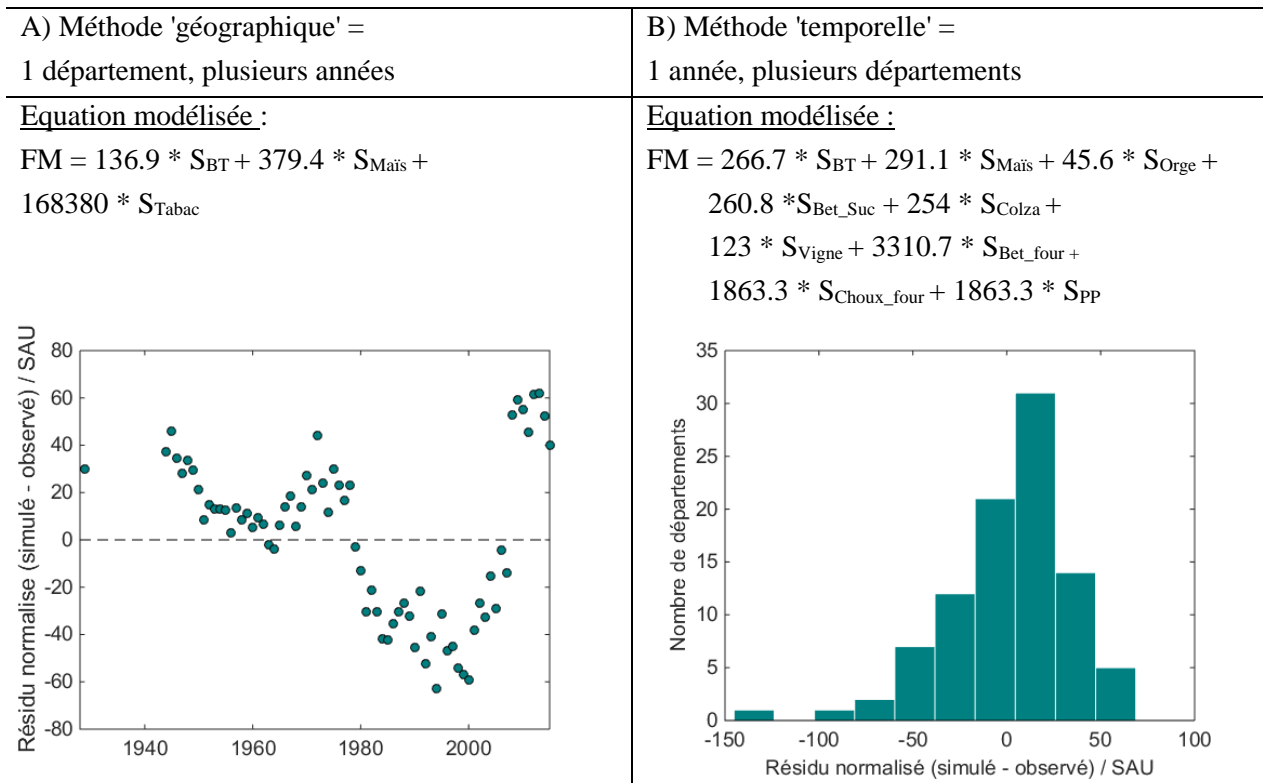


Figure IV-30 : Résidus des équations linéaires multiples déterminées selon A) la méthode dite "temporelle" pour l'année 1990, B) pour la méthode dite "géographique" pour le département de la Seine-et-Marne. FM : fertilisation minérale en kgN, BT : blé tendre, Bet_suc : betterave industrielle, Bet_four : betterave fourragères, Choux_four : choux fourragers, PP : prairies permanentes.

IV.3.2. Rendement des cultures

Le rendement des cultures est déterminé par des caractéristiques propres à la plante (matériel génétique), les facteurs de production (disponibilité en nutriment, rayonnement solaire) et des conditions de croissance (qualité de l'implantation des semences, température, enracinement, structure du sol, eau) (Hirel *et al.*, 2011; Vilain, 1997b). Une partie de ces paramètres dépend du type de sol sur lequel la culture est développée, particulièrement en ce qui concerne le fonctionnement hydrique (réserve utile du sol), les apports de nutriments et la facilité d'implantation des cultures.

En estimant la production à partir des surfaces communales et du rendement départemental fourni par la SAA, le modèle CASSIS_N considère que ce dernier est homogène sur l'ensemble du département. Hors les composantes du rendement telles que le type de sol où les pratiques agricoles ne sont pas homogènes sur un département. Des valeurs de rendement à plus fine échelle, collectées dans le cadre des enquêtes annuelles sur les terres labourables, ont pu être récupérées auprès de la DRAAF de la région Centre pour l'année 2010. La prise en compte des rendements fournis à l'échelle des régions agricoles permet le calcul d'un export d'azote par le blé tendre pouvant différer de +1.6 à -7.5 kgN.ha⁻¹ que ceux calculé avec le rendement fourni par la SAA (64.97 q.ha⁻¹) (Figure IV-30).

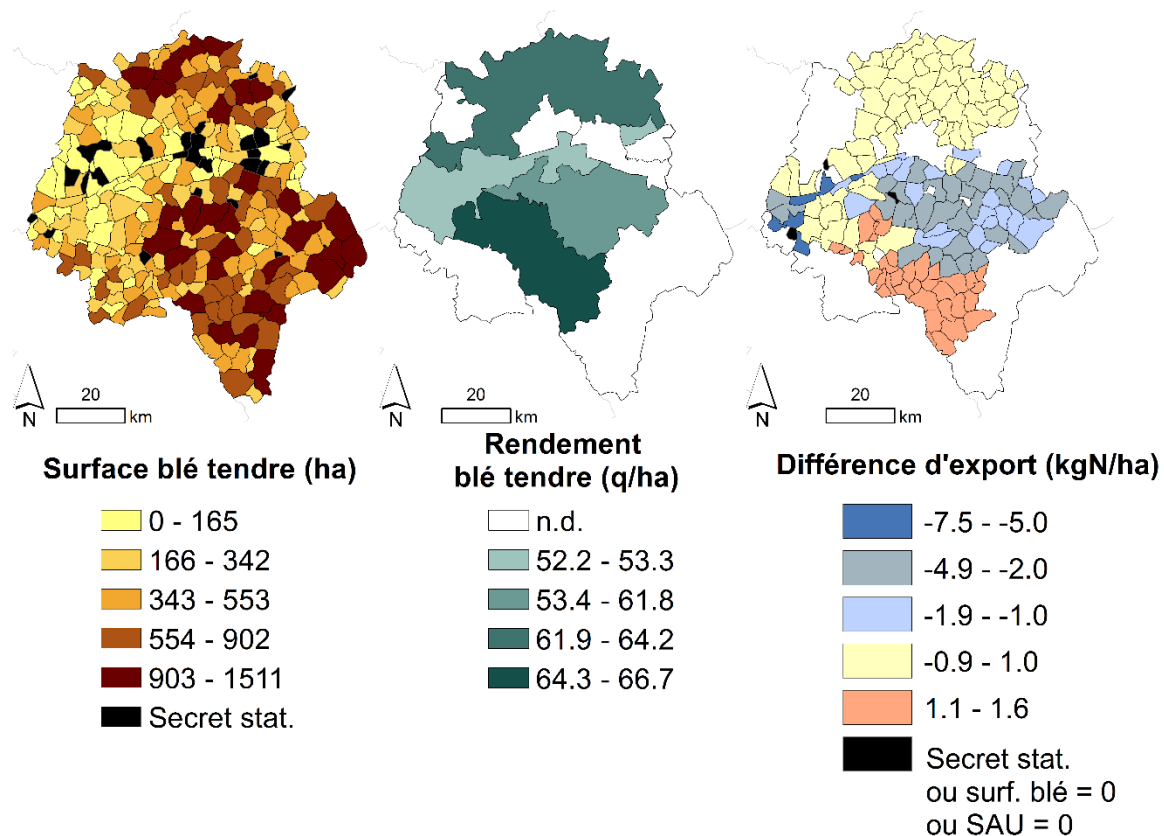


Figure IV-31 : Variation du rendement du blé tendre en Indre-et-Loire à l'échelle de régions agricoles pour l'année 2015. (source des valeurs de rendement : DRAAF région Centre, source des valeurs de surface en blé tendre : RA 2010, <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>). Note : le rendement du blé tendre indiqué par la SAA pour l'année 2010 est 64.97q.ha⁻¹.

Cette constatation soulève le problème de l'échelle de disponibilité des résultats de rendement. En effet, l'échelle départementale à laquelle les résultats de rendement sont fournis n'est pas forcément pertinente d'un point de vue agricole. Le besoin de découper le territoire en un découpage plus objectif vis à vis des réalités agricole, rendant compte des facteurs de production (sol, géologie) mais aussi des orientations techniques et économiques des exploitations n'est pas nouvelle. C'est dans ce but qu'ont d'ailleurs été créées les régions agricoles après la seconde guerre mondiale (Louault, 1982). Les enquêtes terres labourables semblent donner les informations à cette échelle mais les résultats ne renseignent pas l'ensemble du territoire, le sud-est du département de l'Indre-et-Loire n'est par exemple pas renseigné (Figure IV-30). De façon générale, le champ géographique de cette enquête ne concerne les 66 départements les plus concernés par les grandes cultures, d'autre part, cette enquête n'a été réalisée que depuis 1990 (<https://www.cnis.fr/>). Il y aurait donc des problèmes d'ordre spatial et temporel pour l'application de cette donnée dans CASSIS_N.

IV.3.3. Flux d'azote non considérés

Les flux d'azote non considérés à l'échelle communale sont les mêmes que ceux non pris en compte à l'échelle départementale (partie III.4.1) c'est à dire les apports d'azote par les semences, l'eau d'irrigation, les PRO (boues de STEP, résidus de l'industrie), ainsi que les échanges de fourrage et fertilisants organiques. Cependant, certains flux qui semblaient pouvoir être négligeables à l'échelle départementale peuvent prendre une importance majeure à l'échelle communale. Les échanges de fertilisants organiques sont tout particulièrement visés ici, en particulier dans les zones connues pour être en zone d'excédent structurel (plus de 170 kgN.ha⁻¹ d'azote organique produit) où la législation interdit l'épandage de la totalité de l'azote organique. L'export de fertilisants organiques hors de la zone en excédent est alors encouragé. Autant ces flux peuvent être considérés comme négligeables à l'échelle départementale du fait du prix de leur transport, autant ces flux ne devraient pas être négligés au niveau communal. Ces derniers ne sont actuellement pas quantifiés mais la législation en vigueur indique que "Les quantités d'azote épandues chez les tiers ou provenant de tiers figurent sur les bordereaux d'échanges d'effluents prévus au IV de la présente annexe" (Annexe du 5^{ème} programme d'action relatif à la directive nitrate de 2011). Il existe donc une trace de ces échanges depuis 2011, mais ces données ne semblent pas avoir été compilées.

V. Chapitre 5 : Discussion générale

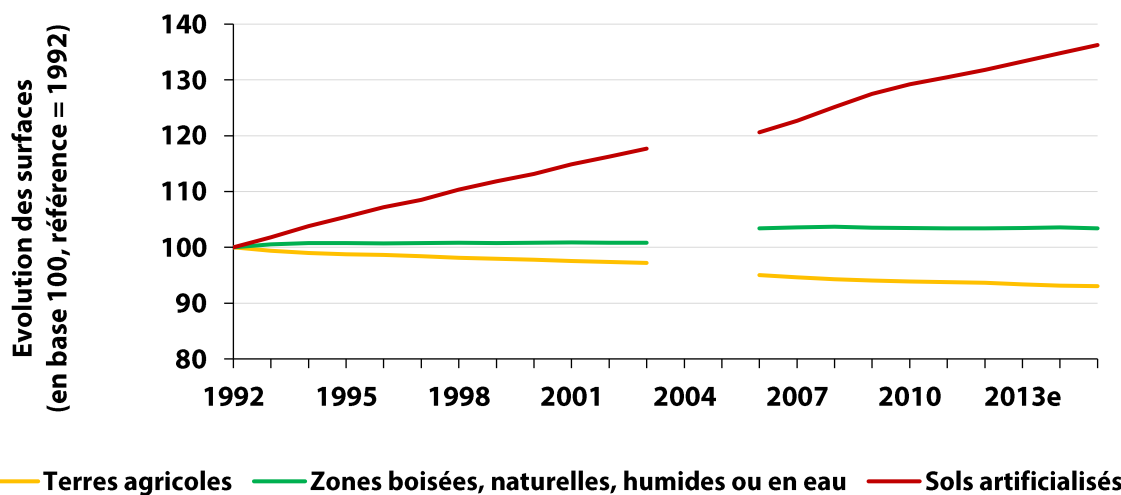
Les pressions azotées en France sont globalement en baisse depuis les années 1990. Cependant à une échelle plus fine, certaines zones sont toujours caractérisées par une augmentation des pressions azotées, d'autres zones par des pressions azotées relativement fortes. Du point de vue des balances azotées, quelles sont les évolutions qui peuvent être attendues ? Les quatre parties de cette section visent à donner des éléments généraux de contexte qui pourraient permettre de prévoir l'évolution des pressions azotées dans le futur.

V.1. Les exports d'azote

L'export d'azote à partir des cultures est sous-tendu par deux facteurs : l'évolution de la surface des cultures et/ou la modification du rendement des cultures.

- Evolution des surfaces cultivées

L'occupation du sol sur les 15 dernières années en France montre une régression des surfaces cultivées (Figure V-1) au profit des zones artificialisées, plus particulièrement au profit de l'habitat individuel (Agreste, 2015b, 2009b). Cette baisse des surfaces irait plutôt dans le sens d'une baisse des exports d'azote et donc d'une hausse des surplus azotés.



Note : Le passage de Teruti à Teruti-Lucas a induit une rupture de série entre 2003 et 2006 liée à des changements de nomenclatures et d'échantillons enquêtés. 2011 et 2013 estimés. France métropolitaine.

Source : SDES d'après ministère chargé de l'Agriculture (SSP), enquêtes Teruti puis Teruti-Lucas

Figure V-1 : Evolution de l'occupation du sol en France entre 1992 et 2015 (terre agricole, zones artificialisées ou zones boisées, naturelles, humides ou en eau) (source : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>)

- Evolution du rendement des cultures

Le rendement des cultures est déterminé par les caractéristiques génétiques de la plante, les facteurs de production et les conditions de croissance. Dans des conditions idéales, la culture peut théoriquement se développer jusqu'à un rendement optimum. Cependant, des facteurs limitants comme la présence de maladies, les insectes, une carence en un nutriment, la compétition avec les adventices ou les autres végétaux cultivés peuvent entraver le développement de la plante. Des pratiques agricoles adaptées pourraient contribuer à éviter ces freins à la croissance des cultures (Cassman *et al.*, 2002) et ainsi assurer un rendement optimal.

Le rendement des cultures en azote, défini comme l'azote récolté dans les parties matures de la culture, divisé par l'azote total apporté durant la période de croissance, dépend à la fois de l'efficacité des racines à capturer l'azote, et aussi de la capacité de la plante à réallouer l'azote extrait du sol aux organes qui seront récoltés par la suite (Barraclough *et al.*, 2010; Hirel *et al.*, 2011). Ces capacités peuvent être modifiées par le biais de la sélection variétale ou de la modification génétique, comme cela a été le cas pour le tabac, le blé tendre, le maïs, le riz ou le colza (Hirel *et al.*, 2011).

En condition réelles, certains auteurs pensent que des cultures comme le blé tendre auraient atteint un plafond de rendement. D'après Gate *et al.*, ce plafond serait dû au réchauffement climatique qui générerait des conditions climatiques défavorables durant des stades critiques du développement du blé. Ainsi l'échaudage (excès de chaleur pendant le remplissage du grain) et la sécheresse pendant l'élongation de la tige seraient à l'origine du plafonnement des rendements du blé tendre (Gate *et al.*, 2010). D'autres auteurs prévoient au contraire une augmentation du rendement du blé tendre à l'échelle de l'Europe à l'horizon 2080 (Schöter *et al.*, 2005, cité dans Bindi et Olesen, 2011). Cette situation de plafonnement des rendements sur le blé tendre n'est pas homogène au sein du territoire : elle ne serait pas identifiée dans le Nord-Ouest de la France (Agreste Auvergne, 2013). L'évolution du rendement d'autres cultures semblent montrer un plafond de rendement à l'échelle nationale (avoine, luzerne, prairie temporaire, maïs, Figure III-12). La betterave sucrière, quant à elle, semble profiter de la hausse des températures dues au changement climatique et présente une augmentation de son rendement (Escriou *et al.*, 2010). Le changement climatique devrait générer une augmentation des accidents climatiques en Europe, qui devraient introduire plus de variabilité dans les rendements (Bindi et Olesen, 2011).

D'autre part, dans une moindre mesure, la baisse de la fertilisation azotée participerait aussi à la stagnation de rendements comme celui du blé tendre (Gate *et al.*, 2010).

En conclusion, les surfaces agricoles sont en régression à l'échelle de la France, ce qui pourrait correspondre à une évolution des exports à la baisse. Cependant, l'évolution des rendements est contrastée géographiquement et suivant les cultures considérées. Le contexte du changement climatique rajoute de l'incertitude sur l'évolution du rendement. Il semble donc difficile de statuer sur l'évolution des exports d'azote.

V.2. Concentration et importance de la fertilisation organique

L'évolution de la fertilisation azotée d'origine organique est dépendant de deux facteurs : le changement du nombre de tête de cheptel sur une zone considérée ou la modification de la quantité d'azote excrétée par les animaux.

- Évolution de l'importance et de la concentration du cheptel

La répartition actuelle du cheptel est la résultante de l'évolution de la distribution des activités agricoles. Cette dernière est liée aux facteurs de production locaux mais aussi à la mise en concurrence (i) des régions entre elles (ii) des pays entre eux à l'échelle européenne et mondiale. D'après la théorie des avantages comparatifs, les exploitations ont intérêt à se spécialiser dans les productions où elles sont les moins mauvaises par rapport à leurs partenaires commerciaux. Selon cette théorie, les exploitations agricoles, se spécialisent selon les critères pédoclimatiques favorisant un type de culture. La mécanisation ayant rompu le lien entre culture des céréales et présence du bétail, il n'y a plus de raison pour que ces deux activités perdurent sur les mêmes territoires. La production de céréales s'est effectivement concentrée sur les sols les plus profonds caractérisés par une bonne réserve hydrique (réserve utile), présentant une bonne fertilité (Figure V-2) et localisés dans une zone climatique favorable (bassin parisien par exemple). L'activité d'élevage des bovins¹³ est "repoussée" dans les zones où les céréales ne sont pas favorisées par les conditions agropédoclimatiques et où le climat permet la culture du fourrage : le Nord-Ouest et le Massif Central en particulier (Figure V-3).

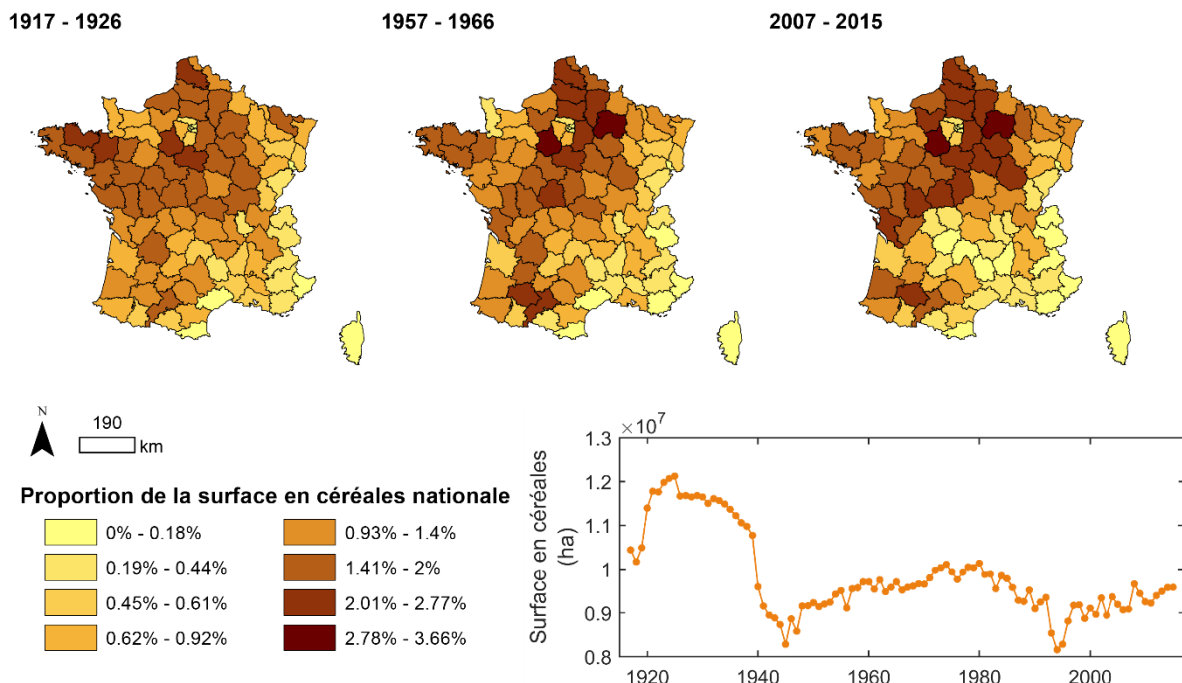


Figure V-2 : Evolution et répartition de la surface en céréales en France (source : SAA 1917 à 2015)

¹³ Les bovins constituant la principale source de fertilisation organique (cf. chapitre3), seule la répartition de ce type de cheptel est traité ici.

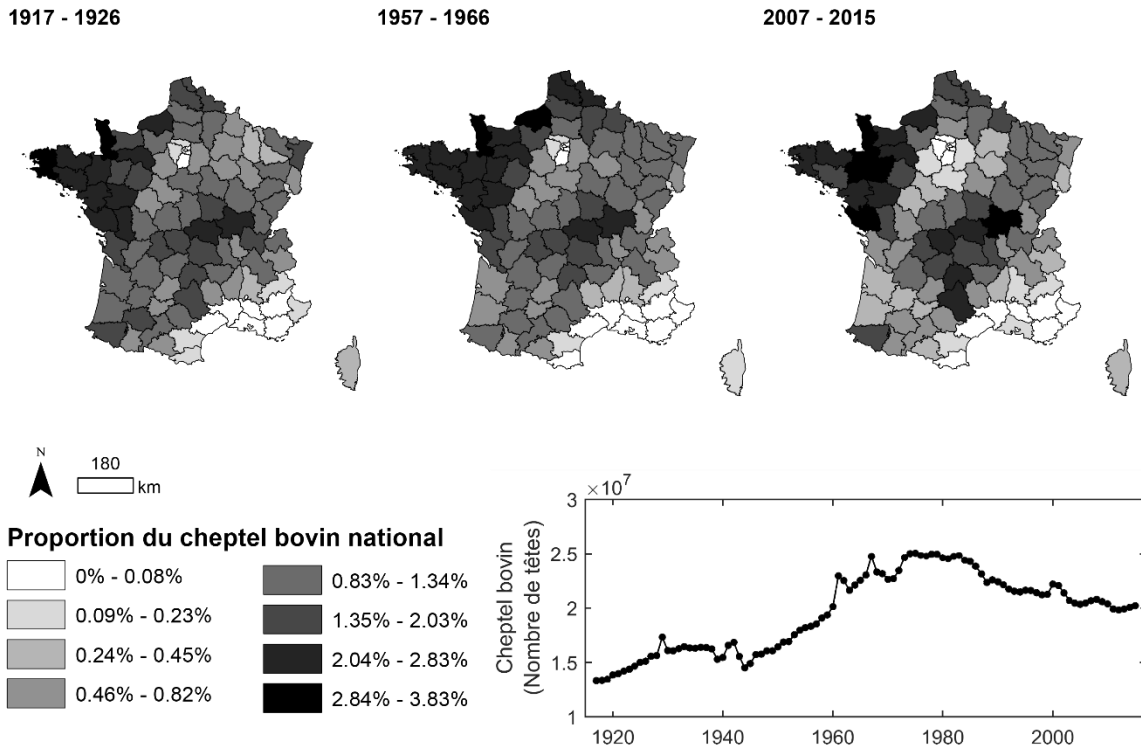


Figure V-3 : Evolution et répartition du cheptel bovin en France

D'autres facteurs économiques tels que la baisse des prix liée aux économies d'échelles favorisent la concentration, l'agrandissement des exploitations et la spécialisation des territoires. Pour des raisons d'économies sur les coûts de transport, les producteurs sont incités à se concentrer autour des industriels, contribuant ainsi à la concentration des activités agricoles comme la production laitière (Gaigné, 2012). D'autre part, la première version de la PAC a subventionné les produits animaux et a encouragé le développement des activités d'élevage dans des zones déjà spécialisées. Cela a aussi favorisé la concentration du cheptel.

La concentration de ces exploitations d'élevage génère des flux d'azote qui sont localement à l'origine de pressions azotées importantes. Cependant, la régulation environnementale et les politiques européennes ont freiné cette concentration.

Le premier frein à cette concentration a été l'établissement des quotas laitiers en 1984 qui a pu freiner le développement du cheptel bovin laitier dans les régions spécialisées dans la production de lait. Le deuxième frein est la mise en place de la directive nitrates en 1991. Cette dernière impose un plafond aux doses d'engrais organiques épandues (170 kgN.ha^{-1} sauf dérogation). Avec cette directive, le lien entre élevage et foncier réapparaît par le biais du problème de l'épandage. Cependant, selon Gaigné, cette directive a finalement peu d'effet sur la concentration des animaux dans les zones avec une forte densité animale (Gaigné, 2012). À partir de 1992, les premières mesures agro-environnementales font leur apparition dans la PAC. Les mesures proposées comprennent entre autres des aides pour la diminution de la densité de cheptel. En France, cela s'est traduit par le biais de la mise en place d'une prime à l'herbe visant à réduire la pression du cheptel mais aussi à maintenir les systèmes extensifs (Bonnieux, 2009). En effet, ce mode d'intervention permet de maintenir des productions agricoles moins bien positionnées en terme de marché en particulier les bovins viande dans le massif central

(Ben Arfa *et al.*, 2009). En 1999, les mesures agri-environnementales sont placés au cœur du dispositif d'aide et deviennent "le deuxième pilier" de la PAC. Aujourd'hui le programme d'action de la directive nitrate conditionne l'obtention des aides PAC au respect des limites d'épandage et les flux de fertilisation azotée organique entre exploitations doivent être mentionnés.

Le contexte actuel laisse peu de visibilité sur l'évolution de l'importance du bétail en particulier dans les zones en excédent structurel. La fin des quotas laitiers en 2015 devrait se traduire par une plus grande libéralisation du marché et favoriser de nouveau la hausse du cheptel bovin et sa concentration. En revanche, le prix de l'énergie augmentant, le prix des transports va croître et diminuer les possibilités de réduire la quantité d'azote à épandre via l'export d'azote organique à d'autres exploitations, ce qui pourrait limiter la concentration du cheptel sur les zones concernées.

- Modification de l'excrétion azotée

Des recherches ont été menées dans le but de réduire l'excrétion azotée du bétail, en ajustant l'apport d'azote par la nourriture aux besoins des animaux selon leur stade physiologique. Par exemple, l'alimentation biphasé, développée pour les porcins depuis 1996, permet la réduction des rejets d'azote de 15 à 20%. D'autres recherches concernant la nutrition azotée des monogastriques ou des ruminants sont en cours. L'amélioration génétique est aussi une voie de réduction possible de l'excrétion azotée (Peyraud *et al.*, 2012).

En conclusion, la concentration du bétail a été initiée par des facteurs historiques et économiques. Cette concentration a généré des excédents structurels qui peuvent être mis en relation avec des surplus importants en particulier dans le Nord-Ouest de la France. La PAC a dans un premier temps favorisé cette concentration. Depuis 1992, l'introduction de mesures environnementales, dont l'importance s'est renforcée, contribuent à limiter la concentration du cheptel bovin et donc la présence d'excédent structurels. Le contexte de libéralisation du marché du lait, de la hausse du prix de l'énergie, et l'avancée des connaissances et des pratiques de gestion des effluents ne permettent pas d'anticiper l'évolution de la fertilisation organique.

V.3. Le regain d'intérêt pour l'utilisation des légumineuses

Les légumineuses sont des végétaux qui sont capables de réaliser la fixation symbiotique. Une partie de ces légumineuses est cultivée pour l'alimentation du bétail (trèfle, luzerne, sainfoin, soja). Les légumineuses ont vu leur sole régresser du fait de la mécanisation de l'agriculture et la généralisation de la fertilisation minérale. Des choix politiques effectués dans les années 1960 ont aussi contribué à un recul des surfaces en légumineuses. La signature d'accords avec les Etats-Unis a permis l'entrée du soja américain dans le territoire français, sans droit de douane. Ce dernier est utilisé dans l'alimentation animale pour son apport protéique. Il constitue un très bon complément à l'utilisation du maïs fourrage, ce dernier apportant quant à lui l'énergie et la matière sèche à l'animal. Le maïs fourrage étant par ailleurs subventionné par la PAC, le système d'alimentation des bovins "maïs fourrage-soja" s'est développé avec du soja provenant de l'étranger. Ce système a contribué à mener la France et l'Europe à une situation de dépendance vis à vis des imports de protéines végétales pour

l'alimentation animale. En 2011-2012, la France et l'Europe dépendaient des apports de protéines végétales provenant de l'étranger à hauteur de 37% et 65% respectivement, selon les estimations du Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt (Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la F, n.d.). De façon assez récente, les pays producteurs de soja de l'Amérique du Sud sont devenus les principaux fournisseurs de protéines sous forme de soja de l'Europe (Lassaletta *et al.*, 2014).

Pour tenter de sortir de la dépendance en protéine vis à vis des imports extérieurs, des aides ont été mises en place pour promouvoir la production de légumineuses. Aujourd'hui, le "plan protéine" propose plusieurs volets pour promouvoir la production de légumineuses sur le territoire dont (i) un système d'aides PAC pour la production de légumineuses fourragères, de soja, de protéagineux (pois, féverole, lupin) et de semences de légumineuses fourragères, (ii) la mise en place d'un programme de recherche et développement. Un projet visant à promouvoir la culture de protéagineux a encore été présenté récemment au parlement européen non seulement pour les objectifs de reconquête de l'autonomie protéique, mais aussi pour des raisons de sécurité alimentaire et pour les avantages agronomiques que les légumineuses procurent par la fixation symbiotique (Denanot, 2017). De plus, aujourd'hui, pour produire la même quantité d'azote les légumineuses, sont aujourd'hui considérées comme une alternative moins coûteuse que la fertilisation minérale (Hirel *et al.*, 2011).

Les politiques publiques visent à promouvoir de nouveau la production de légumineuses sur le territoire. Dans ce cadre, l'entrée d'azote par la fixation symbiotique pourrait augmenter de façon significative.

V.4. L'équilibre de la fertilisation azotée

Les produits de l'agriculture française sont aujourd'hui soumis au commerce mondial et à ses règles. La compétitivité des exploitations passe par l'emploi de pratiques culturales qui minimisent la prise de risque par les agriculteurs et assurent un revenu financier. La fertilisation minérale azotée est un amendement pour lequel il est possible de connaître de façon relativement plus précise les doses épandues (modulo la perte d'azote vers l'atmosphère) par rapport à la fertilisation organique, dont le contenu en azote est variable selon de nombreux facteurs. Dans certains départements, la fertilisation minérale semble être ajoutée en plus de la fertilisation organique, sans tenir compte de l'apport réel constitué par cette dernière. Les résultats obtenus dans le Finistère montrent ainsi une situation où la fertilisation organique et la fixation symbiotique pourraient suffire à assurer le besoin des cultures (Figure III-16-A et C).

Depuis, l'année 1988, la France est dotée d'outils de rationalisation de la fertilisation azotée, avec la publication de la méthode des bilans CORPEN (CORPEN, 1988), le développement d'outils de prévision de la dose à apporter (logiciel informatique AzoFert basé sur les bilan azoté sol-système, Machet *et al.*, 2007) et le diagnostic de l'état nutritionnel azoté des plantes qui permet un fractionnement efficace des apports d'azote (méthode jubil, Bodilis *et al.*, 1998). En 1991, la directive nitrate fait entrer la gestion de la fertilisation azotée dans la législation. Aujourd'hui, le 5^{ème} programme d'action, qui traduit la directive européenne dans le droit Français, contient des éléments

de sanction financière en cas de non-respect des règles de tenue de rationalisation de la fertilisation azotée, tels que la perte des primes PAC et d'autres sanctions (amendes, détention) au titre de l'article L-216-6 du code de l'environnement (*Code de l'environnement - Article L216-6*). Cependant, les expériences menées dans le cadre de restauration de la qualité de l'eau vis à vis des nitrates ou des pesticides montrent que la gestion partenariale, engageant les acteurs du terrain, paraît plus performante que le conseil prescriptif pour le développement de pratiques plus respectueuses de l'environnement (Benoît *et al.*, 1997; Hellec *et al.*, 2013; Brives *et al.*, 2015).

Les tentatives pour équilibrer la fertilisation azotée ne sont donc pas nouvelles. Le travail présenté au cours de cette thèse montre effectivement une baisse des pressions azotées au niveau des agrosystèmes pour la majorité du territoire. Cependant, les baisses de concentration en azote dans les hydrosystèmes se font attendre et le plus souvent le retard de l'observation de l'amélioration de l'état des eaux est imputé au temps de réponse des bassins aux modifications des pressions azotées.

VI. Conclusion et perspectives

VI.1. Conclusion

Avant le début de ce travail, l'évaluation des pressions azotées permettait de quantifier ces dernières à fine échelle pour deux années seulement (SOeS, 2013, 2012) où pour un demi-siècle à l'échelle du pays entier (Bouraoui et Grizzetti, 2011). L'objectif était donc de pouvoir quantifier l'évolution des pressions azotées à la fois à fine échelle et sur une période englobant les dates de faits significatifs pour la modification de l'agriculture : la révolution verte et la directive nitrates.

- Ce travail a permis le développement d'un modèle de balance azotée permettant d'obtenir des chroniques de surplus azotés.

Ce modèle, relativement simple, décrit les flux d'azote entrant et sortant du sol. Les hypothèses nécessaires à son application sont peu nombreuses, ce qui justifie son choix à l'égard de la période et du territoire d'étude. Cependant, les paramètres du modèle ont été choisis de façon à prendre en compte la variabilité des situations agricoles dans le temps et dans l'espace (Tableaux II-6, II-7, II-10, II-11, II-12). Deux types de données sont disponibles sur cette période de temps : la SAA et le RA (partie II-2). La première est une source de donnée statistique qui contient de ce fait des approximations mais qui remonte au moins jusqu'au début du siècle. Le RA est une source de donnée exhaustive mais qui n'est disponible que ponctuellement dans le temps.

- Ce travail a nécessité la constitution de deux bases de données agricoles : l'une à l'échelle départementale sur la période 1917 à 2015, l'autre à l'échelle communale pour l'année 1955.

Le modèle appliqué aux données de la SAA permet l'obtention de résultats à l'échelle départementale, la combinaison des deux jeux de données permet l'obtention de chroniques de résultats à l'échelle communale.

- L'application du modèle aux données départementales permet d'identifier les tendances des pressions azotées sur 99 ans à l'échelle départementale.

Les résultats départementaux, agrégés à l'échelle de la France, permettent de calculer la chronique des surplus azotés et la trajectoire de l'azote caractérisant le territoire national. Ces résultats sont similaires aux ceux présents dans la littérature (Anglade, 2015; Bouraoui et Grizzetti, 2011). Ces deux chroniques montrent une évolution en deux phases : la première période étant caractérisée par une augmentation des pressions azotées (1960 à 1990), la deuxième par une décroissance (après 1990). À l'échelle départementale, les évolutions des pressions azotées sont contrastées. Les différentes méthodes pour éprouver les tendances des surplus au niveau départemental (détection de tendances sur

des périodes fixes, détection automatique des points de rupture et identification des tendances ou détection et identification visuelle des points de rupture et des tendances) s'accordent toutes à montrer que la majorité des départements présente une amélioration des pressions azotées (Tableau VI-1). Le pendant de ce résultat est qu'un certain nombre de départements présentent des pressions azotées toujours croissantes, ce qui semble assez surprenant au regard du cadre législatif de plus en plus contraignant visant à l'équilibre de la fertilisation azotée.

Tableau VI-1 : Tendances des pressions azotées pour les départements Français sur la période 1917 à 2015

Types de changement de tendances	Nombre de départements		
	Date de rupture fixée en 1991	BFAST	Interprétation <<visuelle>>
Modification de tendance			
Dernier changement = arrêt de l'augmentation des pressions (C -> D, C -> S)	74	65	69
Dernier changement = augmentation des pressions (D -> C ou S -> C)	3	6	11
Autre (D -> S, ou S -> D)	6	14	7
Tendance stable			
Croissant (CC)	5	4	2
Stable (SS)	5	3	4
Décroissant (DD)	1	2	1
Total	94	94	94

- L'étude des facteurs de contrôle de l'évolution des surplus permet une meilleure compréhension de leur évolution.

