

Faculté des bioingénieurs

Ouvrir un débat sur la valorisation des systèmes d'intégration culture-élevage comme leviers pour une gestion durable des flux d'azote en Région wallonne

Auteurs	Estelle Compere Leroy Marie-Aline Cornu
Promoteur	Prof. Philippe Baret (UCL/ELI/ELIA)
Lecteurs	Prof. Pierre Bertin (UCL/ELI/ELIA) Prof. Richard Lambert (UCL/ELI/ELIA)
Année Académique	2020 - 2021

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur en Sciences et technologies de l'environnement

Avant propos

Le choix d'une écriture inclusive particulière

En entamant la rédaction de ce mémoire, nous avons le souhait que nos mots puissent représenter un *système* de la façon la plus juste possible. Au-delà des aspects techniques abordés tout au long de ce travail, ce mémoire évoque aussi les *personnes* qui font partie de ce système. Ces personnes sont les agriculteurs, éleveurs, cultivateurs, experts, consommateurs et autres acteurs que l'on évoquera dans les pages de ce travail. Derrière ces mots, une représentation mentale : des hommes. Pour nous, cette représentation induite par l'utilisation unique du masculin biaise la vision que se fait le lecteur, en y excluant les femmes. Pourtant, elles font fonctionner le système au même titre que les hommes. En Région wallonne, 15% des exploitants agricoles sont des femmes et les conjointes d'exploitants qui travaillent à temps plein comme agricultrices sont encore plus nombreuses. Dans le cadre de ce mémoire, des experts, mais également des expertes ont été rencontrés. Les acteurs du monde agricole et des flux d'azote présentés dans ce mémoire sont féminins, autant que masculins.

Pour donner à ces femmes la visibilité qu'elles méritent, mais aussi pour aider le lecteur à les inclure dans ses représentations mentales, l'écriture de ce mémoire alternera le féminin et le masculin. Ainsi, un chapitre sur deux sera écrit au féminin.

Ce choix bouleverse probablement quelque peu les habitudes narratives employées au sein de la faculté, mais nous espérons que cela sera perçu comme une initiative positive pour affirmer la place des femmes, de plus en plus nombreuses à la Croix du Sud, dans le beau monde des bioingénieurs.

Remerciements

Nous tenons à remercier très chaleureusement,

Notre promoteur, le professeur Philippe Baret qui nous a guidé et écouté tout au long de l'année dans cette ascension que fut la réalisation du mémoire. Cherchant des pistes à explorer dans ce vaste sujet que sont les flux d'azote, il nous a chaque fois redirigées afin qu'ensemble, nous trouvions le bon chemin. Son approche imagée optimiste et son engouement pour le sujet nous ont poussé à donner le meilleur de nous-mêmes pour atteindre les objectifs définis en début d'année. Il nous a aussi transmis sa vision systémique et non-normative de façon à délivrer un message clair qui, on l'espère, aura une incidence en dehors du cadre purement académique.

Océane Duluins, qui nous a rejoint en cours de route pour accompagner la réalisation de notre travail. Ses conseils furent précieux et nous avons beaucoup appris sur le bon déroulement d'un projet et la façon de communiquer clairement. Finalement, sa vision pointilleuse a contribué à faire de ce mémoire un travail bien peaufiné.

Nos lecteurs, les professeurs P. Bertin et R. Lambert, qui ont accepté de donner du temps pour lire et évaluer ce travail.

Les dix-sept experts et expertes des flux d'azote sans qui la finition de l'outil COCOON et la réalisation de scénarios n'auraient pu se faire. Ils et elles se sont rendus disponibles pour contribuer à notre travail et leurs remarques passionnantes furent sources de longues réflexions.

Arnaud, Laura-Maria, Xavier, Lara, Anne, Jean-François et Joachim qui ont relu une ou plusieurs parties du mémoire et dont les remarques pertinentes ont contribué de façon significative à son amélioration.

Arnaud, qui a contribué à l'amélioration de notre guide d'entretien en acceptant de réaliser avec nous un entretien "blanco" et en nous partageant ses remarques pertinentes.

La Team Envi, toujours présente pour écouter nos péripéties du mémoire, nous encourager et nous guider dans l'utilisation toujours plus poussée du programme Latex.

Notre famille, nos co-locataires, nos amis et amies, Xavier, et toutes les personnes qui de près ou de loin se sont montrées intéressées par le sujet et nous ont soutenues et motivées, surtout lors de la finalisation du travail.

Et finalement, nous remercions la Faculté des Bioingénieurs de permettre la réalisation de mémoires collégiaux. La complémentarité de nos compétences a créé une synergie nous donnant toutes les forces pour réaliser ce travail à hauteur de nos convictions.

Estelle Compere Leroy et Marie-Aline Cornu

Résumé

Les flux d'azote sont, à l'heure actuelle, source de questionnements et de débats parmi les acteurs des mondes agricole, scientifique, et politique. Le maintien de la fertilité, la mitigation des émissions de gaz à effet de serre et la diminution de risque de pollution de nos eaux sont autant d'enjeux que recouvre leur gestion. A ces questions s'ajoute celle, très actuelle, de la durabilité de l'élevage et de son importance au sein du système. Cet élevage, autrefois connecté aux cultures au sein des systèmes intégrés polyculture-élevage, joue dans le système un rôle encore majoritairement perçu comme essentiel pour la fertilité azotée.

Le premier objectif de ce mémoire est la quantification des flux d'azote en Région wallonne, afin de mettre en avant la présence d'éventuelles tensions au sein du système. Le second objectif est la mise en scène de perspectives d'évolution pour la durabilité des flux quantifiés. Ces perspectives sont présentées sous la forme de deux scénarios à l'horizon 2030. Le troisième et dernier objectif de cette étude est l'ouverture d'un dialogue inter-experts, afin de confronter les différentes opinions existant sur la durabilité des flux d'azote, et sur les scénarios imaginés.

L'outil COCOON, développé dans le cadre de cette étude, a permis de quantifier les flux d'offre et de demande en azote au sein du système agricole wallon et d'évaluer trois indicateurs : l'autonomie du système en azote organique, l'autonomie alimentaire du cheptel en azote digestible et l'efficacité de l'utilisation d'azote au sein du système. L'analyse de ces résultats a fait ressortir deux grandes tensions relatives à la gestion des flux d'azote : une tension quantitative, exprimée par une dépendance du système à l'azote synthétique, et une tension territoriale, exprimée par une séparation spatiale des flux d'offre et de demande en azote organique, en raison de l'éloignement géographique entre les régions d'élevage et de grandes cultures.

Deux scénarios ont été co-construits avec l'aide de 17 experts du monde agricole et des flux d'azote. Le premier met en scène une évolution de l'Agriculture Biologique (AB) qui atteint 30% de la Superficie Agricole Utile (SAU) wallonne en 2030. La mise en oeuvre du scénario a montré une diminution de la tension quantitative et une augmentation de la tension territoriale, dû à la transition vers l'AB de superficies importantes au sein des grandes cultures. Les trois indicateurs évalués ont augmenté suite à la mise en oeuvre du scénario.

Le second scénario met en scène une évolution du cheptel wallon permettant d'atteindre l'autonomie alimentaire du cheptel en azote digestible. Sa mise en oeuvre a montré une augmentation de la tension quantitative, dû à une importante diminution du cheptel bovin et un maintien de la tension territoriale. L'autonomie du cheptel est atteinte, tandis que l'autonomie en azote organique est diminuée. L'efficacité évolue faiblement.

Le dialogue ouvert avec les experts et l'analyse des résultats ont permis de mettre en avant deux perspectives, comme des leviers pour le dénouement de ces tensions : l'augmentation des superficies de légumineuses dans le système, et le renforcement de l'intégration entre les cultures et l'élevage coordonnés collectivement à l'échelle de la Région wallonne.

Table des matières

I	Etat de l'art	3
1	Problématique de l'azote	7
1.1	Problématique mondiale de l'azote	7
1.1.1	L'azote synthétique, entre avancées et problèmes environne- mentaux	7
1.1.2	Mesure scientifique de la problématique : les indicateurs relatifs à l'azote	7
1.1.3	Méthodologies pour avancer vers une future gestion de l'azote	9
1.2	Problématique européenne de l'azote	10
1.2.1	La Directive Nitrate pour la réglementation des nitrates d'ori- gine agricole	10
1.3	Problématique régionale belge de l'azote	10
1.3.1	Le Programme de Gestion Durable de l'Azote en Région wallonne	10
1.3.2	Le Mestdecreet en Région flamande	14
1.3.3	Transferts d'engrais de ferme entre la Flandre et la Wallonie .	15
1.4	Problématique multidimensionnelle de l'azote	16
2	Caractérisation de l'offre et de la demande en azote	17
2.1	Caractérisation des fermes en Wallonie	17
2.2	Caractérisation des cultures et prairies en Wallonie	18
2.2.1	La filière céréalière	18
2.2.2	La filière pommes de terre	18
2.2.3	Les prairies et les cultures fourragères	19
2.3	Caractérisation de l'élevage en Wallonie	19
2.3.1	La filière bovine wallonne	20
3	Les systèmes d'intégration culture-élevage en Europe	20
3.1	Concept de système d'intégration culture-élevage et typologies des échanges	21
3.1.1	Concept général	21
3.1.2	Typologie des niveaux de coordination entre fermes	22
3.2	Opportunités et freins à la mise en place du système	22
3.2.1	Dimension sociale	22
3.2.2	Dimension économique	24
3.2.3	Dimension environnementale	25
3.3	Bénéfices des systèmes d'intégration culture-élevage	26
3.3.1	Dimension sociale	27
3.3.2	Dimension économique	28
3.3.3	Dimension environnementale	30
3.4	Renforcer l'intégration culture-élevage sur le territoire européen, l'exemple du projet CANTOGETHER	32

4	Thèmes de réflexion pour la gestion de l'azote	33
4.1	Concept de sobriété de l'azote	33
4.1.1	Introduction de légumineuses pour la réduction des besoins en azote	34
4.1.2	Pratiques agricoles favorisant la réduction des besoins en azote	34
4.1.3	L'intégration culture-élevage en toute sobriété	35
4.2	Concept de circularité de l'azote	35
II	Matériel et méthode	38
1	Méthodologie et objectifs de la modélisation	39
1.1	Conceptualisation du modèle	40
1.2	Elaboration du calculateur de flux	41
1.2.1	Offre en azote	42
1.2.2	Demande en azote	46
1.2.3	Indicateurs du système	50
2	Scénarisation des perspectives d'évolution	53
2.1	Méthodologie d'enquête	53
2.1.1	Personnes rencontrées	53
2.1.2	Mise en oeuvre des enquêtes	54
2.2	Points de départ des scénarios	54
2.2.1	Scénario 1 : Augmentation de la superficie cultivée en AB . .	54
2.2.2	Scénario 2 : Equilibre entre la taille du cheptel et le maintien des prairies et de l'offre en azote organique	55
III	Résultats	56
1	Limites de l'étude et incertitudes	56
1.1	Rappel du périmètre de l'étude	56
1.2	Ajustement du calculateur	56
1.3	Principales hypothèses utilisées et incertitudes relatives aux données . .	57
2	Les flux d'azote en Wallonie : cartographie et tensions	58
2.1	Quantification des flux d'azote en Wallonie	58
2.2	Validation des données obtenues	61
2.3	Indicateurs d'autonomie	63
2.3.1	Autonomie du système wallon	63
2.3.2	Autonomie alimentaire du cheptel	64
2.4	Indicateur d'efficience	64
3	Vers une gestion durable des flux d'azote en Wallonie : scénarisations à l'horizon 2030	66
3.1	Scénario 1 : 30% de la Superficie Agricole Utile cultivée en agriculture biologique	66
3.1.1	Choix du scénario	66
3.1.2	Mise en oeuvre	67

3.1.3	Quantification des flux d'azote	71
3.1.4	Indicateurs d'autonomie	72
3.1.5	Indicateur d'efficience	73
3.2	Scénario 2 : Quelle taille optimale du cheptel wallon pour garantir un maintien des prairies et de l'offre en azote organique ?	74
3.2.1	Choix du scénario	74
3.2.2	Mise en oeuvre	74
3.2.3	Quantification des flux d'azote	77
3.2.4	Indicateurs d'autonomie	79
3.2.5	Indicateur d'efficience	80
4	Vers une gestion durable des flux d'azote en Wallonie : l'ouverture d'un débat inter-experts	81
4.1	Scénario 1 : 30% de la Superficie Agricole Utile cultivée en agriculture biologique	81
4.1.1	La co-construction d'un scénario : comment évolue le système agricole wallon quand 30% de la SAU sont convertis en AB	81
4.1.2	La mise en oeuvre du scénario 1 : l'évolution des cultures et prairies wallonnes, 3 facteurs d'influence	81
4.1.3	Les conséquences du scénario 1 : la recherche d'engrais organiques comme moteur de reconfiguration du système agricole	83
4.2	Scénario 2 : taille optimale du cheptel wallon	84
4.2.1	La co-construction d'un objectif, comment déterminer la taille optimale du cheptel ?	84
4.2.2	La mise en oeuvre du scénario 2 : une double reconfiguration	84
4.2.3	Quelles conséquences pour le système ?	85
IV Discussion		87
1	Analyse critique de la méthodologie	87
1.1	Cheminement du mémoire	87
1.1.1	La richesse d'une méthodologie en trois temps	87
1.1.2	Perspectives d'amélioration des démarches suivies	87
1.2	L'outil COCOON	88
1.2.1	Validité et transférabilité	88
1.2.2	Perspectives	90
1.3	La création de scénarios	90
1.3.1	L'intérêt d'une approche tournée vers le futur	90
1.3.2	Regard critique	90
1.3.3	Perspectives	91
2	L'intégration culture-élevage comme levier d'une gestion durable des flux d'azote en Wallonie	91
2.1	Retour sur les scénarios : état des lieux des tensions territoriale et quantitative	92

2.1.1	Favoriser les systèmes d'intégration culture-élevage comme piste pour le dénouement de la tension territoriale	93
2.1.2	Les légumineuses intégrées aux systèmes culture-élevage et à l'AB; une piste pour le dénouement de la tension quantitative	94
2.1.3	Concept de circularité de l'azote : une meilleure valorisation des ressources	96
V	Annexes	101

Table des figures

1	Représentation historique des éléments relatifs à la problématique de l'azote (Compere et Cornu, 2020)	3
2	Représentation multiéchelle des éléments relatifs à la problématique de l'azote, (Compere et Cornu, 2020)	5
3	Evolution du Nsur comme fonction du revenu par habitant, (Zhang et al., 2015)	8
4	Evolution du NUE au cours du temps pour certains pays d'Europe, repris de Lassaletta et al. (2014)	9
5	Taux de liaison au sol des exploitations en Wallonie (Bellayachi et al., 2017) .	14
6	Représentation multidimensionnelle des éléments relatifs à la problématique de l'azote (Compere et Cornu, 2020)	16
7	Cheminement du mémoire en trois temps	38
8	Cycle agricole de l'azote	39
9	Flux d'azote entre l'offre et la demande du système agricole	40
10	Carte des acteurs	53
11	Caractérisation des flux d'azote au sein du système agricole wallon	59
12	Scénario 1 : Evolution des superficies cultivées en AB	67
13	Scénario 1 : Quantification de l'offre et de la demande en azote au sein du système agricole wallon - 30% de la SAU cultivée en AB à l'horizon 2030.	71
14	Scénario 2 : Evolution de la taille du cheptel (milliers UGB) et de la surface des prairies permanentes (ha)	75
15	Scénario 2 : Quantification de l'offre et de la demande en azote au sein du système agricole wallon - Équilibre entre cheptel, prairies et azote organique à l'horizon 2030	78
16	Situation 2019 : Caractérisation des flux à destination de la biomasse et des pertes	119
17	Scénario 1 : Evolution des superficies cultivées en AC	120
18	Scénario 1 : Caractérisation des flux à destination de la biomasse et des pertes	122
19	Scénario 2 : Caractérisation des flux à destination de la biomasse et des pertes	124

Liste des tableaux

1	Valeurs des compartiments présentés à la figure 11 (kT/an)	60
2	Comparaison des valeurs obtenues par le calculateur avec celles des modèles EPICgrid et MoSUT (kT/an)	62
3	Données utilisées pour le calcul de l'autonomie du système	63
4	Données utilisées pour le calcul de l'autonomie alimentaire du cheptel	64
5	Données utilisées pour le calcul de l'efficacité du système	65
6	Éléments de résultats exprimés par les experts sur le scénario 1 : 30% de la SAU en AB	69
7	Évolution de la part des cultures en AB, du cheptel et des indicateurs entre la situation 2019 et la situation 2030, selon le scénario 1.	70
8	Scénario 1 : Valeurs des compartiments présentés à la figure 13	72
9	Scénario 1 : Données utilisées pour le calcul de l'autonomie du système	73
10	Scénario 1 : Données utilisées pour le calcul de l'autonomie alimentaire du cheptel	73
11	Éléments de résultats exprimés par les experts sur le scénario 2 : Equilibre entre l'évolution de l'élevage, le maintien des prairies et l'offre en azote organique	76
12	Évolution de la part des cultures en AB, du cheptel et des indicateurs entre la situation 2019 et la situation 2030, selon le scénario 2.	77
13	Scénario 2 : Valeurs des compartiments présentés à la figure 15 (kT/an)	79
14	Scénario 2 : Données utilisées pour le calcul de l'autonomie du système	80
15	Scénario 2 : Données utilisées pour le calcul de l'autonomie alimentaire du cheptel	80
16	Comparaison qualitative de modèles wallons sur l'étude des flux d'azote	89
17	Méthodes d'inclusion des légumineuses et leur effet sur les flux d'azote	94
18	Typologie des échanges dans les systèmes d'intégration culture-élevage, adapté de (Moraine et al., 2016)	102
19	Description des objets mathématiques relatifs aux paramètres des engrais de ferme	106
20	Description des objets mathématiques relatifs aux convertisseurs des engrais de ferme	106
21	Description des objets mathématiques obtenus par le calculateur pour les engrais de ferme	106
22	Description des objets mathématiques utilisés et obtenus dans le calculateur pour les superficies	106
23	Description des objets mathématiques relatifs aux convertisseurs pour les besoins en azote des cultures et leur demande de fertilisation en azote	106
24	Description des objets mathématiques intermédiaires obtenus par le calculateur pour la demande en azote	107
25	Canevas des enquêtes sur les scénarios	110
26	Intervalles de valeurs des compartiments présentés à la figure 11 (kT/an)	118
27	Intervalles de valeurs des compartiments présentés à la figure 13 (kT/an)	121

28	Intervalles de valeurs des compartiments présentés à la figure 15 (kT/an) . . .	123
29	Synthèse de mise en oeuvre des deux scénarios	125

Nomenclature

AB	Agriculture Biologique
AC	Agriculture Conventiennelle
ACISEE	Attestation de conformité des infrastructures de stockage des effluents d'élevage
ACV	Analyse de Cycle de Vie
AFSCA	Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire
APL	Azote potentiellement lessivable
CH ₄	Méthane
DPS	Direction de la Protection des sols
DQ	Démarche qualité
FAO	Food and Agriculture Organisation
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat
kT	Kilotonne = 10 ³ tonnes
LS	Taux de liaison au sol des exploitations agricoles
MAEC	Mesures Agro-Environnementales et Climatiques
MAP	Mest Actie Plan
MWh	Mégawatt-heures
N ₂ O	Protoxyde d'azote
Nda	Azote dérivé de l'air
NH ₄ ⁺	Ammonium
NO ₃ ⁻	Nitrate
Norg	Azote organique
Nsur	Nitrogen Surplus
NUE	Nitrogen Use Efficiency
ONU	Organisation de Nations Unies
PAC	Politique Agricole Commune
PGDA	Programme de Gestion Durable de l'Azote en Région wallonne
ROI	Return On Investment ou Retour sur investissement

SAU	Surface Agricole Utile
SDG	Sustainable Development Goals
SPW	Service Public de Wallonie
SSPs	Shared Socioeconomic Pathways
Tg	Teragramme = 10^{12} g
UE	Union Européenne
UGB	Unité Gros Bétail
ZV	Zones Vulnérables

Introduction

L'agriculture nourrit l'humanité depuis plus de 10 000 ans, à l'époque où la première révolution agricole de l'histoire de l'humanité transforma des humaines chasseuses-cueilleuses en agricultrices (Harari, 2014). Cette agriculture qui nous nourrit est, depuis les années 1990, au coeur des débats environnementaux (Yunlong and Smit, 1994). La durabilité - ou le manque de durabilité - de certaines pratiques reste un sujet d'actualité fréquemment remis sur le tapis des discussions publiques. Ces enjeux amènent les actrices, tant politiques que scientifiques, à proposer des solutions et des initiatives à mettre en oeuvre pour rendre le système plus *"durable"*.

L'une de ces initiatives a été lancée par la Région wallonne en 2017, et s'intitulait "40 jours sans viande". Les initiatrices de la campagne souhaitaient ainsi alerter les consommatrices sur les dangers environnementaux que représentait la consommation de viande, et encourager à sa diminution (Le Sillon Belge, 2017). Au sein du monde agricole, l'initiative a pourtant été vivement critiquée. Parmi les arguments avancés par les défenseuses de l'élevage, revenaient l'importance des prairies pâturées, tant pour le climat que pour la biodiversité, mais également l'importance de l'élevage pour le maintien de la fertilité organique. Sans nos bovins, l'agriculture dépend des engrais azotés de synthèse, dont la fabrication est coûteuse en énergie et émettrice d'importantes quantités de dioxyde de carbone (CO₂). Ces émissions sont une préoccupation mondiale désormais bien connue du grand public, et les enjeux derrière sa diminution sont multiples (Masson-Delmotte et al., 2018).

L'utilisation de ces engrais synthétiques n'est pas la seule question actuelle relative à l'azote. La protection des eaux souterraines et de surface contre les pollutions dues aux nitrates est une préoccupation de l'Union Européenne depuis les années 90 (Conseil des Communautés Européennes, 1991), et les états membres travaillent activement à leur mitigation sur leurs territoires, notamment par le biais de réglementations visant l'agriculture, considérée, encore une fois, comme une des principales responsables de ce risque.

Les flux d'azote sont donc, à l'heure actuelle, source de questionnements et de débats parmi les acteurs des mondes agricole, scientifique, et politique. Le maintien de la fertilité, la mitigation des émissions de gaz à effet de serre (GES), et la diminution du risque de pollution de nos eaux sont autant d'enjeux dissimulés derrière la gestion de ces flux.

La question de l'élevage et de son rôle dans la durabilité de ces flux a été l'un des éléments initiateurs des réflexions à la base de ce mémoire. Cette problématique, qui suscite des polémiques de plus en plus nombreuses tant au sein du monde agricole que dans les sphères de consommateurs, a éveillé chez nous une volonté de s'attaquer de façon systémique à la question, afin de mieux comprendre les enjeux actuels liés à l'élevage et à l'azote, et d'apporter des réponses concrètes à des questions actuelles. Pour aborder la question, il semblait

incontournable d'étudier également les systèmes d'intégration culture-élevage. Comprendre ces systèmes profondément modifiés depuis la révolution agricole du XIX^{me} siècle, et les adapter au contexte actuel, semblait être une approche pertinente pour étudier les flux d'azote et leur durabilité.

En ce sens, trois objectifs se sont dessinés : quantifier les flux d'azote actuels en Région wallonne, imaginer et mettre en scène des perspectives pour le futur de ces flux, et ouvrir un dialogue inter-experts sur les pistes d'évolution envisagées.

Quatre parties rythment le cheminement vers l'accomplissement de ces objectifs. La première partie, une revue de littérature approfondie, a permis d'établir et de consolider de bonnes connaissances de la gestion de l'azote, du système agricole wallon, et des systèmes d'intégration culture-élevage (Partie I : Etat de l'Art). La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à l'explication de la méthodologie. Celle-ci vise à la fois à construire un outil capable de quantifier les flux d'azote en Wallonie, mais également à concevoir des scénarios à l'horizon 2030, et réaliser des entretiens auprès d'experts issus de différents horizons du monde agricole (Partie II : Matériel et méthodes). La troisième partie présente l'analyse des résultats obtenus (Partie III : Résultats), qui sont finalement discutés et mis en perspective dans la quatrième partie (Partie IV : Discussion).

I Etat de l'art

L'azote, une problématique multiple

L'azote est un élément essentiel à la vie, nécessaire à la croissance de tous les végétaux, et par conséquent indispensable à la pratique de l'agriculture. L'azote est l'un des intrants agricoles les plus importants ; abondant sous forme inerte dans l'air, le procédé de transformation employé pour le rendre assimilable par les plantes est consommateur d'une quantité élevée d'énergie. Son impact sur l'environnement est étudié tant à l'échelle mondiale qu'en Région wallonne. La problématique de l'azote est multiple, et les enjeux qui y sont relatifs varient selon la dimension abordée.

I. L'azote, une problématique historique

Depuis le XIX^{me} siècle, de nombreux changements ont eu lieu au sein des systèmes agraires rythmés par les révolutions industrielles marquant de profonds changements dans la société. Un siècle plus tard, les impacts de l'industrialisation de l'agriculture sur l'environnement ont commencé à être observés. De nombreuses recherches et réglementations ont dès lors été appliquées en regard de ce sujet. La figure 1 relate un bref historique de la problématique.

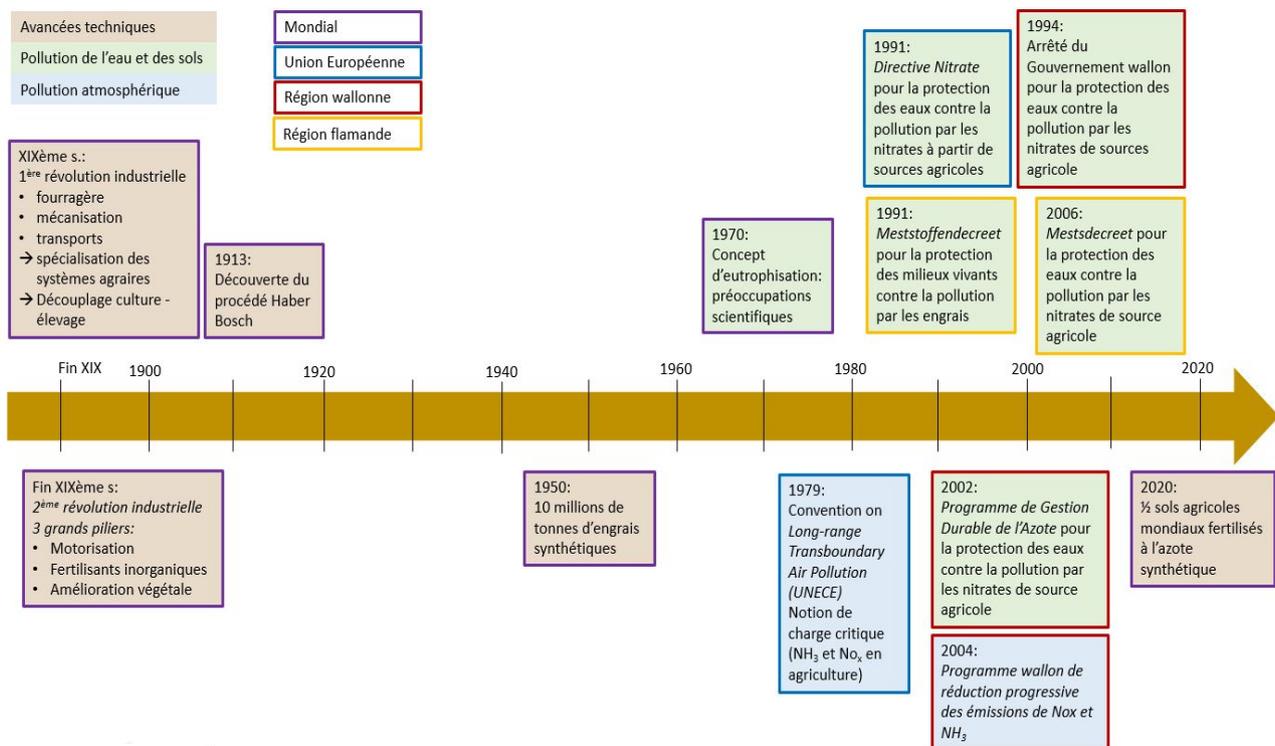


FIGURE 1 – Représentation historique des éléments relatifs à la problématique de l'azote (Compere et Cornu, 2020)

La première révolution industrielle se marque en agriculture par la révolution fourragère, la mécanisation et la révolution des transports (Le Noë et al., 2019; Mazoyer and Roudart, 2017). En effet, la diffusion d'un nouveau système agricole sans jachère mène à un système plus

intensif permettant de nourrir davantage les animaux. L'usage d'outils mécaniques augmente aussi l'intensification du travail et l'extensification des cultures, permettant de cultiver plus et plus vite. Enfin, la révolution des transports permet d'augmenter le réseau d'échanges de produits et favorise la spécialisation des exploitations dans l'activité qui leur est la plus rentable. Il en découle une simplification et une séparation des systèmes d'élevage et de culture. Le transport des engrais remplace maintenant les animaux qui assuraient autrefois la fertilité au sein des systèmes de cultures. La seconde révolution industrielle débute aux alentours de 1880 et est perçue en agriculture par l'apparition de l'électricité et du pétrole, des fertilisants inorganiques et de synthèse et de l'amélioration végétale. Elle permet une forte augmentation des rendements et simultanément, de la démographie. C'est à ce moment que l'azote devient vraiment un élément de grand intérêt, car il a un rôle décisif à jouer dans la rentabilité des exploitations. L'introduction d'azote inorganique en agriculture commence par l'importation en Europe des nitrates d'origine minérale et du guano provenant du Chili pour amender¹ les terres agricoles en Europe (Salomon, 2019). En 1913, la découverte du procédé Haber Bosch, qui permet de synthétiser l'ammoniac à partir de l'azote inerte dans l'atmosphère, amène de nouvelles perspectives dans le domaine de l'agriculture. Ce procédé s'industrialise et en 1950, environ 10 millions de tonnes d'engrais synthétiques sont déjà utilisées dans le monde en agriculture pour amender les cultures (Salomon, 2019). Ce phénomène s'est fortement démocratisé et, de nos jours, près de la moitié des sols agricoles mondiaux sont fertilisés à l'azote synthétique.

Dans les années 1960, la dégradation des grands lacs par excès de nutriments a commencé à faire l'objet de la recherche scientifique et s'est fortement accrue en 1970, s'étendant sur le concept d'eutrophisation dans différents écosystèmes lacustres (Gilles Pinay et al., 2017). Ce problème est issu d'un excès d'azote et de phosphore minéral dans les milieux aquatiques, principales conséquences de l'intensification de l'agriculture et l'urbanisation (Gilles Pinay et al., 2017). L'excès de nutriments mène à une forte augmentation de la productivité primaire et la biomasse ainsi produite limite la pénétration de la lumière dans l'eau. Certaines espèces aquatiques ne peuvent alors survivre et leur dégradation engendre un appauvrissement en oxygène du milieu qui ne peut plus accueillir les animaux marins (Gilles Pinay et al., 2017). A la suite de ces recherches, une directive pour la protection des milieux aquatiques contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles est instaurée en 1991 par l'Union Européenne. Simultanément, la science se penche sur la pollution atmosphérique par les oxydes d'azote et l'ammoniac, notamment issus des émissions des sols agricoles. En 1979, la convention "Long-range Transboundary Air Pollution" est signée au niveau européen pour contrôler cette pollution via l'instauration de la notion de charge critique en azote² (UNECE, 2018).

La Directive Nitrate de 1991 est légiférée au niveau des régions flamande (en 1991) et

1. L'amendement des cultures est le fait d'améliorer la fertilité par apport de substances riches en nutriments.

2. La charge critique en azote est la quantité d'azote que l'écosystème peut tolérer sans montrer de changement notable.

wallonne (en 1994) par des décrets et arrêtés gouvernementaux. En 2004, un programme wallon, le Programme Durable de Gestion de l'Azote (PGDA), est mis en place pour assurer l'intégration et le respect de ces règles dans le travail agricole. Le Mestdecreet arrive en 2006 et est l'équivalent du PGDA pour la Flandre.

C'est ainsi qu'aujourd'hui, en Wallonie, la troisième version du PGDA rythme la gestion de l'azote au sein et entre les différentes exploitations agricoles, majoritairement spécialisées dans les cultures ou l'élevage.

II. L'azote, une problématique multiéchelle

Les enjeux de l'azote relatifs à chaque échelle abordée dans ce travail sont représentés à la figure 2.



FIGURE 2 – Représentation multiéchelle des éléments relatifs à la problématique de l'azote, (Compere et Cornu, 2020)

L'azote agricole est utilisé et partiellement produit à l'échelle de la ferme. On le retrouve dans les fumiers et lisiers issus des effluents d'élevage, et il est nécessaire à la fertilisation des cultures lorsque le sol n'est pas assez riche en nutriments azotés. Ces élevages et ces cultures sont à l'origine de l'offre et de la demande en azote. A l'échelle de la ferme, la gestion est principalement régie par deux processus : le stockage et l'évacuation de l'azote excédentaire pour les élevages, et le besoin de fertilité azotée pour les cultures.

Cette séparation entre l'offre et la demande en azote met en évidence l'existence de flux entre les exploitations exportatrices (élevages) et importatrices (cultures), mais des flux d'azote

existent également entre l'exploitation et son environnement. A l'échelle de la Région, la gestion territoriale de ces flux est importante. En Flandre et en Wallonie, il existe une volonté de protéger les eaux territoriales, en évitant que l'azote agricole ne pollue les cours d'eau et les nappes phréatiques. A l'échelle de la région, la question est de trouver comment combiner la dimension environnementale de protection des eaux, et la dimension agronomique de fertilité.

Cette préoccupation environnementale régionale rejoint des préoccupations européennes, faisant l'objet de réglementations communes aux États Membres de l'Union Européenne depuis les années 90 (Conseil des Communautés Européennes, 1991). Ces directives répondent à une question environnementale, et visent à limiter les pertes d'azote réactif depuis les sols agricoles afin de protéger les cours d'eau, les sols, et l'air de pollutions dues aux nitrates. Conjointement à ces contraintes environnementales, l'Europe se questionne sur l'efficacité des systèmes agraires, et tente de réduire les besoins des agricultrices en azote synthétique en augmentant l'efficacité des intrants utilisés en agriculture (European Commission, 2016).

Enfin, ces questions sont imbriquées dans une échelle globale, concernée également par la problématique de l'azote. Dans les systèmes agraires du monde entier, l'azote est nécessaire pour garantir la fertilité des sols et le rendement des cultures (Zhang et al., 2015). Un déséquilibre dans le cycle de l'azote entraîne quant à lui des conséquences environnementales à l'échelle mondiale. Dans cette perspective globale, la question est de comprendre où se trouve l'équilibre entre sécurité alimentaire et mitigation des pollutions environnementales (Kanter et al., 2020).

1 Problématique de l'azote

1.1 Problématique mondiale de l'azote

1.1.1 *L'azote synthétique, entre avancées et problèmes environnementaux*

La problématique de l'azote est un enjeu mondial. Les Nations Unies (ONU) s'intéressent à ce sujet, indirectement abordé par les dix-sept objectifs du développement durable (SDG), notamment dans la lutte contre la famine. En effet, la découverte d'engrais azotés synthétiques combinée à d'autres avancées techniques, ont permis une forte augmentation de la production alimentaire lors de la Révolution Verte (Patel, 2013). En 2016, l'alimentation de plus de la moitié de la population mondiale était issue de cultures cultivées aux engrais synthétiques (Zhang et al., 2015).

Conjointement à ces avancées, des conséquences sur l'environnement et la santé ont découlé de pertes d'azote réactif depuis les sols agricoles en raison d'amendements trop importants. Lixiviation, dénitrification et volatilisation ont mené à la contamination des nappes souterraines, à l'eutrophisation d'eau fraîche et d'écosystèmes aquatiques, à la pollution troposphérique aux oxydes d'azote et à l'ammoniac, à l'émission de puissants gaz à effet de serre et à la dégradation de la couche d'ozone stratosphérique, ayant des répercussions aux échelles locale, régionale et mondiale (Zhang et al., 2015; Kanter et al., 2020). Les émissions de N_2O d'origine anthropologique sont majoritairement issues du secteur agricole, dont une contribution non négligeable provient des engrais azotés convertis par dénitrification (Stagnari et al., 2017). A cela, s'ajoutent toutes les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) liées à la production des engrais synthétiques par le procédé Haber Bosch et leur transport à travers le monde. Leur production consomme 11,4 MWh par tonne d'ammoniac (NH_3) produite (Kugler et al., 2014), soit l'équivalent de 300 Tg de CO_2 libérés chaque année dans l'atmosphère (Jensen et al., 2012). Alors qu'un sol trop pauvre en azote ne permet pas de maintenir les rendements agricoles nécessaires à nourrir la population mondiale, l'inverse pourrait donc directement impacter négativement la production via le changement climatique et les diverses pollutions citées ci-dessus.

1.1.2 *Mesure scientifique de la problématique : les indicateurs relatifs à l'azote*

L'azote minéral contribue donc à deux dynamiques : une dynamique de productivité alimentaire et une dynamique de pollution de l'eau et du sol. Afin de mesurer ces dynamiques, les scientifiques ont développé des indicateurs qui fournissent aux politiciennes, agriculteurs et autres intervenants des objectifs précis à atteindre (Dobermann, 2016). Le Nitrogen Use Efficiency (NUE) est un indicateur qui représente la fraction d'azote apportée à la plante qui se retrouve effectivement dans le produit final récolté. Cet indicateur permet d'évaluer la dose exacte d'azote dont la plante a besoin pour sa croissance et a été approuvé par 193 pays à l'Assemblée Générale de Nations Unies (Leadership Council of the Sustainable Development Solutions Network 2015 in Zhang et al. 2015). Le Nitrogen Surplus (Nsur) défini comme la

différence entre la quantité d'intrants azotés (engrais chimiques et organiques, fixation et déposition d'azote) et la quantité d'azote dans le produit récolté est un indicateur qui caractérise les pertes d'azote dans le sol. La figure 3, reprise de Zhang et al. 2015, montre que le N_{sur} augmente proportionnellement au revenu par habitant d'une population lorsque les besoins alimentaires de cette même population requièrent plus de terres cultivées et une production plus intense. A partir d'un certain revenu par habitant, les exigences en termes de qualité environnementale prennent le dessus et le N_{sur} diminue grâce aux avancées techniques et à une meilleure gestion de l'utilisation d'azote. L'indicateur atteint finalement une asymptote déterminée par la limite théorique du NUE.

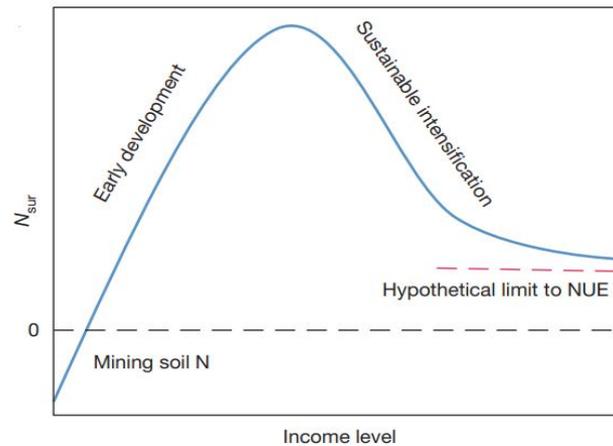


FIGURE 3 – Evolution du N_{sur} comme fonction du revenu par habitant, (Zhang et al., 2015)

Ainsi, en 2014, plus de la moitié de l'azote utilisé comme engrais à l'échelle mondiale était perdue dans l'environnement (Lassaletta et al., 2014) et 30 % du fumier disponible était estimé perdu lors du stockage ou du transport avant même d'atteindre les cultures (Oenema et al. 2007 in Lassaletta et al. 2014). Par ailleurs, pour certains pays d'Europe, l'évolution du NUE au cours du temps augmente depuis 1960 grâce à la réduction de l'utilisation d'intrants azotés sans diminution des rendements, ce qui n'est pas le cas pour la plupart des pays du monde (Lassaletta et al., 2014; Zhang et al., 2015). Ceci est illustré à la figure 4 reprise de Lassaletta et al. (2014).

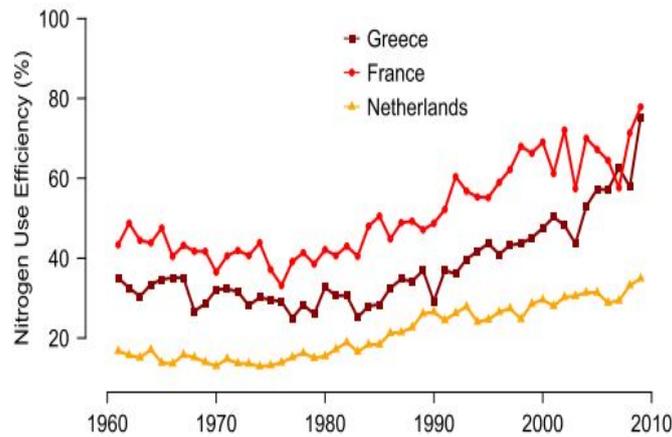


FIGURE 4 – Evolution du NUE au cours du temps pour certains pays d’Europe, repris de Lassaletta et al. (2014)

Les indicateurs de production d’engrais azoté par unité de produit animal (oeuf, lait, viande) et de taux de recyclage de l’engrais, c’est-à-dire la proportion d’azote produit par le bétail qui est collectée, stockée et redistribuée sur les terres agricoles, permettent quant à eux de quantifier la production en azote du bétail (Kanter et al., 2020). Ainsi, en 2013, le taux de recyclage mondial de l’azote était estimé entre 15 et 30 % par le Programme Environnemental des Nations Unies (UNEP) (UNEP 2013 in Kanter et al. 2020).

Les habitudes de consommation alimentaire influencent également les dynamiques de productivité alimentaire et sont elles aussi mesurées au moyen d’indicateurs communs. Les habitudes alimentaires évoluent vers une baisse de consommation de viande, l’indicateur utilisé pour caractériser cette consommation a été défini comme le pourcentage de protéines d’origine animale par rapport à la consommation totale de protéines (Springmann et al. 2018 in Kanter et al. 2020).

1.1.3 Méthodologies pour avancer vers une future gestion de l’azote

Il existe donc une tension entre la pression exercée sur les systèmes agraires pour maintenir une certaine productivité agricole, tant à l’échelle mondiale qu’à l’échelle de l’exploitation, et la pression exercée sur l’environnement par certaines des pratiques agricoles actuellement en oeuvre. Les voies d’évolution du système actuel s’imaginent et se mettent en place dans un certain équilibre entre ces deux pressions, et les possibilités de scénarios sont multiples. Différents groupes de recherche ont mis en place des méthodes permettant de concevoir ces scénarios, et d’obtenir un aperçu des différents futurs possibles.

La méthode des Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) est une approche multidisciplinaire évaluant de manière qualitative différents scénarios pour le futur. Elle peut être utilisée comme outil d’aide à la décision. Les scénarios SSPs se basent notamment sur différents niveaux d’ambition politique pour les indicateurs mentionnés précédemment et sur les trajectoires avancées par le Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’évolution du Climat (GIEC) (Kanter et al., 2020). Une autre méthode est celle du backcasting. La méthode consiste à fixer

un objectif à atteindre pour une date précise dans le futur pour ensuite imaginer le cheminement nécessaire à la réalisation de cet objectif en remontant dans le temps. Cette approche participative de résolution de problème permet d'identifier les trajectoires et étapes critiques au succès de ces objectifs et d'établir des priorités, qui se refléteraient par des actions concrètes comprenant les nouvelles technologies, les modèles économiques, les mécanismes institutionnels et les politiques en vigueur (Dobermann, 2016).

1.2 Problématique européenne de l'azote

Une trajectoire commune est suivie par l'Union européenne au sein de laquelle la problématique de l'azote est adressée par la mise en vigueur de règles relatives à la gestion de l'azote et à ses flux. Une directive en particulier régit les flux d'azote agricoles ; c'est la Directive Nitrate décrite ci-dessous.

1.2.1 *La Directive Nitrate pour la réglementation des nitrates d'origine agricole*

En tant qu'entité européenne, la Belgique est soumise à différentes directives décrétées par l'Union Européenne (UE). En 1991, face aux constats avérés de l'effet des nitrates présents dans l'eau sur la santé humaine et l'environnement, l'UE a souhaité mettre en vigueur des lois visant à protéger les eaux des États membres. Ainsi, la Commission Européenne s'est penchée sur la gestion des nitrates de source agricole ; depuis les années 1990, une augmentation de la teneur en nitrates dans les eaux de certains Etats Membres de l'Union Européenne a en effet été constatée, et il a été admis par le conseil européen que l'utilisation excessive d'engrais constituait un danger pour l'environnement (Conseil des Communautés Européennes, 1991). Depuis lors, la gestion de nitrate d'origine agricoles est réglementée par la directive européenne 91/676 concernant « la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole ». Cette directive exige des Etats Membres :

- De désigner comme « Zones Vulnérables » (ZV) les zones concernées par la pollution au nitrate ou susceptibles de l'être. Sur ces zones vulnérables, des normes plus strictes seront adaptées, et ces zones seront réévaluées tous les 4 ans ;

- D'établir un code de bonnes pratiques agricoles à mettre en œuvre par les agriculteurs ;

- D'établir des mesures législatives et administratives afin de se conformer aux directives ci-dessus. (Conseil des Communautés Européennes, 1991)

En Belgique, l'application de ces mesures relève du pouvoir régional. La gestion de l'azote en Région wallonne et en Région flamande est présentée ci-dessous.

1.3 Problématique régionale belge de l'azote

1.3.1 *Le Programme de Gestion Durable de l'Azote en Région wallonne*

a. Présentation du programme

En Région wallonne, la directive nitrate européenne a d'abord été appliquée en 1994 via l'Arrêté du Gouvernement wallon relatif à la protection des eaux contre la pollution par les

nitrate à partir de sources agricoles (Vandenberghé and Marcoen, 2004). Cet arrêté comportait 4 chapitres, incluant la délimitation de zones vulnérables, la définition d'un code de bonnes pratiques agricoles, la mise en oeuvre d'un programme d'action et enfin des mesures de surveillance quant à la mise en oeuvre de ce programme (Portail de Wallonie, 1994). Cet arrêté a été abrogé en 2002 pour être remplacé par le premier Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA). Il s'inscrit dans la continuité des politiques européennes de lutte contre la pollution par les nitrates, en y ajoutant la dimension de développement durable. Le but du PGDA est en effet "d'atteindre une gestion de l'azote au sens durable du terme" (GREN-NeRA, 2020). Cette gestion durable est assurée autant par la mise en place de réglementations concernant la gestion des engrais azotés, que par l'accompagnement et l'encadrement de la mise en oeuvre de ces mesures.

Le PGDA est établi par la Région wallonne, et sa troisième (et plus récente) version a été éditée en 2014. Pour atteindre les objectifs de protection des eaux, le PGDA aborde trois aspects relatifs à la bonne gestion de l'azote dans les élevages³ :

- Des mesures relatives au taux de liaison au sol (LS), expliqué dans l'encadré 1.3.1 ;
- Des mesures relatives à l'azote potentiellement lessivable (APL) en zones vulnérables⁴ ;
- Des mesures relatives aux infrastructures de stockage des effluents d'élevage (Maes, 2019).⁵

Afin de vérifier la mise en oeuvre de ces mesures, le Service Public de Wallonie (SPW) effectue chaque année des contrôles sur base d'indicateurs précis, décrits dans les encadrés ci-dessous.

3. Exploitations produisant plus de 500 tonnes d'azote par an, hors exploitations hors-sol.

4. Les zones vulnérables représentent 60 % de la surface agricole utilisée de la Wallonie, elle comprend le nord du Sillon Sambre & Meuse, le Pays de Herve, le Sud Namurois et une grande partie du Condroz. Cette zone vulnérable a été établie dans le but d'accroître la protection des eaux souterraines et des eaux de la Mer du Nord. Les zones désignées présentent une concentration déjà actuellement trop élevée en nitrates, ou présentent un risque que la situation ne se dégrade plus rapidement en l'absence de ces mesures spéciales.

