

Evolution des surplus azotés (1960-2010) : déploiement national, étude des temps de transfert et de l'impact du changement des pratiques agricoles »

Evaluation des pressions azotées

Rapport technique

POISVERT Cécile, CURIE Florence, GASSAMA Nathalie

Université de Tours - UFR Sciences et Techniques

Février 2016

Résumé

Face au constat de la pollution azotée des hydrosystèmes, des directives ont été adoptées afin de restaurer ou conserver le bon état des masses d'eau vis à vis des nitrates. Ces directives concernent en particulier les systèmes agricoles, identifiés comme sources majeures de l'azote présent dans les hydrosystèmes. Cependant, les évolutions des concentrations en nitrate mesurées dans les eaux de surfaces n'enregistrent pas l'amélioration attendue. Cette absence de diminution significative pourrait être due au temps de transfert de l'azote au niveau des compartiments de surface et souterrain depuis les systèmes agricoles vers les eaux de surfaces qu'il serait nécessaire d'évaluer. Ce projet vise, dans un premier temps, à déterminer les pressions azotées d'origine agricole sur une longue période.

Les pressions azotées ont été évaluées à partir de l'application d'un modèle de balance azotée de surface du sol, appliqué à l'échelle départementale et annuelle, sur la période allant de 1960 à 2010. Ce modèle permet aussi d'évaluer, pour chaque résultat, une incertitude.

Ce projet permettra d'obtenir des chroniques inédites de pression azotée sur 50 ans à l'échelle départementale, ainsi que leur incertitude associée.

Le guide méthodologique que constitue ce rapport est scindé en cinq parties. La première rappelle le contexte de l'étude, la deuxième partie détaille la structure du modèle employé. La troisième partie présente la méthode de constitution de la base de données nécessaire à l'étude. La quatrième partie présente le calcul des incertitudes relatives au modèle. Les limites du modèle sont évoquées en quatrième partie. Enfin, des exemples de résultats sont présentés en dernière partie.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'implication de Yann Jullian (Ingénieur CaSciMoDot à l'Université de Tours) pour l'implémentation du modèle dans le langage C++. Outre que ce langage soit libre de droit, il a permis d'optimiser le fonctionnement du modèle et ainsi diminuer de manière importante le temps de calcul.

Auteurs

POISVERT Cécile

CURIE Florence

GASSAMA Nathalie

Université de Tours - UFR Sciences et Techniques

Avenue Monge

37002 TOURS

Liste des illustrations

Figure 1 : Le modèle CASSIS_N	9
Figure 2 : Nombre de données de la base de données pour chaque année de la chronique	16
Figure 3 : Chroniques de surplus azoté et leur imprécisions annuelles (kgN/ha SAU/an) pour les départements de la Creuse et du Loir et Cher.....	29
Tableau 1 : Liste des légumineuses prises en compte dans CASSIS_N.....	9
Tableau 2 : Coefficients utilisés pour le calcul de la fixation symbiotique (d'après Anglade et al., 2015)	11
Tableau 3 : Equivalents UGB alimentation grossière (Soes, 2013, et Agreste, 2010).....	13
Tableau 4 : Contenu en matière sèche des racines et tubercules fourragers.....	13
Tableau 5 : Données et paramètres requis pour l'application de CASSIS_N.....	14
Tableau 6 : Engrais azotés minéraux listés dans les volumes de la SAA sur la période 1960-2015.....	18
Tableau 7 : Teneur en azote des différentes productions	20
Tableau 8 : Excrétion azotée pour les différentes catégories de bétail.....	23
Tableau 9 : Perte d'azote vers l'atmosphère selon le type des fertilisations organiques.....	25
Tableau 10 : Volatilisation des différents types d'engrais azotés minéraux (adapté d'après EMEP-Corinair cité dans CORPEN, 2006).....	25
Tableau 11 : Incertitude affectée aux différents items du surplus.....	26
Tableau 12 : Comparaison méthodologique (méthode et des fournisseurs de données) avec NOPOLU27	

Table des matières

I.	Introduction : Contexte scientifique	6
II.	Le modèle de balance azotée de surface du sol : le modèle CASSIS_N	8
II . 1 .	Fixation symbiotique (NFix)	9
II . 1 . a .	Méthode employée par NOPOLU.....	10
II . 1 . b .	Méthode prenant en compte la partie souterraine des légumineuses	10
II . 2 .	Fertilisations organiques (NOrg) et minérales (NMin).....	11
II . 3 .	Dépôts atmosphériques (NAir).....	12
II . 4 .	Exportation d'azote (NExp)	12
II . 4 . a .	Principe général.....	12
II . 4 . b .	Cas particulier de l'export pour les surfaces toujours en herbe.....	12
III.	Les entrées et paramètres du modèle CASSIS_N	13
III . 1 .	Les données d'entrée.....	15
III . 1 . a .	Les données agricoles	15
III . 1 . b .	Les dépôts atmosphériques.....	19
III . 2 .	Les paramètres du modèle	19
III . 2 . a .	Export d'azote : Teneur en azote des différentes productions.....	19
III . 2 . b .	Fertilisation organique.....	22
III . 2 . c .	Fertilisation minérale	25
IV.	Calcul de l'imprécision sur les surplus départementaux	25
V.	Limites.....	27
V . 1 .	Comparaison avec le modèle NOPOLU.....	27
V . 2 .	Flux d'azotes non pris en compte dans le modèle.....	28
V . 2 . a .	Importation et transfert d'alimentation animale	28
V . 2 . b .	Les fertilisations azotés	28
VI.	Exemple de résultats finaux.....	29
VII.	Références	30

Liste des abréviations

AFZ : Association Française de Zootechnie

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'environnement et du travail

EEA : European environment agency

CASSIS_N : Calculation of Soilsimplified Surplus of nitrogen

CETIOM : Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains

CIQUAL : Observatoire de la qualité nutritionnelle des aliments

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CNIPT : Comité national interprofessionnel de la pomme de terre

COMIFER : Comité Français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée

CORPEN : Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement

DGDDI : Direction générale des douanes et droits indirects

EMEP : Co-operative programme for monitoring and evaluation of long range transmission of air pollutants

FAO : Food and agriculture organization

ISOP : modèle d'Information et suivi objectif des prairies

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

ITB : Institut technique de la betterave

MAAF : Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

MS : Matière sèche

NHI : N Harvert Index

ONIGC : Office national interprofessionnel des grandes cultures

PMPOA : Programme de Maîtrise des Pollution d'Origine Agricole

RGA : Recensement général agricole

RTF : racine et tubercules fourragers

SAA : Statistique agricole annuelle

SAU : Surface agricole utile

SOeS : Service de l'Observation et des Statistiques (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie)

STH : Surface toujours en herbe

SSP : Service de la statistique et de la prospective

UGB : Unité gros bétail

UNIFA : Union des Industries de la Fertilisation

I. Introduction : Contexte scientifique

En France, la qualité des eaux en nitrates s'est dégradée à partir des années 1970 (MAAF et al., 2013) entraînant l'eutrophisation d'eaux continentales de surface (Minaudo et al., 2015; Passy et al., 2013), des phénomènes de marées vertes en zones côtières (Chevalassus-au-Louis et al., 2012) et une dégradation de la qualité des nappes d'eau. Cette dégradation a entraîné un surcoût dans la gestion des eaux d'alimentation par la nécessaire diversification de la ressource exploitée et par le traitement de l'eau potable (MAAF et al., 2013).

L'azote est un fertilisant souvent indispensable pour obtenir un niveau de production acceptable pour le producteur. Une fois sorti du système agricole, l'azote qui se trouve alors principalement sous forme de nitrate, devient indésirable. L'utilisation grandissante d'intrants azotés minéraux et organiques en agriculture depuis la "révolution verte" a été identifiée par de nombreux auteurs comme étant la source de l'azote excédentaire présent dans les hydrosystèmes (Aquilina et al., 2012; Heathwaite et al., 1996; Öborn et al., 2003; Oenema et al., 2003; Peyraud et al., 2012).

La législation internationale a évolué afin d'évaluer et améliorer l'état des différentes masses d'eau (directive nitrate, 91/676/CEE; directive cadre sur l'eau, 2000/60/CE, directive fille sur les eaux souterraines, 2006/118/CE^a). Entre autre, de gros efforts ont été demandés au niveau des pratiques agricoles (calendrier d'épandage, définitions de zones sensibles...) et l'état des lieux des pressions azotées diffuses d'origine agricoles est aujourd'hui une estimation obligatoire vis à vis de la législation (directive cadre sur l'eau, 2000/60/CE). Néanmoins, les teneurs en nitrate des cours d'eau et des eaux souterraines mesurées par le réseau de suivi national montrent des résultats peu probants. Deux décennies après la mise en vigueur de la directive nitrate, 34,6% des stations de mesure des eaux de surface et 46,5% des stations de mesure des eaux souterraines montrent une concentration croissante en nitrate entre 1991 et 2011 (Lalouette et al., 2015).

Le temps de réponse des bassins versants vis à vis des mesures d'atténuation semble principalement lié au temps de transfert des composés azotés depuis les agrosystèmes vers l'hydrosystème (Aquilina et al., 2012; Cherry et al., 2008; Dupas et al., 2013). Ce temps de transfert peut être dû au temps de déstockage de l'azote des sols et/ou au temps de transfert eaux souterraines vers les eaux de surface. Ce constat montre la nécessité de l'estimation de ce temps de transfert sans doute extrêmement variable géographiquement.