Pour la majorité des départements, l'évolution des postes constitutifs de la balance azotée peut être décrite par les tendances suivantes (Figure VI-1) :

- l'export d'azote présente une évolution en trois phases, la première relativement stable entre 1917 et les années 1950, une augmentation forte entre les années 1950 et les années 1970-80, puis une croissance relativement faible ou une stabilité;
- la fertilisation organique présente une évolution en une ou deux phases. Dans le cas d'un département plutôt orienté vers la production de viande (Figure III-18), la fertilisation organique est généralement en augmentation sur l'ensemble de la chronique. Ces départements, majoritairement en zone de montagne, profitent certainement des primes à l'extensification proposées par la politique européenne pour développer leur élevage. Dans les départements orientés vers la production de grandes cultures ou vers la production de lait, la fertilisation organique évolue en deux phases : la première présente une croissance, la deuxième est caractérisée par une décroissance démarrant de façon relativement synchrone avec l'apparition des quotas laitiers dans les départements tournés vers la production de lait (Figure III-17), et de façon plus précoce pour les autres (Figures III-15 et 16);
- la fixation symbiotique, est de façon générale, en décroissance sur l'ensemble de la période d'étude, hormis sur les départements de montagne;
- la fertilisation minérale augmente de façon importante entre les années 1940 et les années 1990, puis présente une décroissance ou une stabilité. Cette inversion de tendance est d'ailleurs à l'origine de l'amélioration des pressions dans une grande majorité des départements (66 ou 67

départements selon la méthode d'identification des points de rupture). La fertilisation minérale est aussi le poste qui contrôle le plus l'évolution des surplus. Ce résultat semble logique dans les départements consacrés aux grandes cultures mais il est plus surprenant dans les départements consacrés à l'élevage. Dans certains de ces départements, la quantité d'azote apportée par la fertilisation organique et la fixation symbiotique permettraient pourtant quasiment de s'affranchir de la fertilisation minérale. Les surplus azotés sont le reflet de l'évolution des pratiques agricoles, qui découlent elles-mêmes d'un choix des agriculteurs face à un ensemble complexe de facteurs tels que la situation du commerce mondial des denrées alimentaires, les politiques européennes et nationales et les caractères physiques (sol, climat, pente,...) de la zone considérée. La multiplicité des facteurs pouvant influencer les postes de la balance ne permettent pas de prévoir l'évolution future des pressions azotées.

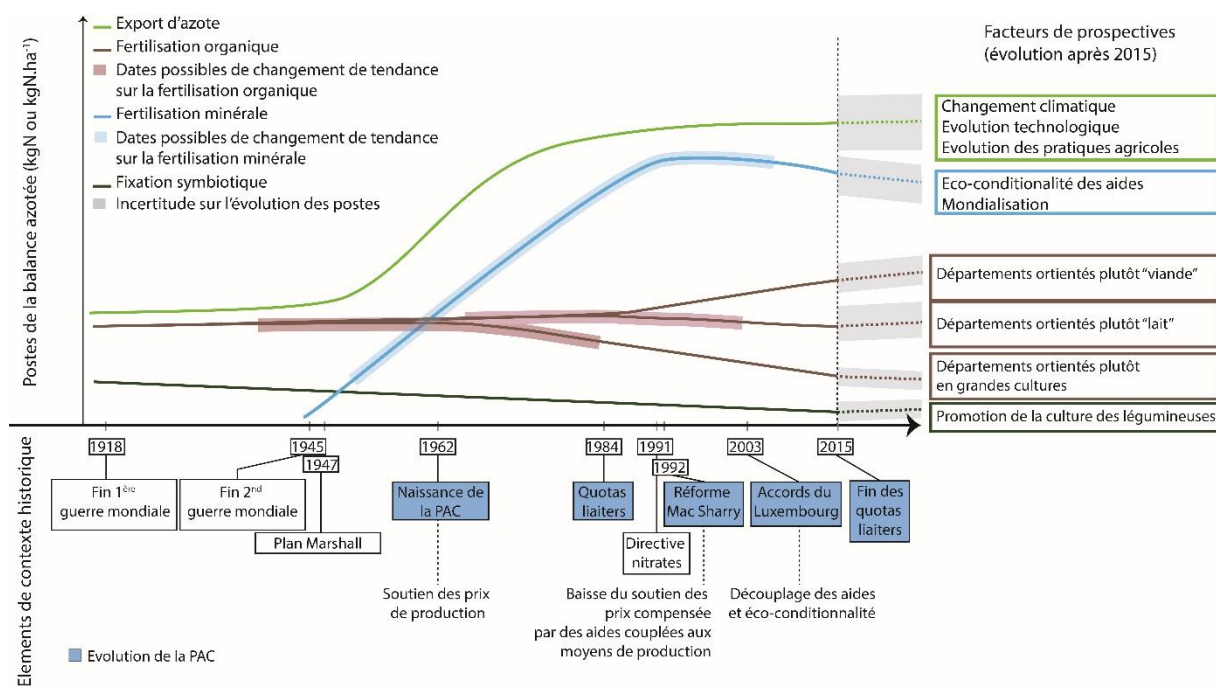


Figure VI-1 : Schéma d'évolution des postes de la balance azotée

- Le modèle appliqué à la combinaison des données de la SAA et des RA permet l'obtention de 61 années de résultat de pressions azotées à l'échelle communale pour la période 1955 à 2015.

L'analyse menée sur les résultats communaux a permis de montrer que les surplus communaux étaient variables et dispersés par rapport au surplus départemental, et ce dès le début de la période d'étude. L'étape de désagrégation est donc nécessaire pour décrire la variabilité spatiale des surplus communaux. Sur trois départements présentant des contextes et productions agricoles différentes, les variables agricoles qui sous-tendent la variabilité des surplus communaux sont les mêmes en 1955 (vaches laitières) et sont relatives à la spécialisation des communes et à l'orientation agricole des départements en 2010.

La comparaison des résultats obtenus à l'échelle cantonale avec le modèle de balance azotée déjà existant pour l'année 2010 (SOeS, 2013), montre des similitudes sur la plupart des postes de la balance azotée mais met en exergue la différence d'estimation de la fertilisation minérale. La critique majeure concernant le modèle CASSIS_N appliquée aux deux échelles d'étude concerne d'ailleurs l'estimation de la fertilisation minérale. Compte tenu des données disponibles et de la période de temps visée, des données statistiques ont été sélectionnées. Cependant, ces données sont sujettes à des perméabilités géographiques et temporelles et il est difficile de statuer sur la pertinence de cette donnée par rapport aux pratiques réelles des agriculteurs. L'amélioration de l'estimation de ce poste constitue la principale perspective d'amélioration pour le modèle.

VI.2. Perspective d'utilisation des résultats

Les bases de données agricoles constituées au niveau départemental et communal forment un apport non négligeable pour des problématiques relatives à l'agriculture autre que l'étude des pressions azotées. Moyennant la mise à jour des bases de données des contenus en nutriment des différentes cultures, les bases de données agricoles et le programme construits lors de cette thèse pourraient servir à calculer des balances pour les autres nutriments majeurs, tels que le phosphore ou le potassium, aux échelles départementales et communales. D'autre part, à partir des bases de données agricoles, il est possible de caractériser l'occupation du sol à diverses échelles. Ce genre de renseignement peut être intéressant pour d'autres problématiques environnementales telles que l'étude de l'érosion des sols agricoles, certaines cultures étant connues pour la favoriser (cultures de printemps laissant les sols nus en hiver ou au contraire prairies permanentes réduisant les possibilités d'érosion et la connectivité sur les versants).

Les résultats de ce modèle sont téléchargeables sur une page web à l'échelle d'un découpage choisi par l'utilisateur. Les résultats de ce modèle ainsi agrégés peuvent être valorisés vis à vis de problématiques telles que l'identification des tendances des pressions azotées sur une zone hydrologique (masse d'eau, bassin versant, bassin d'alimentation de captage). Ces pressions peuvent être comparées à des mesures de qualité des eaux relevées au niveau de stations de qualité des eaux, ou au niveau des captages d'alimentation en eau potable. Ces comparaisons pourraient donner une estimation du temps de réponse des systèmes vis à vis de l'éventuelle modification des pressions azotées (Figure VI-2).

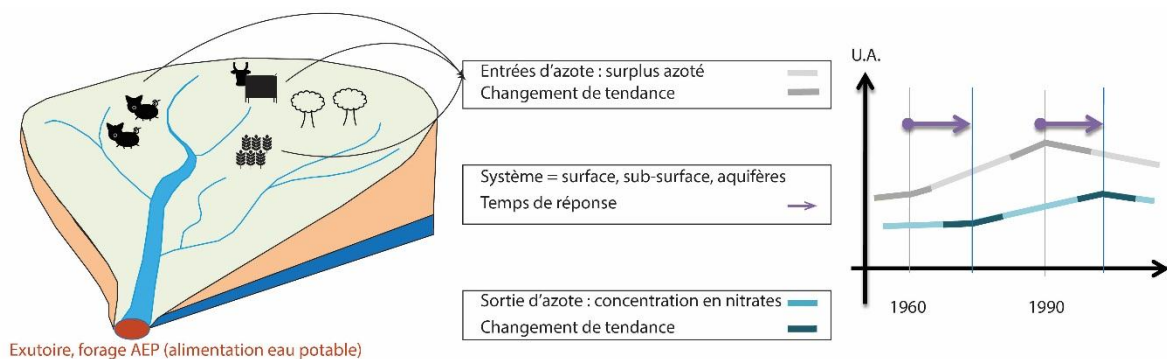


Figure VI-2 : Méthode d'estimation des temps de réponse des systèmes aux modifications de pression azotée

Enfin, les surplus azotés obtenus lors de ce travail pourraient être valorisés en tant que données d'entrée dans différents types de modèles comme des modèles visant à simuler le fonctionnement biogéochimique ou à calculer les flux d'azote au niveau de cours d'eau.

Le modèle développé par Minaudo au cours de sa thèse (Minaudo, 2015) simule différentes variables biogéochimiques telles que la biomasse algale produite dans les cours d'eau (cyanobactéries, diatomées), la concentration en nutriments (nitrate, nitrite, phosphore inorganique total,...) ou encore des variables physiques caractéristiques de cours d'eau (oxygène dissous, matière en suspension) permettant ainsi de modéliser l'eutrophisation et ses conséquences. Ce modèle estime actuellement l'apport d'azote diffus en fonction de 7 classes d'usage des sols (urbain, terres arables, cultures permanentes, STH, forêts, zones humides, autres) sans tenir compte des flux d'azote entrant et sortant au niveau des sols agricoles. Les valeurs de surplus azotés pourraient être utilisées dans ce type de modèle pour l'estimation de l'apport diffus d'azote si toutefois elles sont couplées à l'utilisation de facteurs d'émission. En effet, les surplus azotés sont un indicateur des pertes potentielles d'azote par lixiviation et non des valeurs réelles d'azote perdu. Des facteurs d'émission sont par exemple utilisés pour estimer l'azote lixivié à partir des surplus azotés dans les modèles MITERRA ou IMAGE à l'échelle européenne (de Vries et al., 2011). Cependant, comme évoqué dans le premier chapitre, modéliser le devenir de l'azote dans les agrosystèmes et en particulier sa lixiviation, nécessite une quantité importante de données et/ou de faire de nombreuses hypothèses (teneur en matière organique du sol, précipitations efficace, type de sol, occupation du sol, profondeur d'enracinement pour MITERRA, teneur en matière organique du sol, précipitations efficace, température, texture du sol, drainage pour IDEAG).

Le modèle Nutting-N est un modèle à base statistique qui permet de lier les sources d'azote, les caractéristiques des bassins versants et des cours d'eau (Dupas *et al.*, 2013). Une fois calibré, ce modèle permet d'obtenir des estimations du flux d'azote spécifique annuel pour les nitrates sur l'ensemble du territoire français. Moyennant la disponibilité des autres données nécessaires à l'application de Nutting-N, l'utilisation des résultats issus de CASSIS_N dans ce modèle permettrait l'obtention de chronique de flux d'azote pour l'ensemble du territoire français pour la période allant de 1955 à 2015.

Bibliographie

- Agreste, 2017a. Document méthodologique de la statistique agricole annuelle.
- Agreste, 2017b. Les matières premières dans les aliments composés pour les animaux de ferme en 2015 - Davantage de recours aux tourteaux de tournesol, Primeur.
- Agreste, 2016. Rica France - Tableaux standard 2014 (N°. 233), Chiffres et Données.
- Agreste, 2015a. L'utilisation du territoire en 2014 - Teruti-Lucas (N°. 229), Chiffres et Données.
- Agreste, 2015b. L'artificialisation des terres de 2006 à 2014 : pour deux tiers sur des espaces agricoles (N°. 326), Primeur.
- Agreste, 2015c. Enquête Pratiques culturales sur les légumes 2013 Nombre de traitements phytosanitaires (N°. 27), Les dossiers.
- Agreste, 2014a. Méthodologie RICA France - Tableaux standard 2014.
- Agreste, 2014b. Enquête Pratique phytosanitaires en arboriculture 2012 - Nombre de traitement (N°. 22), Les dossiers.
- Agreste, 2013. Enquête pratiques culturales 2011 - Les traitements phytosanitaires sur les grandes cultures - Indicateurs de fréquence de traitement (N°. 18), Les dossiers.
- Agreste, 2012. Fortes disparités de protection contre l'oïdium et le mildiou (N°. 289), Primeur.
- Agreste, 2011. Enquête bovine au 1er novembre 2001 - Bâtiments d'élevage, Chiffres et Données.
- Agreste, 2010a. Notice Recensement agricole 2010 sur les Unités Gros Bétail.
- Agreste, 2010b. Recensement agricole 2010 (notice unité gros bétail).
- Agreste, 2010c. Questionnaire du recensement agricole 2010 - France métropolitaine.
- Agreste, 2009a. Rica France - Tableaux standard 2007 (N°. 203), Chiffres et Données.
- Agreste, 2009b. La maison individuelle grignote les espaces naturels (N°. 219), Primeur.
- Agreste, 2008a. Enquête structure - Présentation de l'enquête.
- Agreste, 2008b. L'utilisation du territoire en 2007 Teruti-Lucas (N°. 202), Chiffres et Données.
- Agreste, 2008c. Enquête sur les pratiques culturales en 2006 (N°. 200), Chiffres et Données.
- Agreste, 2008d. Enquête porcine au 1er novembre 2001 - Bâtiments d'élevage, Chiffres et Données.
- Agreste, 2006a. Lait et produits laitiers en 2004 (N°. 137), Chiffres et Données.
- Agreste, 2006b. Enquête ovine au 1er novembre 2001 - Bâtiments d'élevage, Chiffres et Données.
- Agreste, 2006c. Enquête caprine au 1er novembre 2001 - Bâtiments d'élevage (N°. 180), Chiffres et Données.
- Agreste, 2004. Enquête sur les pratiques culturales en 2001 (N°. 159), Chiffres et Données.
- Agreste, 2000a. Les prairies en 1998 (N°. 128), Chiffres et données.
- Agreste, 2000b. Questionnaire du recensement agricole 2000.
- Agreste, 1999. Enquête cuniculture 1994 - Les bâtiments d'élevage cunicole (N°. 42/43), Cahier.
- Agreste, 1998. Enquête Aviculture 1994 - Principaux résultats (N°. 104), Données Chiffrées.
- Agreste, 1997a. Lait et produits laitiers en 1995 (IAA N°. 65), Données Chiffrées.
- Agreste, 1997b. Enquête sur la structure des exploitations agricoles Principaux résultats 1990 - 1993 - 1995 (N°. 97), Données Chiffrées. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
- Agreste, 1996. Les pratiques culturales sur grandes cultures en 1994 (Agriculture N°. 85), Données Chiffrées.
- Agreste, 1993. Guide d'utilisation du recensement agricole 1988 (N°. Hors série), Données Chiffrées.
- Agreste Auvergne, 2013. Plafonnement des rendements des céréales à paille (N°. 127).
- Agreste Bretagne, 2013. Pratiques de fertilisation dans les bassins versants en 2011 - Les pratiques de fertilisation s'améliorent en Bretagne.
- Alfroy, M., 1979. La statistique agricole française - quatrième volume - tome 1 (N°. 140), Collection de statistique agricole. SCEES.
- Alfroy, M., 1976. La statistique agricole française - premier volume - tome 3 (N°. 140), Collection de statistique agricole. SCEES, Paris.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S., L. De Paepe, J., 2014. A regional audit of nitrogen fluxes in pampean agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 184, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.003>
- Anglade, J., 2015. Agriculture biologique et qualité des ressources en eau dans le bassin de la Seine: caractérisation des pratiques et applications territorialisées. Université Paris VI – Pierre et Marie Curie.
- Anglade, J., Billen, G., Garnier, J., 2015. Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* 6, 1–24. <https://doi.org/10.1890/ES14-00353>.
- ANSES, 2013. Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqua.

- Aquilina, L., Vergnaud-Ayraud, V., Labasque, T., Bour, O., Molénat, J., Ruiz, L., De Montety, V., De Ridder, J., Roques, C., Longuevergne, L., 2012. Nitrate dynamics in agricultural catchments deduced from groundwater dating and long-term nitrate monitoring in surface-and groundwaters. *Science of the Total Environment* 435, 167–178.
- Arrêté du 9 juillet 2009 portant agrément d'un organisme professionnel pour l'exécution d'enquêtes statistiques publiques dans l'industrie, n.d.
- Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole | Legifrance [WWW Document], n.d. URL <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2011/12/19/DEVL1134069A/jo> (accessed 8.10.16).
- ARVALIS, 2007. Colloque Cartopaille Picardie.
- Asmala, E., Saikku, L., Vienonen, S., 2011. Import–export balance of nitrogen and phosphorus in food, fodder and fertilizers in the Baltic Sea drainage area. *Science of The Total Environment* 409, 4917–4922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.030>
- Aubert, C., Levasseur, P., 2005. Le marché des fertilisants organiques en France. *Science et Techniques Avicoles* 53, 31–36.
- Audouin, L., 1991. Rôle de l'azote et du phosphore dans la pollution animale. *Revue Scientifique et Technique de l'O.I.E.* 10, 629–654.
- Bach, M., Frede, H.-G., 2005. Assessment of Agricultural Nitrogen Balances for Municipalities—Example Baden-Wuerttemberg (Germany). EWA online.
- Barracough, P.B., Howarth, J.R., Jones, J., Lopez-Bellido, R., Parmar, S., Shepherd, C.E., Hawkesford, M.J., 2010. Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement. *European Journal of Agronomy* 33, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.01.005>
- Bassanino, M., Grignani, C., Sacco, D., Allisiardi, E., 2007. Nitrogen balances at the crop and farm-gate scale in livestock farms in Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 122, 282–294. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.01.023>
- Beaudoin, N., Saad, J.K., Van Laethem, C., Machet, J.M., Maucorps, J., Mary, B., 2005. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 111, 292–310. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.006>
- Behera, S.N., Sharma, M., Aneja, V.P., Balasubramanian, R., 2013. Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environ Sci Pollut Res* 20, 8092–8131. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>
- Ben Arfa, N., Rodrigues, C., Daniel, K., 2009. Dynamiques spatiales de la production agricole en France. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine* 807–834.
- Benbi, D.K., Richter, J., 2002. A critical review of some approaches to modelling nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils* 35, 168–183.
- Benoît, M., 1992. Un indicateur des risques de pollution nommé BASCULE. *Courrier de la cellule environnement de l'INRA* 18, 23–28.
- Benoît, M., Deffontaines, J.-P., Gras, F., Bienaimé, É., Riela-Cosserat, R., 1997. Agriculture et qualité de l'eau Une approche interdisciplinaire de la pollution par les nitrates d'un bassin d'alimentation. *Cahiers Agricultures* 6, 97-105 (1).
- Béraud, E., Démotes-Mainard, M., 1998. La plus vieille dame de la statistique va avoir 150 ans. *Courrier des statistiques* 19–23.
- Berrebi, R., Devaux, A., Pozet, F., Villeneuve, A., Humbert, J.-F., Gaudin, P., Massei, N., Mudry, J., Trevisan, D., Lacroix, G., Bornette, G., Verneaux, V., 2012. Rapport d'expertise sur les mortalités de poissons et les efflorescences de cyanobactéries de la Loue - Étude du fonctionnement de la Loue et de son Bassin Versant. ONEMA - UMR BIOEMCO.
- Billen, G., Silvestre, M., Grizzetti, B., Leip, A., Garnier, J., Voss, M., Howarth, R., Bouraoui, F., Lepisto, A., Kortelainen, P., Johnes, P.J., Curtis, C., Humborg, C., Smedberg, E., Kaste, O., Ganeshram, R., Beusen, A., Lancelot, C., 2011. Nitrogen flows from European watersheds to coastal marine waters, in: *The European Nitrogen Assessment*. Mark A. Sutton, Clare M. Howard, Jan Willem Erisman, Gilles Billen, Albert Bleeker, Pering Grennfelt, Hans van Grinsven and Bruna Grizzetti.
- Bindi, M., Olesen, J.E., 2011. The responses of agriculture in Europe to climate change. *Reg Environ Change* 11, 151–158. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x>
- Bockstaller, C., Vertès, F., Aarts, F., Fiorelli, J.-L., Peyraud, J.-L., Rochette, P., 2012. Méthodes d'évaluation environnementale et choix des indicateurs, in: *Les Flux d'azote Liés Aux Élevages Réduire Les Pertes, Rétablir Les Équilibres, Expertises Collectives : INRA* p. 527.
- Bodilis, A.-M., Bouthier, A., Castillon, P., Laurent, F., Desvignes, P., 1998. Pilotage de la fertilisation azotée avec Jubil - La gamme s'élargit. *Perspectives agricoles* 57–63.

- Bonnieux, F., 2009. Bilan critique de la politique agri-environnementale et perspective d'évolution, in: *Politiques Agricoles et Territoire, Update Science & Technologie*. Versailles, pp. 141–164.
- Bouraoui, F., Grizzetti, B., 2014. Modelling mitigation options to reduce diffuse nitrogen water pollution from agriculture. *Science of The Total Environment* 468–469, 1267–1277. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.066>
- Bouraoui, F., Grizzetti, B., 2011. Long term change of nutrient concentrations of rivers discharging in European seas. *Science of The Total Environment* 409, 4899–4916. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.015>
- Bouraoui, F., Grizzetti, B., Alberto, A., 2011. Long term nutrient loads entering European seas (Technical report N°. EUR 24726 EN), JRC Scientific and Technical Reports. JRC, Luxembourg.
- Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., Billen, G., 2009. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970–2050. *Global Biogeochemical Cycles* 23, GB0A04.
- Bouwman, A.F., Van Drecht, G., Van der Hoek, K.W., 2005. Global and Regional Surface Nitrogen Balances in Intensive Agricultural Production Systems for the Period 1970–2030. *Pedosphere* 15, 137–155.
- BRGM, 2016. BDLISA Base de données des Limites de Systèmes Aquifères - fiche de synthèse -région Centre Val de Loire Calcaires de l'Eocène-Oligocène inf., majoritairement lacustre, du Bassin Parisien.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N., 2008. Conceptual basis, formalisation and parametrization of the STICS crop model, Quae. ed. Versailles.
- Brives, H., Rioussat, P., de Tourdonnet, S., 2015. Quelles modalités de conseil pour l'accompagnement vers des pratiques agricoles plus écologiques, in: *Conseiller Privé En Agriculture*. pp. 133–148.
- Brugière, N., Suzuki, A., Hirel, B., 1997. Assimilation de l'ammonium, in: *Assimilation de l'azote Chez Les Plantes, Mieux Comprendre*. Morot-Gaudry Jean-François, pp. 85–107.
- Buckley, C., Wall, D.P., Moran, B., O'Neill, S., Murphy, P.N.C., 2015. Farm gate level nitrogen balance and use efficiency changes post implementation of the EU Nitrates Directive. *Nutr Cycl Agroecosyst* 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9753-y>
- Butault, J.-P., Gohin, A., Guyomard, H., Barkaoui, A., 2005. Une analyse économique de la réforme de la PAC de juin 2003. *Revue française d'économie* 20, 57–107. <https://doi.org/10.3406/rfec.2005.1565>
- Cameron, K. c., Di, H. j., Moir, J. l., 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Ann Appl Biol* 162, 145–173. <https://doi.org/10.1111/aab.12014>
- Campling, P., Terres, J.M., Vande Walle, S., Van Orshoven, J., Crouzet, P., 2005. Estimation of nitrogen balances from agriculture for EU-15: spatialisation of estimates to river basins using the CORINE Land Cover. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Agrometeorology* 2003 30, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.014>
- Capillon, A., 1992. Utilité et spécificité de l'approche de l'environnement par l'agronome. *Cahiers Agricultures* 1, 113-122 (1).
- Casagrande, P., Chapelle, C., 2001. Fertilisation azotée minérale : assagissement à la fin des années 80 (N°. 2), Agreste Les cahiers. AGRESTE.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 31, 132–140. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.132>
- Cellier, P., Rochette, P., Faverdin, P., 2012. La cascade de l'azote et l'élevage, et ses conséquences, in: *Expertises Collectives*. pp. 29–77.
- CGDD, SOeS, 2009. CORINE Land Cover - Guide d'utilisation.
- Chaillou, S., Lamaze, T., 1997. Nutrition ammoniacale des plantes, in: *Assimilation de l'azote Chez Les Plantes*. Morot-Gaudry Jean-François, pp. 67–83.
- Chatzimpiros, P., 2011. Les empreintes environnementales de l'approvisionnement alimentaire : Paris, ses viandes et lait, XIXe-XXIe siècles. Paris-Est.
- Cherry, K.A., Shepherd, M., Withers, P.J.A., Mooney, S.J., 2008. Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: A review of methods. *Science of The Total Environment* 406, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.015>
- Chevassus-au-Louis, B., Andral, B., Femenias, A., Bouvier, M., 2012. Bilan des connaissances scientifiques sur les causes de prolifération de macroalgues vertes. Application à la situation de la Bretagne et propositions (N°. 007942–01 (CGEDD); 11128 (CGAAER)).
- CITEPA, 2017. SECTEN - CITEPA [WWW Document]. CITEPA - Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique. URL <https://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten> (accessed 1.28.18).
- CNIS, n.d. Conseil national de l'information statistique [WWW Document]. URL <https://www.cnis.fr/> Code de l'environnement - Article L216-6, n.d. , Code de l'environnement.
- COMIFER, 2013a. Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales - Cultures annuelles et prairies.

- COMIFER, 2013b. TENEUR EN AZOTE DES ORGANES VEGETAUX RECOLTES pour les cultures de plein champ, les principaux fourrages et la vigne, TABLEAU DE REREFERENCE 2013.
- CORPEN, 2006. Estimation des rejets d'azote - phosphore - potassium - calcium -cuivre - zinc par les élevages avicoles. Comité d'Organisation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement, Paris, France.
- CORPEN, 2003. Estimation des rejets d'azote - phosphore - potassium cuivre et zinc des porcs. Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produites. Comité d'Organisation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement, Paris, France.
- CORPEN, 2001. Estimation des flux d'azote, de phosphore et de potassium associés aux bovins allaitants et aux bovins en croissance ou à l'engrais, issus des troupeaux allaitants et laitiers, et à leur système fourrager. Comité d'Organisation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement, Paris, France.
- CORPEN, 1999. Estimation des flux d'azote, de phosphore et de potassium associés aux vaches laitières et à leur système fourrager. Comité d'Organisation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement, Paris, France.
- CORPEN, 1988. Bilan de l'azote à l'exploitation. Comité d'Organisation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement, Paris.
- Curie, F., 2006. Rétention de nitrates dans les zones humides riveraines : Rôles des facteurs hydrobiologiques, géomorphologiques et biogéochimiques. Approche multi échelle dans le bassin de la Seine. Université Paris VI – Pierre et Marie Curie.
- De Cherisey, H., Roy, C., Pouet, J.-C., 2007. La valorisation de la biomasse . Guide d'information à l'attention des administrations et des établissements publics. ADEME.
- de Vries, W., Leip, A., Reinds, G.J., Kros, J., Lesschen, J.P., Bouwman, A.F., 2011. Comparison of land nitrogen budgets for European agriculture by various modeling approaches. *Environmental Pollution* 159, 3254–3268. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.038>
- Delaby, L., Dourmad, J.-Y., Faverdin, P., Fiorelli, J.L., Peyraud, J.-L., Veysset, P., 2012. Quantification des flux d'azote à l'échelle de l'animal et des ateliers d'élevage, in: *Les Flux d'azote Liés Aux Élevages, Réduire Les Pertes, Rétablir Les Équilibres, Expertises Collectives*. pp. 188–228.
- Delaby, L., Peyraud, J.-L., Verite, R., 1995. Influence du niveau de production laitière et du système d'alimentation sur les rejets azotés du troupeau. Presented at the *Rencontres Recherches Ruminants*, pp. 349–354.
- Deléage, E., 2013. *Agricultures à l'épreuve de la modernisation*, Quae. ed, Synthèses. Versailles.
- Delteil, L., 2012. *Nutrition et alimentation des animaux d'élevage*. Educagri Editions.
- Denanot, J.-P., 2017. *Projet de rapport sur une stratégie européenne pour la promotion des cultures protéagineuses – Encourager la production de protéagineuses et de légumineuses dans le secteur agricole européen*.
- Deronzier, G., 2013. Ressource : Fiche descriptive des sources de données pressions pesticides | Le rés'eau.
- Deronzier, G., Michon, J., 2016. Bulletin n°5 : Concentration en nitrates d'origine agricole dans les cours d'eau et les eaux souterraines Edition 2016 - Données 2014 - 2015. MEDDE, ONEMA, OIE.
- Directive du conseil du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires, n.d.
- Dise, N.B., Ashmore, M., Belyazid, S., Bleeker, A., Bobbink, R., de Vries, W., Erisman, J.W., Spranger, T., Steven, C.J., 2011. Nitrogen as a threat to European terrestrial biodiversity, in: *European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, p. 32.
- DREAL Centre, 2012. Annexe 1 - Eaux souterraines - Révision des zones vulnérables à la pollution par les nitrates d'origine agricole suite à la cinquième campagne de surveillance.
- Dudkowski, A., 2000. L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* 134–135.
- Dupas, R., Curie, F., Gascuel-Oudou, C., Moatar, F., Delmas, M., Parnaudeau, V., Durand, P., 2013. Assessing N emissions in surface water at the national level: Comparison of country-wide vs. regionalized models. *Science of The Total Environment* 443, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.011>
- Duthion, R., 1999. Estimer l'azote minéral épandu sur culture est un exercice délicat. L'exemple de la Bretagne (N°. 46), *Agreste Les cahiers*.
- Duval, J., 1995. Utilisation des citrouilles dans l'alimentation porcine [WWW Document]. *Ecological Agriculture Projects*. URL <http://eap.mcgill.ca/agrobio/ab370-12.htm> (accessed 10.20.14).
- EEA, (European Environment Agency), 2001. Calculation of nutrient surpluses from agricultural sources - Statistics spatialisation by means of CORINE land cover - Application to the case of nitrogen — European Environment Agency (EEA) (Technical N°. 51).
- Eider - Métadonnées - OC-LUCAS - Occupation du territoire en nomenclature LUCAS [WWW Document], n.d. URL <http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/Eider/view-meta.do?metaCode=OC-LUCAS> (accessed 9.15.17).

- Escriou, H., Maupas, F., Richard-Molard, M., 2010. Evolution des rendements de la betterave sucrière : un effet favorable du changement climatique.
- EUR-Lex - 32009R0223 - EN - EUR-Lex [WWW Document], n.d. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32009R0223> (accessed 9.15.17).
- European Commission, E., 2000. Farm structure Historical results : Surveys from 1966/67 to 1997. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- EUROSTAT, 2017. Eurostat Handbook for Annual Crop Statistics (Regulation (EC) N° 543/2009, Commission Delegated Regulation (EU) 2015/1557 and ESS agreement for Annual Crop Statistics).
- EUROSTAT, 2014. Quality report on crop statistics for France (area, production and yield) (apro_acs) [WWW Document]. URL http://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/EN/apro_acs_esqrs_fr.htm (accessed 11.3.17).
- FAO, 1948. Program for the 1950 world census of agriculture. Washington, U.S.A.
- Fovet, O., Ruiz, L., Faucheux, M., Molénat, J., Sekhar, M., Vertès, F., Aquilina, L., Gascuel-Oudou, C., Durand, P., 2015. Using long time series of agricultural-derived nitrates for estimating catchment transit times. *Journal of Hydrology* 522, 603–617. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.030>
- Gac, A., Béline, F., Bioteau, T., 2006. Flux de gaz à effet de serre (CH₄, N₂O) et d’ammoniac (NH₃) liés à la gestion des déjections animales : Synthèse bibliographique et élaboration d’une base de données. ADEME, Rennes.
- Gaigné, C., 2012. Les dynamiques de concentration, origines économiques des excès d’azote au niveau des territoires, in: *Les Flux d’azote Liés Aux Élevages. Réduire Les Pertes, Rétablir Les Équilibres, Expertises Collectives*. pp. 159–184.
- Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.W., Cowling, E.B., Cosby, B.J., 2003. The Nitrogen Cascade. *BioScience* 53, 341–356. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2)
- Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., Asner, G.P., Cleveland, C.C., Green, P.A., Holland, E.A., Karl, D.M., Michaels, A.F., Porter, J.H., Townsend, A.R., Vöosmarty, C.J., 2004. Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry* 70, 153–226. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>
- Gate, P., Brisson, N., Gouache, D., 2010. Les causes du plafonnement du rendement du blé en France : d’abord une origine climatique. Académie d’Agriculture de France – Séance du 5 mai 2010
- GCL développement durable, 2010. Etat, perspectives et enjeux du marché des engrais.
- Glibert, P.M., 2017. Eutrophication, harmful algae and biodiversity - Challenging paradigms in a world of complex nutrient changes. *Marine Pollution Bulletin* 591–606. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.027>
- Groenendijk, P., Heinen, M., Klammler, G., Fank, J., Kupfersberger, H., Pisinaras, V., Gemitz, A., Peña-Haro, S., García-Prats, A., Pulido-Velazquez, M., Perego, A., Acutis, M., Trevisan, M., 2014. Performance assessment of nitrate leaching models for highly vulnerable soils used in low-input farming based on lysimeter data. *Sci Total Environ* 463–480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.002>
- Haynes, R., 1986. Mineral Nitrogen In The Plant-Soil System. Elsevier.
- Heathwaite, A.L., Johnes, P.J., Peters, N.E., 1996. Trends in nutrients. *Hydrological processes* 10, 263–293.
- Hellec, F., Barataud, F., Martin, L., 2013. Protection de l’eau et agriculture : une négociation au long cours. *Nat. Sci. Soc.* 21, 190–199. <https://doi.org/10.1051/nss/2013097>
- Hénault, C., Germon, J.C., 1995. Quantification de la dénitrification et des émissions de protoxyde d’azote (N₂O) par les sols. *Agronomie* 15, 321–355. <https://doi.org/10.1051/agro:19950602>
- Hertel, O., Reis, S., Skjøth, C.A., Bleeker, A., Harrison, R., Cape, J.N., Fowler, D., Skiba, U., Simpson, D., Jickells, T., Baker, A., Kulmala, M., Gyldenkerne, S., Sørensen, L.L., Erisman, J.W., 2011. Nitrogen in the atmosphere, in: *The European Nitrogen Assessment*. Mark A. Sutton, Cambridge University Press, p. 32.
- Hilton, J., O’Hare, M., Bowes, M.J., Jones, J.I., 2006. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers. *Science of The Total Environment, Monitoring and modelling the impacts of global change on European freshwater ecosystems* 365, 66–83. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.055>
- Hirel, B., Tétu, T., Lea, P.J., Dubois, F., 2011. Improving Nitrogen Use Efficiency in Crops for Sustainable Agriculture. *Sustainability* 3, 1452–1485. <https://doi.org/10.3390/su3091452>
- Home | Copernicus Global Land Service [WWW Document], n.d. URL <http://land.copernicus.eu/global> (accessed 10.16.17).
- Home - Eurostat [WWW Document], n.d. URL <http://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home> (accessed 9.15.17).
- Honda, Y., Mukasa, Y., Suzuki, T., Inuyama, S., 2005. Varietal differences in the basic chemical composition of buckwheat flour in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) revealed by principle component analysis. *Fagopyrum* 22, 31–38.