5. Les effluents d'élevage sont issus des déjections animales (bovins, porcs, volailles, chevaux, moutons, lapins, ...) ou des mélanges agricoles (déjections animales et autres composants comme les litières), quelles qu'en soient les proportions. Ils peuvent être utilisés comme engrais pour les prairies ou cultures Sol et environnement Wallonie (2018)

Le taux de liaison au sol des exploitations agricoles (LS)

Le taux de liaison au sol (LS) est défini par le PGDA comme « le rapport entre les quantités d'azote organique (Norg) disponibles sur une année au sein d'une exploitation (production interne + importations - exportations d'effluents d'élevage) et ses capacités d'épandage autorisées sur le territoire wallon » (Maes, 2019). Pour les zones non-vulnérables, les normes d'épandage sont de 230 kg/ha.

Il est calculé par la formule suivante :

$$LS_{global} = \frac{N_{org}produit[kg] + N_{org}import[kg] - N_{org}export[kg]}{prairies[ha] \cdot 230N_{org}[kg/ha] + terres_arables[ha] \cdot 115N_{org}[kg/ha]} \quad (1)$$

Cet indicateur est calculé pour chaque exploitation sur base de données renseignées de manière annuelle par les agriculteurs (lors des demandes de subsides à la Politique Agricole Commune (PAC) et l'Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire (AFSCA) via la banque de données Sanitrace).

Le LS est également calculé pour les zones vulnérables. Pour les parcelles situées sur ces zones, le LS est calculé de la même manière, mais sur base d'une norme d'épandage de 170 kg/ha (pour les prairies et les terres arables).

$$LS_{ZV} = \frac{N_{org}produit[kg] + N_{org}import[kg] - N_{org}export[kg]}{prairies[ha] \cdot 170N_{org}[kg/ha] + terres_arables[ha] \cdot 170N_{org}[kg/ha]} \quad (2)$$

Pour être conforme, une exploitation doit avoir un LS_{global} et un LS_{ZV} inférieur ou égal à 1. Un agriculteur ayant un LS supérieur à 1 a deux options :

- établir un contrat d'épandage afin d'exporter vers une autre exploitation une partie de l'azote organique produit par son cheptel (Vandenberghe et al., 2006) ;
- entrer en Démarche Qualité (DQ) (voir point 1.3.1 Encadrement technique de l'utilisation de l'azote).

L'azote potentiellement lessivable (APL) en zones vulnérables

L'azote potentiellement lessivable (APL) est défini comme « la quantité d'azote nitrique (NO_3^-) contenue dans le sol à l'automne, susceptible d'être entraînée hors de la zone racinaire pendant l'hiver (kg NO_3^- /ha présents dans le sol en fin de saison agricole) ». Il est mesuré chaque année dans 5% des exploitations concernées, choisies aléatoirement.

Des limites de tolérance APL sont établies pour 8 classes de cultures et prairies, sur base de valeurs APL mesurées sur des parcelles expérimentales où les bonnes pratiques agricoles sont mises en œuvre.

Conformité des infrastructures de stockage des effluents d'élevage

Les infrastructures de stockage d'effluents d'élevage sont conformes lorsqu'elles sont étanches, chimiquement inertes et qu'elles respectent les instructions techniques obligatoires fixées à l'annexe 2 de l'arrêté ministériel du 1er avril 2004.

Les éleveurs wallons sont tenus d'introduire une demande d'ACISEE (Attestation de conformité des infrastructures de stockage des effluents d'élevage). Dans les 5 ans suivant la demande, un contrôle des infrastructures de stockage des effluents d'élevage est réalisé. Durant ce contrôle, la capacité des infrastructures, ainsi que leur étanchéité sont vérifiées. Les exigences tiennent compte du nombre d'animaux de l'exploitation.

Le PGDA limite donc l'utilisation d'azote organique et minéral sur les sols agricoles. La quantité utilisée pour la fertilisation des champs ne doit en effet pas dépasser ce que les plantes et les sols sont capables d'absorber. Le contrôle de l'épandage concerne à la fois les quantités utilisées, et les périodes durant lesquelles il est autorisé. La mise en place de ces bonnes pratiques est vérifiée de manière annuelle, au moyen des indicateurs décrits. Cette politique vise à éviter une pollution des masses d'eau souterraines et de surface.

Il est important de noter que les transferts d'azote organique entre exploitations, ainsi que les contrats de pâturage, sont également pris en compte dans les calculs réalisés dans le cadre du PGDA.

b. Encadrement technique de l'utilisation de l'azote

La communication de ces réglementations ainsi que l'accompagnement et le suivi de leur mise en oeuvre par les agriculteurs sont pris en charge par l'ASBL Protect'eau. Les agriculteurs wallons bénéficient de l'appui de l'ASBL Protect'eau (anciennement Nitrawal) qui relaie via sa plateforme en ligne les informations techniques, administratives et légales concernant la gestion de l'azote agricole.

Protect'eau accompagne aussi l'agriculteur dans le choix des pratiques à mettre en vigueur, et dans la réalisation du bilan azoté (Vandenberghe et al., 2006). Celui-ci peut s'engager dans la Démarche Qualité (DQ), « un engagement volontaire de l'agriculteur ayant pour objectif une gestion optimale de l'azote en vue de protéger l'eau. Cet engagement porte sur une durée de 4 ans » (Vandenberghe et al., 2006). S'impliquer dans cette démarche permet à l'agriculteur d'augmenter la quantité d'azote organique épandue sur ses terres, en s'engageant à renforcer les pratiques favorables à une bonne gestion de l'azote au sein de son exploitation.

c. Gestion de l'azote organique au sein de l'exploitation

Le bilan azoté effectué au sein de l'exploitation révèle un taux de liaison supérieur à 1 pour certaines fermes. Celles-ci peuvent alors procéder à des transferts d'effluents vers d'autres exploitations afin de faire baisser leur LS.

En 2006, une expertise réalisée sur la première version du PGDA (2002-2006) a mis en

avant que l'existence de ce programme avait permis de renforcer ces transferts d'effluents entre exploitations, surtout pour celles dont le LS était excédentaire (Vandenberghe et al., 2006). Ainsi, d'après le « Rapport sur l'Etat de l'environnement Wallon » de 2017, 98% des exploitations avaient un taux de liaison ≤ 1 en 2014 (en zone vulnérable : 97%) (Bellayachi et al., 2017). Une augmentation de ce pourcentage entre 2008 et 2014 est observable sur la figure 5.

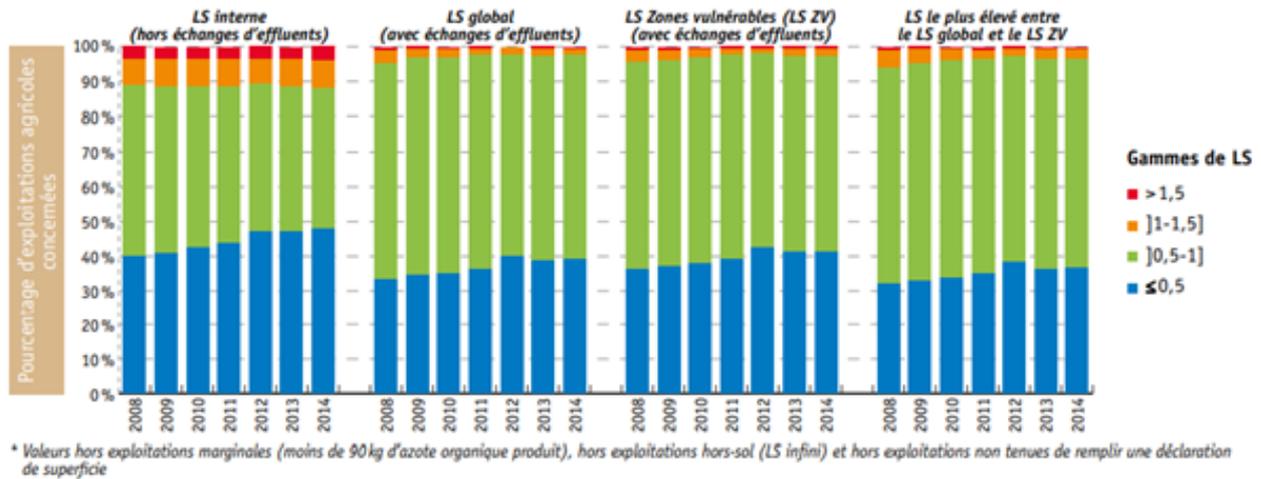


FIGURE 5 – Taux de liaison au sol des exploitations en Wallonie (Bellayachi et al., 2017)

Pour faciliter la réalisation de ces transferts, une bourse d'échange a été créée en 1998, la « Bourse d'échange d'engrais de ferme ». Elle fonctionne actuellement grâce à une plateforme mise en ligne par Protect'eau et a pour objectif de mettre en contact les cédants et les preneurs d'engrais de ferme afin de faciliter les échanges de fumiers, fientes et lisiers. Les agriculteurs rejoignent la plateforme sur base volontaire et gèrent les échanges de manière privée, sans intervention de Protect'eau. Dans le cadre d'un échange, un contrat d'épandage doit être réalisé, afin que l'azote organique soit comptabilisé dans le calcul du LS du receveur, et soustrait de celui du preneur (Protect'eau, 2019). En 2006, la plateforme comptait 2000 agriculteurs inscrits et était jugée inefficace par Nitrawal (ancien Protect'eau) en raison du manque de communication des échanges effectivement réalisés (Vandenberghe et al., 2006). Il semblerait qu'aucune enquête n'ait été récemment réalisée à ce propos.

1.3.2 Le Mestdecreet en Région flamande

En Flandre, de même que le PGDA en Région wallonne, le Mestdecreet⁶ s'inscrit dans la continuité des politiques européennes de lutte contre la pollution par les nitrates. Il régit depuis 1991 la gestion du nitrate en Flandre (en 1991, il n'existait pas encore de mesure législatives concernant la gestion de l'azote agricole en Wallonie) (Govaert, 1998). Le Mestdecreet a pour but de protéger l'environnement de toute pollution due à la production et à l'utilisation d'engrais, les engrais synthétiques sont donc également visés par le décret.

6. Mestdecreet signifie littéralement "décret lisier" en français.

Les mesures imposées par ce décret sont mises en oeuvre par l'application du Mest Actie Plan (MAP), le plan d'action pour le fumier de la Région flamande, dont la sixième et plus récente version a été éditée en 2019. Depuis 2007, l'entièreté du territoire de la région flamande est désignée comme zone vulnérable par l'article 6 du Mestdecreet (Ministère de la Région Flamande, 2006). En 2019, les normes de pollution étaient dépassées dans 28% des mesures réalisées en Flandre, ce qui a orienté la région flamande dans sa décision de renforcer le MAP 6 (Le Sillon Belge, 2019). Afin de protéger les eaux souterraines et de surface, le Mestdecreet aborde trois aspects relatifs à la bonne gestion de l'azote dans les exploitations⁷ :

- Des mesures relatives aux périodes durant lesquelles l'épandage est autorisé ;
- Des mesures relatives à la capacité de stockage exigée pour les exploitations ;
- Des mesures relatives aux bonnes pratiques environnementales d'épandage et au respect des zones vulnérables.

Les agriculteurs sont également tenus par le Mestdecreet de déclarer à la Mestbank (banque du lisier) les quantités de fumier ou lisier produites et utilisées de manière annuelle.

La Mestbank, comportant certaines similitudes avec Protect'eau, a pour mission d'informer, de conseiller et d'accompagner les agriculteurs dans les démarches à effectuer dans le cadre d'une bonne gestion de leurs effluents d'élevage.

Les échanges de fumier en Flandre se font au moyen de la plateforme MTIL, sur laquelle les agriculteurs sont obligés de déclarer les quantités de fumier ou de lisier vendues à des tiers, ainsi que le moyen de transport utilisé. Seuls les fumiers ou engrais ayant été reconnus par la Mestbank peuvent être transportés et par conséquent, vendus. Le vendeur doit être agréé auprès de la région.

1.3.3 *Transferts d'engrais de ferme entre la Flandre et la Wallonie*

Lorsqu'un transfert s'effectue d'une région belge vers une autre, la réglementation de la région vers laquelle le transfert est effectué doit être respectée.

Ainsi, dans le cas d'un transfert effectué d'une exploitation située en Wallonie vers une exploitation située en Flandre, le transfert doit être signalé à la Mestbank, et il doit être effectué par un transporteur agréé (Protect'eau, 2020) .

Tout transfert de matière organique de la Flandre vers la Wallonie est interdit (sauf en cas de circonstances graves et exceptionnelles pour lesquelles des dérogations existent). La volonté régionale de la Wallonie est d'interdire l'importation afin de privilégier les fumiers et digestats wallons. Il existe cependant des exceptions pour les agriculteurs possédant des parcelles en Flandre et en Wallonie. Ces agriculteurs pourront, en le notifiant à la Direction de la Protection des Sols (DPS), transférer du fumier provenant de leurs parcelles flamandes vers leurs parcelles wallonnes. (Protect'eau, 2020)

7. En Flandre, les exploitations concernées sont celles dont la superficie est de plus de 2 ha, ou qui ont une production annuelle d'effluents d'élevage contenant plus de 300kg de phosphates.

1.4 Problématique multidimensionnelle de l'azote

La gestion de l'azote, tant à l'échelle locale de l'exploitation qu'à l'échelle mondiale, relève des compétences et des décisions de divers acteurs touchant à des dimensions différentes. Le graphe sur la figure 6 présente les différentes dimensions de la problématique de la gestion de l'azote à visée agricole.

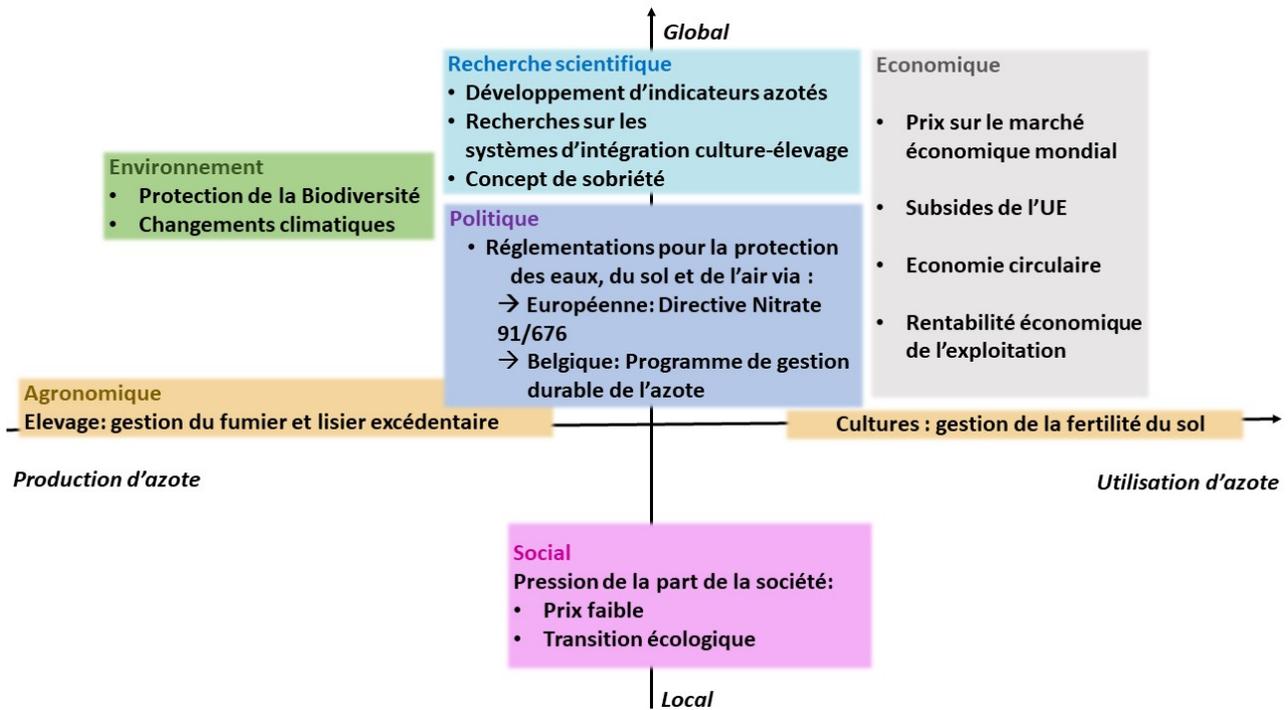


FIGURE 6 – Représentation multidimensionnelle des éléments relatifs à la problématique de l'azote (Compere et Cornu, 2020)

La *recherche scientifique* permet aux différents acteurs d'axer leur communication et leurs décisions sur une base objective commune, grâce à l'élaboration d'indicateurs et de méthodologies communes (Kanter et al., 2020). Il s'agit également de comprendre les systèmes agraires dans leur ensemble et d'évaluer leur efficacité, notamment via la complémentarité entre culture et élevage (European Commission, 2016). Par ailleurs, le concept de sobriété évalue les pistes afin de diminuer, si cela est possible, les besoins en matières azotées.

La dimension scientifique de la problématique de l'azote se met aussi au service de la *dimension environnementale*, reprenant les impacts environnementaux liés à la production et l'utilisation d'engrais azotés. Les pertes d'azote polluent les eaux et les sols et exercent dès lors une pression sur la biodiversité. Par ailleurs, les émissions atmosphériques de carbone (liées à la synthèse et gestion de l'azote) et d'oxydes azotés accentuent les changements climatiques.

La *dimension politique* tente de répondre à la fois aux intérêts environnementaux et aux intérêts des acteurs consommant ou produisant de l'azote organique ou synthétique. Pour cela, des lois et des réglementations visant à cadrer la gestion de l'azote sont mises en vigueur. Ces réglementations sont européennes (la Directive Nitrates 91/676), mais également régionales via

le Programme de gestion durable de l'azote (PGDA) en Wallonie ou le Mestdecret en Flandre. L'Union Européenne tente donc de donner aux états membres des lignes directives, qui sont ensuite adaptées selon les enjeux régionaux propres à chaque pays.

Les directives nitrates européennes et régionales sont adressées aux éleveurs et aux cultivateurs qui peuvent être reprises dans une *dimension agronomique* relative à la gestion d'azote. Elles imposent des normes concernant le stockage, le transport, et l'utilisation des fumiers et engrais azotés. D'une part, pour les éleveurs, la question est de savoir comment gérer l'azote excédentaire issu des lisiers et fumiers produits par les animaux d'élevage. D'autre part, pour les cultivateurs, la question est de trouver comment gérer la fertilité du sol, fortement dépendante de la présence ou apport d'azote via les engrais organiques ou synthétiques.

Enfin, une *dimension sociale* liée aux attentes de la société quant à la production et aux pratiques agricoles ne peut être négligée. Comme expliqué précédemment, les agriculteurs assurent la souveraineté alimentaire. Cela suggère aussi de commercialiser la nourriture à des prix faibles, généralement déterminés par le marché économique mondial et qui répond à la demande des consommatrices. Par ailleurs, la transition écologique encourage les agriculteurs à modifier leurs pratiques agricoles, couramment acquises des générations précédentes, pour s'orienter vers des pratiques agroécologiques et de nouvelles techniques. La question est de trouver comment concilier ces demandes (production à prix faible et transition écologique) avec ses propres besoins d'être humain, en matière de revenu également.

Il s'agit de considérer la *dimension économique*, puisqu'un certain pourcentage du revenu des agriculteurs est issu des subsides octroyés par les différentes instances législatives, notamment la Politique Agricole Commune (PAC). En effet, les prix de production sont régis par le marché économique mondial et ne permettent pas à eux-mêmes de rentabiliser les exploitations. Cette rentabilité est due en partie au maintien des rendements assurés grâce à l'utilisation d'azote pour couvrir les besoins des plantes. La complémentarité entre les cultures et l'élevage -évoquée dans la dimension scientifique- rejoint une optique d'économie circulaire, visant à maintenir les composants du systèmes en circulation le plus longtemps possible, tout en garantissant leur qualité d'utilisation, se passant ainsi de la notion de "déchet".

2 Caractérisation de l'offre et de la demande en azote

L'étude des flux d'azote est fixée dans ce travail à la Wallonie. Une brève présentation de la situation agricole wallonne est donc dépeinte ci-dessous.

2.1 Caractérisation des fermes en Wallonie

En 2019, la Wallonie compte 12 733 exploitations agricoles pour une surface agricole utile (SAU) de 733 714 hectares (SPW Agriculture, 2020a). Ces exploitations représentent 2,6% de l'économie wallonne et sont spécialisées dans différentes activités de cultures ou d'élevage (SPW Agriculture, 2020a). L'agriculture biologique est pratiquée par 14,3% des fermes wallonnes, ce qui correspond en termes de surfaces à 11,5% de la surface agricole utile en Wallonie.

Les activités de ces exploitations ainsi que leurs pratiques agricoles sont décrites aux points suivants.

2.2 Caractérisation des cultures et prairies en Wallonie

Les sols agricoles wallons sont utilisés principalement pour les cultures de céréales, les cultures industrielles (betterave, lin et colza), les cultures de pommes de terre et les fourrages (SPW Agriculture, 2020b). Les prairies temporaires et permanentes représentent presque la moitié de la SAU wallonne et les cultures de céréales en couvrent le quart.

Au niveau de l'activité, 31,5%⁸ des exploitations wallonnes sont spécialisées dans la culture de céréales, de pommes de terre ou de betteraves sucrières, dites "grandes cultures". Ces grandes cultures se situent principalement sur le plateau limoneux, et représentent 56% de la production agricole wallonne (SPW Agriculture, 2020a). Les filières des céréales, des pommes de terre et des prairies et fourrages sont décrites aux points suivants.

2.2.1 La filière céréalière

Les cultures céréalières wallonnes principales sont le froment d'hiver, l'orge (escourgeon), l'épeautre et le maïs fourrager. Ces cultures occupent 25% de la SAU wallonne. La production de céréales est dédiée principalement à l'alimentation du bétail, mais sert également à la production d'énergie et à l'alimentation humaine. Une partie des céréales wallonnes est également exportée. La production locale étant dédiée à près de 80% au bétail et à l'énergie, la Wallonie est importatrice nette de céréales (Antier et al., 2020). Les modes de production principaux de ces céréales sont les modes conventionnels raisonnés et intensifs. L'agriculture biologique ne représentait que 3% de la filière en 2015 et a grimpé à 5% en 2018 (A. Beaudelot, M. Mailleux, 2020).

2.2.2 La filière pommes de terre

En Wallonie, la superficie dédiée à la culture de la pomme de terre est en forte augmentation depuis les années 2000 (Antier et al., 2019). Cette culture est dédiée très majoritairement à l'alimentation humaine, sous forme de produits frais ou surgelés. Les co-produits de la filière sont utilisés pour l'alimentation animale et la production d'énergie (Antier et al., 2019). Le taux de couverture des besoins alimentaires wallons pour la pomme de terre est de 600%, la Wallonie est donc largement en surproduction, et la Belgique est depuis 2011 le premier pays exportateur mondial de produits transformés à base de pomme de terre (Antier et al., 2019).

Les systèmes de cultures les plus représentés dans la filière sont les systèmes conventionnels peu économes et non économes qui comptent pour 81% de la production. La filière biologique quant à elle ne représente que 2% de la production totale de pommes de terre wallonnes en 2016 (Antier et al., 2019).

8. Les chiffres liés aux activités des exploitations et à la production agricole sont issus du Rapport sur l'évolution de la production agricole et horticole Wallonne et font référence à l'année 2018.

2.2.3 Les prairies et les cultures fourragères

Ensemble, les prairies et cultures fourragères recouvrent 56% de la SAU wallonne. Les prairies permanentes et temporaires représentent 84,5% de la production de fourrages (SPW Agriculture, 2020b). Entre 1980 et 2015, la superficie vouée aux prairies permanentes a chuté de 23% en raison de l'artificialisation⁹ et de la réduction du cheptel. Les prairies permanentes sont principalement remplacées par des prairies temporaires, des cultures de pommes de terre et de maïs (Bellayachi et al., 2017). Les prairies permanentes ont des rôles environnementaux à jouer tant dans le maintien des habitats pour la biodiversité que dans leur couverture permanente qui limite les problèmes d'érosion et représente un stock important de carbone (Bellayachi et al., 2017).

Les cultures fourragères et les légumineuses récoltées en grains secs couvrent plus de 62400 ha. 11% de ces cultures sont sous contrôle biologique. Le maïs représente plus de 84% des surfaces de fourrages. Dans les fermes d'élevage avec terres arables, environ 58% des surfaces participent à la production de maïs. Toutefois, une grande partie du maïs fourrager reste produite dans la région limoneuse, région de grandes cultures (SPW Agriculture, 2020b).

2.3 Caractérisation de l'élevage en Wallonie

Près de 60% des exploitations agricoles wallonnes exercent des activités d'élevage (SPW Agriculture, 2020a). Le cheptel wallon élevé par ces exploitations est constitué de six espèces animales : bovins, porcs, ovins, caprins, équidés et volailles. La part de la Wallonie dans la valeur de la production agricole belge pour le secteur de l'élevage est estimée à 21% (SPW Agriculture, 2020a).

En considérant les volailles à part, le cheptel wallon est composé de plus d'un-tiers de bovins, et presque un-quart de porcs (SPW Agriculture, 2020a). L'élevage de bovins est réparti entre le Sud de la Wallonie où est concentrée la production de viande bovine, et l'Est de la Région (Pays de Herve) où est concentrée la production laitière. Les porcs et volailles sont répartis de manière plus éparpillée dans les différentes provinces wallonnes. Ce cheptel est globalement en diminution continue, à l'exception des porcs et des poulets de chair dont le nombre semble rester assez constant (Riera et al., 2019). Pour les bovins, la baisse observée entre 2005 et 2015 allait de -5% (vaches laitières) à -26% (vaches allaitantes). L'élevage wallon est majoritairement conventionnel, avec 9% de l'élevage bovin et 3% de l'élevage porcin sous contrôle biologique. La part des ovins et des caprins élevés en AB est plus importante, puisqu'elle représente 47% de la production de ces cheptels (SPW Agriculture, 2020a).

En termes de nombre d'individus, les volailles représentent la production animale la plus importante en Région wallonne, avec sept millions de poules et poulettes élevées en Wallonie (SPW Agriculture, 2020a). Cet élevage a fortement augmenté depuis les années 2000 avec presque 80% d'individus en plus en 2018. Les volailles sont réparties en poules pondeuses et poulets de chair. Elles se trouvent majoritairement dans des systèmes d'agriculture conven-

9. L'artificialisation est la perte des qualités d'un milieu naturel à abriter la biodiversité et à réguler les cycles biogéochimiques.

tionnels, en cage ou en parcours d'intérieur. La production de volailles en systèmes plein-air ou biologiques représente 32% de la production wallonne de volailles (Riera et al., 2019).

Néanmoins, la filière bovine est la filière d'élevage la plus importante en Wallonie, puisque 46% des exploitations wallonnes détiennent des vaches (Petel et al., 2019). Cette filière est décrite de manière plus approfondie au point suivant.

2.3.1 *La filière bovine wallonne*

La filière bovine wallonne comprend différents types d'exploitations participant à la production de viande et de lait. Les quatre types d'élevage bovins retrouvés en Wallonie sont les suivants (Petel et al., 2019) :

- Les exploitations allaitantes naisseurs, produisant des veaux (bétail maigre) destinés à l'engraissement ;
- Les exploitations laitières, produisant du lait mais également du bétail maigre (veaux mâles et vaches de réforme¹⁰) ;
- Les exploitations engraisseurs, qui achètent le bétail maigre et l'engraissent en taurillons ou vaches de boucherie ;
- Les exploitations allaitantes naisseurs-engrailleurs : prenant en charge la naissance, l'élevage et la croissance des veaux, jusqu'à la boucherie.

Les exploitations allaitantes naisseurs sont majoritaires en Wallonie, la filière est donc dépendante du territoire flamand pour l'engraissement des veaux (Petel et al., 2019). Au total, 13% des exploitations wallonnes sont spécialisées en production laitière, 20% en viande bovine, et 14% en bovins mixtes¹¹ (SPW Agriculture, 2020a).

Une typologie a été élaborée par Petel et al. (2019) afin de classer les différents systèmes de production bovine en Wallonie. Cette typologie classe les exploitations selon leur intensivité (extensif¹² ou semi-intensif) et l'alimentation du bétail (herbager ou maïs). Selon cette même étude, les systèmes extensifs sont majoritaires en Wallonie, et représenteraient 59% du cheptel naisseur (Petel et al., 2019). Ces systèmes extensifs ont une autonomie fourragère de l'ordre de 20 à 35% et utilisent majoritairement de l'azote organique pour leur production de fourrage. Les exploitations semi-intensives, quant à elles, ont une autonomie fourragère inférieure à 9% et utilisent principalement de l'azote minéral pour leur production de fourrage (Petel et al., 2019).

3 Les systèmes d'intégration culture-élevage en Europe

Les avancées techniques du XXe siècle ont permis à l'agriculture d'opérer des changements majeurs dans son fonctionnement et d'évoluer vers des pratiques différenciées (Le Noë

10. Les vaches de réforme sont les vaches inaptes à la production

11. Les exploitations mixtes sont spécialisées à la fois dans la production laitière et dans la production de viande bovine

12. Les systèmes extensifs sont définis par une charge en bétail inférieure à 2 UGB

et al., 2019; Mazoyer and Roudart, 2017). L'apparition de systèmes spécialisés comme celui des grandes cultures ou de l'élevage intensif a entraîné la diminution progressive des systèmes mixtes, ou systèmes polyculture-élevage (Le Noë et al., 2019). Cette spécialisation de l'agriculture semble être couplée avec certaines des conséquences environnementales évoquées au point 1.1.1 ; en 2006, un rapport de la Food and Agriculture Organization (FAO) (Steinfeld et al. 2006 in Martin et al. 2016) indiquait que l'élevage intensif et spécialisé dans les pays industriels contribuait à la pollution des sols et des eaux, au réchauffement climatique et à la baisse de la biodiversité. L'exploitation des synergies existant entre les animaux et les cultures pourrait donc potentiellement être une voie à explorer dans la modélisation de systèmes plus durables (Martin et al., 2016).

Revenir à des fermes intégrant culture et élevage n'est pas envisageable pour de nombreuses cultivatrices. En effet, la spécialisation de l'agriculture, favorisée par les politiques agricoles mises en place (Peyraud et al., 2014), a engendré une simplification de la charge de travail (Bell and Moore, 2012), une réduction des coûts liés à l'énergie et à l'utilisation d'engrais dans les grandes cultures céréalières (Peyraud et al., 2014) et la disparition d'intermédiaires locaux pour la transformation de produits animaux (Moraine et al., 2014). Suite à ces difficultés de réintroduire les animaux au sein des systèmes de cultures très spécialisés, les scientifiques ont envisagé la possibilité de les intégrer à l'échelle du territoire (Moraine et al., 2016; Martin et al., 2016).

3.1 Concept de système d'intégration culture-élevage et typologies des échanges

3.1.1 *Concept général*

Les systèmes d'intégration culture-élevage visent à développer les interactions entre exploitations spécialisées en cultures et celles spécialisées en élevage. Autrement dit, il s'agit de favoriser les échanges entre cultivatrices et éleveuses sur une surface délimitée (Moraine et al., 2014), (Moraine et al., 2018a). Le système d'intégration culture-élevage se concentre donc sur les connexions spatio-temporelles existant entre le cheptel, les champs de cultures, et les prairies ainsi que sur les flux matériels et énergétiques qui en découlent à des niveaux et échelles différentes (Moraine et al., 2014). Ces interactions renforcées permettent de diminuer l'utilisation d'intrants synthétiques à la fois via une gestion optimisée de la fertilisation organique à partir de déjections animales et via la diversification des cultures et prairies pour nourrir les animaux (Asai et al., 2018; Garrett et al., 2020). Un tel système diversifié favorise les services écosystémiques comme le maintien de la fertilité du sol ou la lutte contre l'érosion (Moraine et al., 2016). Cela amène aussi des opportunités afin de gérer les ressources naturelles à l'échelle du territoire et d'engager des actions sociales collectives (Lemaire et al., 2014). Ainsi, ce n'est pas une question d'intensification ou d'extensification de l'agriculture mais une meilleure distribution des ressources sur le territoire (Animal Task Force, Plants for the Future, 2020).

3.1.2 *Typologie des niveaux de coordination entre fermes*

Des échanges de produits azotés, pouvant être assimilés à de l'intégration culture-élevage, existent au-delà de l'entité agricole. Une typologie selon trois perspectives a donc été suggérée par Bell and Moore (2012) pour caractériser le type de coordination impliqué dans ces échanges. La première perspective relève de la gestion spatio-temporelle des terres agricoles, la deuxième considère les pratiques agricoles et de gestion de la ferme en vigueur, et la troisième aborde les considérations dont l'intervenante tient compte pour décider à quelle échelle la coordination entre agricultrices s'effectuera. Selon ces critères, quatre types de coordination de l'intégration culture-élevage peuvent être distingués (Moraine et al., 2016). Ceux-ci sont présentés dans le tableau 18 à l'annexe 1. Les types 1 et 2 sont axés sur le métabolisme des systèmes agraires, c'est-à-dire sur les flux de biens, de services et d'énergie réalisés entre ses composantes, tandis que les types 3 et 4 s'axent sur la mise en oeuvre de services écosystémiques au sein de ces systèmes (European Commission, 2016). La présente section étudie les systèmes de type 3 et 4 et présente les freins et opportunités à leur mise en place ainsi que les conséquences qui en découlent.

3.2 **Opportunités et freins à la mise en place du système**

Différents types de systèmes d'intégration culture-élevage existent en fonction des limites du système étudié. Lorsqu'il s'agit de mettre en place un tel système, de nombreux paramètres qui définissent le contexte de l'espace étudié doivent être considérés. Parmi ceux-ci se retrouvent les marchés économiques, les technologies ou les politiques qui influencent les coûts de production et les prix de vente des produits. Le climat, qui influence la productivité du système, doit également être considéré, au même titre que les interactions sociales qui y sont impliquées (Garrett et al., 2017). Que ce soit lié à la dimension environnementale, sociale ou économique, des freins mais aussi des opportunités existent par rapport à la mise en place des systèmes d'intégration culture-élevage. Le tout est de les identifier pour savoir comment adapter le système à la situation locale. Il n'y a donc pas d'unique stratégie mais des implications et recommandations à instaurer tels que le support financier et technique des instances politiques ou le soutien au réseau social (Asai et al., 2018).

3.2.1 *Dimension sociale*

Renforcer le réseau social est une piste à ne pas négliger puisque la dimension sociale est la plus importante barrière au développement d'un système d'intégration culture-élevage (Ryschawy et al., 2017). La raison primordiale est l'augmentation de la complexité du système requérant une gestion plus intense mais aussi des compétences sociales plus exigeantes (Ryschawy et al., 2017; Garrett et al., 2020). Les habitudes et traditions freinent aussi les agricultrices à se lancer dans des pratiques parfois mal connues et pour lesquelles il est parfois difficile d'accepter de quitter son prestige social (Garrett et al., 2017).

a. Gestion plus complexe

La gestion des fermes intégrant cultures et élevage de manière complémentaire (3) ou synergétique (4) est plus complexe qu'en exploitation spécialisée. En effet, une telle organisation exige davantage de coordination et nécessite de la confiance entre les différentes actrices, un partage des connaissances mais aussi une bonne logistique et organisation du capital économique (Ryschawy et al., 2017; Garrett et al., 2017; Martin et al., 2016). Cela représente tout un apprentissage social dans un contexte où les incertitudes sont non négligeables. Afin que la coopération fonctionne, il est important de réaliser les choses "mieux" par une meilleure exploitation des ressources, et "différemment" par l'exploration de nouvelles ressources (Maletič 2014 in Martin et al. 2016, Asai et al. 2018). La coordination doit donc tenir compte des cultures, prairies, et du cheptel de toutes les agricultrices investies ainsi que de la diversité de leurs pratiques.

Mais le changement se heurte à la difficulté de coordonner toutes ces pratiques au sein d'un groupe hétérogène de personnes et au caractère imprévu du métier qui ne facilite pas l'organisation. La variabilité intra- et inter annuelle de la production génère aussi une incertitude sur les potentiels échanges.

Instaurer un cadre formel par l'établissement de contrats par exemple aide à assurer des partenariats basés sur des normes objectives et non uniquement sur la confiance, offrant plus de crédibilité et de stabilité aux échanges. Au Danemark, les agricultrices sont tenues de rendre compte de manière annuelle aux autorités des quantités d'engrais produites, appliquées, reçues ou délivrées. Ainsi, une éleveuse qui délivre du fumier à une cultivatrice doit soumettre une lettre formelle avec la signature de la cultivatrice concernée. Ces formalités assurent que les termes de l'accord soient bien respectés et que le partenariat ne soit pas violé ; limitant les besoins de contrôle et favorisant des coopérations à long-terme (Asai et al., 2018). Toutefois, la confiance, plus que les contraintes légales, est l'élément déterminant la durée des coopérations (Garrett et al., 2020; Martin et al., 2016). Cette confiance et connaissance de chacun et chacune au préalable aide à éviter les problèmes de logistique (Ryschawy et al., 2017). Par ailleurs, la présence d'une filière permettant la coordination des échanges entre fermes facilite le travail des agricultrices et invite davantage à la mise en place d'un système d'intégration culture-élevage à forte coordination. Cependant, de nombreux cas d'étude relèvent un manque d'infrastructures de la filière et d'opportunités de commercialisation pour un panel varié de produits, notamment les co-produits de l'élevage comme le fumier (Garrett et al., 2020). Le soutien pour encourager les personnes à s'engager en agriculture que ce soit via des mesures ou des conseils scientifiques adaptés à la situation locale est donc un élément essentiel (Moraine et al., 2014; Asai et al., 2018).

b. Limites intellectuelles et comportementales

Outre l'obstacle lié à la complexité de la gestion, un manque de connaissances sur le fonctionnement des systèmes agroécologiques, ainsi que la difficulté à visualiser l'effet des pratiques

agricoles et des processus écologiques sur l'environnement freine les agricultrices à se tourner vers la coordination entre culture et élevage (Martin et al., 2016). En effet, les compétences et connaissances portant à la fois sur l'élevage et les cultures se sont perdues lors de la révolution industrielle dans de nombreuses exploitations, aboutissant à la séparation des deux systèmes. Le manque de formations et de recherche scientifique sur les systèmes mixtes ne renforce pas la connaissance et le développement de techniques adaptées, ce qui présente le saut vers les systèmes d'intégration culture-élevage comme une prise de risques vers des pratiques mal connues (Ryschawy et al., 2017).

L'expérience acquise des prédécesseurs, issue de traditions et habitudes de plusieurs générations, est généralement tournée vers des systèmes de production permanents qui valorisent les rendements d'une unique culture plutôt que les performances mesurées à l'échelle de toute l'exploitation (Garrett et al., 2017). Parfois, un prestige social atteint après des années dans une domaine spécifique rebute les agricultrices de passer à l'intégration culture-élevage et perdre ainsi l'image qui les valorisait jusque-là (Garrett et al., 2020).

Toutefois, dans plusieurs pays du monde, des initiatives éclosent afin d'encourager les agricultrices à se tourner vers l'agroécologie, des pratiques multifonctionnelles ou encore "l'agriculture circulaire"¹³ (Garrett et al., 2020). La transition issue d'une prise de conscience écologique et la montée de mouvements paysans comme la *Via Campesina* ou la *Fédération Associative pour le Développement de l'Emploi Agricole et Rural* valorisent une autre image de l'agriculture, plus autonome et autosuffisante. Ces mouvements supportent des approches de gestion de ferme plus holistiques et agroécologiques de façon à réduire les besoins en intrants, comme les systèmes d'intégration culture-élevage (Dumont and Baret 2016 in Garrett et al. 2020). De plus, le deuxième pilier de la PAC supporte les pratiques agroenvironnementales comme la préservation des habitats semi-naturels ou des prairies. Ce sont d'ailleurs 30% du budget de la PAC qui ont récompensé les pratiques respectueuses de l'environnement entre 2013 et 2018. La société, ainsi que les pouvoirs publics ont donc un rôle important à jouer dans la transition vers les systèmes d'intégration culture-élevage.

3.2.2 Dimension économique

Les pouvoirs publics sont des leviers importants dans cette transition de système. Au niveau économique, les mesures actuelles ne sont pas toujours adaptées aux systèmes mixtes, et de nouveaux coûts qui en émanent doivent être considérés.

a. Facteurs économiques influençant la mise en place de systèmes d'intégration culture-élevage

Actuellement, les prix du marché et les revenus profitent surtout aux exploitations spécia-

13. L'agriculture circulaire est définie par Thigssen (2018) comme "l'utilisation des résidus de la biomasse agricole et de la transformation des aliments au sein du système alimentaire afin de réduire la dépendance à l'égard des engrais chimiques et des aliments pour animaux éloignés"

lisées. En effet, si les prix du marché pour un produit sont élevés, les grandes monocultures peuvent faire du profit plus aisément. De plus, certaines exploitations signent des mandats pour la production de biocarburants et ne peuvent diversifier leur production à moins d'agrandir la ferme (Garrett et al., 2020). La spécialisation permet de faire des économies d'échelle et de simplifier la gestion de la ferme (Moraine et al., 2014). Par ailleurs, les subsides octroyés par la PAC sont calculés par hectare ou par tête de bétail, ce qui favorise à nouveau la spécialisation des exploitations (Garrett et al., 2020); les subventions n'ont pas de condition de diversification.

Un autre aspect à prendre en compte est le prix des engrais synthétiques sur le territoire évalué. Si les engrais synthétiques coûtent cher et que le coût du travail est bas, les systèmes d'intégration culture-élevage sont plus intéressants car ils nécessitent moins d'intrants externes que certains systèmes intensifs et spécialisés. Cela d'autant plus, si le prix des engrais incluait les coûts sociaux via des mesures politiques comme les taxes sur l'azote et le carbone (Garrett et al., 2017). Parallèlement aux engrais, le manque de nourriture animale obligeant son importation à des prix parfois élevés pourrait être comblé par l'intégration d'un système mixte, réduisant alors ces coûts (Garrett et al., 2020).

b. Coûts apparaissant avec les systèmes d'intégration culture-élevage

Selon le contexte politique et économique, les systèmes d'intégration culture-élevage sont parfois plus avantageux que des systèmes spécialisés. Toutefois, certains coûts liés notamment à la gestion plus complexe des fermes doivent être considérés dans ce système mixte. Des coûts de transports liés aux échanges de produits ou au déplacement du bétail apparaissent (Martin et al. (2016)). Une distance maximale peut être calculée afin de maintenir un transport d'effluents d'élevage efficace en tenant compte de la topographie du chemin et du contenu en matière sèche du fumier – un fumier plus sec pouvant être transporté plus loin (Asai et al. 2014b in Martin et al. 2016). Pour donner un ordre de grandeur, une étude danoise portant sur la collaboration entre fermes a montré que 70,8% des 644 agricultrices ayant répondu à l'enquête transportaient leur engrais de ferme dans un rayon de 5 km ; 25 km étant la distance maximale afin que les échanges restent efficaces (Asai et al., 2014a; Files and SN, 2001).

La diversification des pratiques nécessite aussi une logistique adéquate notamment par rapport aux installations de transformation, aux voies de communication pour les transports et aux canaux commercialisation. La présence d'un marché de consommatrices déjà existant peut faciliter le développement du système et être plus attractif pour les différentes actrices de la filière (Moraine et al., 2014).

Des aides gouvernementales ou subventions atténueraient les craintes liées à cette augmentation initiale des coûts et encourageraient à la transition (Asai et al., 2018).

3.2.3 Dimension environnementale

Ces aides gouvernementales auraient d'autant plus de sens qu'elles récompenseraient les agricultrices pour leur gestion respectueuse de l'environnement et les services écosystémiques

qui en découlent (Asai et al., 2018; Moraine et al., 2014). L'introduction de légumineuses dans la rotations de cultures ou la réintégration de l'élevage dans les successions de cultures favorisent la qualité du sol et pourraient être encouragées par des politiques de soutien à l'environnement (Martin et al., 2016). Ce sont par exemple des politiques régulant les émissions de carbone et d'azote ou des politiques de sécurité alimentaire autorisant les animaux à pâturer sur les terres cultivées (Garrett et al., 2017).

Toutefois, dans certaines zones les systèmes d'élevage sont dominants et les conditions biophysiques locales ne sont pas adaptées à l'introduction de cultures (Garrett et al., 2020). Bien que de nombreux bénéfices environnementaux existent, l'augmentation des déplacements du bétail selon la rotation des cultures et le transport de produits en plus petite quantité (dans le cas d'intégration de type synergie ou complémentarité) augmentent la consommation en énergie et les émissions de gaz à effet de serre (Martin et al., 2016).

En coexistence locale particulièrement, les flux sont parfois unidirectionnels si du fumier est transporté vers les cultures, mais que les nutriments ne reviennent pas sous forme de nourriture animale à l'éleveuse ; le cycle de l'azote n'est donc pas bouclé (Martin et al., 2016). Le retour de nutriments sous forme de fourrage est plus intéressant lorsque les prix sur les fourrages importés sont élevés.

3.3 Bénéfices des systèmes d'intégration culture-élevage

Une fois le système d'intégration culture-élevage mis en place, des bénéfices mais aussi des inconvénients peuvent apparaître. Trois dimensions sont directement visées par la mise en place de tels systèmes et sont davantage favorisées par des coordinations culture-élevage de type complémentarité (3) et synergie (4).

La première dimension reprend l'aspect *social* du système d'intégration culture-élevage. La coordination organisationnelle parmi les agricultrices permet en effet d'initier des actions collectives qui augmenteraient l'indépendance des agricultrices face au marché mondial et la résilience du groupe face aux imprévus, comme les changements climatiques. Cette seconde dimension étudie également les problèmes de coordination qui peuvent découler de ces associations (Martin et al., 2016; Coomes et al., 2019).

Ensuite, le système touche aussi à la dimension *économique* car il favorise diversité et flexibilité des revenus et donc la résilience aux fluctuations des marchés, tout en ayant ses limites (Martin et al., 2016).

La troisième dimension est *environnementale* et se rapporte aux pratiques favorisant les services écosystémiques. Celles-ci permettent de maintenir la fertilité du sol et de boucler le cycle de nutriments tels que l'azote, le carbone ou le phosphore en leur permettant de regagner le sol via un transfert effectué grâce aux animaux. Elles contribuent également à limiter les problèmes d'érosion et à augmenter la lutte biologique contre les adventices et pathogènes (Coomes et al., 2019; Garrett et al., 2020).

3.3.1 *Dimension sociale*

L'organisation temporelle et spatio-temporelle du territoire nécessite une grande coordination pour les liens de type complémentarité (3) et synergie (4) respectivement. Du point de vue de la dimension sociale, la création de groupes d'agricultrices ayant comme objectif le recouplage entre cultures et élevage peut amener trois bénéfices majeurs : la gestion de la ferme partagée, l'apprentissage et la responsabilité collectifs et l'acceptation sociale des activités agricoles (Martin et al., 2016).

a. Gestion de la ferme partagée

Un des avantages de s'organiser en groupe est la gestion partagée des tâches. En effet, pour les fermes combinant les pratiques de culture et d'élevage en leur sein-même, la charge de travail peut s'avérer très lourdes à certaines périodes de l'année (Dedieu and Servière, 2012) in (Martin et al., 2016). Le partage et la délégation des tâches permettent d'atténuer l'intensité du travail lors de ces périodes très chargées et de libérer du temps, voire permettre aux agricultrices de prendre des vacances (Ryschawy et al. 2013 in Martin et al. 2016). Il faut toutefois noter qu'en général, la rotation des cultures incluant le pâturage augmente aussi le déplacement des animaux et donc la charge de travail (Garrett et al., 2017). La gestion partagée de la ferme considère aussi le partage des employés et des équipements, diminuant les besoins en effectifs de la ferme et augmentant la productivité des fermes en collaboration (Martin et al., 2016). Le travail peut aussi être mieux réparti selon la quantité et les compétences de la main d'oeuvre.