^a Ce rapport concernant l'établissement de chroniques de pression azotée diffuse, seuls les textes de loi faisant référence à la pollution diffuse des eaux ont été cités. Néanmoins, il faut noter que la législation vis à vis des pollutions ponctuelles a aussi évolué mettant ainsi en place un cadre contraignant par exemple sur les rejets provenant d'eaux urbaines résiduaires (91/271/CEE).

L'objectif général du projet est d'estimer les pressions azotées établies sur une longue durée (un demi-siècle) au niveau des agrosystèmes afin de pouvoir faire le lien entre celles-ci et l'évolution des concentrations azotées dans les eaux de surface. Le décalage dans le temps entre variation des apports et variation des teneurs dans les eaux correspond au temps de transfert entre les agrosystèmes et les eaux de surface. Ce rapport présente la méthodologie retenue pour la première étape de ce projet, qui vise à déterminer des chroniques de pressions azotées à l'échelle départementale. Il présente en dernière partie des exemples de chroniques de surplus azoté établies à l'échelle départementale.

Les balances azotées de surface du sol sont de bons indicateurs globaux des pressions azotées agricoles (EEA, 2001). Le modèle actuel de référence du calcul des pressions azotées en France, NOPOLU, utilise ce type de balance azotée (Soes, 2013). NOPOLU propose des résultats spatialisés à l'échelle de la commune en se basant sur les données départementales de rendement agricole de la Statistique Agricole Annuelle (SAA) couplée aux données de surface communales issues du Recensement Général Agricole (RGA). Le RGA est une enquête exhaustive, réalisée environ tous les dix ans (1970, 1979, 1988, 2000, 2010), et son utilisation ne permet donc que l'obtention de résultats ponctuels dans le temps. La dernière version de Nopolu (Nopolu 2010) s'appuie sur les données du RGA 2010 et de la SAA 2010 (Soes, 2013). Pour obtenir des résultats sur des années intermédiaires, une interpolation des données du RGA est nécessaire. L'obtention d'une année de résultats demande des mises à jour complexes qui n'autorisent pas un accès direct à une chronique de pression annuelle.

Des chroniques annuelles de pressions azotées ont été établies d'après le principe des balances azotées de surface de sol et avec l'utilisation des données de la FAO (Bourouai and Grizzetti, 2011). Cependant, ces chroniques ne sont disponibles qu'à l'échelle du pays ce qui occulte les disparités régionales.

Enfin, l'évolution de l'agriculture en France au cours du XXe siècle, avec en particulier une modernisation rapide à partir de 1945 (Deléage, 2013) met clairement en avant l'intérêt de regarder l'évolution de ces pressions non pas uniquement à l'échelle annuelle mais pluriannuelle, et idéalement une chronique longue. Ces chroniques permettraient ainsi de comparer les surplus azotés (pression diffuse) au niveau des agrosystèmes et la concentration en nitrates dans les eaux de surface (impact). L'analyse du décalage temporel entre ces deux chroniques constituerait ainsi une évaluation du temps de transfert des composés azotés.

Un modèle de calcul de pressions azotées, CASSIS_N (CALculation of SoilsImplied Surplus of Nitrogen), a donc été développé, utilisant les balances azotées de surface du sol, dans le but d'obtenir des chroniques annuelles de pressions azotées. Ce modèle permet aussi la quantification des incertitudes liées aux résultats.

Le modèle CASSIS_N a été développé et appliqué dans un précédent projet, sur le bassin de la Loire (projet Eutrophisation du bassin de la Loire 1975-2014 financé par le Plan Loire, l'Europe, EDF et l'Agence de l'eau Loire-Bretagne), sur les 39 départements de la région Loire-Bretagne, pour déterminer les pressions azotées sur 43 ans (1940, 1950, 1960 à 2010). Dans le cadre de ce projet ONEMA, la zone géographique a été étendue aux 55 autres départements de la France continentale et à la région Corse afin de couvrir **l'ensemble du territoire métropolitain**. La période d'étude finale s'étend à présent de **1960 à 2015**. Les principes de calculs du modèle CASSIS_N sont restés les mêmes mais différentes améliorations ont été apportées afin de mieux prendre en compte la fixation symbiotique du diazote atmosphérique de l'air par les légumineuses.

Ce rapport présente les principes de calcul du modèle CASSIS_N ainsi que les données d'entrée nécessaires à son fonctionnement à l'échelle départementale. La méthode de détermination des incertitudes permettant de tester la robustesse des calculs fait également l'objet d'une partie de ce rapport.

II. Le modèle de balance azotée de surface du sol : le modèle CASSIS_N

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

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

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

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 par la fertilisation minérale et organique respectivement et N_{exp} la quantité d'azote exportée du sol par les récoltes.

L'ensemble des postes (fixation symbiotique, déposition atmosphérique, fertilisation minérale, fertilisation organique, exportation d'azote) étant normalisé par la surface agricole utile (SAU) en hectare du département (notée S_{dep} par la suite), toutes les valeurs sont en $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\text{SAU}\cdot\text{an}^{-1}$.

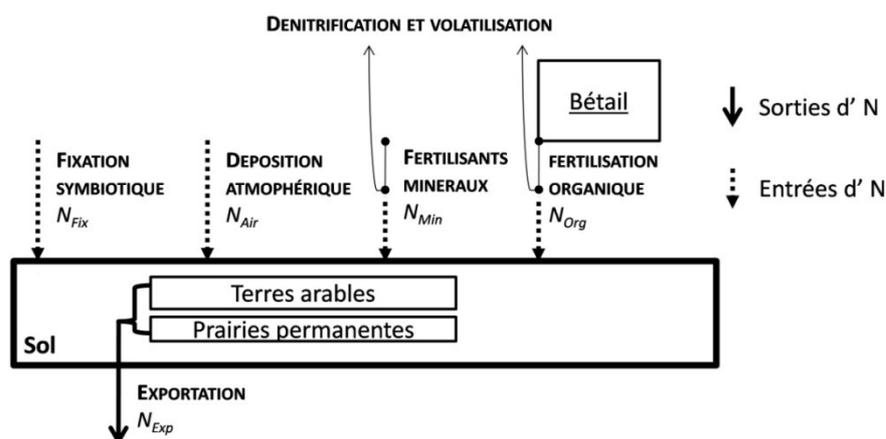


Figure 1 : Le modèle CASSIS_N

II . 1 . Fixation symbiotique (NFix)

La fixation du diazote atmosphérique est effectuée par des plantes de la famille des légumineuses (*Fabacées*). Certaines de ces plantes sont cultivées pour leur intérêt vis à vis de l'alimentation humaine ou animale (Tableau 1). Leur culture représente un apport d'azote au système agricole par le biais de la fixation symbiotique qu'il convient de prendre en compte dans la balance azotée de surface du sol. Le tableau 1 ne recense que les cultures pures. Cependant, les légumineuses fourrages sont souvent cultivées en association avec des graminées. D'après les expert du CORPEN, la proportion de légumineuse fourrage dans les prairies permanentes et temporaire est respectivement de 15 et 30%.

Tableau 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

La quantité d'azote fixé par fixation symbiotique peut être déterminée par deux méthodes de calcul. La première méthode est la plus fréquente, elle est notamment utilisée dans le modèle NOPOLU (Eq. 2a). Cependant, une des limites de cette méthode est qu'elle ne permet de calculer que l'azote fixé dans la partie aérienne des végétaux.

La deuxième méthode proposée en 2015 par Anglade et al., corrige ce biais et a retenu notre attention pour le calcul de la fixation symbiotique (Eq. 2b). Cette méthode présentée dans un deuxième point est celle implémentée dans le modèle CASSIS_N.

n.b. : Pour les deux méthodes proposées, il faut tenir compte du fait que les cultures de légumineuses ne sont pas forcément pures (cf. I.1.a) et multiplier la production des légumineuses en conséquence.

II.1.a. Méthode employée par NOPOLU

La quantité d'azote introduite dans le sol par la fixation symbiotique (N_{Fix} en $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\text{SAU}\cdot\text{an}^{-1}$) est calculée en fonction de la production des cultures légumineuses ($P_{\text{dt}_{\text{cultures_fixatrices}}}$ en quintal) et de l'azote contenu dans ces cultures ($N_{\text{cultures_fixatrices}}$ en $\text{kgN}\cdot\text{quintal}^{-1}$)

$$N_{\text{Fix}} = \sum_{\text{cultures_fixatrices}} \left(N_{\text{cultures_fixatrice}} * P_{\text{dt}_{\text{cultures_fixatrice}}} * P_{\text{légumineuses}} * \text{TF} \right) / S_{\text{dep}} \quad (2a)$$

avec $P_{\text{légumineuses}}$ la proportion de légumineuse dans la culture considérée, S_{dep} la SAU départementale en ha et TF le taux de fixation symbiotique des légumineuses fixé à 0.7 d'après les experts du CORPEN (Soes, 2013).

II.1.b. Méthode prenant en compte la partie souterraine des légumineuses

Dans son article de synthèse sur les mesures de la fixation symbiotique, Anglade et al., 2015 propose une nouvelle formule de calcul de la quantité de N_2 fixé.