- Hou, Y., Bai, Z., Lesschen, J.P., Staritsky, I.G., Sikirica, N., Ma, L., Velthof, G.L., Oenema, O., 2016. Feed use and nitrogen excretion of livestock in EU-27. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 218, 232–244.
- Howarth, R.W., Billen, G., Swaney, D., Townsend, A., Jaworski, N., Lajtha, K., Downing, J.A., Elmgren, R., Caraco, N., Jordan, T., 1996. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences, in: *Nitrogen Cycling in the North Atlantic Ocean and Its Watersheds*. Springer, pp. 75–139.
- Huyghe, C., 2009. Evolution des prairies et cultures fourragères et de leurs modalités culturales et d'utilisation en France au cours des cinquante dernières années. *Fourrages* 107–428.
- IFA, n.d. IFA-International Fertilizer Association [WWW Document]. URL <https://www.fertilizer.org/> (accessed 2.4.18).
- ifen, 2001. Plus de 60% des boues d'épuration municipales ont été épandues en 1999 sur 2% des sols agricoles, Les données de l'environnement.
- IFV, n.d. Formulaire de calcul SECV/PR ou rapport feuilles / fruits [WWW Document]. URL <https://www.vignevin-sudouest.com/services-professionnels/formulaires-calcul/rapport-sfe-rendement.php> (accessed 4.23.18).
- IGN, ASP, 2017. RPG Version 1.0 - Registre Parcellaire Graphique - Descriptif de contenu et de livraison.
- INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins: besoins des animaux, valeurs des aliments : tables Inra 2007. Editions Quae.
- INRA, CIRAD, AFZ, FAO, n.d. Feedipedia Animal feed resources information system.
- INSEE, 2017. Code officiel géographique au 1er janvier 2016 | Insee [WWW Document]. URL <https://www.insee.fr/fr/information/2114819> (accessed 10.25.16).
- INSEE, 2010. Guide du secret statistique.
- Journal officiel des Communautés européennes, 2000. DIRECTIVE 2000/60/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.
- Journal officiel des Communautés européennes, 1991. DIRECTIVE DU CONSEIL du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles.
- Jussiau, R., Montméas, L., Parot, J.-C., 1999. L'élevage en France: 10 000 ans d'histoire. Educagri Editions.
- Kleiber, C., 2017. Structural Change in (Economic) Time Series. arXiv:1702.06913 [physics, q-fin, stat].
- Klein, T., 2009. Comparaison des sécheresses estivales de 1976 et 2003 en Europe occidentale à l'aide d'indices climatiques. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 2, 12.
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Garnier, J., Leach, A.M., Galloway, J.N., 2014. Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry* 118, 225–241. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9923-4>
- Lassaletta, L., Romero, E., Billen, G., Garnier, J., García-Gómez, H., Rovira, J.V., 2012. Spatialized N budgets in a large agricultural Mediterranean watershed: high loading and low transfer. *Biogeosciences* 9, 57–70. <https://doi.org/10.5194/bg-9-57-2012>
- Laurent, C., 1966. La collecte de l'information économique globale : les méthodes du Service Central des Enquêtes et études du ministère de l'agriculture. *Economie rurale* 69, 57–71. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1966.1949>
- Le Souder, C., 2007. Evolution des pratiques de fertilisation des agriculteurs sur blé tendre.
- Ledoux, E., Gomez, E., Monget, J.M., Viavattene, C., Viennot, P., Ducharne, A., Benoit, M., Mignolet, C., Schott, C., Mary, B., 2007. Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS–MODCOU modelling chain. *Science of The Total Environment, Human activity and material fluxes in a regional river basin: the Seine River watershed* 375, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.002>
- Leip, A., Marchi, G., Koehler, R., Kempen, M., Britz, W., Li, C., 2008. Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model to estimate nitrogen and carbon losses from arable soils in Europe. *Biogeosciences* 5, 73–94.
- Lemaire, G., Jeuffroy, M.-H., Gastal, F., 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy* 28, 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.005>
- Lenco, M., 1973. Généralités et nouveautés techniques du recensement général de l'agriculture de 1970 en France. *Journal de la société statistique de Paris* 114, 48–64.
- Leterme, P., Morvan, T., Poulain, D., 1997. Azote et pollution, in: *Assimilation de l'azote Chez Les Plantes, Mieux Comprendre*. Morot-Gaudry Jean-François, pp. 381–401.
- Lloyd, C.E.M., Freer, J.E., Collins, A.L., Johnes, P.J., Jones, J.I., 2014. Methods for detecting change in hydrochemical time series in response to targeted pollutant mitigation in river catchments. *Journal of Hydrology* 514, 297–312. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.036>
- Loi n° 51-711 du 7 juin 1951 sur l'obligation, la coordination et le secret en matière de statistiques., n.d.

- Louault, F., 1982. La délimitation des régions agricoles. L'exemple de l'Indre-et-Loire. *Noroi* 115, 345–364. <https://doi.org/10.3406/noroi.1982.4049>
- Loucks, D.P., Van Beek, E., Stedinger, J.R., Dijkman, J.P.M., Villars, M., 2005. Model Sensitivity and Uncertainty Analysis, in: *Water Resources Systems Planning and Management An Introduction to Methods Models and Applications*, Studies and Reports in Hydrology. UNESCO, Paris, p. 690.
- Ma, W., Yamanaka, T., 2016. Factors controlling inter-catchment variation of mean transit time with consideration of temporal variability. *Journal of Hydrology* 534, 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.061>
- Machet, J.M., Dubrulle, P., Damay, N., Duval, R., Recous, S., Mary, B., 2007. AZOFERT : A NEW DECISION SUPPORT TOOL FOR FERTILISER N ADVICE BASED ON A DYNAMIC VERSION OF THE PREDICTIVE BALANCE SHEET METHOD 6.
- Magdelaine, P., SCEES, 1989. Les élevages avicoles en 1987 (Résultats de l'enquête Aviculture 1987) (N° 281), Collection de statistique agricole. SCEES.
- Mariotti, A., 1982. Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. Pierre et Marie Curie - Paris 6, Paris.
- Martin, P., Scheurer, O., 2017. Utiliser le Registre Parcellaire Graphique pour suivre les dynamiques d'occupation du sol des Aires d'Alimentation de Captage avec RPG Explorer. *Innovations agronomiques* 21–34.
- Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechognat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., Suzuki, A., 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Ann Bot* 105, 1141–1157. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq028>
- Mazoyer, M., Aubineau, M., Bermond, A., Bougler, J., Ney, B., Roger-Estrade, J., 2002. *Larousse agricole - Le monde paysan au XXIe siècle*, Mathilde Majorel, Nora Schott, Thierry Olivaux. ed. Larousse.
- Meisinger, J.J., Calderón, F.J., Kenkindon, D.S., 2008. Soil Nitrogen Budgets, in: *Nitrogen in Agricultural Systems*, Agronomy Monograph N°49. J. S. Schemm and W. R. Raun, p. 994.
- Minaudo, C., 2015. Analyse et modélisation de l'eutrophisation de la Loire. Université François Rabelais de Tours, Tours.
- Minaudo, C., Meybeck, M., Moatar, F., Gassama, N., Curie, F., 2015. Eutrophication mitigation in rivers: 30 years of trends in spatial and seasonal patterns of biogeochemistry of the Loire River (1980–2012). *Biogeosciences* 12, 2549–2563. <https://doi.org/10.5194/bg-12-2549-2015>
- Ministère de la transition écologique et solidaire, n.d. Observation et statistiques [WWW Document]. URL <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/2490/0/evolution-part-territoire-occupe-sols-artificialises.html>
- Ministère de l'agriculture, 1929. Résultats généraux de l'enquête de 1929.
- Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la F, n.d. DISAR [WWW Document]. URL <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/faces/index.jsp>
- Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la F, n.d. Le plan protéines végétales pour la France 2014 - 2020 | Alim'agri.
- Ministre de l'Agriculture, de la Pêche, de l'Alimentation et des Affaires rurales, Ministre de la Culture et de la Communication, 2006. TABLEAU DE GESTION DES ARCHIVES DES SERVICES DE LA STATISTIQUE AGRICOLE, DPACI/RES/2006/014.
- Moldanová, J., Grennfelt, P., Jonsson, A., Simpson, D., Spranger, T., Aas, W., Munthe, J., Rabl, A., 2011. Nitrogen as a threat to European air quality, in: *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, p. 29.
- Morhain, S., 2015. *La PAC, son histoire, ses réformes*, Educagri. ed. Dijon.
- Mosier, A., Syers, J.K., Freney, J.R., 2004. *Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment*. Island Press.
- Myrhe, G., Schindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, in: *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 82.
- Näsholm, T., Kielland, K., Ganeteg, U., 2009. Uptake of organic nitrogen by plants. *New Phytologist* 182, 31–48. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02751.x>
- Öborn, I., Edwards, A.C., Witter, E., Oenema, O., Ivarsson, K., Withers, P.J.A., Nilsson, S.I., Richert Stinzing, A., 2003. Element balances as a tool for sustainable nutrient management: a critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European Journal of Agronomy* 20, 211–225. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00080-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00080-7)
- OECD Compendium of Agri-environmental Indicators, 2013a. . OECD Publishing.

- OECD Compendium of Agri-environmental Indicators, 2013b. . OECD Publishing.
- Oenema, O., Kros, H., de Vries, W., 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy* 20, 3–16.
- Office International de l'eau (OIEau), n.d. Pollution diffuse | Gest'eau [WWW Document]. URL <http://www.gesteau.fr/concept/pollution-diffuse> (accessed 2.22.18a).
- Office International de l'eau (OIEau), n.d. Glossaire sur l'eau et les milieux aquatiques [WWW Document]. URL <http://www.glossaire.eaufrance.fr/concept/ann%C3%A9e-hydrologique> (accessed 2.22.18b).
- O'Sullivan, C., Palta-Paz, J., Farrell, M., Treble, K., 2016. Genotypic variability in wheat for preference of NH_4^+ , NO_3^- or NH_4NO_3 .
- Passy, P., Gypens, N., Billen, G., Garnier, J., Thieu, V., Rousseau, V., Callens, J., Parent, J.-Y., Lancelot, C., 2013. A model reconstruction of riverine nutrient fluxes and eutrophication in the Belgian Coastal Zone since 1984. *Journal of Marine Systems* 128, 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.05.005>
- Payraudeau, S., van der Werf, H.M.G., Vertès, F., 2007. Analysis of the uncertainty associated with the estimation of nitrogen losses from farming systems. *Agricultural Systems* 94, 416–430. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.11.014>
- Peyraud, J.-L., Cellier, P., Aarts, F., Béline, F., Bockstaller, C., Bourblanc, M., Delaby, L., Donnars, C., Dourmad, J.Y., Dupraz, P., Durand, P., Faverdin, P., Fiorelli, J.L., Gagné, C., Girard, A., Guillaume, F., Kuikman, P., Langlais, A., Le Goffe, P., Le Perchec, S., Lescoat, P., Morvan, T., Nicourt, C., Parnaudeau, V., Pevraud, J.L., Réchauchère, O., Rochette, P., Vertès, F., Veysset, P., 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. INRA, France.
- Peyraud, Jean-Louis, Cellier, P., Dupraz, P., 2012. Options pour utiliser moins et mieux l'azote, in: *Les Flux d'azote Liés Aux Élevages - Réduire Les Pertes, Rétablir Les Équilibres, Expertises Collectives*. pp. 501–519.
- Pflimlin, A., Faverdin, P., Béranger, C., 2009. Un demi-siècle d'évolution de l'élevage bovin. Bilan et perspectives. *Fourrages* 429–464.
- Poisvert, C., Curie, F., Moatar, F., 2017. Annual agricultural N surplus in France over a 70-year period. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 107, 63–78. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9814-x>
- Portejoie, S., Dourmad, J.-Y., Martinez, J., Lebreton, Y., 2004. Effect of lowering dietary crude protein on nitrogen excretion, manure composition and ammonia emission from fattening pigs 45–55.
- Rebischung, J., Desroches, R., 1960. Les variétés françaises de graminées fourragères. *Fourrages* 71–93.
- Reboul, C., 1977. Déterminants sociaux de la fertilité des sols. *Actes de la recherche en sciences sociales* 17–18, 85–112.
- Refsgaard, J.C., van der Sluijs, J.P., Højberg, A.L., Vanrolleghem, P.A., 2007. Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software* 22, 1543–1556. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.02.004>
- Règlement (CE) N° 1593/2000 du conseil du 17 juillet 2000 modifiant le règlement (CEE) n°3508/92 établissant un système intégré de gestion et de contrôle relatif à certains régimes d'aides communautaires, n.d.
- Règlement (CE) n°1166/2008 du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relatif aux enquêtes sur la structure des exploitations et à l'enquête sur les méthodes de production agricole, et abrogeant le règlement (CEE) n°571/88 du Conseil (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), n.d. , 2007/0084/COD.
- Reidy, B., Dämmgen, U., Döhler, H., Eurich-Menden, B., Van Evert, F.K., Hutchings, N.J., Luesink, H.H., Menzi, H., Misselbrook, T.H., Monteny, G.-J., others, 2008. Comparison of models used for national agricultural ammonia emission inventories in Europe: Liquid manure systems. *Atmospheric environment* 42, 3452–3464.
- RESEDA, ADEME, 2008. Enquête sur les gisements et la valorisation des coproduits issus de l'agro-industrie.
- Richard-Schott, F., 2009. Le Recensement Général de l'Agriculture de 1955, une référence pour les géographes ? *Géocarrefour* 2009, 271–279. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.7567>
- Roger-Estrade, J., Bail, M.L., Ney, B., Martin, P., Doré, T., 2006. L'agronomie aujourd'hui. Quae.
- Ross, S.M., Izaurralde, R.C., Janzen, H.H., Robertson, J.A., McGill, W.B., 2008. The nitrogen balance of three long-term agroecosystems on a boreal soil in western Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 127, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.04.007>
- Ruget, F., Novak, S., Granger, S., 2006. Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. *Adaptation à la prairie, application spatialisée*. *Fourrages* 241–256.
- Salo, T., Turtola, E., 2006. Nitrogen balance as an indicator of nitrogen leaching in Finland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 113, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.09.002>
- Sauvant, D., Perez, J.-M., Tran, G., 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage: porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons, 2e édition. ed. INRA.
- SCEES, 1991. L'utilisation du territoire en 1990 et son évolution de 1982 à 1990 (N°. 21), Données Chiffrées.

- SCEES, 1988. Industries laitières : Production, collecte et transformation en 1987 (N°. 280), Collection de statistique agricole.
- SCEES, 1986. Les élevages avicoles français (Résultats de l'enquête sur l'aviculture en 1982) (N°. 261), Collection de statistique agricole.
- SCEES, 1984. Les prairies en 1982 (N°. 233), Collection de statistique agricole.
- SCEES, 1983. Les terres labourables et les grandes cultures en 1981 (N°. 209), Collection de statistique agricole.
- SCEES, 1981. Les superficies herbagères en 1978 (Ardennes, Côtes du Nord, Jura, Meurthe et Moselle, Oise, Pyrénées-Atlantiques) (N°. 194), Collection de statistique agricole. Paris.
- SCEES, 1978. Les élevages de lapins dans les exploitations agricoles en 1976 (N°. 169), Collection de statistique agricole.
- SCEES, 1977. Résultats des enquêtes sur les productions céréalières en 1975 - Tome 2 : techniques culturales (N°. 146 Bis), Collection de statistique agricole.
- SCEES, 1973. Enquête sur la structure du cheptel bovin au 1er Janvier 1972 - Résultats définitifs et comparaisons avec les enquêtes précédentes (N°. 9), Les cahiers.
- SCEES, 1971. Etude sur la structure du cheptel bovin au 1er janvier 1969 (N°. 77), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1970a. Enquête sur les productions de blé et d'orge en 1969 (N°. 65), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1970b. Etude sur la production de maïs en 1969 (N°. 69), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1970c. Etude sur la structure du cheptel porcin (N°. 68), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1969a. Enquête communautaire sur la structure des exploitations agricoles en 1967 - Résultats provisoires du dépouillement manuel (N°. 42), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1969b. Enquête expérimentale sur les productions fourragères en Haute-Vienne en 1968 (N°. 57).
- SCEES, 1969c. Enquête sur les productions de blé et d'orge en 1968 (N°. 52), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1969d. Etude sur la production du maïs en 1968 (N°. 54), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1969e. Enquête sur la structure du troupeau bovin en 1967 - Etude du troupeau des femelles de souche et de la structure des exploitations ayant entretenu un troupeau bovin au cours de l'année 1966 (N°. 43), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1968a. Enquête sur la production de maïs en 1967 (N°. 39), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1968b. Enquête sur les productions de blé et d'orge en 1967 - Principaux résultats de 1964 à 1967 par région de programme (N°. 38), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1968c. Mécanisation des exploitations agricoles (N°. 36), Supplément "Série Etudes." Paris.
- SCEES, 1967. Enquête sur les productions de blé et d'orge en 1966 (N°. 23), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1966a. Enquête sur les productions de blé et d'orge en 1965 (N°. 11), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1966b. Enquête sur la production de maïs en 1965 (N°. 17), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1966c. Enquête sur la production de pommes de terre de conservation en 1965 (N°. 12), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1965a. Enquête sur les productions de blé et d'orge en 1964 (N°. 1), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1965b. Enquête expérimentale sur la production fourragère dans le Cher en 1964 (N°. 6), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1965c. Enquête sur la production de maïs en 1964 (N°. 2), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, 1965d. Premiers résultats de l'enquête au 1/10ème pour les structures agricole en 1960 (N°. 5), Supplément "Série Etudes."
- SCEES, FNIE, 1975. Quelques informations sur la fertilisation des céréales en 1972 et 1973.
- Schneider, A., Huyghe, C., 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables, Quae. ed. Versailles.
- Schoumans, O.F., Silgram, M., (Eds), 2003. Review and literature evaluation of quantification tools of nutrient losses (EUROHARP report 1-2003, NIVA report, SNO 4739-2003). Oslo, Norway.
- Schvartz, C., Decroux, J., Muller, J.-C., 2005. Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairies. France Agricole Editions.
- Silgram, M., Anthony, S.G., Collins, A.L., Strömqvist, J., Bouraoui, F., Schoumans, O., Lo Porto, A., Groenendijk, P., Arheimer, B., Mimikou, M., Johnsson, H., 2009. Evaluation of diffuse pollution model applications in EUROHARP catchments with limited data. Journal of Environmental Monitoring 11, 554. <https://doi.org/10.1039/b901181a>
- SOeS, 2013. NOPOLU-Agri. Outil de spatialisation des pressions de l'agriculture. Méthodologie et résultats pour les surplus d'azote et les émissions des gaz à effet de serre. Campagne 2010-2011. Ministère du Développement durable et de l'Énergie.
- SOeS, 2012. L'analyse des pressions agricoles : surplus d'azote et gaz à effet de serre (N°. 113), Le point sur. SOES.
- SOeS, 2009. CORINE Land Cover France Guide d'utilisation.
- SSP, Service de la statistique et de la prospective, 1977. La statistique agricole annuelle.

- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., Grinsven, H. van, Grizzetti, B., 2011a. The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press.
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., Grinsven, H. van, Grizzetti, B., 2011b. Assessing our nitrogen inheritance, in: The European Nitrogen Assessment. Cambridge University Press, pp. 1–6.
- Touraine, B., Gojon, A., 1997. Intégration de l'absorption du nitrate dans la plante, in: Assimilation de l'azote Chez Les Plantes, Mieux Comprendre. Morot-Gaudry Jean-François, pp. 109–128.
- Union des Industries de la Fertilisation [WWW Document], n.d. URL <http://www.unifa.fr/> (accessed 11.7.17).
- Uusitalo, L., Lehtikoinen, A., Helle, I., Myrberg, K., 2015. An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support. *Environmental Modelling & Software* 63, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.017>
- van Kessel, C., Hartley, C., 2000. Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? *Field Crops Research* 65, 165–181. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00085-4)
- Velthof, G.L., Barot, S., Bloem, J., Butterbach-Bahl, K., de Vries, W., Kros, J., Lavelle, P., Eivind Olesen, J., Oenema, O., 2011. Nitrogen as a threat to European soil quality, in: The European Nitrogen Assessment. Mark A. Sutton, Clare M. Howard, Jan Willem Erisman, Gilles Billen, Albert Bleeker, Perine Grennfelt, Hans van Grinsven and Bruna Grizzetti., pp. 495–510.
- Velthof, G.L., Oudendag, D., Witzke, H.P., Asman, W.A.H., Klimont, Z., Oenema, O., 2009. Integrated Assessment of Nitrogen Losses from Agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE. *Journal of Environment Quality* 38, 402. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0108>
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., Culvenor, D., 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment* 114, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014>
- Vertès, F., Simon, J.-C., Laurent, F., Besnard, A., 2007. Prairies et qualité de l'eau. Evaluation des risques de lixiviation d'azote et optimisation des pratiques. *Fourrages* 423–440.
- Vilain, M., 1997a. La production végétale - La maîtrise technique de la production, Tech & Doc. ed. Paris.
- Vilain, M., 1997b. La production végétale - Les composantes de la production, Technique et Documentation. ed, Agriculture d'aujourd'hui Sciences, Techniques, Applications. Paris.
- Voisin, A.-S., Salon, C., Munier-Jolain, N.G., Ney, B., 2002. Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil* 243, 31–42. <https://doi.org/10.1023/A:1019966207970>
- Warren, C.R., 2009. Does nitrogen concentration affect relative uptake rates of nitrate, ammonium, and glycine? *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 172, 224–229. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800251>
- Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G., 2002. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology* 259, 254–271. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7)
- Zeileis, A., Kleiber, C., Krämer, W., Hornik, K., 2003. Testing and dating of structural changes in practice. *Computational Statistics & Data Analysis* 44, 109–123.

Annexes

Annexe 1 : Nomenclature des données agricoles	197
Annexe 2 : Liste d'enquêtes spécifiques menées dans le cadre des enquêtes structure depuis 1955	219
Annexe 3 : Définition de l'exploitation agricole	221
Annexe 4 : Répartition de données régionales : cas du cheptel des canards entre 2005 et 2010 en Poitou-Charentes	223
Annexe 5 : Complétion de catégories détaillées : cas de la répartition des vaches sur les catégories "laitières" et "nourrices dans l'Ain en 1950	224
Annexe 6 : Répartition des engrais minéraux azotés sur les différents types d'engrais : cas de l'Ain en 1971	227
Annexe 7 : Reconstitution de données communales : exemple de la répartition du cheptel porcin pour deux communes de Charente en 1955	228
Annexe 8 : Annual agricultural N-surplus in France over a 70-year period	230
Annexe 9 : Facteurs de contrôle du surplus sur les sous-périodes identifiées sur l'ensemble du territoire	249
Annexe 10 : Liste des cultures prises en compte dans le modèle NOPOLU	269
Annexe 1 : Nomenclature des données agricoles	197
Annexe 2 : Liste d'enquêtes spécifiques menées dans le cadre des enquêtes structure depuis 1955	219
Annexe 3 : Définition de l'exploitation agricole	221
Annexe 4 : Répartition de données régionales : cas du cheptel des canards entre 2005 et 2010 en Poitou-Charentes	223
Annexe 5 : Complétion de catégories détaillées : cas de la répartition des vaches sur les catégories "laitières" et "nourrices dans l'Ain en 1950	224
Annexe 6 : Répartition des engrais minéraux azotés sur les différents types d'engrais : cas de l'Ain en 1971	227
Annexe 7 : Reconstitution de données communales : exemple de la répartition du cheptel porcin pour deux communes de Charente en 1955	228
Annexe 8 : Annual agricultural N-surplus in France over a 70-year period	230
Annexe 9 : Facteurs de contrôle du surplus sur les sous-périodes identifiées sur l'ensemble du territoire	249
Annexe 10 : Liste des cultures prises en compte dans le modèle NOPOLU	269

Annexe 1 : Nomenclature des données agricoles

Nomenclature utilisée dans les recensements agricoles

Sources : Recensement agricoles 1955, 1970, 1979, 1988, 2000, 2010

Superficie des cultures

Cultures annuelles

1955

01	Terres labourables
02	Prairies (Surfaces toujours en herbe)
03	Culture maraichère
04	Surface totale (SAU)
05	Blé (blé tendre)
06	Seigle
07	Méteil
08	Orge et Escourgeon
09	Avoine
10	Mais grain
11	Riz
12	Autres céréales
13	Céréales (total)
14	Tabac
15	Houblon
16	Lin textile
17	Chanvre
18	Cultures spéciales (Production de semences hors céréales)
19	Autres cultures diverses
20	Cultures diverses (total)
21	Colza et navette
22	Autres oléagineux
23	Surface oléagineux (total)
24	Haricot
25	Pois
26	Autres légumes secs
27	Légumes secs (total)
28	Pomme de terre
29	Topinambour
30	Betterave Industrielles
31	Betterave fourragère
32	Choux fourragers
33	Autres plantes sarclées
34	Plantes sarclées (total)

1970 et 1979

01	Blé tendre
02	Blé dur
03	Orge et escourgeon
04	Avoine
05	Seigle
06	Mélanges de céréales
07	Maïs grain
08	Sorgho grain
09	Riz
10	Autres (millet, sarrasin)
11	Total céréales
12	Colza
13	Tournesol
14	Soja
15	Lin oléagineux
16	Autres oléagineux (navette, œillette, ricin)
17	Lin textile
18	Chanvre (textile et papier)

19	Houblon
20	Tabac
21	Plantes médicinales et à parfum (lavande, lavandin, menthe, pavot, ...)
22	Semences grainières (lég., florales, industr.)
23	Autres (chicorée à café, sorgho à balai)
24	Total cultures industrielles
25	Haricot sec
26	Fève et féverole
27	Autres (lentille, pois sec...)
28	Total légumes secs
29	Pomme de terre de conservation
30	Pomme de terre nouvelle et primeur
31	Pomme de terre pour l'industrie
32	Plants de pomme de terre
33	Betterave industrielle (semences exclues)
34	Betterave fourragère
35	Chou fourrager
36	Autres (citrouille, rutabaga, topinambour)
37	Total plante sarclées
38	Maïs fourrage
39	Autres fourrages annuels
40	Prairies artificielles (luzerne, trèfle violet, ect...)
41	Prairies temporaires de 5 ans et mois
42	Total cultures fourragères
43	Jachères
44	Légumes frais (yc melon, fraise, asperge) en plein champ
45	Légumes frais (yc melon, fraise, asperge) en maraîchage plein air
46	Légumes frais (yc melon, fraise, asperge) en maraîchage sous abri bas
47	Légumes frais (yc melon, fraise, asperge) en maraîchage sous abri serre
48	Total légumes frais
49	Fleurs, plantes ornementales en plein air
50	Fleurs, plantes ornementales sous abri bas
51	Fleurs, plantes ornementales sous serre
52	Total fleurs, plantes ornementales
53	Total Vignes
54	Total Verger 6 espèces (Abricotier, cerisier, pêcher, prunier, poirier, pommier)
55	Total autres cultures permanentes (Agrumes, oliviers, petits fruits, pépinières...)
56	Prairies permanentes fauchées
57	Prairies permanentes non fauchées
58	Parcours, landes et alpages productifs (non compris les pacages public)
59	Total superficie toujours en herbe
60	Jardins familial
61	SAU
62	Sol des bâtiments et cours
63	Landes et friches non productives
64	Superficie agricole utilisée (82 + 83 + 84)
65	Peupleraies en plein
66	Bois et forêts
67	Territoire non agricole (yc parc et jardins d'agrément)
68	Superficie totale (85 + 86 + 87 + 88)

1988

01	Blé tendre
02	Blé dur
03	Orge et escourgeon
04	Avoine
05	Triticale
06	Seigle
07	Maïs grain
08	Maïs semence
09	Sorgho grain
10	Riz
11	Mélanges (yc. méteil)
12	Autres (alpiste, millet, sarrasin)
13	Total céréales
14	Betterave industrielle

15	Colza grain et navette
16	Tournesol
17	Soja
18	Autres oléagineux (lin, œillette, ricin,...)
19	Lin textile
20	Chanvre (textile, papier)
21	Houblon (en production ou non)
22	Tabac (yc. plants)
23	Plantes médicinales à parfum aromatiques et condimentaires (lavande, lavandin, menthe, pavot, ...)
24	Semence grainière (lég., flor., indust., fourragères)
25	Autres (chicorée à café, sorgho à balai)
26	Total cultures industrielles
27	Pois sec (yc. pois protéagineux)
28	Fève et féverole
29	Lupin, vesce
30	Autres (haricot sec, lentille, pois chiche, ...)
31	Total légumes secs et protéagineux
32	Maïs fourrage et ensilage (plante entière)
33	Chou fourrager
34	Betterave fourragère
35	Autres plantes sarclées fourragères
36	Autres fourrages annuels (sorgho fourrager, ...)
37	Prairies artificielles (luzerne, trèfle violet, ...)
38	Prairies temporaires (0 à 5 ans) (yc. RGI)
39	Total fourrage en culture principale
40	Prairies semées depuis 6 à 10 ans
41	Prairies naturelles ou semées depuis plus de 10 ans
42	STH peu productive (parcours, lande et alpage, ...)
43	Total STH
44	Pomme de terre primeurs ou nouvelles
45	Pomme de terre de semi saison et conservation
46	Plants de pomme de terre
47	Pomme de terre pour la féculerie
48	Total pomme de terre
49	Légumes frais et fraise parcelles en plein air ou sous abris bas consacrées exclusivement à des légumes ou des fleurs
50	Légumes frais et fraise parcelles en plein air ou sous abris bas en rotation avec d'autres cultures
51	Légumes frais et fraise parcelles sous serre ou sous abri haut
52	Total légume frais et fraise
53	Fleurs, plantes ornementales en plein air ou sous abri bas
54	Fleurs, plantes ornementales sous serre ou sous abri haut
55	Total fleurs, plantes ornementales
56	Total Vignes
57	Total cultures permanentes entretenues (yc jeunes plantations, yc sous serre)
58	Jachères (yc jachères de vigne)
59	Jardins et vergers familiaux
60	SAU
61	Sol des bâtiments et cours
62	Landes et friches non productives
63	Peupleraies en plein
64	Taillis, bois et forêts de l'exploitation
65	Territoire non agricole (yc parc et jardins d'agrément)
66	Superficie totale

2000

01	Blé tendre
02	Blé dur
03	Orge et escourgeon
04	Avoine
05	Triticale
06	Seigle
07	Maïs
08	Sorgho grain
09	Riz
10	Autres (mélanges, sarrasin, ...)
11	Total céréales

12	Betterave industrielle
13	Colza
14	Tournesol
15	Soja
16	Autres oléagineux (lin, œillette, ricin, ...)
17	Lin textile
18	Autres plantes textiles (chanvre, ...)
19	Houblon
20	Tabac
21	Plantes aromatiques, à parfum, médicinale et condimentaires
22	Semences grainière
23	Autres (chanvre papier, chicorée à café)
24	Total cultures industrielles
25	Pois protéagineux
26	Féverole
27	Lupin, vesce
28	Légumes secs (haricot sec, lentille, pois chiche, fève, ...)
29	Total légumes secs et protéagineux
30	Maïs fourrage et ensilage (plante entière)
31	Plantes sarclées fourragères
32	Autres fourrages annuels
33	Prairies artificielles
34	Prairies semées depuis automne 94 graminées pures
35	Prairies semées depuis automne 94 mélanges
36	Total fourrages
37	Prairies naturelles ou semées avant automne 1994
38	STH peu productive (parcours, lande pâturée, ...)
39	Total STH
40	Pomme de terre primeurs ou nouvelles (com. avant 1er août)
41	Pomme de terre demi-saison et conservation (con. après 1er août)
42	Plants de pomme de terre
43	Pomme de terre de féculerie
44	Total pomme de terre
45	Légumes frais, fraise et melon consacré exclusivement à des légumes (maraîchage)
46	Légumes frais, fraise et melon (plein champ destinés au marché du frais)
47	Légumes frais, fraise et melon (destinés à la transformation)
48	Légumes frais, fraise et melon (Parcelles sous serre ou sous abri haut)
49	Total légumes frais, fraise et melon
50	Fleurs, plantes ornementales en plein air ou sous abri bas
51	Fleurs, plantes ornementales sous serre ou sous abri haut
52	Total fleurs, plantes ornementales
60	Total Vignes
78	Total cultures permanentes entretenues (yc. jeunes plantation, yc. sous serre)
79	Jachères non aidées (yc. jachère de vigne)
80	Jachère aidées (nc. cult. non alim. sur terre gelées)
81	Total jachères
82	Jardins et vergers familiaux
83	SAU
84	Sol des bâtiments et cours
85	Peupleraies en plein
86	Bois et forêts de l'exploitation
87	Lande non productive, friche, territoire non agricole (yc. étang, jardin d'agrément, ...)
88	Superficie totale (83 à 87)

2010

01	Total céréales	12	Mais grain et semence
02	Blé tendre hiver	13	Sorgho grain
03	Blé tendre printemps	14	Riz indica
04	Blé dur hiver	15	Autres riz
05	Blé dur printemps	16	Autres cultures hiver (mélange)
06	Orge d'hiver, escourgeon	17	Autres cultures printemps (mélange)
07	Orge de printemps	18	Autres céréales que maïs et riz (DOM)
08	Avoine d'hiver	19	Total Oléagineux, Protéagineux
09	Avoine de printemps	20	Total Oléagineux
10	Triticale	21	Colza hiver
11	Seigle	22	Colza printemps

23	Tournesol	65	Total Pomme de terre
24	Soja	66	Pomme de terre primeur ou nouvelle
25	Lin oléagineux	67	Pomme de terre demi-saison, conservation
26	Autres oléagineux	68	Pommes de terre plants
27	Total protéagineux	69	Pomme de terre féculerie
28	Pois protéagineux	70	Autres tubercules (sous-total) (DOM)
29	Féveroles et vesce	71	Ignome
30	Lupins doux	72	Madère, dachine
31	Total plantes à fibres	73	Manioc
32	Lin textile	74	Patate douce
33	Chanvre	75	Autres
34	Autres plantes textiles	76	Total fleurs et plantes ornementales
35	Oléagineux ou plantes à fibres (DOM)	77	Fleurs plein air ou abris bas
36	Total Plantes Industrielles	78	Fleurs coupées en plein air ou sous abri bas (DOM)
37	Betterave industrielle	79	Plantes en pot en plein air ou sous abri bas (DOM)
38	Houblon	80	Fleurs sous serre ou abri haut chauffé
39	Tabac	81	Fleurs sous serre ou abri haut non chauffé
40	Plant. arom. parf. medic. cond.	82	Fleurs coupées sous serre ou sous abri haut (DOM)
41	Semence grainière	83	Plantes en pot sous serre ou sous abri haut (DOM)
42	Canne à sucre	84	Total Vignes
43	Chicorée à café	85	Total culture permanente
44	Racine endive	86	Fruits à noyau
45	Autres cultures industrielles	87	Fruits à pépins
46	Total fourrages et STH	88	Agrumes
47	Mais fourrage et ensilage	89	Petits fruits
48	Plantes sarclées fourragères	90	Fruits à coque
49	Légumineuses fourragères	91	Total jachère
50	Autres fourrages annuels	92	Jachère sous contrat
51	Prairies artificielles	93	Autres jachères
52	Autres prairies sem dep sep2004 = "prairie temporaires"	95	Jardins et vergers familiaux
53	STH productive	96	Abattis
54	STH peu productive	97	SAU
55	Total légume secs	98	Sol des bâtiments et cours
56	Lentille, pois chiche, fève	99	Taillis à courte rotation
57	Autres légumes secs	10	Bois et forêts de l'exploitation
58	Total légumes frais, fraises et melons	10	Lande non productive, friche
59	Parcelles sous serre ou abris haut (DOM)	1	
60	Serre chauffée	10	
61	Serre non chauffée	2	Autres superficielles
62	Légumes frais exclusivement (plein air ou abris bas)	10	
63	Plein champ marche frais	3	Superficie totale
64	Plein champ transformation		

Légumes

1955

01 Légumes verts et fraises

1970 et 1979

01	Ail	Plein champ
02	Ail	Maraichage
03	Artichaut	Plein champ
04	Artichaut	Maraichage
05	Asperge	Plein champ
06	Asperge	Maraichage
07	Aubergine	Plein champ
08	Aubergine	Maraichage
09	Betterave potagère	Plein champ
10	Betterave potagère	Maraichage
11	Carotte	Plein champ
12	Carotte	Maraichage
13	Céleri Branche	Plein champ
14	Céleri Branche	Maraichage