La coordination entre agricultrices peut se faire de manière informelle, en fonctionnant sur les relations interpersonnelles de chacune ou être structurée par une institution. L'avantage d'institutionnaliser la coordination est que cela augmente généralement la capacité d'action ainsi que l'autonomie du groupe et amène certains avantages tels que la présence d'une filière pour stocker et transporter les produits ; voire même pour les transformer et les vendre sous des labels locaux dans des points de vente locaux (Moraine et al., 2017). La gestion partagée de la ferme, lorsqu'elle est menée à bien, est donc une innovation sociale qui augmente la capacité à s'adapter et l'indépendance des agricultrices face aux imprévus de la vie (Martin et al., 2016; Coomes et al., 2019).

b. Apprentissage et responsabilité collectifs

La capacité d'adaptation est aussi appuyée par les échanges de savoirs et savoir-faire qui peuvent ramener un souffle nouveau et une motivation en agriculture (Moraine et al., 2014). Bien que l'apprentissage social soit complexe, il encourage la capacité à relever certaines problématiques à une échelle plus large que la ferme. Par exemple, il est possible de gérer la répartition des prairies à l'échelle du territoire dans l'optique de réduire les problèmes de ruissellement et d'érosion (Moraine et al., 2016). Sur base de discussions, négociations, et d'échange d'expérience, une confiance peut s'installer entre les protagonistes issus de professions parfois différentes, améliorant leur collaboration et entraînant un gain de temps pour le

suivi des autres fermes (Martin et al., 2016; Moraine et al., 2017).

Le fait de réfléchir l'aménagement du territoire en coopération augmente la probabilité que la gestion du territoire et des fermes respecte les règles environnementales et que les aspects récréatifs soient pensés de manière coordonnée (Moraine et al., 2014; Martin et al., 2016). Par exemple, au Danemark, dans le cadre de la Directive Nitrate (91/676/EEC) des règles établissent quelle quantité de fumier les agricultrices sont autorisées à épandre par unité de surface. Cela a amené les éleveuses qui accumulaient des quantités de fumier trop élevées sur leurs terres à établir des partenariats collaboratifs pour l'échange de fumier. En 2009, ces échanges régis par des contrats formels représentaient 80% des fermes en agriculture biologique et 70% des élevages laitiers biologiques (Asai et al., 2014a). Ces partenariats, dans une optique de respect des normes environnementales, a amélioré l'acceptation des activités agricoles.

c. Acceptation sociale des activités agricoles

L'image de la société envers l'agriculture est améliorée par cette approche collective de gestion et d'apprentissage. Les coordinations complémentaires et synergétiques peuvent favoriser l'intégration sociale des agricultrices, notamment par une meilleure adaptation à la demande sociétale ; comme offrir des produits locaux, protéger l'environnement et préserver le paysage rural (Moraine et al., 2014; Asai et al., 2018). D'après Marc Cornelissen, afin que la société comprenne le rôle que joue l'agricultrice, il faut passer par l'éducation à l'alimentation. Pour cela, des échanges locaux entre exploitations favorisent la traçabilité de la production, notamment via le développement de labels ou par la vente directe (Moraine et al., 2014). En théorie, si l'innovation sociale permettait d'attirer des jeunes en agriculture, il serait possible d'atténuer les problèmes de succession des fermes et vieillissement des agricultrices (Moraine et al., 2014).

3.3.2 Dimension économique

Un aspect non négligeable pour attirer les jeunes ou autres en agriculture est l'aspect économique. En effet, les investissements pour commencer ou reprendre une ferme sont souvent importants et l'incertitude sur les rentrées d'argent n'arrange rien. Les bénéfices économiques issus des associations entre agricultrices dans les systèmes d'intégration culture-élevage dépendent du contexte (marché, technologies, réglementation) mais sont souvent significativement observables par une plus grande résilience et une diminution des risques. Les grands avantages sont une utilisation plus efficace des ressources, la diversification des revenus et la flexibilité face aux fluctuations du marché économique. D'après Ryschawy et al. (2017), les systèmes d'intégration culture-élevage sont une solution vers l'agroécologie, puisque sans compromettre la rentabilité économique, ils réduisent la pression sur l'environnement.

a. Utilisation efficace des ressources

D'après Garrett et al. (2020), le retour sur investissements (ROI), soit le profit réellement fait comparé à l'argent investi au départ, se fait plus rapidement dans les systèmes d'intégration

culture-élevage et est plus élevé que dans des exploitations spécialisées. D'une part, les coûts de production peuvent être réduits par la diminution de l'utilisation d'intrants -permise par le retour de fertilité grâce aux animaux et la diversification des pratiques agricoles- et cela mène à une efficacité économique. Il semblerait toutefois que les performances économiques dépendent davantage de la gestion de l'exploitation que du type d'exploitation, spécialisé ou mixte (Ryschawy et al., 2017).

D'autre part, les coûts de transaction peuvent être réduits après un certain temps grâce au réseau social et à la coordination organisée des flux entre exploitations (Asai et al., 2018). Ces coûts de transaction sont classés en trois types : les coûts relatifs à l'acquisition des données qu'elles soient d'ordre technique, scientifique ou descriptif de l'exploitation ; les coûts relatifs à la prise de décision collective que ce soit la coordination et le suivi des échanges ; et les coûts relatifs aux opérations d'échanges et au suivi en tant que tels (Asai et al., 2018).

Par ailleurs, l'utilisation des ressources est gérée de manière plus efficace (Moraine et al., 2017). Par exemple, le pâturage peut être plus rentable dans certaines régions où les conditions ne sont pas propices à atteindre de bons rendements de cultures. Au contraire, des terres fertiles sont dédiées préférentiellement aux cultures, où les animaux ne sont nécessaires qu'après de longues rotations de cultures diversifiées (Martin et al., 2016). Cela prend aussi en compte la gestion de l'eau puisque les forages pour l'irrigation vont se faire préférentiellement là où l'eau est facilement accessible pour les cultures. Le transfert de fourrage vers les fermes d'élevage en zone non irriguée répond alors aux besoins des animaux sans avoir recours à de nombreuses installations coûteuses (Moraine et al., 2017).

b. Diversification des revenus

La gestion partagée de la ferme permet la diversification des pratiques (rotation de cultures, pâturages, etc.) qui augmente directement la diversité des revenus et donc la résilience face aux fluctuations du marché économique et une certaine stabilité au cours de l'année (Coomes et al., 2019; Garrett et al., 2017). En effet, si une année les prix d'un produit sur le marché sont très bas, ou les rendements sont mauvais, il existe toujours d'autres sources exploitables pour générer un revenu. Les terres non cultivées peuvent aussi être pâturées par des espèces animales différentes afin de diversifier l'élevage (Martin et al., 2016). L'aspect attractif du territoire favorise également le développement du tourisme, et peut renforcer le dynamisme du marché local en attirant diverses filières pour la transformation et valorisation des produits locaux, notamment sous couvert de labels (Moraine et al., 2014, 2017). Une telle réorganisation pourrait donc mener à des fermes résilientes en développant divers marchés internes et en dispersant les sources de revenu.

c. Flexibilité face aux fluctuations du marché

En France, un marché interne issu d'un réseau d'agricultrices en agriculture biologique, appliquant l'intégration culture-élevage de type complémentarité (3), a établi des contrats

pluriannuels pour le prix du fourrage. Ces contrats considèrent que les prix peuvent être ajustés en fonction des fluctuations du marché (Martin et al., 2016).

Une autre adaptation possible relève de l'ajustement de la production en fonction des fluctuations des prix des produits. En effet, si les prix d'un produit sont très bas, produire la culture comme nourriture pour le bétail représente une bonne alternative qui requiert des investissements moins exigeants. En cas de mauvais rendements dus à des problèmes techniques tels que la propagation d'agents pathogènes, ou à des conditions climatiques non favorables, nourrir le bétail représente toujours une bonne alternative qui valorise aussi les co-produits, comme le son de blé (Moraine et al., 2017). Par ailleurs, au sein des fermes en polyculture-élevage, il est facile d'ajuster le niveau de chaque système de culture ou d'élevage en fonction des prix ou de la météo et de ne produire qu'une partie de la production, tout en garantissant un revenu (Garrett et al., 2017). Ainsi, la coopération entre différentes agricultrices les rend moins sensibles aux fluctuations de prix et cette stabilité impacte aussi la résilience des ménages (Ryschawy et al., 2017).

3.3.3 *Dimension environnementale*

Les systèmes d'intégration culture-élevage visent à mettre en place des pratiques favorisant des services écosystémiques comme le renouvellement de la fertilité et la régulation biologique. En fonction de la gestion de l'exploitation, la diminution des émissions de gaz à effet de serre ainsi que l'augmentation de la tolérance à la sécheresse peuvent aussi être observés. Ces services écosystémiques vont directement bénéficier aux exploitations tant dans leur dimension environnementale que dans la dimension économique voire même sociale.

a. Renouvellement de la fertilité

Un des services écosystémiques les plus importants est le renouvellement de la fertilité des sols via la présence dans les rotations culturales de cultures de couverture, de prairies et de légumineuses. Les effets de ces pratiques sont influencés par leurs échelles spatio-temporelles ainsi que par leur intensité (Martin et al., 2016).

Tout d'abord, les cultures de couverture augmentent le ratio C/N qui favorise la rétention d'azote dans le sol et évite son lessivage. Les cultures de couverture limitent aussi le ruissellement et l'érosion des sols (Garrett et al., 2020), problèmes souvent rencontrés en agriculture et qui engendrent une perte de biomasse à la surface du sol. Ensuite, l'utilisation de légumineuses en culture de rotation favorise le renouvellement de la fertilité grâce à la fixation symbiotique de l'azote effectuée par les micro-organismes présents dans les nodules racinaires de ces plantes. Les teneurs en azote dans le sol sont par conséquent généralement plus élevées après une culture de légumineuses qu'après un autre type de culture. Leur présence permet notamment d'éviter à une partie de l'azote d'être lessivé (Lüscher et al., 2014; Drinkwater and Snapp, 2007). Par ailleurs, les racines profondes améliorent la structure du sol favorisant la bonne infiltration de l'eau. Enfin, les prairies de courte durée se voient aussi bénéfiques pour limiter le lessivage de l'azote, les pertes diminuant exponentiellement avec leur présence

accrue dans la rotation de culture (Kunrath et al. 2015 in Martin et al. 2016).

L'immobilisation des nutriments (carbone C, azote N, phosphore P) est un élément clé afin de renouveler et maintenir la fertilité des sols (Drinkwater and Snapp, 2007; Asai et al., 2018). L'apport de fumier (via application ou pâturage) fournit de la matière organique au sol, ce qui allonge généralement le temps de résidence des ions dans le sol et favorise l'activité microbiologique du sol (Diacono and Montemurro 2011 in Martin et al. 2016). Toutefois, l'application en excès peut avoir des effets inverses, augmentant le lessivage d'azote ; il faut donc adapter la quantité d'engrais organique apporté à la situation locale (Martin et al., 2016). Le pâturage d'intensité modérée est le plus bénéfique, puisqu'un pâturage trop faible ne profite pas de la productivité de la prairie, et qu'un pâturage trop intensif diminue les performances animales et peut dégrader la prairie (Garrett et al., 2017).

b. Régulation biologique

Ensuite, les systèmes d'intégration culture-élevage bénéficient des services de régulation biologique que ce soit dans la lutte contre les adventices ou contre les organismes pathogènes (Coomes et al., 2019). L'intégration des prairies dans la rotation des cultures modifie la composition et l'abondance des communautés du sol et de surface. En général, le ratio mycètes : bactéries du sol augmente, la biomasse microbienne totale est plus importante et les communautés plus stables (Acosta-Martínez et al., 2010). L'abondance, la diversité et l'activité enzymatique microbienne et de la microfaune du sol dépendent de l'intensité du pâturage et du labour ; davantage favorisés par une intensité de pâturage modérée et le non-labour. Cela pourrait diminuer voire cesser les besoins d'utilisation des pesticides et la nécessité de labourer (Martin et al., 2016; Garrett et al., 2017).

Le niveau d'intensification écologique des agroécosystèmes (reprenant la biodiversité présente dans le champ, l'hétérogénéité du paysage et la gestion des cultures) détermine l'efficacité du contrôle biologique des nuisibles et maladies ainsi que de la pollinisation des cultures par les insectes (Martin et al., 2016). Par exemple, l'intégration de prairies pâturées dans les cultures annuelles diminue les maladies et l'abondance des adventices (Garrett et al., 2017). L'hétérogénéité du paysage est évaluée selon son hétérogénéité compositionnelle, c'est-à-dire le nombre et la composition des différents usages du territoire, et selon l'hétérogénéité configurationnelle, soit l'agencement de ces différents usages (Lüscher et al., 2014). Afin de favoriser le contrôle des nuisibles et diminuer les dommages faits aux cultures, il est conseillé d'inclure des prairies dans la rotation culturale ainsi que de conserver des habitats semi-naturels (pour augmenter l'hétérogénéité compositionnelle) et les inclure dans les rotations et assolement (pour favoriser cette fois l'hétérogénéité configurationnelle) (Martin et al., 2016; Coomes et al., 2019). L'hétérogénéité du paysage permet de disperser les ressources, tromper les nuisibles avec des cultures "piège" ou cultures de répulsion, faciliter l'allélopathie et les effets architecturaux (Ratnadass et al. 2012 in Martin et al. 2016). Toutefois, cela demande une organisation spatio-temporelle des composantes biotiques et abiotiques finement gérée entre les différentes agricultrices.

c. Diminution des émissions de gaz à effet de serre

L'épandage d'engrais organiques à la place d'engrais synthétiques tend à diminuer les émissions de méthane (CH_4) et de protoxyde d'azote (N_2O) qui est un puissant gaz à effet de serre au pouvoir de réchauffement global 300 fois supérieur à celui du CO_2 (Garrett et al., 2017; Wang et al., 2018). Cela est dû en partie au ratio C :N plus élevé, qui diminue la minéralisation (la libération d'azote minéral) par les microorganismes et favorise la conversion de nitrate (NO_3^-) en ammonium (NH_4^+), à défaut du N_2O (Signor and Cerri, 2013; Putz et al., 2018). Le non-labour ralentit aussi ce phénomène de minéralisation (Wang et al., 2018).

La présence de bétail sur les prairies, ainsi que l'épandage d'engrais organiques influencent les communautés de bactéries dénitrificatrices et favorisent la conversion complète du NO_3^- en N_2 à défaut du N_2O , par rapport à l'épandage d'engrais synthétiques (Wang et al., 2018; Philippot et al., 2009). D'autre part, diminuer la production d'engrais synthétique économise de l'énergie et épargne des émissions atmosphériques de CO_2 . La proximité des échanges concernant le fourrage y contribue aussi directement via la réduction des transports et indirectement via la diminution de l'énergie nécessaire à la production de fourrage à l'étranger (Garrett et al., 2017).

d. Tolérance à la sécheresse

La complexité structurale et biologique émanant des systèmes d'intégration culture-élevage défère aux plantes une meilleure résistance aux sécheresses et aux stress, notamment via l'augmentation du contenu en matière organique du sol, du pouvoir tampon biogéochimique, de la rétention des nutriments, de l'abondance microbienne, et de l'amélioration de la structure du sol. Dans une étude de cas faite au Etats-Unis sur plus de 10 ans, l'amendement de fumier dans la rotation d'une culture de pommes de terre a permis d'augmenter les rendements de 5% et que les cultures résistent mieux à la sécheresse (Asai et al., 2018). Il faut toutefois noter que si le pâturage est trop intense, la sol peut se compacter, diminuant la porosité et potentiellement le stock d'eau utile pour la plante.

3.4 Renforcer l'intégration culture-élevage sur le territoire européen, l'exemple du projet CANTOGETHER

Les avantages découlant d'une coordination de type complémentarité ou synergie dans les systèmes d'intégration culture-élevage sont donc multiples mais de nombreux freins existent encore quant à leur mise en place. La Commission Européenne s'est donc penchée sur la problématique. En 2012, la Commission européenne a lancé le projet Crops and ANimal TOGETHER (CANTOGETHER). Ce programme planifié sur 4 ans a eu pour objectif de rassembler les chercheurs et acteurs européens autour de la question des systèmes d'agriculture mixtes, afin d'améliorer leurs performances et leur durabilité (European Comission, 2016). L'amélioration de la synergie entre agriculture et élevage est, pour les défenseurs de ce projet, une piste pour diminuer l'impact environnemental de l'agriculture, et en particulier de l'élevage (European Comission, 2016). Pour mener à bien ce projet, des innovations prometteuses ont

été mises en place au sein de 24 études de cas européennes. Les cas étudiés concernent des synergies présentes à l'échelle de l'exploitation, mais également à l'échelle régionale. Les impacts économiques, environnementaux et sociaux de ces systèmes ont ensuite été mesurés.

Au lancement du programme CANTOGETHER, le constat de la Commission européenne était que seules 24% des exploitations européennes pratiquaient une agriculture mixte culture-élevage. Entre 2004 et 2009, un net déclin de la proportion d'exploitations peu spécialisées a été observé (33% des exploitations mixtes dirigées majoritairement vers l'élevage et 39% des exploitations mixtes dirigées vers les cultures se sont spécialisées) (European Commission, 2016). Réalisant ce constat, l'Union Européenne a cherché à comprendre comment promouvoir des systèmes d'agriculture mixtes auprès des Etats Membres. Quatre types d'intégration culture élevage ont été identifiés sur base du niveau de diversité et de synergies relevées dans les fermes étudiées. Ils ont été définis dans le tableau 18 à l'annexe 1.

Les résultats de cette étude ont montré des performances environnementales améliorées dans la majorité des cas (80% (European Commission, 2016)). D'un point de vue économique, il a été mis en avant que la transition d'une forme d'agriculture spécialisée vers des pratiques plus intégrées était souvent désavantageuse, car elle entraîne dans beaucoup de cas une baisse des rendements incompatible avec le système intensif dans lequel les fermes spécialisées se trouvent. De plus, les exploitations mixtes sont souvent perçues comme source de travail accrue, et leur gestion est considérée comme plus complexe, c'est pourquoi le projet CANTOGETHER s'est également tourné vers les systèmes d'intégration à l'échelle territoriale.

A l'issue du programme CANTOGETHER, un outil permettant de mettre en lien les agricultrices offrant ou demandant certains biens et services a été mis en oeuvre dans plusieurs pays membres, dont la Suisse et l'Irlande.

4 Thèmes de réflexion pour la gestion de l'azote

Les systèmes d'intégration culture-élevage se basent implicitement sur deux grands concepts de gestion des ressources que sont la *sobriété* et la *circularité* des ressources. Ces deux concepts sont deux pistes de réflexion qui ont été approfondies dans cette section.

4.1 Concept de sobriété de l'azote

Alors que l'efficacité des systèmes est souvent mise en avant, la sobriété est parfois négligée et dans le secteur de l'énergie par exemple, l'utilisation croissante de technologies plus efficaces ne réduit pas la consommation totale d'énergie. Le concept de sobriété se base sur le principe qu'il est possible d'utiliser moins de ressources pour satisfaire nos besoins (Association négaWatt, 2018). Sobriété n'est pas synonyme de privation mais plutôt de contrôle et régulation de la consommation (Morin, 2015) et est complémentaire à l'efficacité (Association négaWatt, 2018). Divers pistes sont possibles pour diminuer l'utilisation d'azote, telles que l'introduction de légumineuses dans des rotations de cultures ou l'agriculture de précision - non développée dans ce travail- qui apporte la dose exacte requise par la plante pour se

développer, en tenant compte de l'hétérogénéité du terrain.

Cette section aborde les bénéfices de l'introduction des légumineuses dans la gestion de l'azote ainsi que les pratiques favorables à la réduction des besoins en azote. La sobriété est aussi analysée sous l'angle des systèmes d'intégration culture-élevage.

4.1.1 *Introduction de légumineuses pour la réduction des besoins en azote*

L'introduction de légumineuses dans la rotation de cultures est une piste envisageable pour réduire les besoins en azote car ce type de plante améliore la fertilité du sol par la fixation symbiotique de l'azote¹⁴. Les légumineuses sont des cultures riches en azote vouées tant à l'alimentation humaine qu'à l'alimentation animale lorsqu'elles sont récoltées ou laissées comme résidus de culture (Stagnari et al., 2017; Jouan et al., 2020). Leur introduction, diminue les besoins en engrais azotés, notamment pour la culture qui suit, et épargne de ce fait de l'énergie fossile pour la synthèse d'engrais. Les légumineuses, en fonction des systèmes de culture et techniques de gestion, pourraient libérer 5 à 7 fois moins de gaz à effet de serre (CO₂ et N₂O) que d'autres cultures par unité de surface (Jensen et al., 2012; Clune et al., 2017). Les résidus de culture libèrent dans le sol une matière organique de bonne qualité en termes de ratio C :N, ce qui accroît la séquestration de carbone dans le sol et le maintien de l'azote et diminue les risques d'érosion (Stagnari et al., 2017).

Néanmoins, l'introduction de légumineuses se heurte à certaines habitudes ancrées dans notre société et le rôle des acteurs publics pour leur généralisation est primordial (Association négaWatt, 2018; Stagnari et al., 2017). Les inconvénients potentiels sont principalement économiques comme la diminution du profit à court terme, et l'absence de filière et de marchés de commercialisation. Les rendements sont aussi incertains en fonction de l'adaptation au climat et de la susceptibilité aux stress biotiques et abiotiques (Stagnari et al., 2017; Jouan et al., 2020).

4.1.2 *Pratiques agricoles favorisant la réduction des besoins en azote*

Des pratiques agricoles telles que les cultures associées ou l'agriculture de conservation bénéficient des avantages environnementaux liés aux légumineuses (Stagnari et al., 2017), ce qui n'est pas toujours le cas en monocultures. Les cultures associées reposent sur deux ou plusieurs espèces cultivées simultanément sur une même parcelle et bénéficient de la diversité des cultures. La légumineuse, en association avec une espèce céréale, contribue jusqu'à 15% de l'azote présent dans le sol et diminue la compétition pour cette ressource davantage disponible pour l'espèce céréale (Brooker et al., 2015). Les cultures associées ont toutefois les contraintes de la difficulté à standardiser les produits, de la mécanisation non adaptée ou de l'utilisation

14. La fixation de l'azote est la conversion d'azote inerte de l'air (N₂) en ammoniac (NH₃) par les bactéries en milieu anaérobie. Une relation symbiotique se crée alors entre la bactérie, abritée et sustentée par la plante qui lui envoie du carbone, et la plante qui reçoit l'azote directement sous forme minérale pour être assimilé dans son métabolisme.

d'intrants en excès (Stagnari et al., 2017).

L'agriculture de conservation quant à elle, vise à perturber le sol le moins possible et que celui-ci soit couvert à 30% minimum en permanence de façon à limiter les pertes en terre (Stagnari et al., 2017). Cette pratique met donc en place des cultures de couverture qui augmentent le potentiel de séquestration du carbone en restituant au sol de grandes quantités de carbone et azote organique (Reckling et al., 2014).

4.1.3 *L'intégration culture-élevage en toute sobriété*

Les légumineuses sont une source de protéines dans l'alimentation animale. Actuellement, l'Union Européenne ne subvient qu'à 45% des besoins en protéines pour les animaux et compte sur les imports pour une nourriture animale riche en protéines (Jouan et al., 2020). Un cas d'étude français a imaginé l'introduction de luzerne (plante légumineuse) dans le système de cultures qui permettrait à la fois de diminuer les besoins en engrais azoté et à la fois de nourrir le cheptel (Moraine et al., 2016).

Maintenir l'élevage et les prairies reste primordial puisque les prairies permettent une décomposition lente de l'humus et un stockage à long terme du carbone, voire sa séquestration (Soussana et al., 2004).

Selon un cas d'étude de Moraine et al. (2014), une meilleure gestion globale de la ferme et une diminution du nombre d'animaux a réduit les besoins en fourrage et dès lors de leur production, limitant l'irrigation, la fertilisation et les coûts de production. La sobriété au sein de la ferme pourrait avoir des répercussions sur la société. Une réduction du nombre d'animaux au sein des exploitations concorderait avec une diminution de la production de viande et de ce fait, la consommation de viande. Un scénario à l'horizon 2050 visant à augmenter la part de l'agriculture biologique en Wallonie avance que la consommation de viande devrait être limitée à 56 grammes par semaine par personne (Petel et al., 2019). La sobriété a donc aussi sa place dans les habitudes alimentaires de la société.

4.2 **Concept de circularité de l'azote**

La circularité est définie comme un système conçu pour remplacer les logiques d'extraction, d'utilisation et d'élimination des ressources par un modèle économique et technique basé sur la réutilisation, le recyclage, la réduction et la valorisation des ressources (Ellen MacArthur Foundation, 2012). Dans le domaine des systèmes alimentaires, la circularité est une voie éventuelle pour atteindre la durabilité dans la production agricole (Jurgilevich et al., 2016).

La circularité peut être exprimée à différentes échelles spatiales; elle peut exister au sein d'une ferme, à l'échelle d'une région, ou dans un pays entier (Koppelmäki et al., 2021). Le concept de production alimentaire circulaire suggère un certain maintien des nutriments, de l'énergie et de la biomasse au sein d'un système (de Figueiredo and Mayerle 2014 in Koppelmäki et al. 2021). Ces différents éléments sont donc insérés dans des flux et recyclés tout au long de leur vie. Les systèmes alimentaires comprennent les systèmes de production et les systèmes de

consommation. Le concept de circularité imbriquée ("nested circularity") apporté par certains auteurs abordant la circularité dans les systèmes alimentaires, propose par conséquent de fermer les cycles des nutriments, de la biomasse, et de l'énergie à travers les échelles spatiales, en maximisant les synergies (Koppelmäki et al., 2021).

Insérée à la question de l'azote, une économie de la production alimentaire circulaire suggérerait que les nutriments produits par les plantes retournent sur le sol d'où ils proviennent grâce à un transfert de fertilité effectué par le fumier. Si ce transfert n'est pas possible à l'échelle de la ferme dans une certaine partie des exploitations (voir partie 3 intégration culture-élevage), il est envisageable à d'autres échelles comme celle de la région. Ceci rejoint également l'idée que l'économie circulaire implique une utilisation plus efficiente des sous-produits et des déchets, dont le fumier est un exemple (Jurgilevich et al., 2016). Dans un tel système, les entrées d'intrants extérieurs dans la boucle de production sont en effet limités au maximum. Une transition vers un système plus circulaire demanderait alors non pas plus de diversification, mais une dépendance renouvelée dans des ressources plus localisées à l'échelle spatiale (Koppelmäki et al., 2021).

Objectifs

L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire a le but de nourrir un débat sur la valorisation des systèmes d'intégration culture élevage comme leviers pour une gestion durable des échanges d'azote en Wallonie. Pour atteindre ce but, trois objectifs sont définis.

1. Le premier objectif de cette étude est d'évaluer, après avoir quantifié les flux d'azote en Wallonie, si des tensions existent dans le système actuel. Cette quantification est réalisée grâce au développement d'un nouvel outil d'évaluation des flux et dans le but de comprendre les freins à la transition vers un système wallon sans azote synthétique.

2. Le deuxième objectif abordé est d'imaginer et de mettre en scène des perspectives d'évolution futures envisageables pour le système actuel. Ces perspectives sont présentées sous la forme de scénarios à l'horizon 2030. La mise en oeuvre de cet objectif implique l'étude de systèmes durables, et leur adaptation au contexte wallon.

3. Le troisième et dernier objectif de la présente étude est d'ouvrir un dialogue avec différentes actrices et acteurs sur les pistes d'évolution envisagées. Cela afin de relever les freins face aux perspectives d'évolution mais aussi d'évaluer leur faisabilité, et leurs leviers de mise en oeuvre.

II Matériel et méthode

La méthodologie suivie dans le cadre de ce mémoire se déroule en trois temps. La première partie de l'étude consiste en un travail de modélisation du système agricole de l'azote, sous forme d'un calculateur permettant d'évaluer un bilan chiffré de l'offre et de la demande, au moyen de données issues de la littérature (partie 1). La seconde partie de l'étude a consisté en un travail de scénarisation, pour imaginer, sur base du système actuel, les voies d'évolution possibles à l'horizon 2030 vers une plus grande autonomie dans le système et un développement de la complémentarité existant entre l'agriculture et l'élevage (partie 2). La troisième partie du mémoire est un dialogue, mené sous forme d'enquêtes semi-dirigées, avec des expertes du système précédemment modélisé (partie 2.1.1). Ces expertes ont d'abord apporté leurs contributions à la réalisation du calculateur et ont permis de compléter certaines données manquantes dans la littérature. Elles ont ensuite nourri un dialogue sur la mise en oeuvre des scénarios proposés. Les trois étapes réalisées dans le cadre de ce mémoire sont complémentaires. La figure 7 illustre les trois parties de la méthodologie employées et décrites dans la présente section.

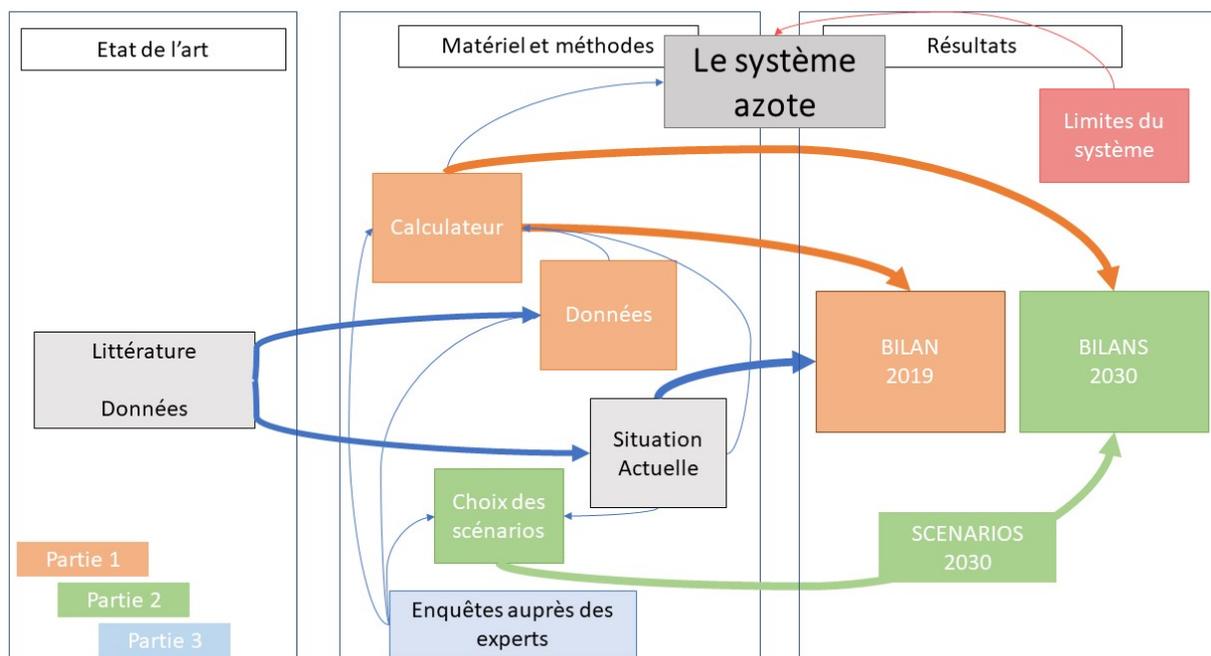


FIGURE 7 – Cheminement du mémoire en trois temps

1 Méthodologie et objectifs de la modélisation

Le système agricole de l'azote est un système complexe dans lequel êtres-vivants et écosystème sont liés par différents flux. Les composantes de ce systèmes ont été étudiées et décrites dans l'État de l'art, permettant de les représenter et les lier entre-elles. Le cycle agricole de l'azote est illustré par la figure 8¹⁵.

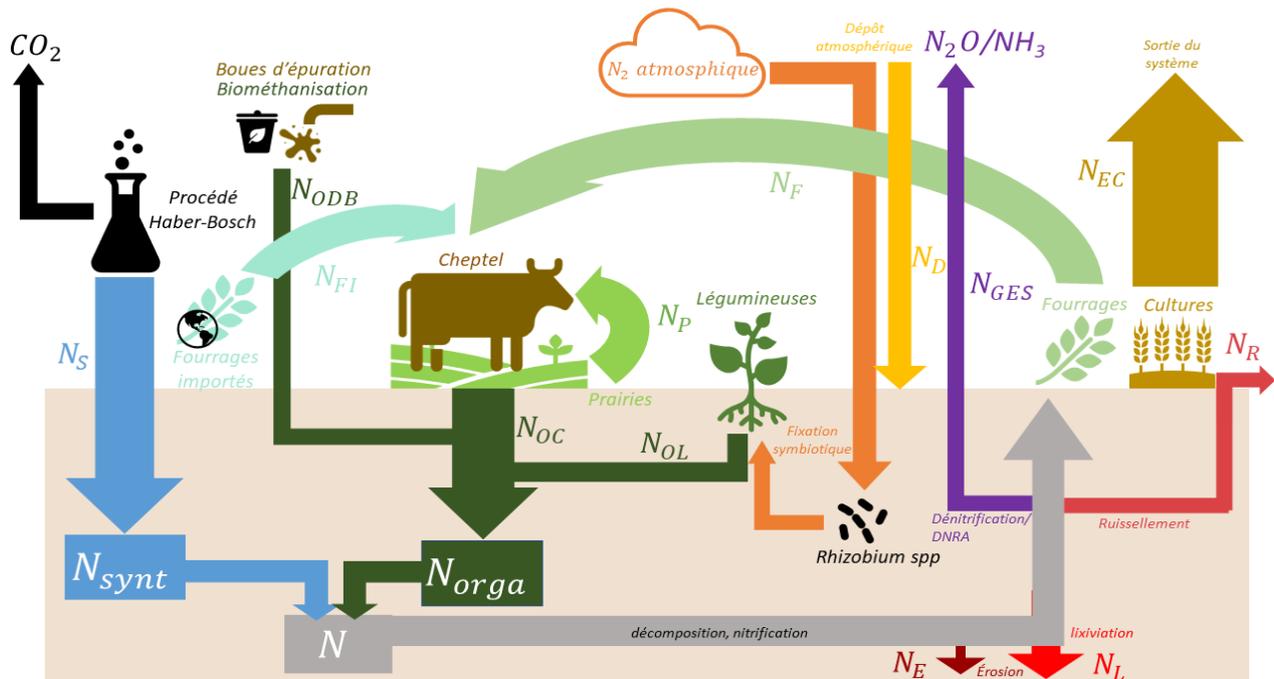


FIGURE 8 – Cycle agricole de l'azote

La présente étude porte sur la quantification de ces flux au sein de la Wallonie. En plus de la quantification de ces flux, trois indicateurs (définis à la section 1.2.3) seront également évalués :

1. Indicateurs d'autonomie :

- L'autonomie alimentaire du cheptel en azote digestible
- L'autonomie wallonne en azote

2. Indicateurs d'efficience

- L'efficience du système.

Ces objectifs sont atteints à travers la conception et la réalisation d'un calculateur permettant de chiffrer la production et la consommation d'azote en Région wallonne. Ce calculateur permet d'obtenir des ordres de grandeurs qui fournissent une estimation suffisamment précise pour comparer les possibilités, susciter le questionnement et entamer des débats concernant la

15. Les flux illustrés sur la figure, et étudiés dans le cadre de cette étude sont les suivants : N_S : synthèse industrielle, N_{FI} : fourrages importés, N_{ODB} : biométhanisation et boues d'épuration, N_{OC} : déjections du cheptel, N_P : prairies, N_{OL} : fixation symbiotique par les légumineuses, N_F : fourrages wallons, N_D : dépôt atmosphérique, N_L : pertes par lessivage, N_R : pertes par ruissellement, N_{GES} : pertes par volatilisation, N_{EC} : exportation par les cultures.

gestion de l'azote en Région wallonne. Il ne donne toutefois pas de valeurs précises, ni d'indications valables à de plus petites échelles et est donc complémentaire à des travaux d'analyses de scénarios prospectifs détaillés.

La méthodologie suivie pour atteindre ces objectifs peut être définie en deux temps : la conceptualisation du modèle et l'élaboration du calculateur de flux. Ces deux étapes sont présentées dans la présente section, et permettront de quantifier les flux d'azote au sein du système.

1.1 Conceptualisation du modèle

L'approche choisie se concentre sur les flux d'azote, et se limitera à ce flux. Le modèle exposé à la figure 9 offre une représentation schématique et quantifiée de l'offre en azote disponible en Wallonie ainsi que de la demande en azote pour la fertilisation des cultures et prairies wallonnes.

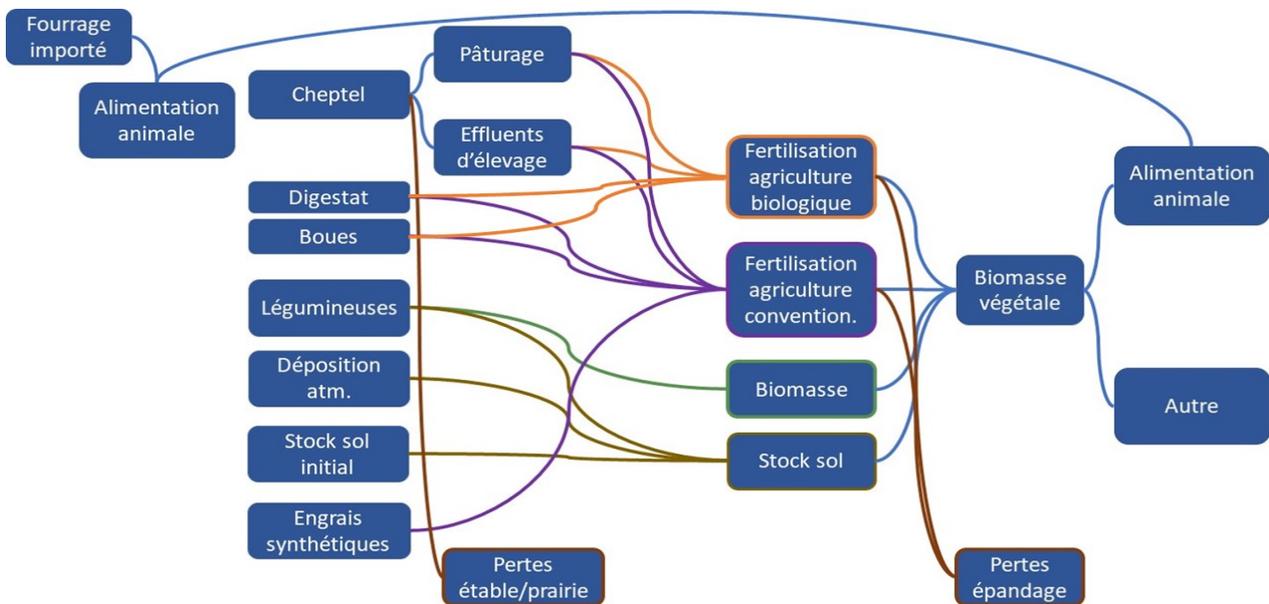


FIGURE 9 – Flux d'azote entre l'offre et la demande du système agricole

Les différents compartiments représentés à la figure 9 sont repris dans le modèle sous forme de matrices, et sont tous définis au point 1.2. L'offre en azote est caractérisée par l'azote provenant du cheptel, des légumineuses, des boues d'épuration et digestats, du dépôt atmosphérique et de l'azote synthétique. Le modèle considère que toutes les déjections du cheptel sont utilisées pour répondre à la demande de fertilisation des cultures et prairies au sein du système wallon, mais prend en compte les pertes d'azote ayant lieu à l'étable et durant le stockage.

Le compartiment des prairies est fertilisé par le pâturage des animaux et par l'apport supplémentaire d'azote synthétique et organique. Le compartiment des cultures, quant à lui, est dissocié en deux pratiques : l'AB, n'utilisant que des engrais organiques et respectant le cahier des charges de la filière, et l'Agriculture Conventioneerelle (AC), utilisant des engrais

synthétiques et organiques. L'AC englobe ici toutes les autres formes d'agriculture autres que l'AB, faute d'une typologie complète distinguant les agricultures wallonnes. Différents types de cultures sont aussi considérés, basés sur les informations fournies par les rapports de la Région wallonne et de l'équipe Sytra. Le stock d'engrais synthétiques est considéré comme infini puisqu'il provient de l'extérieur du système. Une part de l'azote appliqué sur les cultures se retrouve dans la biomasse produite, et une part est perdue par volatilisation, lessivage ou érosion. La biomasse se développe aussi à partir de l'azote contenu dans le sol, fonction de la matière organique, du dépôt atmosphérique et des légumineuses mais aussi d'un stock de sol initial. Il est assumé qu'une partie de la production des cultures et prairies retourne vers le cheptel via l'alimentation animale, complétée par du fourrage et des concentrés importés. L'implication des couverts végétaux n'est pas considérée dans le présent modèle et pourrait être étudiée dans de prochains travaux.

1.2 Elaboration du calculateur de flux

Le calculateur de flux est un fichier Excel reprenant les composantes du modèle sous forme de matrices. Les liens quantitatifs existant entre elles sont décrits via des formules mathématiques. Les données obtenues sont définies en termes d'unité d'azote.

Dans le cadre de cette étude, le terme "unité d'azote" sera employé tant pour décrire une unité d'azote sous forme minérale qu'une unité d'azote sous forme organique. Les termes azote organique et azote synthétique feront alors référence à la source de cette unité d'azote et non à sa forme. En effet, les engrais organiques (dénomination azote organique) contiennent une part d'azote sous forme minérale, directement assimilable par la plante et une part d'azote organique^a, minéralisée dans l'année ou les années à venir. Les bilans réalisés dans le cadre de cette étude sont des bilans annuels moyens. Dès lors, une "unité d'azote organique", comprend la part disponible de l'azote organique épandu lors d'une année donnée (soit sa forme minérale), ainsi que les parts de l'azote épandu lors des années précédentes, rendues disponibles après une ou plusieurs années. Il est également entendu qu'une unité d'azote organique ne sera pas disponible à 100%, même après plusieurs années, car les pertes sont plus importantes pour l'azote organique.

^a. L'azote organique ne peut être prélevé par les plantes et doit d'abord être minéralisé avant de leur être disponible.

Chaque feuille du calculateur représente une composante du système, décrite par des matrices. Chaque composante est quantifiée au moyen de paramètres d'entrée. Ces données permettent d'obtenir une quantité définie d'azote au moyen de convertisseurs, c'est-à-dire des constantes qui relient le paramètre d'entrée au paramètre de sortie. Des matrices intermédiaires, fonction des matrices d'entrée, sont obtenues et leur somme permettra de connaître les valeurs d'offre et de demande en azote.

Le calcul des surfaces et taille des cheptels repose sur des bases de données publiques. Les quantités d'azote produites et requises par type de pratique sont reprises de références

techniques plus spécifiques, telles que les rapports de Sytra ou des données de la littérature. Les données utilisées pour quantifier les pertes d'azote proviennent de rapports techniques et de données issues de modèles abordant aussi la problématique de l'azote en Région wallonne.

Ci-dessous, les feuilles matricielles sont présentées une par une en détaillant les sous-composantes du système, les paramètres d'entrées ainsi que les objets mathématiques qui y sont relatifs, c'est-à-dire les vecteurs et matrices.

Les données contenues dans les matrices ont été complétées et modifiées suite aux enquêtes réalisées auprès des différents experts du système agricole wallon et des flux d'azote (cfr. Matériel et méthode, partie 2.1.1). Les modifications proposées par les experts sont présentées dans la partie III de ce mémoire (Résultats).

1.2.1 *Offre en azote*

Les matrices relatives à l'offre en azote sont présentées dans les feuilles 1, 2 et 3. Il est important de différencier les sources d'azote primaires qui sont la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par les légumineuses, la synthèse d'azote minéral en industrie et l'importation de fourrage et paille. Les autres sources sont des sources secondaires, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas des sources à proprement parler, mais valorisent l'azote présent dans le système sous une forme davantage disponible.

Feuille 1 : Cheptel

Les cheptels, par leur production de déjections, sont source d'azote organique au sein du système. Utilisé pour la fertilisation des cultures, ce flux est en réalité un flux de recirculation, puisque le cheptel ne produit pas d'azote à proprement parler. Cette offre est divisée en deux flux :

- L'azote maîtrisable correspond aux déjections restituées à l'étable, ou engrais de ferme. Ce flux est divisé en deux catégories ; le fumier qui correspondent ici au mélange des excréments des animaux d'élevage et de la litière (paille et fourrage) sur laquelle ils sont en stabulation, et que le lisier, défini par le mélange liquide des excréments et de l'urine des animaux d'élevage en stabulation nue.
- L'azote non-maîtrisable correspond aux déjections restituées directement sur le pâturage.

La production de ces engrais de ferme dépend de la composition du cheptel wallon, et de ses conditions de stabulation.

Le modèle intègre sept espèces animales : les bovins, porcins, ovins, caprins, volailles, équidés et lapins. Pour chacune de ces espèces, différentes catégories, reprises dans les données statbel, différencient les individus selon leur âge, leur sexe et leur fonction¹⁶.

16. Les fonctions reprises dans le calculateur permettent de faire les distinction suivantes :
Pour les bovins : les vaches allaitantes, les vaches laitières, les races mixtes et les vaches de réforme.

Les conditions de stabulation influencent la quantification des flux d'azote maîtrisable et non-maîtrisable. Les animaux d'élevage en stabulation contribueront au flux maîtrisable, soit sous forme de fumier si cette stabulation est réalisée sur paille, soit de lisier si elle s'effectue sur sol nu. Les animaux sur pâturage contribueront au flux non-maîtrisable, destiné à la seule fertilisation des prairies. Le nombre de jours annuels de stabulation est renseigné dans le calculateur, qui indique également pour chaque espèce quelle proportion de cette stabulation est réalisée sur paille. Les paramètres d'entrée apparaissent dans le calculateur sous forme d'objets mathématiques, soit des matrices et des vecteurs décrits dans le tableau 19 à l'annexe 3. Ces informations sont ensuite converties en quantités d'azote (N) totale au moyen de deux convertisseurs¹⁷ :

- la quantité de déjections produite par jour et par individu : ce convertisseur dépend de l'espèce et de l'âge de l'individu.
- la teneur en azote des déjections : ce convertisseur dépend du type de flux (lisier, fumier ou azote non maîtrisable).

Ces convertisseurs apparaissent dans le calculateur sous forme de matrices décrites dans le tableau 20 à l'annexe 3.

Les équations intermédiaires utilisées pour évaluer les quantités d'azotes générées par le cheptel sont décrites ci-dessous :

$$d = c \cdot D \quad (3)$$

avec

d : le vecteur déjections du cheptel (Kg/jour/catégorie) ;

c : le vecteur cheptel (Nombre d'individus) ;

D : la matrice diagonale production de déjections (Kg/jour/individu).

Les quantités de fumier, de lisier, et d'azote directement transféré aux prairies s'obtiennent ensuite grâce aux équations suivantes :

$$Fumier = d \cdot E \cdot F \cdot T_f \quad (4)$$

avec

Fumier : le vecteur quantité d'azote apportée par le fumier (Kg N/cheptel) ;

E : la matrice diagonale nombre de jours annuels passés à l'étable (jours/an) ;

F : la matrice diagonale proportion du cheptel sur stabulation paillée (%) ;

T_f : la matrice diagonale teneur en azote du fumier (Kg N/Kg).

$$Lisier = d \cdot E \cdot L \cdot T_l \quad (5)$$

Pour les porcs : les truies gestantes et les truies saillies.

Pour les poulets : les poules pondeuses et poulets de chair.

Pour les autres espèces, les données statbel ne reprennent aucune typologie et tous les individus sont placés dans la même catégorie

17. Les convertisseurs sont des constantes du modèle permettant de convertir les paramètres d'entrée en données de production d'azote.

avec

Lisier : le vecteur quantité d'azote apportée par le lisier (Kg N/cheptel) ;

L : la matrice diagonale proportion du cheptel sur sol nu (%);

T_l : la matrice diagonale teneur en azote du fumier (Kg N/Kg).

$$Prairies = d \cdot P \cdot T_d \quad (6)$$

avec

Prairies : le vecteur quantité d'azote transféré aux prairies (Kg N/animal) ;

P : la matrice diagonale nombre de jours annuels passés sur prairies (jours/an) ;

T_d : la matrice diagonale teneur en azote des déjections (Kg N/Kg).

Tous les termes du vecteur relatifs à un même espèce (pour rappel : bovins, porcins, caprins, ovins, équins, volailles et lapins) sont ensuite agrégés, de façon à obtenir trois vecteurs de dimensions 1 x 7. Les vecteurs *Fumier*, *Lisier*, et *Prairies* obtenus à l'issue de ces opérations contiennent donc chacun 7 éléments et sont décrits dans le tableau 21 à l'annexe 3. Chacun de ces élément représente, pour une espèce donnée, la quantité d'azote fournie en un an correspondant à la catégorie quantifiée par le vecteur (fumier, lisier ou déjection sur prairie).