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

(2b)

avec $\alpha_{\text{culture_fixatrice}}$ et $\beta_{\text{culture_fixatrice}}$ des coefficients qui dépendent du type de culture, NHI le *N Harvert Index* c'est à dire le ratio entre la partie récoltée et la partie souterraine de la plante (Tableau 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 $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ et $S_{\text{culture_fixatrice}}$ la surface cultivée de la légumineuse considérée.

Tableau 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

II . 2 . Fertilisations organiques (N_{Org}) et minérales (N_{Min})

Le calcul de l'azote introduit par les fertilisations minérales (Eq. 3) et organiques (Eq. 4) tient compte des processus de volatilisation et de dénitrification qui entraînent une perte de l'azote épandu ou excrété vers l'atmosphère. La quantité totale de fertilisation est tout d'abord déterminée par département, 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. La quantité d'azote minérale qui entre effectivement dans le sol (N_{Min} en $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{SAU} \cdot \text{an}^{-1}$) est calculée comme suit :

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

avec j les différents types d'engrais minéraux (ammonitrates, engrais composés...), F_j **la quantité des différents types de fertilisants minéraux (en kgN) livrée par département** 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.

La fertilisation organique est calculée à partir de l'excrétion totale du cheptel par département modulée avec un coefficient C_i qui représente la proportion d'azote excrété qui n'est pas perdu vers l'atmosphère. L'apport réel d'azote au sol d'origine organique (N_{Org} en $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{SAU} \cdot \text{an}^{-1}$) est calculé comme suit :

$$N_{\text{Org}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N b_j * E_j * C_i / S_{\text{dep}} \quad (4)$$

avec 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, E_j l'excrétion (en kgN/tête) pour chaque classe de bétail (\emptyset).

II . 3 . Dépôts atmosphériques (NAir)

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 tout au long de la période d'étude.

II . 4 . Exportation d'azote (NExp)

II . 4 . a . Principe général

L'export d'azote (N_{exp} en kg N.ha⁻¹SAU.an⁻¹) est calculé en fonction de la quantité récoltée pour chaque culture ($Pdt_{culture}$) ainsi que sa teneur en azote ($N_{culture}$ en kgN.quintal⁻¹).

$$N_{Exp} = \sum_{culture} (Pdt_{culture} * N_{culture}) / S_{dep} \quad (5)$$

II . 4 . b . Cas particulier de l'export pour les surfaces toujours en herbe

La production d'herbe en provenance des surfaces toujours en herbe (STH) doit être vérifiée et adaptée vis à vis des besoins fourragers du bétail présent sur le département. La variable UGB alimentation grossière permet de comparer les animaux en fonction de leur consommation en aliments grossiers (herbe, fourrage) (Agreste, 2010). Le besoin fourrager de l'ensemble du bétail du département a été calculé d'après le postulat qu'un équivalent UGB alimentation grossière (Tableau 3) nécessite 52 quintaux de matière sèche (MS) à l'année (Soes, 2013).

Le besoin fourrager est d'abord comblé par les productions fourragères du département (prairies artificielles, prairies temporaires, racines et tubercules fourragers -RTF-). Pour les racines et tubercules fourragers une conversion est nécessaire entre la production récoltée (en quintal) et la quantité de matière sèche (Tableau 4). Dans le cas où le besoin fourrager n'est pas comblé par les cultures citées

précédemment alors le besoin fourrager est comblé par de l'herbe provenant des STH jusqu'à une valeur maximum correspondant au potentiel de production d'herbe par les STH relevé dans la SAA.

Tableau 3 : Equivalents UGB alimentation grossière (Soes, 2013, et Agreste, 2010)

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

Tableau 4 : Contenu en matière sèche des racines et tubercules fourragers

Type de racine ou tubercule	%matière sèche	Notes	Source
Betterave	16		1
Carotte	18		1
Navet	8		1
Rutabaga	15		1
Topinambour	20		1
Panaïs	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, ³ Duval, 1995

III. Les entrées et paramètres du modèle CASSIS_N

Le modèle de balance azotée de surface du sol nécessite le calcul des flux entrants et sortant d'un sol agricole, sans tenir compte de l'évolution du stock d'azote du sol ni de la lixiviation. Ces flux peuvent être estimés à l'aide des équations 2 à 5 présentées dans la partie précédente. Le calcul de chaque poste requiert l'utilisation de données et de paramètres (Tableau 5) présentés par la suite.

Les données et les paramètres nécessaires au fonctionnement de CASSIS_N proviennent majoritairement de rapports d'institutions nationales ce qui reflète la sélection de références adaptées au cadre géographique de l'étude (territoire français).

Tableau 5 : Données et paramètres requis pour l'application de CASSIS_N

Poste	Equations concernées	Données requises	Paramètres requis
Fixation symbiotique	2a et 2b	Production et surface des légumineuses ¹ , SAU ¹	Contenu en azote des légumineuses ⁴
Fertilisation minérale	3	Livraison d'engrais ² , SAU ¹	Perte d'azote vers l'atmosphère ⁶
Fertilisation organique	4	Nombre de tête de cheptel ¹ , SAU ¹	Perte d'azote vers l'atmosphère ⁷ , excrétion azotée du bétail ⁵
Exportation	5	Production des différentes cultures SAU ¹	Contenu en azote des cultures ⁴
Déposition atmosphérique		Déposition atmosphérique d'azote ³	/

Sources :

¹ Ministère de l'agriculture : SSP, Service de la Statistique et de la Prospective (Agreste 1960 à 2015)

² SSP, UNIFA, Union des Industries de la Fertilisation

³ EMEP, European Monitoring and Evaluation Programm

⁴ ANSES, 2013 ; SoeS, 2013 ; COMIFER, 2013 ; EEA, 2001 ; Audouin, 1991 ; Alvarez et al., 2014 ; Bach and Frede, 2005 ; Bouwman et al., 2005 ; CORPEN, 1988 ; Leip et al., 2011 ; Feedipedia^b (consulté le 25/11/14) ; comm. pers. CETIOM ; comm. pers. CNTIP ; Honda et al., 2005, 2005 ; comm pers. ITB ; ARVALIS, 2007 ; INRA, 2007, Sauvart et al., 2004

⁵ CORPEN, 1988, 1999, 2001, 2003, 2006 ; Circulaire DERF/SDAGER/C2002-3013 ; JOFR, 2011

⁶ EMEP-Corinair in CORPEN, 2006 cited in Soes (2013),

⁷ Gac et al., 2006

L'incertitude sur les données d'entrée et les paramètres utilisés dans CASSIS_N sont de deux types : les incertitudes stochastiques (incertitude irréductible due à la variabilité des phénomènes naturels) et épistémiques (incertitude due à un manque de connaissance). Une attention particulière a été apportée à l'estimation des incertitudes relatives à chaque valeur utilisée au sein de CASSIS_N : un intervalle de valeurs probables a été déterminé pour chacune d'entre elle. Dans le cas où une seule valeur est trouvée dans la littérature (données d'entrées, volatilisation des engrais minéraux vers l'atmosphère), l'incertitude sur cette valeur a été fixée en accord avec les estimations de Oenema et al., (2003). Dans le cas où plusieurs valeurs sont relevées dans la littérature, l'incertitude est estimée en fonction de l'intervalle des valeurs trouvées (contenu en azote des cultures, excrétion du bétail...).

Les parties suivantes détailleront les méthodes de mise en forme des données d'entrées (données agricoles et déposition atmosphérique), les méthodes d'estimation des paramètres pour chaque poste du bilan ainsi que l'incertitude qui a été affectée à chaque valeur.

^b Feedipedia est projet commun entre l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), l'AFZ (Association Française de Zootechnie) et la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Ce projet vise à regrouper des informations sur les aliments utilisés pour nourrir le bétail. Les données sont disponibles en ligne en accès libre sur le site <http://www.feedipedia.org/>.

III . 1 . Les données d'entrée

III . 1 . a . Les données agricoles

La majorité des données agricoles (production, nombre de tête de bétail et fertilisation minérale) utilisées sont issues des annuaires de la SAA fournis par le SSP (Service de la Statistique et de la Prospective) et l'UNIFA (Union des Industries de la Fertilisation). Les **données sont dans leur grande majorité disponibles à l'échelle départementale.**

La SAA est établie chaque année par les services statistiques (SSP) des directions régionales de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF). La SAA fournit des renseignements sur l'utilisation des terres, les productions végétales et animales à partir d'opérations de synthèse utilisant l'ensemble des informations disponibles sur un sujet donné :

- Des enquêtes exhaustives ou non,
- 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 ,...
- D'autres administrations (INSEE, Institut national des Statistiques et des Etudes économiques, Office national météorologique, Service des Haras...).

Les résultats finaux sont déterminés en fonction de la cohérence générale des données dans le temps et l'espace et en accord avec les résultats des recensements agricoles disponibles.

Avant 2005, les données de la SAA étaient consignées dans des annuaires papiers. La numérisation de ces données a été nécessaire pour la réalisation de cette étude. Les données concernant la période 1990 à 2010 sont maintenant disponibles sous format numérique (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>).