15	Céleri Rave	Plein champ
16	Céleri Rave	Maraichage
17	Chou de Bruxelles	Plein champ
18	Chou de Bruxelles	Maraichage
19	Chou-fleur	Plein champ
20	Chou-fleur	Maraichage
21	Autres choux	Plein champ
22	Autres choux	Maraichage
23	Concombre	Plein champ
24	Concombre	Maraichage
25	Endive	Plein champ
26	Endive	Maraichage
27	Epinard	Plein champ
28	Epinard	Maraichage
29	Haricot à écosser demi-sec	Plein champ
30	Haricot à écosser demi-sec	Maraichage
31	Haricot vert	Plein champ
32	Haricot vert	Maraichage
33	Navet	Plein champ
34	Navet	Maraichage
35	Oignon	Plein champ
36	Oignon	Maraichage
37	Petit pois	Plein champ
38	Petit pois	Maraichage
39	Poireau	Plein champ
40	Poireau	Maraichage
42	Pomme de terre primeur	Maraichage
44	Pomme de terre récoltée avant maturité à compter du 1er aout	Maraichage
45	Radis rose	Plein champ
46	Radis rose	Maraichage
47	Salade Chicorée, frisée et scarole	Plein champ
48	Salade Chicorée, frisée et scarole	Maraichage
49	Salade laitue pommée et romaine	Plein champ
50	Salade laitue pommée et romaine	Maraichage
51	Tomate	Plein champ
52	Tomate	Maraichage
53	Fraise	Plein champ
54	Fraise	Maraichage
55	Melon	Plein champ
56	Melon	Maraichage

1988

01	Ail	09	Haricot vert
02	Asperge	10	Melon
03	Artichaut	11	Oignon
04	Carotte	12	Petit pois
05	Chou-fleur	13	Poireau
06	Concombre	14	Salades Chicorée frisée et scarole
07	Endive	15	Salades Laitue pommée et romaine
08	Fraise	16	Tomate

2000

01	Plants de légume
02	Asperge
03	Carotte
04	Chou-fleur
05	Courgette
06	Fraise
07	Haricot vert
08	Melon
09	Oignon de couleur
10	Petit pois
11	Poireau
12	Salade
13	Tomate

2010	
01	Ail
02	Artichaut
03	Aubergine
04	Asperge
05	Banane légume
06	Bette et carde
07	Betterave potagère (rouge)
08	Brède
09	Brocolis
10	Carotte
11	Céleri branche
12	Céleri-rave
13	Chou blanc
14	Chou de Bruxelles
15	Chou chinois
16	Chou à choucroute
17	Chou coco, chou palmiste
18	Chou-fleur
19	Chou vert
20	Choux autres
21	Cristophine (chouchou, chayotte)
22	Concombres
23	Courgettes sous serre ou sous abri haut
24	Courgettes en plein air ou sous abri bas
25	Echalote
26	Epinard
27	Fenouil
28	Fève
29	Flageolet
30	Fraise sous serre ou sous abri haut
31	Fraise en plein air ou sous abri bas
32	Gombo
33	Haricot à écosser et demi-sec
34	Haricot coco paimpolais
35	Haricot vert, beurre
36	Lentilles
37	Maïs doux
38	Melons sous serre ou abri haut
39	Melon en plein air ou sous abri bas
40	Navet potager
41	Oignon blanc
42	Oignon de couleur
43	Oignon pays
44	Oignons autres
45	Pastèques
46	Petits pois
47	Plants de légumes
48	Poireau
49	Pois d'angole
50	Poivron
51	Potiron, courge giraumon
52	Radis
53	Raifort cultivé ou radis noir
54	Salade - chicorée
55	Salade - Laitue
56	Salade - Mâche
57	Salade - autres
58	Salsifis
59	Tomates sous serre : grappe
60	autres => tomates sous serres hors grappe
61	Tomates plein air
62	Légumes -autres

Fruits

1955

01 Vignes

1970 et 1979

01	Vignes à raisin de cuve AOC
02	Vignes à raisin de cuve VDQS
03	Vignes à raisin de cuve Vin de table
04	Vignes à raisin de cuve Vins de Cognac
05	Vignes à raisin de table
06	Pépinières viticoles
07	Vignes mères de porte greffes
08	Total Vignes
09	Abricotier
10	Cerisier
11	Pêcher (yc brugnon, nectarine, pavie)
12	Prunier (yc mirabelle, quetsche)
13	Poirier
14	Pommier de table
15	Total Verger 6 espèces
16	Agrumes
17	Oliviers entretenus
18	Autres vergers (châtaignier, figuier, noyer, ect., yc jeunes plantation)
19	Petits fruits (framboise, cassis, ect., ...)
20	Pépinières ornementales
21	Pépinières fruitières
22	Pépinières forestières
23	Autres (jonc, mûrier, osier, ect., ...)
24	Total autres cultures permanentes

1988

01	Vignes à raisin de cuve à vocation AOC
02	Vignes à raisin de cuve à vocation VDQS
03	Vignes à raisin de cuve à vocation vin pour Cognac
04	Vignes à raisin de cuve à vocation autres vins
05	Vignes à raisin de table
06	Pépinières viticoles
07	Vignes mères de porte greffes
08	Total Vignes
09	Abricotier
10	Cerisier
11	Pêcher (yc. brugnon, nectarine, pavie)
12	Prunier (yc. mirabelle, quetsche)
13	Poirier
14	Pommier de table
15	Agrumes
16	Kiwi
17	Olivier olive de table
18	Olivier olive à huile
19	Fruits à coque (amandier, châtaignier, noyer, ...)
20	Autres vergers (pommier à cidre, figuier, ...)
21	Petits fruits (cassis, framboise, groseille, ...)
22	Pépinières ornementales
23	Pépinières fruitières
24	Pépinières forestières
25	Autres (jonc, mûrier, osier, ect., ...)
26	Total cultures permanentes entretenues (yc. jeunes plantations, yc. sous serre)

2000

01	Vignes à raisin de cuve à vocation d'appellation (AOC, VDQS)
02	Vignes à raisin de cuve à vocation vin de pays

03	Vignes à raisin de cuve à vocation vin de table
04	Vignes à raisin de cuve à vocation vin apte à la production de cognac
05	Vignes à raisin de table
06	Pépinières viticoles
07	Vignes mères de porte greffes
08	Total Vignes
09	Abricotier
10	Cerisier
11	Pêcher (yc. brugnol, nectarine, pavie)
12	Prunier (yc. mirabelle, quetsche)
13	Poirier de table
14	Pommier de table
15	Agrumes
16	Kiwi
17	Olivier
18	Noyers
19	Autres fruits à coque (amandier, châtaignier, ...)
20	Autres vergers (pomme à cidre, figuier, ...)
21	Petits fruits (cassis, framboise, ...)
22	Pépinières ornementales
23	Pépinières fruitières
24	Pépinières forestières
25	Autres (jonc, mûrier, osier, ect., ...)
26	Total cultures permanentes entretenues (yc. jeunes plantation, yc. sous serre)

2010

01	Total vignes raisin de cuve
02	Vignes vin AOP
03	Vignes vin IGP
04	Vignes vin sans indication géographique
05	Vignes production eau vie
06	Vignes raisin de table
07	Vignes, pépinière viticole
08	Vigne porte-greffe
09	Total culture permanente
10	Fruits à noyau
11	Abricotier
12	Cerisier et griottier
13	Pêcher, nectarinier, pavie
14	Prunier
15	Olivier
16	Autres fruits à noyau
17	Fruits à pépins
18	Pommiers de table
19	Pommiers à cidre
20	Poirier y compris nashi
21	Poiriers à poiré
22	Kiwi
23	Figuier
24	Autres fruits à pépins
25	Agrumes
26	Mandarinier et ses hybrides, clémentinier
27	Pamplemousse et hybrides : tangelo
28	Oranger et ses hybrides : tangor
29	Citrons
30	Limes
31	Combaya
32	Autres agrumes
33	Petits fruits
34	Framboisier
35	Groseillier
36	Cassissier
37	Myrtille
38	Autres petits fruits
39	Fruits à coque
40	Amandier
41	Châtaignier

42	Noyer
43	Noisetier
44	Autres fruits à coques
45	Fruits tropicaux
46	Abricots pays ou mamey
47	Ananas
48	Avocat
49	Banane fruit toute espèces
50	Cacao
51	Café
52	Carambole
53	Cerise pays ou acérola
54	Coco frais
55	Corossol
56	Fruit à pain
57	Goyave
58	Goyavier
59	Grenadille (maracudja)
60	Letchi, ramboutan
61	Longani
62	Mangue
63	Papaye
64	Pomme cannelle
65	Autres fruits tropicaux
66	Arbres de Noël
67	Pépinière, ornementale, fruitière forestière
68	Culture à vocation énergétique
69	Autres (jonc, mûrier, osier, arbres, truffiers...)

Cheptel

1955

01	Equins
02	Bovins (total)
03	Vaches laitières
04	Ovins (total)
05	Porcins (total)
06	Truies mères

1970 et 1979

01	Vache laitière (yc réforme)
02	Vaches nourrices (yc réforme)
03	Bovins de moins d'un an
04	Bovins de 1 à 2 ans toutes destinations mâles (yc. taureaux)
05	Bovins de 1 à 2 ans toutes destinations femelles
06	Autres bovins de 2 ans et plus (élevage boucherie bœufs de trait) mâles (yc. taureaux)
07	Autres bovins de 2 ans et plus (élevage boucherie bœufs de trait) femelles
08	Total bovins
70	Juments poulinières (réforme exclue)
71	Chevaux de selle et de course
72	Chevaux lourds
73	Anes, mulets, bardots
74	Total équidés
75	Chèvres (yc réforme)
76	Autres caprins (yc compris boucs)
77	Total caprins
78	Brebis mères (yc réforme)
79	Agnelles pour la souche
80	Autres ovins (yc béliers)
81	Total ovins
82	Truies mères (réforme exclue)
83	Jeunes truies de 50 kg et plus
84	Porcelets de moins de 20 kg
85	Autres porcs de 20 kg et plus
86	Total porcins

87	Lapines mères
88	Poules et poulettes
89	Poulets de chair et coqs
90	Canards
91	Dindes et dindons au 1er octobre
92	Pintades au 1er octobre
93	Oies au 1er octobre
94	Pigeons, cailles
95	Total volailles
96	Nombre de ruches
97	Présence d'animaux divers : animaux à fourrure
98	Présence d'animaux divers : gibier d'élevage

1988

01	Vaches laitières (yc. réforme)
02	Vaches nourrices (yc. réforme)
03	Autres bovins de 2 ans et plus femelles
04	Autres bovins de 2 ans et plus mâles
05	Bovins de 1 à moins de 2 ans femelles
06	Bovins de 1 à moins de 2 ans mâles
07	Veaux de boucherie
08	Autres bovins de moins de 1 an
09	Total bovins
10	Juments et ponette poulinières selle, course
11	Juments et ponette poulinières races lourdes
12	Chevaux et poneys selle, course
13	Chevaux et poneys trait, boucherie, maigre
14	Ane, mulets, bardots
15	Total équidés
16	Chèvres
17	Chevrette pour la souche
18	Autres caprins (yc. boucs)
19	Total caprins
20	Brebis mères (yc. réforme) nourrices
21	Brebis mères (yc. réforme) laitières
22	Agnelles pour la souche
23	Autres ovins (yc. béliers)
24	Total ovins
25	Truies mères (réforme exclue)
26	Jeunes truies de 50 kg et plus
27	Porcs à l'engrais, truies réformées et verrats
28	Porcelets
29	Total porcins
30	Lapines mères
31	Poules pondeuses d'œufs de consommation
32	Poules pondeuses d'œufs à couver
33	Poulettes
34	Poulets de chair et coqs
35	Dindes et dindons au 1er octobre 1988
36	Pintades
37	Canards (à rôtir, à gaver)
38	Oies au 1er octobre 1988 (à rôtir, à gaver)
39	Pigeons, cailles
40	Total volaille

2000

01	Vaches laitières (yc. réforme)
02	Vaches nourrices (yc. réforme)
03	Autres bovins 2 ans et plus : femelles
04	Autres bovins 2 ans et plus : mâles
05	Bovins de 1 à moins de 2 ans : femelles
06	Bovins de 1 à moins de 2 ans : mâles
07	Bovins de moins de 1 an : veau de boucherie
08	Bovins de moins de 1 an : autres : femelles
09	Bovins de moins de 1 an : autres : mâles
10	Total bovins

11	Juments et ponettes poulinières (nc. réforme) : selle, course
12	Juments et ponettes poulinières (nc. réforme) : races lourdes
13	Chevaux et poneys (yc. réforme) : selle, course
14	Chevaux et poneys (yc. réforme) : trait, boucherie, maigre
15	Anes, mulets, bardots
16	Total équidés
17	Chèvres (yc réforme)
18	Chevrettes pour la souche
19	Autres caprins
20	Total caprins
21	Brebis mères (yc. réforme) : nourrices
22	Brebis mères (yc. réforme) : laitières
23	Agnelles pour la souche
24	Autres ovins (yc. béliers)
25	Total ovins
26	Truies mères (nc. réforme)
27	Jeunes truies de 50 kg et plus destinées à la reproduction
28	Porcelets (yc. post sevrage)
29	Autres porcs (engraissement, verrats, réforme)
30	Total porcins
31	Lapines mères (nc. race angora)
32	Poules pondeuses : d'œufs de consommation
33	Poules pondeuses d'œufs à couvrir
34	Poulettes
35	Poulets de chair et coqs
36	Dindes et dindons
37	Oies (à rôtir, à gaver)
38	Canards : à rôtir
39	Canards : à gaver
40	Pintades
41	Pigeons, cailles

2010

01	Vaches laitières (yc. réformes)
02	Vaches nourrices (yc. réformes)
03	Veaux de 8 jours
04	Veaux de boucherie
05	Veaux abattus entre 8 et 12 mois
06	Autres veaux mâles
07	Autres veaux femelles
08	Mâles castrés de 1 à 2 ans
09	Mâles castrés de 2 ans et plus
10	Autres mâles de 1 à 2 ans
11	Autres mâles de 2 ans et plus
12	Femelles de renouvellement de 1 à 2 ans
13	Femelles de renouvellement de 2 ans et plus
14	Autres femelles de 1 à 2 ans
15	Autres femelles de 2 ans et plus
16	Total équidés
17	Chèvres (yc. réformes)
18	Chevrettes pour la souche
19	Autres caprins (yc. boucs)
20	Chevreaux à l'engraissement
21	Brebis mères nourrices (yc. réforme)
22	Brebis mères laitières (yc. réforme)
23	Agnelles pour la souche
24	Autres ovins (yc. béliers)
25	Agneaux à l'engraissement
26	Truies reproductrices 50 kg et + (yc. cochettes, réforme exclue)
27	Porcelets (yc. post sevrage)
28	Jeunes porcs de 20 à 50 kg
29	Autres porcs de 50 kg et +
30	Lapines mères (race angora exclue)
31	Lapins à l'engraissement
32	Poules pondeuses : d'œufs de consommation
33	Poules pondeuses d'œufs à couvrir
34	Poulettes

35	Poulets de chair et coqs
36	Dindes et dindons
37	Oies (à rôtir, à gaver)
38	Canards : à rôtir
39	Canards en gavage, à gaver
40	Pintades
41	Pigeons, cailles

Nomenclature utilisée dans les enquêtes structures

Liste construite à partir de la base de données disponible pour les enquêtes 1990 à 2007 dont les résultats sont disponibles sur le site EUROSTAT (<http://ec.europa.eu/eurostat/web/agriculture/data/database>)

Superficie des cultures

Céréales	
01	Blé tendre et épeautre
02	Blé dur
03	Seigle
04	Orge
05	Avoine
06	Maïs grain
07	Riz
08	Autres céréales (mélanges, sarrasin...)
09	Pomme de terre
10	Betteraves sucrières (nc. semences)
Plantes industrielles	
11	Tabac
12	Houblon
13	Coton
14	Colza et navette
15	Tournesol
16	Soja
17	Autres plantes oléagineuses ou textiles (lin textile et oléagineux, chanvre textile ...)
18	Aromatiques, médicinales et condimentaires (lavande, lavandin, menthe, ...)
19	Autres plantes industrielles (chanvre papier, chicorée à café...)
Légumes frais, melons, fraises	
20	En plein air : Légumes frais, melons, fraises
21	Culture de plein champs : En plein air : Légumes frais, melons, fraises
22	Culture maraichère : En plein air : Légumes frais, melons, fraises
23	Sous serre : Légumes frais, melons, fraises
24	Superficie des serres utilisées
Fleurs et plantes ornementales	
25	En plein air : Fleurs et plantes ornementales
26	Sous serre : Fleurs et plantes ornementales
Cultures permanentes	
27	Plantations d'arbres fruitiers et baies
28	Agrumeraies
29	Oliveraies
30	Vignes
31	Pépinières
32	Autres cultures permanentes
33	Cultures permanentes sous serre
Prairies permanentes et pâturages	
34	Prairies permanentes et pâturage (nc. les pâturages pauvres)
35	Pâturages pauvres
Jachères	
36	Jachères

Cheptel

Bovins	
01	Bovins de moins d'un an
02	Bovins d'un à deux an mâles
03	Bovins d'un à deux ans femelles
04	Bovins de plus de deux ans mâles

05	Génisses de plus de 2 ans
06	Vaches laitières (plus de 2 ans)
07	Autres vaches (plus de 2 ans)
Ovins	
08	Brebis reproductrices
09	Ovins, autres
Caprins	
10	Chèvres reproductrices
11	Autres caprins
Porcins	
12	Porcelets d'un poids vif de moins de 20 kg
13	Truies reproductrices de 50 kg et plus
14	Autres porcs
Volaille	
15	Poulets de chair
16	Poules pondeuses
17	Autres volailles

Nomenclature du Registre parcellaire graphique

01	Blé tendre
02	Maïs grain et ensilage
03	Orge
04	Autres céréales
05	Colza
06	Tournesol
07	Autres oléagineux
08	Protéagineux
09	Plantes à fibres
10	Semences
11	Gel (surfaces gelées sans production)
12	Gel industriel
13	Autres gels
14	Riz
15	Légumineuses à grain
16	Fourrage
17	Estives landes
18	Prairies permanentes
19	Prairies temporaires
20	Vergers
21	Vignes
22	Fruits à coque
23	Oliviers
24	Autres cultures industrielles
25	Légumes - fleurs
26	Canne à sucre
27	Arboriculture
28	Divers

Nomenclature du RICA

Superficie des cultures

01	Surface en blé tendre (ha)
02	Surface en maïs grain (ha)
03	Surface en orge (ha)
04	Surface en cultures industrielles (ha)
05	Surface en oléagineux sauf colza (ha)
06	Surface en colza (ha)
07	Surface en betterave à sucre (ha)
08	Surface en pomme de terre (nc primeur) (ha)
09	Surface en pois protéagineux (ha)
10	Surface en fleurs (are)
11	Surface en fleurs sous verre (are)
12	Surface en fleurs plein air (are)
13	Surface développée en fleurs coupées (are)
14	Surface en semences et plants (are)

15	Surface en légumes frais (are)
16	Surface en légumes frais de plein air (are)
17	Surface en légumes frais sous verre (are)
18	Surface en légumes frais de plein champ (are)
19	Surface en vergers (ha)
20	Surface en pommiers (ha)
21	Surface en pêcheurs (ha)
22	Surface en poiriers (ha)
23	Surface en vignes (ha)
24	Surface en vignes pour vin AOC/AOP et IGP (ha)
25	Surface en vignes pour vin sans indication géographique y compris vin de pays (ha)
26	Surface en vignes pour raisin de table (ha)
27	Surface fourragère principale (SFP) (ha)
28	Surface en maïs fourrager (ha)
29	Superficie toujours en herbe (ha)

Cheptel

	Effectifs animaux (UGB)
01	
02	Effectif bovins (Tête)
03	Effectif de vaches laitières (Tête)
04	Effectif de bovins non laitiers (Tête)
05	Effectif de vaches nourrices (Tête)
06	Effectif de bovins de moins d'un an (Tête)
07	Effectif de veaux de batterie (Tête)
08	Effectif autres veaux de boucherie (Tête)
09	Effectif des autres herbivores (Tête)
10	Effectif ovins (Tête)
11	Effectif de brebis laitières (Tête)
12	Effectif de brebis viande (Tête)
13	Effectif caprins (Tête)
14	Effectif porcs (Tête)
15	Effectif de porcs à l'engrais (Tête)
16	Effectif de porcelets (Tête)
17	Effectif de truies mères (Tête)
18	Effectif de volailles (x 100 Tête)
19	Effectif de poulets de chair (x 100 Tête)
20	Effectif de poules pondeuses (x 100 Tête)
21	Effectif de volailles diverses (x 100 Tête)

Nomenclature EUROSTAT

Superficie et production des cultures

Note : cette nomenclature a été établie à partir du manuel d'établissement des statistiques sur les cultures de 2017 (EUROSTAT, 2017) et elle a pu évoluer au cours du temps. Par exemple, certaines catégories de cultures ont été modifiées en 2015. Par exemple, la chicorée est classée dans les légumes à partir de 2015 alors qu'elle faisait partie des cultures industrielles auparavant. D'autres catégories ont été supprimées comme les catégories "blé dur d'hiver" et "blé dur de printemps" (la catégorie "blé dur" existe toujours).

Cultures annuelles

01	Céréales (riz non compris) pour la production de grains (yc semence)
02	Blé et épeautre
03	Blé tendre et épeautre
04	Blé tendre et épeautre d'hiver
05	Blé tendre et épeautre de printemps
06	Blé dur
07	Seigle et mélange de céréales d'hiver (méteil)
08	Seigle
09	Mélange de céréales d'hiver (méteil)
10	Orge
11	Orge d'hiver
12	Orge de printemps

13	Avoine et mélange de céréales de printemps (grains mélangés autres que méteil)
14	Avoine
15	Mélange de céréales de printemps (grains mélangés autres que méteil)
16	Maïs grain
17	Triticale
18	Sorgho
19	Autres céréales (sarrasin, millet, alpiste, ect...)
20	Riz
21	Riz Indica
22	Riz Japonica
23	Légumes secs et cultures protéagineuses pour la production de grains (y compris semences mélanges de céréales et de légumes secs)
24	Pois secs
25	Fèves et féveroles
26	Lupins doux
27	Autres légumes secs et cultures protéagineuses
28	Plantes sarclées
29	Pomme de terre (yc plants de pomme de terre)
30	Betteraves à sucre (semences non comprises)
31	Autres plantes sarclées
32	Plantes industrielles
33	Graines oléagineuses
34	Graines de colza, de navette, de tournesol et de soja
35	Graines de colza et de navette
36	Graines de colza et de navette d'hiver
37	Graines de colza et de navette de printemps
38	Graines de tournesol
39	Soja
40	Graines de lin (lin oléagineux)
41	Graines de coton
42	Autres graines oléagineuses
43	Plantes textiles
44	Lin textile
45	Chanvre
46	Fibres de coton
47	Autres plantes textiles
48	Tabac
49	Houblon
50	Plantes aromatiques, médicinales et condimentaires
51	Cultures énergétiques
52	Autres plantes industrielles
53	Plantes prélevées en vert sur les terres arables
54	Prairies temporaires
55	Plantes légumineuses prélevées en vert
56	Luzerne
57	Autres plantes légumineuses prélevées en vert
58	Maïs ensilage
59	Autres céréales prélevées en vert (maïs ensilage non compris)
60	Autres plantes prélevées en vert sur les terres arables
61	Superficie agricole utilisée
62	Terres arables
63	Pépinières
64	Jardins potagers

Légumes

01	Légumes frais (y compris melons et pastèques) et fraises
02	Légumes frais (y compris melons et pastèques)
03	Choux communs (Brassicac)
04	Choux-fleurs et brocolis
05	Choux de Bruxelles
06	Choux pommés
07	Autres choux communs
08	Légumes à feuilles et à tiges (choux non compris)
09	Poireaux
10	Céleris branches

11	Laitues
12	Laitues -sous serre ou abris hauts accessibles
13	Endives (chicons)
14	Epinards
15	Asperges
16	Chicorée
17	Chicorée de consommation
18	Chicorée destinée à la transformation
19	Artichauts
20	Autres légumes à feuilles ou à tiges
21	Légumes cultivés pour le fruit (y compris melons et pastèques)
22	Tomates
23	Tomates de consommation
24	Tomates destinées à la transformation
25	Tomates -sous serre ou abris hauts accessibles
26	Concombres
27	Concombres - sous serre ou abris hauts accessibles
28	Cornichons
29	Aubergines
30	Courgettes
31	Courges et citrouilles
32	Melons
33	Pastèques
34	Poivrons (piments)
35	Poivrons (piments) - sous serre ou abris hauts accessibles
36	Légumes racines, bulbes et tubercules
37	Carottes
38	Oignons
39	Echalotes
40	Betteraves potagères
41	Céleris raves
42	Radis
43	Ail
44	Autres légumes racines, bulbes et tubercules
45	Légumes frais à cosse
46	Petits pois frais
47	Haricots frais
48	Autres légumes frais à cosse
49	Autres légumes frais
50	Fraises
51	Fraises - sous serre ou abris haut accessibles
52	Champignons cultivés
53	Champignons de Paris
54	Autres champignons cultivés

Fruits

01	Cultures permanentes pour la consommation humaine y compris provenant de jardins potagers
02	Cultures permanentes pour la consommation humaine
03	Fruits, baies et fruits à coques (agrumes, raisins et fraises non compris)
04	Fruits à pépins
05	Pommes
06	Pommes de consommation
07	Pommes destinées à la transformation
08	Poires
09	Poires de consommation
10	Fruits à noyau
11	Pêches
12	Nectarines et brugnons
13	Abricots
14	Cerises
15	Cerises acides (Griottes)
16	Cerises douces
17	Prunes
18	Autres fruits à noyau
19	Fruits de zones climatiques subtropicales et tropicales
20	Figues
21	Kiwi

22	Avocats
23	Bananes
24	Autres fruits de zones climatiques subtropicales et tropicales
25	Baies (fraises non comprises)
26	Cassis et groseilles
27	Cassis
28	Groseilles
29	Framboises
30	Myrtilles
31	Autres baies
32	Fruits à coque
33	Noix
34	Noisettes
35	Amandes
36	Châtaignes
37	Autres fruits à coque
38	Agrumes
39	Oranges
40	Oranges Navel
41	Oranges blondes
42	Oranges sanguines
43	Autres oranges
44	Petits agrumes
45	Satsumas
46	Clémentines
47	Autres petits agrumes (y compris les hybrides)
48	Citrons et limes (citrons verts)
49	Citrons jaunes
50	Limes (Citrons verts)
51	Pomélos et pamplemousses
52	Autres agrumes
53	Raisins
54	Raisins de cuve
55	Raisins de cuve pour vin à appellations d'origine protégée (AOP)
56	Raisins de cuve pour vin à indication géographique protégée (IGP)
57	Raisins de cuve pour les autres vins
58	Raisin de table
59	Raisins pour raisins secs
60	Raisins pour autres utilisation
61	Olives
62	Olives de table
63	Olives pour l'huile
64	Autres cultures permanentes pour la consommation humaine

CheptelPériode 1974 - 2004

01	Bovins
02	Bovins de moins d'1 an
03	Bovins de boucherie, de moins d'1 an
04	Veaux mâles, moins d'1 an, non destinés à la boucherie
05	Bovins mâles, 1 an
06	Bovins mâles, 2 ans ou plus
07	Bovins femelles, moins d'1 an, non destinées à la boucherie
08	Génisses de boucherie, 1 an
09	Génisses non destinées à la boucherie, 1 an
10	Génisses de boucherie, 2 ans ou plus
11	Génisses non destinées à la boucherie, 2 ans ou plus
12	Vaches
13	Vaches laitières
14	Vaches non laitières
15	Buffles
16	Porc domestique
17	Porcelets de moins de 20 kg
18	Truies reproductrices
19	Truies saillies

20	Truies saillies pour la première fois
21	Truies non saillies
22	Cochettes non encore saillies
23	Porcins de 20 kg à moins de 50 kg
24	Porcs à l'engrais, de 50 kg ou plus
25	Verrats reproducteurs
26	Ovins
27	Caprins
28	Poules pondeuses
<u>Période 2007-2016</u>	
01	Bovins
02	Bovins de moins d'1 an
03	Bovins de boucherie, de moins d'1 an
04	Bovins non destinés à la boucherie, de moins d'1 an
05	Bovins, 1 an
06	Bovins, 2 ans ou plus
07	Veaux mâles, moins d'1 an, non destinés à la boucherie
08	Bovins mâles, 1 an
09	Bovins mâles, 2 ans ou plus
10	Bovins femelles, 2 ans ou plus
11	Bovins femelles, moins d'1 an, non destinées à la boucherie
12	Génisses, 1 an
13	Génisses de boucherie, 1 an
14	Génisses non destinées à la boucherie, 1 an
15	Génisses, 2 ans ou plus
16	Génisses de boucherie, 2 ans ou plus
17	Génisses non destinées à la boucherie, 2 ans ou plus
18	Vaches
19	Vaches laitières
20	Vaches non laitières
21	Buffles
22	Porc domestique
23	Porcelets de moins de 20 kg
24	Porcins reproducteurs
25	Truies reproductrices
26	Truies saillies
27	Truies saillies pour la première fois
28	Truies non saillies
29	Cochettes non encore saillies
30	Porcins de 20 kg à moins de 50 kg
31	Porcs à l'engrais, de 50 kg ou plus
32	Porcs à l'engrais, de 50 kg à moins de 80 kg
33	Porcs à l'engrais, de 80 kg à moins de 110 kg
34	Porcs à l'engrais, de 110 kg ou plus
35	Verrats reproducteurs
36	Ovins
37	Brebis et agnelles saillies
38	Brebis et agnelles laitières saillies
39	Brebis et agnelles non-laitières saillies
40	Autres ovins
41	Caprins
42	Chèvres saillies et chèvres ayant déjà mis bas
43	Chèvres saillies pour la première fois
44	Chèvres ayant déjà mis bas
45	Autres caprins
46	Poules pondeuses

Nomenclature CORINE Land Cover

01	Tissu urbain continu
02	Tissu urbain discontinu
03	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques
04	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés
05	Zones portuaires
06	Aéroports

07	Extraction de matériaux
08	Décharges
09	Chantiers
10	Espaces verts urbains
11	Equipements sportifs et de loisirs
12	Terres arables hors périmètres d'irrigation
13	Périmètres irrigués en permanence
14	Rizières
15	Vignobles
16	Vergers et petits fruits
17	Oliveraies
18	Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole
19	Cultures annuelles associées à des cultures permanentes
20	Systèmes culturaux et parcellaires complexes
21	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants
22	Territoires agroforestiers
23	Forêts de feuillus
24	Forêts de conifères
25	Forêts mélangées
26	Pelouses et pâturages naturels
27	Landes et broussailles
28	Végétation sclérophylle
29	Forêt et végétation arbustive en mutation
30	Plages, dunes et sable
31	Roches nues
32	Végétation clairsemée
33	Zones incendiées
34	Glaciers et neiges éternelles
35	Marais intérieurs
36	Tourbières
37	Marais maritimes
38	Marais salants
39	Zones intertidales
40	Cours et voies d'eau
41	Plans d'eau
42	Lagunes littorales
43	Estuaires
44	Mers et océans

Nomenclature TerUti - LUCAS

La nomenclature présentée ici ne détaille que les catégories "Sols agricoles" de TerUti-LUCAS. Il existe aussi des nomenclatures détaillées pour l'occupation des sols artificialisés et les sols naturels dans TerUti-LUCAS.

Période 1982 - 1991

N°	Code TerUti	Description
01	27	Blé
02	28	Orge et escourgeon
03	29	Avoine
04	30	Maïs
05	31	Seigle
06	32	Mélange et autres céréales
07	33	Betteraves
08	34	Plantes textiles
09	35	Tournesol
10	36	Colza oléagineux
11	37	Autres cultures industrielles oléagineuses
12	38	Autres cultures industrielles
13	39	Pomme de terre
14	40	Pois et petits pois
15	41	Fèves, féveroles
16	42	Autres légumes
17	43	Pépinières (y compris forestières), fleurs et plantes ornementales
18	44	Plantes sarclées fourragères
19	45	Autres cultures fourragères annuelles
20	46	Prairies artificielles

21	47	Prairies fauchées ou mixtes
22	48	Prairies pâturées
23	49	Alpages régulièrement pâturés
24	50	Superficie en herbe à faible productivité potentielle
25	51	Pré - Vergers
26	52	Jachères
27	53	Abricotiers (en culture pure)
28	54	Cerisiers (en culture pure)
29	55	Pêchers (en culture pure)
30	56	Pruniers (en culture pure)
31	57	Poiriers (en culture pure)
32	58	Pommiers (en culture pure)
33	59	Mélange des 6 espèces
34	60	Autres espèces fruitières que les 6 (cultures pures en mélange)
35	61	Association des 6 espèces avec des productions autres que fruitières
36	62	Association des autres espèces que les 6 avec des productions autres que fruitières
37	63	Vignes (en culture pure)
38	64	Association vigne - verger des 6 espèces
39	65	Association vigne - autre culture
40	66	Petits fruits et autres cultures diverses
41	67	Jardins familiaux à dominante potagère
42	68	Pelouses d'agrément et autres superficies en herbe

Période 1992 - 2004

N°	Code TerUti	Description
01	27	Blé
02	28	Orge et escourgeon
03	29	Avoine
04	30	Maïs
05	31	Seigle
06	32	Mélange et autres céréales
07	33	Betteraves
08	34	Plantes textiles
09	35	Tournesol
10	36	Colza oléagineux
11	37	Autres cultures industrielles oléagineuses
12	38	Autres cultures industrielles
13	39	Pomme de terre
14	40	Pois et petits pois
15	41	Fèves, féveroles
16	42	Autres légumes
17	43	Pépinières (y compris forestières), fleurs et plantes ornementales
18	44	Plantes sarclées fourragères
19	45	Autres cultures fourragères annuelles
20	46	Prairies artificielles
21	461	Trèfle
22	462	Luzerne
23	463	Autres légumineuses ou mélange de légumineuses
24	47	Prairies temporaires
25	471	Ray-grass (Italie ou hybride)
26	472	Autres graminées pures
27	473	Mélanges de graminées ou graminées légumineuses
28	48	Prairies permanentes
29	49	Alpages régulièrement pâturés
30	50	Superficie en herbe à faible productivité potentielle
31	51	Pré - Vergers
32	52	Jachères
33	53	Abricotiers (en culture pure)
34	54	Cerisiers (en culture pure)
35	55	Pêchers (en culture pure)
36	56	Pruniers (en culture pure)
37	57	Poiriers (en culture pure)
38	58	Pommiers (en culture pure)
39	59	Mélange des 6 espèces
40	60	Autres espèces fruitières que les 6 (cultures pures en mélange)
41	61	Association des 6 espèces avec des productions autres que fruitières

42	62	Association des autres espèces que les 6 avec des productions autres que fruitières
43	63	Vignes (en culture pure)
44	64	Association vigne - verger des 6 espèces
45	65	Association vigne - autre culture
46	66	Petits fruits et autres cultures diverses
47	67	Jardins familiaux à dominante potagère
48	68	Pelouses d'agrément et autres superficies en herbe

Depuis 2005

01		Blé tendre et épeautre
02		Blé dur
03		Orge et escourgeon
04		Maïs
05		Triticale
06		Avoine
07		Autres céréales
08		Pomme de terre
09		Betterave industrielle
10		Tournesol
11		Colza et navette
12		Autres cultures industrielles oléagineuses
13	Sols cultivés	Protéagineux (y compris fourragers)
14		Autres racines et tubercules
15		Cultures industrielles textiles
16		Autres cultures industrielles annuelles (hors lupin)
17		Légumes, fleurs (y compris sous serre)
18		Jardins familiaux
19		Prairies temporaires
20		Jachères
21		Arbres fruitiers
22		Vigne
23		Autres cultures permanentes (y compris pépinières)
24		Sols enherbés liés à la production agricole, hors élevage
25		Sols nus liés à une activité agricole
28		Prairies permanentes
29	Surfaces toujours en herbe	Alpages

Annexe 2 : Liste d'enquêtes spécifiques menées dans le cadre des enquêtes structure depuis 1955

Nom	Descriptif	Dates connues	Disponibles au CASD	Exemple de publications nationales associées
Cultures				
Traitements phytosanitaires en arboriculture	Caractérisation des pratiques culturales axée sur l'utilisation des produits phytosanitaires pour obtenir un indicateur de pression phytosanitaire de référence	2012	√	Agreste, 2014
Pratiques phytosanitaires en viticulture		2010	√	Agreste, 2012
Pratiques phytosanitaires en grandes cultures		2014	√	Agreste, 2013
Pratiques culturales sur les légumes	Domaines enquêtés : itinéraire technique des cultures et usage de produits phytosanitaires	2013	√	Agreste, 2015
Pratiques culturales sur les grandes cultures	Techniques culturales (travaux du sol, fertilisation, traitements phytosanitaires) sur 14 cultures (blé tendre, blé dur, orge, triticale, maïs (grain et fourrage), colza, tournesol, pois protéagineux, betterave industrielle, pomme de terre, prairies temporaires, prairies permanentes et canne à sucre)	2006, 2013-2014	√	Agreste, 2008b, 2004
	Techniques culturales (précédent cultural, type de semence, variété semée, fertilisation, traitements, date de récolte ...) sur 8 cultures (blé tendre, blé dur, orge, maïs grain et fourrage, colza, tournesol, pois protéagineux)	1994		Agreste, 1996
Pratiques culturales en prairies	Techniques culturales sur prairies (Nature des prairies, fréquence de fertilisation, quantité d'engrais apporté), modes d'exploitation et rendement	1998, 2006, 2011	√	Agreste, 2000
		1982		SCEES, 1984
Enquête sur les productions d'orge et de blé	Variétés, surfaces, précédents culturaux, type de semis (date et mode) et de semence (semence produite par un établissement spécialisé ou non), fumure, désherbage, méthode de récolte, utilisation de la paille	1962-1969, 1975		SCEES, 1977, 1970, 1969, 1968, 1967, 1966, 1965
Enquête sur les productions de maïs	Variétés, surfaces, précédents culturaux, type de semis (date et mode) et de semence (semence produite par un établissement spécialisé ou non), fumure, désherbage, méthode de récolte, traitements (taupin, irrigation)	1962, 1963, 1964, 1965, 1967-1969, 1975		SCEES, 1977, 1970b, 1969d, 1968b, 1966b, 1965d
Enquête sur les pommes de terre	Variétés, plantation (date et mode), type de plants (certifiés ou non), fertilisation, traitement (doryphore, taupin, mildiou, désherbage, destruction des fanes), méthode de récolte	1963-1966		SCEES, 1966c
Inventaire des vergers	Facteurs descriptifs du potentiel de production des vergers	2012 - 2013	√	Agreste, 2015
Enquête sur les structures ou inventaire des vergers	Structure des exploitations ayant des vergers, pratiques culturales et commercialisation des produits des vergers	2007	√	x
Structure sur la production légumière	Porte sur les exploitations produisant des légumes frais destinés au marché du frais, à la transformation ou à la conservation	2005	√	x
Enquête sur les pratiques agricoles dans les bassins versants des programmes Bretagne Eau Pure et Pro-littoral	Comparaison des pratiques agricoles de différents territoires sur une même campagne, notamment celles des bassins versants engagés dans un contrat d'action pour la reconquête de la qualité de l'eau.	2004, 2011	√	Agreste Bretagne, 2013 *

Cheptel				
Bâtiments d'élevage porcin	Enquêtes prescrites par la directive communautaire n° 93/23/CEE. Donnent une connaissance précise du cheptel porcin par catégorie d'animaux permettant de réaliser des prévisions de production de viande porcine	2001, 2008	√	Agreste, 2008
Enquête sur la structure du cheptel porcin	Caractéristiques des unités de production (porcelet et engraissement), spécialisation, commercialisation, paramètres d'élevage	1969		SCEES, 1970c
Bâtiments d'élevage bovin	Enquêtes prescrites par la directive communautaire n° 93/24/CEE. Donnent une connaissance précise du cheptel porcin par catégorie d'animaux permettant de réaliser des prévisions de production de viande bovine	2001, 2008	√	Agreste, 2011 ^{N.D.}
Enquête sur la structure du cheptel bovin	Structure par âge du troupeau, races des femelles de souche, spécialisation des zones d'élevage bovin, production de viande ...	1963, 1967, 1969, 1972		SCEES, 1973, 1971, 1969d
Enquête annuelle laitière	Chiffres définitifs de collecte et de production de la branche laitière	1968-1994, 1995-2001, 2001-2014, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014	√	Agreste, 2006, 1997; SCEES, 1988
Bâtiments d'élevage ovin	Enquêtes prescrites par la directive communautaire n° 93/25/CEE. Donnent une connaissance précise du cheptel porcin par catégorie d'animaux permettant de réaliser des prévisions de production de viande ovine	2001, 2008	√	Agreste, 2006b ^{N.D.}
Bâtiments d'élevage caprin	Enquêtes prescrites par la directive communautaire n° 93/25/CEE. Donnent une connaissance précise du cheptel porcin par catégorie d'animaux permettant de réaliser des prévisions de production de viande caprine	2001, 2008	√	Agreste, 2006c ^{N.D.}
Bâtiments d'élevage Aviculture	Structure des exploitations, moyens et facteurs de production des exploitations dépassant des seuils de production de vente de volaille de chair, d'œufs de consommation ou d'œufs à couvrir.	2008, 2008 complémentaire	√	x
Enquête sur l'aviculture	Données générales sur la production, techniques et facteurs de production, relations contractuelles, élevage intensif avicole	1982, 1987, 1944		Agreste, 1998; Magdelaine and SCEES, 1989; SCEES, 1986
Enquête sur la cuniculture	Localisation de l'élevage, techniques de production (âge sevrage, importance des portées, consommation de granulées, problèmes sanitaires ...)	1976, 1994		Agreste, 1999; SCEES, 1978
Enquête sur les matières premières utilisées pour la fabrication d'aliments composés pour animaux de ferme	Composition (quantité et qualité) des matières premières utilisées pour les aliments complets et complémentaires (dont aliments d'allaitement et compléments minéraux) pour les animaux de ferme	tous les 3 ans depuis 1979		x
		2015	√	Agreste, 2017a
Pratiques d'élevage	Gestion des effluents, alimentation des animaux, pratiques phytosanitaires, soins aux animaux, main d'œuvre	2015	√	x

Annexe 3 : Définition de l'exploitation agricole

D'après (Agreste, 1997b)

La définition de l'exploitation agricole doit être précisée selon des seuils qui doivent être les plus petits possibles afin de conserver les nombreuses exploitations agricoles de faible taille, mais qui ensemble peuvent représenter une part importante de la production, dans les recensements (FAO, 1948).