Feuille 2 : Légumineuses, digestat et boues d'épuration

En plus des engrais de ferme, le modèle intègre trois sources supplémentaires d'azote organique : l'azote provenant de la fixation symbiotique effectuée dans la zone racinaire des légumineuses, le digestat issu de la biométhanisation de matière organique et les boues issues des stations d'épuration.

Les légumineuses améliorent la fertilité du sol grâce à la fixation symbiotique de l'azote présent dans l'air (N_2) sous forme d'ammoniac. Elles sont une source d'azote pour le système à deux niveaux :

- Au niveau de leurs parties aériennes (biomasse exportée du système, dont une partie de l'azote contenu est dérivée de l'air) ;

- Au niveau de leur zone racinaire, qu'elles enrichissent en azote (solde azoté du sol).

Les superficies de légumineuses reprises dans Statbel (Statbel, 2020) ont été considérées pour l'apport de cet azote symbiotique. Il s'agit des pois protéagineux, fèves et féveroles, autres légumineuses récoltées en grains secs, luzerne, trèfle, mélanges, petits pois et haricots. Les superficies de prairies, qui contiennent un certain pourcentage de trèfles, ont également été comptabilisées.

Chacune de ces plantes enrichira le sol d'une quantité d'azote propre à son espèce, et à la superficie plantée. Pour chaque légumineuses, deux valeurs sont prises en compte dans le calculateur : la quantité totale d'azote fixée, ou N_{da} (azote dérivé de l'air) en kg/ha, et la quantité d'azote dérivée de l'air ayant un effet fertilisant sur la prochaine culture, ou solde du N_{da} en kg/ha. Les valeurs utilisées dans le calculateur sont issues, pour la luzerne, le trèfle, les haricots et les petits pois de Vance (1998), pour la féverole, de Guinet (2019), et pour les pois protéagineux du COMIFER (2013). Quant aux surfaces couvertes de mélanges de

légumineuses, les valeurs minimales parmi celles de tous les types présents dans le mélange ont été utilisées. Sur les surfaces de prairies permanentes et temporaires, c'est la proportion de trèfles qui impacte la fixation d'azote. Un apport de 2 kg/ha par pourcentage de trèfles est considéré¹⁸. Cette proportion de trèfles est très variable selon les types de prairies et les régions, et sera considérée comprise dans un intervalle allant de 0 à 80%¹⁹.

Les quantités d'azote fixées par les légumineuses sont ensuite calculées au moyen de l'équation 7 :

$$N_f = \sum_{i=1}^9 S_i \cdot f_i \quad (7)$$

avec :

N_f : la quantité d'azote fixé par les légumineuses (Kg N/an) ;

i = pois protéagineux, fèves et féveroles, autres légumineuses récoltées en grains secs, luzerne, trèfle, mélanges, petits pois, haricots, prairies ;

f_i : la quantité d'azote fixée par hectare (Kg N/ha/an).

Les quantités d'azote transférées vers le sol grâce aux légumineuses sont ensuite calculées au moyen de l'équation 8 :

$$N_l = \sum_{i=1}^9 S_i \cdot l_i \quad (8)$$

avec :

N_l : la quantité d'azote transférée vers le sol par les légumineuses (Kg N/an) ;

i = pois protéagineux, fèves et féveroles, autres légumineuses récoltées en grains secs, luzerne, trèfle, mélanges, petits pois, haricots, prairies ;

l_i : la quantité d'azote libérée dans le sol par hectare (Kg N/ha/an).

La quantité d'azote dérivé de l'air et exportée dans la biomasse est obtenue en soustrayant N_l à N_f .

La quantité de digestat produite, quant à elle, dépend d'un paramètre : le nombre de chaque type de centrale de biométhanisation en Wallonie. Le calculateur reprend quatre types de centrales dont les produits peuvent être utilisé pour la fertilisation des sols agricoles.

- Les centrales agricoles : Unité de biométhanisation utilisant en partie des intrants agricoles ;
- Les centrales microagricoles : unité de biométhanisation visant l'autonomie énergétique d'une exploitation agricole ;
- Les centrales FFOM²⁰ : unité de biométhanisation traitant la fraction ferment-cibles des déchets ménagers ;

18. Valeur obtenue suite aux enquêtes et confirmée dans (Chambre d'agriculture de l'Ariège, 2017), voir annexe 6 : ajustement du calculateur suite aux enquêtes

19. Même remarque

20. FFOM : Fraction Fermentiscible des Ordures Ménagères.

- Les centrales STEP²¹ : unité de biométhanisation installée dans une station d'épuration et utilisée pour la fermentation des boues d'épurations (Heneffe, 2019).

La quantité de boues d'épuration épandue disponible dépend de la proportion de ces boues utilisée pour l'agriculture.

Ces informations sont ensuite converties en quantités d'azote (N) au moyen de trois convertisseurs :

- la quantité de digestat produite par centrale (Kg/an/centrale)
- la proportion d'azote dans les différents digestats et dans les boues d'épuration (Kg d'azote/ T de digestat)
- la quantité de boues d'épuration produite annuellement (T/an)

Les quantités d'azote apportées au système via les boues et digestats est calculée au moyen de l'équation 9

$$N_{db} = \sum_{i=1}^4 n_i \cdot d_i \cdot t_{Ni} + p_b \cdot q_b \cdot t_{Nb} \quad (9)$$

avec :

- N_{db} : la quantité d'azote apportée par les boues d'épuration et le digestat (Kg N/an) ;
- i = agricole ; microagricole ; FFOM ; STEP ;
- n_i : le nombre de centrales de type i ;
- d_i : la quantité de digestat produite par la centrale de type i (Kg/an) ;
- t_{Ni} : la teneur en azote du digestat de la centrale i (Kg N/Kg) ;
- p_b : la proportion des boues d'épuration utilisée comme engrais (%) ;
- q_b : la quantité de boues d'épuration produite annuellement (Kg/an) ;
- t_{Nb} : la teneur en azote des boues d'épuration (Kg N/Kg).

Feuille 3 : Azote synthétique

L'offre en azote synthétique (N_{synth}) est calculée à partir des conseils de fertilisation des cultures et prairies. Ces conseils sont considérés pour chaque culture, avec une distinction faite pour les différents types de pratiques reprises dans le calculateur. Cette matrice est liée aux matrices de la demande de fertilisation et sera davantage expliquée dans la feuille 5 sur les besoins des cultures.

1.2.2 Demande en azote

Le modèle intègre également les besoins en azote des cultures²² de la surface agricole utile wallonne, selon différentes pratiques culturales propres à chacune des cultures considérées. Les variables et convertisseurs des matrices relatives aux besoins en azote des cultures sont présentés dans les feuilles 4 et 5, soit les matrices relatives aux superficies des cultures et les objets mathématiques relatifs aux besoins en azote de ces cultures.

21. STEP : Station d'Épuration

22. Dans cette partie, les prairies sont aussi reprises sous la dénomination "cultures"

Feuille 4 : Superficie des cultures

La matrice des superficies agricoles décompose la superficie agricole utile totale selon des types de cultures pour l'année 2019. Une part de la superficie est dédiée au pâturage des animaux en prairie pour un certain nombre de jours de l'année, l'autre part est dédiée aux cultures ou aux prairies à fauche.

La répartition de la superficie agricole utile est issue des chiffres agricoles 2019 rendus publics par Statbel (Statbel, 2020). Les surfaces sont présentées en grands types de cultures (céréales, cultures industrielles, pommes de terre, légumineuses récoltées en grains secs, légumes plein air, fourrage, cultures permanentes, prairies, terres arables non productives), elles-mêmes déclinées selon les cultures principales lorsque les besoins en azote et la surface agricole diffèrent fortement. Par exemple, pour les céréales autres que le froment d'hiver, l'orge d'hiver et l'épeautre, il est considéré que l'utilisation d'engrais est similaire à celle de l'épeautre et leur surface arable est donc combinée à celle l'épeautre (Antier et al., 2020). La matrice superficie est une matrice diagonale présentée au tableau 22.

Les superficies sont déclinées pour chaque culture selon quatre types de pratiques définies dans la section 1.2.2. Pour chaque type de culture, la somme cumulée des pratiques fait 100%. L'aspect temporel aurait dû être décrit par les rotations culturales ; les cultures suivant la tête de rotation bénéficient généralement d'une quantité d'azote dans le sol plus élevée (Chambre d'Agriculture de l'Isère, 2017). Toutefois, en raison de la faible disponibilité de données concernant les rotations de cultures pour une année spécifique, cet aspect n'a pas été repris dans le calculateur. Les différentes matrices relatives à ces paramètres et convertisseurs des surfaces sont décrites au tableau 22, dans l'annexe 3.

La matrice intermédiaire R, qui représente les surfaces déclinées par culture et par pratique, est obtenue par multiplication de la matrice des surfaces et de la part relative des pratiques :

$$SPrat = S \cdot Prat \quad (10)$$

Feuille 5 : Besoins en azote de la biomasse

Les *besoins* en azote des plantes ne changent pas en fonction du type de pratique. Par contre, la façon dont les sources sont réparties pour combler ces besoins varie quant à elle. Le calculateur distingue trois sources principales :

- L'azote présent dans le sol pouvant être prélevé par la plante ;
- L'azote fixé directement dans la biomasse dans le cas des légumineuses ;
- L'azote amené par les engrais répondant à la "*demande de fertilisation*" pour combler les besoins en azote de la plante. Celui-ci est décliné en fonction des pratiques agricoles.

Le stock de sol initial n'étant pas connu au départ, le calcul inverse a été fait, c'est-à-dire que ce stock initial est déduit à la fin des calculs pour combler les besoins en azote de la biomasse. La "*demande de fertilisation*" par pratique est connue à partir des conseils de fertilisation des cultures en engrais organiques et synthétiques provenant à la fois de données

de la littérature et des données d’expertes. Pour rappel, les enquêtes auprès des expertes ont contribué à renforcer la base de données du calculateur et ajuster les valeurs quand cela était nécessaire (voir 1.2).

Les quatre types de pratiques agricoles sont définis dans le calculateur selon leur niveau d’utilisation d’engrais. Généralement, un apport moins important d’engrais s’appuie sur une offre d’azote plus importante par le sol ou la biomasse. La typologie des pratiques est reprise du rapport sur la filière des céréales belges réalisé par l’équipe Sytra (Antier et al., 2020). Ce choix méthodologique se base sur les céréales qui représentent la superficie agricole la plus importante en Wallonie, et pour lesquelles des données complètes sont disponibles dans la littérature. La typologie choisie distingue les quatre pratiques suivantes :

- Le modèle de fertilisation conventionnelle intensive : le mode de culture est basé sur une utilisation systématisées d’intrants, dont les engrais azotés (Antier et al., 2020) dans le but de maximiser les rendements. La majorité des engrais azotés utilisés sont synthétiques.
- Le modèle de fertilisation conventionnelle raisonnée : les techniques agricoles utilisées sont similaires à celles du modèle intensif (recherche de très haut rendement) mais l’utilisation d’intrants y est optimisée (Antier et al., 2020). La part d’azote organique utilisée par ce modèle est plus importante que dans le modèle conventionnel intensif.
- Le modèle de fertilisation écologiquement intensive : le modèle cherche à réduire l’utilisation d’intrants, dont les engrais azotés (Antier et al., 2020). La part d’engrais organique utilisée est plus importante que dans les deux premiers modèles.
- Le modèle de fertilisation biologique : la totalité des engrais azotés utilisés sont organiques.

Lorsque les études de Sytra le permettent, cette différenciation de fertilisation entre les quatre pratiques apparaît dans le calculateur. Dans le cas contraire, la différence se fait entre les pratiques biologiques et conventionnelles. Les matrices de convertisseurs pour les besoins en azote des cultures et leur demande de fertilisation en azote organique et synthétique selon le type de pratique sont présentés dans le tableau 23, à l’annexe 3. La fertilisation d’engrais synthétiques pour l’AB apparaît dans les objets mathématiques mais les valeurs rentrées seront nulles.

Les besoins et conseils de fertilisation des cultures sont donnés par hectare. Ils proviennent principalement de la base de données du COMIFER et de l’ASBL RequaSud (COMIFER, 2013; ASBL REQUASUD, 2011) et ont été validés par deux experts. Des sources détaillées quant à la provenance des données utilisées pour chaque culture sont exposées à l’annexe 2. Pour obtenir ces quantités à l’échelle de la Région wallonne, il faut donc les multiplier par les surfaces relatives aux cultures (et selon les pratiques dans le cas de la demande de fertilisation). Les équations 11 et 1.2.2 présentent les objets mathématiques intermédiaires ainsi obtenus :

$$B_N = S \cdot B_{Nsurf} \quad (11)$$

avec :

B_N : le vecteur des besoins en azote des cultures (Kg N/an) ;

S = Surface relative à chaque culture en Région wallonne (ha) ;

B_N : Le convertisseur exprimant les besoins en azote par hectare de culture (Kg N/ha/an).

$$Ferti_{Ni} = SPrat \cdot Ferti_{S Ni} \quad (12)$$

avec :

i = organique, synthétique ;

$Ferti_{Ni}$: la matrice de demande de fertilisation en azote organique ou synthétique par cultures, selon le type de pratique (Kg Ni /an) ;

$SPrat$ = Surface relative à chaque culture selon le type de pratique en Région wallonne (ha) ;

$Ferti_{S Ni}$: la matrice de demande de fertilisation en azote organique ou synthétique par hectare de cultures, selon le type de pratique (Kg Ni /ha /an).

Les deux matrices ainsi obtenues, sont présentées à l'annexe 3, dans le tableau 24. Elles sont ensuite agrégées en sommant toutes les cultures afin d'obtenir un besoin total de la biomasse wallonne (B_{Ntot}) et une demande de fertilisation organique ou synthétique par pratique pour les cultures wallonnes ($Ferti_{Ntot}$). Les objets mathématiques sont présentés dans le même tableau 24 à l'annexe 3. Une distinction intermédiaire entre cultures et prairies peut être faite au niveau de la demande en fertilisation afin de faciliter la caractérisation des flux de l'offre vers la demande.

A défaut de pouvoir représenter correctement la diversité des pratiques, les pratiques conventionnelles sont regroupées ensemble. Les quantités d'azote organique et synthétique épandues sur les cultures et les prairies sont maintenant connues pour l'AC et l'AB. La somme des cultures et prairies, et de l'azote organique et synthétique, donne la demande de fertilisation pour l'AC et l'AB.

Les besoins en azote pour la biomasse sont connus, la demande de fertilisation est connue, et la quantité fixée dans la biomasse est aussi connue grâce à la feuille 2 (offre des légumineuses). Pourtant, le stock initial de sol ne peut déjà être calculé car une partie de l'azote épandu ne comble pas les besoins des cultures et est perdu. La feuille 6 reprend le calcul des pertes au stockage et à l'épandage. Le calcul du stock de sol pourra se faire en connaissant la quantité d'azote contribuant effectivement à la croissance de la biomasse. Celle-ci est connue par l'équation 1.2.2.

$$Ferti_{biomasse} = \sum Ferti_{Ntot} - Pertes_{tot} \quad (13)$$

avec :

$Ferti_{biomasse}$: l'azote contenu dans la biomasse et provenant de la fertilisation des engrais Kg N/an ;

$\sum Ferti_{Ntot}$: l'azote organique et synthétique total épandu sur les cultures et prairies (Kg N/an) ;

$Pertes_{tot}$: les pertes totales à l'épandage (kg N/an).

Le stock du sol initial vient finalement combler les besoins en azote des plantes. Son calcul se fait comme suit :

$$Stock_{sol} = B_{Ntot} - Ferti_{biomasse} - N_f - N_{dep} - N_{autre} \quad (14)$$

avec :

$Stock_{sol}$: Stock initial du sol contribuant à la fertilité (Kg N/an) ;

B_{Ntot} : Besoins de la biomasse (Kg N/an) ;

$Ferti_{biomasse}$: l'azote contenu dans la biomasse et provenant de la fertilisation des engrais (Kg N/an) ;

N_{dep} : l'azote issu de la déposition atmosphérique (Kg N/an) ;

N_{autre} : l'azote organique n'ayant pas contribué à la fertilisation des cultures et contribuant de ce fait au stock du sol (Kg N/an).

Feuille 6 : Pertes d'azote

Un certain pourcentage de l'azote introduit dans le système agricole est perdu par lessivage ainsi que par volatilisation et se retrouve dans l'environnement (air, eaux souterraines et eaux de surface). Ce pourcentage d'azote perdu dans l'environnement est distinct pour l'azote organique et l'azote minéral lorsqu'il s'agit de la volatilisation.

Les pertes par volatilisation ont lieu à deux niveaux : lors du stockage des engrais de ferme, à l'étable et au pâturage, et après l'épandage. A l'étable, 20% de l'azote contenu dans les engrais de ferme est volatisé (Sohier, 2011). Après l'épandage, 20% de l'azote organique, et 10% de l'azote synthétique est perdu dans l'air (Agence Flamande de l'Environnement et al., 2020).

Les pertes par lessivage ont lieu suite à l'épandage. Ce flux de sortie n'est pas un flux suivant une relation linéaire avec les entrées, et dépend de nombreux facteurs météorologiques, pédologiques et topographiques qui sortent des limites définies dans le cadre de ce mémoire. Le calculateur évalue donc ces pertes dans un intervalle de valeurs, allant de 6% à 11% des entrées. Ces valeurs ont été déduites des travaux de C. Sohier (Sohier, 2011), ayant quantifié ces pertes à l'échelle de la Région wallonne.

1.2.3 Indicateurs du système

Les définitions et calculs relatifs aux indicateurs d'autonomie du système wallon et du cheptel, ainsi qu'à l'indicateur d'efficience sont présentés ci-dessous.

a. Indicateurs d'autonomie

Autonomie du système wallon

Au sein du système azote wallon, une distinction est faite entre les sources organiques, produites ou recyclées par le système, et les sources synthétiques, synthétisées industriellement.

L'autonomie du système est mesurée par le rapport entre l'offre organique, et la demande en fertilisation synthétique et organique des cultures wallonnes. L'offre organique est évaluée par l'équation 15, la demande de fertilisation totale a été calculée précédemment en sommant les composantes de la matrice $Ferti_{Ntot}$ et l'autonomie est connue par le rapport des deux, à l'équation 16.

$$Ntot_{org} = Fumier + Lisier + Prairies + N_{db} + N_f \quad (15)$$

avec :

$Ntot_{org}$: La quantité totale d'azote organique produite par le système (kg N/an).

$$A_w = \frac{Ntot_{org}}{\sum Ferti_{Ntot}} \cdot 100 \quad (16)$$

avec :

A_w : l'autonomie du système wallon (%).

L'autonomie en sources primaire (A_{wprim} %) peut aussi être calculée à partir de l'azote fixé par les légumineuses comme seule source primaire du système-même. Celle-ci se calcule comme suit :

$$A_{wprim} = \frac{N_f}{\sum Ferti_{Ntot}} \cdot 100 \quad (17)$$

Autonomie en azote du cheptel

L'azote introduit dans le circuit de la fertilisation par le cheptel provient des pâtures, des fourrages et des concentrés utilisés pour nourrir le bétail. Ces fourrages sont issus de cultures wallonnes et d'importations. Une part de l'azote organique produit par le cheptel est donc une source d'azote indirectement importée. L'autonomie en azote du cheptel définit la part de l'azote issue du circuit local. Elle est calculée par le rapport entre les besoins nutritifs du cheptel en aliments azotés (données issues de Peyraud et al. (2012) et Bontemps et al. (2007)) et l'azote disponible dans les fourrages et prairies wallonnes (données issues de COMIFER (2013)).

Les besoins en azote du bétail sont calculés au moyen de la formule 18 :

$$B_c = \sum_{i=1}^{24} n_i \cdot b_i \quad (18)$$

avec

i = catégories d'animaux d'élevage ;

B_c : Le besoins annuel nutritif total en azote du cheptel wallon (Kg N/an) ;

n_i : le nombre d'individus au sein de chaque catégorie ;

b_i : les besoins annuels nutritifs en azote de chaque catégorie d'individus (Kg N/an/individu).

La quantité d'azote contenue dans les fourrages et les prairies wallonnes est calculée au

moyen de la formule 19 :

$$N_f = \sum_{i=1}^3 S_i \cdot r_i \cdot t_{Ni} + S_p \cdot t_{Np} \quad (19)$$

avec :

N_f : la quantité d'azote disponible dans le fourrage wallon (Kg/an) ;

i = types de fourrages, concentrés et herbe issue des prairies ;

S_i : la superficie de la culture i (Ha) ;

r_i : le rendement de la culture i (Kg/Ha/an) ;

t_{Ni} : la teneur en azote de la culture i (Kg N/Kg) ;

S_p : la superficie de prairies wallonnes (Ha) ;

t_{Np} : la teneur en azote des prairies (Kg N/Ha).

L'autonomie en azote du cheptel est ensuite calculée par le rapport de ces deux éléments :

$$A_c = \frac{N_f}{B_c} \cdot 100 \quad (20)$$

avec :

A_c : l'autonomie en azote du cheptel (%).

b. Efficience du système

L'efficience d'utilisation d'azote du système (ϵ) est calculée via le rapport entre l'azote contribuant à la production de biomasse (ou besoins de la biomasse, B_{Ntot}) et l'azote total investi dans le système. Cet azote total peut être calculé de deux manières différentes qui mènent au même résultat, soit à partir de l'offre totale en azote organique, soit à partir de la somme de la biomasse finale, des pertes au stockage et à l'épandage et d'un surplus s'il y en a un. La première méthode est présentée ci-dessous.

$$\epsilon = \frac{B_{Ntot}}{Fumier + Lisier + Prairies + N_{db} + N_f + N_{dep} + Stock_{sol} + N_{synth}} \cdot 100 \quad (21)$$

avec :

ϵ = efficience d'utilisation d'azote du système (%).

2 Scénarisation des perspectives d'évolution

2.1 Méthodologie d'enquête

Les scénarios sont créés sur base d'une co-construction avec les experts, au moyen d'entretiens semi-dirigés, durant lesquels les bases de ces scénarios leur ont été présentées. Sur base des conclusions tirées lors de l'étude de la littérature, les experts à rencontrer ont été choisis. Cette démarche de sélection est expliquée au point 2.1.1. Un guide d'entretien a ensuite été élaboré, afin de permettre une co-construction des scénarios avec les experts. Enfin, les entretiens ont été retranscrits, afin de faire ressortir, pour chacun des points étudiés, les grandes tendances et divergences d'opinions exprimées par les experts. La création du guide d'entretien et le canevas pour l'analyse des enquêtes sont expliqués à l'annexe 5.

2.1.1 Personnes rencontrées

Les experts rencontrés ont été sélectionnés spécifiquement dans le cadre de cette étude, avec l'objectif de rencontrer des profils diversifiés. Après une analyse approfondie de la question des flux d'azote, du système agricole wallon et des systèmes d'intégration culture-élevage, les domaines impactant le système et les scénarios ont été sélectionnés. Pour chacun de ces domaines, au moins un profil d'expert a été rencontré : systèmes agraires durables, systèmes d'intégration culture-élevage, grandes cultures, élevage, cultures fourragères, gestion des prairies, utilisation d'engrais azotés, PGDA, création de bilans azotés, comportement des flux d'azote dans les sols et impact environnemental de l'utilisation d'azote. 17 experts (au moins un par domaine) ont été rencontrés dans le cadre de cette étude. Une liste reprenant les expertises précises des personnes rencontrées ainsi que les institutions auxquelles elles appartiennent est présentée à l'annexe 4. Une carte des acteurs a été élaborée à la figure 10, et permet de situer les institutions auxquelles les experts rencontrés appartiennent, en fonction de leur point d'influence dans le système de l'azote agricole, ainsi que leur échelle de travail.

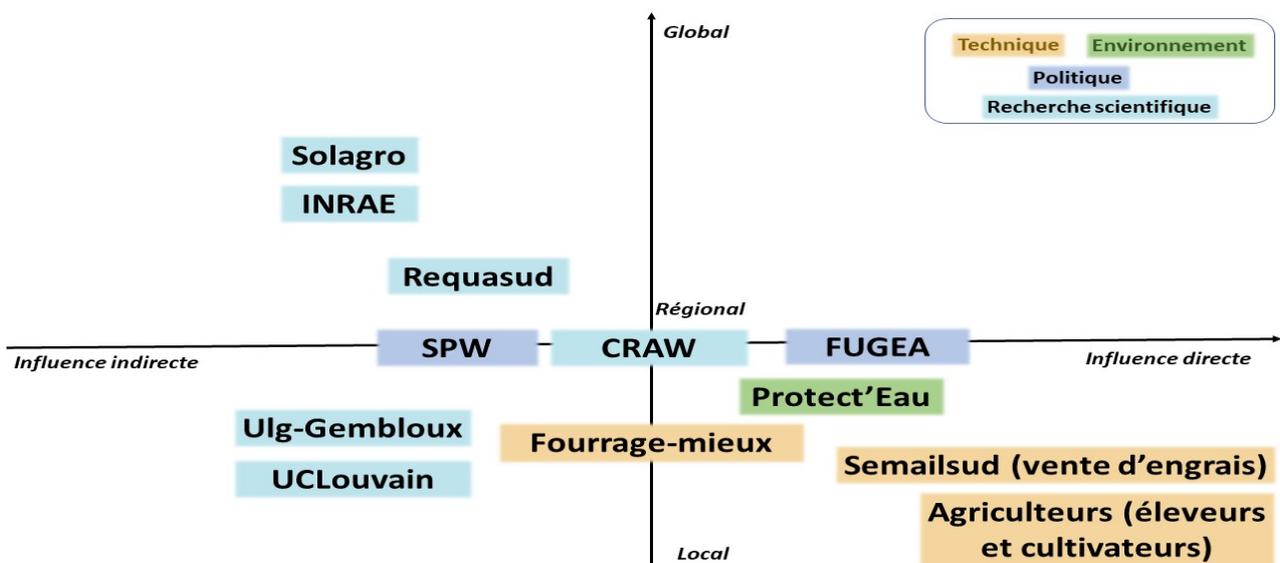


FIGURE 10 – Carte des acteurs

Le niveau local correspond à l'exploitation agricole, le niveau régional à la Région wallonne et le niveau global est utilisé pour situer les experts français, dont l'approche n'était pas centrée sur le système wallon. Une influence directe sur le cycle de l'azote consiste en la mise en pratique de techniques spécifiques (ou conseils de mise en pratique), tandis que l'influence indirecte s'exprime par la mise en place de réglementations ou la réalisation d'études scientifiques.

2.1.2 *Mise en oeuvre des enquêtes*

Un guide d'entretien a été élaboré, afin de présenter aux experts les points de départ proposés pour chaque scénario, et d'aborder les questions techniques et socio-économiques relatives à la mise en oeuvre des scénarios. Ce guide d'entretien est disponible à l'annexe 5. Les deux premières parties du guides reprennent une brève présentation, ainsi qu'une description plus approfondie de l'étude et de ses objectifs. La troisième partie du guide est une feuille de route utilisée pour aborder les scénarios. Chaque scénario est abordé distinctement. Après présentation des points de départ, le guide aborde la mise en oeuvre et les conséquences du scénario 1 en 4 sous-points : les cultures, l'élevage, les difficultés rencontrées par les agriculteurs et un point "autre"²³ adapté avant l'entretien à l'expertise de la personne rencontrée. Le scénario 2 est abordé en 2 sous-points : la diminution optimale du cheptel, elle même divisée en sous-points, et un point autre²⁴.

Après retranscription des entretiens, toutes les informations relatives à un même point ont été rassemblées, permettant ainsi d'avoir une vue d'ensemble de toutes les opinions exprimées sur un même sujet, et d'en faire ressortir les convergences et divergences.

2.2 Points de départ des scénarios

Les scénarios ont été construits suite aux résultats des enquêtes semi-dirigées. Leur point de départ tel que présenté aux experts est décrit ci-dessous et leur évolution détaillée sera présentée dans la partie résultats.

Les deux scénarios sont évalués pour l'horizon 2030 en jouant sur les paramètres d'entrée relatifs à l'offre et à la demande. La mise en oeuvre de ces scénarios, modifie les effectifs du cheptel, la distribution de la SAU et la part des différentes pratiques agricoles, ce qui permet une nouvelle quantification des flux d'azote et des trois indicateurs du système. Les scénarios pourront ainsi servir de base, dans l'optique d'ouvrir un débat sur la gestion des flux d'azote en Wallonie.

2.2.1 *Scénario 1 : Augmentation de la superficie cultivée en AB*

Le Service Public de Wallonie (SPW) a fixé un objectif à la Wallonie : atteindre 30% de sa SAU cultivée en AB d'ici 2030.

23. Dans ce point, les questions de changements climatiques, de pollution environnementale, de viabilité économique et d'habitudes de consommation ont entre autres été abordées.

24. Même remarque.

Le cahier de charges de l'AB exige que la fertilisation du sol soit uniquement réalisée avec des engrais organiques, l'utilisation d'azote synthétique est proscrite. L'AB utilise également en moyenne moins d'unités d'azote par hectare que l'agriculture conventionnelle intensive ou raisonnée (Antier et al., 2020). Le scénario évalue donc le système lorsque 30% de la SAU sont cultivés en AB, considérant aussi une évolution du cheptel.

2.2.2 Scénario 2 : Equilibre entre la taille du cheptel et le maintien des prairies et de l'offre en azote organique

Les tendances actuelles prévoient une diminution du cheptel wallon, déjà actuellement observée, qui se prolongerait dans les années à venir (Riera et al., 2019). Or l'élevage est un élément important pour le maintien des prairies permanentes mais aussi pour le maintien d'une offre en azote organique suffisante pour répondre à la demande en azote organique des cultures.

Ce deuxième scénario cherche à atteindre l'autonomie alimentaire en azote digestible pour le cheptel (2^{me} indicateur d'autonomie) d'ici 2030. Les effectifs du cheptel ainsi que la distribution des surfaces de la SAU sont alors modifiés.

III Résultats

1 Limites de l'étude et incertitudes

1.1 Rappel du périmètre de l'étude

L'outil réalisé dans le cadre de ce mémoire est appelé COCOON (COmpere et COrnu pour une gestion Optimisée de l'azote (N)). C'est un modèle établissant des relations entre des flux d'entrée et des flux de sortie. Le modèle utilise des données quantitatives issues de la littérature, complétées ou corrigées suite aux entretiens réalisés auprès d'experts. L'objectif de ce calculateur est de quantifier les flux d'azote en Wallonie, afin d'évaluer si des tensions existent dans le modèle actuel. Cet outil a été conçu pour évaluer des ordres de grandeur suffisamment précis pour être comparés et pour servir de base à l'ouverture d'un débat quant au devenir de ces flux. Les quatre piliers du calculateur sont présentés ci-dessous.

- Le calculateur est une représentation du système agricole wallon, et les flux d'azote présentés sont limités aux flux d'entrée et de sortie relatifs aux élevages et aux cultures.
- Le modèle quantifie les flux d'azote. Les besoins en fertilité, l'autonomie²⁵ et l'efficacité²⁶ du système sont ici exprimés uniquement par rapport à cet élément.
- L'échelle étudiée est celle de la Région wallonne. La réalité représentée par l'outil est celle d'un système global, et non une représentation agronomique à l'échelle de la parcelle.
- Le bilan réalisé est un bilan annuel moyen, c'est-à-dire qu'il représente à l'échelle d'une année les entrées moyennes d'azote provenant des années actuelles et antérieures. Les résultats de ce travail permettent d'observer, pour une année type, l'ensemble des entrées et des sorties d'azote au sein du système agricole. La diversité inter-annuelle pouvant exister à l'échelle d'une parcelle (rotations) sort du cadre des objectifs de ce mémoire.

1.2 Ajustement du calculateur

Les enquêtes auprès des expertes ont permis de mettre en évidence certaines lacunes du calculateur. Toutes les remarques émises n'ont pas pu être prises en compte, soit parce qu'elles nécessitaient l'ajout de données inexistantes dans la littérature, soit parce qu'elles sortaient des limites définies pour ce calculateur (partie 1.1). Ces remarques se retrouvent dans la liste des incertitudes et limites du modèle (partie 1.3). Un certain nombre d'éléments du calculateur ayant fait l'objet de remarques émises par les expertes ont été corrigés suite aux entretiens. Les modifications apportées suite aux enquêtes sont présentées par ordre de matrices à l'annexe 6.

25. L'autonomie évaluée dans le cadre de ce travail est double : L'autonomie du système wallon en azote, et l'autonomie alimentaire du cheptel en azote digestible. Ces deux concepts sont définis dans la partie "Matériel et méthodes", au point 1.2.3.

26. L'efficacité du système évaluée dans le cadre de ce travail est définie dans la partie "Matériel et méthodes", au point 1.2.3.

1.3 Principales hypothèses utilisées et incertitudes relatives aux données

Toutes les données utilisées pour la réalisation du calculateur comportent une part d'incertitude, car aucune base de données ne peut refléter la réalité du terrain dans son entièreté. L'objectif de cette section n'est pas de revenir sur les incertitudes propres à chacune de ces bases de données, mais de mettre en avant les données inexistantes dans la littérature, et d'expliquer soit les hypothèses émises pour combler ces manques (H), soit les raisons pour lesquelles ces données n'ont pas été prises en compte (I). Les hypothèses utilisées, et incertitudes résultant suite à la réalisation de ce calculateur sont présentées par matrice aux annexes 7 et 8.

2 Les flux d'azote en Wallonie : cartographie et tensions

Le calculateur de flux réalisé à l'issue de ce mémoire a permis une première quantification des flux d'azote à l'échelle de la Wallonie. Ce bilan chiffré est un bilan annuel, effectué pour l'année 2019.

2.1 Quantification des flux d'azote en Wallonie

L'azote utilisé pour la fertilisation des cultures dans le système agricole wallon provient de six sources : une source synthétique (la fixation industrielle du diazote par le procédé Haber-Bosch), quatre sources organiques, et un stock de sol initial²⁷, également considéré organique.

Les sources organiques sont réparties en quatre pôles :

- ▶ L'azote non-maîtrisable reprend les sources azotées émises directement sur la parcelle ; les déjections de cheptel pâturant, qui ne peuvent pas être transportées hors des pâturages.

- ▶ L'azote maîtrisable, à l'inverse, reprend toutes les sources organiques transportables et dont il est possible de déterminer librement l'allocation. Ce pôle comprend les déjections du cheptel en stabulation, le digestat issu de la biométhanisation, et les boues d'épuration utilisées en agriculture. Lors du stockage en étable ou en prairie, une partie du flux issu du cheptel est perdue par volatilisation.

- ▶ Le pôle biomasse représente l'azote fixé par les légumineuses se retrouvant directement dans leurs parties aériennes.

- ▶ Le pôle du stock sol est alimenté par l'azote fixé par les légumineuses se retrouvant dans leurs parties racinaires. L'azote issu de la déposition atmosphérique, ainsi que le stock du sol initial entrent également dans la composition du pôle sol.

Ces flux sont dirigés vers trois destinations potentielles :

- ▶ Une partie est utilisée pour la fertilisation des cultures et des prairies. Ce pôle est séparé selon la fertilisation en Agriculture Biologique (Ferti. AB), dont la fertilisation est exclusivement organique, et selon la fertilisation en Agriculture Conventiionnelle (Ferti. AC), dont la fertilisation est organique et minérale.

- ▶ Une partie de l'azote inséré dans le système rejoint le pôle stock du sol.

- ▶ Une partie est perdue par volatilisation lors du stockage.

Le pôle biomasse est transposé depuis le pôle source organique biomasse. Ces flux et les liens quantitatifs existant entre eux sont illustrés par la figure 11.

27. Le stock du sol initial a été quantifié par la différence entre les besoins totaux des cultures et prairies en azote, et l'azote effectivement épandu. La caractérisation de ce pôle n'a pas été étudiée en profondeur dans le cadre de cette étude, mais l'azote qu'il contient provient très probablement de la biomasse du sol, composée de résidus végétaux, insectes et invertébrés, ainsi que par des bactéries réalisant la fixation non symbiotique de l'azote (dont *Azotobacter spp*).

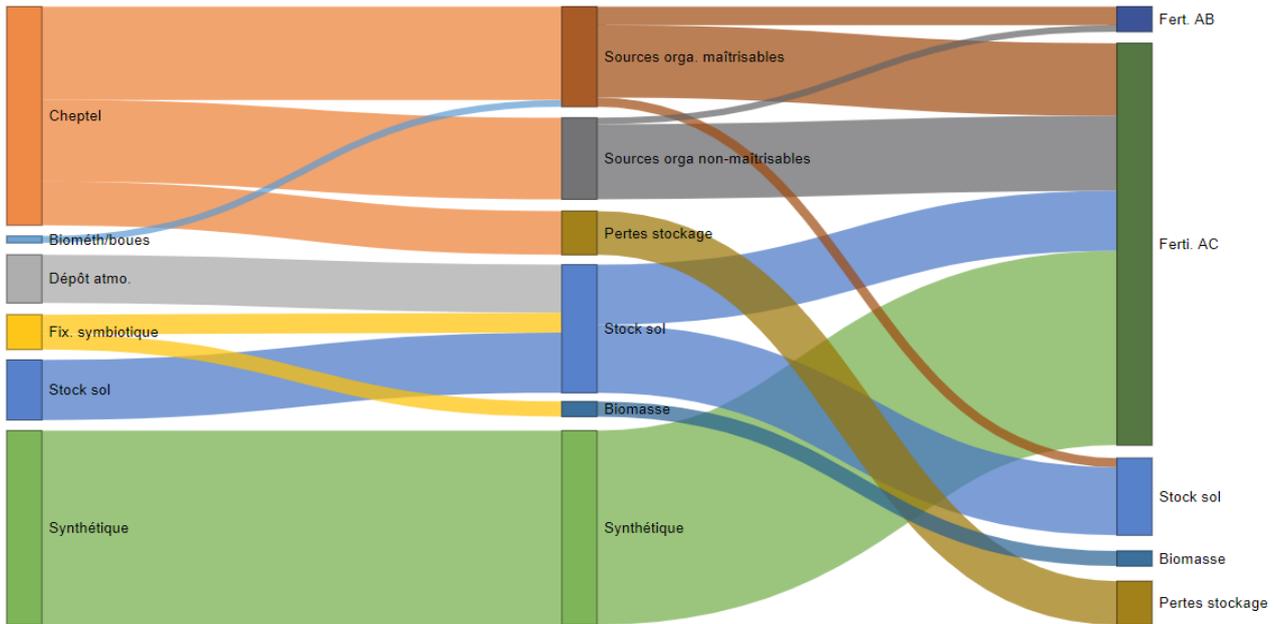


FIGURE 11 – Caractérisation des flux d'azote au sein du système agricole wallon

Les valeurs quantitatives de ces flux, exprimées en milliers de tonnes par an (kT/an), sont présentées dans le tableau 1. Un intervalle de valeurs a été pris en compte pour deux éléments du système, sur lesquels une incertitude très élevée persistait ; il s'agit du pourcentage de trèfles dans les prairies (influençant la quantité d'azote fixé de façon symbiotique), et le pourcentage d'azote perdu par lessivage.

Pour l'année 2019, le pourcentage de trèfles en prairie est fixé à 18%²⁸, et le système est évalué pour les pertes par lessivage à l'épandage de 11%²⁹. L'influence des intervalles de valeurs, pour la proportion de trèfles en prairie (de 10% à 80%) et pour la part de pertes par lessivage à l'épandage (de 6% à 11%), est discutée dans les résultats. Ces intervalles sont présentés dans le tableau 26, à l'annexe 9.

Les seules sources primaires d'azote dans le système sont l'azote synthétique, l'azote fixé par les légumineuses et l'azote issu de la déposition atmosphérique. Les flux issus du cheptel et de la biométhanisation sont des flux de recirculation, qui recyclent de l'azote originellement présent dans le système (Afterres, Solagro et al., 2017).

28. Les experts ont mis en avant la très forte variabilité de ce pourcentage, qui varie entre 10 et 80% selon le type de prairie étudié. Cet intervalle a été étudié, et la valeur de 18% a été fixée par référence à la littérature dans laquelle les valeurs les plus fréquentes sont situées entre 10 et 25%.

29. Le modèle utilisé par la Région wallonne évalue des pertes par lessivage à hauteur de 6 à 11% des entrées d'intrants azotés. La valeur de 11% a été fixée, afin de ne pas sous-estimer ces pertes qui sont amenées à augmenter avec les changements climatiques (E8).

Tableau 1 – Valeurs des compartiments présentés à la figure 11 (kT/an)

Bilan d'azote actuel (kT/an)	Offre	Demande
Cheptel	90,8	18,2
<i>Sources organiques non-maîtrisables</i>	<i>33,9</i>	
<i>Sources organiques maîtrisables</i>	<i>38,7</i>	
<i>Pertes au stockage</i>	<i>18,2</i>	<i>18,2</i>
Biométhanisation/boues	2,8	
Dépôt atmosphérique	20,0	
Fixation symbiotique	14,5	6,3
<i>Stock sol</i>	<i>8,2</i>	
<i>Biomasse</i>	<i>6,3</i>	<i>6,3</i>
Synthétique	80,8	
Stock sol	24,9	57,0
<i>Initial</i>	<i>24,9</i>	<i>24,9</i>
<i>Dépôt atmosphérique</i>		<i>20,0</i>
<i>Fixation symbiotique</i>		<i>8,2</i>
<i>Cheptel et biométhanisation</i>		<i>3,8</i>
Fertilisation AC		141,9
<i>Dont prairies</i>		<i>52,6</i>
<i>Dont cultures</i>		<i>53,5</i>
<i>Dont pertes</i>		<i>35,8</i>
Fertilisation AB		10,4
<i>Dont prairies</i>		<i>6,6</i>
<i>Dont cultures</i>		<i>0,6</i>
<i>Dont pertes</i>		<i>3,2</i>
Total	233,8	233,8

Les sources organiques d'azote représentent 153 kT/an soit 65% des entrées du système. En tenant compte des pertes par volatilisation occurring lors du stockage des engrais de ferme (20%), cette quantité descend à 134,8 kT/an, soit 59% des sources de fertilisation synthétiques et organiques. C'est le cheptel qui remplit majoritairement le compartiment offre organique, avec 54% de cette offre provenant des engrais de ferme et du pâturage.

La demande la plus importante en fertilisation azotée est issue de l'agriculture conventionnelle (AC) (141,9 kT/an), qui consomme 61% de l'offre. L'agriculture biologique (AB), quant à elle, utilise 10,4 kT d'azote chaque année, soit 5% de l'offre totale. Cette différence de besoins entre l'AC et l'AB (l'AB consomme 7% de ce que l'AC exige en termes d'azote, soit 14 fois moins) est due à deux facteurs : une superficie nettement moins importante pour les cultures et les prairies en AB (12% de la SAU), et des quantités d'azote épandues par hectare en moyenne moins élevées en AB.

La demande de fertilisation en AB est exclusivement organique et provient à 92% des prairies qui recouvrent 73% de la SAU cultivée en AB (prairies permanentes) (A. Beaudelot, M. Maillieux, 2020). Le pâturage couvre 36% de leur fertilisation en AB et 50% en AC. Cette différence de pâturage entre l'AB et l'AC est expliquée par le cahier de charges de l'agriculture biologique imposant la charge maximale de 2 UGB (Unité Gros Bétail) par hectare. En AC,

la fertilisation organique dont 69% sont à destination des prairies, ne représente que 43% de la fertilisation totale. La fertilisation en azote synthétique couvre 73% de la fertilisation des cultures en AC.

L'offre en azote organique du cheptel et de la biométhanisation/boues dépasse la demande de fertilisation en azote organique. Ce surplus de 3,8 kT/an alimente alors le stock du sol qui contribue aussi à la croissance de la biomasse.

20% de l'azote issu des effluents d'élevage est perdu par volatilisation lors du stockage. Bien que le PGDA impose des normes strictes en termes de stockage des effluents d'élevage, ces pertes semblent quasiment inévitables. Des pertes par volatilisation s'observent également en prairie lors du pâturage. Les pertes à l'épandage quant à elles représentent 25% de la fertilisation en AC et 31% en AB. Les phénomènes à l'origine de ces pertes sont le lessivage, l'érosion des sols et la volatilisation. L'écart de pertes entre AC et AB provient du fait que les engrais synthétiques, qui combinent 57% de la fertilisation en AC subissent des pertes par volatilisation deux fois moins importantes que les engrais organiques. Au total, 24% des flux d'azote sont perdus du système. Ces flux de pertes sont représentés à l'annexe 10 (figure 16), de façon analogue aux flux présentés à la figure 11 .

Les intervalles de valeurs présentés à l'annexe 9 mettent en évidence la sensibilité du modèle à la proportion de trèfles en prairie. En effet, pour un pourcentage allant de 10 à 80%, le stock de la fixation symbiotique varie de 9 à 57,4 kT/an. Cette différence s'apparente à un manque d'azote dans l'offre du système à hauteur de 5,6 kT/an lorsque ce pourcentage vaut 10, ou à un surplus de 42,8 kT/an lorsqu'il vaut 80. Le surplus pourrait être utilisé afin de diminuer la demande de fertilisation en azote synthétique. Diminuer les pertes par lessivage de 5% augmente la part des engrais disponible pour la biomasse de 74 à 79%.

➔ La représentation des flux à la figure 11 montre qu'en l'état actuel des choses, les sources organiques ne suffisent pas à elles seules à répondre à la demande de fertilisation des cultures. Cette question est approfondie au point 2.3.

2.2 Validation des données obtenues

Dans un deuxième temps de ce travail, le calculateur est utilisé pour illustrer des scénarios relatifs au futur des flux azotés en Région wallonne. Pour pouvoir effectuer ces projections, une phase de validation préliminaire permet de vérifier la pertinence des flux calculés par l'outil. Le tableau 2 présente une comparaison des chiffres obtenus³⁰ effectuée avec deux outils similaires ; le modèle EPICgrid (Région wallonne) et le modèle MoSUT (France)³¹.

30. Les chiffres présentés par le modèle COCOON sont ceux évalués à l'échelle de la Région wallonne.

31. Les chiffres français présentés ont été adaptés pour correspondre de façon proportionnelle à la SAU wallonne, ceci afin d'être interprétés de façon pertinente.

• Le modèle **EPICgrid** est un modèle hydrologique de bassins versants adapté par C. Sohier (Gembloux Agro-Bio Tech). Au moyen de données climatiques, topologiques et pédologiques, il établit de manière annuelle un bilan azoté à l'échelle de la Région wallonne, divisée en différents bassins versants.

• Le modèle **MoSUT** (Modèle Systémique d'Utilisation des Terres) est une matrice de modélisation systémique de l'utilisation des terres (Solagro, 2015). Ce modèle lie des ressources disponibles aux besoins de la population et les adapte en fonction des surfaces disponibles. Le modèle est paramétré par divers facteurs externes tels que le climat, le sol ou encore la démographie. Il est développé pour le territoire français.