III . 1 . a . i . Description de la base de données brute

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 (Figure 2). **La période renseignée annuellement s'étend de 1960 à 2015.**

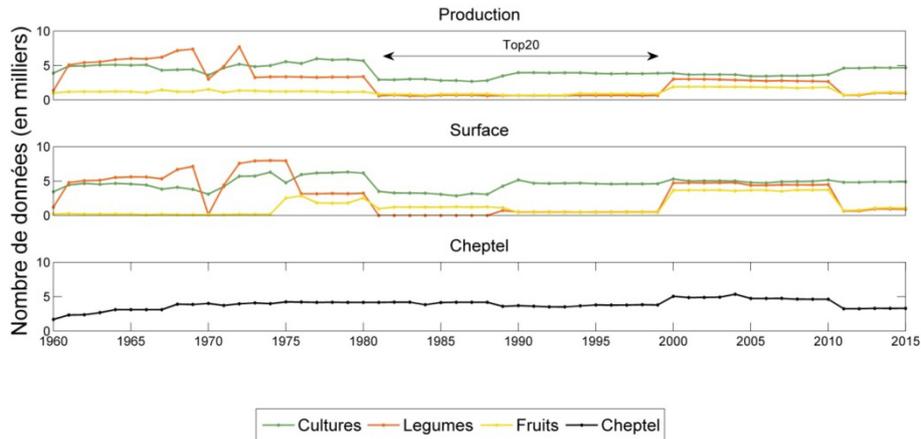


Figure 2 : Nombre de données de la base de données pour chaque année de la chronique

Les **catégories** qui permettent de décrire les données agronomiques sont **hétérogènes au cours du temps**. Les **principales productions végétales** (blé, orge, avoine...) **sont conservées** tout au long de la chronique mais plusieurs modes de culture (culture principale, dérobée ou associée) peuvent être détaillés dans les annuaires selon les années. Par exemple, la production d'épinards qui est décrit par une seule catégorie en 1960 est décrite par 4 catégories (culture principale, dérobée, associée et culture maraichère) en 1961. Certaines productions apparaissent au fil des années comme c'est le cas de la production de courgette qui n'est renseignée qu'à partir de 1961, certainement du fait de l'importance que prend la production de ce légume.

De même, les catégories de cheptel varient au cours du temps. Ainsi, les bovins sont décrits par le biais de 6 catégories en 1960 et 20 en 2010. L'ensemble "volaille-clapier" n'apparaît qu'en 1968.

Un important travail d'**homogénéisation** des données a donc été effectué afin d'**obtenir les mêmes catégories sur l'ensemble de la période d'étude**.

III. 1. a. ii. Reconstitution de chroniques homogènes

- Homogénéisation des catégories de productions et cheptel

Pour les données de cheptel et de production, deux cas de figure peuvent se présenter : (1) l'abondance de catégories pour lesquelles aucune information particulière sur les teneurs en azote n'est disponible et (2) le manque de détail au sein d'une catégorie pour laquelle une distinction est nécessaire.

Pour le cas (1) concernant l'abondance de catégories, un exemple simple concerne la présence d'informations sur la production selon le mode de culture (principale, dérobée ou associée). Dans ce cas, les productions et les surfaces sont sommées afin de réduire le nombre de catégories.

Pour le cas (2) concernant le manque de détail au sein d'une catégorie, un bon exemple est celui de la variation des catégories du cheptel bovin (Annexe 1). La teneur en azote de l'excrétion des vaches laitières et nourrices est différente (110 vs. 80 kgN.an⁻¹). Cependant, en 1960, 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 et du ratio observé sur les autres années entre vaches nourrices et vaches laitière pour le même département afin de pouvoir prendre en compte les différences d'excrétion.

Certaines chroniques peuvent présenter des données manquantes. Cela peut être dû à plusieurs raisons :

- présentation des données sous forme de "top 20", format sous lequel les productions sont renseignées de façon départementale pour les 20 départements les plus productifs. Le reste de la production nationale est regroupée dans un item "Autres départements".
- des productions très peu importantes
- la présence de données régionales

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 la période de 5 ans complète la plus proche de l'année à compléter. Par exemple, le nombre de tête de canard n'est disponible qu'à l'échelle régionale pour les années 2005 à 2010. Pour chaque département, le nombre de canard départemental entre 2005 et 2010 sera reconstitué à partir du rapport moyen du nombre canard départemental et du nombre de canard régional sur les 5 années les plus proches et du nombre de canard régional (Annexe 2).

A la suite de ces différentes méthodes de complétion, les chroniques de production, de surface ou de cheptel seront complétées suivant différentes méthodes en fonction l'année concernée par l'absence de données. Si la donnée manquante se trouve en début de chronique, alors la chronique est complétée par la première valeur connue. De la même façon si la donnée manquante se trouve en fin de chronique alors la série de donnée est complétée par la dernière valeur connue. Enfin, si la valeur manquante se trouve au sein même de la chronique, la chronique est complétée par les valeurs issues d'une régression linéaire entre les deux valeurs connues les plus proches des valeurs manquantes (Annexe 3).

- Homogénéisation des catégories d'engrais

Les catégories des données d'engrais présentent également une variation au cours de la période d'étude. Douze types d'engrais azoté minéraux sont listés sur l'ensemble de la chronique (Tableau 6).

Tableau 6 : Engrais azotés minéraux listés dans les volumes de la SAA sur la période 1960-2015

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

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

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

Les engrais minéraux sont en partie volatilisés lors de leur épandage et le taux de volatilisation dépend du type d'engrais utilisé. Par exemple, il est considéré qu'en moyenne 2% de la quantité d'azote contenue dans l'ammonitrate est perdue vers l'atmosphère alors que 8% des engrais azotés simples sous forme 'solution' est perdue vers l'atmosphère EMEP-Corinair cité dans CORPEN, 2006).

Afin de pouvoir appliquer les coefficients de volatilisation adaptés à chaque type d'engrais, la chronique d'engrais final doit informer sur les quantités d'azote des différents types d'engrais utilisés. Selon les périodes, les livraisons d'engrais sont renseignées en quantité d'azote sans le détail de la livraison par type d'engrais simple (1960 à 1971) ou avec ce détail (1972 à 2015) (Annexe 1). Lorsque le détail des engrais simples n'est pas fourni, les quantités d'azote livrées par catégories d'engrais (Ammonitrates, Solution, Urée, Autres) doivent être reconstituées car la quantité d'azote par type d'engrais simple est indispensable au calcul de la volatilisation. Les quantités d'azote livrées par type d'engrais simples sont reconstituées d'après le ratio des quantités d'engrais simple par types sur les 5 années de données disponibles les plus proches (1972 à 1976) et le total des engrais simples livré au département (Annexe 4). Environ 12% des valeurs de livraison d'engrais ont été reconstituées.

- Calcul de la SAU (Surface Agricole Utile)

La donnée de la SAU n'apparaît dans les volumes de la SAA qu'à partir de l'année 1965. Pour les années précédentes (1960 à 1965), la donnée a été reconstituée à partir des données d'utilisation du territoire disponibles (Annexe 1). La SAU est calculée comme étant la somme des surfaces des terres arables, des surfaces toujours en herbe, des surfaces maraichères, des surfaces en vigne et des surfaces fruitières.

- Modifications des limites départementales

Entre 1960 et 2010, certaines limites administratives ont évolué. La région parisienne a subi une profonde mutation.

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 (Annexe 5).

Ce redécoupage ne suit pas exactement les limites des départements précités mais en l'absence de renseignements permettant d'améliorer la spatialisation, 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.

III . 1 . b . Les dépôts atmosphériques

Les données de dépôts atmosphériques utilisées proviennent dans la base de données EMEP (http://www.emep.int/mscw/index_mscw.html) qui renseigne des valeurs de dépôts atmosphériques azoté secs et humides sur des surfaces de 50*50 km pour les années 1980, 1985, 1993, 2000, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 et 2010.

L'incertitude liée aux données d'entrée (données agricoles et dépôts atmosphérique) a été estimée à $\pm 5\%$ (Oenema et al., 2003).

III . 2 . Les paramètres du modèle

La littérature offre un panel de valeur pour un même paramètre ce qui traduit l'incertitude sur ce paramètre. Si on considère chaque paramètre comme une variable statistique de distribution normale, l'écart type mesure la dispersion qui peut caractériser une variable et sera donc retenu comme descripteur de l'incertitude. La valeur moyenne de ce paramètre qui est la valeur la plus probable pour ce paramètre sera appelée "valeur de référence" par la suite.

III . 2 . a . Export d'azote : Teneur en azote des différentes productions

Dans le cas où un document de synthèse français fourni la valeur moyenne et/ou l'écart type d'un paramètre, ces valeurs seront respectivement utilisées comme "valeurs de références" et descripteur de l'incertitude. Par exemple, la teneur en azote d'un blé tendre en France est de 1.8 (valeur de référence)

± 0.13 (incertitude sur la valeur) $\text{kgN}\cdot\text{q}^{-1}$ (COMIFER, 2013), la teneur moyenne en azote des abricots (valeur de référence) est $0.14 \text{ kgN}\cdot\text{q}^{-1}$ (ANSES).

Si l'écart type n'est pas donné par les documents de références, alors un intervalle de valeur possible est 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) $\text{kgN}\cdot\text{q}^{-1}$ (Bouwman et al., 2009; EEA, 2001). Dans le cas où la valeur minimum et/ou maximum est manquante, elle sera estimée à $\pm 20\%$ de la valeur de référence (Oenema et al., 2003).