En France, les exploitations recensées doivent répondre aux 4 conditions suivantes :

1. L'exploitation produit des produits agricoles (cueillette et ramassage dans la nature exclus)
2. L'exploitation atteint ou dépasse une certaine dimension
 - avoir une Superficie Agricole Utilisée supérieure ou égale à 1 hectare
 - OU
 - avoir une superficie en Culture Spécialisées (tabac, houblon, cultures florales...) supérieure ou égale à 0.2 hectares
 - OU
 - présenter une activité minimale de production
 - A - Présence d'un nombre minimum de l'une ou l'autre des espèces suivantes :
 - 1 reproducteur mâle faisant régulièrement la monte (étalon, baudet, taureau, bélier, verrat, bouc...);
 - 1 jument poulinière ou muletière ;
 - 1 vache ;
 - 2 bovins de plus de 2 ans;
 - 1 truie mère;
 - 6 brebis mères ;
 - 6 chèvres ;
 - 10 lapines - mères ;
 - 100 pondeuses ;
 - 10 ruches en production ;
 - une capacité d'incubation de 1000 œufs.
 - B - Présence d'un des élevages suivants :
 - élevage de chevaux, avec au moins une jument poulinière ;
 - élevage d'animaux à fourrure (visons, ragondins, chinchillas...), de chèvres ou de lapins angoras ;
 - élevage de gibier en captivité, pour l'abattage ou pour la vente (hors chasse).
 - C- Production, au cours de l'année passée, d'un certain nombre d'animaux :
 - 2 chevaux de boucherie ;
 - 5 veaux de batterie ;
 - 5 ovins de boucherie ;
 - 10 caprins de boucherie ;
 - 5 porcs ;
 - 200 lapins de chair ;
 - 500 volailles de chair (toutes espèces) ;

- 10000 œufs.

D - Présence d'une superficie minimum de l'une ou l'autre des cultures suivantes :

- 20 ares d'asperges ;
- 20 ares de choux a choucroute ;
- 15 ares de fraises ;
- 5 ares de légumes frais en rotation légumière ou florale (non destinés à l'autoconsommation) ;
- 5 ares de cultures florales ou ornementales ;
- 10 ares de vignes (vins d'appellation d'origine contrôlée) ;
- 5 ares de vignes à Champagne ;
- 5 ares de pépinières (viticoles, ornementales, fruitières, forestières) ;
- 40 arbres fruitiers isolés, en rapport.

E - Production effective, au cours de la campagne agricole précédente de :

- 2 tonnes d'endives (chicon);
- cresson pour la vente ;
- 1 tonne de champignons.

3. L'exploitation est gérée par une seule personne : le chef d'exploitation.

4. L'exploitation est localisée dans une commune déterminée, au niveau du siège de l'exploitation.

Annexe 4 : Répartition de données régionales : cas du cheptel des canards entre 2005 et 2010 en Poitou-Charentes

Le cheptel des canards est donné à l'échelle régionale pour les années 2005 à 2010. En Poitou-Charentes, les seules données disponibles sont les suivantes :

Nombre de milliers de tête de canard en Poitou-Charentes entre 2005 et 2010 (source : SAA)

Année	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Charente						
Charente-Maritime						
Deux sèvres						
Vienne						
Total Poitou-Charentes	1342	1493	1561	1407	1512	1816

La première étape consiste à rechercher les 5 années les plus proches pour lesquelles les données départementales sont disponibles.

Nombre de milliers de tête de canard en Poitou-Charentes entre 2000 et 2005 (source : SAA)

Année	2000	2001	2002	2003	2004
Charente	90	100	90	90	110
Charente-Maritime	50	50	52	52	52
Deux sèvres	700	800	900	980	940
Vienne	68	70	120	122	120
Total Poitou-Charentes	908	1020	1162	1244	1222

Ceci permet de calculer la répartition moyenne du cheptel régional sur les différents départements. Ainsi en moyenne 8.6% des canards de Poitou-Charentes sont situés en Charente.

Répartition des canards en Poitou-Charentes entre 2000 et 2005 (source : SAA)

Année	2000	2001	2002	2003	2004	Σ	Ratio 2000 - 2004
Charente	90	100	90	90	110	480	8.6
Charente-Maritime	50	50	52	52	52	256	4.6
Deux sèvres	700	800	900	980	940	4320	77.8
Vienne	68	70	120	122	120	500	9.0
Total Poitou-Charentes	908	1020	1162	1244	1222	5556	100

A partir des ratios moyens calculés et des valeurs régionales, le nombre de canard départemental entre 2005 et 2010 peut être reconstitué. Le nombre de canard en Charente en 2005 est estimé de la façon suivante : cheptel régional * ratio soit $1342 * 0.86 = 116$ milliers de tête de canard.

Données reconstituées du nombre de milliers de tête de canard départemental en Poitou-Charentes entre 2005 et 2010

Année	Ratio 2000 - 2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Charente	8.6	116	129	135	122	131	157
Charente-Maritime	4.6	62	69	72	65	70	84
Deux sèvres	77.8	1043	1161	1214	1094	1176	1412
Vienne	9.0	121	134	140	127	136	163
Total Poitou-Charentes	100	1342	1493	1561	1407	1512	1816

Annexe 5 : Complétion de catégories détaillées : cas de la répartition des vaches sur les catégories "laitières" et "nourrices" dans l'Ain en 1950

- **Cas de la répartition d'une catégorie de cheptel avec absence de valeurs pour les sous-catégories**

La situation ci-dessous présente le cas où une catégorie (les vaches) doit être répartie en sous-catégories (vaches laitières et nourrices) en préalable au calcul de l'excrétion azotée (Etape initiale) pour le département de l'Ain en 1950.

La répartition de la catégorie (ici les vaches) et **toutes** les sous-catégories (vaches laitières et nourrices) va être recherchée sur les autres années de la chronique pour le même département. Si une des sous-catégories n'est pas présente, l'année ne sera pas retenue pour calculer le ratio (Etape 1). Le ratio entre la somme des sous-catégories et la catégorie est calculée à partir de l'ensemble des données disponibles (Etape 2). Ce ratio est appliqué pour reconstituer la chronique des sous catégories ce qui permet de calculer l'excrétion totale (Etape 3).

Etape initiale :

1950 (département de l'Ain):

	Catégorie	Excrétion (kgN/an)	Effectif (Nombre de tête)	
Bovins	Vaches laitières	113	X	113 * ____ = ____
	Vaches nourrices	100	X	100 * ____ = ____
	Total Vaches	X	128 200	Excrétion totale = ____

Etape 1 : recherche de données sur la répartition de la catégorie en sous-catégories

Pour la clarté de la figure, seules 8 années ont été présentées.

Année	...	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	...
Vaches laitières	...	140000	145000	130000	131000	128000	125000	124000	126000	...
Vaches nourrices	...	4000	4500	4000	3600	3100	4000	4000	3500	...

Etape 2 : recherche du ratio entre la catégorie et les sous-catégories

En revanche, la colonne somme des années renseignées présente bien la somme de toutes les valeurs satisfaisant la condition (tous les sous catégories présentes) pour être prise dans ne calcul du ratio.

Année	...	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	...	Somme des années renseignées	%
Vaches laitières	...	140000	145000	130000	131000	128000	125000	124000	126000	...	4348066	86
Vaches nourrices	...	4000	4500	4000	3600	3100	4000	4000	3500	...	699707	14
Total Vaches	...	144000	149500	134000	134600	131100	129000	128000	129500	...	5047773	100

Etape 3 : calcul des effectifs des sous catégories et de l'excrétion totale

	Catégorie	Excrétion (kgN/an)	Effectif (Nombre de tête)	
Bovins	Vaches laitières	113	128200*0.86	113 * 110872 = 12528483
	Vaches nourrices	100	128200*0.14	100 * 17328 = 1732847
	Total Vaches	X	128 200	
				Excrétion totale 14261330

Le même genre de méthode a été employé pour répartir les données régionales sur les données départementales ou pour répartir les différentes catégories du département 'Seine et Oise' et 'Seine' aux départements de la région parisienne.

○ **Cas de la répartition d'une catégorie de cheptel avec des sous catégories déjà renseignées**

L'exemple ci dessous présente des données du cheptel bovin en Isère en 1982. Les annuaires de la SAA fournissent des renseignements non exploitables en l'état pour les bovins de 2 ans et plus car la catégorie 'Autres' n'est pas assez précise pour se voir attribuer un coefficient en azote (Etape initiale). Les données de la catégorie 'Bovins de plus de 2 ans (hors vaches)' devront être réparties pour compléter les catégories restantes ('Mâle type viande', 'Mâle type lait', 'Génisses de boucherie') en tenant compte des renseignements présents ('Mâles reproducteurs', 'Génisses laitières', 'Génisses nourrices').

Etape initiale:

1982 (département de l'Isère):

	Catégorie	Excrétion (kgN/an)	Effectif (Nombre de tête)	Excrétion pour la catégorie
Bovins de plus de 2 ans (hors vaches)	Génisses laitières	53	13000	53 * 13000 = 689000
	Génisses nourrices	53	3000	53 * 3000 = 159000
	Mâle type 'viande'	91	X	
	Mâle type 'lait'	91	X	
	Génisses de boucherie	56	X	
	Autres	X	17000	___ * 17000 = ___
	Total	X	33000	___

Les données seront réparties en fonction des valeurs déjà connues et du ratio entre la catégorie à répartir ('Bovins de plus de 2 ans (hors vaches)) et les catégories à renseigner ('Mâle type viande', 'Mâle type lait', 'Génisses de boucherie') (Etape1). Un facteur correctif a donc été rajouté dans ces cas ci, permettant l'ajustement des données calculées aux données de la SAA (cf. le tableau résultats ci-dessous) .

Résultats:

	Catégorie	Effectif (Nombre de tête)	Ratios	Sans ajustement	Avec ajustement
Bovins de plus de 2 ans (hors vaches)	Génisses laitières	13000	0.41	13000	13000
	Génisses nourrices	3000	0.24	3000	3000
	Mâle type 'viande'	X	0.03	7531	11575
	Mâle type 'lait'	X	0.1	1001	1538
	Génisses de boucherie	X	0.22	3374	5186
	Autres	183000		11906	183000
	Total	34300	1	27907	34300

Formalisation de la méthode:

Pour tout $n < k < m$,

$$Y_k = R_k * T * \left(\frac{T - \sum_{0 < i < n} X_i}{\sum_{n < j < m} R_j * T} \right)$$

avec les notations suivantes :

- T le total,
- X_0, X_1, \dots, X_{n-1} les valeurs déjà connues,
- $Y_n, Y_{n+1}, \dots, Y_{m-1}$ les valeurs à calculer,
- $R_n, R_{n+1}, \dots, R_{m-1}$ les ratios des valeurs à calculer.

Le facteur correctif (entre parenthèse) permet que la somme de toutes les catégories calculées fasse bien la somme T indiquée dans les annuaires.

Annexe 6 : Répartition des engrais minéraux azotés sur les différents types d'engrais : cas de l'Ain en 1971

La quantité d'engrais par type est nécessaire dans le calcul de la volatilisation. Pour l'année 1971, seule la quantité totale des engrais simple est disponible.

Données de livraison d'engrais simple (SAA)

Type	1971
Ammonitrate	
Urée	
Solutions	
Autres *	
Somme simples N	7390

* Sulfates d'ammonium, Nitrates de sodium et de calcium, Cyanamide, Ammoniac

Les quantités d'engrais par type ont été calculées à partir du ratio moyen des différents types d'engrais observé sur les 5 années complètes les plus proches et la quantité d'engrais simple sur l'année.

Données de livraison d'engrais simple de 1972 à 1976 (SAA)

Type	Année	1972	1973	1974	1975	1976
Ammonitrate		6 538.0	6 609.0	7 036.0	5 511.0	5 706.0
Urée		96.0	42.0	28.0	29.0	12.0
Solutions		530.0	651.0	542.0	545.0	597.0
Autres *		461.0	461.0	423.0	294.0	350.0
Somme simples N		7 625.0	7 763.0	8 029.0	6 379.0	6 665.0

* Sulfates d'ammonium, Nitrates de sodium et de calcium, Cyanamide, Ammoniac

Ceci permet de calculer la répartition moyenne des engrais par type entre 1962 et 1967 puis de reconstituer les données de livraison par type d'engrais simple pour 1971. Par exemple, la livraison d'ammonitrate pour 1971 est calculée à partir de la livraison d'engrais simple (7390) multipliée par le ratio ammonitrate/total engrais simple (0.86).

Données de livraison d'engrais complétées

Type	Année	1972	1973	1974	1975	1976	Σ	Ratio 1972-1976	1971
Ammonitrate		6 538.0	6 609.0	7 036.0	5 511.0	5 706.0	31 400.0	0.86	6364.2
Urée		96.0	42.0	28.0	29.0	12.0	207.0	0.01	42.0
Solutions		530.0	651.0	542.0	545.0	597.0	2 865.0	0.08	580.7
Autres *		461.0	461.0	423.0	294.0	350.0	1 989.0	0.05	403.1
Somme simples N		7 625.0	7 763.0	8 029.0	6 379.0	6 665.0	36 461.0	1.00	7390

* Sulfates d'ammonium, Nitrates de sodium et de calcium, Cyanamide, Ammoniac

Annexe 7 : Reconstitution de données communales : exemple de la répartition du cheptel porcin pour deux communes de Charente en 1955

La répartition de données sur des catégories à reconstituer est un problème qui a déjà été abordé dans le traitement des données départementales. Les méthodes suivies sont donc les mêmes. Pour illustrer la reconstitution de données détaillées à partir d'un ensemble plus général, le cas de la répartition du cheptel porcin en 1955 sur les types porcins "Porcs (20 à 50kg)" et "Autres porcs" et "Truies" a été choisi. La catégorie "Autres porcs" regroupe les verrats et porcs à l'engrais car ils ont le même coefficient d'excrétion.

Le nombre de cheptel porcins dans le RA 1955 est décrit par deux valeurs : le nombre total de porcins et le nombre de truies. Hors le nombre de tête de cheptel pour les types "Porcs (20 à 50kg)" et "Autres porcs" est nécessaire pour calculer l'excrétion azotée.

Table - Nombre de tête du bétail pour le cheptel porcin pour 2 communes en 1955 (RA 1955)

Type de bétail	Coefficient d'excrétion	Brie	Cognac
Porcs (20 à 50kg)	0.59		
Truies (>50kg)	22.5	61	0
Autres porcs (>50kg)	4.2		
Total porcins	x	526	12

Etape 1 : La répartition entre les différentes classes est calculée au niveau départemental pour l'année concernée.

Table - Répartition départementale des porcins en Charente en 1955

Type de bétail	Charente	Ratio
Porcs (20 à 50kg)	19663	0.377
Truies (>50kg)	10700	0.205
Autres porcs (>50kg)	21830	0.418
Total porcins	52193	1

Etape 2 : La répartition départementale est appliquée à l'échelle communale pour calculer le nombre de tête de cheptel par catégorie.

Ainsi le nombre de tête de cheptel de la catégorie "Autres porcs" sur la commune de Brie sera calculé comme le nombre de porcins total de la commune (526 porcins) multiplié par le ratio de cette classe relevée sur le département (0.418), soit 198 "Autres porcs". La méthode est appliquée pour l' (les) autre(s) catégorie(s) à reconstituer (ici une seule catégorie : Porcs de 20 à 50 kg).

Table - Nombre de tête du bétail (étape intermédiaire) pour le cheptel porcin pour 2 communes de Charente en 1955 (RA 1955)

Type de bétail	Coefficient d'excrétion	Brie	Cognac
Porcs (20 à 50kg)	0.59	198	5
Truies (>50kg)	22.5	61	0
Autres porcs (Verrats et porcs à l'engrais >50kg)	4.2	220	5
Total porcins	x	526	12
Vérification somme des catégories		479	10

A l'issue de cette étape, la somme des catégories reconstituées ("Porcs de 20 à 50 kg" et "Autres Porcs") et de la catégorie dont les chiffres étaient donnés par le RA (Truies) ne correspond pas à la somme indiquée dans le RA (479 têtes de porcins après reconstitution pour Brie contre 526 indiqué

dans le RA). Une étape supplémentaire d'ajustement des données reconstituées est nécessaire afin d'être en accord avec le nombre de tête de porc total indiqué dans le RA.

Étape 3 : Un facteur correctif est appliqué à chaque donnée reconstituée, ce qui permet que la somme de toutes les catégories calculées fasse bien la somme indiquée dans le RA.

Ce facteur correctif est égal à la somme des données reconstituées sur la commune (pour Brie : 198 + 220 = 418) divisé sur le nombre théorique que devrait faire cette somme (pour Brie : 526 (nombre de porc) - 61 (nombre de truies mères) = 465).

Le nombre de porcs (20 à 50 kg) pour la commune de Brie est ajusté comme par le calcul $198 * 418 / 465 = 220$. La formalisation de la méthode est donnée en fin d'annexe.

n.b. : L'étape 3 n'est nécessaire que dans le cas où une (ou des) catégorie(s) détaillée(s) est (sont) déjà renseignée(s) par les données brutes.

Table - Ajustement des résultats pour conserver la somme indiquée dans le RA

Type de bétail	Coefficient d'excrétion	Brie	Cognac
Porcs (20 à 50kg)	0.59	$198 * 418 / (526 - 61)$	$5 * 10 / (12 - 0)$
Truies (>50kg)	22.5	61	0
Autres porcs (Verrats et porcs à l'engrais >50kg)	4.2	$220 * 418 / (526 - 61)$	$5 * 10 / (12 - 0)$
Total porcins	x	526	12

Table - nombre de tête du bétail (valeurs complétées) pour le cheptel porc pour 2 communes en 1955 (RA 1955)

Type de bétail	Coefficient d'excrétion	Brie	Cognac
Porcs (20 à 50kg)	0.59	220	6
Truies (>50kg)	22.5	61	0
Autres porcs (Verrats et porcs à l'engrais >50kg)	4.2	245	6
Total porcins	x	526	12
Vérification somme des catégories		526	12

Formalisation de la méthode

Pour tout $n < k < m$,

$$Y_k = R_k * T * \left(\frac{T - \sum_{0 < i < n} X_i}{\sum_{n < j < m} R_j * T} \right)$$

avec les notations suivantes :

- T le total,
- X_0, X_1, \dots, X_{n-1} les valeurs déjà connues,
- $Y_n, Y_{n+1}, \dots, Y_{m-1}$ les valeurs à calculer,
- $R_n, R_{n+1}, \dots, R_{m-1}$ les ratios des valeurs à calculer.

Annexe 8 : Annual agricultural N-surplus in France over a 70-year period

Poisvert C.¹, Curie F.¹, Moatar F.¹,

¹Université François Rabelais - Tours, EA 6293, Géo-Hydrosystèmes Continentaux, Faculté des Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, F-37200 Tours, France

Corresponding author: Poisvert C. :cecile.poisvert@univ-tours.fr (C. Poisvert)

Curie F.: florence.curie@univ-tours.fr

Moatar F.: florentina.moatar@univ-tours.fr

Abstract

High levels of nitrogen (N) contamination of ground and surface water are still detected at European and national scales, despite the implementation of Directives highlighting the need to improve understanding of changes in N load. Soil surface nitrogen balance was investigated at the county level in France over a 70-year period to identify areas with high N surpluses and trends in N load. Soil surface nitrogen balances were calculated for 90 NUTS3 (Nomenclature of Territorial Units for Statistics in the EU) called 'departments' (ranging from 611 to 10,145 km², median surface area 6,032 km²) and one NUTS2 entity. Over the whole period, the N surplus calculated for France as a whole averaged 37 kgN per ha of utilized agricultural area (UAA) and departmental N surpluses ranged from 10 to 86 kgN.haUAA⁻¹. Imprecision, i.e. an 80 % confidence interval in N surpluses, was calculated using Monte Carlo simulation. Average imprecision for the whole period ranged from 6 to 45 kgN.haUAA⁻¹ across different departments. Analysis revealed that yearly and departmental imprecision values were mainly correlated with N export (R²=0.46). Despite this imprecision, the soil surface nitrogen balance was found to be a consistent and suitable tool to determine trends in N load at the department level. The model revealed an upward trend in N surplus until the 1990s for 82% of the area studied, and a downward or stable trend for more than 90% of the area since the European Nitrates Directive has been implemented.

Key words: soil surface balance, nitrogen, trend analysis, uncertainty, surplus

Acknowledgments

This work was part of the scientific program Eutrophication-Trends, supported with European funds (*FEDER, Fond Européen de Développement Régional*), *Etablissement Public Loire*, and the *Agence de l'Eau Loire Bretagne* (Loire River Basin authority) and was continued in the scientific program Nitrogen Surpluses funded by the ONEMA (*Organisme National de l'Eau et des Milieux Aquatiques*). The authors would like to thank the experts who contributed to this work: L. Delaby and P. Faverdin (UMR Pegase), R. Duval (ITB, *Institut technique de la betterave*), L. Champolivier and A. Merrien (CETIOM, *Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains*), J.M. Gravouille (CNTIP, *Comité national interprofessionnel de la pomme de terre*), M. Herve (COMIFER, *Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée*), C. Le Souder, F. Bert (ARVALIS), A. Colombani, S. Boneschi and G. Giroux (SSP, *Service de la Statistique*

et de la prospective). The authors are also grateful to M. Billen, J. Garnier and L. Lassaletta for their helpful proofreading.

2. Introduction

Concentrations of nitrogen compounds observed in European surface waters are higher than the reported natural values (EEA, 2001). This has led to eutrophication of coastal waters and degradation of continental water in terms of quality for drinking water production. Mitigation programs and Directives have been implemented specifically to reduce nitrogen inputs, a key factor to limit eutrophication in coastal areas (Leip et al. 2011). However, the effects of these Directives regarding nitrogen concentrations remain insufficient at the European scale (Bouraoui and Grizzetti, 2011). At the country scale, for example in France, river basins such as those of the Loire (Minaudo et al., 2015) and the Seine (Passy et al., 2013) still present signs of eutrophication. Many authors have highlighted that the response of river basins to mitigation measures is delayed for several years to decades due to long solute transfer time through soil and groundwater systems and catchment buffering (Cherry et al., 2008; Fovet et al., 2015; Ma and Yamanaka, 2016). Agricultural intensification has led to an increase in nutrient inputs such as chemical and organic fertilizers. Since the 1960s, agricultural systems have constituted the main diffuse source of nitrogen in water bodies (Aquilina et al., 2012; Heathwaite, et al. 1996; Öborn et al. 2003; Oenema, et al., 2003) and are currently considered to be the main source of nitrogen delivered to European seas (Bouraoui and Grizzetti, 2014). Long-term quantification of diffuse N load from agricultural systems is only available at the country scale for France (Bouraoui and Grizzetti, 2011) currently changes in N load at a smaller scale over the long term are not available. Furthermore, national diffuse N load cannot be used to identify and estimate major diffuse pollution in specific areas despite the recommendation of the European Union Water Framework Directive (WFD, 2000/60/CE).

N balances are based on the 'conservation of matter' principle and to construct them requires combining the individual N processes (Meisinger et al., 2008). As a whole, N balance is a useful tool to improve understanding of N flux at a regional scale (Galloway et al., 2004; Sutton et al., 2011a). The difference between N input and output is called the surplus and can be used to estimate N load (EEA, 2001). This approach is common and has been used widely (Alvarez et al., 2014; Asmala et al., 2011; Salo and Turtola, 2006). Depending on how the limits of the agro-system are defined, there are different types of nitrogen balance. (i) The *Farm-gate balance* considers the system as a whole farm, including cropland, grassland and livestock. The surplus defined in this type of balance does not distinguish between losses from the soil and from animal systems. (ii) The *Soil system budget* considers only the total N pool of the soil itself and requires a quantification of every single N input and output flux, such as leaching, runoff, denitrification, export of N with harvested crops and variations in soil nitrogen stocks, resulting in a high degree of uncertainty due to the lack and poor quality of data available (Öborn et al., 2003). (iii) The *Soil surface balance* considers that the inputs consist of the nitrogen entering the soil through fertilizer and manure application, symbiotic N₂ fixation and atmospheric deposition, and that the output is the export of N through harvested crops (Oenema et al., 2003). The difference between N input and output is the N surplus, corresponding to the nitrogen entering the soil but unused by crops. This nitrogen surplus can be stored in the pool of soil organic matter or can be lost from the soil through runoff, volatilisation, denitrification or

leaching. The amount of N prone to leaching can contribute notably to N contamination of aquifers and rivers. Soil surface balances can be applied at various levels from plot to national scales (Cherry et al., 2008). At the smallest administrative scale, models using farm records can lead to spatially accurate results. These models use agricultural census data (Alvarez et al., 2014; EEA, 2001) which provide details in terms of both space (Table 1) and time.

Table 1 Soil surface balance models used in France, including their spatial resolution, data sources and year of application. Scales are given following the EUROSTAT classification, NUTS3 is an equivalent of a department and LAU1 of municipality. Sources in the table refer to: (1) SoeS, 2013, (2) EEA, 2001, (3) Benoît, 1992, (4) Velthof et al., 2009 cited by de Vries et al., 2011, (5) **de Vries et al., 2011**(6) Bouwman et al., 2005, (7) Leip et al., 2008.

Model / Name	Sources	Spatial resolution (ha)	Scale of database used		Mineral fertilizer	Year of application
			yield	area		
NOPOLU	(1)	~ 170 to 6.4.10 ⁷	(NUTS2*)	(LAU1)	National surveys	2002, 2004, 2007, 2010
adapted from NOPOLU	(2)	~ 1.5.10 ⁷	(NUTS2*)	(LAU1)	Scenarios	2001
BASCULE	(3)	2 -620	Field	Field	Farm record	1992
MITERRA	(4)	0.03 - 54.10 ⁶	National	(NUTS2)	FAO	2000
INTEGRATOR	(5)		National	NCU	FAO	1970 - 2030
IMAGE	(6)		National	Country	FAO	1970 - 2030
IDEAg (CAPRI + DNDC)	(7)		Regional	HSMU**	FAO	2002

* NCU = nitroEurope Calculation Units. Units refer to clusters of 1 km²grid units that are characterized by a similar environment and/or farming condition

** HSMU = Homogeneous Spatial Mapping Units

For example, the French reference model NOPOLU (SoeS, 2013) estimates diffuse N source emission with a statistical model based on the soil surface balance principle that allows a spatialized surplus to be calculated at the Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS4) level, which is a fine scale (Schoumans and Silgram, 2003). However, this model mainly uses datasets that are not available every year: agricultural census data, land cover information and results of national surveys. At larger scales, other models can be used with countrywide or regional data (Table 1), which do not enable spatial nitrogen load to be clearly understood over a whole drainage basin.

The aim of this paper was threefold: (i) to calculate soil surface N balances at a subnational scale focusing on estimation uncertainties, (ii) to identify trends in diffuse N load and (iii) to investigate the robustness of these trends despite uncertainties.

To determine diffuse N load originating from agricultural systems over more than half a century, we calculated surpluses using a soil surface balance using statistical data available at the NUTS3 level, a seldom used spatial resolution, corresponding to the French administrative departments, and Corsica (NUTS2). We estimated the associated uncertainty range based on model reliability using relevant information about current knowledge of N fluxes and available data (Uusitalo et al., 2015). We applied

this method and quantified surpluses with their uncertainty for 90 departments in France from 1940 to 2010.

3. Materials and methods

Surpluses were calculated annually between 1940 and 2010 for 91 geographic entities: 90 French metropolitan departments and one NUTS 2 entity: Corsica. Paris and the neighbouring departments were not included in this study because each represented less than 0.01% of the French utilized agricultural area (UAA)(SSP,*Service de la Statistique et de la prospective*, 1940 to 2010).

3.1. Balancing methods

Nitrogen surpluses were determined using a soil surface balance method (Oenema et al., 2003). For each department, the soil surface balance quantifies N input such as manure and chemical fertilizers, atmospheric deposition and symbiotic fixation, and N output represented by harvested crops, including fruit and vegetables, and grazing. All units are in kgN.ha UAA⁻¹.yr⁻¹.

N input was calculated using Equation 1:

$$NI = N_{\text{Fix}} + N_{\text{Air}} + N_{\text{Min}} + N_{\text{Man}} \quad (1)$$

where NI is the total nitrogen entering the soil, N_{Fix} is the symbiotic fixation of N_2 , N_{Air} is the atmospheric deposition of nitrogen, N_{Min} and N_{Man} represent the nitrogen available for plants from chemical fertilizers and from manure respectively.

Inputs of manure were calculated from the estimated rates of livestock, taking into account N loss through processes such as denitrification and volatilisation to calculate the amount of nitrogen that actually entered the soil.

Nitrogen excretion from livestock was calculated according to Equation 2:

$$N_{\text{Man}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N b_j * E_j * C_i / A_{\text{UAA}} \quad (2)$$

where i is the livestock type (cattle, sheep, etc.) , j the livestock class (e.g.), $N b_j$ the annual population of animals in each livestock class, E_j excretion per individual animal of that class (Table 2), and A_{UAA} the utilized agricultural area (ha) per department. N excretion was adjusted for losses through volatilization of ammonia, denitrification and N_2 loss for each animal class, multiplying the total nitrogen in livestock excretion by a coefficient C_i . C_i refers to N in livestock excretion that was not lost to the atmosphere i.e. $C_i = 1 - \text{value}$ in Table 3.

Table 2 N excretion per livestock category (kgN.head⁻¹.year⁻¹). Sources in the table refer to: (1) Corpen, 1999, (2) Corpen, 2001, (3) Corpen, 1988, (4) Circular DERF/SDAGER/C2002-3013, (5) JOFR, 2011, (6) Corpen, 2006, (7) Corpen, 2003. Hypotheses for factors which affect N excretion such as animal size or diet are mainly based on Soes, 2013.

	Livestock category	Mean	Min.	Max.	Source	Factors taken into account
Bovine animal						
Animal over two years old	Dairy cow	111.6	72.4	161.3	(1)	Milk yield (4000 - 10000kg/an) ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
	Suckler cow + calf	79.5	47.3	125.0	(2)	Animal size (600 to 740 kg) ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)

	Plough oxen	101.6	62.6	147.4	(2)	Animal size 900kg \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
	Dairy heifer	50.8	31.3	73.7	(2)	Animal size 450kg \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
	Replacement heifer for suckler cow	62.1	38.3	90.1	(2)	Animal size 550kg \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
	Slaughter heifer*	56.5	31.3	90.1	(2)	
	Cull cow	24.2	13.8	37.6	(2)	Diet (grass sillage or corn silage) ; fattening duration (2 to 4 month)
	Fattening steer	80.0	54.6	106.5	(2)	Animal size 650 kg \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
	Bull	101.6	62.6	147.4	(2)	Animal size 900 kg \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
	Dairy heifer	45.2	27.8	65.5	(2)	Animal size 400 \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage) (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
Animal between one and two years old	Replacement heifer for suckler cow	50.8	31.3	73.7	(2)	Animal size 450 \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
	Slaughter heifer	48.0	27.8	73.7	(2)	
	Fattening steer (Male)	67.7	46.2	90.1	(2)	Animal size 550 \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
	Bull	56.5	34.8	81.9	(2)	Animal size 500 \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
Animal under 1 year of age	Veal calf	7.2	5.8	8.6	(2)	Fed with milk powder
	Other animals	23.2	7.0	39.0	(2)	Animal size 250 kg \pm 20% and 300 \pm 20% ; diet (harvested herbage -hay and grass silage-, grass, corn silage)
Sheep						
	Ewe - ram	14.3	11.4	17.1	(3)	
	Lamb	5.7	4.3	7.1	(3)	
Goat						
	Goat (more than one year)	14.3	11.4	17.1	(4)	
	Kid (under one year of age)	5.7	4.3	7.1	(4)	
Horse						
	Horse, Donkey, Mule	56.0	26.0	73.0	(5)	
Poultry						
	Cock and hen	0.1430	0.0220	0.0680	(6)	
	Duck	0.1853	0.1110	0.2960	(6)	
	Turkey	0.3107	0.1430	0.5730	(6)	
	Goose	0.4187	0.1770	0.6710	(6)	
	Guinea fowl	0.1460	0.0870	0.2590	(6)	
	Quail	0.0255	0.0250	0.0260	(6)	
	Pigeon	0.8270	0.6616	0.9924	(6)	
Pig						
	Young pig (20 - 50 kg)	0.59	0.56	0.62	(7)	Simple or bi-phase feeding
	Sow (more than 50 kg)	22.5	20.4	24.6	(7)	Simple or bi-phase feeding
	Boar (more than 50 kg)	4.2	3.8	4.6	(7)	Simple or bi-phase feeding
	Fattening Pigs	4.2	3.8	4.6	(7)	Simple or bi-phase feeding
Rabbit						
	Adult	3.3	1.9	4.6	(5)	
	Young	0.06	0.05	0.08	(5)	

Table 3 N losses to the atmosphere according to organic fertilizer type. Sources in the table refer to (1) Gac et al., 2006, (2) personal communication UMR Pegase.