Tableau 2 – Comparaison des valeurs obtenues par le calculateur avec celles des modèles EPICgrid et MoSUT (kT/an)

	Modèle COCOON	Modèle Epicgrid	Modèle MoSUT
Minéral		95,0	
<i>Synthétique</i>	80,5		61,8
<i>Partie minérale engrais organiques</i>	<i>Non calculé</i>		
Sources organiques	75,4	79,0	51,7
<i>Cheptel</i> ³²	72,6		51,7
<i>Biométhanisation/Boues</i> ³³	2,8		0
Stock du sol	24,9	9,0	22,7
Fixation symbiotique	14,5	19,0	10,4
Dépôt atmosphérique	20,0	21,0	20,8
Pertes	57,4		23,5
Pertes au stockage	18,2		
Pertes au champ	39,2	41,0	
Total	272,7	264,0	190,9

Tous les modèles comportent leur part d'incertitude, celle-ci résulte des choix posés pour représenter une réalité. Les chiffres obtenus par deux modèles différents ne seront donc jamais identiques. Les entrées d'engrais minéraux d'EPICgrid sont plus élevées de 15% par rapport aux entrées synthétiques du calculateur. Cela est dû à une différence méthodologique de quantification ; EPICgrid mesure en effet les entrées *minérales*, tandis que le calculateur évalue les entrées *synthétiques*. EPICgrid considère une minéralisation d'une part des engrais de ferme, comptabilisée dans le pôle minéral. De même, EPICgrid rassemble en un seul et même pôle toutes les entrées organiques (engrais de ferme, résidus de cultures et engrais verts), tandis que le calculateur COCOON effectue une distinction entre ces différentes sources et ne prend pas en compte les résidus de cultures et engrais verts, qui sont comptabilisés dans le compartiment stock du sol. Le modèle MoSUT utilise une méthodologie similaire à celle du modèle COCOON et quantifie les entrées d'azote synthétique et les entrées du cheptel, sans faire la distinction entre entrées minérales et organiques. De façon analogue au modèle COCOON,

32. La quantité d'azote présentée est l'azote total contenu dans les engrais dont une partie est minérale.

33. Même remarque.

MoSUT comptabilise les résidus de cultures et engrais verts dans le compartiment stock du sol, et non dans les engrais organiques. L'organisation de ces trois premiers compartiments n'étant pas identique pour les modèles EPICgrid et COCOON, une comparaison de la somme des trois est pertinente. Au sein du modèle EPICgrid, cette somme vaut 183 kT/an. Pour le calculateur COCOON, elle est égale à 181 kT/an. Une différence de 1% qui appuie la pertinence du modèle dans le cadre d'une quantification des flux azotés.

Une comparaison des pertes est compliquée à établir, puisque les pertes au stockage n'apparaissent pas dans le bilan EPICgrid. Les pertes au champ sont quant à elles très proches, avec une différence de 5%.

→ *L'intérêt d'un deuxième calculateur de bilan azoté pour la Région wallonne*

Le calculateur réalisé dans le cadre de ce mémoire est un outil assez complémentaire à EPICgrid. Ce dernier est un outil solide, reposant sur une forte base de données. C'est donc un bon repère à utiliser pour valider les flux quantifiés. Le calculateur, quant à lui, a l'avantage d'être facilement manipulable, et il offre la possibilité de modifier ou de rajouter très simplement des paramètres d'entrée, ce qui en fait un outil utile pour représenter la diversité des possibles dans le cadre de la réalisation de scénarios. L'outil EPICgrid est un algorithme certes puissant, mais qui prend plusieurs semaines à tourner et à présenter des résultats, ce qui le rend difficilement utilisable dans le cadre d'une scénarisation.

Par rapport au modèle français, une différence d'une trentaine de pourcents est quasi systématiquement observable. Cela pourrait être dû à une conversion biaisée au niveau des surfaces de la SAU qui comptent notamment de nombreux alpages³⁴ dont la gestion agricole est très différente. Cela pourrait notamment expliquer la différence de 24% observée au niveau de l'utilisation d'engrais minéraux.

2.3 Indicateurs d'autonomie

2.3.1 *Autonomie du système wallon*

L'autonomie du système wallon en azote est évaluée par le rapport entre l'offre en engrais organiques et la demande des cultures et prairies en fertilisation azotée, ces valeurs sont reprises dans le tableau 3.

Tableau 3 – Données utilisées pour le calcul de l'autonomie du système

	Demande en fertilisation		Offre en azote organique				Autonomie	
	Fertilisation AB	Fertilisation AC	Sources primaires	Flux de recirculation			Sources organiques	Sources primaires
			Fixation symbiotique	Biométhanisation /boues	Cheptel	Pertes au stockage		
(kT/an)	10,4	141,9	14,5	2,8	90,8	18,2	59%	10%

Pour l'année 2019, cette demande était couverte à hauteur de 59% ($\frac{14,5+2,8+90,8-18,2}{10,4+141,9}$) par

34. 41% des prairies permanentes en France se trouvaient dans les régions montagneuses en 2010.

des flux organiques. Le reste provient d'azote synthétique fixé industriellement. L'autonomie du système augmente fortement quand la part de trèfles en prairie est élevée à 80% ; elle atteint alors 87%, grâce à l'augmentation de la fixation symbiotique.

L'autonomie en sources primaires est également évaluée. Ces sources comprennent tous les flux qui ne sont pas issus de la recirculation. Dans le cas de l'offre organique, il s'agit de la fixation symbiotique. Cette distinction est faite car une part importante de l'azote émis par le cheptel est issue du recyclage d'azote contenu dans l'herbe des prairies, qui sont en partie fertilisées par de l'azote synthétique, puisque 82% des prairies sont en AC. Suivant ce principe, l'autonomie du système serait en réalité de 10%³⁵ ($\frac{14,5}{10,4+141,9}$).

2.3.2 Autonomie alimentaire du cheptel

L'autonomie alimentaire du cheptel³⁶ a été évaluée par le rapport entre les besoins alimentaires en azote digestible des différentes catégories d'animaux d'élevage et la quantité d'azote fournie par les prairies, les fourrages et les concentrés. Les co-produits de cultures valorisés pour l'alimentation animale étant mal connus, ils n'ont pas été repris dans le calcul de l'indicateur mais leur intervalle sera discuté. Ces valeurs sont présentées au tableau 4, Les cultures considérées dans l'offre en azote pour le cheptel sont celles à destination de l'alimentation animale, leur fertilisation est également présentée.

Tableau 4 – Données utilisées pour le calcul de l'autonomie alimentaire du cheptel

	Demande en azote	Offre en azote digestible		Fertilisation des cultures et prairies				Autonomie
		Besoins cheptel	Prairies	Cultures	N _{synth} prairies	N _{org} prairies	N _{synth} cultures	
(kT/an)	126,1	61,8	40,0	51,9	29,6	20,4	9,3	81%

Pour l'année 2019, l'alimentation azotée du cheptel était couverte à hauteur de 80,5% ($\frac{61,8+40,0}{126,1}$) par les cultures et prairies wallonnes. Les besoins complémentaires en azote sont fournis par des concentrés et fourrages importés. Ce chiffre n'est pas un indicateur d'autonomie fourragère, mais bien d'autonomie azotée. Les co-produits des betteraves sucrières représentent environ 7,2 kT/an, ce qui augmenterait cette autonomie à 86%. Leur valorisation dans l'alimentation animale semble donc non négligeable.

2.4 Indicateur d'efficience

L'efficience du système wallon en azote est évaluée par le rapport entre la production de biomasse en termes d'unités d'azote, et les entrées totales en azote (sources organiques et synthétiques confondues). Le tableau 5 présente les résultats pour ce calcul d'efficience.

35. L'autonomie en sources organiques primaires atteint 38% lorsque la part de trèfles en prairie augmente à 80%.

36. L'autonomie étudiée dans le cadre de ce travail est définie comme autonomie du cheptel en azote digestible. Elle diffère donc de l'autonomie fourragère et se rapproche plus de l'autonomie protéique. Ce choix a été posé pour rester dans une logique cohérente avec l'étude des flux d'azote. Dans la suite de ce travail, cet indicateur sera appelé "autonomie alimentaire du cheptel".

Tableau 5 – Données utilisées pour le calcul de l'efficacité du système

	Entrées totales	Pertes			Efficacité
	Bilan total	Pertes au stockage	Pertes à l'épandage (AC)	Pertes à l'épandage (AB)	Efficacité
(kT/an)	233,8	18,2	35,8	3,8	75%

Ce rapport vaut 75,5% ($\frac{233,8-18,2-3,8-35,8}{233,8}$) pour l'année 2019. Un quart de l'azote introduit dans le système est donc perdu, soit dans l'air par volatilisation lors du stockage ou de l'épandage, soit dans le sol et l'eau, suite à l'épandage. En diminuant les pertes par lessivage et en augmentant l'importance de la fixation symbiotique (80% de trèfles en prairie), cet indicateur s'élève à 82%. En France, l'efficacité du bilan azoté agricole calculé par le modèle MoSUT s'élève à 86%, dont 16% sont un solde au sol. Le système agricole français semblerait à première vue plus efficace que le système wallon, mais il est difficile de tirer de telles conclusions sans informations approfondies sur la méthodologie de calcul des pertes du modèle MoSUT.

3 Vers une gestion durable des flux d'azote en Wallonie : scénarisations à l'horizon 2030

Les enquêtes, réalisées auprès de dix-sept expertes du monde agricole et des flux d'azote en Wallonie, ont permis de co-construire des scénarios prenant en compte la diversité des regards et des réalités exprimées par leurs opinions et leurs remarques. Ces remarques souvent qualitatives ont été utilisées pour prendre des décisions quantitatives quant à l'adaptation des données du calculateur pour représenter chacun des scénarios, à l'horizon 2030.

→ Un tableau de synthèse à l'annexe 16 présente les caractéristiques de la situation 2019 et de chacun des deux scénarios (tableau 29).

3.1 Scénario 1 : 30% de la Superficie Agricole Utile cultivée en agriculture biologique

3.1.1 *Choix du scénario*

Le scénario 1 a été imaginé à partir d'un objectif de la Région wallonne, atteindre 30% de la surface agricole utile en agriculture biologique pour l'année 2030. Cet objectif impacte les flux d'azote, puisque la fertilisation des cultures en AB exige la disponibilité d'une offre suffisante en intrants azotés organiques. En 2019, cette offre était encore insuffisante pour combler la totalité des besoins des cultures et prairies, et l'autonomie du système atteignait 59%. Une augmentation conséquente de la demande en fertilité organique pourrait impacter cette autonomie, ou se heurter à une insuffisance de l'offre organique.

Pour atteindre cet objectif, la part de chaque activité agricole wallonne en AB doit évoluer. Ces évolutions ont été spécifiées suite aux enquêtes, pour les différentes cultures et cheptels wallons. Les résultats de ces enquêtes, menées auprès des experts, sont présentés au tableau 6. Les remarques utilisées pour la construction de ces scénarios sont numérotées ; lorsqu'une référence y est faite, ce numéro est utilisé. Elles résultent d'une part de certaines évidences techniques, et d'autre part de prédictions sur l'évolution des filières et des primes, puisqu'elles agissent comme leviers sur les décisions des agriculteurs (8, 9).

Toutes les filières de cultures et d'élevage, à l'exception de l'élevage porcin et de l'élevage de volailles (12), sont confrontées à des difficultés soit techniques, soit socio-économiques face à la mise en oeuvre de cette transition (2, 10, 11, 14). Ces difficultés ont été prises en compte dans la réalisation du scénario et l'évolution des superficies en AB a été déterminée sur bases des remarques des expertes, qu'elles soient techniques ou socio-économiques, mais des compromis devront être envisagés par les acteurs du monde agricole pour parvenir à cet objectif de 30%.

3.1.2 Mise en oeuvre

La mise en oeuvre de ce scénario induit l'hypothèse d'une SAU constante entre l'année 2019 et l'année 2030. Toutes les superficies de cultures sont maintenues constantes, à une exception près : l'augmentation de l'AB entraîne une augmentation des cultures de légumineuses (5). La surface des légumineuses récoltées en grains et des légumineuses fourragères est doublée. Pour contrebalancer cette augmentation, la surface des betteraves sucrières est réduite du nombre d'hectares ajoutés aux légumineuses (7341 ha). La superficie en AB est triplée, entraînant une diminution de la superficie en AC. L'évolution de la superficie en AB est illustrée à la figure 12. L'évolution des parts relatives des différentes cultures y est présentée.

Une figure analogue à la figure 12 présente l'évolution des parts relatives des différentes cultures en AC, à l'annexe 11 (figure 17).

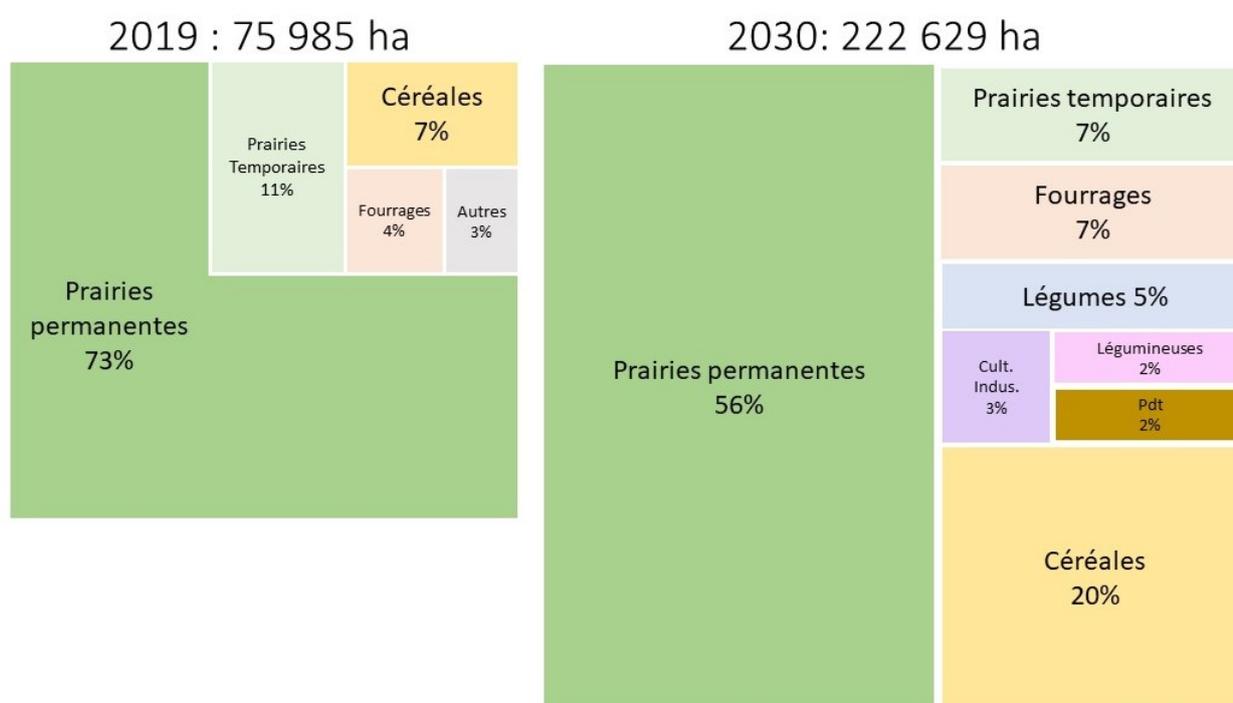


FIGURE 12 – Scénario 1 : Evolution des superficies cultivées en AB

Les évolutions de chaque superficie en AB sont décrites ci-dessous. Ces évolutions chiffrées peuvent être retrouvées de façon synthétisée au tableau 7.

Les prairies représentent actuellement 47% de la SAU wallonne et 73% de la superficie AB (Statbel, 2020). Leur évolution est centrale pour atteindre l'objectif des 30%. La conversion en AB des prairies conventionnelles (permanentes et temporaires) est simple d'un point de vue technique (1). La superficie des prairies en AB est doublée. Une augmentation supplémentaire est difficilement envisageable, compte tenu du problème de filière rencontré par les élevages viandeux, puisque 75% de la viande élevée en AB est actuellement écoulee dans des filières conventionnelles (10). La surface totale des prairies permanentes n'est pas modifiée car les conditionnalités des aides agricoles tentent de maintenir le pâturage permanent en imposant

des contraintes lorsque le ratio de la surface des prairies permanentes sur la SAU diminue de plus de 5% par rapport à la référence de 2005.

Les légumes et les fruits ont un potentiel à la fois au niveau technique et au niveau des filières (4, 13). Ce sont les seules filières de cultures pour lesquelles il existait un consensus des expertes sur le potentiel d'évolution. Leur proportions respectives en AB passent à 60% pour les légumes, et 50% pour les fruits.

Les céréales ont un potentiel valorisable (11) via les filières panifiables, même si leur culture est techniquement plus compliquée parce qu'exigeante en engrais azotés (2). Les céréales représentent la superficie de cultures la plus importante en Région wallonne (24% de la SAU), leur évolution est par conséquent nécessaire pour atteindre l'objectif du scénario. Dès lors, une augmentation de la surface emblavée en céréales en AB à 24% pour le froment d'hiver, l'orge d'hiver, l'épeautre et les autres céréales semblait un bon compromis.

Les cultures industrielles, dont la plus importante en termes de superficie est la betterave sucrière, se convertissent difficilement en AB. Toutefois afin d'atteindre l'objectif de 30%, il est indispensable d'augmenter la part de ces surfaces en AB. Une augmentation à 7% pour les betteraves sucrières, et à 10% pour les autres (lin, colza, chicorée) est suggérée.

D'un point de vue technique, des possibilités pour cultiver la pomme de terre en AB existent (3). Le principal obstacle rencontré pour la conversion de cette filière est un problème de débouchés dû à deux facteurs. Premièrement, en Belgique, le fait que les pommes de terre soient principalement utilisées pour réaliser des produits transformés, pour lesquels la demande en bio est beaucoup moins importante que pour les produits frais. Deuxièmement, le fait que cette culture soit très majoritairement exportée, et donc dépendante du marché mondial (14). Leur superficie en AB a été augmentée à 8%.

Une diminution du cheptel bovin est observée depuis près de 20 ans, et cette tendance devrait rester observable durant les dix prochaines années (7). Cette évolution du cheptel est traduite par une baisse de 14% du nombre de bovins (baisse tendancielle). Le cheptel en AB augmenterait grâce aux primes de la PAC, encourageant à la fois l'AB, mais également le pâturage extensif via les Mesures Agro-Environnementales et Climatiques (MAEC) ou stagnerait, selon les experts, tandis que le cheptel conventionnel diminuerait (6). Cette diminution du cheptel, couplée à un maintien des superficies de prairies, entraîne une extensification du pâturage, en ligne avec le cahier des charges de l'AB.

Le cheptel porcin et les volailles sont maintenues constants, en raison de la bonne valorisation de ces filières en AB (12).

Une évolution de la part des superficies propres à chaque culture en AB, du cheptel et des

indicateurs, est présentée au tableau 7.

Tableau 6 – Éléments de résultats exprimés par les experts sur le scénario 1 : 30% de la SAU en AB

Scénario 1 : vers 30% de la SAU cultivée en agriculture biologique (AB) à l'horizon 2030		
N°	Élément de résultat	Expert
Cultures		
1	D'un point de vue technique, les prairies sont les superficies les plus simples à convertir en AB.	E2, E3
2	D'un point de vue technique, les céréales sont des superficies compliquées à convertir en AB car elles sont compliquées à fertiliser.	E2, E3
3	D'un point de vue technique, la conversion des surfaces de pommes de terre en AB est possible.	
4	Les superficies de maraîchage peuvent facilement être converties en AB, si elles sont de petite taille.	
5	En AB, les légumineuses sont fondamentales. Leur superficie va augmenter si la SAU en AB augmente.	E9, E5, E7
Elevage		
6	Le cheptel en AB augmente et augmentera encore, tandis que le cheptel conventionnel va diminuer.	E5
7	L'élevage va continuer à diminuer.	E11, E5, E6
Filières		
8	Pour que l'AB se développe, il faut des filières fortes.	E17
9	L'agriculture est tirée soit par les primes, soit par les filières.	E15
10	L'élevage viandoux en AB fait face à un problème de filière, puisque 75% de la viande produite en AB est vendue via des filières conventionnelles.	E4, E5, E6, E17
11	La filière des céréales panifiables a du potentiel, même si elle manque encore actuellement de débouchés.	E4, E6, E15
12	Les filières de monogastriques (porcins et volailles) se développent très bien et sont très rentables en AB.	E6, E15
13	Les filières de fruits et légumes en AB ont du potentiel et pourraient être plus développées.	E15
14	Les filières de pommes de terres en AB sont bouchées, d'une part parce qu'elle finissent en produits transformés, pour lesquels la demande est moindre qu'en produits frais, et d'autre part car elles sont exportées.	E5, E6
Changements climatiques		
15	Les changements climatiques vont amener de la diversification dans les cultures et les rotations.	E9, E5, E16

Tableau 7 – Évolution de la part des cultures en AB, du cheptel et des indicateurs entre la situation 2019 et la situation 2030, selon le scénario 1.

		Situation actuelle 2019		Scénario 1 30% de la SAU en AB 2030	
Cultures		Superficie (ha)	Part AB (%)	Superficie (ha)	Part AB (%)
Céréales	froment d'hiver	125 608	1,0	125 608	24,0
	orge d'hiver	28 046	3,0	28 046	24,0
	épeautre et autres	31 190	11,0	31 190	24,0
Cultures industrielles	betteraves sucrières	38 835	0,5	31 374	7,0
	lin, colza, chicorée	27 225	1,0	27 225	10,1
Pommes de terre		43 056	1,9	43 056	8,0
Légumineuses récoltées en grain sec		3 807	7,0	7 614	50,0
Fourrages	betteraves fourragères	1 360	34,6	1 360	68,0
	maïs fourrager	57 389	0,8	57 389	15,0
	légumineuses	3 654	59,8	7 309	68,0
Légumes	légumes de plain air	18 113	6,2	18 113	60,0
Cultures permanentes	vergers et petits fruits	1 927	19,5	1 927	50,0
	autres	611	0,0	611	0,0
Prairies	prairies temporaires	36 635	22,7	36 635	40,0
	prairies permanentes	309 180	18,0	309 180	40,0
Terres arables non cultivées		6 956	4,5	6 956	4,5
Part totale de la SAU en AB (%)		11		30	
Cheptel		Effectifs 2019	Effectifs 2030	Evolution (%)	
Bovins		1 257 818	1 079 505	-14	
<i>dont mixtes</i>		<i>Non renseigné</i>	<i>Non renseigné</i>	/	
Porcins		370 271	370 271	0	
Volailles		4 766 098	4 766 098	0	
Caprins		9 933	9 933	0	
Ovins		43 116	43 116	0	
Equins		12 892	12 892	0	
Lapins		75 366	75 366	0	
Indicateurs		2019	2030		
Autonomie du système (%)		59	81		
Autonomie du cheptel (%)		81	93		
Efficience (%)		75	78		

3.1.3 Quantification des flux d'azote

Les flux d'azote évalués dans le cadre du premier scénario sont présentés à la figure 13. Les flux de pertes sont présentés à l'annexe 13 (figure 18). Les valeurs propres à chaque compartiment présenté sur la figure sont définies au tableau 8. L'influence des intervalles de valeurs, pour la proportion de trèfles en prairie et pour la part de pertes par lessivage à l'épandage, est discutée dans les résultats. Ces intervalles sont présentés dans le tableau 27 à l'annexe 12.

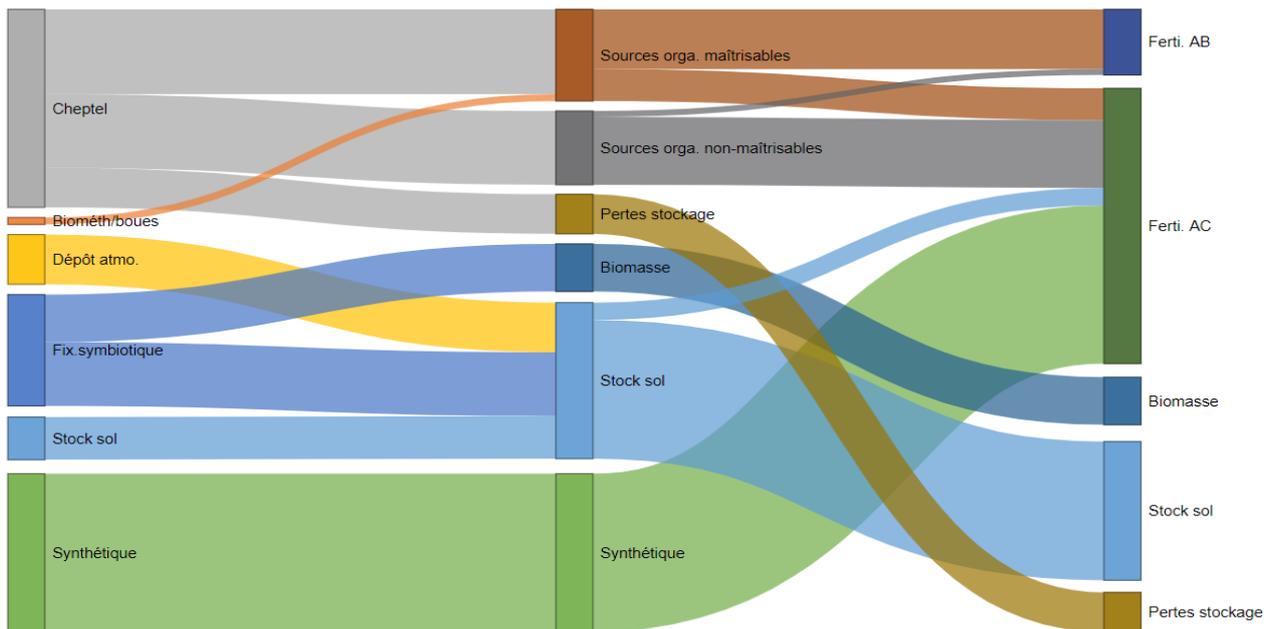


FIGURE 13 – Scénario 1 : Quantification de l'offre et de la demande en azote au sein du système agricole wallon - 30% de la SAU cultivée en AB à l'horizon 2030.

La conversion de 30% de la SAU en agriculture biologique engendre des conséquences sur les flux d'azote wallons. Les figures et analyses présentées dans cette section correspondent aux résultats quantitatifs de ce travail.

Une diminution nette de la demande en fertilisation azotée est observée, et quantifiée dans le tableau 8. Au total, le système "cultures" consomme 10% d'azote en moins par comparaison à l'année de référence 2019 et les entrées synthétiques diminuent de 22%. En AB, les prairies ne représentent plus que 78% de la consommation en azote, contre 92% en 2019.

L'effectif du cheptel bovin suit une baisse tendancielle de 14%, mais l'offre des pôles organiques augmente de 16% car une partie de la diminution des entrées d'engrais de ferme est compensée par l'augmentation des surfaces de légumineuses.

Par rapport à 2019, les quantités d'azote perdues au stockage diminuent de 12% suite à la baisse du cheptel et de 7,5% à l'épandage en raison d'une consommation moindre d'engrais.

Alors que ce scénario présente un surplus de l'offre par rapport à la demande, ce n'est plus le cas si la part de trèfles en prairie diminue en-dessous de 49% (au lieu de 60%). L'offre en azote organique vaut alors 148,7 kT, soit 10% en plus par rapport à la situation de 2019 (134,8 kT). En-dessous de ce pourcentage de trèfles, un manque dans l'offre en azote apparaît,

mettant en évidence la nécessité d'adapter le système au long-terme.

Ces chiffres semblent indiquer qu'une transition vers un système où l'AB est plus importante en termes de superficie est envisageable sur le plan de la fertilité azotée. Ce premier constat est appuyé par l'analyse des indicateurs, présentés au point 3.1.4.

Tableau 8 – Scénario 1 : Valeurs des compartiments présentés à la figure 13

Bilan d'azote scénario 1 (kT/an)	Offre	Demande	Evolution depuis 2019 ³⁷
Cheptel	79,7	16	-12%
<i>Sources organiques non-maîtrisables</i>	29,7		
<i>Sources organiques maîtrisables</i>	34,1		
<i>Pertes au stockage</i>	16,0	16,0	
Biométhanisation/boues	2,8		0%
Dépôt atmosphérique	20,0		0%
Fixation Symbiotique	44,8	19,2	+209%
<i>Stock sol</i>	25,6		
<i>Biomasse</i>	19,2	19,2	
Synthétique	63,2		-22%
Stock sol	24,9 ³⁸	63,6	
<i>Initial</i>	24,9	18,0	
<i>Dépôt atmosphérique</i>		20,0	
<i>Fixation symbiotique</i>		25,6	
Fertilisation AC		110,3	-22%
<i>Dont prairies</i>		38,7	
<i>Dont cultures</i>		43,7	
<i>Dont pertes</i>		27,9	
Fertilisation AB		26,3	+153%
<i>Dont prairies</i>		14,3	
<i>Dont cultures</i>		3,9	
<i>Dont pertes</i>		8,2	
Surplus		8,0	
Total	235,4	235,4	

3.1.4 Indicateurs d'autonomie

a. Autonomie du système wallon

L'autonomie du système wallon en azote évaluée dans le cadre du premier scénario indique que 82% de l'azote utilisé par le système agricole provient de sources organiques. L'augmentation de l'agriculture biologique engendre une augmentation significative de l'autonomie du système, ce qui peut être expliqué par une demande en azote plus faible pour la fertilisation des cultures en AB, l'augmentation des superficies de légumineuses et la baisse des besoins en azote synthétique. Ces résultats sont présentés au tableau 9.

En considérant uniquement les entrées nettes dans le système, c'est-à-dire l'azote fixé par les légumineuses, cette autonomie passe à 33%, une augmentation également significative par

37. Cette valeur est maintenue constante par rapport au cas actuel. Une partie de ce stock n'est pourtant pas utilisée et est en "surplus" par rapport aux besoins de la biomasse.

38. L'évolution présentée est celle calculée entre la valeur du flux en 2019, et la valeur du flux en 2030.

rapport à la situation actuelle pour des raisons analogues à celles développées ci-dessus.

Tableau 9 – Scénario 1 : Données utilisées pour le calcul de l'autonomie du système

	Demande en azote organique		Offre en azote organique				Autonomie	
	Fertilisation AB	Fertilisation AC	Sources primaires	Flux de recirculation			Sources organiques	Sources primaires
			Fixation symbiotique	Biométhanisation /boues	Cheptel	Pertes au stockage		
Valeurs 2030 (kT/an)	26,3	110,3	44,8	2,8	79,7	16,0	82%	33%
Valeurs 2019 (kT/an)	10,4	141,9	14,5	2,8	90,8	18,2	59%	9,5%

b. Autonomie alimentaire du cheptel

L'autonomie alimentaire du cheptel évaluée dans le cadre du premier scénario montre que les besoins en azote des animaux d'élevage sont couverts à 93% par les cultures wallonnes, soit une augmentation de 12% par rapport à l'autonomie évaluée pour l'année 2019. Cette autonomie accrue est une conséquence de deux facteurs : une légère diminution du cheptel suivant une baisse tendancielle, et un maintien des prairies dont la superficie reste équivalente à celle de 2019. Ces valeurs sont présentées au tableau 10.

Tableau 10 – Scénario 1 : Données utilisées pour le calcul de l'autonomie alimentaire du cheptel

	Demande en azote	Offre en azote digestible		Fertilisation des cultures et prairies				Autonomie
	Besoins cheptel	Prairies	Cultures	N _{synth} prairies	N _{org} prairies	N _{synth} cultures	N _{org} cultures	Autonomie cheptel
Valeurs 2030 (kT/an)	110,6	61,8	41,0	21,9	51,9	16,3	10,6	93%
Valeurs 2019 (kT/an)	126,1	61,8	40,0	51,9	29,6	20,4	9,3	81%

3.1.5 Indicateur d'efficience

L'efficience du système observée suite à la mise en oeuvre du premier scénario vaut 83% (75% en 2019). L'augmentation des pratiques en AB sur le territoire permet au système d'être plus efficace et par conséquent, de diminuer les pertes d'azote, pour deux raisons principales. En premier lieu, la part des engrais de ferme dans les intrants totaux diminue (suite à la diminution tendancielle du cheptel), provoquant une baisse des pertes au stockage (qui ne sont observées que pour les engrais de ferme). En second lieu, la part des légumineuses dans l'offre en azote totale augmente, source pour laquelle des pertes ne sont pas observées. Cet indicateur augmente de 4% en élevant la part de trèfles en prairie à 80% et en diminuant les pertes par lessivage de 5%.

3.2 Scénario 2 : Quelle taille optimale du cheptel wallon pour garantir un maintien des prairies et de l'offre en azote organique ?

3.2.1 *Choix du scénario*

Le deuxième scénario part du constat actuel suivant : en 20 ans, les effectifs bovins ont baissé de 25%. Cette baisse s'associe à une diminution de 10% la surface prairiale. En parallèle à ce constat, l'étude des flux d'azote au sein du système a montré que le cheptel bovin avait un rôle important à jouer dans la fertilisation des prairies et cultures. En effet, les bovins sont source de 88% de l'offre en azote issue du cheptel, offre qui, pour rappel, remplit 54% des sources d'azote organique. Bien que le flux d'azote issu du cheptel soit un flux de recirculation, le cheptel valorise l'azote contenu dans la biomasse en le rendant rapidement disponible pour les plantes. Une diminution trop importante du cheptel aura donc une incidence directe sur l'offre en azote organique du système.

C'est dans ce contexte qu'intervient le questionnement sur la part du cheptel qu'il est pertinent de maintenir à l'avenir. A la fois dans l'optique de garantir le maintien des prairies qui sont sources de 57% de l'alimentation azotée animale et bénéficient à l'environnement et au climat, et dans l'optique de maintenir une certaine autonomie azotée au sein du système wallon.

Les opinions des expertes interrogées lors des enquêtes divergent dans leurs façons de concevoir cette baisse, mais toutes s'accordent sur le fait que l'autonomie fourragère est un équilibre à atteindre (1). Les résultats de ces enquêtes, menées auprès des expertes, sont présentés au tableau 11. Les remarques utilisées pour la construction de ce scénario sont numérotées et lorsqu'une référence y est faite, ce numéro est utilisé. Elles résultent, d'une part, de prédictions sur l'évolution des filières et des primes, et d'autre part, de certains changements sociétaux qui agissent comme leviers sur les choix des agricultrices. Les évolutions du cheptel, des cultures et des prairies spécifiées suite aux enquêtes sont présentées de façon synthétique au tableau 12.

3.2.2 *Mise en oeuvre*

La mise en oeuvre de ce scénario fait l'hypothèse d'une autonomie alimentaire du cheptel en azote digestible atteinte à 100% en 2030. Les effectifs des cheptels de bovins, porcins et volailles sont diminués, de manière à ce que leurs besoins correspondent à l'offre. Cette diminution porte principalement sur les bovins dont la baisse tendancielle est la plus importante et qui sont les principaux consommateurs d'azote (via l'herbe et les fourrages) du système. Le calculateur a permis d'évaluer que pour atteindre cette autonomie complète, le cheptel bovin devait diminuer de 26%. Les porcins et volailles doivent quant à eux diminuer respectivement de 11 et 5%, tandis que le reste du cheptel (équidé, ovin, caprin) est maintenu constant.

La SAU est considérée constante entre l'année 2019 et l'année 2030. La superficie des prairies permanentes baisse de façon à maintenir un chargement UGB global supérieur à 3. Cette

norme UGB de 3 est revenue lors de plusieurs enquêtes comme étant un bon équilibre (E5, E17). Elle est diminuée de 15% par rapport à 2019. Afin de maintenir l'autonomie alimentaire du cheptel à 100%, la superficie de prairies perdue doit être compensée par un apport pour le cheptel. La SAU étant maintenue constante, cette superficie de prairies perdue est convertie en cultures. Les superficies de légumineuses fourragères sont doublées et les superficies de légumineuses récoltées en grains secs sont triplées (6), permettant également d'augmenter l'offre organique issue de fixation symbiotique. Afin d'atteindre l'autonomie alimentaire du cheptel, les superficies de céréales sont augmentées de 25%. Une partie de ces céréales peuvent également être valorisée par des filières de blé panifiable qui ont actuellement un bon potentiel de développement (9). La surface des prairies temporaires est aussi augmentée (8), de façon à combler les derniers hectares perdus en prairies permanentes et toujours dans l'optique de maintenir l'autonomie en alimentation animale à 100%.

La superficie en AB augmente suivant la tendance observée ces 10 dernières années pour atteindre 21% de la SAU wallonne. Les évolutions de l'AB pour chaque culture sont inspirées de Biowallonie (A. Beudelot, M. Maillieux, 2020) et sont présentées de façon synthétique dans le tableau 12. L'évolution de la taille du cheptel, ramenée en milliers d'UGB, ainsi que l'évolution des prairies permanentes est présentée à la figure 14.

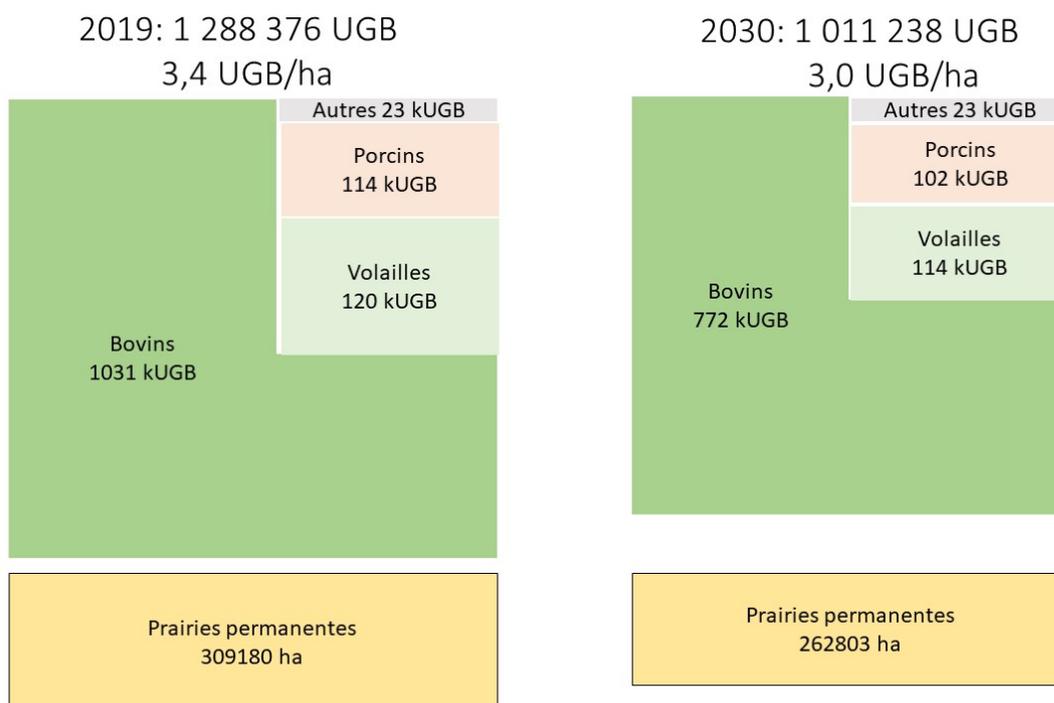


FIGURE 14 – Scénario 2 : Evolution de la taille du cheptel (milliers UGB) et de la surface des prairies permanentes (ha)

Ce scénario s'accompagne également d'une reconfiguration du cheptel bovin ; les vaches laitières et allaitantes diminuent de 35% et les autres bovins de 30% (2). Cette baisse est compensée par l'apparition de bovins mixtes à hauteur de 75800 nouvelles têtes, soit 10% du nouveau cheptel (3). De cette façon, la diminution du cheptel bovin reste bien égale à 26%. Contrairement aux porcins et volailles, les bovins ont une efficacité protéique nette supérieure

à l'unité et peuvent donc valoriser des ressources non consommées par l'être humain comme l'herbe des prairies. Il est donc intéressant de maintenir un équilibre entre bovins et prairies. La surface des prairies permanentes est maintenue à 85% pour une charge totale de 3,0 UGB/ha de prairie permanente³⁹. La diminution observée par rapport au chargement actuel (3,4 UGB/ha) est liée à une extensification de l'élevage dûe en partie à l'augmentation tendancielle de l'élevage en AB. Concernant l'offre en azote organique, une gestion plus intégrée des prairies valorise le retour naturel du trèfle et permet d'augmenter sa proportion jusqu'à 40% assumés dans ce deuxième scénario (7).

Tableau 11 – Eléments de résultats exprimés par les experts sur le scénario 2 : Equilibre entre l'évolution de l'élevage, le maintien des prairies et l'offre en azote organique

Scénario 2 : vers un équilibre entre évolution de l'élevage et maintien de la surface des prairies et de l'offre en azote organique		
N°	Elements de résultat	Expertes
	Diminution du cheptel	
1	La baisse idéale du cheptel vise l'autonomie en concentrés ou en fourrages riches en légumineuses.	E1, E5
2	Il y a une reconfiguration du cheptel : les vaches laitières et allaitantes diminuent (filière naisseur) et l'engraissement est valorisé.	E4, E11
3	Il y aura davantage d'élevages de races mixtes.	E7, E9, E16
	Maintien de la superficie des prairies	
4	La surface des prairies diminue si l'élevage diminue. Les prairies sont valorisées par l'élevage.	E17
5	Les prairies sont converties en terres arables car il y a un intérêt économique derrière.	E11, E17
	Maintien de l'offre en azote organique	
6	Les légumineuses sont une source infinie d'azote valorisable directement en prairies, en cultures associées ou en engrais verts via la méthanisation.	E5, E7, E16
7	Le trèfle blanc revient naturellement si la prairie n'est pas semée et est bien gérée.	E5
	Intégration des systèmes cultures-élevage	
8	La réorganisation spatiale de l'élevage est encouragée par l'augmentation des prairies temporaires dans les rotations.	E7, E15, E16
	Cultures	
9	La production d'alimentation humaine (filière de céréales panifiables) doit être prioritaire sur la production de fourrage.	E5, E7, E9, E15

39. Les prairies temporaires sont généralement fauchées (Crémer S., Bernes A. et Knoden D, 2016).

Tableau 12 – Évolution de la part des cultures en AB, du cheptel et des indicateurs entre la situation 2019 et la situation 2030, selon le scénario 2.

		Situation actuelle 2019		Scénario 2 Taille optimale du cheptel 2030	
Cultures		Superficie (ha)	Part AB (%)	Superficie (ha)	Part AB (%)
Céréales	froment d'hiver	125 608	1,0	140 608	11,0
	orge d'hiver	28 046	3,0	36 046	12,0
	épeautre et autres	31 190	11,0	40 190	33,3
Cultures industrielles	betteraves sucrières	38 835	0,5	38 835	2,5
	lin, colza, chicorée	27 225	1,0	27 225	3,1
Pommes de terre		43 056	1,9	43 056	2,6
Légumineuses récoltées en grain sec		3 807	7,0	11 421	20,0
Fourrages	betteraves fourragères	1 360	34,6	1 360	50,0
	maïs fourrager	57 389	0,8	57 389	5,0
	légumineuses	3 654	59,8	7 307	80,7
Légumes	légumes de plein air	18 113	6,2	18 113	22,0
Cultures permanentes	vergers et petits fruits	1 927	19,5	1 927	68,3
	autres	611	0,0	611	5,0
Prairies	prairies temporaires	36 635	22,7	39 743	30,0
	prairies permanentes	309 180	18,0	262 803	33,0
Terres arables non cultivées		6 956	4,5	6 956	8,9
Part totale de la SAU en AB (%)		10		21	
Cheptel		Effectifs 2019		Effectifs 2030	Evolution (%)
Bovins		1 257 818		931 089	-26
<i>dont mixtes</i>		<i>Non renseigné</i>		75 798	/
Porcins		370 271		329 541	-11
Volailles		4 766 098		4 527 793	-5
Caprins		9 933		9 933	0
Ovins		43 116		43 116	0
Equins		12 892		12 892	0
Lapins		75 366		75 366	0
Indicateurs		2019		2030	
Autonomie du système (%)		59		58	
Autonomie du cheptel (%)		80,5		100	
Efficience (%)		75		78	

3.2.3 Quantification des flux d'azote

Les flux d'azote évalués dans le cadre du second scénario sont présentés à la figure 15. Les flux de pertes sont présentés à l'annexe 15 (figure 19). Les valeurs propres à chaque compartiment présenté sur la figure sont définies au tableau 13. L'influence des intervalles de valeurs, pour la proportion de trèfles en prairie et pour la part de pertes par lessivage à l'épandage, est discutée dans les résultats. Ces intervalles sont présentés dans le tableau 28 à l'annexe 14.

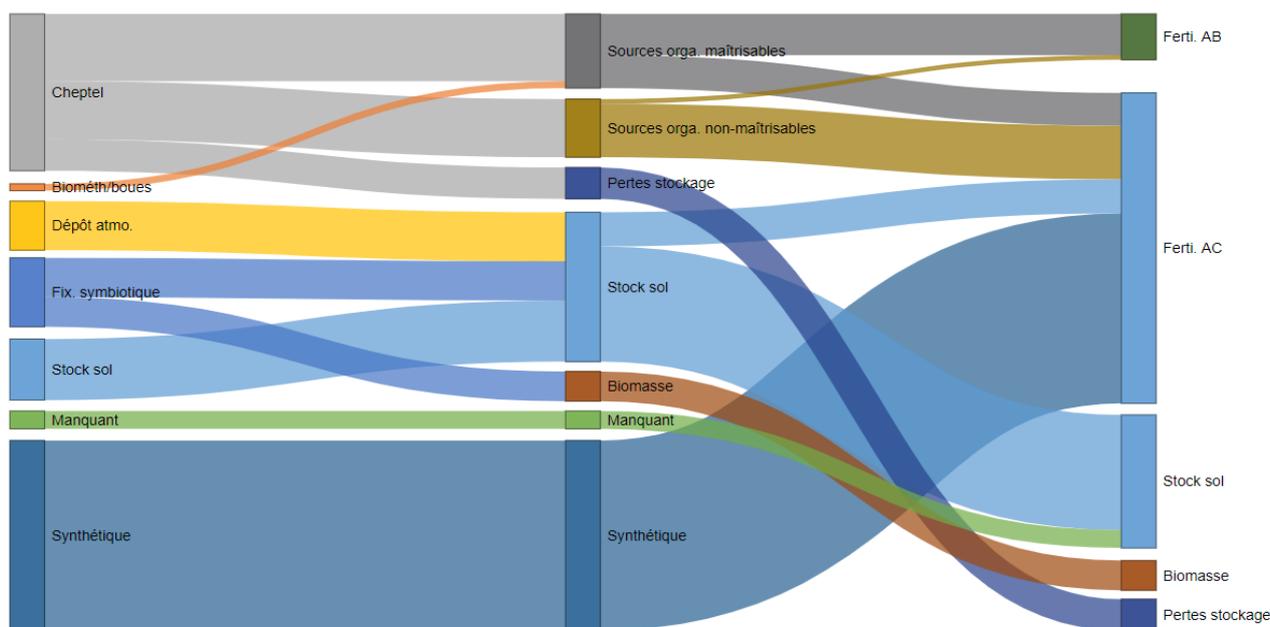


FIGURE 15 – Scénario 2 : Quantification de l'offre et de la demande en azote au sein du système agricole wallon - Équilibre entre cheptel, prairies et azote organique à l'horizon 2030

La quantification des flux pour ce deuxième scénario permet de mettre en évidence une supposition avérée : si le cheptel diminue, les sources d'engrais organiques pour la fertilisation des prairies et cultures pourraient venir à manquer. La diminution du cheptel scénarisée entraîne une diminution des quantités d'azote maîtrisable et non maîtrisable de 30%. En considérant que d'ici 2030, la surface de légumineuses est multipliée par 2,5 de façon à doubler la fixation symbiotique (28,1 kT/an), ce manque d'engrais est évalué à 11,7 kT/an. L'offre en azote des pôles organiques (126,9 kT/an), pertes déduites, diminue de 6% par rapport à 2019 mais couvre toujours 58% de la demande de fertilisation totale. La part du cheptel dans l'offre en azote organique atteint 40% alors qu'elle valait 54% en 2019.

Ce scénario fait l'hypothèse d'une proportion de trèfles en prairie de 40%. Afin de combler le manque d'azote dû à une diminution de l'élevage, la part de trèfles en prairie devrait atteindre 60%. Cela souligne l'importance d'une bonne gestion des prairies en agriculture.

La consommation d'engrais pour la fertilisation diminue de 8%, étant donné l'augmentation tendancielle de l'AB. Les prairies représentent 81% de la demande de fertilisation en AB, alors que ce pourcentage s'élevait à 92% pour l'année 2019. Elles sont toujours fertilisées à plus de 30% par le pâturage. En AC, le cheptel couvre 66% de la fertilisation organique destinée à 62% aux prairies. Les autres sources venant combler cette demande de fertilisation en azote organique sont les légumineuses et les boues d'épuration.

Par rapport à 2019, les pertes au stockage et à l'épandage sont diminuées respectivement de 30% et 7%.

Ce scénario fait donc une utilisation plus sobre de l'azote mais une tension reste observable entre l'offre et la demande en azote organique. Les indicateurs du système, présentés au point 3.2.4, appuient ces résultats.