Un écart type (σ) est alors calculé à partir de ces valeurs minimum et maximum (Eq. 6).

$$\sigma = [\text{Maximum (valeur de référence - valeur minimum, valeur maximum - valeur de référence)}]/3 \quad (6)$$

Tableau 7 : Teneur en azote des différentes productions

*Les teneurs en azote minimum et maximum 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., 2011, (10) Feedipedia (consulté le 25/11/14), (15) INRA, 2007. Les valeurs minimum et maximum soulignées sont calculées telles que $0.8 * \text{valeur de référence}$ (Valeur minimum), $1.2 * \text{valeur de référence}$ (Valeur maximum).*

Les incertitudes sur les paramètres sont définies par les écart-types affectées à 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 $\text{Max} ((\text{Valeur de référence} - \text{Valeur minimum})/3, (\text{Valeur maximum} - \text{Valeur de référence})/3)$.

Les valeurs sont données en $\text{kgN}\cdot\text{quintal}^{-1}$.

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 (Vesces)	<u>2.7</u>	3.4	0.5	4.9	(9)(15)
Prairies temporaires	<u>2.25</u>	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>	0.33	<u>0.09</u>	0.4	(1)
Choux à choucroute (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.26</u>	0.33	<u>0.02</u>	0.4	(1)
Autres choux (moyenne des choux rouges, verts et blancs)	<u>0.18</u>	0.23	<u>0.06</u>	0.4	(1)
Endives	<u>0.13</u>	0.16	<u>0.08</u>	0.4	(1)
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>	0.26	<u>0.05</u>	0.4	(1)
Mâche	0.4	0.45	<u>0.03</u>	<u>0.54</u>	(1)(2)
Autres salades (salade verte)	<u>0.09</u>	0.11	<u>0.10</u>	0.4	(1)
Bettes	<u>0.26</u>	0.33	<u>0.02</u>	0.4	(1)
Cardons	<u>0.08</u>	0.1	<u>0.10</u>	0.4	(1)
Fenouils	<u>0.14</u>	0.18	<u>0.07</u>	0.4	(1)
Rhubarbes (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.26</u>	0.33	<u>0.09</u>	0.4	(1)
Pissenlit	0.4	0.46	<u>0.03</u>	<u>0.55</u>	(1)
Persil	0.4	0.48	<u>0.03</u>	<u>0.58</u>	(1)
Cerfeuil	0.4	0.53	<u>0.04</u>	<u>0.63</u>	(1)
Estragon	0.4	0.47	<u>0.03</u>	<u>0.56</u>	(1)
Thym	0.4	0.97	<u>0.19</u>	<u>1.17</u>	(1)
Maïs frais	0.4	0.51	<u>0.04</u>	<u>0.61</u>	(1)
Champignons	0.4	0.49	<u>0.03</u>	<u>0.59</u>	(1)
Fraises	<u>0.1</u>	0.12	<u>0.09</u>	0.4	(1)
Aubergines	<u>0.11</u>	0.13	<u>0.09</u>	0.4	(1)
Concombres	<u>0.08</u>	0.1	<u>0.10</u>	0.4	(1)
Cornichons (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.1</u>	0.12	<u>0.09</u>	0.4	(1)
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>	0.09	<u>0.10</u>	0.4	(1)
Poivrons (Poivrons spp.)	<u>0.12</u>	0.14	<u>0.09</u>	0.4	(1)
Piments	<u>0.26</u>	0.33	<u>0.02</u>	0.4	(1)
Citrouilles	<u>0.09</u>	0.11	<u>0.10</u>	0.4	(1)
Tomates	<u>0.12</u>	0.15	<u>0.09</u>	0.4	(1)
Ail	0.4	1.26	<u>0.29</u>	<u>1.52</u>	(1)
Betteraves maraichères	<u>0.29</u>	0.37	<u>0.02</u>	0.4	(1)
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>	0.15	<u>0.08</u>	0.4	(1)
Oignons	<u>0.16</u>	0.2	<u>0.07</u>	0.4	(1)

Radis	<u>0.1</u>	0.12	<u>0.09</u>	0.4	(1)
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)
Crosnes (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.1</u>	0.12	<u>0.09</u>	0.4	(1)
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)
Lentilles (moyenne lentille en conserve et cuites)	<u>0.91</u>	1.14	<u>0.89</u>	3.8	(1)
Pois cassés	<u>1.09</u>	1.36	<u>0.81</u>	3.8	(1)
Ers et pois (moyenne des légumes cuisinés)	<u>0.87</u>	1.09	<u>0.90</u>	3.8	(1)
Pois chiches	<u>1.13</u>	1.42	<u>0.79</u>	3.8	(1)
Fèves vertes	<u>0.65</u>	0.82	<u>0.99</u>	3.8	(1)
Féveroles (consommation humaine)	<u>0.87</u>	1.09	<u>0.90</u>	3.8	(1)
Fruits					
Abricots	0.05	0.14	<u>0.03</u>	<u>0.17</u>	(1)
Cerises	0.05	0.21	<u>0.05</u>	<u>0.25</u>	(1)
Pêches, nectarines et brugnons	0.05	0.51	<u>0.04</u>	<u>0.61</u>	(1)
Prunes	0.05	0.21	<u>0.02</u>	<u>0.25</u>	(1)
Olives	0.05	0.16	<u>0.04</u>	<u>0.19</u>	(1)
Poires	0.05	0.06	<u>0.004</u>	<u>0.07</u>	(1)
Pommes	0.05	0.05	<u>0.003</u>	<u>0.06</u>	(1)
Coings	0.05	0.06	<u>0.004</u>	<u>0.07</u>	(1)
Nêfles	0.05	0.11	<u>0.02</u>	<u>0.13</u>	(1)
Kakis	0.05	0.1	<u>0.02</u>	<u>0.12</u>	(1)
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)
Châtaigne	0.05	0.45	<u>0.13</u>	<u>0.54</u>	(1)
Noix	0.05	2.77	<u>0.91</u>	<u>3.32</u>	(1)
Noisettes	0.05	3.09	<u>1.01</u>	<u>3.71</u>	(1)
Kiwis	0.05	0.18	<u>0.04</u>	<u>0.21</u>	(1)
Myrtille	0.05	1.63	<u>0.03</u>	<u>1.96</u>	(1)
Framboise	0.05	0.22	<u>0.06</u>	<u>0.27</u>	(1)
Groseille	0.05	0.18	<u>0.04</u>	<u>0.21</u>	(1)
Avocats	0.05	0.29	<u>0.08</u>	<u>0.35</u>	(1)
Figues	0.05	0.21	<u>0.05</u>	<u>0.25</u>	(1)
Angélique (moyenne tous fruits)	0.05	0.11	<u>0.02</u>	<u>0.13</u>	(1)
Oranges	0.05	0.15	<u>0.03</u>	<u>0.18</u>	(1)
Pamplemousse	0.05	0.13	<u>0.03</u>	<u>0.15</u>	(1)
Citrons	0.05	0.13	<u>0.03</u>	<u>0.15</u>	(1)
Cédrats	0.05	0.13	<u>0.03</u>	<u>0.15</u>	(1)
Autres agrumes	0.05	0.13	<u>0.03</u>	<u>0.16</u>	(1)

III . 2 . b . Fertilisation organique

III . 2 . b . i . Azote excrété par le bétail

De façon générale, les caractéristiques physiques, métaboliques et d'alimentation du bétail ont varié pendant le 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, or l'augmentation de la productivité laitière conduit à une hausse des rejets d'azote par le cheptel laitier (Delaby et al., 1995). Le cheptel porcin a vu son alimentation modifiée pour la recherche d'une excrétion azotée moins importante (Peyraud 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 65 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)(Tableau 8). Les différentes hypothèses sur les caractéristiques de l'animal et son alimentation permettent d'obtenir un intervalle de valeur d'excrétion possible. La valeur de référence est la moyenne des valeurs obtenues (Annexe 6). Les valeurs minimum et maximum d'excrétion permettront de calculer un écart type qui caractérise l'incertitude sur cette valeur selon l'équation n°6.

Les équins, les lapins et les catégories de volailles renferment des sous-catégories d'animaux divers. Par exemple, la catégorie 'pintade' regroupe les sous catégories pintades de label 'standard', 'label' ou 'bio' qui excrètent une quantité d'azote variable (JOFR, 2011). Les valeurs de référence d'excrétion ont été estimées comme la moyenne des valeurs relevées pour les sous-catégories, les valeurs minimum et maximum d'excrétion sont les minimum et maximum des valeurs relevées pour les sous catégories.

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 8 : Excrétion azotée pour les différentes catégories de bétail

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) Circulaire DERF/SDAGER/C2002-3013, (5) JOFR, 2011, (6) Corpen, 2006, (7) Corpen, 2003.