Type	Reference	N loss (% N spread)		
		Lower limit	Reference	Upper limit
Bovine	(1)	37.1	19.8	9.1
Pig	(1)	88.3	31.2	14.7
Sheep, Goat	(2)	50	30	10
Poultry	(1)	51.1	27.9	11.6
Horse	(2)	50	30	10

N volatilisation for each type of N chemical fertilizer was taken into account in accordance with EMEP-Corinair cited in CORPEN (*Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement*) (2006) based on SoeS report (2013) resulting in a calculation of N input from chemical fertilizers using Equation 3:

$$N_{\text{Min}} = \sum_{j=1}^m F_j * K_j / A_{\text{UAA}} \quad (3)$$

where F_j is the amount of each type of chemical fertilizer delivered per department and K_j the fraction of N provided through chemical fertilizer that was not lost to the atmosphere ($K_j = 1 - \text{value in Table 3}$).

N input through plant symbiotic fixation was calculated in accordance with Anglade et al., (2015)(Equation 4).

$$N_{\text{Fix}} = \sum_{\text{crop_fix}} \left(\left[\alpha_{\text{crop_fix}} * \frac{Y_{\text{crop_fix}}}{\text{NHI}} + \beta_{\text{crop_fix}} \right] * \text{BGN} * A_{\text{crop_fix}} \right) / A_{\text{UAA}} \quad (4)$$

where $\alpha_{\text{crop_fix}}$ and $\beta_{\text{crop_fix}}$ coefficients depend on culture type, $Y_{\text{crop_fix}}$ and $A_{\text{crop_fix}}$ the harvested yield and area covered by each crop capable of fixing N_2 ($\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$), NHI is the N harvest index and BGN a multiplicative factor to take into account belowground contributions. Leguminous plants can be grown in mixed cultures. According to SoeS (2013), the proportion of leguminous plants was set at 0.15 for permanent pasture and 0.3 for temporary grassland.

N export (N_{Exp}) is the sum of N export for each crop (Equation 5).

$$N_{\text{Exp}} = \sum_{\text{crops}} \left(\text{Pdt}_{\text{crop}} * N_{\text{crop}} \right) / A_{\text{UAA}} \quad (5)$$

where Pdt_{crop} is the crop yield (ton), and N_{crop} the N content ($\text{kgN} \cdot \text{ton}^{-1}$) for each type of crop (Suppl. 1).

Suppl 1. Nitrogen contents for each type of crops ($\text{kgN} \cdot \text{t}^{-1}$). Sources in the table refer to (❖) ANSES, 2013, (1) SoeS, 2013, (2) COMIFER, 2013, (3) EEA, 2001, (4) Audouin, 1991, (5) Alvarez et al., 2014, (6) Bach et Frede, 2005, (7) Bouwman et al., 2005, (8) CORPEN, 1988, (9) Leip et al., 2011, (10) Feedipedia (consulted the 25/11/14), (11) comm. pers, CETIOM, (12) comm. pers. CNTIP, (13) Honda et al., 2005, (14) comm pers. ITB, (15) ARVALIS, 2007 cited by UNIFA, 2008.

Crops	Minimum value	Reference	S.D.	Maximum value	Sources
Cereals					
Common wheat	18	19	1.3	24	(2)(9)
Durum Wheat	21	21	0.6	24	(1)(2)(9)

Rye and Maslin	14	18	2.4	24	(1)(3)(4)(9)
Barley	15	15	0.8	24	(1)(2)(3)(4)(9)
Oats	16	16	2.4	24	(2)(6)(7)(9)
Corn	12	12	0.3	24	(2)(9)
Sorghum	11.2 ^a	14	0.7	24	(2)(9)
Triticale	15	16	0.6	24	(2)(7)(9)
Rice	9.6 ^a	12	1.2	24	(2)(9)
Millet	17	19	2.7 ^b	24	(3)(9)
Buckwheat	15.2 ^a	19	1.3	24	(9)(13)
Others cereals	16	19	1.7 ^b	24	(7)(9)
Straw	4 ^a	7	2	8.4 ^a	(2)(10)(15)
Oil crops					
Rapeseed	29	35	1.8	51	(2)(11)(9)
Sunflower	19	19	3.7	51	(1)(3)(9)(11)
Soya	35	56.5	3.7 ^b	71	(3)(7)
Seed flax	30	32	6.3 ^b	51	(5)(9)
Others Oilseeds	28 ^a	35	5.3 ^b	51	(9)
Protein crops					
Beans, field beans and protein peas	24.8 ^a	31	2.4	39 ^a	(2)
Industrial crops					
Sugar beet	0.88 ^a	1.1	0.2	3.1	(1)(14)
Hops	20 ^a	25	1.7 ^b	30	(1)
Tobacco	30	40	3.3 ^b	41	(3)(7)
Fibre crops	5	5.6	25 ^b	81	(4)(7)
Other Industrial crops	10.8 ^a	13.5	22.5 ^b	16.2 ^a	(1)
Potatoes					
All Potatoes	3	3.5	0.5	3.5	(3)(6)(7)(12)
Fodder					
Annual fodder (Corn)	3.5	11.5	0.5	15	(2)(3)(4)
Forage roots	2.4	2.5	5	3	(1)(2)(7)
Leguminous plants	27	29	5	49	(2)(4)(9)(10)
Temporary meadows	22.5	23	5	35	(2)(3)(4)(10)
Permanente pasture and meadows	20	23	5	35	(2)(3)(4)(10)
Vegetables					
Artichokes	4	4.1	0.3 ^b	4.92 ^a	(2)
Asparagus	3.2 ^a	4	0.3 ^b	4.8 ^a	(2)
Celery sticks	1 ^a	1.2	0.9 ^b	4	(2)
Cabbage	3.1 ^a	3.9	0.3 ^b	4	(2)
Broccoli	4	4.3	0.3 ^b	5.1 ^a	(2)
Brussels sprouts (mean cooked vegetable)	2.6 ^a	3.3	0.9 ^b	4	(1)
Cabbage for Sauerkraut (mean cooked vegetable)	2.6 ^a	3.3	0.2 ^b	4	(1)
Other brassicas (mean green, red and white cabbages)	1.8 ^a	2.3	0.6 ^b	4	(1)
Endives	1.3 ^a	1.6	0.8 ^b	4	(1)
Spinach	3 ^a	3.7	0.2 ^b	4	(1)(2)
Leeks	2.6 ^a	3.3	0.2 ^b	4	(1)(2)
Lettuce	1.4 ^a	1.8	0.7 ^b	4	(1)(2)
Curled-leaved and broad leaved endives	2.6 ^a	3.3	0.2 ^b	4	(1)(2)
Cress	2 ^a	2.6	0.5 ^b	4	(1)
Corn salad	4 ^a	4.5	0.3 ^b	5.4	(1)(2)
Others salad (green salad without seasoning)	0.9 ^a	1.1	1.0 ^b	4	(1)
Swiss Chard	2.6 ^a	3.3	0.2 ^b	4	(1)
Cardoon	0.8 ^a	1	1.0 ^b	4	(1)
Fennel	1.4 ^a	1.8	0.7 ^b	4	(1)
Rhubarb (mean cooked vegetable)	2.6 ^a	3.3	0.9 ^b	4	(1)
Dandelion	4	4.6	0.3 ^b	5.5 ^a	(1)
Parsley	4	4.8	0.3 ^b	5.8 ^a	(1)
Chervil	4	5.3	0.4 ^b	6.3 ^a	(1)
Tarragon	4	4.7	0.3 ^b	5.6 ^a	(1)
Thyme	4	9.7	1.9 ^b	11.7 ^a	(1)
Sweet corn	4	5.1	0.4 ^b	6.1 ^a	(1)
Mushrooms and truffles	4	4.9	0.3 ^b	5.9 ^a	(1)
Strawberries	1 ^a	1.2	0.9 ^b	4	(1)
Eggplants	1.1 ^a	1.3	0.9 ^b	4	(1)
Cucumbers	0.8 ^a	1	1.0 ^b	4	(1)
Gherkins (mean cooked vegetable)	1 ^a	1.2	0.9 ^b	4	(1)
Zucchini	1.8 ^a	2.2	0.6 ^b	4	(1)
Melon	1.1 ^a	1.4	0.9 ^b	4	(1)

Watermelons	0.8 ^a	0.9	1.0 ^b	4	(1)
Pepper (Piper spp.)	1.2 ^a	1.4	0.9 ^b	4	(1)
Hot pepper	2.6 ^a	3.3	0.2 ^b	4	(1)
Pumpkins, squash and gourds	0.9 ^a	1.1	1.0 ^b	4	(1)
Tomato	1.2 ^a	1.5	0.9 ^b	4	(1)
Garlic	4	12.6	2.9 ^b	15.2 ^a	(1)
Garden beet	2.9 ^a	3.7	0.2 ^b	4	(1)
Carrot	1 ^a	1.2	0.9 ^b	4	(1)
Celeriac	1.6 ^a	2	0.7 ^b	4	(1)
Shallot	1.8 ^a	2.3	0.6 ^b	4	(1)
Turnip	1.2 ^a	1.5	0.8 ^b	4	(1)
Onions (inc. shallots), green	1.6 ^a	2	0.7 ^b	4	(1)
Radish	1 ^a	1.2	0.9 ^b	4	(1)
Salsify	4	4.9	0.3 ^b	5.9 ^a	(1)(2)
Black Radish	4	4.5	0.3 ^b	5.4 ^a	(1)
Chinese artichoke (mean cooked vegetable)	1	1.2	0.9 ^b	4	(1)
Green pea	4	9.8	1.9 ^b	11.8 ^a	(1)(2)
Semi dry-beans	4	15	3.7 ^b	18 ^a	(1)(2)
Beans	2.7 ^a	3.4	0.2 ^b	4	(1)(2)
Beans, dry (mean white canning, white cooked and red cooked bean)	10.4 ^a	12.9	8.4 ^b	38	(1)
Lentils (mean canning and cooked lentils)	9.1 ^a	11.4	8.9 ^b	38	(1)
Split peas	10.9 ^a	13.6	8.1 ^b	38	(1)
Peas (mean dry cooked vegetable)	8.7 ^a	10.9	9.0 ^b	38	(1)
Chick peas	11.3 ^a	14.2	7.9 ^b	38	(1)
Beans, green (cooked green beans)	6.5 ^a	8.2	9.9 ^b	38	(1)
Field beans (mean dry cooked vegetable)	8.7 ^a	10.9	9.0 ^b	38	(1)
Fruits					
Apricot	0.5	1.4	0.3 ^b	1.7 ^a	(1)
Cherry	0.5	2.1	0.5 ^b	2.5 ^a	(1)
Peach, nectarine, brugnon (mean peach and nectarine)	0.5	5.1	0.4 ^b	6.1 ^a	(1)
Prunes (mean all prune)	0.5	2.1	0.2 ^b	2.5 ^a	(1)
Olive	0.5	1.6	0.4 ^b	1.9 ^a	(1)
Pears	0.5	0.6	0.0 ^b	0.7 ^a	(1)
Apple	0.5	0.5	0.0 ^b	0.6 ^a	(1)
Quince	0.5	0.6	0.0 ^b	0.7 ^a	(1)
Medlar	0.5	1.1	0.2 ^b	1.3 ^a	(1)
Kaki	0.5	1	0.0 ^b	1.2 ^a	(1)
Grape	0.5	1.3	0.3 ^b	1.6 ^a	(1)(2)
Almond	0.5	49	16.2 ^b	58.8 ^a	(1)
Chestnut	0.5	4.5	1.3 ^b	5.4 ^a	(1)
Walnut	0.5	27.7	9.1 ^b	33.2 ^a	(1)
Hazelnut	0.5	30.9	10.1 ^b	37.1 ^a	(1)
Kiwi fruit	0.5	1.8	0.4 ^b	2.1 ^a	(1)
Currant and blueberry (mean currant and blueberry)	0.5	16.3	0.3 ^b	19.6 ^a	(1)
Raspberry	0.5	2.2	0.6 ^b	2.7 ^a	(1)
Gooseberry	0.5	1.8	0.4 ^b	2.1 ^a	(1)
Avocados	0.5	2.9	0.8 ^b	3.5 ^a	(1)
Figs	0.5	2.1	0.5 ^b	2.5 ^a	(1)
Angelica (mean fruit)	0.5	1.1	0.2 ^b	1.3 ^a	(1)
Oranges	0.5	1.5	0.3 ^b	1.8 ^a	(1)
Pomelos	0.5	1.3	0.3 ^b	1.5 ^a	(1)
Lemons and limes	0.5	1.3	0.3 ^b	1.5 ^a	(1)
Citron (like lemon)	0.5	1.3	0.3 ^b	1.5 ^a	(1)
Others citrus fruits (mean all citrus fruits)	0.5	1.3	0.3 ^b	1.6 ^a	(1)

^a Values were calculated as 0.8 * reference value (Minimum value), 1.2 * reference value (Maximum value) (Oenema et al., 2003)

^b Values were calculated as Max ((Reference N content-Minimum N content value)/3, (Maximum N content value-Reference N content value/3))

S.D. : standard deviation

3.2. Data collection

Data required to calculate soil surface N balance were collected from 12 institute publications, 7 reference papers and official French documents (Table 4).

Table 4 Source of the data used in CASSIS_N

Data type	Sources
Area, production	French Ministry of Agriculture : SSP (1940 to 2010)
Chemical fertilizer delivery	SSP, UNIFA
Atmospheric deposition	EMEP
N content in crops	ANSES, 2013 ; SoeS, 2013 ; COMIFER, 2013 ; EEA, 2001 ; Audouin, 1991 ; Alvarez et al., 2014 ; Bach et Frede, 2005 ; Bouwman et al., 2005 ; CORPEN, 1988 ; Leip et al., 2011 ; Feedipedia (consulted the 25/11/14) ; comm. pers. CETIOM ; comm. pers. CNTIP ; Honda et al., 2005 ; comm pers. ITB ; ARVALIS, 2007.
N content in livestock excretion	CORPEN, 1999 ; CORPEN, 2001 ; CORPEN, 1988 ; Circular DERF/SDAGER/C2002-3013 ; JOFR, 2011 ; CORPEN, 2006 ; CORPEN, 2003
N loss from manure	EMEP-Corinair in CORPEN, 2006 cited in Soes (2013) ; Gac et al., 2006

Agronomic information originated from two sources: the agronomical annual statistics of the SSP (*Service de la Statistique et de la Prospective*, 1940 to 2010) and UNIFA (*Union des Industries de la Fertilisation*)(Table 4). The SSP database provides yearly data for livestock numbers, crop yields and agricultural areas (e.g. UAA) for each department. The SSP data were gathered from databases of more than 5.10^5 registers mostly including information for livestock (~33%) and cash crop production (~30%). Of the remaining surface area, vegetable and fruit production represented 20% and 11% respectively. Data for chemical fertilizers were obtained from the amounts delivered in each department, which were assumed to be equivalent to the quantity used in the same department.

Crop production and livestock classes differed over the period studied. Therefore, they were reorganized into more homogenous classes when necessary. When no data was available, data series were completed using the following simple rules: the missing value prior to the first given value was assumed to be equal to this first given value. The missing value following the last given value was assumed to be equal to this last known value. If there were missing values within series, the values were calculated using linear interpolation. Some data given at a regional scale (NUTS2) were downscaled to the department scale. In this case, departmental data (d_{NUTS3_year}) were computed using regional data (d_{NUTS2_year}) multiplied by the mean ratio between departmental and regional figures calculated for other years ($d_{NUTS3_year} = d_{NUTS2_year} * d_{NUTS3_other_years}/d_{NUTS2_other_year}$). In the end, approximately 37% of the production and livestock database was reconstructed following the above-mentioned rules, leaving 63% of raw data that originated from SSP statistics. Grass production required adjustments because in the SSP database, considered that all the natural grassland production was harvested and removed. This led to an overestimation of N exportation since grazing does not export as much nitrogen as cutting. Therefore, values for grass dry matter produced in natural meadows were corrected according to livestock needs per department. The corrected value was calculated as the difference between livestock fodder needs (5,2tMS/LSU, <http://ec.europa.eu/eurostat/>) and the sum of temporary grassland, artificial grassland, annual fodder, and dry matter content of root and tuber fodder production (Table 5). In 2012, a review published by Peyraud et al. found that about a quarter of livestock farms were at least 50% self-sufficient in dry matter. As a consequence, in order to address the dry matter needs of livestock, forage needed to be

imported. The data available did not allow us to estimate accurately the transport of fodder between departments. However, fodder is bulky and expensive to transport and the departments are relatively large, so we assumed that the amount transported between departments could be ignored.

Table 5 Dry matter content in fodder. Sources in the table refer to: (1) Delteil.,2012, (2) INRA, 2007, (3) Duval, 1995.

Root -tuber	% dry matter	Notes	Reference
Beets	16		(1)
Carrots	18		(1)
Turnips	8		(1)
Suedes	15		(1)
Jerusalem artichokes	20		(1)
Parsnips	18	like carrots	(1)
Celeriac	15	like suedes	(1)
Cabbages	12		(2)
Pumpkins	10		(3)
Others	15	mean of the others	This study

The level of N content in crops or in livestock excretion can vary widely. The lowest and the highest values found in previous studies were recorded as the minimum and maximum. Reference values for N content were provided by national bodies, 46% by COMIFER (*Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée*, 2013) and the remaining by ANSES (*Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail*, 2013). Reference values for N content ranged from 0.5 (apples) to 56.5kgN.ton⁻¹ (soya) (Suppl. 1).

Livestock farming practices changed between 1940 and 2010 (diet, housing, animal productivity) and those changes have influenced N excretion (Hou et al., 2016; J.-L. Peyraud et al., 2012), and also N loss from manure (J.-L. Peyraud et al., 2012; Reidy et al., 2008). In particular, higher milk yields have led to an increase in N excretion for dairy cows (CORPEN, 1999). However, due to a lack of data, N excretion and N loss from manure to the atmosphere were assumed to be constant over time when calculating N balance (Bouraoui and Grizzetti, 2011). The data available in France did not enable us to assess quantified data on changes in livestock practices at a departmental level between 1940 and 2010. Values for N excretion and N loss from organic manure were collected for a variety of situations corresponding to a large range of management practices and livestock characteristics (Table 2) assumed to include all those encountered in France over the past 70 years. The difference between the minimum and maximum value found reflected the degree of uncertainty in livestock practices. For example, departmental milk yield is considered to be between 4,000 and 10,000 kg of milk per dairy cow per year. This range was chosen because below 4,000 kg of milk per cow, milk yield no longer influences N excretion (personal communication UMR PEGASE). A milk yield of 10,000 kg per cow per year is the highest yield simulated in CORPEN, 1999. Moreover, this yield was exceeded in only 0.2% of all the geographic entities during the whole period studied (SPP, 1940 to 2010). N excretion was simulated for low milk yield (4,000 kg per head), medium performance (6,000 kg per head) and high performance (10,000 kg per head) and for various diets following Soes assumption (Soes, 2013). These results were combined to obtain a minimum, an average and a maximum N excretion value (Table2). If N excretion values were not available, values of spreadable N in manure *i.e.* N excreted

minus N loss to the atmosphere can be used to calculate the N excretion value if necessary (Table 2). Sheep, goat and horse N excretion were calculated from spreadable N assuming a 30% loss of N to the atmosphere.

Data for atmospheric N deposition were taken from the EMEP database (http://www.emep.int/mscw/index_mscw.html), which provided a 50 km* 50 km model of dry and humid N deposition. As the EMEP database covers less than half of our studied period, available data were averaged on a pro rata basis of the surface area of the department and were assumed to be the same throughout the studied period. The values ranged from 7 to 17 kgN.ha⁻¹, with a mean of 12 (±2) kgN.ha⁻¹.

3.3. Calculation of uncertainties in N surplus

Output uncertainties mainly result from basic uncertainty, that is to say, imperfect knowledge of reality (N content, magnitude of processes) and operational uncertainty, that is error in data (Oenema et al., 2003; Refsgaard et al., 2007). Therefore, uncertainty in model parameters was estimated according to the type of data (Oenema et al., 2003) and its availability. All parameters were assumed to follow normal distribution. When available, national survey data provided the average value and the standard deviation of the parameters (N content in crops). Otherwise, the standard deviation was estimated from minimum and maximum values in the literature (Table 6).

Table 6 Coefficient of variation (CV) used in the N soil surface N balance model

Category	CV (%)
	Median [range]
Mineral fertilizer	1.7
Deposition	1.7
Number of animals	1.7
N losses to the atmosphere:	
from manure	15 [0.7 - 28.2]
from mineral fertilizer	6.9 [6.8 - 7.8]
Percentage of leguminous plants in meadows	8.3 [5.6 - 11.1]
N content in crops	20.3 [2.5 - 449]
N content in livestock excretion	13.3 [6.7 - 4000]

Output uncertainty was assumed to be a propagation of uncertainties associated with each parameter of the model. The imprecision in departmental N-surplus calculation was obtained with a simple Monte Carlo simulation analysis. The model was then run 200 times with the parameters' uncertainty selected randomly from their statistical distribution (mean, standard deviation and type of distribution). This resulted in 200 model outputs that could be analysed in terms of probability distribution and model performance (Loucks et al., 2005). The influence of uncertainty of one item was tested by first setting its value to its minimum and then to its maximum range, while keeping the other items at their base level. Variability was thus defined as the difference between the N surplus calculated with coefficients of an item set to its maximum and that calculated when the considered item coefficients were set to their minimum values. The set of output results was tested for normality using the Chi square goodness-of-fit test ($p < 0.05$). Approximately 18% of the results did not follow normality, therefore imprecision was calculated as the average range between the ninth (E9) and first (E1) deciles of the 200 surplus values obtained for each year and each department.

3.4 Trend analysis of N surpluses over time and uncertainty influence

Significant trends in N-surplus time series, from now on referred to as 'base trends', were tested using Spearman's rho (ρ) ($p < 0.05$) (Yue et al., 2002). The correlation coefficient indicated the extent to which N surpluses and times were linked by a monotonic trend: higher absolute values of Spearman's ρ indicated stronger links between the variables. Spearman's ρ is a non-parametric test and therefore it does not assume statistical normality of results. It was applied to two different periods (1940 - 1991 and 1992 - 2010) corresponding to the date at which chemical fertilizer use changed (www.UNIFA.fr) and to the presumed impact of the Nitrates Directive (91/676/CEE).

The robustness of the trends was tested using output results obtained with simple Monte Carlo (MC) sample simulation. For one department, a set of 200 N-surplus time series was constructed with values for each year selected randomly among the results obtained with simple Monte Carlo sample simulation (MC time series). Spearman's ρ ($p < 0.05$) was then performed for both selected periods for each of the 200 N-surplus time series (MC trends). MC trends were then compared to base trends. The most robust trends were those for which there was the greatest number of MC trends close to the base trends.

4. Results and discussion

The N exported when crops were harvested was the main factor among the seven variables included in the soil surface N balance (41%). Organic and chemical fertilizer inputs accounted for about the same percentage (~22% of the sum of absolute values of all items, Figure 1A). In contrast, between 1985 and 2005 in 12 other European countries chemical fertilizers were reported to be the greatest anthropogenic N input (Bouraoui et al., 2011). However, the similar proportion of chemical and organic fertilizers at the national scale hides discrepancies between the 91 entities studied. Manure was the main N input for 51 of them. Symbiotic fixation represented about 11% of the sum of absolute values of all N fluxes, followed by atmospheric deposition (3%).

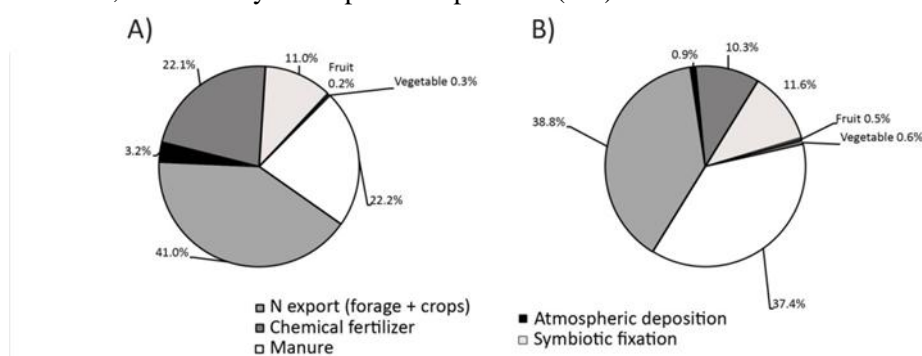


Fig. 1a. Contribution of each item to the soil surface N balance (mean value over the whole period studied from 1940 to 2010, % of the sum of absolute value of all items)

Fig. 1b Percentage of the total variability contributed by each item (1940 to 2010).

4.1. N-Surplus results at the national and departmental scales

The average N surplus, determined from the reference values during the whole period and for the 90 departments and Corsica, was about 37 kgN.ha UAA⁻¹ with values ranging from -70 to +187 kgN.ha

UAA⁻¹yr⁻¹. The departmental N-surplus means ranged from 10kgN.ha UAA⁻¹yr⁻¹ to 86kgN.ha UAA⁻¹yr⁻¹, with the lowest values found in the centre and the south east of the country and the highest in the north west (Figure 2A). In 1940 only one N surplus was higher than 40kgN.ha UAA⁻¹yr⁻¹ with an average surplus of around 16kgN.ha UAA⁻¹yr⁻¹. In 1991, the mean N surplus rose to 52kgN.ha UAA⁻¹yr⁻¹, with a greater spread of values either side of the mean. N surpluses covered a wider range in 2010 than in 1940 and 1991 but the mean surplus was lower (~34kgN.ha UAA⁻¹yr⁻¹) (Figure 2B).

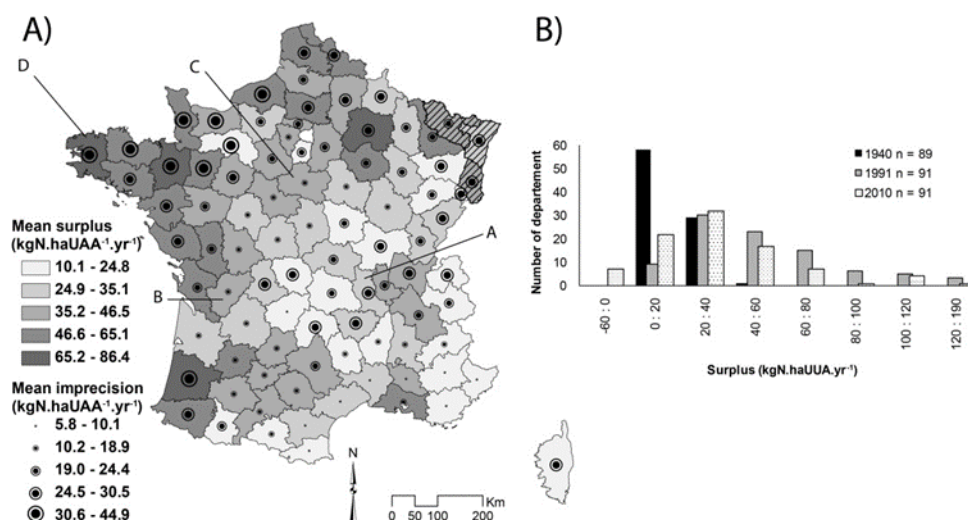


Fig. 2a Mean departmental N surpluses and their associated imprecision (80% confidence interval) with A, B, C and D indicating four departments with different types of agriculture. Data were not available for 1940 to 1944 for hatched departments.

Fig. 2b Departmental N surplus distribution for 1940, 1991 and 2010.

Four departments showing different agricultural activities were characterised by different changes in N surplus. For department A, characterised by a UAA of mainly permanent grassland, the soil surface N balance was very close to equilibrium (Figure 3A). By contrast, for a department where UAA represented almost as much cereal production as permanent grassland, or a majority of cereal production, N surpluses were higher and varied over time (Figure 3B, 3C). The highest values and greatest variation in surpluses were found in departments where there were more livestock (Figure 3D).

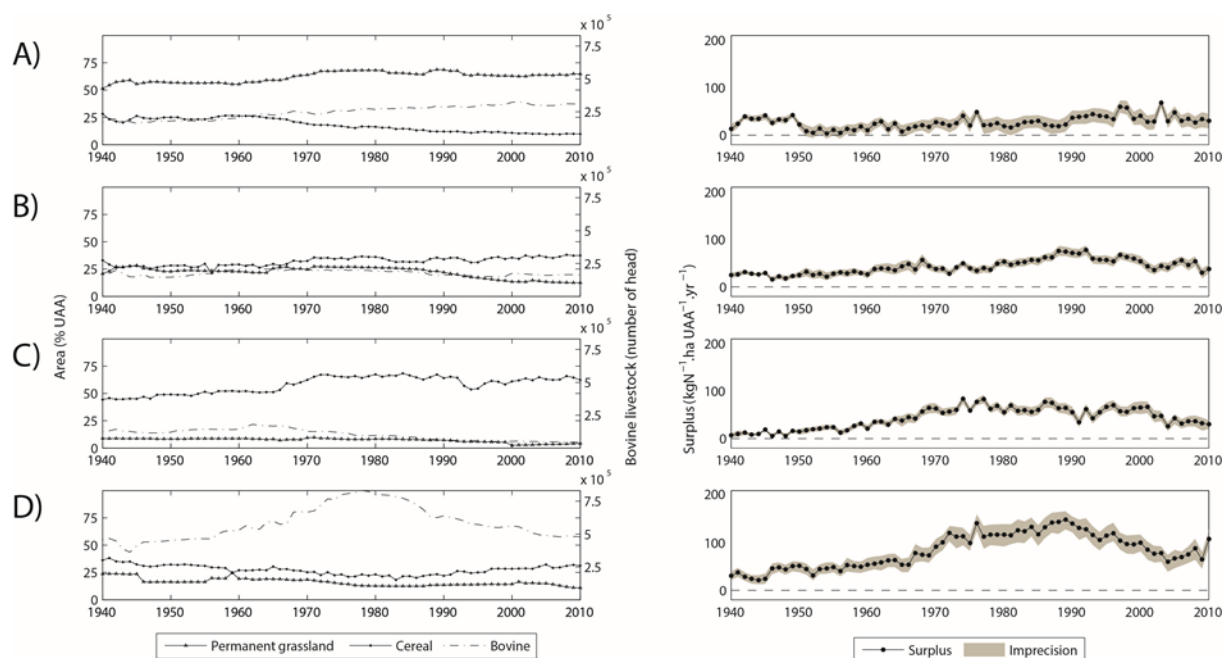


Fig. 3 Surplus time series with annual imprecision, for the four French departments indicated in Fig. 2a, characterized by different typical agricultural production systems : A = department characterised by UUA used for permanent grasslands, B = UAA used roughly equally for cereal and permanent grasslands, C = UAA used mostly for cereal production, D = department with the highest bovine livestock production.

4.2. Uncertainties

4.2.1. Sensitivity analysis

The highest contribution to total uncertainties was crop production (39% of the total variability)(Figure 1B), and it mainly originated from N content (Table 7). Organic fertilizer use contributed 37 % of the total variability in N surpluses, with N losses to the atmosphere being the item that caused the most variability. N fixation and chemical fertilizers contributed 12 and 10% of the variability respectively. Fruit and vegetable production, and atmospheric deposition together only accounted for 2% of the total variability.

Table 7 Mean variability in surpluses caused by each item of the soil surface N balance (1940 - 2010) ($\text{kgN}\cdot\text{haUAA}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$). Variability is defined as the difference between surpluses calculated with the coefficients of an item set to their maximum and to their minimum.

Items	Variability produced by the item modification
N Export	
N content	44
Crop production	8
Manure	
Number of livestock	4
N excretion	25
N loss from manure	17
Chemical fertilizer	
Fertilizer delivery	10
N loss from chemical fertilizer	20
Fixation	
N content	16
Crop production	2
Coefficients (α , β , NHI, BGN)	26
Proportion of leguminous plants	5
Atmospheric deposition	
	1.2

Regarding chemical fertilizers, variations due to uncertainty in chemical fertilizer data (i.e. quantity of fertilizer delivered) were almost 2-fold smaller than the variation due to N loss into the atmosphere (Table 7). It was assumed that the quantity of fertilizer delivered in a department was entirely consumed within the same department during the same year. However, temporal and geographic permeability do exist (fertilizer stocks and exchange between departments), but this information was not available. To overcome this problem, models could be based on surveys of the amount of fertilizer used. This method has been used in other studies (NOPOLU, BASCULE see Table 1) but cannot be applied to such a small scale for the whole country or to long time series for the following three reasons. First, surveys are based on interviews of a sample of farmers which might not be representative (selection bias). Secondly, spatialized data for fertilizer practices regarding each type of crop are lacking. Due to their scarcity in the past, these surveys cannot be used to estimate past fertilizer use. Finally, dishonesty could introduce a bias which is difficult to evaluate (Payraudeau et al., 2007). Like chemical fertilizers, the uncertainty in N losses to the atmosphere was the main item that created variability for organic fertilizers, followed by the uncertainty in N content of manure and then by the uncertainty in data (Table 7). Concerning organic and chemical fertilizers, the amount of fertilizers produced in one department was assumed to be totally used within that same department. On the one hand, some departments in western France like in Brittany are known to be in an N surplus situation because of the concentration of livestock breeding (i.e. Figure 2A department D). On the other hand, the soils of some departments characterized by intensive cropping (i.e. Figure 2A department B) are known to lack organic matter. However, any trade of manure between departments is unofficial and to our knowledge there is no quantified overview of this exchange (Aubert and Levasseur, 2005). Moreover, manure transport is bulky and expensive and farmers tend to avoid it. There might be manure movement from high livestock areas to departments lacking organic matter, but this mainly involves dry dejections such as poultry manure. The latter has a very low N content, and thus would probably have a low impact on N surplus.

4.2.2. Imprecision in N surpluses: a Monte Carlo simulation analysis

Mean N surplus and mean imprecision were determined for each of the 200 MC simulations in each of the 91 geographic entities and for each of the 71 years studied.

The average of the departmental imprecision for the whole period ranged from 6 to 45 kgN.ha UAA⁻¹.yr⁻¹ (Figure 2A). The average departmental imprecision was 21 kgN.ha UAA⁻¹.yr⁻¹. The departmental imprecision appeared to be spatially organized (Figure 2A). In fact, imprecision was mainly linked to N exports and to a lesser extent to manure (Figure 4).

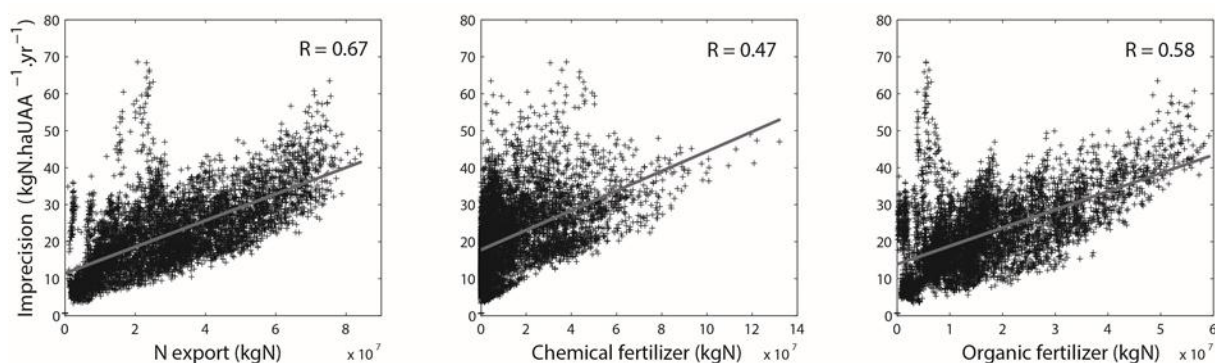


Fig. 4 Relation between imprecision and three items of the soil surface N balance, N export, and chemical and organic fertilizers.