Tableau 13 – Scénario 2 : Valeurs des compartiments présentés à la figure 15 (kT/an)

Bilan d'azote scénario 2 (kT/an)	Offre	Demande	Evolution depuis 2019
Cheptel	63,9	12,8	-30%
<i>Sources organiques non-maîtrisables</i>	<i>23,7</i>		
<i>Sources organiques maîtrisables</i>	<i>27,4</i>		
<i>Pertes au stockage</i>	<i>12,8</i>	<i>12,8</i>	
Biométhanisation/boues	2,8		0%
Dépôt atmosphérique	20,0		0%
Fixation Symbiotique	28,1	12,1	+94%
<i>Fertilisation AC</i>	<i>13,9</i>		
<i>Stock sol</i>	<i>2,1</i>		
<i>Biomasse</i>	<i>12,1</i>	<i>12,1</i>	
Synthétique	72,9		-10%
Source organique manquante	11,7	11,7	
Stock sol	24,9	47,0	
<i>Initial</i>	<i>24,9</i>	<i>24,9</i>	
<i>Dépôt atmosphérique</i>		<i>20,0</i>	
<i>Fixation symbiotique</i>		<i>2,1</i>	
Fertilisation AC		122,5	-14%
<i>Dont prairies</i>		<i>38,3</i>	
<i>Dont cultures</i>		<i>53,5</i>	
<i>Dont pertes</i>		<i>30,7</i>	
Fertilisation AB		18,2	+75%
<i>Dont prairies</i>		<i>10,2</i>	
<i>Dont cultures</i>		<i>2,4</i>	
<i>Dont pertes</i>		<i>5,6</i>	
Total	224,3	224,3	

3.2.4 Indicateurs d'autonomie

a. Autonomie du système wallon

L'autonomie en azote du système wallon évaluée dans le tableau 14 pour l'année 2019 indique que 59% de l'azote utilisé par le système agricole provient de sources organiques. La diminution du cheptel bovin n'engendre pas une diminution significative de cette autonomie (58%). Cela s'explique par le fait que la fixation symbiotique vient combler les besoins en azote organique par l'augmentation des superficies de légumineuses et l'augmentation de la proportion de trèfles dans les prairies à 40%. L'autonomie primaire augmente de 10% par rapport à 2019. Si les prairies contenaient en moyenne 60% de trèfles (ce qui est observé sur les prairies les mieux gérées), l'autonomie du système atteindrait 67%. La présence de trèfles sur les prairies est donc un levier important de la fertilisation azotée.

Tableau 14 – Scénario 2 : Données utilisées pour le calcul de l'autonomie du système

	Demande en fertilisation		Offre en azote organique				Autonomie	
	Fertilisation AB	Fertilisation AC	Sources primaires	Flux de recirculation			Sources organiques	Sources primaires
			Fixation symbiotique	Biométhanisation /boues	Cheptel	Pertes au stockage		
Valeurs 2030 (kT/an)	18,2	122,5	28,1	2,8	63,9	12,8	58%	20%
Valeurs 2019 (kT/an)	10,4	141,9	14,5	2,8	90,8	18,2	59%	10%

b. Autonomie alimentaire du cheptel

Ce deuxième scénario a pour objectif d'atteindre l'autonomie en alimentation animale azotée en 2030. Les besoins du cheptel wallon en azote digestible sont couverts à 100%, soit une augmentation de 19% par rapport à l'autonomie évaluée pour l'année 2019. Cette autonomie accrue est une conséquence de deux facteurs : une reconfiguration du cheptel bovin avec diminution des vaches laitières et allaitantes de 35% et une compensation de la diminution des surfaces de prairies permanentes par une augmentation des superficies de légumineuses, de céréales et des prairies temporaires dont une partie est allouée à l'alimentation animale. Le tableau 15 présente les éléments de calcul pour l'autonomie du cheptel.

Tableau 15 – Scénario 2 : Données utilisées pour le calcul de l'autonomie alimentaire du cheptel

	Demande en azote	Offre en azote digestible		Fertilisation des cultures et prairies				Autonomie
	Besoins cheptel	Prairies	Cultures	N _{synth} prairies	N _{org} prairies	N _{synth} cultures	N _{org} cultures	Autonomie cheptel
Valeurs 2030 (kT/an)	97,5	54,1	43,5	21,8	45,4	26,4	10,9	100%
Valeurs 2019 (kT/an)	126,1	61,8	40,0	51,9	29,6	20,4	9,3	81%

3.2.5 Indicateur d'efficience

L'efficience du système observée suite à la mise en oeuvre du second scénario vaut 78%. Cette augmentation de 2,5% est due en partie à une diminution des pertes au stockage des déjections animales et une augmentation de la part des légumineuses dans l'offre en azote, source pour laquelle des pertes ne sont pas observées. Cette efficience est élevée de 4% lorsque les pertes par lessivage diminuent de 5%.

4 Vers une gestion durable des flux d'azote en Wallonie : l'ouverture d'un débat inter-experts

Les résultats quantitatifs présentés à la section précédente sont le fruit de la mise en oeuvre de scénarios, co-construits avec les experts rencontrés dans le cadre des enquêtes. La divergence des opinions exprimées sur certains cas de figure a été étudiée et a orienté ces choix de mise en oeuvre. Cette section a pour objectif de mettre en avant cette diversité, mais également d'expliquer la manière dont ces éléments qualitatifs ont influencé les décisions quantitatives. Les remarques générales sur chacun des scénarios, les facteurs d'influence sur leur mise en oeuvre et les conséquences induites y sont présentés, toujours sous l'angle des accords et désaccords d'opinions.

4.1 Scénario 1 : 30% de la Superficie Agricole Utile cultivée en agriculture biologique

4.1.1 *La co-construction d'un scénario : comment évolue le système agricole wallon quand 30% de la SAU sont convertis en AB*

L'objectif de ce scénario était de déterminer comment évoluent les différentes cultures et prairies de la SAU wallonnes pour atteindre 30% de la SAU en AB. Les différents experts rencontrés ont été interrogés sur leur vision de cette évolution et les enquêtes ont ainsi permis de mettre en avant la diversité des opinions sur la question du système agricole en AB et de son évolution.

Un consensus auprès des experts : Les enquêtes auprès des experts ont mis en lumière une des lacunes de l'objectif wallon d'atteindre 30% de la SAU en AB d'ici 2030 : rien ne précise comment évoluent les différentes surfaces agricoles. Pourtant, la part cultivée en AB ne peut être élevée à 30% pour tous les types de cultures. Dès lors, l'évolution de la SAU cultivée en AB a été réfléchi au cas par cas afin de correspondre aux réalités socio-culturelles, économiques et techniques relevées lors des enquêtes.

4.1.2 *La mise en oeuvre du scénario 1 : l'évolution des cultures et prairies wallonnes, 3 facteurs d'influence*

1. Influence technique

D'un point de vue technique, certaines dissensions ont été relevées car des experts avancent que la conversion des cultures à l'AB se ferait facilement (E9, E11, E17) tandis que d'autres, au contraire, y voyaient trop de contraintes (E4, E6, E7). La fertilisation des cultures offre parfois peu de marges à l'agriculteur pour changer sa façon de procéder. Au contraire des engrais minéraux, les engrais organiques offrent peu de flexibilité aux agriculteurs pour fertiliser selon les besoins de la plante (E4, E5, E11, E13), or le cahier de charges de l'AB interdit leur utilisation. Les engrais organiques sont plus difficilement utilisables à grande échelle, en raison des quantités élevées (en termes de masse) nécessaires à l'hectare, qui rendent la logistique de fertilisation compliquée sur des surfaces conséquentes (E4). Ces contraintes ne s'appliquent

toutefois pas à toutes les cultures et sont atténuées par les bénéfices de l'utilisation d'engrais organiques comme la redynamisation de l'activité biologique du sol (E5, E9).

2. Influence économique

Outre les freins techniques, les experts se sont entendus sur le fait que les choix des agriculteurs étaient fortement influencés par les filières⁴⁰ (E4, E5, E6, E11, E15, E16, E17), ou les primes (E4, E11, E15).

En AB, *les filières* ne sont globalement pas encore très développées. Certains experts y voient alors un potentiel de développement, comme pour la filière panifiable valorisée par la présence de meuniers (E4, E16). Au contraire, d'autres le voient plutôt comme une limite, par exemple dans le cas des fruits et légumes et des pommes de terre (E5, E6). Si ces marchés ne sont pas développés, c'est en partie dû au fait que les consommateurs ne sont pas intéressés et que le marché local est rapidement saturé, faute de couvrir un territoire assez grand (E5, E6, E17). Le levier pour développer les filières repose aussi sur l'agro-industrie et les pouvoirs publics qui, en incitant à davantage de coordination entre acteurs des filières, ont un rôle important à jouer dans leur développement (E4, E5, E17). Certaines filières demandent à être créées pour valoriser l'entièreté de la production comme les céréales rustiques à double-emploi (paille et grain) (E16) qui répondent à la demande en nourriture animale biologique (E15).

Les primes sont aussi moteur du changement, surtout concernant l'évolution des prairies. Alors que la filière viande bovine est actuellement saturée, la conversion de l'élevage bovin en AB est actuellement encouragée par les primes de l'AB et les primes MAE (E4, E11, E15, E17), ce qui pourrait changer à l'avenir si les primes ne sont plus cumulables (E4).

En général, le développement de l'AB dépend fortement des opportunités économiques (E7), même si l'influence socio-culturelle n'est pas à négliger.

3. Influence socio-culturelle

Certains experts ont mentionné des freins et opportunités socio-culturels à la transition vers l'AB en général. Des coutumes liées à l'élevage de Blanc-Bleu-Belge, interdit en AB, freinent certains éleveurs à s'y convertir (E7). Toutefois, les questionnements sur les changements climatiques et le renouvellement des générations avides de systèmes plus résilients sont des opportunités pour une transition vers l'AB (E5, E9).

4. Les légumineuses, un cas à part

L'évolution des légumineuses est un cas à part puisque **tous** les experts se sont accordés pour dire que leur superficie allait augmenter à l'avenir. En effet, leurs multiples fonctions (source d'azote, produit pour l'alimentation humaine et l'alimentation animale en grain et fourrage) ainsi que leur résistance à la sécheresse, leur confèrent un potentiel de développement assez élevé (E5, E7, E9, E16), d'autant plus que des primes en AB existent déjà pour les légumineuses (E11). Les experts voient donc naturellement leur introduction dans les pratiques AB intégrant

40. Les filières représentent toutes les activités complémentaires offrant des opportunités de valoriser la production agricole ainsi que les co-produits.

une plus grande diversité de cultures, un allongement des rotations et une augmentation d'intercultures (E5, E7, E9), limitant le risque de maladies (E5) citées par un expert (E17).

4.1.3 *Les conséquences du scénario 1 : la recherche d'engrais organiques comme moteur de reconfiguration du système agricole*

1. Diversification des sources d'engrais organiques

Le passage en AB ne génère qu'une faible augmentation de la demande en engrais organiques mais une grande partie des cultures converties en AB sont spatialement éloignées des fermes d'élevage, source principale d'engrais organiques actuellement. Ce problème territorial oblige les agriculteurs à diversifier leurs sources d'engrais.

Pour beaucoup d'experts, l'élevage est irremplaçable dans l'offre en azote (E4, E5, E10), mais d'autres sources d'azote ont aussi été discutées. L'introduction de légumineuses précédemment mentionnée est appuyée par des exemples de fermes en agriculture biologique fonctionnant avec 100% d'engrais végétaux⁴¹ (E9, E16). Par ailleurs, du fumier déshydraté de Flandre et des engrais bio transformés de manière industrielle existent aussi sur le marché (E4, E6, E11), mais leur provenance, leur coût et leur durabilité ont été questionnés par certains experts (E11, E17).

2. Valorisation des systèmes culture-élevage comme systèmes agricoles efficaces

Une solution aux problèmes territoriaux (éloignement de l'offre et la demande en engrais organiques) évoqués par les experts est la mise en place de systèmes polyculture-élevage (E11, E16, E17), plus efficaces que ceux "100% engrais végétaux" (E16). Ces systèmes peuvent se développer de diverses façons qui mènent à certains désaccords entre experts.

La présence de *poulaillers* sur les fermes est actuellement en augmentation en AB et est une manière efficace de fertiliser les cultures (E2, E3, E11). Mais la durabilité de ces poulaillers est à discuter : les volailles concurrencent l'alimentation humaine (E2, E3, E11) et des dérives pourraient advenir si l'agro-industrie s'empare du marché (E17).

Au contraire, les *bovins* ont une efficacité protéique plus élevée et valorisent des ressources herbagères qui ne concurrencent pas l'alimentation humaine (E4, E5, E7, E9). Ils pourraient paître sur des prairies temporaires plus souvent présentes dans les rotations de cultures en AB (E7, E15, E16). Toutefois, actuellement, ce système est souvent fort intensif et non autonome (E4) et devrait donc évoluer pour viser une autonomie alimentaire animale au sein de la ferme.

Pour revenir sur la valorisation des produits en AB, les systèmes d'intégration culture-élevage génèrent plus de bénéfices lorsque les fourrages et concentrés sont consommés au sein de la ferme puisqu'ils génèrent aussi des produits animaux (E15, E16).

41. C'est le cas des fermes étudiées par le réseau français RotAB qui "rassemble cinq dispositifs expérimentaux testant sur le plan agronomique, économique et environnemental des systèmes en grandes cultures biologiques sans élevage" (Fontaine et al., 2012).

4.2 Scénario 2 : taille optimale du cheptel wallon

4.2.1 *La co-construction d'un objectif, comment déterminer la taille optimale du cheptel ?*

Le second scénario avait pour objectif de proposer une évolution optimale du cheptel. Les différents experts rencontrés ont été interrogés sur leur définition d'un cheptel de taille optimale et les enquêtes ont ainsi permis de mettre en avant la diversité des opinions sur la question de l'élevage et de son évolution.

Deux tendances se sont distinguées.

Certains experts abordent la baisse tendancielle du cheptel bovin observée depuis 20 ans. Pour eux, cette baisse est suffisante pour l'atteinte d'un équilibre, car elle a l'avantage de maintenir à la fois la superficie actuelle des prairies, la fertilité azotée, ainsi que l'approvisionnement en viande et en lait de la Région wallonne et de Bruxelles. Ces experts avancent notamment que la diminution du cheptel s'accompagne souvent de la disparition de certaines fermes, au profit d'un agrandissement d'autres exploitations, n'allant pas toujours dans le sens de la durabilité et d'une meilleure gestion des flux d'azote (E4). D'autres experts considèrent que le cheptel actuel pourrait diminuer de moitié sans compromettre ni la fertilité azotée, ni le maintien des prairies, si le système agricole est repensé afin de valoriser tous ses territoires. Pour ces experts, cette valorisation passe par une réorganisation et une diversification de la SAU et implique également de "couper les vannes" de l'approvisionnement international. Sans ces apports externes, les prairies wallonnes pourraient être maintenues afin d'assurer l'alimentation des animaux restants. Cette baisse du cheptel doit s'accompagner d'une augmentation et d'une revalorisation des superficies de légumineuses afin de combler en partie la diminution du flux azoté issu du cheptel (E16, E19).

Au sein de ces opinions divergentes, une tendance de convergence s'est dessinée sur un point : le système doit évoluer vers une autonomie fourragère (E1, E2, E4, E5, E17, E19). Le consensus établi sur ce point suite aux enquêtes a orienté la mise en oeuvre de ce scénario. Dans une optique de cohérence avec l'étude des flux azotés, la baisse du cheptel scénarisée a donc été celle qui permet d'atteindre l'autonomie en azote digestible.

4.2.2 *La mise en oeuvre du scénario 2 : une double reconfiguration*

1. Reconfiguration du cheptel :

Pour les experts rencontrés, la baisse de l'élevage ne se concrétise pas seulement dans la diminution des effectifs animaux, mais s'accompagne d'une reconfiguration du cheptel bovin. A nouveau, deux tendances se sont distinguées sur la manière dont cette reconfiguration devait s'effectuer.

Pour certains experts, cette nouvelle configuration intervient au niveau des deux grands systèmes présents en Région wallonne, les systèmes naisseur et engraisseur. Ces experts amènent l'idée que la baisse du cheptel pourrait s'exprimer par une diminution des effectifs naisseurs, afin de valoriser la filière engraisseurs (actuellement la moins développée en Région wallonne) (E4, E10).

L'importance de l'augmentation des bovins mixtes dans le système a été mise en avant par d'autres experts. Selon ces derniers, la reconfiguration du cheptel s'exprimerait par une apparition de ces bovins mixtes, accompagnant une diminution forte des systèmes uniquement laitiers ou viandeux (E9, E16, E17). Pour ces experts, ces bovins mixtes ont de nombreux avantages : ils permettent à l'exploitation de se diversifier, s'inscrivant bien dans une optique de systèmes culture-élevage plus intégrés, et sont davantage résistants aux changements climatiques.

Ces deux derniers arguments (l'intégration des systèmes culture-élevage et la résilience aux changements climatiques) répondent bien aux enjeux abordés par ce mémoire et la reconfiguration du cheptel étudiée scénarise donc une baisse des effectifs bovins de 26%, accompagnée de l'apparition de bovins mixtes, à hauteur de 10% du nouveau cheptel. L'apparition de ces bovins mixtes entraîne de nouveaux enjeux socio-économiques, notamment concernant les habitudes de consommation de viande, puisque ces races divergent du blanc-bleu consommé habituellement en Belgique (E7, E16).

2. Reconfiguration territoriale :

Les experts ont également exprimé la nécessité de repenser la répartition du cheptel sur le territoire wallon. Cet aspect n'a pas été abordé par la scénarisation quantitative, mais reste néanmoins une clé de la durabilité de la gestion des flux d'azote. Réinstaurer des bovins dans les régions de cultures (région limoneuse) permet, pour les experts, d'optimiser l'emploi de l'azote organique en déplaçant une partie de l'offre sur les territoires de la demande. La réimplantation du cheptel dans les régions de cultures peut passer par l'ajout de prairies temporaires dans les rotations (E7, E15, E16).

4.2.3 Quelles conséquences pour le système ?

1. Une évolution des surfaces de prairies

L'existence des prairies nécessite la présence d'un cheptel qui les valorise économiquement et qui justifie leur présence dans le système. Dès lors, les experts ont été amenés à se prononcer sur la question de l'évolution des surfaces de prairies suite à cette baisse du cheptel.

Pour un certain nombre d'experts, il est clair que la diminution des prairies est une conséquence logique de la baisse des cheptels, et qui s'inscrit également dans une tendance à la conversion des prairies en terres arables, économiquement plus rentables (E11, E17). D'autres avancent que cette baisse des prairies peut être évitée, grâce à une réorganisation des territoires, expliquée plus haut (E9, E16). L'élevage est alors utilisé pour valoriser certaines terres non utilisées.

Sans diminution de la surface des prairies, la charge UGB du cheptel pâturant (bovins, équins, ovins, caprins) vaut 2,6 , une charge très faible correspondant à des systèmes assez extensifs. La diminution des surfaces de prairies modélisée permet d'atteindre 3 UGB/ha, une norme suggérée par les experts avec qui la question avait été abordée (E4, E5).

2. L'apparition d'un déficit d'azote dans le système

La diminution du cheptel a entraîné, de façon prévisible, l'apparition d'un déficit d'azote

pour les cultures du système. Les experts ont exprimé leurs opinions sur les possibilités permettant de combler ce manque au sein du système.

Ceux qui s'étaient positionnés en faveur d'un maintien de l'élevage soutiennent que l'offre d'azote issue du cheptel n'est pas remplaçable dans le système (E4, E10). Pour d'autres, la valorisation des légumineuses permet de résoudre le problème (E7, E9, E16). Ils opposent aux partisans du maintien de l'élevage l'idée que la fixation symbiotique est la seule réelle source d'azote organique au sein du système, tandis que les flux émis par le cheptel ne sont que des flux de recirculation.

Parmi les autres sources d'azote envisagées, certains experts ont abordé la méthanisation d'herbe et de résidus de cultures (E16). Cette solution, bien que techniquement efficace pour remplacer les bovins, ne fait pas l'unanimité auprès des experts car elle n'est pas toujours rentable en termes de surfaces (E11, E16, E17). Les engrais verts sont une autre piste, mais il faut prendre en compte leur temps de réponse plus long que celui des engrais de ferme (E11, E17). Enfin, l'importation de fumier flamand est une voie techniquement envisageable, mais actuellement rendue illégale par le PGDA. Les avis des experts quant à cette interdiction sont mitigés. Pour certains, cela représente un risque inutile pour la pollution des nappes souterraines, justifiant l'idée de privilégier la matière organique locale (E15, E8). Pour d'autres, la réglementation stricte mise en place autour du taux de liaison (LS) permettrait d'éviter ce problème (E5).

IV Discussion

1 Analyse critique de la méthodologie

1.1 Cheminement du mémoire

1.1.1 *La richesse d'une méthodologie en trois temps*

La méthodologie suivie dans le cadre de ce mémoire s'est déroulée en trois temps. Dans un premier temps, une étude de la littérature, a permis de mieux comprendre le système agricole wallon et de comprendre les leviers de mise en oeuvre des systèmes d'intégration culture-élevage, ainsi que leurs avantages. La littérature a également fourni différentes bases de données utilisées par l'outil COCOON. Dans un second temps, des enquêtes auprès d'expertes d'horizons différents ont été menées dans l'optique de compléter le calculateur, mais également de co-construire les scénarios. Les données de la littérature ont été discutées avec les expertes, permettant de corriger certains chiffres, et de compléter COCOON avec des données manquantes dans la littérature. Les expertes ont également apporté certains éléments utilisés pour consolider le calculateur, et le rendre le plus représentatif du système dans son ensemble. Dans un troisième temps, les résultats obtenus par l'outil COCOON ont été comparés à d'autres bilans d'azote wallon et français pour en faire ressortir les forces et faiblesses.

Cette méthodologie a l'avantage de combiner une expertise tant qualitative (littérature et enquêtes) que quantitative, dont les données proviennent de bases statistiques (bases de données issues de la littérature) et du terrain (enquêtes auprès d'expertes). De cette façon, l'information est représentée d'une façon la plus complète possible, et soumise à un triple regard.

Une difficulté rencontrée lors des enquêtes a été d'articuler une vision centrée sur un seul élément du système, à une vision du système dans son ensemble. En effet, l'approche choisie est systémique et large et n'a pas pour but de représenter chaque détail du système, ce qui ne concorde pas toujours avec la réalité vécue par les expertes. Cette approche est riche, parce qu'elle permet de relever la diversité des opinions et des réalités, tout en maintenant une vue d'ensemble du système.

1.1.2 *Perspectives d'amélioration des démarches suivies*

Consolidation de la base de données wallonnes

L'obtention de données reste un point limitant pour la fiabilité du modèle. Bon nombre d'informations n'existent pas de façon actualisée et précise pour le système wallon, et la recherche de données a souvent été compliquée par les divergences et désaccords rencontrés d'une part entre les expertes et la littérature, mais également au sein des expertes entre elles. Des incertitudes importantes sur les proportions de trèfles dans les prairies, l'importance des surfaces des cultures de couverture, les typologies des différents systèmes de fertilisation, ou du niveau d'intensivité des prairies pourraient être levées par des enquêtes de terrain, qui permettraient

alors de représenter le système sur une base solide. C'est le cas en France, où l'existence de fermes de référence classées selon une typologie nationale et régionale, et suivies annuellement par des conseillères de la chambre d'agriculture, permet aux chercheuses du monde agricole d'accéder à des données très complètes sur le système (Chambres d'agriculture, 2019; Afterres, Solagro et al., 2017).

Une approche systémique à partir de caractérisation de terrain

La base de données wallonne pourrait être consolidée par une récolte importante de données sur le terrain. Cela permettrait de caractériser des systèmes d'exploitation au lieu d'une succession d'éléments et de développer une approche plus systémique de l'agriculture wallonne. La méthodologie développée par COCOON étudie le système comme un ensemble de cultures distinctes, ayant chacune leurs caractéristiques propres, mais l'état actuel de caractérisation du système wallon ne permet pas d'y inclure des éléments tels que les rotations et les associations de cultures, qui sont pourtant des caractéristiques déterminantes de la fertilité. Ce genre d'approche est développée dans l'outil MoSUT, réalisé par le groupe SOLAGRO et implique un travail de terrain conséquent en termes de ressources et de durée, puisque des éléments comme les rotations s'étudient sur plusieurs années. Cette approche est néanmoins une perspective très riche pour l'outil COCOON, qui a l'objectif d'étudier le système de la façon la plus globale possible.

1.2 L'outil COCOON

1.2.1 Validité et transférabilité

Deux critères sont utilisés pour évaluer la qualité du modèle COCOON : un critère quantitatif et un critère qualitatif. La validité du modèle, en tant que critère quantitatif, évalue les erreurs de modélisation sur les résultats en les comparant à d'autres données fiables. Cette partie est présentée dans les résultats lors des comparaisons chiffrées aux modèles sur les bilans d'azote (2.2). Le deuxième critère, qualitatif cette fois, est la transférabilité du modèle qui évalue la possibilité de transférer les résultats du modèle à d'autres contextes d'étude. Ce critère repose sur la comparaison d'une description des modèles entre eux. Cette comparaison est effectuée au tableau 16 par rapport à deux modèles wallons : le modèle EPICgrid, précédemment décrit dans la partie "résultats" et le modèle DECiDE, développé par le CRAW. Ce dernier est basé sur la méthodologie standardisée de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) . Conçu à l'échelle de l'exploitation, il permet d'estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de NH₃ des exploitations. L'outil est proposé à destination des exploitations agricoles, et de leurs conseillères (Van Stappen and Lories, 2021).

Tableau 16 – Comparaison qualitative de modèles wallons sur l'étude des flux d'azote

	Modèle COCOON	Modèle EPICgrid	Modèle DECiDE
Type de modèle	Caractérisation des flux d'azote	Bilan hydrologique	Analyse de cycle de vie
Objectif	Évaluation des flux d'azote selon les caractéristiques du cheptel et des cultures de la Région wallonne	Évaluation des flux de solutés en Région wallonne par modélisation hydrologique	Évaluation et comparaison de l'empreinte énergétique et climatique des fermes en Région wallonne
Échelle spatiale	Région wallonne	Bassins hydrologiques - régions agricoles agrégées à l'échelle de la Région wallonne	Exploitation agricole
Approche temporelle	Non dynamique réalisé à l'échelle d'une année (à réaliser chaque année pour variabilité inter-annuelle)	Dynamique : -rotations de cultures : prélèvement successif de plusieurs cultures différentes -décomposition de la matière organique au cours du temps et en fonction des conditions météorologiques	Non dynamique réalisé à l'échelle d'une année (à réaliser chaque année pour variabilité inter-annuelle)
Processus	Linéaires ⁴²	Non linéaires : caractérisation des pertes fonction de nombreux facteurs du système (climat, topographie, pédologie)	Linéaires
Typologie des engrais	Distinction entre engrais de ferme (organiques) et engrais de synthèse (minéraux)	Distinction entre azote organique et minéral	Distinction entre engrais de ferme (organiques) et engrais de synthèse (minéraux)
Indicateurs	Autonomie et efficacité du système	/	Consommation énergétique, émission de GES et de NH ₃ de l'exploitation

Alors qu'ils étudient tous deux les flux d'azote à l'échelle de la Région wallonne, le modèle EPICgrid et le modèle COCOON emploient des méthodologies très différentes. Le modèle EPICgrid réalise un bilan hydrologique dynamique, régi par des processus non-linéaires répondant aux conditions physico-chimiques changeantes du milieu. Sous l'angle de la fertilité, ces processus permettent de modéliser la minéralisation de l'azote et de distinguer sa forme minérale de sa forme organique, dont les propriétés sont différentes. La résolution du modèle est plus fine puisqu'elle se fait à l'échelle des bassins hydrologiques et permet de mettre en avant la tension territoriale existant entre l'offre et la demande en azote. Mais tant de précision ne permet pas d'évaluer de manière simple des scénarios comme le fait l'outil COCOON. Par ailleurs, le recours à des indicateurs pour évaluer le système est un atout qui ne se retrouve pas dans l'outil EPICgrid.

Le modèle DECiDE, quant à lui, adopte une méthodologie de calcul très similaire à celle de COCOON. Toutefois, DECiDE est un modèle à l'échelle de l'exploitation et n'a pas un objectif de scénarisation, mais plutôt un objectif d'évaluation comparative. L'outil DECiDE ne cherche donc pas à représenter certains aspects du système, tels que la tension territoriale résultant de la séparation en Région wallonne entre les activités d'élevage et de cultures.

42. Une processus linéaire est une équation mathématique de premier ordre de type "y = a·x", ce qui implique que lorsque y augmente, x augmente proportionnellement

1.2.2 *Perspectives*

Le modèle COCOON n'est actuellement pas en capacité de considérer les différentes successions culturales et de représenter la tension territoriale de l'azote en Région wallonne. L'intégration de l'aspect dynamique et de la régionalisation des cultures sont des perspectives intéressantes et envisageables. L'aspect dynamique pourrait être ajouté en représentant le système cultures sur plusieurs années, et en y insérant des distinctions de besoins entre les cultures en tête de rotation, et celles en fin de rotation. L'aspect régional, quant à lui, peut être développé en détaillant les bases de données par région agricole, permettant ainsi de mettre en avant les caractéristiques propres à chaque localisation.

Les trois modèles wallons étudiés possèdent tous leurs spécificités, et en cela, ils sont assez complémentaires. Le développement de l'outil COCOON a levé la question de la distribution des surfaces agricoles selon différentes pratiques de fertilisation, et de la configuration du cheptel. Cette configuration pourrait être affinée en distinguant différentes classes selon le niveau d'intensification du cheptel. Dans tous les cas, cela a permis, avec l'aide des expertes, de proposer des scénarios d'évolution des différentes pratiques agricoles et des effectifs du cheptel, dont l'intérêt dans le cadre d'une telle étude est discuté au point 1.3.1.

1.3 La création de scénarios

1.3.1 *L'intérêt d'une approche tournée vers le futur*

L'approche choisie pour la réalisation de cette étude est basée sur la création de scénarios, et par conséquent, est tournée vers le futur. Les scénarios permettent de représenter l'évolution d'un système, et de proposer des futurs, dans l'optique d'adapter au mieux la gestion de la situation présente. Se représenter des enjeux futurs permet de planifier une transition adaptée, et s'insère dans une optique systémique, au sein de laquelle les différentes actrices sont réunies, pour réfléchir ensemble l'avancée du système. En ce sens, l'élaboration de scénarios semble être une façon pertinente d'étudier un système.

1.3.2 *Regard critique*

Les scénarios choisis mettent en scène des perspectives de gestion durable des flux d'azote. Le choix de ces scénarios est un positionnement sur une vision de la durabilité de ces flux, mais cette vision mérite d'être nuancée. Il est en effet très compliqué de définir la durabilité, et elle peut s'exprimer par de nombreux aspects différents d'un système. En ce qui concerne les flux d'azote, les résultats de l'étude ont montré que l'agriculture biologique entraînait certaines améliorations des indicateurs étudiés; une autonomie accrue, un système plus efficient, et une diminution de l'utilisation d'azote synthétique. Ces facteurs suffisent-ils cependant à affirmer que le système représenté est plus *durable*? La question peut être discutée.

1.3.3 Perspectives

L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire imagine deux scénarios pour le futur de la Wallonie : une évolution de l'AB jusque 30% de la SAU, et une diminution de 26% des effectifs bovins. Une perspective intéressante soulevée lors de la création du premier scénario était d'imaginer et de chiffrer une distribution des 30% de cultures en AB, en distinguant pour chacune d'elle une évolution dépendant à la fois de facteurs techniques et socio-économiques. L'évolution de l'AB est souvent discutée de façon globale, et la valeur ajoutée de l'étude réalisée de le cadre de ce mémoire a été de détailler de façon concrète la mise en oeuvre de cet objectif. Une perspective à considérer pour une utilisation approfondie de ce scénario serait de réaliser un éventail de situations, représentant plusieurs distributions possibles des 30% de la SAU en AB. Un scénario pourrait alors envisager l'atteinte de l'objectif par évolution des prairies, comme l'indiquerait la tendance actuelle, tandis qu'une troisième possibilité pourrait analyser une situation où les grandes cultures (céréales, pommes de terres et betteraves) évolueraient de façon plus importante. Des éléments de résultats tels que la tension territoriale ou la demande en azote organique pourraient être amenés à varier selon la configuration choisie.

Quant au second scénario, il a permis d'observer les conséquences sur la fertilité azotée et sur le maintien des prairies d'une reconfiguration du cheptel wallon, dans le but d'atteindre une autonomie alimentaire en azote digestible du cheptel. Une perspective à approfondir pour ce second scénario pourrait être d'utiliser COCOON pour analyser les effets de différentes reconfigurations du cheptel. Ainsi, l'on pourrait imaginer un cheptel dans lequel les ruminants sont majoritairement maintenus, avec une diminution plus importante des porcins et des volailles. D'autre part, un cheptel de bovins diminué, mais majoritairement mixte, avec une diminution plus importante des porcins et des volailles est également une reconfiguration intéressante à explorer. La scénarisation d'un éventail de configurations permettrait de mettre en avant des variations de certains éléments de résultats tels que la disponibilité de l'offre organique ou l'évolution des prairies et surfaces fourragères nécessaire à l'atteinte de l'autonomie en azote digestible.

Cette approche en éventail permettrait dès lors d'identifier les leviers et les freins à la mise en oeuvre de la transition au sein de chacun des scénarios. Tout en montrant en parallèle d'autres perspectives, elle donne les clés d'une comparaison entre les voies possibles, et met en avant les enjeux relatifs à chacune des possibilités.

2 L'intégration culture-élevage comme levier d'une gestion durable des flux d'azote en Wallonie

Les résultats ont mis en avant deux tensions apparaissant dans le système : une tension quantitative et une tension territoriale.

La tension territoriale s'exprime par une distribution asymétrique de l'offre en azote organique au sein de la région, résultant en une forte concentration de l'offre dans les zones d'élevage.

La tension quantitative quant à elle, s'exprime par le fait que l'offre en azote organique ne comble pas toute la demande et qu'une partie de cette offre provient indirectement d'azote synthétique puisque l'élevage est nourri en partie par des cultures et prairies poussant à partir d'engrais azotés synthétiques. Dès lors, la dépendance aux engrais azotés synthétiques reste présente dans le système.

L'objectif de cette section est de mener une réflexion sur le dénouement - ou non - de ces tensions grâce aux scénarios imaginés en collaboration avec les experts. Un état de ces deux tensions sera brièvement exposé pour chacun des deux scénarios et des perspectives de dénouement issues de la littérature seront ensuite exposées pour chacune d'elle. La possibilité d'adapter ces perspectives étudiées à l'étranger au cas de la Wallonie sera aussi discutée.

2.1 Retour sur les scénarios : état des lieux des tensions territoriale et quantitative

1. Premier scénario : 30% de la SAU en AB à l'horizon 2030

Etat de la situation : diminution de la tension quantitative sur la demande en Norg, mais augmentation de la tension territoriale.

Pour effectuer la transition d'un système conventionnel vers un système biologique, la disponibilité de l'offre en intrants organiques est indispensable. Les résultats observés pour le premier scénario montrent un *dénouement de cette tension quantitative*, et confirment que le système peut produire suffisamment d'azote organique pour atteindre l'objectif, même si l'autonomie en azote organique n'est pas encore atteinte (des cultures en AC sont toujours présentes, et l'azote synthétique reste indispensable pour leur fertilisation). Un frein à cette transition apparaît cependant : d'un système où les superficies en AB sont très majoritairement des prairies, on passe à un système dans lequel près de la moitié des terres agricoles en AB sont des cultures. Initialement, l'offre est donc localisée là où se trouve la demande : dans les régions d'élevage. Le système scénarisé est confronté à un tout nouvel enjeu, car les régions effectuant une transition vers l'AB sont les régions de grandes cultures. *La tension territoriale est accrue.*

2. Second scénario : atteindre un équilibre entre le cheptel, les prairies, et l'offre en azote organique, à l'horizon 2030

Etat de la situation : augmentation de la tension quantitative entre l'offre en azote organique et sa demande. Pas de changement quant à la tension territoriale.

L'équilibre entre le cheptel, les prairies et l'offre en azote organique s'est articulé autour de l'autonomie alimentaire animale en azote. Les résultats montrent que cette autonomie est atteinte en augmentant la part des légumineuses cultivée pour l'alimentation animale et en diminuant le cheptel bovin de 26%. Cet objectif est atteint, mais ne permet pas de maintenir une offre en azote organique suffisante pour la fertilisation des cultures. De nombreuses pistes existent pour diminuer cette *tension quantitative* et atténuer la *tension territoriale* qui s'y

joint. Cela demande une réorganisation territoriale et une meilleure valorisation de l'ensemble des ressources du territoire.

"Faire mieux avec moins, c'est possible si on s'organise bien." (COCOON)

2.1.1 Favoriser les systèmes d'intégration culture-élevage comme piste pour le dénouement de la tension territoriale

Pour dénouer cette tension territoriale, des perspectives existent. Certaines ont été abordées par les experts et sont développées dans les résultats, d'autres ont été explorées par la littérature. Deux de ces pistes sont discutées dans la section suivante.

1. Augmenter les échanges entre fermes, une possibilité à petite échelle

Une réponse logique et intuitive pour le dénouement de cette tension est d'étudier les optiques d'échanges d'engrais de ferme entre exploitations de cultures, et exploitation d'élevage. Il s'agirait alors de comprendre les mécanismes favorisant ces échanges, afin de les mettre en place de façon efficiente.

Une telle étude a été menée par Asai et al. 2014b, au Danemark. Le Danemark est un point de comparaison intéressant pour la situation wallonne, en ce sens que de la même façon qu'en Wallonie, on y observe une forte spacialisation des régions de culture et d'élevage. Les échanges d'engrais de ferme ont été étudiés sur base d'un échantillonnage de 1500 fermes danoises, et leur étude a permis de caractériser les partenariats mis en place par les agriculteurs, dans le cadre de ces échanges. Il en est ressorti qu'ils ont lieu entre des cultivateurs spécialisés, et des éleveurs spécialisés ayant déjà un lien social fort (familial, ou voisinage), et se connaissant de longue date. Les échanges étudiés étaient réalisés dans le cadre de partenariats sur le long terme, via des réseaux locaux et très peu professionnels (Asai et al., 2014b). Les distances sur lesquelles ces échanges sont effectués sont très courtes (inférieures à 10 kilomètres).

Les conclusions de cette étude sur les échanges d'engrais de ferme montrent que cette perspective n'est pas en mesure de lever la tension territoriale existant pour les flux d'azote en Wallonie. Les échanges concernent en effet des agriculteurs très proches, tant socialement que géographiquement, ce qui n'est pas le cas des éleveurs et des cultivateurs concernés par le cas Wallon.

Ces échanges ne peuvent être envisagés que si des exploitations d'élevage sont réintégrées dans les régions de grandes cultures, une perspective bloquée par le manque d'attractivité de l'élevage observé actuellement en Région wallonne.

2. Vers des systèmes culture-élevage plus intégrés

Si les échanges d'engrais de ferme ne peuvent être envisagés comme une solution à grande échelle, des solutions pour des systèmes culture-élevage mieux coordonnés doivent être envisagées. Le projet européen CANTOGETHER a étudié 26 de ces solutions, dans différentes régions de l'Union Européenne, et les a documentées (European Commission, 2016). Parmi les innovations mises en oeuvre, un projet initié en Toscane (Italie) a permis de renforcer la collaboration entre éleveurs et cultivateurs dans un région où, tout comme en Wallonie, ces deux

activités sont éloignées spatialement (Moraine et al., 2014). Ainsi, l'intégration de l'élevage et des cultures a été renforcée par deux aspects : la production de gaz naturel par biométhanisation sur les territoires des fermes d'élevage, et les échanges de terres entre éleveurs et cultivateurs. Dans un premier temps, la production de gaz naturel à partir des déjections du cheptel a permis d'obtenir un digestat qui, une fois séché, a pu être transporté sur des distances bien plus importantes que le fumier liquide (jusque 30 kilomètres), à moindre coût. Dans un second temps, les échanges de terres ont été pensés pour transformer certaines parcelles de cultures en prairies temporaires, et inversement. Pour les cultivateurs, ces échanges ont permis d'augmenter les possibilités de terres disponibles pour les cultures, facilitant ainsi la gestion des rotations. La fertilité des terres a également été améliorée grâce au pâturage, et à la disponibilité de digestat séché. Pour les éleveurs, la possibilité de faire pâturer une partie du cheptel sur d'autres terres a permis de diminuer la pression exercées par les bovins sur les eaux souterraines et de surfaces, en diminuant la quantité d'azote rejetée sur les terres. Ces éleveurs bénéficient également du gaz naturel produit (Moraine et al., 2014).

Des perspectives innovantes telles que l'exemple toscan montrent que des solutions pour renforcer les liens entre culture et élevage existent, mais elle demandent de l'organisation collective et nécessitent l'existence de coopératives ou groupements de producteurs. De plus, la déshydratation de fumier est assez consommatrice en énergie, et nécessite des équipements technologiques importants (E16). Ces différents aspects sont autant de facteurs à prendre en compte, pour envisager l'implémentation de telles innovations en Région wallonne.

2.1.2 *Les légumineuses intégrées aux systèmes culture-élevage et à l'AB; une piste pour le dénouement de la tension quantitative*

Un des facteurs ayant permis d'atténuer la tension quantitative entre l'offre et la demande en azote organique est l'introduction plus importante de légumineuses dans le système. Ces cultures sont complémentaires aux engrais de ferme, car elles constituent une source d'azote primaire pour le cheptel. Cette complémentarité est une perspective pleine de potentiel, puisque la fixation symbiotique permet d'augmenter les entrées d'azote dans le système, et que le cheptel (bovin) permet de transformer efficacement cet azote en engrais disponible pour les cultures.

Les légumineuses permettent d'atténuer la tension quantitative à deux niveaux : en diminuant la demande en azote des cultures, et en augmentant l'offre en azote organique dans le système. Les différentes méthodes d'inclusion des légumineuses et leurs effets sont présentés au tableau 17.

Tableau 17 – Méthodes d'inclusion des légumineuses et leur effet sur les flux d'azote

Rôle des légumineuses dans le dénouement de la tension quantitative		
	Diminution de la demande	Augmentation de l'offre
Cultures	Intercultures Cultures associées	Engrais verts
Elevage	/	Culture fourragère de luzerne Présence de trèfles dans les prairies

Actuellement, le principal débouché des légumineuses est l'alimentation animale (Voisin et al., 2014). Outre leur aptitude à fixer l'azote atmosphérique, elles fournissent au cheptel des graines et fourrages riches en protéines, reconnus pour leur qualité nutritionnelle (Voisin et al., 2014). Avec le trèfle, elles jouent un rôle dominant pour l'atteinte de l'autonomie protéique dans les fermes d'élevage (Peyraud et al., 2012). Puisque l'élevage est un moteur de l'introduction des légumineuses dans le système culture (Martin et al., 2016), les synergies polycultures-élevages sont un levier à étudier pour la diminution de la tension quantitative observée pour les flux d'azote. Le double effet des légumineuses sur l'offre et la demande en azote organique est ici analysé, à l'aide de la littérature et des résultats obtenus pour les deux scénarios étudiés.

Au niveau du système cultures, un des leviers mis en avant par la littérature est **l'insertion de légumineuses telles que la luzerne ou le trèfle dans les rotations**, comme cela a été mis en oeuvre dans les deux scénarios. En fournissant 100 à 200 kg d'azote par hectare de culture leur succédant (Ballesta and Vilamanya, 2010), elles permettent de *diminuer le flux de la demande*. Cette perspective doit être accompagnée par le renforcement de l'intégration entre cultures et élevage, puisque c'est l'élevage qui est à l'origine de la demande en luzerne mais également en trèfle (via les prairies) (Kebede et al., 2016). Une autre possibilité d'intégration des légumineuses dans le système culture est leur utilisation comme **engrais vert**. Un couvert de trèfle semé en interculture ou sous culture agit comme source d'azote, après sa destruction, *augmentant ainsi l'offre en azote* de l'exploitation (Chambre d'agriculture région Nord-Pas de Calais, 2012). L'utilisation d'engrais vert ne nécessite pas d'être couplée à des activités d'élevage, puisque les légumineuses utilisées sont enfouies dans le sol, et non valorisées via un débouché.

Au sein d'un système élevage, l'introduction de **légumineuses fourragères** telles que la luzerne peut permettre d'*augmenter l'offre en azote*, comme l'a montré le groupe français Solagro en travaillant sur la transition des systèmes agraires, et la réalisation de scénarios à l'horizon 2050. Leurs constats rejoignent ceux observés par l'étude du premier scénario : "L'agriculture biologique autonome avec élevage repose le plus souvent sur le principe de la polyculture-élevage, où une partie de l'assolement est constituée de légumineuses dédiées à l'alimentation des animaux. Une partie de l'azote symbiotique est transformé en viande ou en lait, une partie est disponible pour fertiliser les surfaces cultivées." (Couturier et al., 2020).

Les systèmes d'intégration culture-élevage agissent donc comme des leviers soit au niveau de l'*offre*, soit au niveau de la *demande*. Au sein de l'exploitation, ils permettent à l'agriculteur de réaliser un transfert de fertilité en introduisant dans ses rotations soit de la luzerne, soit des prairies temporaires avec une proportion élevée de trèfles. Ces superficies sont valorisées par la présence d'un cheptel, et l'exploitation atteint l'autonomie fourragère et protéique, *tout en augmentant son offre en azote organique*. L'exploitation atteint également une haute efficacité en intrants, car outre l'augmentation d'autonomie que les légumineuses engendrent, elles améliorent l'efficacité du système (Lüscher et al., 2014) en réduisant le lessivage des nitrates, grâce à l'effet de leurs racines profondes (Snapp et al., 2005). Intégrés

à l'échelle locale, ces systèmes sont également des moteurs de l'introduction de légumineuses, car leur coexistence au sein d'une même région permet la diversification des rotations, avec inclusion de prairies temporaires ou de légumineuses (Martin et al., 2016), *ce qui permet de diminuer la demande en azote* des cultures leur succédant. La complémentarité de ces synergies à plus grand échelle peuvent également agir comme levier, les systèmes cultures comblant alors les besoins en fourrage des systèmes élevages (Martin et al., 2016).

➔ Ainsi, la combinaison des légumineuses et de l'élevage permet une utilisation autonome et efficiente de l'azote, fixé symbiotiquement par les premières, et transféré aux cultures par le second.

Un avantage prometteur des légumineuses est également leur résilience face au changement climatique, et la prise de conscience croissante de leur intérêt est un moteur d'adaptation culturelle vers leur intégration plus courante au sein des systèmes de culture-élevage (Stagnari et al., 2017). Leur mise en place dans les systèmes européens, et par conséquent dans le système wallon, est néanmoins confrontée à de nombreux freins principalement socio-économiques, dus à l'absence de filières fortes pour les valoriser (Magrini, 2018).

Bien que les cultivateurs soient souvent réticents à l'introduction de légumineuses en raison de débouchés instables, des perspectives ont été observées dans certains systèmes et documentées par la littérature. Ainsi, Moraine et al. (2018b) a étudié comment l'implantation d'une coopérative dans le département du Tarn-et-Garonne avait pu lever cette crainte. En effet, en organisant les échanges de fourrages ou mélanges céréales-légumineuses contre du fumier, les cultures ont été diversifiées et les échanges pérennisés sur des bases sûres (Moraine et al., 2018b). L'importance de coopératives ou groupes d'actions organisés pour coordonner les échanges voire pour organiser le transport, le stockage, la transformation et la commercialisation n'est plus à démontrer (Moraine et al., 2016). En Wallonie, les filières manquent encore de coordination et, bien que des Groupes d'Actions Locales (GAL) se développent sur certaines communes, des actions coordonnées à l'échelle de la région sont nécessaires pour développer un marché stable des légumineuses (E17).