Catégorie de bétail	Excrétion azotée (kgN/an)			Source	Hypothèses de calcul
	Moyenne	Min.	Max.		
Bovin					
Vaches laitières	109.7	72.4	153.7	(1)	Rendement laitier (4000 - 10000kg/an)* ; 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%
+ 2ans 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)	Originie 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)	Poids de l'animal 400 \pm 20% ; alimentation (herbe conservée : foin et ensilage d'herbe, herbe fraîche, ensilage de maïs)
	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% and 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 an	5.7	4.3	7.1	(3)	
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	(5)	
Volaille						
	Ensemble des gallus	0.14	0.02	0.3	(6)	
	Canard	0.19	0.11	0.3	(6)	
	Dindon	0.31	0.14	0.57	(6)	
	Oie	0.42	0.18	0.67	(6)	
	Pintade	0.15	0.09	0.26	(6)	
	Caille	0.0255	0.025	0.026	(6)	
	Pigeon	0.83	0.67	0.99	(6)	
Porcin						
	Jeunes après sevrage (20 - 50 kg)	0.59	0.56	0.62	(7)	Alimentation (simple ou biphasé)
	Truie (plus de 50 kg)	22.5	20.4	24.6	(7)	Alimentation (simple ou biphasé)
	Verrat (plus de 50 kg)	4.2	3.8	4.6	(7)	Alimentation (simple ou biphasé)
	Animaux à l'engrais	4.2	3.8	4.6	(7)	Alimentation (simple ou biphasé)
Clapier						
	Adulte	3.3	1.9	4.6	(5)	
	Jeune	0.06	0.05	0.08	(5)	

* en deçà de 4000 kg de lait par an, l'excrétion azotée ne varie plus en fonction de la production laitière (comm.pers. UMR PEGASE)

III. 2. b. ii. Perte d'azote à partir des déjections du bétail

Les modifications des conditions d'élevage ont aussi modifié les pertes d'azote 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 possible (nature des déjections croisé au temps passé à l'extérieur) à été testé, permettant ainsi d'obtenir une valeur minimum, moyenne et maximum de perte d'azote en provenance des déjections vers l'atmosphère, pour les cheptels bovins, porcins et avicoles. Pour les autres catégories de cheptel, la valeur a été fixée à 30% de perte ($\pm 20\%$) (comm.pers. UMR PEGASE) (Tableau 9).

Tableau 9 : Perte d'azote vers l'atmosphère selon le type 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

III . 2 . c . Fertilisation minérale

Tableau 10 : 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).

IV. Calcul de l'imprécision sur les surplus départementaux

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité qui utilise souvent des coefficients dont la valeur est connue avec une précision limitée. En particulier, la variation de ces paramètres dans le temps et l'espace peut être due à des processus qui ne peuvent être pris en compte dans le modèle (Annan, 2001) (incertitudes stochastiques et aléatoires). La connaissance de ces incertitudes amène à interroger la fiabilité des résultats obtenus. La méthode des tirages de Monte Carlo est fréquemment utilisée pour estimer le degré de confiance que l'on peut attribuer aux résultats d'un modèle dont l'incertitude des données d'entrée et des paramètres a été évaluée. Cette méthode consiste à appliquer le modèle un nombre x de fois avec un jeu de données et paramètres tirés au hasard selon leur caractéristiques statistiques. Les x résultats obtenus permettront de caractériser la dispersion des résultats obtenus et ainsi d'associer un degré de confiance aux résultats : plus la dispersion est faible, plus le résultat est sûr.

Le modèle CASSIS_N a été construit de façon à associer une incertitude à chaque donnée d'entrée et à chaque paramètre du modèle (quantité de récolte, teneur en azote des cultures, quantité d'azote perdue dans l'atmosphère, fixation symbiotique, pourcentage de légumineuse dans les prairies, quantité d'azote atmosphérique déposé). Chaque donnée d'entrée ou paramètre du modèle peut alors être vu comme une variable aléatoire caractérisée par des descripteurs statistiques (moyenne ou valeur de référence et écart type ou incertitude) ainsi qu'une distribution statistique (distribution normale) et une procédure de tirage Monte Carlo a pu être appliquée. Le nombre de tirage a été fixé à 200. Le tableau 11 rappelle les incertitudes utilisées pour les tirages de Monte Carlo.

Tableau 11 : Incertitude affectée aux différents items du surplus

Type d'item	Items et unités	Poste et équation concernés	Variabilité attribuée
Données	Cultures récoltées (q)	Export d'N (Pdt dans éq. 5)	
	Nombre de tête du bétail (têtes)	F. Organique (Nb _i dans éq. 4)	
	Quantité de fertilisant minéral livrée par département (tonnes)	F. Minérale (F _i dans éq. 3)	
	Cultures récoltées (q)	Fixation symbiotique (Pdt _{cultures fixatrices} dans éq. 2)	*%5±
	Proportion de légumineuse dans la culture (%)	Fixation symbiotique (P _{légumineuse} dans éq. 2)	
	Déposition atmosphérique	Déposition atmosphérique (N _{air} dans éq. 1)	
	Volatilisation	F. Minérale (K _i dans éq. 3)	*%02±
	Perte d'azote vers l'atmosphère	F. Organique (C _i dans éq. 4)	Min et max littérature si non disponible±20%*
	Excrétion azotée du cheptel	F. Organique (E _i dans éq. 4)	
	Coefficient de fixation symbiotique	Fixation symbiotique (α, β NHI, BGN éq.2)	d'après Anglade et al., 2015
Flux d'N	Teneur en azote des cultures	Export d'N (N _{culture} dans éq. 5)	Min et max littérature si non disponible±20%*
	Teneur en azote des cultures fixatrices	Fixation symbiotique (N _{culture fixatrices} dans éq. 2)	

*(Oenema *et al.*, 2003)

La série des résultats obtenus, c'est à dire 200 surplus pour un an et pour un département, permet ainsi de caractériser une imprécision I pour chaque année et pour chaque département telle que

$$I = \text{Décile}_9 - \text{Décile}_1 \quad (7)$$

le décile₁ et décile₉ étant les 1^{er} et 9^{ème} décile de la série obtenue.

V. Limites

V . 1 . Comparaison avec le modèle NOPOLU

CASSIS_N est construit sur les principes de calcul de balance azotée de surface du sol et ressemble dans sa structure générale au modèle NOPOLU. Cependant, les modèles diffèrent sur les données d'entrée (en vert dans le Tableau 12) et sur des méthodes de calcul employées pour le calcul de 2 postes.

Les données d'entrée constituent la force du modèle CASSIS_N. Ces données, relativement homogènes (cf. II) et disponibles sur une période longue, permettent l'obtention de chroniques de pressions azotées agricoles à une échelle départementale sur presque plus d'un demi-siècle.

Tableau 12 : Comparaison méthodologique (méthode et des fournisseurs de données) avec NOPOLU

Postes	NOPOLU_2006	NOPOLU_2010	CASSIS_N
Surfaces (hors surfaces collectives)	RA2000 mise à jour avec SAA 2000 et 2006	RA2010 – extraction échelle cantonale	
Surfaces collectives	RA2000 – extrapolation à partir du nombre UGB utilisant des surfaces collectives	RA2010 – questionnaire surfaces collectives (prairies temporaires et permanentes) - extraction cantonale	SAA
Cheptels	RA2000 mise à jour avec SAA 2000 et 2006	RA2010 – extraction échelle cantonale	
Rendements	SAA 2005-2006-2007 (valeur moyenne)	SAA 2010	
Gestion des déjections (y compris pâturage)	BDD PMPOA - Institut de l'élevage – échelle régionale	RA2010 échelle cantonale	Intégrée aux incertitudes sur l'excrétion azotée du bétail et la perte d'azote vers l'atmosphère
Fertilisation minérale	Enquêtes PK 2006 et surfaces	Enquêtes PK 2011 et surfaces	Livraison d'engrais UNIFA
Coefficient de fixation symbiotique	100% N export	70% N export	I. Anglade et al., 2015
Déposition atmosphérique	EMEP 2005	EMEP 2010	moyenne EMEP
Incertitudes	x	x	Tirage de Monte Carlo
Transferts d'N entre départements	x	x	x
Evolution de l'excrétion azotée	x	x	Intégrée aux incertitudes sur l'excrétion azotée du bétail

CASSIS_N prend en compte les derniers développements méthodologiques sur le calcul de la fixation symbiotique (II . 1 . b .). En l'absence de données quantifiées sur l'ensemble de la période et à l'échelle départementale l'impact de la gestion des déjections du cheptel (pâturage ou stockage), de l'influence de l'alimentation, le format du bétail a été intégré dans les incertitudes.

V . 2 . Flux d'azotes non pris en compte dans le modèle

V . 2 . a . Importation et transfert d'alimentation animale

Une partie de l'élevage Français repose sur l'utilisation de tourteau d'oléo-protéagineux pour l'alimentation animale. Cependant, la France est incapable de répondre à la demande sur ces produits et a importé entre 4 et 5 millions de tonnes par an de tourteaux de soja entre 2000 et 2010 (FranceAgriMer, 2010). Ces importations représentent aussi un apport de matière sèche (87,8% MS pour le tourteau de soja⁴⁸, INRA, 2007) non comptabilisé dans le modèle. En effet, si cette matière sèche est apportée par les tourteaux de soja, elle va venir combler le besoin fourrager du bétail qui n'a plus besoin d'herbe à la hauteur de ce qui est calculé par le modèle. En conséquence, le surplus départemental pourrait être plus élevé que celui calculé par le modèle. Un manque de spatialisation sur les importations de tourteaux de soja (et autres nourritures de substitution) ne permet pas à l'heure actuelle de répondre à cette lacune.

V . 2 . b . Les fertilisations azotées

La concentration des activités agricoles en France depuis les années 60 a entraîné l'émergence de zones excédentaires en azote comme la Bretagne. Malgré le coût relativement élevé que peut représenter le transport de déchets organiques en provenance de l'élevage, l'exportation des déjections animales hors zone de production constitue apparemment une solution intéressante pour limiter l'excédent d'azote de ces secteurs. Cependant, cette pratique reste difficile à quantifier et aucune étude n'apporte de vision claire sur le sujet (Aubert and Levasseur, 2005).