Departments with the greatest imprecision were those with higher N exports and greater livestock production (Figure 3 and 5).

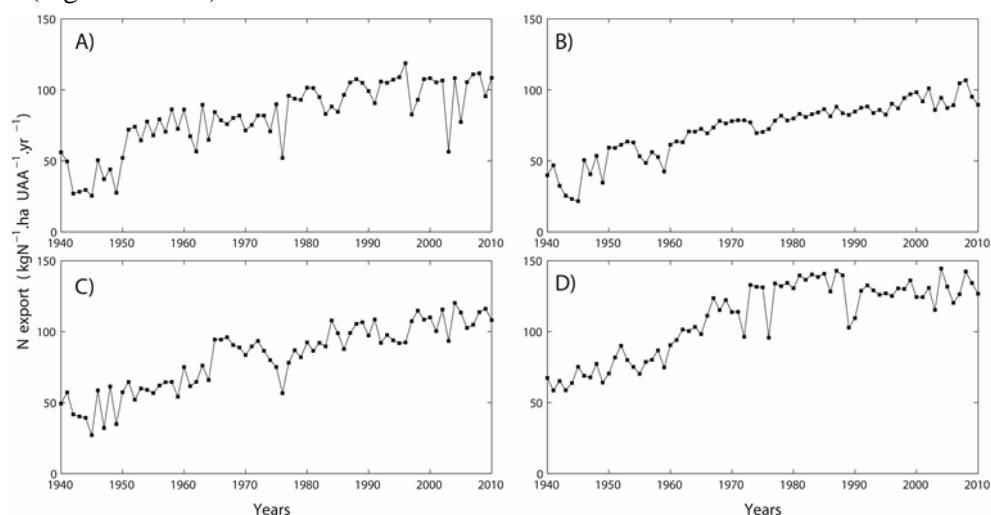


Fig. 5 N export for four departments (for the four French departments indicated in fig. 3).

4.3. Temporal trends of N surplus

Reference trends of surplus over time were statistically identified over two periods: 1940 to 1991, and 1992 to 2010. Statistical analysis of the outputs of the soil surface N balance model determined only with reference values revealed significant trends during the two periods. The main trend during the first period was a surplus which increased over time (for 82% of the area), indicating an increase in

diffuse N load (Figure 6). During the second period, 8% of the area still showed a trend of increasing N surplus.

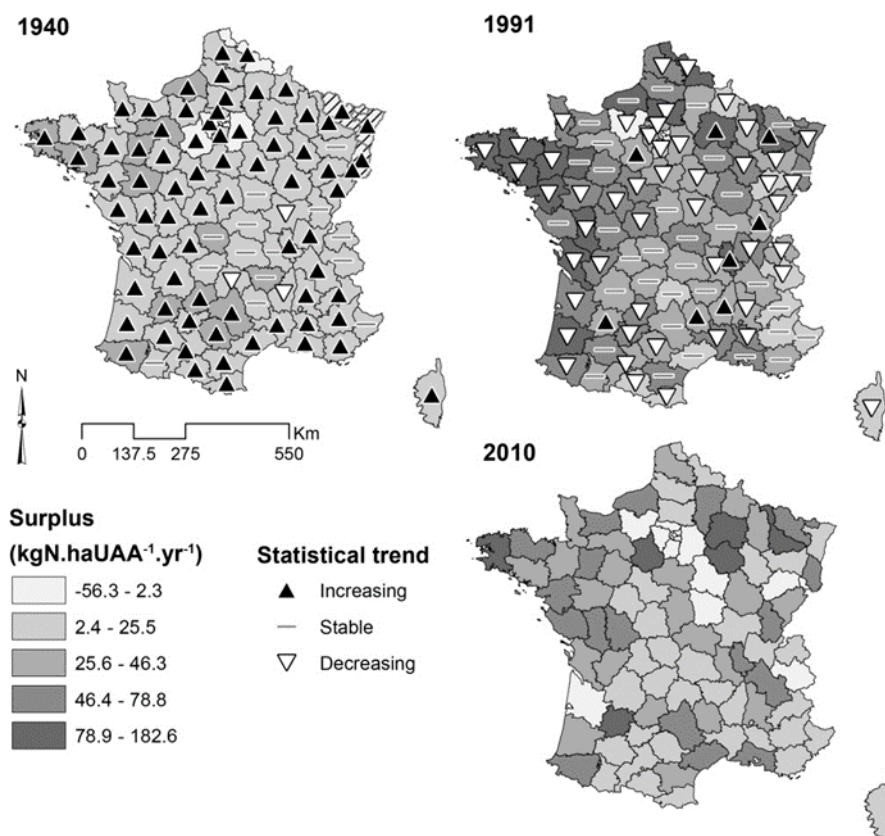


Fig. 6 Statistical trends in departmental N surplus since 1940 in France for two periods: 1940 to 1991 and 1992 to 2010.

Data were not available for 1940 to 1944 for hatched departments.

However, more than 90% of the area presented a stable or decreasing N surplus. Hence, over the whole period, the main pattern was an increasing N surplus over time within the first period, followed by a decrease (47%) or an increase and then a stable N surplus over time (30%). This change in trends between the two periods can be interpreted as a consequence of the Nitrates Directive. This Directive has played a major role in European legislation and introduced a limit on fertilizer use and aimed to balance N input (mineral, manure, reactive nitrogen from the stock in the soil). Since 1990, many other European countries (e.g. Germany, Italy and Portugal) have shown a trend of decreasing N surplus (*OECD Compendium of Agri-environmental Indicators*, 2013).

However, the analysis of uncertainties raised the issue of some possible variations in the output model. Although Spearman's ρ test is a powerful tool to detect trends in time series, its power depends on the amount of variation within a time series (Yue et al., 2002). Strong variations within data can hide the magnitude of the trend, decreasing the robustness of the test and preventing detection of temporal trends. Therefore, the influence of imprecision in trend detection was tested with the outputs of the Monte Carlo simulation analysis (MC trends). Based on the 200 series of surpluses for each of the 90 departments tested, we found that only 13.0% of trends changed compared to the reference trends. The greatest changes were a switch from a significant trend (downward or upward) to a non-significant

trend, that was considered stable (7.2% and 4.3% of the 36,400 simulated trends respectively, Table 8). During the first period, the change was mainly from increasing to stable trends, while in the second period, the changes were mostly from decreasing to stable trends. This clearly suggests that even when taking into account imprecision, diffuse N load in France has remained stable or decreased since 1991.

Table 8 Estimation of robustness of departmental trends in N pressure despite uncertainty in soil surface N balance. Trends in N diffuse pressure at departmental level calculated with reference values for all parameters (base trends) were compared with trends observed in surplus time series constituted with Monte Carlo outputs (MC trends). The more the trend is conserved between reference trends and MC trends, the more robust the trend is considered.

Types of switch *	Percentage
✧ No trend switch	87.0
✧ Trend change	13.0
✧ Trend no longer significant	11.5
• Trend no longer significant in first period	7.6
Including Increasing to Stable	6.2
• Trend no longer significant in second period	15.4
Including Increasing to Stable	2.4
✧ Switch from decrease to stable over the two periods	7.2
✧ Switch from increase to stable over the two periods	4.3
✧ Switch from stable to increase or decrease	1.5
✧ Switch from significant trend to another	0
Total (36400 trends)	100

✧ N=36400, • N =18200

These N surpluses and their associated uncertainties assessed over a long time period are essential for modelling past and present N load at a subnational scale. Adapting these results to a suitable scale (large catchments) and comparing this diffuse N load time series to N concentration in rivers could provide valuable information about N transfer, in particular, its transit time from soil to river networks and its retention time in river basins.

5. Conclusion

N surpluses were assessed over a 71-year period with yearly results between 1940 and 2010 in France. National mean N surpluses calculated for the whole area rose from 16 to 52 kgN.ha UAA⁻¹.yr⁻¹ between 1940 and 1991, and decreased to 34 kgN.ha UAA⁻¹.yr⁻¹ in 2010. This change in N-surpluses has been found in other European countries. However, national trends in N load hid discrepancies between the different departments and the mean department surpluses ranged from 10 to 86 kgN.ha UAA⁻¹.yr⁻¹. The N surpluses obtained in this study were characterized by a large variability, mainly due to uncertainties in N content in crops and in N excreted by livestock, but also in the estimation of symbiotic fixation. The imprecision, defined here as an 80% confidence interval in departmental N surpluses, showed a spatial organization due to its strong correlation with organic fertilizer use and N export. This departmental imprecision ranged from 6 to 45 kgN.ha UAA⁻¹.yr⁻¹.

The model revealed an upward trend in surplus values between 1940 and 1991 for 82% of the studied area and a downward or stable trend for more than 90% of the area between 1991 and 2010.

Imprecision did not modify the statistical trend for most departments (86%). In particular, diffuse N load remained stable or decreased in most of the area under study, probably as a consequence of the Nitrates Directive.

Annexe 9 : Facteurs de contrôle du surplus sur les sous-périodes identifiées sur l'ensemble du territoire

- Identification des sous-périodes selon BFAST (en jaune : amélioration de la pression azotée)

Départements	Période 1	Période 2	Période 3	Période 4	Période 5	Période 6	Facteur de changement	Date
Seine-et-Marne	1917 - 1942 Décroissante $r^2= 0.32$ Fix. symb. $r^2= 0.32$	1942 - 1986 Croissante $r^2= 0.92$ F. min. $r^2= 0.95$	1986 - 2005 Décroissante $r^2= 0.59$ F. min. $r^2= 0.75$	2005 - 2015 Décroissante $r^2= 0.53$ F. min. $r^2= 0.96$			F.min	1986
	1917 - 1939 Décroissante $r^2= 0.31$ Export $r^2= 0.19$ Prairies permanentes $r^2= 0.83$	1939 - 1961 Croissante $r^2= 0.71$ F. min. $r^2= 0.84$	1961 - 1979 Croissante $r^2= 0.87$ F. min. $r^2= 0.96$	1979 - 2003 Décroissante $r^2= 0.68$ F. min. $r^2= 0.74$	2003 - 2015 Stable $r^2= -0.08$ F. min. $r^2= 0.63$			F.min
Yvelines	1917 - 1946 Décroissante $r^2= 0.41$ F. org. $r^2= 0.23$ Ovin adulte (boucherie) $r^2= 0.75$	1946 - 1969 Croissante $r^2= 0.7$ F. min. $r^2= 0.74$	1969 - 1979 Croissante $r^2= 0.62$ F. min. $r^2= 0.87$	1979 - 2003 Décroissante $r^2= 0.68$ F. min. $r^2= 0.75$		2003 - 2015 Stable $r^2= -0.08$ F. min. $r^2= 0.63$	F.min	1979
	1917 - 1946 Décroissante $r^2= 0.91$ F. org. $r^2= 0.92$ lapin1 $r^2= 0.91$	1946 - 1967 Décroissante $r^2= 0.8$ Export $r^2= 0.9$ prairie $r^2= 0.97$	1967 - 1983 Croissante $r^2= 0.76$ F. min. $r^2= 0.81$	1983 - 1995 Décroissante $r^2= 0.92$ F. min. $r^2= 0.99$	1995 - 2015 Stable $r^2= -0.03$ F. min. $r^2= 0.75$ Prairies permanentes $r^2= 0.99$			F.min
Hauts-de-Seine	1917 - 1937 Décroissante $r^2= 0.59$ F. org. $r^2= 0.38$ Equins $r^2= 0.88$	1937 - 1969 Croissante $r^2= 0.82$ F. min. $r^2= 0.91$	1969 - 1979 Croissante $r^2= 0.77$ F. min. $r^2= 0.76$	1979 - 2005 Décroissante $r^2= 0.5$ F. min. $r^2= 0.78$		2005 - 2015 Stable $r^2= 0.04$ F. min. $r^2= 0.87$	F.min	1979
	1917 - 1941 Décroissante $r^2= 0.91$ F. org. $r^2= 0.96$ Equins $r^2= 0.99$	1941 - 1955 Stable $r^2= 0$ F. org. $r^2= 0.27$ Equins $r^2= 0.99$	1955 - 1970 Croissante $r^2= 0.7$ F. min. $r^2= 0.73$	1970 - 1980 Croissante $r^2= 0.46$ F. min. $r^2= 0.85$	1980 - 2003 Décroissante $r^2= 0.25$ F. org. $r^2= 0.52$ Equins $r^2= 0.9$	2003 - 2015 Stable $r^2= -0.07$ F. min. $r^2= 0.89$		F.min
Val-de-Marne	1917 - 1939 Décroissante $r^2= 0.54$ F. min. $r^2= 0.06$	1939 - 1951 Croissante $r^2= 0.67$ F. min. $r^2= 0.79$	1951 - 1979 Croissante $r^2= 0.9$ F. min. $r^2= 0.96$	1979 - 2003 Décroissante $r^2= 0.77$ F. min. $r^2= 0.71$		2003 - 2015 Stable $r^2= -0.07$ F. min. $r^2= 0.61$	F.min	1979
	1917 - 1936 Stable $r^2= -0.02$ Export $r^2= 0.66$ Prairies permanentes	1936 - 1947 Croissante $r^2= 0.9$ Export $r^2= 0.97$ Prairies permanentes	1947 - 1973 Stable $r^2= -0.02$ Export $r^2= 0.32$ Prairies permanentes	1973 - 2015 Décroissante $r^2= 0.58$ F. org. $r^2= 0.58$ Vaches laitières $r^2= 0.98$				F.org.

	r ² = 0.84	r ² = 0.98	r ² = 0.79	
	1917 - 1957	1957 - 1989	1989 - 2015	
	Croissante r ² = 0.16	Croissante r ² = 0.93	Stable r ² = - 0.03	
	Export r ² = 0.71	F. min. r ² = 0.95	F. min. r ² = 0.65	
Haut-Rhin	Prairies permanentes r ² = 0.87			F.min 1989
	1917 - 1976	1976 - 2015		
	Croissante r ² = 0.27	Stable r ² = 0.06		
	F. org. r ² = 0.43	F. min. r ² = 0.44		
Dordogne	Vaches nourrices r ² = 0.59			F. min. et F. org. 1976
	1917 - 1955	1955 - 1993	1993 - 2015	
	Croissante r ² = 0.2	Croissante r ² = 0.83	Décroissante r ² = 0.13	
	Export r ² = 0.3	F. min. r ² = 0.95	F. min. r ² = 0.98	
Gironde	Prairies permanentes r ² = 0.93			F.min 1993
	1917 - 1960	1960 - 1991	1991 - 2005	2005 - 2015
	Croissante r ² = 0.04	Croissante r ² = 0.63	Stable r ² = 0.15	Stable r ² = 0.16
	Export r ² = 0.22	F. min. r ² = 0.89	F. min. r ² = 0.93	F. min. r ² = 0.98
Landes	Maïs grain r ² = 0.52			F.min 1991
	1917 - 1966	1966 - 2005	2005 - 2015	
	Croissante r ² = 0.53	Stable r ² = - 0.02	Stable r ² = - 0.09	
	F. min. r ² = 0.32	F. min. r ² = 0.5	F. min. r ² = 0.99	
Lot-et-Garonne				F.min 1966
	1917 - 1964	1964 - 2001	2001 - 2015	
	Stable r ² = 0.03	Croissante r ² = 0.69	Décroissante r ² = 0.23	
	F. org. r ² = 0.2	F. min. r ² = 0.84	F. min. r ² = 0.98	
Pyrénées-Atlantiques	Vaches nourrices r ² = 0.35			F.min 2001
	1917 - 1995	1995 - 2015		
	Stable r ² = 0.02	Stable r ² = 0.13		
	Fix. symb. r ² = 0.27	Export r ² = 0.7		
Allier	Prairies permanentes r ² = 0.86			
	1917 - 1957	1957 - 2015		
	Croissante r ² = 0.24	Croissante r ² = 0.05		
	Export r ² = 0.6	Fix. symb. r ² = 0.15		
Cantal	Prairies permanentes r ² = 0.97			
	1917 - 2015			
	(Pas de changement de tendance)			
	Stable r ² = 0.01			
Haute-Loire	Fix. symb. r ² = 0.28			
	1917 - 2015			
	(Pas de changement de tendance)			
Puy-de-Dôme	Stable r ² = 0			

	Export $r^2=$ 0.27 Prairies permanentes $r^2=$ 0.96					
	1917 - 2015 (Pas de changement de tendance) Croissante $r^2=$ 0.64 F. min. $r^2=$ 0.77					
Calvados						
	1917 - 1962 Croissante $r^2=$ 0.21 Fix. symb. $r^2=$ 0.4	1962 - 1990 Croissante $r^2=$ 0.73 F. min. $r^2=$ 0.8	1990 - 2015 Décroissante $r^2=$ 0.2 F. min. $r^2=$ 0.78			
Manche					F.min	1990
	1917 - 1949 Stable $r^2=$ 0.07 Export $r^2=$ 0.83 Prairies permanentes $r^2=$ 0.96	1949 - 1991 Croissante $r^2=$ 0.53 F. min. $r^2=$ 0.53	1991 - 2015 Stable $r^2=$ - 0.02 Export $r^2=$ 0.38 Prairies permanentes $r^2=$ 0.68			
Orne					F. org.	1991
	1917 - 1960 Croissante $r^2=$ 0.19 Export $r^2=$ 0.18 Prairies permanentes $r^2=$ 0.88	1960 - 1993 Croissante $r^2=$ 0.78 F. min. $r^2=$ 0.83	1993 - 2015 Stable $r^2=$ - 0.01 F. min. $r^2=$ 0.45			
Côte-d'Or					F.min	1993
	1917 - 1977 Croissante $r^2=$ 0.58 F. min. $r^2=$ 0.42	1977 - 2003 Stable $r^2=$ 0 Export $r^2=$ 0.34 Prairies permanentes $r^2=$ 0.88	2003 - 2015 Stable $r^2=$ 0.14 Export $r^2=$ 0.89 Prairies permanentes $r^2=$ 0.9			
Nièvre					F.min	1977
	1917 - 1939 Décroissante $r^2=$ 0.45 Export $r^2=$ 0.86 Prairies permanentes $r^2=$ 0.93	1939 - 1949 Croissante $r^2=$ 0.29 Export $r^2=$ 0.91 Prairies permanentes $r^2=$ 0.97	1949 - 1966 Croissante $r^2=$ 0.6 F. org. $r^2=$ 0.69 Vaches nourrices $r^2=$ 0.88	1966 - 2015 Stable $r^2=$ 0.04 Export $r^2=$ 0.5 Prairies permanentes $r^2=$ 0.88		Export 1966
Saône-et-Loire						
	1917 - 1939 Décroissante $r^2=$ 0.62 Export $r^2=$ 0.07 Luzerne $r^2=$ 0.5	1939 - 1960 Croissante $r^2=$ 0.19 F. org. $r^2=$ 0.23 Vaches laitières $r^2=$ 0.86	1960 - 1977 Croissante $r^2=$ 0.73 F. min. $r^2=$ 0.76	1977 - 1989 Croissante $r^2=$ 0.26 F. min. $r^2=$ 0.59	1989 - 2003 Stable $r^2=$ 0.02 F. min. $r^2=$ 0.32	2003 - 2015 Stable $r^2=$ 0.2 Export $r^2=$ 0.52 Blé tendre $r^2=$ 0.81 F.min 1989
Yonne						
	1917 - 1957 Décroissante $r^2=$ 0.39 Export $r^2=$ 0.49 Sarclées fourragères $r^2=$ 0.76	1957 - 1979 Croissante $r^2=$ 0.88 F. min. $r^2=$ 0.96	1979 - 2001 Décroissante $r^2=$ 0.26 F. min. $r^2=$ 0.69	2001 - 2015 Croissante $r^2=$ 0.26 F. min. $r^2=$ 0.73		
Cotes-d'Armor						
	1917 - 1945 Décroissante $r^2=$ 0.56 F. org. $r^2=$	1945 - 1969 Croissante $r^2=$ 0.68 F. org. $r^2=$	1969 - 1986 Croissante $r^2=$ 0.54 F. min. $r^2=$	1986 - 2005 Décroissante $r^2=$ 0.9 F. min. $r^2=$ 0.94	2005 - 2015 Stable $r^2=$ -0.1 F. min.	F.min 1986
Finistère						

	0.52 Vaches laitières r ² = 0.84	0.79 Vaches laitières r ² = 0.97	0.84	r ² = 0.86		
	1917 - 1939 Stable r ² = - 0.02 Export r ² = 0.41 Prairies permanentes r ² = 0.54	1939 - 1975 Croissante r ² = 0.71 F. org. r ² = 0.84 Vaches laitières r ² = 0.97	1975 - 1988 Croissante r ² = 0.45	1988 - 2015 Décroissante r ² = 0.86		F.min 1988
Ille-et-Vilaine	1917 - 1970 Décroissante r ² = 0.48 Export r ² = 0.65 Sarclées fourragères r ² = 0.82	1970 - 1990 Croissante r ² = 0.82 F. min. r ² = 0.85	1990 - 2005 Décroissante r ² = 0.61 F. min. r ² = 0.75	2005 - 2015 Stable r ² = 0.12 F. min. r ² = 0.89		F.min 1990
	1917 - 1964 Croissante r ² = 0.45 F. min. r ² = 0.48	1964 - 2005 Stable r ² = 0.02 Export r ² = 0.08 Blé tendre r ² = 0.62	2005 - 2015 Décroissante r ² = 0.31 F. min. r ² = 0.95			F.min 2005
Cher	1917 - 1963 Croissante r ² = 0.23 F. min. r ² = 0.5	1963 - 1990 Croissante r ² = 0.64 F. min. r ² = 0.81	1990 - 2001 Croissante r ² = 0.45 F. min. r ² = 0.7	2001 - 2015 Stable r ² = 0.05 F. min. r ² = 0.61		F.min 2001
Eure-et-Loir	1917 - 1967 Croissante r ² = 0.49 F. min. r ² = 0.57	1967 - 1991 Croissante r ² = 0.28 F. min. r ² = 0.54	1991 - 2001 Décroissante r ² = 0.51 F. min. r ² = 0.42	2001 - 2015 Stable r ² = -0.02 F. min. r ² = 0.61		F.min 1991
Indre	1917 - 1967 Croissante r ² = 0.62 F. min. r ² = 0.79	1967 - 1984 Stable r ² = - 0.06 F. min. r ² = 0.16	1984 - 2015 Décroissante r ² = 0.83 F. min. r ² = 0.77			F.min 1984
Indre-et-Loire	1917 - 1957 Croissante r ² = 0.47 F. min. r ² = 0.61	1957 - 1967 Croissante r ² = 0.76 F. min. r ² = 0.67	1967 - 1991 Croissante r ² = 0.26 F. min. r ² = 0.63	1991 - 2015 Décroissante r ² = 0.35 F. org. r ² = 0.28 Vaches laitières r ² = 0.81		F.min 1991
Loir-et-Cher	1917 - 1950 Stable r ² = - 0.02 Export r ² = 0.44 Luzerne r ² = 0.84	1950 - 1977 Croissante r ² = 0.88 F. min. r ² = 0.95	1977 - 2005 Décroissante r ² = 0.28 Export r ² = 0.39 Blé tendre r ² = 0.69	2005 - 2015 Stable r ² = 0.19 F. min. r ² = 0.97		F.min 1977
Loiret	1917 - 1972 Croissante r ² = 0.53 F. min. r ² = 0.52	1972 - 2015 Décroissante r ² = 0.32 Export r ² = 0.62 Blé tendre r ² = 0.44				F. min et F. Org. 1972
Ardennes	1917 - 1955 Croissante r ² = 0.13 F. min. r ² = 0.3	1955 - 1994 Croissante r ² = 0.89 F. min. r ² = 0.94	1994 - 2004 Décroissante r ² = 0.51 F. min. r ² = 0.91	2004 - 2015 Stable r ² = -0.09 F. min. r ² = 0.92		F.min 2004
Aube	1917 - 1954	1954 - 1984	1984 - 2003	2003 - 2015		F.min 1984
Marne						

	Croissante r ² = 0.25 F. min. r ² = 0.44	Croissante r ² = 0.92 F. min. r ² = 0.97	Décroissante r ² = 0.52 F. min. r ² = 0.75	Décroissante r ² = 0.48 F. min. r ² = 0.93			
Haute-Marne	1917 - 1947 Croissante r ² = 0.15 Export r ² = 0.63 Prairies permanentes r ² = 0.87	1947 - 1991 Croissante r ² = 0.69 F. min. r ² = 0.7	1991 - 2005 Décroissante r ² = 0.42 F. org. r ² = 0.33 Vaches laitières r ² = 0.84	2005 - 2015 Stable r ² = 0.27 F. min. r ² = 0.69		F.min 1991	
Doubs	1917 - 1966 Croissante r ² = 0.18 F. org. r ² = 0.12 Vaches laitières r ² = 0.89	1966 - 2000 Croissante r ² = 0.63 F. min. r ² = 0.76	2000 - 2015 Décroissante r ² = 0.28 F. min. r ² = 0.91			F.min 2000	
Jura	1917 - 1963 Décroissante r ² = 0.07 Export r ² = 0.23 Prairie temporaire r ² = 0.76	1963 - 2002 Croissante r ² = 0.59 F. min. r ² = 0.81	2002 - 2015 Décroissante r ² = 0.26 F. min. r ² = 0.98			F.min 2002	
Haute-Saône	1917 - 1940 Décroissante r ² = 0.38 Export r ² = 0.91 Prairies permanentes r ² = 0.9	1940 - 1959 Stable r ² = 0.14 Export r ² = 0.42 Prairies permanentes r ² = 0.91	1959 - 1970 Stable r ² = 0.06 Fix. symb. r ² = 0.8	1970 - 1982 Stable r ² = -0.07 Fix. symb. r ² = 0.48	1982 - 2003 Décroissa nte r ² = 0.26 Export r ² = 0.42 Maïs grain r ² = 0.4	2003 - 2015 Décroissante r ² = 0.39 Export r ² = 0.91 Prairies permanentes r ² = 0.8 F. org.	1982
Territoire-de-Belfort	1917 - 1973 Stable r ² = - 0.01 Export r ² = 0.34 Prairies permanentes r ² = 0.84	1973 - 2015 Décroissante r ² = 0.58 Export r ² = 0.69 Prairie temporaire r ² = 0.31				F.min 1973	
Eure	1917 - 1957 Croissante r ² = 0.28 F. min. r ² = 0.56	1957 - 1990 Croissante r ² = 0.08 F. min. r ² = 0.21	1990 - 2001 Stable r ² = 0.02 Export r ² = 0.45 Blé tendre r ² = 0.43	2001 - 2015 Stable r ² = -0.07 F. min. r ² = 0.45		F.min 1990	
Seine-Maritime	1917 - 1960 Décroissante r ² = 0.17 Export r ² = 0.59 Prairies permanentes r ² = 0.9	1960 - 1992 Croissante r ² = 0.71 F. min. r ² = 0.83	1992 - 2002 Stable r ² = - 0.02 F. min. r ² = 0.75	2002 - 2015 Croissante r ² = 0.56 F. min. r ² = 0.97			
Aude	1917 - 1956 Croissante r ² = 0.14 F. min. r ² = 0.51	1956 - 1985 Croissante r ² = 0.82 F. min. r ² = 0.9	1985 - 1996 Stable r ² = - 0.02 F. min. r ² = 0.8	1996 - 2015 Décroissante r ² = 0.5 F. min. r ² = 0.93		F.min 1996	
Gard	1917 - 1955 Stable r ² = 0.02 Fix. symb. r ² = 0.28	1955 - 1981 Croissante r ² = 0.86 F. min. r ² = 0.97	1981 - 1991 Croissante r ² = 0.59 F. min. r ² = 0.99	1991 - 2005 Décroissante r ² = 0.43 F. min. r ² = 0.97	2005 - 2015 Croissante r ² = 0.59 F. min. r ² = 0.89		

	1917 - 1965 Stable $r^2=$ 0.02 F. min. $r^2=$ 0.24	1965 - 1991 Croissante $r^2=$ 0.18 F. min. $r^2=$ 0.76	1991 - 2003 Stable $r^2=$ - 0.08 F. min. $r^2=$ 0.98	2003 - 2015 Stable $r^2=$ 0.01 F. min. $r^2=$ 0.93		
Hérault					F.min	1991
	1917 - 1953 Croissante $r^2=$ 0.17 Fix. symb. $r^2=$ 0.44	1953 - 2015 Croissante $r^2=$ 0.54 F. org. $r^2=$ 0.5 Vaches nourrices $r^2=$ 0.85				
Lozère						
	1917 - 1944 Croissante $r^2=$ 0.13 F. min. $r^2=$ 0.35	1944 - 1965 Croissante $r^2=$ 0.18 F. min. $r^2=$ 0.76	1965 - 2015 Décroissante $r^2=$ 0.86 F. min. $r^2=$ 0.95			
Pyrénées-Orientales					F.min	1965
	1917 - 1949 Croissante $r^2=$ 0.1 Fix. symb. $r^2=$ 0.23	1949 - 1981 Stable $r^2=$ 0.03 Fix. symb. $r^2=$ 0.14	1981 - 1994 Stable $r^2=$ 0.16 Export $r^2=$ 0.96 Prairies permanentes $r^2=$ 0.95	1994 - 2015 Stable $r^2=$ 0.12 Export $r^2=$ 0.65 Prairies permanentes $r^2=$ 0.91		
Corrèze					Export	1949
	1917 - 2015 (Pas de changement de tendance) Décroissante $r^2=$ 0.11 Export $r^2=$ 0.47 Prairie temporaire $r^2=$ 0.5					
Creuse						
	1917 - 1942 Stable $r^2=$ 0.06 Export $r^2=$ 0.78 Prairies permanentes $r^2=$ 0.72	1942 - 1967 Décroissante $r^2=$ 0.36 Export $r^2=$ 0.78 Prairies permanentes $r^2=$ 0.77	1967 - 1990 Croissante $r^2=$ 0.31 Export $r^2=$ 0.47 Prairie temporaire $r^2=$ 0.38	1990 - 2015 Stable $r^2=$ -0.01 Export $r^2=$ 0.43 Prairie temporaire $r^2=$ 0.2		
Haute-Vienne					F. min	1990
	1917 - 1928 Croissante $r^2=$ 0.82 F. org. $r^2=$ 0.96 Vaches laitières $r^2=$ 0.61	1928 - 1955 Décroissante $r^2=$ 0.3 Export $r^2=$ 0.5 Prairies permanentes $r^2=$ 0.87	1955 - 1989 Croissante $r^2=$ 0.36 F. min. $r^2=$ 0.44	1989 - 2001 Croissante $r^2=$ 0.54 F. min. $r^2=$ 0.84	2001 - 2015 Décroissance $r^2=$ 0.26 F. min. $r^2=$ 0.64	
Ariège					F. min	2001
	1917 - 1949 Croissante $r^2=$ 0.29 F. org. $r^2=$ 0.4 Vaches nourrices $r^2=$ 0.88	1949 - 1980 Croissante $r^2=$ 0.55 F. org. $r^2=$ 0.68 Vaches laitières $r^2=$ 0.78	1980 - 2015 Stable $r^2=$ 0.08 Export $r^2=$ 0.37 Prairie temporaire $r^2=$ 0.46			
Aveyron					F. min	1980
	1917 - 1963 Croissante $r^2=$ 0.42 F. min. $r^2=$ 0.42	1963 - 1978 Croissante $r^2=$ 0.35 F. min. $r^2=$ 0.46	1978 - 1996 Décroissante $r^2=$ 0.48 F. org. $r^2=$ 0.4 Vaches laitières $r^2=$ 0.97	1996 - 2015 Décroissante $r^2=$ 0.81 F. min. $r^2=$ 0.93		
Haute-Garonne					F. min	1978

	0.78	r ² = 0.81				
	1917 - 1973 Croissante r ² = 0.51 F. org. r ² = 0.52 Vaches laitières r ² = 0.96	1973 - 1991 Croissante r ² = 0.4 Fix. symb. r ² = 0.86	1991 - 2015 Décroissante r ² = 0.4 Export r ² = 0.63 Prairie temporaire r ² = 0.61			F. min 1991
Mayenne						
	1917 - 1967 Croissante r ² = 0.15 F. min. r ² = 0.15	1967 - 1991 Croissante r ² = 0.8 F. min. r ² = 0.81	1991 - 2015 Décroissante r ² = 0.3 Export r ² = 0.48 Prairie temporaire r ² = 0.42			F. min 1991
Sarthe						
	1917 - 1949 Croissante r ² = 0.13 Export r ² = 0.43 Prairies permanentes r ² = 0.43	1949 - 1973 Croissante r ² = 0.57 F. min. r ² = 0.57	1973 - 1990 Croissante r ² = 0.54 F. min. r ² = 0.52	1990 - 2005 Décroissante r ² = 0.63 F. min. r ² = 0.67	2005 - 2015 Stable r ² = 0.07 F. min. r ² = 0.85	F. min 1990
Vendée						
	1917 - 1941 Décroissante r ² = 0.12 Export r ² = 0.25 Luzerne r ² = 0.83	1941 - 1981 Croissante r ² = 0.85 F. min. r ² = 0.88	1981 - 2003 Stable r ² = -0.04 F. min. r ² = 0.36	2003 - 2015 Croissante r ² = 0.35 F. min. r ² = 0.82		
Aisne						
	1917 - 1945 Stable r ² = - 0.02 F. min. r ² = 0.28	1945 - 1982 Croissante r ² = 0.8 F. min. r ² = 0.84	1982 - 1992 Croissante r ² = 0.83 F. min. r ² = 0.98	1992 - 2002 Décroissante r ² = 0.68 F. min. r ² = 0.93	2002 - 2015 Stable r ² = 0 F. min. r ² = 0.32	F. min 1992
Oise						
	1917 - 1943 Stable r ² = 0.04 F. min. r ² = 0.37	1943 - 1970 Croissante r ² = 0.77 F. min. r ² = 0.81	1970 - 1987 Stable r ² = 0.03 Fix. symb. r ² = 0.21	1987 - 2004 Décroissante r ² = 0.43 Export r ² = 0.49 Blé tendre r ² = 0.74	2004 - 2015 Décroissa nte r ² = 0.63 F. min. r ² = 0.74	F. min 1987
Somme						
	1917 - 1945 Croissante r ² = 0.33 Export r ² = 0.25 Luzerne r ² = 0.91	1945 - 1969 Croissante r ² = 0.72 F. min. r ² = 0.78	1969 - 1987 Croissante r ² = 0.6 F. min. r ² = 0.75	1987 - 2000 Décroissante r ² = 0.28 F. min. r ² = 0.66	2000 - 2015 Stable r ² = -0.04 F. min. r ² = 0.64	F. min 1987
Charente						
	1917 - 1953 Stable r ² = 0 Export r ² = 0.05 Luzerne r ² = 0.81	1953 - 1967 Croissante r ² = 0.38 Fix. symb. r ² = 0.79	1967 - 1992 Croissante r ² = 0.94 F. min. r ² = 0.96	1992 - 2005 Stable r ² = - 0.07 F. min. r ² = 0.84	2005 - 2015 Décroissa nte r ² = 0.39 F. min. r ² = 0.94	F. min 2005
Charente- Maritime						
	1917 - 1986 Croissante r ² = 0.67 F. min. r ² = 0.62	1986 - 2015 Décroissante r ² = 0.46 F. org. r ² = 0.53 Bovins mâles (viande) 1 à 2 ans r ² = 0.94				F. min 1986
Deux-Sèvres						
Vienne	1917 - 1953	1953 - 1963	1963 - 1980	1980 - 2005	2005 -	F. min 2005