2.1.3 *Concept de circularité de l'azote : une meilleure valorisation des ressources*

La question de l'autonomie alimentaire animale et de l'autonomie du système en azote amène à repenser l'utilisation des ressources qui est faite à l'échelle d'un territoire. Une utilisation des ressources plus efficiente et mieux distribuée contribuerait au dénouement des *tensions territoriale et quantitative*. La gestion du territoire peut être réfléchi afin de répondre à la demande du cheptel et à la demande des cultures. Ces points sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

Une approche territoriale

Alors que la valeur de chaque parcelle est souvent vue de manière indépendante du reste, une

approche systémique du territoire met en évidence les connexions possibles entre les différents éléments du paysage afin de valoriser toutes les ressources qui s'y retrouvent.

a. Répondre à la demande du cheptel

L'autonomie européenne de concentrés riches en protéines, c'est-à-dire contenant plus de 15% de protéines, n'atteint que 45% (Jouan et al., 2020). Or ces concentrés sont couverts à 81% par du soja dont une partie contribue à la déforestation de certains pays (Jouan et al., 2020). Atteindre l'autonomie wallonne en alimentation animale n'aurait probablement pas de répercussion majeure au niveau mondial mais engager la transition vers cette autonomie pourrait initier un mouvement européen, soucieux des problématiques mondiales.

L'outil COCOON a permis de montrer qu'une autonomie en azote digestible pour les animaux était atteignable sans avoir recours aux concentrés importés, pour une diminution de 9% du cheptel wallon. Ce constat provient notamment d'une diversification et valorisation des sources en azote, peut-être moins concentrées, mais comprenant une quantité d'azote totale suffisante. Cela fait écho au concept de circularité des ressources, étudié au niveau du territoire wallon, et qui cherche à valoriser toutes les ressources qui ne le sont pas encore pour l'alimentation animale.

L'autonomie alimentaire animale peut être atteinte avec les ressources locales, soit via les opportunités de reconnexion entre éléments, soit via leur planification.

Des opportunités de connexion entre animaux et surfaces non valorisées existent sur le territoire. Les inter-rangs de vignes ou d'autres cultures pérennes pourraient être pâturés ou utilisés pour la production de cultures fourragères, comme c'est le cas en France (E16). D'autres ressources, non plus au niveau des surfaces agricoles, mais au niveau de l'industrie agro-alimentaire, sont aussi valorisables. En Espagne, les agriculteurs ont imaginé un scénario où les vaches sont nourries essentiellement avec les co-produits de l'industrie locale tels que les résidus ou pulpes de meunerie (Moraine et al., 2014).

Sous couvert de la *planification*, le pâturage peut s'envisager dans les rotations culturales sur les cultures de couverture ou les résidus de cultures mais aussi sur les prairies temporaires encore souvent vouées à la fauche (Moraine et al., 2014).

b. Répondre à la demande des cultures

L'autonomie complète en azote organique du système wallon n'est pas encore atteinte et n'a pas été considérée dans ces scénarios. Toutefois, l'outil COCOON a montré l'importance des prairies et légumineuses pour soutenir l'autonomie du système. L'approche territoriale permet de réfléchir à la gestion de ces prairies et cultures comme connexion entre l'élevage et les cultures et d'en retirer le meilleur afin de dénouer les tensions quantitatives et territoriales décrites au point 2.

L'autonomie alimentaire du cheptel, vue sous l'angle de la circularité, permet potentiellement de réfléchir à l'utilisation qui est faite des terres arables. A nouveau, les opportunités de connexion (ou déconnexion) ainsi que la planification sont maîtres-mots pour une bonne valorisation des ressources du territoire.

L'optique de circularité crée *l'opportunité* de déconnecter des terres arables à destination des animaux et de les rediriger vers la production pour l'alimentation humaine. Cela laisse l'ouverture à un système de cultures à moindres rendements mais aussi à plus d'espaces dédiés aux cultures de légumineuses et aux prairies, primordiales dans l'offre en azote organique.

Par ailleurs, *la planification* dans le temps et l'espace favorise une bonne gestion des prairies, tant au niveau de la parcelle (E5) qu'au niveau du territoire (E16). Les prairies temporaires améliorent la fertilité du sol pour les cultures suivantes et Moraine et al. (2014) recommande des les introduire le plus fréquemment possible dans les rotations culturales avec du pâturage.

c. Application au territoire wallon

En Wallonie, les zones spécialisées en grandes cultures pourraient se diversifier et intégrer une composante d'élevage. Sans recourir au retour des exploitations d'élevage, le pâturage des vaches de réforme provenant d'exploitations plus éloignées géographiquement est envisageable sur des prairies temporaires. Celles-ci seraient plus fréquentes dans les rotations culturales, ce qui fertiliserait indirectement les cultures suivantes (Moraine et al., 2014). Dans la même optique, le pâturage des résidus de cultures ou d'intercultures pourrait aussi être envisagé. Cela pose question quant aux problèmes de transports. *A priori*, ceux-ci peuvent être levés par une bonne coordination et une bonne confiance entre cultivateurs et éleveurs. En région des prairies peu productives, la connexion avec des systèmes de cultures n'est pas aussi évidente. La suggestion de remplacer le maïs dédié à l'alimentation animale par des prairies sur les terres peu productives est une possibilité qui ouvrirait plus de portes à une fertilisation alternative, incluant les trèfles par exemple (Moraine et al., 2017). Cela bénéficierait à l'environnement mais aussi aux éleveurs qui pourraient stocker une partie de l'herbe pour l'hiver et substituer des ressources tels que les concentrés (Afterres, Solagro et al., 2017). Les échanges de connaissance et la coopération sont donc primordiaux à la réflexion sur la gestion du territoire.

D'une transition individuelle vers une transition collective

A l'échelle de la région, la mise en oeuvre concrète de l'intégration culture-élevage comme présentée ci-dessus ne pourra se réaliser que sur base d'une conception participative. La participation inclut notamment les différentes intervenantes issues des domaines de l'aménagement du territoire et de l'agriculture (Moraine et al., 2018a). Un projet de transition peut se créer si les différents acteurs sont enclins au changement et que le projet reflète leur vision collective de l'agriculture durable comme objectif à atteindre (Moraine et al., 2018b). Alors que les décisions collectives pourraient être un frein à la mise en oeuvre d'une réorganisation territoriale, elles peuvent aussi faciliter les concessions et l'apprentissage collectif constitue une clef pour orienter la dynamique de mobilisation des acteurs et soutenir le développement du territoire (Bélanger, 2015). A l'échelle de la région cela nécessite une bonne coopération entre les différentes communes, les différents villages et les différentes fermes. Finalement, c'est en convergeant les transitions individuelles vers une transition collective que les systèmes d'intégration culture-élevage seront renforcés en Région wallonne pour répondre à une gestion durable des flux d'azote.

Conclusion

Au cours des trois derniers siècles, de profonds changements ont eu lieu au sein du monde agricole. L'apparition d'engrais azotés synthétiques sur le marché mondial a fortement bouleversé les pratiques agricoles et les rapports à la fertilité, menant à une séparation entre les systèmes de cultures et d'élevage dont la complémentarité était remise en question. Une utilisation démesurée de ces engrais a engendré des répercussions néfastes sur l'environnement, ce qui a valu la mise en place de politiques au niveau de l'Union Européenne et de la Région wallonne afin de réglementer la gestion des flux d'azote. Outre les incitations techniques, une piste pour gérer ces flux de manière durable est de reconnecter l'élevage aux cultures, dans une optique de les intégrer à l'échelle du territoire.

La quantification des flux d'azote du système agricole wallon a été réalisée après développement de l'outil COCOON. Celui-ci a montré qu'en l'état actuel des choses, l'autonomie en azote du système s'élève à 59%. Il y a donc une tension quantitative entre l'offre et la demande en azote au sein du système wallon. De plus, le cheptel est à l'origine de 54% de cette offre, dont 88% proviennent des bovins. Une tension territoriale a donc aussi été relevée entre l'offre se trouvant principalement dans les régions herbagères d'élevage et la demande provenant des régions de grandes cultures, séparées géographiquement. Grâce aux prairies et cultures vouées à l'alimentation animale, l'autonomie en azote digestible du cheptel atteint 81%. Le système agricole wallon est donc dépendant d'importations d'engrais synthétiques, et de concentrés et fourrages pour l'alimentation animale. Malgré les normes du PGDA, 24% de l'azote introduit dans le système wallon sont perdus lors du stockage et de l'épandage des engrais, laissant une marge pour l'amélioration de la gestion des flux d'azote.

Deux scénarios pour l'horizon 2030 ont été construits en collaboration avec des experts afin d'imaginer des perspectives d'évolution dans la gestion des flux d'azote.

Le premier scénario imagine un système wallon dans lequel 30% de la SAU passe en agriculture biologique. L'évolution des surfaces est fortement influencée par les facteurs techniques, économiques (primes et filières) et socio-culturels. La part des prairies gérées en AB passe à 40% et la conversion de surfaces arables de l'AC vers l'AB se fait principalement au niveau des cultures de céréales, fourrages et cultures maraîchères. Finalement, la superficie des cultures de légumineuses est augmentée.

Suite à la mise en oeuvre de ce scénario, l'importation d'engrais synthétiques diminue de 22% et l'autonomie du système wallon atteint 82%. L'autonomie alimentaire animale s'élève à 93%. Malgré une diminution tendancielle des effectifs bovins, l'offre en azote organique augmente grâce à la diversification des sources d'engrais organiques, comme les légumineuses ou les trèfles en prairies. Ces sources d'azote contribuent à diminuer les pertes du système à 17% et détendent la tension quantitative. La tension territoriale est quant à elle renforcée par une plus grande demande en azote organique dans la région de cultures. La complémentarité

entre cultures et élevage doit donc être renforcée pour atteindre cet objectif.

Le deuxième scénario reconfigure le cheptel de façon à atteindre l'autonomie alimentaire animale en azote digestible. Le cheptel bovin diminue de 26% et est reconfiguré au niveau des systèmes naisseurs et engraisseurs. Les porcs et volailles diminuent plus faiblement. Cette baisse s'accompagne d'une diminution de la surface des prairies permanentes compensée par l'augmentation des superficies de céréales, prairies temporaires et plus fortement des superficies de légumineuses.

Suite à la mise en oeuvre du deuxième scénario, l'autonomie alimentaire animale est atteinte à 100%. La baisse du cheptel entraîne une diminution de l'offre du cheptel de 30%. Pourtant, l'autonomie en azote du système est maintenue à 58% en raison de l'augmentation de l'offre par les légumineuses. La proportion de pertes change peu et représente 22% de l'azote introduit. Malgré une consommation globale d'engrais à la baisse, la tension quantitative est accrue par un déficit d'azote dans le système. Si le cheptel est effectivement redistribué de manière plus homogène sur le territoire, la tension territoriale devrait diminuer.

Les résultats ont montré l'importance de la complémentarité entre cultures et élevage. Les *systèmes d'intégration culture-élevage* sont une piste pour le dénouement de la tension territoriale wallonne avec des possibilités innovantes d'échanger les ressources agricoles. Les *légumineuses*, couplées à ces systèmes, sont quant à elles une piste pour diminuer la tension quantitative et peuvent être valorisées de différentes façons à condition que des débouchés existent. Elles contribuent alors à augmenter l'offre en azote pour le cheptel via les fourrages et trèfles en prairie, augmenter l'offre en azote pour les cultures via les engrais verts et diminuer la demande en azote des cultures en étant introduites dans les cultures intermédiaires et cultures associées.

Étudier ces pistes sous l'angle de la *circularité des ressources* entraîne une meilleure valorisation des ressources disponibles sur le territoire tant pour le cheptel que pour les cultures. Cette approche nécessite une réflexion territoriale à propos des opportunités existantes et de la planification à élaborer. Des pistes envisageables pour la Wallonie sont le pâturage des vaches de réforme en région de grandes cultures, une réallocation des ressources à destination humaine et une gestion intégrée des prairies.

L'outil COCOON a permis d'ouvrir le débat sur les systèmes d'intégration culture-élevage comme leviers pour une gestion durable des flux d'azote en Wallonie. Son peaufinement permettra de représenter de manière plus fine le système agricole wallon et les perspectives de scénarios. Une enquête plus large sur les leviers aux tensions territoriale et quantitative permettra également de faire avancer le débat pour qu'un jour, ces mots deviennent réalité. Finalement, les trois pistes évoquées pourront voir le jour si tous et toutes travaillent en coopération pour cheminer vers une transition régionale collective et coordonner les actions pour soutenir le développement du territoire vers une gestion durable des flux d'azote.

V Annexes

ANNEXE 1 : Typologies des systèmes d'intégration culture-élevage

Tableau 18 – Typologie des échanges dans les systèmes d'intégration culture-élevage, adapté de (Moraine et al., 2016)

	1. Coexistence mondiale	2. Coexistence locale	3. Complémentarité	4. Synergie
Coordination spatiale	Non	Non	Non	Oui
Coordination temporelle	Non	Oui	Oui	Oui
Coordination organisationnelle	Non	Non	Oui	Oui
Pratiques et gestion au sein de la ferme	Exploitations spécialisées dans une activité	<ul style="list-style-type: none"> -Cultures : Introduction de cultures fourragères (de couverture ou non) dans les rotations de cultures -Epannage du fumier sur les champs de cultures -Elevage : Introduction de fourrage et céréales locaux dans l'alimentation animale 	<ul style="list-style-type: none"> -Cultures : Introduction de cultures fourragères (de couverture ou non) et de prairies pâturées dans les rotations de culture -Epannage de fumier sur les champs de cultures -Pâturage de chaume et céréales immatures -Vocation des cultures flexible : céréales ou ensilage -Elevage : Introduction de fourrage et céréales locaux dans l'alimentation animale 	<ul style="list-style-type: none"> -Cultures : Introduction de cultures fourragères (de couverture ou non) et de prairies pâturées dans les rotations de culture -Epannage de fumier sur les champs de cultures -Pâturage de chaume et céréales immatures -Vocation des cultures flexible : céréales ou ensilage -Elevage : Introduction de fourrage et céréales locaux dans l'alimentation animale
Considérations pour l'échelle de coordination	Echanges de matières premières riches en nutriments (céréales, fourrage, paille) via les marchés nationaux et internationaux	Echanges de matières premières (céréales, fourrage, paille, fumier) via une organisation économique locale (coopérative, etc) au sein d'une même région	<ul style="list-style-type: none"> -Echanges directs de matières premières (céréales, fourrage, paille, fumier) entre fermes -Planification stratégique pour équilibrer offre et demande locales et faire face aux imprévus -Partage du travail et des connaissances 	<ul style="list-style-type: none"> -Partage des ressources entre fermes (terres arables, céréales, fourrage, paille, fumier) -Planification stratégique pour équilibrer offre et demande locales et faire face aux imprévus -Coordination renforcée et durable pour une gestion complexe des rotations de culture intégrant le pâturage -Partage du travail et des connaissances

ANNEXE 2 : Sources des données utilisées dans COCOON

Les explications quant à l'obtention des données de fertilisation sont présentées ci-dessous. Les besoins de la biomasse sont issus de la base de données de RequaSud et du COMIFER (ASBL REQUASUD, 2011; COMIFER, 2013). Les parts de chaque culture cultivées en AB sont issues du document de Biowallonie pour l'année 2019 (A. Beudelot, M. Mailleux, 2020).

- *Céréales* : les données sont issues du rapport Sytra sur la filière céréales (Antier et al., 2020). Les besoins en azote étaient estimés selon quatre modes de production relatifs à l'utilisation de pesticides. Les quantités d'azote minéral et organique appliqués sur les cultures sont reprises telles quelles pour chaque type de pratique. Comme mentionné dans la section 1.2.2 Superficie agricole utile totale, l'épeautre reprend aussi d'autres cultures aux utilisations d'engrais similaires. Les proportions des surfaces sont reprises telles quelles du tableau 28 qui se base sur les modes de production de 2015. Si la culture est en tête de rotation, après une prairie temporaire, les besoins en azote peuvent être diminués (Crémer S., Bernes A. et Knoden D, 2016), mais cela n'est pas repris en compte ici.
- *Cultures industrielles* : les conseils de fumure en azote pour les betteraves sucrières et fourragères ne diffèrent pas et les mêmes quantités d'azote sont considérées bien que les besoins en azote des betteraves fourragères soient légèrement plus élevés (ASBL REQUASUD, 2011). Le conseil de fumure pour la betterave est de 120 uN/ha sans apport organique et 70 uN/ha avec apport organique (IRBAB, 2021). 60% des cultures de betteraves se trouvent en région limoneuse (Statbel, 2020), où on considère que la fertilisation est uniquement minérale au vu de la faible proportion d'élevage (E13). Un calcul de pondération permet de trouver une fumure moyenne soit $(120*0,6 + 70*0,4) = 100$. Les 20 autres unités sont apportées par du fumier de bovin. Pour les betteraves en culture biologique, un apport de 100 kg N/ha est conseillé (AGRIDEA, 2017; ADBFM, 2015; YARA France, 2019; IRBAB, 2021; Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la Betterave asbl, 2019; P. Bertin, 2017).

La fertilisation des cultures de lin est conseillée entre 70 et 130 kg N/ha et un exemple est donné à 80 kg N/ha, valeur choisie dans ce cas (COMIFER, 2013; CAP filière - Val-de-Loire, 2020; N. Rabourdin, 2018). Aucune information n'est donnée concernant l'AB ou la proportion des engrais organiques, qui sont donc assumés comme nuls pour l'AC.

Les conseils de fertilisation en azote pour les colza sont estimés à partir des quantités appliquées observées sur 18 parcelles en 2015 et qui sont cohérentes avec d'autres sources (DEKALB, 2018; P. Bertin, 2017; Vandenberghe C., 2015). L'apport d'engrais organique est considéré à 20 tonnes de fumier de bovin par hectare ou 5 tonnes de fientes de volaille, ce qui correspond à deux exemples de fertilisation issus de sources différentes. La fumure

organique n'est pas négligeable étant donné que 48% des cultures de colza se trouvent dans le Condroz (Statbel, 2020), région où la fertilisation organique n'est pas rare (E11). Pour l'AB, la quantité d'engrais organique est reprise de la fiche technique (Institut technique de l'Agriculture Biologique, 2007). Suite aux enquêtes, la fertilisation du colza est élevée à 180 kg N/ha au lieu de 165 (E11).

Les conseils de fumure pour la chicorée sont de maximum 80 kg N/ha en appliquant 2/3 d'engrais organiques et 1/3 d'engrais minéraux, pour la production biologique, il est assumé que les terres sont "normales à riches" car elles sont fréquemment amendées et que 50 kg N/ha suffisent en AB (Cornelis, 2003).

Pour le tabac et autres cultures, une approximation de 90 kg N /ha est faite à partir des conseils de fertilisation pour le tabac, à nouveau sans apport organique pour le conventionnel (COMIFER, 2013).

- *Pommes de terres* : les données sont issues du rapport Sytra pour la filière pommes de terre (Antier et al., 2019). Quatre niveaux d'utilisation d'engrais étaient présentés selon les classes de niveau de charge en produit phytopharmaceutiques. Cette typologie ne concorde pas avec la typologie du calculateur et la fertilisation semble élevée. Toutefois, comme ces chiffres sont issus d'enquêtes de terrain récentes et fiables, ces données ont été reprises telles quelles dans le calculateur. Étant donné que la typologie du calculateur ne reprend que 3 niveaux d'intensification en AC, la fertilisation raisonnée est la moyenne des systèmes économes et très économes qui étaient relativement proches. Pour l'AB, l'utilisation d'engrais organique se situe entre 80 et 100 kg N/ha en Région wallonne et c'est le chiffre le plus élevé qui est retenu (Antier et al., 2019) (Tableau 18). Les parts des pratiques sont reprises du tableau 14 et complétées avec la proportion en AB.
- *Légumineuses récoltées en grains secs* : Bien que la fertilisation conseillée de ces cultures soit nulle, il est commun d'apporter 30 à 40 unités d'azote par hectare (D. Knoden, G. Meniger, 2021). Cet apport est préférentiellement organique (E2).
- *Légumes* : les données sont issues du rapport Sytra pour la filière légumes (Riera et al., 2020). Les niveaux d'utilisation d'engrais sont associés aux filières du frais et de la transformation pour lesquelles les quantités d'azote appliquées en moyenne sont différentes. Étant donné que 96% des légumes sont voués à la transformation, les quantités appliquées pour les légumes sont celles des légumes de la filière transformation. La part en zéro-traitement est assimilée à la pratique écologiquement intensive. Pour les carottes et oignons et autres légumes, un apport de 30 T/ha de fumier de bovin en début de saison est considéré pour toutes les pratiques, le reste est de l'azote minéral (Légumes plein champs BIO, 2013). Pour les haricots et pois, aucune mention d'engrais organique n'a été faite et, étant donné les conseils d'éviter les apports de matière organique fraîche, il

est considéré que la totalité de l'azote provient des engrais minéraux (Merret, 2008).

- *Fourrage* : la fertilisation azotée pour le maïs fourrager est estimée à partir d'exemple donnés par l'ASBL Protect'eau pour le respect des normes du PGDA (CIPF a.s.b.l., 2018). La fertilisation des betteraves fourragères est assimilée à celle des betteraves sucrières bien que leurs besoins en azote diffèrent légèrement. Les légumineuses sont cultivées comme fourrage en cultures pures ou associées. La surface de cultures associées céréales-légumineuses pour l'année 2019 donnée par Statbel Statbel (2020) est plus faible que la surface mentionnée en AB pour la même année (A. Beaudelot, M. Mailleux, 2020). C'est la surface de Statbel qui est retenue ici et pour laquelle la surface de mélange est minimale. Dès lors, la fertilisation est considérée pour des légumineuses en culture pure comme mentionné pour les légumineuses récoltées en grains secs.
- *Fruits et vergers* : La fertilisation des fruits est évaluée à partir des conseils de la Chambre des Agricultures pour les pommes et poires par tonne produite (JF. Larrieu, 2019). Les besoins sont ensuite multipliés par une estimation de la quantité de fruits bio produits en Wallonie et divisés par le nombre d'hectares qui y sont alloués (N. Luburić, 2019; Statbel, 2020).
- *Prairies* : La fertilisation minérale des prairies est estimée sur base des conseils de la chambre des Agricultures Française pour un élevage intensif, ce qui correspond au cas de la Wallonie en termes de rapport surface/effectifs (Chambre d'agriculture de l'Ariège, 2017; Doligez, sans date). Deux experts ont confirmé cette fertilisation, mentionnant notamment les problèmes de surfertilisation des prairies (E11, E13). Cela correspond davantage à la fertilisation estimée dans la thèse de Catherine Sohier étudiant la Région wallonne (Sohier, 2011). Par ailleurs, les prairies temporaires sont fertilisées en moyenne 50% en plus que les prairies permanentes. La fertilisation organique provient des exemples de fertilisation du Livret de l'agriculture où l'apport par les légumineuses et les déjections animales est généralement de l'ordre de 150 uN/ha (D. Knoden, S. Crémer, R. Lambert, 2007).
- *Cultures non productives* : La fertilisation des cultures ornementales n'est pas connue. La superficie de ces cultures étant très faible, leur fertilisation peut être négligée et mise à 0. Les jachères et tournières ne sont pas fertilisées.

ANNEXE 3 : Description des objets mathématiques utilisés dans le calculateur

Tableau 19 – Description des objets mathématiques relatifs aux paramètres des engrais de ferme

Objet	Nom	Abréviation	dimensions	Unités des éléments
Vecteur	Cheptel	c	1 x 24	Nombre d'individus ⁴³
Vecteur	Déjections du cheptel	d	1 x 24	Kg/jour/catégorie
Matrice	Nombre de jours passés à l'étable	E	24 x 24	Jours/an
Matrice	Nombre de jours passés en prairie	P	24 x 24	Jours/an
Matrice	Proportion du cheptel en stabulation paillée	F	24 x 24	%
Matrice	Proportion du cheptel en stabulation sur sol nu	L	24 x 24	%

Tableau 20 – Description des objets mathématiques relatifs aux convertisseurs des engrais de ferme

Objet	Nom	Abréviation	dimensions	Unités des éléments
Matrice	quantité de déjections produite	D	24 x 24	kg/jour/individu
Matrice	teneur en azote du flux	D	24 x 24	kgN/jour/individu

Tableau 21 – Description des objets mathématiques obtenus par le calculateur pour les engrais de ferme

Objet	Nom	Abréviation	dimensions	Unités des éléments
Vecteur	Quantité d'azote apportée par le fumier	Fumier	1 x 24	Kg N/cheptel/an
Vecteur	Quantité d'azote apportée par le lisier	Lisier	1 x 24	Kg N/cheptel/an
Vecteur	Quantité d'azote transférée aux prairies	Prairies	1 x 24	Kg N/cheptel/an

Tableau 22 – Description des objets mathématiques utilisés et obtenus dans le calculateur pour les superficies

Objet	Nom	Abréviation	dimensions	Unités des éléments
Matrice utilisée	Surfaces	S	23 x 23	Ha
Matrice utilisée	Part relative des pratiques	Prat	23 x 4	%
Matrice obtenue	Surfaces des cultures par pratique	SPrat	23x4	Ha

Tableau 23 – Description des objets mathématiques relatifs aux convertisseurs pour les besoins en azote des cultures et leur demande de fertilisation en azote

Objet	Nom	Abréviation	dimensions	Unités des éléments
Matrice	Besoins de N par hectare de culture	B_{Nsurf}	23 x 1	Kg N/ Ha /an
Matrice	Demande en fertilisation de N_{org} par hectare de culture et pratique	$Ferti_{SNorg}$	23 x 4	Kg N_{org} / Ha /an
Matrice	Demande en fertilisation de N_{synth} par hectare de culture et pratique	$Ferti_{SNsynth}$	23 x 4	Kg N_{synth} / Ha /an

Tableau 24 – Description des objets mathématiques intermédiaires obtenus par le calculateur pour la demande en azote

Objet	Nom	Abréviation	dimensions	Unités des éléments
Vecteur	Besoin en azote par culture	B_N	23 x 1	Kg N/ an
Matrice	Demande en N_{org} par culture et par type de pratique	$Ferti_{N_{org}}$	23 x 4	Kg N_{org} /an
Matrice	Demande en N_{synth} par culture et par type de pratique	$Ferti_{N_{synth}}$	23 x 4	Kg N_{synth} /an
Vecteur	Besoin total en azote pour les cultures wallonnes	$B_{N_{tot}}$	1 x 1	Kg N/an
Matrice	Demande totale en N_{org} et N_{synth} pour les cultures et prairies wallonnes par type de pratique	$Ferti_{N_{tot}}$	4 x 4	Kg N/ an

ANNEXE 4 : Experts rencontrés lors des enquêtes

Experts rencontrés

1. Chargé de recherche au sein l'équipe Sytra, spécialisé en élevage et en création de scénarios, UCLouvain (**E1**)
 2. Directeur de l'ASBL centre Agri-environnemental de Michamps, UCLouvain (**E2**)
 3. Conseiller en pratiques de fertilisations organiques, gestion des cultures intermédiaires et des fourrages et prairies, Protect'eau (**E3**)
 4. Chargé de mission politique et des groupements de producteurs, FUGEA (**E4**)
 5. Responsable du centre de recherche Marbaix et éleveur en agriculture biologique, UCLouvain (**E5**)
 6. Coordinateur de la cellule Recherche et développement en agriculture biologique, CRAW (**E6**)
 7. Chercheur au département durabilité, systèmes et prospectives, CRAW (**E7**)
 8. Expert sol, agriculture et environnement à la direction de l'état de l'environnement wallon, SPW (**E8**)
 9. Directrice de Solagro (groupe français spécialisé en scénarios de transition) (**E9**)
 10. Chercheuse à l'axe eau-sol-plante de l'ULG Agro-Bio Tech (Gembloux), créatrice du modèle EPICgrid (modélisation des flux de solutés en Région wallonne) (**E10**)
 11. Vendeur d'engrais et agriculteur conventionnel, Semailsud (**E11**)
 12. Expert en sciences du sol et pédologie, UCLouvain (**E12**)
 13. Responsable technique de la chaîne Qualité Minérale et Organique, REQUASUD (**E13**)
 14. Attachée scientifique au département durabilité, systèmes et prospectives, CRAW (**E14**)
 15. Agriculteur en élevage et cultures biologiques (**E15**)
 16. Chercheur spécialisé en systèmes polyculture-élevage, INRAE (**E16**)
 17. Chercheur-coordonateur spécialisé en fourrages, prairies et légumineuses, Fourrage Mieux (**E17**)

ANNEXE 5 : Guide d'entretien

1. Présentation et mise en confiance

- Nous sommes deux étudiantes UCLouvain en dernière année bioingénieur, option environnement.

- Nous réalisons un mémoire commun sur les flux d'azote en Wallonie et l'intégration culture élevage.

- Nous vous remercions de votre intérêt pour notre travail, et surtout d'avoir accepté de nous rencontrer.

- Nous allons, si vous l'acceptez, enregistrer l'entretien. Cet enregistrement restera confidentiel et anonyme, il peut être interrompu à votre demande.

2. Objectifs

- Nous avons réalisé un calculateur permettant de modéliser les flux d'azote en Wallonie, selon différents scénarios. Nous estimons les quantités d'azote produites par le cheptel (bovins, ovins, volaille), la demande en azote issue de l'agriculture, et les pertes en azote dans les sols.

- Une fois ces flux modélisés, nous évaluons :

l'origine de l'azote du système wallon :

- Proportion des engrais organiques VS minéraux
- Proportion de la nourriture animale locale Vs importée

l'efficience de l'utilisation de l'azote

- Proportion de l'azote du système utilisé dans les cultures

les conséquences induites

- Proportion de la surface des prairies VS cultures

- Ces indicateurs sont évalués pour différents scénarios. L'objectif est ici d'observer l'évolution de ces chiffres dans deux cas de figure :

- 1) Une augmentation de la SAU wallonne cultivée en Bio, qui attendrait 30% d'ici 2030.

- 2) Une réduction des cheptels wallons permettant à la fois de diminuer les émissions de GES dues aux élevages (objectif RW, GIEC), en maintenant un certain niveau de prairies, et une offre en azote suffisante, d'ici 2030.

- Nous souhaitons ouvrir un dialogue sur ce calculateur et sur ces scénarios avec différents acteurs du système de l'azote.

Le 1^{er} objectif de ces échanges est d'apporter des améliorations au calculateur, afin de le rendre plus représentatif de la réalité wallonne.

Le 2^{me} objectif de ces entretiens sera de confronter nos scénarios au regard de ces acteurs du système, et de dialoguer de manière constructive sur ces scénarios, et la manière de les améliorer.

Le 3^{me} objectif de ces entretiens est d'accueillir de nouvelles propositions de scénarios qui vous sembleraient pertinentes, et de les modéliser, sur base de vos recommandations. Le tableau 25 présente le canevas initial sur la réflexion des scénarios.

Tableau 25 – Canevas des enquêtes sur les scénarios

Questions	Eléments de réponse attendus	Relance éventuelle
Scénario 1 : une augmentation de la SAU cultivée en bio – 25%		
Quelles conséquences pour les cultures ?	Quelle part de bio pour quelle culture ?	Pourquoi ?
	Quel effet sur les rendements ?	Quels freins ?
	Quel effet sur la fertilisation ?	Quelles opportunités ?
	Effet sur les légumineuses et couverts ?	Quelle alternative ?
		Quelle solution à mettre en place ?
Quelles conséquences sur l'élevage ?	Quel effet sur le cheptel ?	
	Quel effet sur le fourrage ?	
	Quel effet sur la consommation de viande ?	
Quelles difficultés pour les agriculteurs ?	Difficultés techniques ?	
	Difficultés pour les fermes spécialisées ?	
	Difficultés économiques ?	
Conséquences - autres ?	Conséquences sur les changements climatiques ?	
	Changements économiques ?	
	Evolution dans la consommation ?	
Scénario 2 : un équilibre entre les cheptels, les prairies et l'offre en N ?		
Quelle diminution du cheptel pour atteindre un équilibre ?	Diminution des émissions de GES	Pourquoi ?
	Diminution des pertes en nitrates ?	Quels freins ?
	Extensification de l'élevage	Quelles opportunités ?
	Maintien des prairies : puits de carbone, biodiversité	Quelle alternative ?
	Diminution de la consommation de viande/protein shift	Quelle solution à mettre en place ?
	Maintien de l'offre en azote	
	Viabilité des exploitations agricoles, éventuelles difficultés ?	
Conséquences - autres	Difficulté techniques pour les agriculteurs ?	
	Impact sur l'agriculture biologique ?	
	Transitions alimentaire ?	
	Impact économique ?	
	Difficultés techniques	
	AB	
	Augmentation des légumineuses	
Transition alimentaire		

ANNEXE 6 : Ajustements du calculateur suite aux enquêtes

Modifications relatives au cheptel wallon et à la production d'engrais de ferme

-Le niveau de précision utilisé pour la typologie des espèces animales a été augmenté, afin de mieux représenter chaque cheptel dans sa diversité. La production d'azote par tête dépend en effet de critères plus larges que l'âge et l'espèce de l'individu. Des distinctions ont été ajoutées, entre vaches laitières, vaches allaitantes, taureaux et vaches de réformes ainsi qu'entre les verrats, les truies gestantes, et les truies saillies. Aucune modification n'a été apportée pour les cheptels ovins, caprins, et équins. Une nouvelle classification a été réalisée sur base de la classification utilisée pour les calculs du SPW. (E8, E11, E17).

Modifications relatives aux sources d'engrais organiques non-issues du cheptel

-L'apport d'azote par les légumineuses dans les prairies n'est pas négligeable. La surface des prairies a donc été rajoutée dans l'offre en azote (E2, E3)

-Les légumineuses des prairies qui minéralisent l'azote dans le sol sont une source d'azote non maîtrisable. Dès lors, cette offre d'azote a été comptabilisée directement vers la fertilisation des prairies (E4).

Modifications relatives aux pratiques agricoles

-Les prairies temporaires étant généralement gérées de manière plus intensive, la fertilisation azotée a été rehaussée à 150 kg N/ha (E5).

-La fertilisation du lin a été revue à la baisse, à 80 kg N/ha au lieu de 100. La fertilisation du colza a quant à elle été relevée, à 180 kg N/ha au lieu de 165 (E11).

Modifications relatives aux pertes d'azote

-Les pertes en azote n'étaient au départ considérées qu'après épandage au champ. Or, pour les engrais de ferme, ces pertes sont à comptabiliser de l'excrétion des déjections animales jusqu'à l'épandage sur les champs. Une partie de l'azote excrété par le cheptel est perdue par volatilisation lors de l'excrétion, du stockage (également en prairie) et du transport. Cet azote perdu est soustrait de l'offre en azote produite par le cheptel (E1, E10).

-Pour l'évaluation des pertes par volatilisation, les coefficients du GIEC utilisés par le calculateur semblent trop élevés. Ces chiffres ont été remplacés par les valeurs de coefficients utilisés dans le modèle EPICgrid (E4).

Modifications relatives à l'autonomie du système

-Au départ, l'autonomie fourragère était évaluée mais il est plus pertinent d'étudier l'autonomie alimentaire en azote de tout le cheptel wallon ; c'est-à-dire les fourrages et les concentrés (E1).

ANNEXE 7 : Hypothèses et incertitudes relatives aux données

Incertainces relatives au cheptel wallon et à la production d'engrais de ferme

H.01 : Le nombre d'individus jeunes et vieux de chaque cheptel est issu de la base de données sanitel (Statbel, 2020). Pour les cheptels ovins, caprins et équins, les données datent de 2016, et il n'existe pas, à notre connaissance, de distinction entre les individus jeunes et les individus vieux. Au vu de la faible importance numérique de ces cheptels en comparaison aux cheptels bovins et porcins, tous les ovins, caprins et équidés ont été classés dans la catégorie "vieux". Cette approximation n'impacte pas le résultat de manière significative, puisque ces cheptels représentent moins d'un pourcent du cheptel wallon (E1).

I.01 : Les données de stabulation des différents cheptels sont issues d'un recensement effectué par Statbel en 1996 (Agence Flamande de l'Environnement et al., 2020). Ces données n'ont pas été renouvelées depuis (E2, E3). Ces données n'ont néanmoins pas d'impact sur la production d'azote organique totale, et n'influencent que la répartition des différents types d'engrais de ferme issue du cheptel (lisier, fumier et azote non maîtrisable).

Incertainces relatives aux sources d'engrais organiques non-issues du cheptel

H.02 : L'apport d'azote par fixation symbiotique des légumineuses est estimé pour chaque superficie de légumineuses en Région wallonne. Les apports par hectare sont issus de données de (Vance, 1998) et (Guinet, 2019). Pour certaines superficies occupées par des mélanges de légumineuses dont les types et les proportions ne sont pas référencés, des valeurs minimales ont été utilisées, afin de ne pas surestimer la quantité d'azote introduite dans le système.

H.03 : Les espèces qui se développent en prairie permanente et prairie temporaire sont généralement différentes et n'ont pas les mêmes potentiels de fertilisation (E17). L'espèce de trèfle considérée par défaut dans le calculateur est le trèfle blanc, parce qu'elle se développe à la fois dans les prairies permanentes et les prairies temporaires.

I.02 : L'apport d'azote par les prairies dépend de la proportion de trèfle contenue dans ces prairies (environ 2kg d'azote fixés par pourcentage de trèfles, sur un hectare de prairie, E17). Cette proportion n'est pas connue à l'échelle de la Wallonie et peut varier de 0 à 80% selon le type de prairie, la période de l'année et la gestion de la prairie (E17). Dans la littérature, les valeurs de 10% et 25% reviennent de façon courante (D. Knoden, S. Crémer, R. Lambert, 2007) ; la valeur de 18% a été utilisée dans le calculateur. Un intervalle de confiance a également été calculé et se situe entre les valeurs de 0% et 80%.

Incertainces relatives à la consommation d'azote synthétique

I.03 : La demande en fertilisation des prairies dépend de leur caractère extensif ou intensif

(E2). Une grande diversité existe dans la manière dont les prairies sont fertilisées, cette diversité n'a pas été prise en compte dans le calculateur, parce qu'aucune typologie ne permet de les différencier de façon quantitative. Une quantité moyenne sur base des exemples issus de La Fertilisation raisonnée des prairies a été retenue (D. Knoden, S. Crémer, R. Lambert, 2007).

Incertitudes relatives aux superficies agricoles

I.04 : Les superficies des cultures de légumineuses sont souvent biaisées car elles peuvent être intégrées dans des cultures associées dont les déclarations ne correspondent pas toujours à la réalité de terrain (E4). Les superficies reprises dans le calculateur sont celles référencées dans Statbel (Statbel, 2019).

Incertitudes relatives aux pratiques agricoles

H.04 : La répartition de chaque superficie de culture en quatre types de pratiques a été effectuée par l'équipe Sytra pour les céréales, les pommes de terres, et certains légumes. Pour les autres cultures wallonnes, il n'existe pas de typologie distinguant les différentes agricultures entre elles (mis à part l'agriculture biologique, réglementée par un cahier de charges précis). Pour ces cultures, il est admis que la totalité de la superficie agricole non référencée en agriculture biologique (AB) est cultivée en agriculture conventionnelle.

H.05 : Dans la pratique, seule une partie de l'azote contenu dans les engrais organiques est directement disponible pour les cultures sous forme minérale. Le reste de l'azote contenu dans ces engrais est minéralisé dans l'année ou sur les années à venir. Le bilan annuel en azote produit par le calculateur réalisé dans le cadre de ce travail est un "faux bilan annuel", c'est-à-dire qu'il représente à l'échelle d'une année les entrées moyennes d'azote provenant des années actuelles et antérieures. Dans cette optique (ce qui n'est pas le cas pour un bilan à l'échelle de la parcelle), il est pertinent de considérer dans l'offre tout l'azote contenu dans ces engrais organiques (E10).

I.05 : La réalité de terrain diverge parfois des conseils de fumure et une tendance à la surfertilisation en engrais organiques des prairies et de certaines cultures telles que le maïs a été relevée. Cette tendance n'est pas contrôlable, et par conséquent pas mesurable, puisque les indicateurs de LS et APL sont toujours respectés (E11, E4).

Incertitudes relatives aux pertes d'azote

H.06 : La dynamique des pertes relève de modèles mathématiques complexes décrivant à la fois les réactions chimiques du cycle de l'azote et à la fois les phénomènes physiques de bilans hydrologiques. Ces pertes ne peuvent pas être évaluées par des relations linéaires avec les entrées d'azote, parce qu'elles dépendent de facteurs météorologiques, topographiques, et pédologiques. Le calculateur n'a pas la vocation d'être un modèle hydrologique et le calcul des

perles dépasse donc le cadre de ce travail. Ces pertes étant importantes pour la réalisation du bilan azoté annuel, elles ont été estimées dans un intervalle de valeurs compris entre 6 et 11% des entrées, permettant d'obtenir des valeurs similaires à celles du modèle EPICgrid, un modèle hydrologique conçu pour l'évaluation de ces pertes en Région wallonne (E10).

Incertitudes relatives à l'autonomie du système

H.07 : Les co-produits sont une part importante de l'alimentation animale (E4, E9, E17). Une grande incertitude existe concernant d'une part leur importance en Région wallonne, et d'autre part la proportion de ces co-produits utilisée pour l'alimentation animale. Une estimation, à considérer avec prudence, a été réalisée sur base des documents de (Antier et al., 2020) et de (Vandaele, 2018) et a été discutée en intervalle.

H.08 : 45% des céréales produites en Région wallonne sont vouées à l'alimentation animale (Delcour et al., 2014). Ce pourcentage est donc directement repris pour estimer la quantité de concentrés disponible pour l'autonomie alimentaire animale. Toutefois, il n'est pas précisé si les 45% sont consommés seulement en Wallonie. Il est assumé que la totalité produite en Wallonie est consommée en Wallonie (E4).

ANNEXE 8 : Hypothèses et incertitudes relatives à la structure du calculateur

Les incertitudes présentées dans cette section se réfèrent à des cases ayant été ajoutées au calculateur, complétant ainsi sa structure, mais dont le contenu est resté vide, en raison de l'inexistence de la donnée dans la littérature.

I.06 : Des engrais fabriqués à partir d'une base organique (guano, fientes de poules incinérées, farine de sang séché, farine de porc mise en bouchon) existent sur le marché. A l'heure actuelle, ceux-ci ne sont utilisés qu'en agriculture biologique car ils sont plus chers et moins efficaces que les engrais synthétiques, leur quantité est encore négligeable par rapport aux autres types d'engrais. Dans le calculateur, une case a tout de même été ajoutée dans les autres sources en azote organique (feuille 2) car avec l'augmentation de l'agriculture biologique, ces engrais pourraient prendre plus d'ampleur à l'avenir (E6, E11).

I.07 : Les couverts sont non négligeables comme source d'azote puisqu'ils permettent de maintenir l'azote dans le sol et d'éviter son lessivage. Dans le modèle EPICgrid, 90% des terres emblavées doivent être couvertes. Mais les couverts restent une grande inconnue au niveau de leur surface (fonction des rotations culturales), des espèces présentes et de leur finalité (enfouis ou exportés) (E6, E10, E4). Un compartiment des couverts végétaux a été rajouté dans l'offre en azote organique non issue du cheptel. A priori, ces couverts ne sont pas une source d'azote mais maintiennent l'azote dans le sol et évitent une partie de son lessivage.

I.08 : De la paille est importée de France, et représente une entrée d'azote dans le système. Malgré une faible teneur en azote, la quantité de paille est importante (E5). Les quantités importées au niveau de la Région wallonne ne sont pas connues. Une case a été créée pour la paille importée dans le calculateur, mais la valeur étant inconnue, elle n'est pas prise en compte .

I.09 : Il faudrait considérer l'apport d'azote dans le sol par les bactéries non-symbiotiques (E5). Cette fixation est estimée entre 10 et 30 kg N/ha par an. Toutefois, les quantités pouvant être fixées dans les sols sont extrêmement variables en fonction du type de sol, des conditions du milieu, de la végétation présente, de la population bactérienne, etc (COMIFER, 2013).

I.10 : Des pertes du sol par voies gazeuses liées à la vie microbienne sont aussi observables. Néanmoins, elles compenseraient l'effet de la fixation par les bactéries non-symbiotiques, impliquant que ces deux compartiments très incertains puissent être négligés (COMIFER, 2013).

I.11 : Certaines superficies fertilisées, comme les cultures de sapins de Noël, ne sont pas reprises dans les données de la SAU wallonne (E2), et ne sont dès lors pas comptabilisées dans

ce travail, qui étudie l'azote au sein du système agricole.

I.12 : L'apport d'engrais est généralement mesuré au niveau de la rotation. En effet, il s'effectue lors de certaines phases de la rotation culturale mais ne précède pas nécessairement toutes les cultures. Le calculateur effectue un bilan à l'échelle d'une année, par conséquent les rotations sortent du cadre de ce travail, bien qu'elles aient un rôle important pour la gestion de la fertilité. Pour les prendre en compte, l'outil devrait être adapté pour effectuer une succession de bilans sur plusieurs années, en prenant en compte un changement annuel d'assolement et de besoins en azote (E11).