Par manque de données, le modèle ne prend pas en compte :

- l'apport exogène d'azote (boues de STEP, eaux d'irrigation)
- les perméabilités géographiques et temporelles pour les données d'engrais minéral (stock et mouvement d'engrais minéral)
- les perméabilités géographiques de la fertilisation organique : mouvement des déjections du cheptel

VI. Exemple de résultats finaux

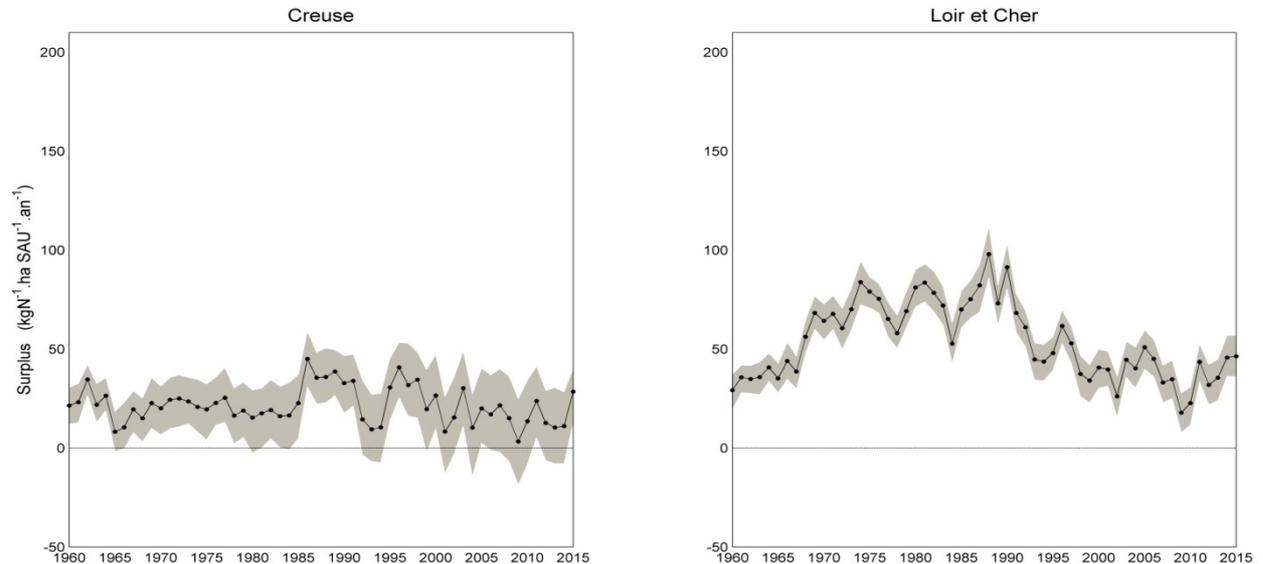


Figure 3 : Chroniques de surplus azoté et leur imprécisions annuelles (kgN/ha SAU/an) pour les départements de la Creuse et du Loir et Cher

n.b. : Les surplus présentés ici ont été calculés avec la méthode de calcul de la fixation symbiotique décrite par J. Anglade.

La méthode présentée ci-dessus permet l'obtention de chroniques de surplus azoté à un pas de temps annuel ainsi que les imprécisions associées à chaque valeur du surplus (Figure 3).

Les surplus azotés calculés peuvent être plus ou moins variable au sein d'un département. Ainsi l'étendue des valeurs prises par les surplus azotés en Loir et Cher (80 kgN/ha SAU/an) est deux fois plus importante que pour la Creuse est de 42 kgN/ha SAU/an.

En moyenne, les surplus calculés en Loir et Cher sont 2.5 fois plus importants que ceux calculés pour le département de la Creuse (54 vs. 22 kgN/ha SAU/an).

Les surplus calculés permettent d'observer des tendances temporelles. En Creuse, les surplus évoluent peu au cours du temps. En revanche, en Loir et Cher, les surplus augmentent sur une première période allant de 1960 à 1990 environ puis baissent jusqu'en 2010.

Les imprécisions présentent une étendue plus importante dans la Creuse (28 kgN/ha SAU/an) que dans le Loir et Cher (12 kgN/ha SAU/an).

VII. Références

- Agreste, 1960 à 2015, Statistique agricole annuelle
- Agreste, 2010. Recensement agricole 2010 (notice unité gros bétail).
- Agreste, 2010. Notice Recensement agricole 2010 sur les Unités Gros Bétail.
- 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. doi:10.1016/j.agee.2013.11.003
- 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.
- Annan, J.D., 2001. Modelling under uncertainty: Monte Carlo methods for temporally varying parameters. *Ecological Modelling* 136, 297–302. doi:10.1016/S0304-3800(00)00413-0
- ANSES, 2013. Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual.
- 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.
- ARVALIS, 2007. Colloque Cartopaille Picardie.
- 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.
- 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. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.08.015
- 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 Dreht, 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.
- 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. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.07.015
- Chevalassus-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 (No. 007942-01 (CGEDD); 11128 (CGAAER)).
- COMIFER, 2013. 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.
- 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.
- 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. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.011
- 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 No. 51).
- FranceAgriMer, 2010. Le marché des oléagineux.
- 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.
- Heathwaite, A.L., Johnes, P.J., Peters, N.E., 1996. Trends in nutrients. *Hydrological processes* 10, 263–293.
- 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.
- INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins: besoins des animaux, valeurs des aliments : tables Inra 2007. Editions Quae.
- Lalouette, V., Petit, K., Deronzier, G., Michon, J., 2015. Concentration en nitrates d'origine agricole dans les cours d'eau et les eaux souterraines (données 2011-2012). Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema).
- Leip, A., Britz, W., Weiss, F., de Vries, W., 2011. Farm, land, and soil nitrogen budgets for agriculture in Europe calculated with CAPRI. *Environmental Pollution* 159, 3243–3253. doi:10.1016/j.envpol.2011.01.040
- MAAF, MEDDE, OIEau, 2013. Evaluation environnementale du programme d'actions national relatif à l'application de la directive "nitrates" en France.
- Minardo, 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. doi:10.5194/bg-12-2549-2015
- 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. doi:10.1016/S1161-0301(03)00080-7
- 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.
- 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.
doi:10.1016/j.jmarsys.2013.05.005
- 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., Gaigné, C., Girard, A., Guillaume, F., Kuikman, P., Langlais, A., Le Goffe, P., Le Perchec, S., Lescoat, P., Morvan, T., Nicourt, C., Parnaudeau, V., Peyraud, 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.
- Pflimlin, A., Faverdin, P., Béranger, C., 2009. Un demi-siècle d'évolution de l'élevage bovin. Bilan et perspectives. *Fourrages* 429–464.
- 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.
- 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.
- 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.

Annexes
Annexe 1 : Catégories renseignées et méthodes d'homogénéisation

Année	Types de catégories			Top 20	Engrais Catégories renseignées et méthodes d'homogénéisation	Nombre de catégorie						Calcul SAU	
	Cultures dérobées	Cultures associées	Cultures maraîchères			Culture		Légume		Fruits			Cheptel
						Production	Surface	Production	Surface	Production	Surface		
1960				1		35	57	24	20	22	5	20	TA + STH + SM + vigne + SF + CFP
1961				1		104	99	93	80	32	6	29	TA + STH + SM + vigne + SF + CFP
1962				1		104	98	102	79	34	5	29	TA + STH + SM + vigne + SF + CFP
1963				1		100	96	99	84	33	5	31	TA + STH + SM + vigne + SF + CFP
1964				1		108	98	112	91	35	5	34	TA + STH + SM + vigne + SF + CFP
1965				1		106	98	109	95	35	5	34	x
1966				1		107	94	109	91	35	4	34	x
1967				1		83	77	102	94	40	4	34	x
1968				1		84	84	134	132	32	4	44	x
1969				1		102	88	152	149	32	4	44	x
1970				1		51 (+12)	47 (+3)	41 (+24)	2	40	4	13 (+32)	x
1971				1		83	84	80	68	20	4	42	x
1972				√		77	104	121	123	35	4	43	x
1973				√		101	115	59	160	34	3	44	x
1974				√		101	117	60	168	37	4	43	x
1975				√		96	94	59	164	37	61	44	x
1976				√		99	114	56	56	38	66	44	x
1977				√		102	119	56	57	36	67	44	x
1978				√		100	115	56	58	35	67	44	x
1979				√		98	122	56	58	34	61	44	x
1980				√		96	121	56	57	36	68	44	x
1981				√		54	55	28	0	44	55	42	x
1982				√		54	56	32	0	44	77	40	x
1983				√		53	52	28	0	44	80	41	x
1984				√		53	52	28	0	44	77	36	x
1985				√		53	52	31	0	44	77	38	x
1986				√		53	54	31	0	44	75	40	x
1987				√		54	54	31	0	44	74	40	x
1988				√		54	56	31	0	44	75	38	x
1989			F	√		56	67	34	34	38	74	36	x
1990				√		64	84	36	50	37	40	35	x
1991				√		63	79	35	50	37	40	35	x
1992				√		64	79	35	50	37	40	33	x
1993				√		64	79	35	50	37	40	33	x
1994				√		64	79	35	46	41	40	34	x
1995				√		63	79	35	50	41	40	34	x
1996				√		63	79	35	51	41	40	36	x
1997				√		63	79	35	51	41	40	36	x
1998				√		63	79	33	51	41	40	36	x
1999				√		63	79	35	51	41	40	36	x
2000				√		63	86	50	51	40	39	46	x
2001				√		58 (+3)	81 (+3)	50	51	40	39	46	x
2002				√		59 (+3)	81 (+3)	50	51	40	39	46	x
2003				√		58 (+3)	81 (+3)	50	51	40	39	46	x
2004				√		58 (+3)	81 (+3)	50	51	40	38	51	x
2005				√		55 (+3)	78 (+3)	50	47	40	39	35 (+10)	x
2006				√		58 (+3)	79 (+3)	50	47	40	39	35 (+10)	x
2007				√		55 (+3)	79 (+3)	50	46	40	37	35 (+10)	x
2008				√		55 (+3)	79 (+3)	50	46	38	39	35 (+10)	x
2009				√		55 (+3)	79 (+3)	50	47	40	39	35 (+10)	x
2010				√		55 (+3)	79 (+3)	50	47	40	39	35 (+10)	x

2011				√	56 (+3)	62 (+3)	50	47	39	39	35 (+10)	x
2012				√	56 (+3)	62 (+3)	50	47	39	39	35 (+10)	x
2013				√	56 (+3)	62 (+3)	50	47	39	39	35 (+10)	x
2014				√	56 (+3)	62 (+3)	50	47	39	39	35 (+10)	x
2015				√	56 (+3)	62 (+3)	50	47	39	39	35 (+10)	x

Abréviations et notations utilisées dans le tableau

- Cultures dérobées

* seulement sur les cultures sarclées

- Top 20 :

¶ Le top 20 concerne les fruits uniquement

- Nombres de catégories

Les chiffres entre parenthèse sont des catégories renseignées à l'échelle régionale. Les valeurs ont été réparties au niveau départemental suivant la méthode présentée à la partie III . 1 . a . ii .

- Catégories d'engrais:

¶ Il n'y a pas de détail de livraison pour les engrais simples. Le total des engrais simples, des engrais composés et de la livraison total d'engrais est donné en quantité d'azote.

- Calcul de la SAU:

TA : terres arables (terres labourables)

STH : surface toujours en herbe (prairies permanentes)

SM : surface maraichère

SF : surface fruitière en plein

CFP : autres cultures fruitières permanentes (Oliveraies, Noyeraies, Châtaigneraies)

Annexe 2 : Méthode de reconstitution d'une donnée départementale à partir de données régionales

En 1970 et entre 2005 et 2010, des catégories de productions, de surfaces et de cheptel sont données à l'échelle régionale. Leur nombre est consigné dans le tableau suivant.

Nombres de catégories fournies à l'échelle régionales par la SAA

Type de données	Année	1970	2005 à 2010
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)

Afin d'obtenir des chiffres départementaux, les valeurs régionales ont été réparties sur les différents départements suivant le ratio moyen des valeurs départementales sur régionales.

Par exemple, 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 reconstituée 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 3 : Exemples de complétion de données

- **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 représentées.

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 le 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

La même genre de méthode a été employée 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)	<i>Génisses laitières</i>	13000	0.41	13000	13000
	<i>Génisses nourrices</i>	3000	0.24	3000	3000
	<i>Mâle type 'viande'</i>	X	0.03	7531	11575
	<i>Mâle type 'lait'</i>	X	0.1	1001	1538
	<i>Génisses de boucherie</i>	X	0.22	3374	5186
	<i>Autres</i>	183000		11906	183000
	<i>Total</i>	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 :

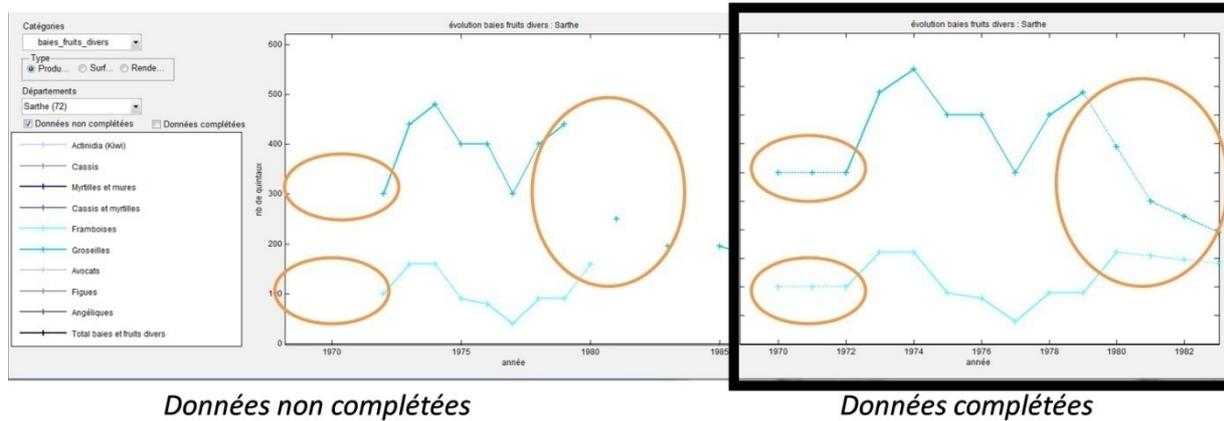
- T le total,
- X_0, X_1, \dots, X_{n-1} les valeurs déjà connues,
- $Y_n, Y_{n+1}, \dots, Y_{m-1}$ les valeurs à calculer,
- $R_n, R_{n+1}, \dots, R_{m-1}$ les ratios des valeurs à calculer.

Le facteur correctif (entre parenthèse) permet que la somme de toutes les catégories calculée fasse bien la somme T indiquée dans les annuaires.

○ **Données manquantes en début de chronique et au sein de la chronique**

La situation ci-dessous présente la production des petits fruits en Sarthe à l'époque où la chronique n'était renseignée qu'à partir de 1970. Sur cet exemple, il manque les données de production de framboise et groseille pour 1970 et 1971 (début de la chronique) et 1980 (entre autre) pour la groseille.

Les données manquantes de début de chronique sont complétées avec la première valeur connue, les valeurs manquantes en milieu de chroniques sont complétées par interpolation linéaire entre les valeurs connues.



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 dans les annuaires de production.

Annexe 4 : Méthode de reconstitution de la quantité d'azoté livré par type d'engrais à partir du total des engrais simple (1960 - 1971)

La quantité d'engrais par type est nécessaire dans le calcul de la volatilisation. Pour les années 1960 à 1971, seul la quantité totale des engrais simple est disponible.

Données de livraison d'engrais simple (SAA)

Type	1971
Ammonitrates	
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
Ammonitrates	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
Ammonitrates		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 5 : Evolution territoriale de la région Parisienne en 1968

(source : <https://fr.wikipedia.org/>)



Annexe 6 : Exemples de l'estimation de l'excrétion du bétail : cas des vaches laitières

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

Excrétion mensuelle azotée en fonction du rendement laitier

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

*niveau de base, données issues de CORPEN, 1999

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

La valeur calculée pour l'excrétion azotée mensuelle pour une vache nourrie par du maïs ensilage qui produit 4000 kg de lait voit son excrétion baisser de 5% par tranche de 1000 kg de lait en moins par rapport à 6000 kg lait ($6.7 * (0.05*2) = 6.03$).

Afin de représenter la diversité des régimes alimentaires proposés aux vaches laitières depuis 1960, des hypothèses de rations simplifiées ont été retenues (SOEs, 2013). Par exemple, la ration dont le chiffre est représenté en gras et souligné dans le tableau ci dessous est caractérisé par 25% d'herbe conservée (Ensilage, foin, ou autres fourrages conservés à base d'herbe), 50% de maïs fourrage et 25% d'herbe pâturée.

Hypothèses des rations simplifiées (pourcentage de la ration)

maïs	herbe conservée				
	0	25	50	75	100
0		75	50	25	0
25	75		50	25	0
50	50	25		50	0
75	25	0			75
100	0				

herbe pâturée

L'excrétion d'une vache laitière ayant un rendement laitier de 4000kg lait par an ayant le régime alimentaire précédemment décrit sera calculée comme suit :

Excrétion = Excrétion annuelle sous régime maïs ensilage $[6.03 \cdot 12]$ * pourcentage de maïs ensilage dans la ration $[50/100]$ + Excrétion annuelle sous régime Herbe conservée $[8.19 \cdot 12]$ * pourcentage de d'herbe conservée $[25/100]$ + Excrétion annuelle sous régime Herbe fraîche $[10.08 \cdot 12]$ * pourcentage d'herbe fraîche dans la ration $[25/100]$ = 91 kgN/an (en gras dans le tableau ci après)

L'excrétion annuelle est calculée pour les différents rendements laitiers et les différentes rations simplifiées.

vaches laitières 4000kg/an						
		herbe conservée				
maïs		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				
herbe pâturée						
vaches laitières 6000kg/an						
		herbe conservée				
maïs		0	25	50	75	100
	0		128	122	116	109
	25	121	115	108	102	
	50	107	101	95		
	75	94	88			
	100	80				
herbe pâturée						
vaches laitières 1000kg/an						
		herbe conservée				
maïs		0	25	50	75	100
	0		154	146	139	131
	25	145	138	130	122	
	50	129	121	114		
	75	113	105			
	100	96				
herbe pâturée						

La valeur moyenne de l'excrétion est de 110 kgN/an, la valeur minimum d'excrétion est 72 kgN/an, la valeur maximum 154 kgN/an.