	Croissante r ² = 0.1 F. min. r ² = 0.06	Croissante r ² = 0.67 Fix. symb. r ² = 0.81	Croissante r ² = 0.64 F. min. r ² = 0.71	Stable r ² = - 0.04 F. min. r ² = 0.13	2015 Décroissa nte r ² = 0.41 F. min. r ² = 0.76		
Alpes_de_Haute _Provence	1917 - 1938 Croissante r ² = 0.38 F. org. r ² = 0.68 Brebis mères r ² = 0.95	1938 - 1972 Croissante r ² = 0.69 F. min. r ² = 0.72	1972 - 2015 Stable r ² = -0.02 F. min. r ² = 0.2				F. min 1972
Hautes-Alpes	1917 - 1938 Stable r ² = 0 Export r ² = 0.22 Prairies permanentes r ² = 0.94	1938 - 1948 Croissante r ² = 0.34 Fix. symb. r ² = 0.4	1948 - 1963 Croissante r ² = 0.58 Fix. symb. r ² = 0.95	1963 - 1973 Stable r ² = - 0.1 Fix. symb. r ² = 0.83	1973 - 2000 Croissante r ² = 0.52 Fix. symb. r ² = 0.71	2000 - 2015 Décroissante r ² = 0.2 F. min. r ² = 0.48	Fixation symbiotique 2000
Alpes-Maritimes	1917 - 1929 Croissante r ² = 0.48 F. org. r ² = 0.86 Vaches laitières r ² = 0.86	1929 - 1940 Stable r ² = 0.23 F. org. r ² = 0.75 Brebis mères r ² = 0.83	1940 - 1963 Croissante r ² = 0.92 F. min. r ² = 0.94	1963 - 1986 Décroissante r ² = 0.94 F. min. r ² = 0.9	1986 - 2015 Décroissa nte r ² = 0.78 F. min. r ² = 0.9		Fixation symbiotique et f. min 1963
Bouches-du- Rhône	1917 - 1943 Décroissante r ² = 0.43 F. min. r ² = 0.4	1943 - 1990 Croissante r ² = 0.86 F. min. r ² = 0.98	1990 - 2005 Stable r ² = -0.02 F. min. r ² = 0.83	2005 - 2015 Décroissante r ² = 0.8 F. min. r ² = 0.98			F. min 2005
Var	1917 - 1931 Stable r ² = 0.2 F. min. r ² = 0.61	1931 - 1944 Stable r ² = - 0.06 Export r ² = 0.09 Prairies permanentes r ² = 0.76	1944 - 1970 Croissante r ² = 0.34 F. min. r ² = 0.38	1970 - 1987 Croissante r ² = 0.25 F. min. r ² = 0.94	1987 - 2015 Décroissa nte r ² = 0.76 F. min. r ² = 0.91		F. min 1987
Vaucluse	1917 - 1941 Stable r ² = - 0.04 F. min. r ² = 0.51	1941 - 1967 Croissante r ² = 0.95 F. min. r ² = 0.98	1967 - 1977 Stable r ² = -0.07 F. min. r ² = 0.87	1977 - 1987 Décroissante r ² = 0.62 F. min. r ² = 0.92	1987 - 2004 Décroissa nte r ² = 0.7 F. min. r ² = 0.95	2004 - 2015 Stable r ² = 0.22 F. min. r ² = 0.84	F. min 1967
Ain	1917 - 1952 Stable r ² = 0.07 Export r ² = 0.8 Prairies permanentes r ² = 0.91	1952 - 2003 Croissante r ² = 0.88 F. min. r ² = 0.91	2003 - 2015 Décroissante r ² = 0.74 F. min. r ² = 0.91				F. min 2003
Ardèche	1917 - 1934 Décroissante r ² = 0.4 Export r ² = 0.85 Prairies permanentes r ² = 0.97	1934 - 1988 Décroissante r ² = 0.3 Export r ² = 0.55 Prairies permanentes r ² = 0.73	1988 - 2002 Stable r ² = 0.08 Export r ² = 0.68 Prairies permanentes r ² = 0.87	2002 - 2015 Stable r ² = - 0.07 F. min. r ² = 0.4			
Drome	1917 - 1962 Croissante r ² =	1962 - 2003 Stable r ² = -	2003 - 2015 Stable r ² = -0.07				F. min 1962

	0.39	0.01			
	F. min. $r^2=$ 0.48	F. min. $r^2=$ 0.19	F. min. $r^2=$ 0.37		
	1917 - 1932 Décroissante $r^2=$ 0.69 Export $r^2=$ 0.79 Prairies permanentes $r^2=$ 0.91	1932 - 1976 Croissante $r^2=$ 0.61 F. min. $r^2=$ 0.43	1976 - 1998 Croissante $r^2=$ 0.66 F. min. $r^2=$ 0.73	1998 - 2015 Décroissante $r^2=$ 0.65 F. min. $r^2=$ 0.69	
Isère					F. min 1998
	1917 - 1950 Croissante $r^2=$ 0.11 Export $r^2=$ 0.86 Prairies permanentes $r^2=$ 0.95	1950 - 1996 Croissante $r^2=$ 0.42 F. min. $r^2=$ 0.49	1996 - 2015 Stable $r^2=$ 0.07 Export $r^2=$ 0.64 Prairies permanentes $r^2=$ 0.82		
Loire					F. min 1996
	1917 - 1975 Croissante $r^2=$ 0.08 Fix. symb. $r^2=$ 0.28	1975 - 1991 Croissante $r^2=$ 0.22 F. min. $r^2=$ 0.83	1991 - 2005 Stable $r^2=$ -0.05 F. min. $r^2=$ 0.75	2005 - 2015 Croissante $r^2=$ 0.56 F. min. $r^2=$ 0.96	
Rhône					
	1917 - 1940 Décroissante $r^2=$ 0.45 Export $r^2=$ 0.73 Prairies permanentes $r^2=$ 0.93	1940 - 1958 Décroissante $r^2=$ 0.34 Export $r^2=$ 0.79 Prairies permanentes $r^2=$ 0.99	1958 - 2015 Décroissante $r^2=$ 0.64 Fix. symb. $r^2=$ 0.32		
Savoie					
	1917 - 1954 Décroissante $r^2=$ 0.12 Export $r^2=$ 0.23 Prairies permanentes $r^2=$ 0.88	1954 - 1964 Stable $r^2=$ 0.1 Fix. symb. $r^2=$ 0.81	1964 - 1991 Croissante $r^2=$ 0.38 F. min. $r^2=$ 0.5	1991 - 2003 Décroissante $r^2=$ 0.55 F. min. $r^2=$ 0.7	2003 - 2015 Stable $r^2=$ -0.09 Export $r^2=$ 0.25 Prairies permanent es $r^2=$ 0.7
Haute-Savoie					F. min 1991
	1917 - 1961 Croissante $r^2=$ 0.13 F. min. $r^2=$ 0.31	1961 - 2015 Croissante $r^2=$ 0.72 F. min. $r^2=$ 0.95			
Meurthe-et-Moselle					
	1917 - 1973 Croissante $r^2=$ 0.56 Fix. symb. $r^2=$ 0.57	1973 - 2003 Stable $r^2=$ - 0.02 Fix. symb. $r^2=$ 0	2003 - 2015 Stable $r^2=$ -0.03 F. min. $r^2=$ 0.65		
Meuse					F. min 1973
	1917 - 1955 Stable $r^2=$ - 0.01 Export $r^2=$ 0.6 Prairies permanentes $r^2=$ 0.7	1955 - 1980 Croissante $r^2=$ 0.7 F. min. $r^2=$ 0.73	1980 - 2015 Stable $r^2=$ 0.07 F. min. $r^2=$ 0.48		
Moselle					F. min 1980
	1917 - 1941 Stable $r^2=$ 0.1 Export $r^2=$ 0.71 Prairies permanentes $r^2=$ 0.89	1941 - 1955 Décroissante $r^2=$ 0.48 Export $r^2=$ 0.95 Prairies permanentes $r^2=$ 0.99	1955 - 1975 Stable $r^2=$ -0.04 Fix. symb. $r^2=$ 0.03	1975 - 2004 Décroissante $r^2=$ 0.29 Export $r^2=$ 0.68 Prairies permanentes $r^2=$ 0.74	2004 - 2015 Croissante $r^2=$ 0.32 Export $r^2=$ 0.58 Prairies permanent es $r^2=$ 0.79
Vosges					

	1917 - 1935	1935 - 1955	1955 - 2003	2003 - 2015		
	Stable $r^2=$ -	Croissante $r^2=$	Croissante $r^2=$	Stable $r^2=$		
	0.01	0.39	0.45	0.17		
	Export $r^2=$	Export $r^2=$	F. org. $r^2=$	Export $r^2=$		
	0.23	0.71	0.55	0.7		
	Prairies	Prairies	Vaches nourrices	Prairies		
	permanentes	permanentes		permanentes		
Corse	$r^2=$ 0.99	$r^2=$ 0.99	$r^2=$ 0.54	$r^2=$ 0.99	F. org.	2003

- Identification selon interprétation visuelle

Département		Période 1	Période 2	Période 3	Période 4	Facteur de changement	Date
Seine-et-Marne	Période	1917 - 1940	1940 - 1985	1985 - 2015		F.min	1985
	Tendance						
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante			
Yvelines	Poste	Fix. symb. $r^2=$	F. min. $r^2=$	F. min. $r^2=$			
	Facteur	0.31	0.95	0.96			
Essonne	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015		F.min	1980
	Tendance						
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante			
Hauts de Seine	Poste	Export $r^2=$ 0.2	F. min. $r^2=$	F. min. $r^2=$			
	Facteur	Prairies permanentes $r^2=$	0.83	0.84			
Seine-Saint-Denis	Période	1917 - 1945	1945 - 1980	1980 - 2015		F.min	1980
	Tendance						
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante			
Val-de-Marne	Poste	F. org. $r^2=$ 0.21	F. min. $r^2=$	F. min. $r^2=$			
	Facteur	Ovins adultes (boucherie) $r^2=$	0.72	0.84			
Val-d'Oise	Période	1917 - 1962	1962 - 1980	1980 - 2015		F.min	1980
	Tendance						
	Stat.	Décroissante	Croissante	Stable			
Bas-Rhin	Poste	F. org. $r^2=$ 0.89	F. min. $r^2=$	F. min. $r^2=$			
	Facteur	Lapines mères $r^2=$	0.97	0.59			
Haut-Rhin	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015		F.min	1980
	Tendance						
	Stat.	D	Croissante	Décroissante			
Haut-Rhin	Poste	F. org. $r^2=$ 0.49	F. min. $r^2=$	F. min. $r^2=$			
	Facteur	Equins $r^2=$ 0.92	0.92	0.86			
Haut-Rhin	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015		F.min	1980
	Tendance						
	Stat.	D	Croissante	Décroissante			
Haut-Rhin	Poste	F. org. $r^2=$ 0.96	F. min. $r^2=$	F. min. $r^2=$			
	Facteur	Equins $r^2=$ 0.99	0.72	0.72			
Haut-Rhin	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015		F.org.	1980
	Tendance						
	Stat.	D	Croissante	Décroissante			
Haut-Rhin	Poste	Export $r^2=$ 0.62	Fix. symb. $r^2=$	F. org. $r^2=$			
	Facteur	Prairies permanentes $r^2=$	0.41	0.53			
		0.85		0.97			
Haut-Rhin	Période	1917 - 1940	1940 - 1985	1985 - 2015		F.min	1985
	Tendance						
	Stat.	S	Croissante	Stable			

	Poste	Fix. symb. $r^2= 0.6$	F. min. $r^2= 0.94$	F. min. $r^2= 0.45$		
	Facteur					
	Période	1917 - 2000	2000 - 2015		F. min.	2000
	Tendance					
	Stat.	Croissante	Stable			
Dordogne	Poste	F. min. $r^2= 0.47$	F. min. $r^2= 0.68$			
	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015	F.min	1990
	Tendance					
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.62$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.93	F. min. $r^2= 0.91$	F. min. $r^2=$ 0.98		
Gironde	Facteur					
	Période	1917 - 1960	1960 - 1990	1990 - 2015	F.min	1990
	Tendance					
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.22$ Maïs grain $r^2=$ 0.52	F. min. $r^2= 0.91$	F. min. $r^2=$ 0.97		
Landes	Facteur					
	Période	1917 - 1965	1965 - 2015			
	Tendance					
	Stat.	Croissante	Croissante			
	Poste	F. min. $r^2= 0.19$	F. min. $r^2= 0.86$			
Lot-et-Garonne	Facteur					
	Période	1917 - 1960	1960 - 1995	1995 - 2015	F.min	1995
	Tendance					
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
	Poste	F. org. $r^2= 0.2$ Vaches nourrices $r^2= 0.45$	F. min. $r^2= 0.77$	F. min. $r^2=$ 0.98		
Pyrénées-Atlantiques	Facteur					
	Période	1917 - 2015 (Pas de changement de tendance)				
	Tendance					
	Stat.	Stable				
	Poste	Fix. symb. $r^2= 0.27$				
Allier	Facteur					
	Période	1917 - 2015 (Pas de changement de tendance)				
	Tendance					
	Stat.	Stable				
	Poste	Fix. symb. $r^2= 0.24$				
Cantal	Facteur					
	Période	1917 - 1950	1950 - 2015		Export	1950
	Tendance					
	Stat.	Croissante	Décroissante			
	Poste	Export $r^2= 0.55$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.93	Fix. symb. $r^2=$ 0.41			
Haute-Loire	Facteur					
	Période	1917 - 2015 (Pas de changement de tendance)				
	Tendance					
	Stat.	Stable				
	Poste	Export $r^2= 0.27$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.92				
Puy-de-Dôme	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 2015			
	Tendance					
	Stat.	Stable	Croissante			
	Poste	Export $r^2= 0.88$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.98	F. min. $r^2= 0.68$			
Calvados	Facteur					

	Période	1917 - 1990	1990 - 2015		F.min	1990
	Tendance					
	Stat.	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. min. $r^2= 0.6$	F. min. $r^2= 0.78$			
Manche	Facteur					
	Période	1917 - 1960	1960 - 1980	1980 - 2015	F. org.	1980
	Tendance					
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.61$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.97	Fix. symb. $r^2=$ 0.45	Export $r^2=$ 0.49 Prairies permanentes $r^2= 0.6$		
Orne	Facteur					
	Période	1917 - 1930	1930 - 1990	1990 - 2015	F.min	1990
	Tendance					
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.85$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.86	F. min. $r^2= 0.89$	F. min. $r^2=$ 0.55		
Côte-d'Or	Facteur					
	Période	1917 - 1975	1975 - 2000	2000 - 2015	F.min	2000
	Tendance					
	Stat.	Croissante	Stable	Décroissante		
	Poste	F. min. $r^2= 0.35$	Export $r^2= 0.31$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.87	Export $r^2= 0.6$ Prairies permanentes $r^2= 0.87$		
Nièvre	Facteur					
	Période	1917 - 1970	1970 - 2015		Export	1970
	Tendance					
	Stat.	Stable	Décroissante			
	Poste	F. org. $r^2= 0.33$ Vaches nourrices $r^2= 0.46$	Export $r^2= 0.47$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.84			
Saône-et-Loire	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015	F.min	1990
	Tendance					
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.07$	F. min. $r^2= 0.82$	F. min. $r^2=$ 0.77		
Yonne	Facteur	Luzerne $r^2= 0.53$				
	Période	1917 - 1950	1950 - 1985	1985 - 2015	F.min	1985
	Tendance					
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.58$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.63	F. min. $r^2= 0.97$	F. min. $r^2=$ 0.47		
Cotes-d'Armor	Facteur					
	Période	1917 - 1945	1945 - 1985	1985 - 2015	F.min	1985
	Tendance					
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante		
	Poste	F. org. $r^2= 0.52$ Vaches laitières $r^2= 0.84$	F. min. $r^2= 0.96$	F. min. $r^2=$ 0.94		
Finistère	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1985	1985 - 2015	F.min	1985
	Tendance					
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.37$ Prairies permanentes $r^2=$ 0.53	F. min. $r^2= 0.93$	F. min. $r^2=$ 0.97		
Ille-et-Vilaine	Facteur					
	Période	1917 - 1965	1965 - 1990	1990 - 2015	F.min	1990
	Tendance					
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.67$ Sarclées fourragères $r^2=$ 0.85	F. min. $r^2= 0.92$	F. org. $r^2=$ 0.69 Vaches laitières $r^2=$ 0.78		
Morbihan	Facteur					
Cher	Période	1917 - 1995	1995 - 2015		F.min	1995

	Tendance Stat.	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. min. $r^2= 0.77$	F. min. $r^2= 0.92$			
	Facteur					
Eure-et-Loir	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015	F.min	1990
	Tendance Stat.	Décroissante	Croissante	Stable		
	Poste	Export $r^2= 0.33$	F. min. $r^2= 0.94$	F. min. $r^2= 0.53$		
Indre	Facteur	Luzerne $r^2= 0.67$				
	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015	F.min	1980
	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
Indre-et-Loire	Poste	Export $r^2= 0.4$	F. min. $r^2= 0.92$	F. min. $r^2= 0.67$		
	Facteur	Prairies permanentes $r^2= 0.5$				
	Période	1917 - 1940	1940 - 1985	1985 - 2015	F.min	1985
Loir-et-Cher	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.08$	F. min. $r^2= 0.87$	F. min. $r^2= 0.77$		
	Facteur	Trèfle $r^2= 0.61$				
Loiret	Période	1917 - 1940	1940 - 1985	1985 - 2015	F.min	1985
	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
	Poste	F. min. $r^2= 0.15$	F. min. $r^2= 0.94$	F. min. $r^2= 0.63$		
Ardennes	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015	F.min	1980
	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
Aube	Poste	Export $r^2= 0.49$	F. min. $r^2= 0.94$	F. min. $r^2= 0.63$		
	Facteur	Luzerne $r^2= 0.73$				
	Période	1917 - 1975	1975 - 2015		F. min et F. Org.	1975
Marne	Tendance Stat.	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. min. $r^2= 0.68$	Export $r^2= 0.65$			
	Facteur		Blé tendre $r^2= 0.42$			
Haute-Marne	Période	1917 - 1940	1940 - 2015			
	Tendance Stat.	Stable	Croissante			
	Poste	Export $r^2= 0.62$	F. min. $r^2= 0.95$			
Doubs	Facteur	Prairies permanentes $r^2= 0.72$				
	Période	1917 - 1940	1940 - 2015			
	Tendance Stat.	Décroissante	Croissante			
Jura	Poste	F. min. $r^2= 0.13$	F. min. $r^2= 0.92$			
	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015	F.min	1990
Haute-Marne	Tendance Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.7$	F. min. $r^2= 0.69$	F. org. $r^2= 0.32$		
	Facteur	Prairies permanentes $r^2= 0.84$		Vaches laitières $r^2= 0.94$		
Doubs	Période	1917 - 2000	2000 - 2015		F.min	2000
	Tendance Stat.	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. min. $r^2= 0.53$	F. min. $r^2= 0.91$			
Jura	Facteur					
	Période	1917 - 1970	1970 - 2015			
	Tendance Stat.	Décroissante	Croissante			
Jura	Poste	Export $r^2= 0.45$	F. min. $r^2= 0.95$			
	Facteur	Prairies temporaires $r^2=$				

		0.64				
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015		
	Tendance				F.min	1990
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.91$ Prairies permanentes $r^2=$	F. min. $r^2= 0.19$	F. min. $r^2=$ 0.76		
Haute-Saône	Facteur	0.9				
	Période	1917 - 1970	1970 - 2015			
	Tendance				F.min	1970
	Stat.	Stable	Décroissante			
	Poste	Export $r^2= 0.5$ Prairies permanentes $r^2=$	Export $r^2= 0.63$ Prairies temporaires $r^2=$			
Territoire-de- Belfort	Facteur	0.84	0.26			
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015		
	Tendance				F.min	1990
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
	Poste	Export $r^2= 0.8$ Prairies permanentes $r^2=$	F. min. $r^2= 0.65$	F. org. $r^2=$ 0.57 Vaches laitières $r^2=$		
Eure	Facteur	0.95		0.93		
	Période	1917 - 1960	1960 - 2015			
	Tendance					
	Stat.	Stable	Croissante			
	Poste	Export $r^2= 0.59$ Prairies permanentes $r^2=$	F. min. $r^2= 0.8$			
Seine-Maritime	Facteur	0.9				
	Période	1917 - 1940	1940 - 2000	2000 - 2015		
	Tendance				F.min	2000
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante		
	Poste	F. org. $r^2= 0.28$ Vaches laitières ^{5f} $r^2= 0.7$	F. min. $r^2= 0.96$	F. min. $r^2=$ 0.93		
Aude	Facteur					
	Période	1917 - 1960	1960 - 1990	1990 - 2015		
	Tendance				F.min	1990
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
	Poste	Fix. symb. $r^2=$ 0.25	F. min. $r^2= 0.97$	F. min. $r^2=$ 0.97		
Gard	Facteur					
	Période	1917 - 1960	1960 - 2015			
	Tendance					
	Stat.	Stable	Croissante			
	Poste	F. min. $r^2= 0.28$	F. min. $r^2= 0.98$			
Hérault	Facteur					
	Période	1917 - 1960	1960 - 2015			
	Tendance					
	Stat.	Stable	Croissante			
	Poste	Fix. symb. $r^2=$ 0.58	F. org. $r^2= 0.5$ Vaches nourrices $r^2= 0.82$			
Lozère	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1970	1970 - 2015		
	Tendance				F.min	1970
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante		
	Poste	F. org. $r^2= 0.44$ Brebis mères $r^2=$	F. min. $r^2= 0.88$	F. min. $r^2=$ 0.96		
Pyrénées- Orientales	Facteur	0.86				
	Période	1917 - 1960	1960 - 2015			
	Tendance					
	Stat.	Décroissante	Stable			
	Poste	Fix. symb. $r^2=$ 0.81	Fix. symb. $r^2= 0.5$			
Corrèze	Facteur					
	Période	1917 - 1960	1960 - 2015			
	Tendance					
	Stat.	Décroissante	Stable			
	Poste	Export $r^2= 0.56$	Export $r^2= 0.54$			
Creuse	Facteur					

	Facteur	Prairies permanentes $r^2=$ 0.55	Prairies permanentes $r^2=$ 0.54				
	Période	1917 - 1970	1970 - 1980	1980 - 2015		F. min	1980
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	Export $r^2=$ 0.31 Prairies permanentes $r^2=$	F. min. $r^2=$ 0.54	Export $r^2=$ 0.69 Prairies temporaires $r^2=$ 0.43			
Haute-Vienne	Facteur	0.66					
	Période	1917 - 2000	2000 - 2015			F. min	2000
	Tendance						
	Stat.	Stable	Décroissante				
	Poste	Export $r^2=$ 0.15 Prairies permanentes $r^2=$	F. min. $r^2=$ 0.75				
Ariège	Facteur	0.8					
	Période	1917 - 1960	1960 - 1980	1980 - 2015		F. min	1980
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. org. $r^2=$ 0.41 Vaches laitières $r^2=$ 0.87	F. org. $r^2=$ 0.56 Vaches laitières $r^2=$ 0.82	Export $r^2=$ 0.37 Prairies temporaires $r^2=$ 0.46			
Aveyron	Facteur	0.87					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015		F. min	1990
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. org. $r^2=$ 0.68 Vaches laitières $r^2=$ 0.68	F. min. $r^2=$ 0.86	F. min. $r^2=$ 0.87			
Haute-Garonne	Facteur	0.68					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015		F. min	1990
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Stable			
	Poste	F. org. $r^2=$ 0.4 Vaches laitières $r^2=$ 0.79	F. min. $r^2=$ 0.87	F. min. $r^2=$ 0.72			
Gers	Facteur	0.79					
	Période	1917 - 1960	1960 - 2000	2000 - 2015		F. min	2000
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	Export $r^2=$ 0.54 Prairies permanentes $r^2=$	F. min. $r^2=$ 0.82	F. min. $r^2=$ 0.72			
Lot	Facteur	0.87					
	Période	1917 - 1990	1990 - 2015			F. min	1990
	Tendance						
	Stat.	Stable	Décroissante				
	Poste	Fix. symb. $r^2=$ 0.21	F. min. $r^2=$ 0.6				
Hautes-Pyrénées	Facteur						
	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015		F. min	1980
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	Export $r^2=$ 0.18 Prairies permanentes $r^2=$	F. min. $r^2=$ 0.8	F. min. $r^2=$ 0.58			
Tarn	Facteur	0.72					
	Période	1917 - 1950	1950 - 1980	1980 - 2015		F. min	1980
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. org. $r^2=$ 0.47 Vaches nourrices $r^2=$ 0.29	F. min. $r^2=$ 0.97	F. min. $r^2=$ 0.88			
Tarn-et-Garonne	Facteur	0.29					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015		F. min	1980
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. min. $r^2=$ 0.82	F. min. $r^2=$ 0.85	F. min. $r^2=$			
Nord	Facteur						

		0.86					
Pas-de-Calais	Facteur						
	Période	1917 - 1940	1940 - 1970	1970 - 2000	2000 - 2015	F. min	1970
	Tendance Stat.	Décroissante	Croissante	Stable	Décroissante	r ² = 0.91	
Loire-Atlantique	Poste	F. min. r ² = 0.37	F. min. r ² = 0.71	F. min. r ² = 0.21	F. min. r ² = 0.89		
	Facteur						
	Période	1917 - 1960	1960 - 1990	1990 - 2015		F. min	1990
Maine-et-Loire	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	Export r ² = 0.12 Sarclées fourragères r ² = 0.82	F. min. r ² = 0.79	F. min. r ² = 0.85			
	Facteur						
Mayenne	Période	1917 - 1960	1960 - 1990	1990 - 2015		F. min	1990
	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. min. r ² = 0.1	F. min. r ² = 0.7	F. min. r ² = 0.82			
Sarthe	Facteur						
	Période	1917 - 1990	1990 - 2015			F. min	1990
	Tendance Stat.	Croissante r ² = 0.68	Décroissante r ² = 0.47				
Vendée	Poste	F. min. r ² = 0.83	Export r ² = 0.71 Prairies temporaires r ² = 0.68				
	Facteur						
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015		F. min	1990
Aisne	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	Export r ² = 0.73 Prairies permanentes r ² = 0.83	F. min. r ² = 0.84	Export r ² = 0.6 Prairies temporaires r ² = 0.49			
	Facteur						
Oise	Période	1917 - 1950	1950 - 1990	1990 - 2015		F. min	1990
	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	Export r ² = 0.48 Sarclées fourragères r ² = 0.53	F. min. r ² = 0.91	F. min. r ² = 0.53			
Somme	Facteur						
	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2000	2000 - 2015		
	Tendance Stat.	Décroissante	Croissante r ² = 0.86	Décroissante	Croissante		
Charente	Poste	Export r ² = 0.25	F. min. r ² = 0.89	Export r ² = 0.32 Blé tendre r ² = 0.81	F. min. r ² = 0.79		
	Facteur	Luzerne r ² = 0.83					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015		F. min	1990
Charente-Maritime	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. min. r ² = 0.24	F. min. r ² = 0.91	F. min. r ² = 0.93			
	Facteur						
Somme	Période	1917 - 1940	1940 - 1975	1975 - 2015		F. min	1975
	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	F. min. r ² = 0.39	F. min. r ² = 0.92	Export r ² = 0.58 Blé tendre r ² = 0.83			
Charente	Facteur						
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015		F. min	1990
	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
Charente-Maritime	Poste	Export r ² = 0.13 Luzerne r ² = 0.89	F. min. r ² = 0.8	F. min. r ² = 0.69			
	Facteur						
	Période	1917 - 1950	1950 - 2000	2000 - 2015		F. min	2000
Charente-Maritime	Tendance Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			

	Poste	Export $r^2= 0.12$	F. min. $r^2= 0.95$	F. min. $r^2= 0.96$		
	Facteur	Luzerne $r^2= 0.73$				
	Période	1917 - 1990	1990 - 2015		F. min	1990
	Tendance		Décroissante $r^2= 0.43$			
	Stat.	Croissante $r^2= 0.64$				
	Poste	F. min. $r^2= 0.75$	Export $r^2= 0.5$			
Deux-Sèvres	Facteur		Prairies temporaires $r^2= 0.66$			
	Période	1917 - 1940	1940 - 2005	2005 - 2015	F. min	2005
	Tendance		Croissante	Décroissante		
	Stat.	Stable				
	Poste	F. min. $r^2= 0$	F. min. $r^2= 0.73$	F. min. $r^2= 0.76$		
Vienne	Facteur					
	Période	1917 - 2000	2000 - 2015		F. min	2000
	Tendance					
	Stat.	Croissante $r^2= 0.8$	Stable $r^2= -0.02$			
Alpes_de_Haute_Provence	Poste	F. min. $r^2= 0.82$	F. min. $r^2= 0.47$			
	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1960	1960 - 2015	Fixation symbiotique	1960
	Tendance		Croissante	Décroissante		
	Stat.	Stable				
	Poste	Export $r^2= 0.29$	Fix. symb. $r^2= 0.82$	Fix. symb. $r^2= 0.77$		
Hautes-Alpes	Facteur	Prairies permanentes $r^2= 0.94$				
	Période	1917 - 1940	1940 - 1960	1960 - 2015	Fixation symbiotique et f. min	1960
	Tendance		Croissante	Décroissante		
	Stat.	Décroissante				
	Poste	F. org. $r^2= 0.5$	F. min. $r^2= 0.92$	F. min. $r^2= 0.96$		
Alpes-Maritimes	Facteur	Brebis mères $r^2= 0.63$				
	Période	1917 - 1940	1940 - 1990	1990 - 2015	F. min	1990
	Tendance		Croissante	Décroissante		
	Stat.	Décroissante				
	Poste	F. min. $r^2= 0.42$	F. min. $r^2= 0.98$	F. min. $r^2= 0.91$		
Bouches-du-Rhône	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1985	1985 - 2015	F. min	1985
	Tendance		Croissante	Décroissante		
	Stat.	Décroissante				
	Poste	F. min. $r^2= 0.37$	F. min. $r^2= 0.87$	F. min. $r^2= 0.92$		
Var	Facteur					
	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015	F. min	1980
	Tendance		Croissante	Décroissante		
	Stat.	Décroissante				
	Poste	F. min. $r^2= 0.51$	F. min. $r^2= 0.98$	F. min. $r^2= 0.98$		
Vaucluse	Facteur					
	Période	1917 - 1955	1955 - 1990	1990 - 2015	F. min	1990
	Tendance		Croissante	Décroissante		
	Stat.	Décroissante				
	Poste	Export $r^2= 0.79$	F. min. $r^2= 0.86$	F. min. $r^2= 0.88$		
Ain	Facteur	Prairies permanentes $r^2= 0.91$				
	Période	1917 - 1960	1960 - 1980	1980 - 2015		
	Tendance		Décroissante	Croissante		
	Stat.	Stable				
	Poste	Export $r^2= 0.75$	F. min. $r^2= 0.37$	F. min. $r^2= 0.43$		
Ardèche	Facteur	Prairies permanentes $r^2= 0.97$				

Drome	Période	1917 - 1940	1940 - 1980	1980 - 2015	F. min	1980	
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	Fix. symb. $r^2=$ 0.36	F. min. $r^2=$ 0.84	F. min. $r^2=$ 0.32			
Isère	Période	1917 - 1930	1930 - 2000	2000 - 2015	F. min	2000	
	Tendance						
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante			
	Poste	Export $r^2=$ 0.79 Prairies permanentes $r^2=$ 0.9	F. min. $r^2=$ 0.71	F. min. $r^2=$ 0.64			
Loire	Période	1917 - 2015 (Pas de changement de tendance)					
	Tendance						
	Stat.	Stable					
	Poste	F. min. $r^2=$ 0.26					
Rhône	Période	1917 - 1960	1960 - 1980	1980 - 2000	2000 - 2015		
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante	Croissante		
	Poste	Export $r^2=$ 0.69 Prairies permanentes $r^2=$ 0.9	F. min. $r^2=$ 0.73	F. min. $r^2=$ 0.96	F. min. $r^2=$ 0.88		
Savoie	Période	1917 - 2015 (Pas de changement de tendance)					
	Tendance						
	Stat.	Décroissante					
	Poste	Export $r^2=$ 0.42 Prairies permanentes $r^2=$ 0.88					
Haute-Savoie	Période	1917 - 1970	1970 - 1995	1995 - 2015	F. min	1995	
	Tendance						
	Stat.	Décroissante	Croissante	Décroissante			
	Poste	Fix. symb. $r^2=$ 0.38	F. min. $r^2=$ 0.77	F. min. $r^2=$ 0.71			
Meurthe-et-Moselle	Période	1917 - 2015 (Pas de changement de tendance)					
	Tendance						
	Stat.	Croissante $r^2=$ 0.74					
	Poste	F. min. $r^2=$ 0.97					
Meuse	Période	1917 - 1940	1940 - 1995	1995 - 2015	F. min	1995	
	Tendance						
	Stat.	Stable	Croissante	Décroissante			
	Poste	Export $r^2=$ 0.36 Prairies permanentes $r^2=$ 0.87	F. min. $r^2=$ 0.77	F. min. $r^2=$ 0.79			
Moselle	Période	1917 - 1960	1960 - 2015				
	Tendance						
	Stat.	Stable $r^2=$ -0.01	Croissante $r^2=$ 0.69				
	Poste	Export $r^2=$ 0.59 Prairies permanentes $r^2=$ 0.73	F. min. $r^2=$ 0.89				
Vosges	Période	1917 - 1960	1960 - 1985	1985 - 2015	F. min	1985	
	Tendance						
	Stat.	Stable $r^2=$ 0	Croissante $r^2=$ 0.26	Décroissante $r^2=$ 0.36			
	Poste	Export $r^2=$ 0.56 Prairies permanentes $r^2=$ 0.97	F. min. $r^2=$ 0.32	Export $r^2=$ 0.5 Prairies permanentes $r^2=$ 0.49			

	Période	1917 - 1960	1960 - 2000	2000 - 2015	F. org.	2000
	Tendance	Décroissante $r^2=$		Décroissante		
	Stat.	0.09	Croissante $r^2= 0.57$	$r^2= 0.52$		
	Poste	Export $r^2= 0.38$	F. org. $r^2= 0.62$	Export $r^2=$		
		Prairies		0.74		
		permanentes $r^2=$	Vaches nourrices	Prairies		
Corse	Facteur	0.99	$r^2= 0.77$	permanentes		
				$r^2= 0.99$		

Annexe 10 : Liste des cultures prises en compte dans le modèle NOPOLU

- Blé tendre
- Triticale
- Blé dur
- Seigle
- Orge et escourgeon
- Avoine
- Maïs grain et semence (dont maïs grain et semence irrigué)
- Riz
- Autres céréales (mélanges de céréales ou non)
- Sorgho grain
- Légumineuses pures (fourragères)
- Légumes secs
- Pomme de terre
- Betterave industrielle
- Plantes sarclées fourragères (Betteraves fourragères, Choux fourragers, Navets fourragers, Autres)
- Tabac
- Houblon
- Colza
- Tournesol
- Soja
- Autres oléagineux
- Lavandes
- Autres cultures industrielles
- Plantes textiles (Lin, chanvre, Autres)
- Légumes frais de plein champ destinés au marché du frais
- Légumes frais en plein air ou abris bas hors assolement
- Légumes frais sous serre et sous abri haut
- Fleurs et plantes ornementales en plein air ou sous abri bas
- Fleurs et plantes ornementales sous serre ou sous abri haut
- Prairies temporaires (graminées pures)
- Mélanges de graminées et associations de graminées - légumineuses
- Maïs fourrage et ensilage (plante entière)
- Autres fourrages annuels (ray - grass, colza fourrager, sorgho fourrager)
- Prairies artificielles (Luzerne, trèfle violet, trèfle incarnat, autres légumineuses et mélanges de légumineuses)
- Pois protéagineux
- Jachères (hors jachères productives)
- Prairies naturelles (y compris les surfaces collectives)
- Prairies naturelles peu productives (y compris les surfaces collectives)
- Fruits (Fruits à noyaux)
- Petits fruits
- Pommes
- Poires
- Autres fruits à pépins
- Fruits (agrumes)
- Noix et fruits secs
- Olives
- Vigne (sous signe officiel de qualité)
- Autres vignes
- Raisin de table

- Pépinières
- Peupleraies
- Bois et forêts

Résumé

Ce travail a pour but d'étudier l'évolution des pressions azotées et de ses facteurs de contrôle sur l'ensemble du territoire. Un modèle de balance azotée de surface du sol a permis de l'obtention de chroniques de surplus azotés à l'échelle départementale pour la période 1917 à 2015 et à l'échelle communale pour la période 1955 à 2015. La quantification des tendances des pressions azotées obtenus à l'échelle départementale, montre que plus de 69% du territoire national est caractérisé par une baisse des pressions azotées à l'heure actuelle, majoritairement sous tendue par une baisse de la fertilisation minérale. Les surplus communaux obtenus sont hétérogènes dans l'ensemble des départements, et ce depuis 1955. Ces résultats peuvent être utilisés dans le cadre de l'état des lieux de la directive nitrates de 2019, mais aussi pour caractériser l'évolution des pressions à l'échelles de masses d'eau ou encore comme données d'entrée dans d'autres modèles de transfert d'azote.

Mots clés : azote, balance azotée de surface du sol, tendance, surplus azoté, efficacité, modélisation, pratiques agricoles, données agricoles, comblement de données, facteur de contrôle

Résumé en anglais

This work aimed to study trends in nitrogen pressure and its drivers on the French territory. A nitrogen soil surface balance was developed and used to obtain nitrogen surplus times series at the departmental scale from 1917 to 2015 and at the municipality scale from 1995 to 2015. Characterisation of departmental trends showed that nowadays, more than 69% of the country presents a decrease in nitrogen pressure, mainly resulting from decrease in mineral fertilizer. Municipality surpluses are heterogeneous for all departments since 1955. Results can be used in the framework of the status of the nitrates directive of 2019, but also to characterise nitrogen pressure on water bodies or as input data for other models.

Key words : nitrogen, nitrogen soil surface balance, trends, nitrogen surplus, efficiency, modelling, agricultural practices, agricultural data, data filling, drivers