ANNEXE 9 : Système actuel : valeurs des compartiments présentés avec leurs intervalles

Tableau 26 – Intervalles de valeurs des compartiments présentés à la figure 11 (kT/an)

Bilan d'azote actuel (kT/an)	Offre	Demande
Cheptel	90,8	18,2
<i>Sources organiques non-maîtrisables</i>	33,9	
<i>Sources organiques maîtrisables</i>	38,7	
<i>Pertes au stockage</i>	18,2	18,2
Biométhanisation/boues	2,8	
Dépôt atmosphérique	20,0	
Fixation Symbiotique	14,5 [9,0-57,4]	6,3 [3,9-24,5]
<i>Stock sol</i>	8,2 [5,1-32,9]	
<i>Biomasse</i>	6,3 [3,9-24,5]	6,3 [3,9-24,5]
Source organique manquante	0,0 [5,5-0,0]	0,0 [5,5-0,0]
Synthétique	80,8	
Stock sol	24,9	57,0 [53,9-81,7]
<i>Initial</i>	24,9	24,9
<i>Dépôt atmosphérique</i>		20,0
<i>Fixation symbiotique</i>		8,2 [5,1-32,9]
<i>Cheptel et biométhanisation</i>		3,8
Fertilisation AC		141,9
<i>Dont prairies</i>		52,6 [52,6-56,2]
<i>Dont cultures</i>		53,5 [53,5-56,9]
<i>Dont pertes</i>		35,8 [35,9-28,8]
Fertilisation AB		10,4
<i>Dont prairies</i>		6,6 [6,6-7,1]
<i>Dont cultures</i>		0,6 [0,6-0,6]
<i>Dont pertes</i>		2,7 [3,2-2,7]
Surplus besoins de la biomasse		0,0 [0,0-50,4]
Total	233,8 [228,3-276,7]	233,8 [228,3-276,7]

ANNEXE 10 : Système actuel : flux à destination de la biomasse et des pertes

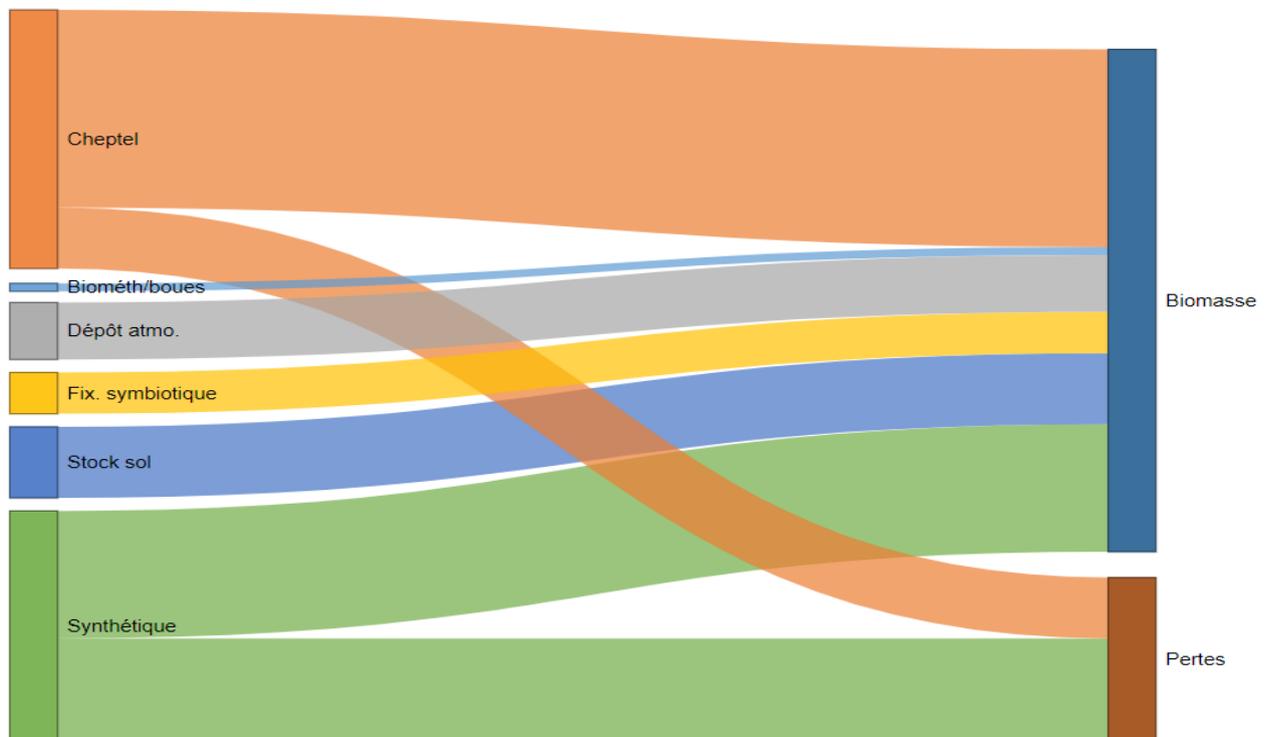


FIGURE 16 – Situation 2019 : Caractérisation des flux à destination de la biomasse et des pertes

ANNEXE 11 : Scénario 1 : Évolution des superficies cultivées en AC

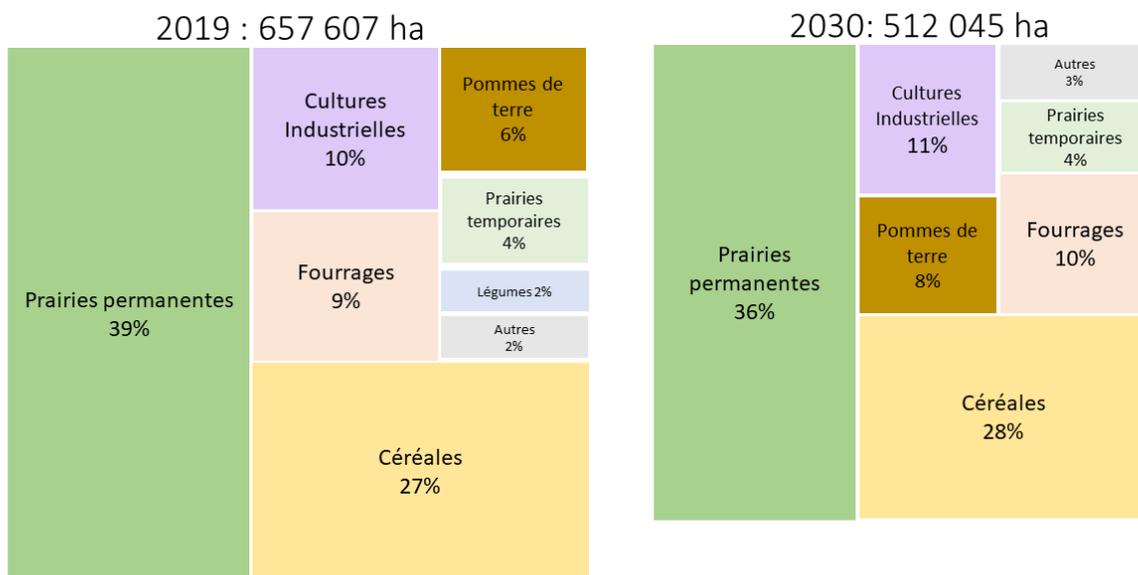


FIGURE 17 – Scénario 1 : Evolution des superficies cultivées en AC

ANNEXE 12 : Scénario 1 : Valeurs des compartiments présentés avec leurs intervalles

Tableau 27 – Intervalles de valeurs des compartiments présentés à la figure 13 (kT/an)

Bilan d'azote scénario 1 (kT/an)	Offre	Demande
Cheptel	79,7	16,0
<i>Sources organiques non-maîtrisables</i>	29,7	
<i>Sources organiques maîtrisables</i>	34,1	
<i>Pertes au stockage</i>	16,0	16,0
Biométhanisation/boues	2,8	
Dépôt atmosphérique	20,0	
Fixation Symbiotique	44,8 [10,2-58,6]	19,2 [4,5-25,5]
<i>Stock sol</i>	25,6 [5,8-33,8]	
<i>Biomasse</i>	19,2 [4,5-25,5]	19,2 [4,5-25,5]
Synthétique	63,2	
Source organique manquante	0,0 [26,6-0 0]	
Stock sol	24,9	63,6 [43,8-71,8]
<i>Initial</i>	24,9	18,0
<i>Dépôt atmosphérique</i>		20,0
<i>Fixation symbiotique</i>		25,6 [5,8-33,8]
Fertilisation AC		110,3
<i>Dont prairies</i>		38,7 [38,7-41,4]
<i>Dont cultures</i>		43,7 [43,7-46,5]
<i>Dont pertes</i>		27,9 [27,9-22,4]
Fertilisation AB		26,4
<i>Dont prairies</i>		14,3 [14,3-15,3]
<i>Dont cultures</i>		3,9 [3,9-4,2]
<i>Dont pertes</i>		8,2 [8,2-6,9]
Surplus besoins de la biomasse		8,0 [0-28,6]
Total	235,4 [227,4-249,2]	235,4 [227,4-249,2]

ANNEXE 13 : Scénario 1 : Flux à destination de la biomasse et des pertes

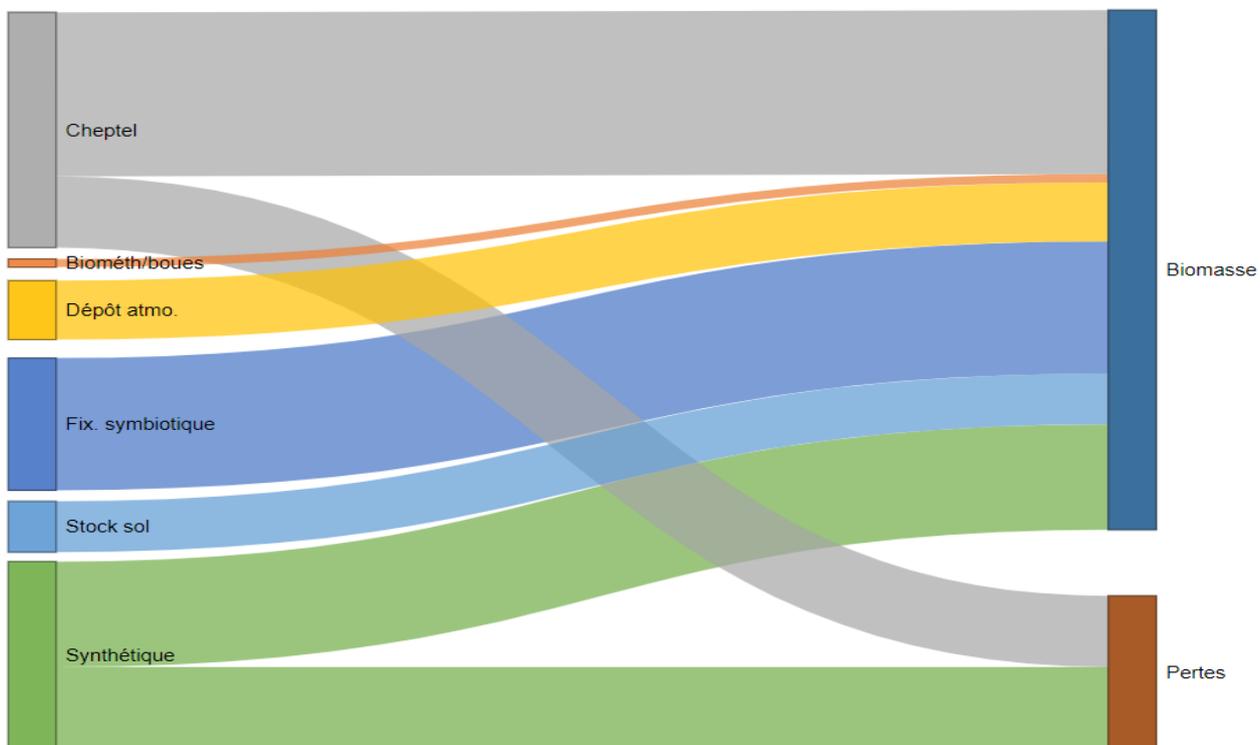


FIGURE 18 – Scénario 1 : Caractérisation des flux à destination de la biomasse et des pertes

ANNEXE 14 : Scénario 2 : Valeurs des compartiments présentés avec leurs intervalles

Tableau 28 – Intervalles de valeurs des compartiments présentés à la figure 15 (kT/an)

Bilan d'azote scénario 2 (kT/an)	Offre	Demande
Cheptel	63,9	12,8
<i>Sources organiques non-maîtrisables</i>	<i>23,7</i>	
<i>Sources organiques maîtrisables</i>	<i>27,4</i>	
<i>Pertes au stockage</i>	<i>12,8</i>	<i>12,8</i>
Biométhanisation/boues	2,8	
Dépôt atmosphérique	20,0	
Fixation Symbiotique	28,1 [10-52,3]	12,1 [0,0-22,4]
<i>Fertilisation AC</i>	<i>13,9 [10,0-13,9]</i>	
<i>Stock sol</i>	<i>2,1 [0,0-16,0]</i>	
<i>Biomasse</i>	<i>2,1 [0,0-22,8]</i>	<i>12,1 [0,0-22,8]</i>
Source organique manquante	11,7 [29,8-0,0]	11,7 [15,6-0,0]
Synthétique	72,9	
Stock sol	24,9	47,0 [44,9-60,9]
<i>Initial</i>	<i>24,9</i>	<i>24,9</i>
<i>Dépôt atmosphérique</i>		<i>20,0</i>
<i>Fixation symbiotique</i>		<i>2,1 [0,0-16,0]</i>
Fertilisation AC		122,5
<i>Dont prairies</i>		<i>38,3 [38,3-40,9]</i>
<i>Dont cultures</i>		<i>53,5 [53,5-57,0]</i>
<i>Dont pertes</i>		<i>30,7 [30,7-24,6]</i>
Fertilisation AB		18,2
<i>Dont prairies</i>		<i>10,2 [10,2-10,9]</i>
<i>Dont cultures</i>		<i>2,4 [2,4-2,6]</i>
<i>Dont pertes</i>		<i>5,7 [5,6-4,7]</i>
Surplus besoins de la biomasse		0,0 [0,0-19,5]
Total	224,3 [224,3-236,8]	224,3 [224,3-236,8]

ANNEXE 15 : Scénario 2 : Flux à destination de la biomasse et des pertes

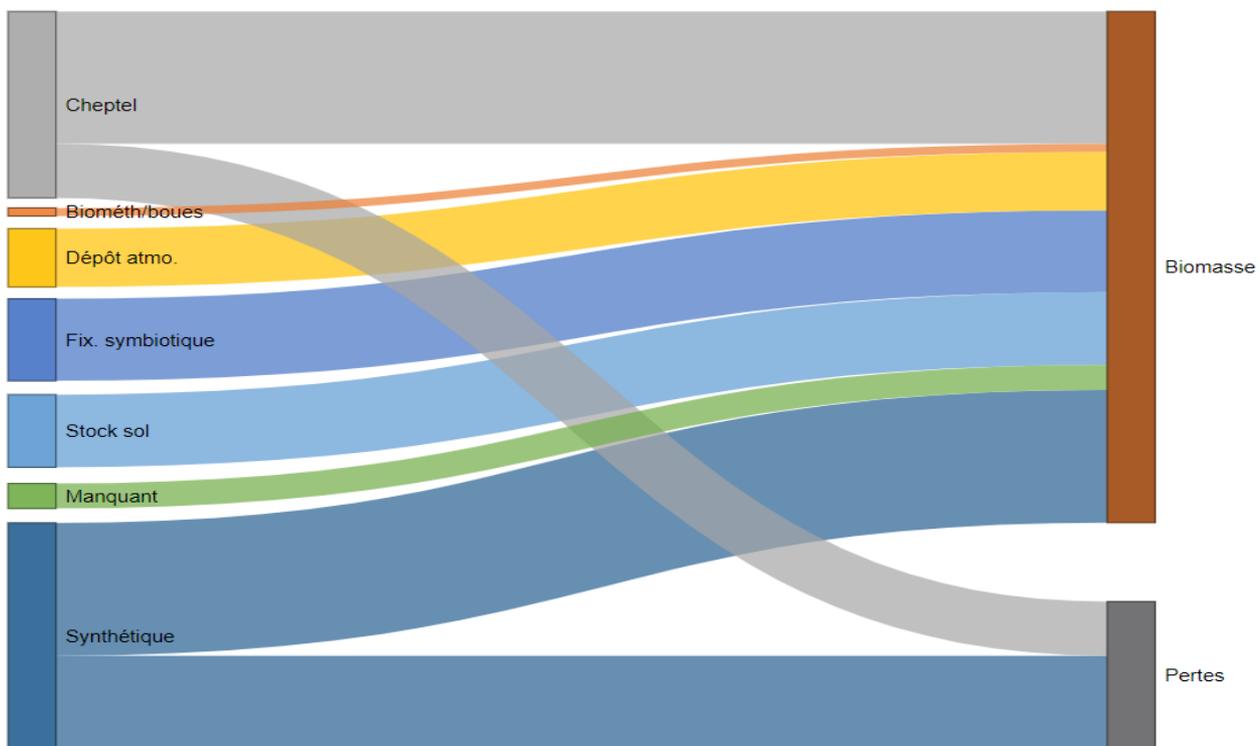


FIGURE 19 – Scénario 2 : Caractérisation des flux à destination de la biomasse et des pertes

ANNEXE 16 : Synthèse des choix de mise en oeuvre relatifs aux deux scénarios

Tableau 29 – Synthèse de mise en oeuvre des deux scénarios

		Situation actuelle 2019		Scénario 1 30% de la SAU en AB 2030		Scénario 2 taille optimale du cheptel 2030	
Cultures		Superficie (ha)	Part AB (%)	Superficie (ha)	Part AB (%)	Superficie (ha)	Part AB (%)
Céréales	froment d'hiver	125 608	1.0	125 608	24.0	140 608	11.0
	orge d'hiver	28 046	3.0	28 046	24.0	36 046	12.0
	épeautre et autres	31 190	11.0	31 190	24.0	40 190	33.3
Cultures industrielles	betteraves sucrières	38 835	0.5	31 374	7.0	38 835	2.5
	lin, colza, chicorée	27 225	1.0	27 225	10.1	27 225	3.1
Pommes de terre		43 056	1.9	43 056	8.0	43 056	2.6
Légumineuses récoltées en grain sec		3 807	7.0	7 614	50.0	11 421	20.0
Fourrages	betteraves fourragères	1 360	34.6	1 360	68.0	1 360	50.0
	maïs fourrager	57 389	0.8	57 389	15.0	57 389	5.0
	légumineuses	3 654	59.8	7 309	68.0	7 307	80.7
Légumes	légumes de plain air	18 113	6.2	18 113	60.0	18 113	22.0
Cultures permanentes	vergers et petits fruits	1 927	19.5	1 927	50.0	1 927	68.3
	autres	611	0.0	611	0.0	611	5.0
Prairies	prairies temporaires	36 635	22.7	36 635	40.0	39 743	30.0
	prairies permanentes	309 180	18.0	309 180	40.0	262 803	33.0
Terres arables non cultivées		6 956	4.5	6 956	4.5	6 956	8.9
Part totale de la SAU en AB (%)		10		30		21	
Cheptel		Effectif 2019		Effectif 2030	Evolution (%)	Effectif 2030	Evolution (%)
Bovins		1 257 818		1 079 505	-14	931 089	-26
<i>dont mixtes</i>		<i>Non renseigné</i>		<i>Non renseigné</i>	/	75 798	/
Porcins		370 271		370 271	0	329 541	-11
Volailles		4 766 098		4 766 098	0	4 527 793	-5
Caprins		9 933		9 933	0	9 933	0
Ovins		43 116		43 116	0	43 116	0
Equins		12 892		12 892	0	12 892	0
Lapins		75 366		75 366	0	75 366	0
Indicateurs							
Autonomie du système (%)		59		81		58	
Autonomie du cheptel (%)		86		98		100	
Efficience (%)		75		83		78	

Références

- A. Beudelot, M. Mailleux. Chiffres du bio 2019, statistiques du bio en date du 31 décembre 2019, 2020. URL <https://www.biowallonie.com/chiffres-du-bio/>. consulté en ligne le 02/03/2021.
- V. Acosta-Martínez, C. Bell, B. Morris, J. Zak, and V. Allen. Long-term soil microbial community and enzyme activity responses to an integrated cropping-livestock system in a semi-arid region. *Agriculture, ecosystems & environment*, 137(3-4) :231–240, 2010.
- ADBFM. Betterave fourragère : Fumure, 2015. URL <https://www.betterave-fourragere.org/fumure-fertilisation.html>. Consulté en ligne le 05/03/2021.
- Afterres, Solagro et al. Afterres 2050 : le scénario qui imagine l’autre modèle agricole de demain. *Solagro*, 2017.
- Agence Flamande de l’Environnement, Institut Flamand de Recherche Technologique, Agence Wallonne pour l’air et le Climat, Bruxelles Environnement, ECONOTEC, Service Public Fédéral de santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement, and Cellule Interregionale de l’Environnement. *Belgium’s greenhouse gas inventory (1990-2018) - National Inventory Report*. Ministère de l’environnement, 2020.
- AGRIDEA. Agriculture biologique : Betterave, 2017. URL <MIMBVFIQ/4-3-betteraves-2017-AGRIDEA-prov.pdf>. consulté en ligne le 27/04/2021.
- Animal Task Force, Plants for the Future. How to re-implement crop-livestock synergies? ATF-PlantETP webinar, 2020. URL <http://animaltaskforce.eu/Events/ATF-PlantETP-webinar>.
- C. Antier, T. Petel, and P. Baret. Etat des lieux et scénarios à horizon 2050 de la filière des pommes de terre en Région wallonne. *Earth and Life Institute, UCLouvain*, page 62, 2019.
- C. Antier, T. Petel, and P. Baret. Etat des lieux et scénarios à horizon 2050 de la filière des céréales en région wallonne. *Earth and Life Institute, UCLouvain*, page 66, 2020.
- M. Asai, V. Langer, and P. Frederiksen. Responding to environmental regulations through collaborative arrangements : Social aspects of manure partnerships in denmark. *Livestock Science*, 167 :370–380, 2014a.
- M. Asai, V. Langer, P. Frederiksen, and B. H. Jacobsen. Livestock farmer perceptions of successful collaborative arrangements for manure exchange : a study in denmark. *Agricultural systems*, 128 :55–65, 2014b.
- M. Asai, M. Moraine, J. Ryschawy, J. de Wit, A. K. Hoshide, and G. Martin. Critical factors for crop-livestock integration beyond the farm level : A cross-analysis of worldwide case studies. *Land use policy*, 73 :184–194, 2018.

- ASBL REQUASUD. Etablissement du conseil de fumure azotée en cultures, préconisé par l'ASBL REQUASUD. *CRA-W*, 2011.
- Association négaWatt. La sobriété énergétique : pour une société plus juste et plus durable, 2018. URL https://negawatt.org/IMG/pdf/sobriete-scenario-negawatt_brochure-12pages_web.pdf. consulté en ligne le 10/01/2021.
- A. Ballesta and J. L. Vilamanyà. Nitrogen replacement value of alfalfa to corn and wheat under irrigated mediterranean conditions. *Spanish journal of agricultural research*, 1 :159–169, 2010.
- L. W. Bell and A. D. Moore. Integrated crop–livestock systems in australian agriculture : Trends, drivers and implications. *Agricultural Systems*, 111 :1–12, 2012. ISSN 0308-521X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.04.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X12000686>.
- A. Bellayachi, C. Cuvelier, J. Dejemeppe, C. Généreux, E. Maes, G. Marzo, V. Renard, and V. Thiry. Rapport sur l'état de l'environnement wallon, 2017.
- P.-Y. Bontemps, C. Vandenberghe, and J.-M. Marcoen. Elevages porcins : Justification des valeurs de production annuelle d'azote. *Dossier GRENeRA*, 6 :17, 2007.
- R. W. Brooker, A. E. Bennett, W.-F. Cong, T. J. Daniell, T. S. George, P. D. Hallett, C. Hawes, P. P. Iannetta, H. G. Jones, A. J. Karley, et al. Improving intercropping : a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 206(1) :107–117, 2015.
- C. Bélanger. *Apprentissage collectif, innovation et fonctions territorialisées de soutien au développement : définition, dimensions et influence*. GRIR, 2015. URL <https://constellation.uqac.ca/4112/>.
- CAP filière - Val-de-Loire. Lin oléagineux de printemps - linum usitatissimum, 2020. URL <https://www.cap-filieres.fr>. consulté en ligne le 20/04/2021.
- Chambre d'agriculture de l'Ariège. Fertilisation azotée des prairies, 2017. URL <https://ariège.chambre-agriculture.fr/actualites/toutes-nos-actualites/detail-de-lactualite/actualites/fertilisation-azotee-des-prairies/>. Consulté en ligne le 24/03/2021.
- Chambre d'agriculture région Nord-Pas de Calais. Les engrais verts de légumineuses semés sous couvert en bio. *Agriculture de conservation.com*, 2012. URL https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/engrais_vert-bio.pdf.
- Chambre d'Agriculture de l'Isère. Guide technique : Concevoir sa rotation culturale pour réduire l'utilisation d'intrants. *Agricultures et Territoires*, 2017. URL <http://www.isere.chambres-agriculture.fr/>.

- Chambres d'agriculture. Inosys, des références système au service du conseil et de la prospective agricole, 2019. URL <https://chambres-agriculture.fr/informations-economiques/inosys-references-technico-economiques/>. consulté en ligne le 25/05/2021.
- CIPF a.s.b.l. Fertilisation du maïs fourrager. *Protect'eau*, 2018.
- S. Clune, E. Crossin, and K. Verghese. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. *Journal of Cleaner Production*, 140 :766–783, 2017.
- COMIFER. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales pour les cultures annuelles et les prairies, 2013. URL www.comifer.asso.fr.
- Conseil des Communautés Européennes. Directive du conseil du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles (91/676/CEE). *Official Journal of the European Communities*, L365 :1–8, 1991.
- O. T. Coomes, B. L. Barham, G. K. MacDonald, N. Ramankutty, and J.-P. Chavas. Leveraging total factor productivity growth for sustainable and resilient farming. *Nature Sustainability*, 2(1) :22–28, 2019.
- I. P. Cornelis. Guide de bonnes pratiques en culture de chicorée industrielle. *Centre Agricole Betterave-Chicorée, (CABC)*, page 57, 2003.
- C. Couturier, A. Couturier, and M. Duru. La place de l'élevage face aux enjeux actuels - éléments de réflexion. *Afterres 2050*, page 23, 2020.
- Crémer S., Bernes A. et Knoden D. Cultiver des céréales immatures. *Fourrages Mieux*, 2016.
- D. Knoden, G. Meniger. Vade mecum : la culture de luzerne. *Fourrages Mieux ASBL*, 2021. URL http://www.fourragesmieux.be/autres_cultures_luzerne.html.
- D. Knoden, S. Crémer, R. Lambert. Fertilisation raisonnée des prairies. *Ministère de la Région wallonne, Direction générale de l'Agriculture*, 15, 2007.
- J. N. de Figueiredo and S. F. Mayerle. A systemic approach for dimensioning and designing anaerobic bio-digestion/energy generation biomass supply networks. *Renewable energy*, 71 : 690–694, 2014.
- B. Dedieu and G. Servière. Vingt ans de recherche-développement sur le travail en élevage : acquis et perspectives. *Productions Animales*, 25 :85, 2012.
- DEKALB. La fertilisation azotée du colza lors de la reprise, 2018. URL <https://www.dekalb.fr/colza/itineraire-technique-du-colza/fertilisation-et-nutrition-du-colza/fertilisation-azotee-du-colza>. Consulté en ligne le 05/03/2021.

- A. Delcour, F. Van Stappen, S. Gheysens, V. Decruyenaere, D. Stilmant, P. Burny, F. Rabier, H. Louppe, and J.-P. Goffart. État des lieux des flux céréaliers en wallonie selon différentes filières d'utilisation. *Biotechnologie, agronomie, société et environnement*, 18(2) :181–192, 2014.
- M. Diacono and F. Montemurro. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. In *Sustainable agriculture volume 2*, pages 761–786. Springer, 2011.
- A. Dobermann. Looking forward to 2030 : Nitrogen and the sustainable development goals. In *Proceedings of the International Nitrogen Initiative Conference, Melbourne ()*, page 5, 2016.
- P. Doligez. Est-il nécessaire de réaliser un apport d'azote sur les prairies ? *Equi-pâture*, page 3, sans date. URL <https://equipedia.ifce.fr/>. consulté en ligne le 28/04/2021.
- L. E. Drinkwater and S. Snapp. Nutrients in agroecosystems : Rethinking the management paradigm. *Advances in Agronomy*, 92 :163–186, 2007.
- S. Dumont, Vanloqueren and Baret. Clarifying the socioeconomic dimensions of agroecology : between principles and practices. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(1) :24–47, 2016.
- Ellen MacArthur Foundation. Towards the circular economy : economic and business rationale for an accelerated transition. *Journal of Industrial Ecology*, 2 :23–44, 2012. URL <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>. consulté en ligne le 06/01/2021.
- European Commission. CANTOGETHER : project final report, 2016.
- A. Files and S. SN. Agricultural integration : systems in action. *Maine Agric. Center Publ.*, 002, 2001. URL <http://fr.slideshare.net/Aliki85w/agricultural-integration-systems-in-action-theuniversity-of-maine>.
- L. Fontaine, L. Fourrié, J. Garnier, M. Mangin, B. Colomb, M. Carof, A. Aveline, L. Prieur, T. Quirin, B. Chareyron, et al. Connaître, caractériser et évaluer les rotations en systèmes de grandes cultures biologiques. *Innovations Agronomiques*, 25 :27–40, 2012.
- R. Garrett, M. T. Niles, J. D. Gil, A. Gaudin, R. Chaplin-Kramer, A. Assmann, T. S. Assmann, K. Brewer, P. C. de Faccio Carvalho, O. Cortner, et al. Social and ecological analysis of commercial integrated crop livestock systems : Current knowledge and remaining uncertainty. *Agricultural Systems*, 155 :136–146, 2017.
- R. D. Garrett, J. Ryschawy, L. W. Bell, O. Cortner, J. Ferreira, A. V. Garik, J. D. Gil, L. Klerkx, M. Moraine, C. A. Peterson, et al. Drivers of decoupling and recoupling of crop and livestock systems at farm and territorial scales. *Ecology and Society*, 25(1) :24, 2020.

- Gilles Pinay et al. *Eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*. PhD thesis, irstea, 2017.
- S. Govaert. Le plan lisier en Flandre. *Courrier hebdomadaire du CRISP*, 8 :1–59, 1998.
- GREENeRA. PGDA - Contexte européen, 2020. URL <https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/PGDA.html>.
- M. Guinet. *Quantification des flux d'azote induits par les cultures de légumineuses et étude de leurs déterminants : comparaison de 10 espèces de légumineuses à graines*. PhD thesis, Université Bourgogne Franche-Comté, 2019.
- Y. N. Harari. *Sapiens : A brief history of humankind*. Random House, 2014.
- C. Heneffe. Panorama de la filière biométhanisation en Wallonie en 2019, 2019. URL <https://energie.wallonie.be/fr/panorama-de-la-filiere-biomethanisation-en-wallonie-en-2019.html?IDC=9464&IDD=140807>. consulté en ligne le 15/05/2021.
- Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la Betterave asbl. Conseil moyen de fumure azotée en betteraves 2019, 2019. URL <https://www.irbab-kbivb.be/fr>. consulté en ligne le 03/04/2021.
- Institut technique de l'Agriculture Biologique. Fiche technique : cultiver du colza d'hiver en agriculture biologique. *CETIOM-fiche technique*, 2007. URL <http://itab.asso.fr>.
- IRBAB. Fertilisation de la betterave sucrière, 2021. URL <https://www.irbab-kbivb.be/fr/conseil-moyen-de-fumure-azotee-en-betteraves-2021/>. consulté en ligne le 03/04/2021.
- E. S. Jensen, M. B. Peoples, R. M. Boddey, P. M. Gresshoff, H. Hauggaard-Nielsen, B. J.R. Alves, and M. J. Morrison. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. a review. *Agronomy for sustainable development*, 32(2) :329–364, 2012. ISSN 1773-0155. doi : 10.1007/s13593-011-0056-7. URL <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0056-7>.
- JF. Larrieu. Guide de fertilisation raisonnée en arboriculture fruitière, 2019. 44 p.
- J. Jouan, A. Ridier, and M. Carof. Legume production and use in feed : Analysis of levers to improve protein self-sufficiency from foresight scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 274 :123085, 2020.
- A. Jurgilevich, T. Birge, J. Kentala-Lehtonen, K. Korhonen-Kurki, J. Pietikäinen, L. Saikku, and H. Schösler. Transition towards circular economy in the food system. *Sustainability*, 8 (1) :69, 2016.
- D. R. Kanter, W. Winiwarter, B. L. Bodirsky, L. Bouwman, E. Boyer, S. Buckle, J. E. Compton, T. Dalgaard, W. de Vries, D. Leclère, et al. A framework for nitrogen futures in the shared socioeconomic pathways. *Global Environmental Change*, 61 :102029, 2020.

- G. Kebede, G. Assefa, F. Feyissa, and A. Mengistu. Forage legumes in crop-livestock mixed farming systems : A review. *Int J Livest Res*, 6 :1–18, 2016.
- K. Koppelmäki, J. Helenius, and R. P. Schulte. Nested circularity in food systems : A nordic case study on connecting biomass, nutrient and energy flows from field scale to continent. *Resources, Conservation and Recycling*, 164 :105218, 2021.
- K. Kugler, B. Ohs, M. Scholz, and M. Wessling. Towards a carbon independent and co 2-free electrochemical membrane process for nh 3 synthesis. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(13) :6129–6138, 2014.
- T. R. Kunrath, C. de Berranger, X. Charrier, F. Gastal, P. C. de Faccio Carvalho, G. Lemaire, J.-C. Emile, and J.-L. Durand. How much do sod-based rotations reduce nitrate leaching in a cereal cropping system ? *Agricultural Water Management*, 150 :46–56, 2015.
- L. Lassaletta, G. Billen, B. Grizzetti, J. Anglade, and J. Garnier. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems : the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environmental Research Letters*, 9(10) :105011, 2014. ISSN 1748-9326. doi : 10.1088/1748-9326/9/10/105011. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/105011>.
- J. Le Noë, G. Billen, and J. Garnier. Trajectoires des systèmes de production agricole en france depuis la fin du xixe siècle : une approche biogéochimique. *Innovations Agronomiques*, 72 : 149–161, 2019.
- Le Sillon Belge. 40 jours sans viande, pour ou contre ? *Le Sillon Belge*, 2017.
- Le Sillon Belge. Le gouvernement flamand approuve un nouveau "plan lisier", 2019. URL <https://www.sillonbelge.be/3988/article/2019-03-27/le-gouvernement-flamand-approuve-un-nouveau-plan-lisier>. consulté en ligne le 10/12/2020.
- Leadership Council of the Sustainable Development Solutions Network. Indicators and a monitoring framework for sustainable development goals, 2015. URL <http://unsdsn.org/resources>. consulté en ligne le 27/10/2020.
- G. Lemaire, A. Franzluebbers, P. C. de Faccio Carvalho, and B. Dedieu. Integrated crop–livestock systems : Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190 :4–8, 2014.
- A. Lüscher, I. Mueller-Harvey, J.-F. Soussana, R. Rees, and J.-L. Peyraud. Potential of legume-based grassland–livestock systems in europe : a review. *Grass and Forage Science*, 69(2) : 206–228, 2014.
- Légumes plein champs BIO. Fiche projet : Cultiver la carotte de plein champ en agriculture biologique, 2013.

- E. Maes. Programme de gestion durable de l'azote en agriculture : Notice méthodologique, 2019. URL <http://etat.environnement.wallonie.be/files/indicateurs>. consulté en ligne le 21/11/2020.
- M.-B. Magrini. Freins au développement des légumineuses à l'échelle des filières. *Colloque de restitution LEGITIMES*, pages 18–p, 2018.
- M. e. a. Maletič. Sustainability exploration and sustainability exploitation : From a literature review towards a conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 79 :182–194, 2014.
- G. Martin, M. Moraine, J. Ryschawy, M.-A. Magne, M. Asai, J.-P. Sarthou, M. Duru, and O. Therond. Crop–livestock integration beyond the farm level : a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(3) :1–21, 2016. ISSN 1774-0746, 1773-0155. doi : 10.1007/s13593-016-0390-x. URL <http://link.springer.com/10.1007/s13593-016-0390-x>.
- V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, et al. Global warming of 1.5 c. *An IPCC Special Report on the impacts of global warming of*, 1 :1–9, 2018.
- M. Mazoyer and L. Roudart. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Le Seuil, 2017.
- T. Merret. Fertilisation des légumes frais en plein champs. *Chambre d'agriculture de Bretagne*, page 48 (29), 2008.
- Ministère de la Région Flamande. Decreet van 22 december 2006 houdende de bescherming van water tegen de verontreiniging door nitraten uit agrarische bronnen, 2006. consulté en ligne le 15/12/2020.
- M. Moraine, M. Duru, P. Nicholas, P. Leterme, and O. Therond. Farming system design for innovative crop-livestock integration in europe. *Animal*, 8(8) :1204–1217, 2014.
- M. Moraine, J. Grimaldi, C. Murgue, M. Duru, and O. Therond. Co-design and assessment of cropping systems for developing crop-livestock integration at the territory level. *Agricultural Systems*, 147 :87–97, 2016.
- M. Moraine, M. Duru, and O. Therond. A social-ecological framework for analyzing and designing integrated crop–livestock systems from farm to territory levels. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(1) :43–56, 2017.
- M. Moraine, M. Duru, and O. Therond. Concevoir des systèmes culture élevage à l'échelle des territoires : une méthode adaptative et participative. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 8(2) :149–156, 2018a.
- M. Moraine, S. Ramonteu, M.-B. Magrini, and J. P. Choisis. Diversité des formes d'échanges entre céréaliers et éleveurs en france : des dynamiques collectives pour l'autonomie en légumineuses. 2eme Rencontres Francophones sur les Légumineuses (RFL2), 2018b. URL <https://www.rfl-legumineuses.com/>.

- E. Morin. "aux oasis!", 2015. URL <https://www.humanite.fr/edgar-morin-aux-oasis-586559>. consulté en ligne le 26/01/2021.
- N. Luburić. Alimentation durable, 2019. URL <https://www.biowallonie.com/manger-durablement/>. Consulté en ligne le 24/03/2021.
- N. Rabourdin. Bulletin de santé du végétal inter-régional - lin oléagineux. Consulté en ligne le 03/04/2021, 2018.
- O. Oenema, D. Oudendag, and G. L. Velthof. Nutrient losses from manure management in the european union. *Livestock science*, 112(3) :261–272, 2007.
- P. Bertin. Cours de phytotechnie. *UCLouvain*, 2017.
- R. Patel. The long green revolution. *The Journal of Peasant Studies*, 40(1) :1–63, 2013.
- T. Petel, C. Antier, and P. Baret. Etat des lieux et scénarios à horizon 2050 de la filière viande bovine en région wallonne. *Earth and Life Institute, UCLouvain*, 2019.
- J. L. Peyraud, P. Cellier, C. Donnars, F. Aarts, F. Beline, C. Bockstaller, M. Bourblanc, L. Delaby, J.-Y. Dourmad, P. Dupraz, et al. Les flux d’azote en élevage de ruminants. In *19. Rencontres Recherches Ruminants (3R)*, pages 41–48. Institut de l’Elevage-INRA, 2012.
- J.-L. Peyraud, M. Taboada, and L. Delaby. Integrated crop and livestock systems in western europe and south america : A review. *European Journal of Agronomy*, 57 :31–42, 2014. ISSN 11610301. doi : 10.1016/j.eja.2014.02.005. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1161030114000276>.
- Peyraud et al. Les flux d’azote liés aux élevages : réduire les pertes, rétablir les équilibres. Other, Inra - DEPE, 2012. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01198315>. Backup Publisher : Ministère de l’alimentation, de l’agriculture et de la pêche et Ministère de l’écologie, de l’énergie, du développement durable, des transports et du logement.
- L. Philippot, J. Čuhel, N. P. Saby, D. Chêneby, A. Chroňáková, D. Bru, D. Arrouays, F. Martin-Laurent, and M. Šimek. Mapping field-scale spatial patterns of size and activity of the denitrifier community. *Environmental microbiology*, 11(6) :1518–1526, 2009.
- Portail de Wallonie. Arrêté du gouvernement wallon relatif à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles, 1994. URL <https://wallex.wallonie.be/contents/acts/9/9346/1.html?doc=3454&rev=2783-1585>. consulté en ligne le 16/01/2021.
- Protect’eau. FAQ - Gestion durable de l’Azote en agriculture et SIE, 2020. URL <https://protecteau.be/fr/presse/faq/faqnitrate>. consulté en ligne le 16/03/2021.
- M. Putz, P. Schleusner, T. Rütting, and S. Hallin. Relative abundance of denitrifying and dnra bacteria and their activity determine nitrogen retention or loss in agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 123 :97–104, 2018.

- A. Ratnadass, P. Fernandes, J. Avelino, and R. Habib. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems : a review. *Agronomy for sustainable development*, 32(1) :273–303, 2012.
- M. Reckling, S. Preissel, P. Zander, C. Topp, C. Watson, D. Murphy-Bokern, and F. Stoddard. Effects of legume cropping on farming and food systems. legume futures report 1.6, 2014.
- A. Riera, C. Antier, and P. Baret. Scénarios à horizon 2050 pour le secteur de l'élevage belge. *Earth and Life Institute, UCLouvain*, 2019.
- A. Riera, C. Antier, and P. Baret. État des lieux et scénarios à horizon 2050 de la filière légumière en Région wallonne. *Earth and Life Institute, UCLouvain*, page 88, 2020.
- J. Ryschawy, N. Choisis, J. P. Choisis, and A. Gibon. Paths to last in mixed crop–livestock farming : lessons from an assessment of farm trajectories of change. *Animal*, 7(4) :673–681, 2013. ISSN 1751-7311. doi : 10.1017/S1751731112002091. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731112002091>.
- J. Ryschawy, G. Martin, M. Moraine, M. Duru, and O. Therond. Designing crop–livestock integration at different levels : Toward new agroecological models? *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108(1) :5–20, 2017.
- Salomon. Chapitre II. la pollution des sols et des eaux. In *Danger pollutions!*, À la croisée des sciences, pages 37–61. Presses Universitaires de Bordeaux, 2019. ISBN 979-10-300-0381-9. URL <http://books.openedition.org/pub/1335>.
- D. Signor and C. E. P. Cerri. Nitrous oxide emissions in agricultural soils : a review. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 43(3) :322–338, 2013.
- S. Snapp, S. Swinton, R. Labarta, D. Mutch, J. Black, R. Leep, J. Nyiraneza, and K. O'neil. Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agronomy journal*, 97(1) :322–332, 2005.
- C. Sohier. Développement d'un modèle hydrologique sol et zone vadose afin d'évaluer l'impact des pollutions diffuses et des mesures d'atténuation sur la qualité des eaux en région wallonne. *Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech*, 2011.
- Sol et environnement Wallonie. Les effluents d'élevage, 2018. URL <https://sol.environnement.wallonie.be/home/sols/matieres/effluents-delevage.html>. consulté en ligne le 15/01/2021.
- Solagro. Afterres 2050 : Changer notre modèle agricole et alimentaire. *Solagro*, 2015. URL https://solagro.org/images/imagesCK/files/presse/Dossier_presse_Afterres2050.pdf. consulté en ligne le 09/04/2021.

- J.-F. Soussana, P. Loiseau, N. Vuichard, E. Ceschia, J. Balesdent, T. Chevallier, and D. Arrouays. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil use and management*, 20(2) :219–230, 2004.
- M. Springmann, M. Clark, D. Mason-D’Croz, K. Wiebe, B. L. Bodirsky, L. Lassaletta, W. de Vries, S. J. Vermeulen, M. Herrero, K. M. Carlson, M. Jonell, M. Troell, F. DeClerck, L. J. Gordon, R. Zurayk, P. Scarborough, M. Rayner, B. Loken, J. Fanzo, H. C. J. Godfray, D. Tilman, J. Rockström, and W. Willett. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728) :519–525, 2018. ISSN 1476-4687. doi : 10.1038/s41586-018-0594-0. URL <https://www.nature.com/articles>. Number : 7728 Publisher : Nature Publishing Group.
- SPW Agriculture. L’agriculture wallonne en chiffres : 2020, 2020a. URL <https://agriculture.wallonie.be/agriculture-wallonne-en-chiffres>. consulté en ligne le 06/02/2021.
- SPW Agriculture. Evolution de l’économie agricole et horticole de la wallonie, 2020. Technical report, SPW Agriculture, 2020b.
- F. Stagnari, A. Maggio, A. Galieni, and M. Pisante. Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability : an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4(1) :1–13, 2017.
- Statbel. Chiffres agricoles 2019 : liste complète : résultats pour la belgique, les régions, les provinces et les régions agricoles, 2019. URL <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures>. consulté en ligne le 14/04/2021.
- Statbel. Exploitations agricoles et horticoles - chiffres clé 2020, 2020. URL <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures>. consulté en ligne le 11/03/2021.
- H. Steinfeld, P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. *Livestock’s long shadow*. Food & Agriculture Org., 2006. URL <http://www.fao.org/3/a0701e/a0701e00.htm>. consulté en ligne le 06/12/2020.
- A. Thigssen. Circular agriculture : a new perspective for dutch agriculture. *Wageningen University & Research*, 13 :12, 2018.
- UNECE. Long-term strategy for the convention on long-range transboundary air pollution for 20202030 and beyond, 2018. URL https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2018/Air/EB/correct_numbering_Decision_2018_5.pdf. consulté en ligne le 30/10/2020.
- UNEP. *Drawing down N2O to protect climate and the ozone layer : a UNEP synthesis report*. United Nations Environment Programme, 2013. ISBN 978-92-807-3358-7. OCLC : ocn907094640.

- F. Van Stappen and A. Loriers. Guide méthodologique de l'outil decide v2.0 : Diagnostics energie-climat des exploitations agricoles en wallonie. *Wallonie recherche - CRAW*, pages 1–12, 2021.
- C. P. Vance. Legume symbiotic nitrogen fixation : agronomic aspects. In *The Rhizobiaceae*, pages 509–530. Springer, 1998.
- M. Vandaele. Les coproduits de l'industrie agroalimentaire : Gestion et valorisation en wallonie, 2018. URL <https://blog.wagralim.be/les-coproduits-de-lindustrie-agroalimentaire-gestion-et-valorisation-en-wallonie>. consulté en ligne le 21/04/2021.
- C. Vandenberghe and J. M. Marcoen. Transposition de la directive nitrate (ce) en région wallonne : azote potentiellement lessivable de référence pour les sols cultivés en région wallonne. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 8 :111–118, 2004.
- C. Vandenberghe, P.-Y. Bontemps, and J. M. Marcoen. Le programme de gestion durable de l'azote en Région Wallonne (premier programme d'action, période 2002 -2006). In *Cellule Etat de l'environnement wallon*. SPW, 2006. Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007, <http://hdl.handle.net/2268/34942>.
- C. G. Vandenberghe C., Cartrysse C. Evaluation du conseil de fertilisation en colza. résultats de suivis menés à GxABT et dans le survey surfaces agricoles. Technical Report Dossier GRENeRA 15-10, Gembloux Agro-bio Tech, 2015.
- A.-S. Voisin, J. Guéguen, C. Huyghe, M.-H. Jeuffroy, M.-B. Magrini, J.-M. Meynard, C. Mougel, S. Pellerin, and E. Pelzer. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in europe : a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2) :361–380, 2014. ISSN 1774-0746, 1773-0155. doi : 10.1007/s13593-013-0189-y. URL <http://link.springer.com/10.1007/s13593-013-0189-y>.
- J. Wang, D. R. Chadwick, Y. Cheng, and X. Yan. Global analysis of agricultural soil denitrification in response to fertilizer nitrogen. *Science of the Total Environment*, 616 :908–917, 2018.
- YARA France. Betterave sucrière : les fondamentaux de la fertilisation, 2019. URL <https://www.yara.fr/fertilisation/blog/betterave-sucriere-fertilisation/>. consulté en ligne le 12/03/2021.
- C. Yunlong and B. Smit. Sustainability in agriculture : a general review. *Agriculture, ecosystems & environment*, 49(3) :299–307, 1994.
- X. Zhang, E. A. Davidson, D. L. Mauzerall, T. D. Searchinger, P. Dumas, and Y. Shen. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580) :51–59, 2015. ISSN 0028-0836, 1476-4687. doi : 10.1038/nature15743. URL <http://www.nature.com/articles/nature15743>.

Ouvrir un débat sur la valorisation des systèmes d'intégration culture-élevage comme leviers pour une gestion durable des flux d'azote en Région wallonne

Présenté par Estelle Compere Leroy et Marie-Aline Cornu

RÉSUMÉ

Les flux d'azote sont, à l'heure actuelle, source de questionnements et de débats parmi les acteurs des mondes agricole, scientifique, et politique. Le maintien de la fertilité, la mitigation des émissions de gaz à effet de serre et la diminution de risque de pollution de nos eaux sont autant d'enjeux que recouvre leur gestion. A ces questions s'ajoute celle, très actuelle, de la durabilité de l'élevage et de son importance au sein du système. Cet élevage, autrefois connecté aux cultures au sein des systèmes intégrés polyculture-élevage, joue dans le système un rôle encore majoritairement perçu comme essentiel pour la fertilité azotée.

Le premier objectif de ce mémoire est la quantification des flux d'azote en Région wallonne, afin de mettre en avant la présence d'éventuelles tensions au sein du système. Le second objectif est la mise en scène de perspectives d'évolution pour la durabilité des flux quantifiés. Ces perspectives sont présentées sous la forme de deux scénarios à l'horizon 2030. Le troisième et dernier objectif de cette étude est l'ouverture d'un dialogue inter-experts, afin de confronter les différentes opinions existant sur la durabilité des flux d'azote, et sur les scénarios imaginés.

L'outil COCOON, développé dans le cadre de cette étude, a permis de quantifier les flux d'offre et de demande en azote au sein du système agricole wallon et d'évaluer trois indicateurs : l'autonomie du système en azote organique, l'autonomie alimentaire du cheptel en azote digestible et l'efficacité de l'utilisation d'azote au sein du système. L'analyse de ces résultats a fait ressortir deux grandes tensions relatives à la gestion des flux d'azote : une tension quantitative, exprimée par une dépendance du système à l'azote synthétique, et une tension territoriale, exprimée par une séparation spatiale des flux d'offre et de demande en azote organique, en raison de l'éloignement géographique entre les régions d'élevage et de grandes cultures.

Deux scénarios ont été co-construits avec l'aide de 17 experts du monde agricole et des flux d'azote. Le premier met en scène une évolution de l'Agriculture Biologique (AB) qui atteint 30% de la Superficie Agricole Utile (SAU) wallonne en 2030. La mise en oeuvre du scénario a montré une diminution de la tension quantitative et une augmentation de la tension territoriale, dû à la transition vers l'AB de superficies importantes au sein des grandes cultures. Les trois indicateurs évalués ont augmenté suite à la mise en oeuvre du scénario.

Le second scénario met en scène une évolution du cheptel wallon permettant d'atteindre l'autonomie alimentaire du cheptel en azote digestible. Sa mise en oeuvre a montré une augmentation de la tension quantitative, dû à une importante diminution du cheptel bovin et un maintien de la tension territoriale. L'autonomie du cheptel est atteinte, tandis que l'autonomie en azote organique est diminuée. L'efficacité évolue faiblement.

Le dialogue ouvert avec les experts et l'analyse des résultats ont permis de mettre en avant deux perspectives, comme des leviers pour le dénouement de ces tensions : l'augmentation des superficies de légumineuses dans le système, et le renforcement de l'intégration entre les cultures et l'élevage coordonnés collectivement à l'échelle de la Région wallonne.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro