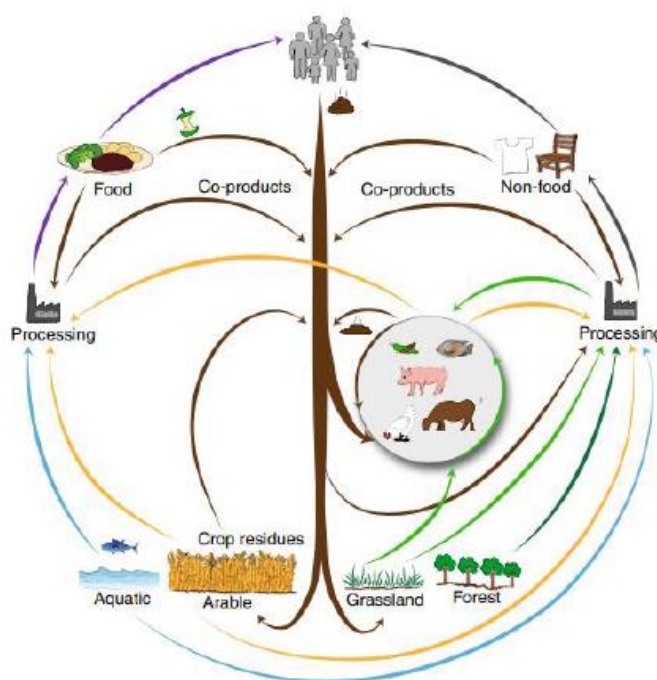


Autonomie azotée en agriculture biologique et gestion des effluents et déchets organiques

Vers une approche circulaire



(Muscat *et al.*, 2021)

Mémoire de fin d'étude

Directeur du mémoire :
BELINE Fabrice
Directeur de recherche UMR SAS

CRISTOFARO Lisa
Elève ingénieure ISARA
Promotion 52

Tuteur pédagogique :
CELETTE Florian

Date de soutenance : 03 septembre 2024

Ce document ayant été réalisé par des Élèves-Ingénieurs de l'ISARA dans le cadre d'une convention avec l'INRAE, toute mention, communication ou diffusion devra faire état de l'origine Isara.

Table des matières

Remerciements.....	5
Table des abréviations, sigles et acronymes	6
1. Introduction	1
2. Synthèse bibliographique	2
2.1. Perturbations du cycle de l'azote et conséquences environnementales	2
2.2. L'enjeu de l'autonomie azotée en agriculture biologique	6
2.3. La circularité des flux de nutriments : les enjeux autour de sa définition	7
3. Matériels et méthodes	9
3.1. Méthodologie générale	9
3.2. Identification et hiérarchisation des leviers permettant d'augmenter l'autonomie des exploitations AB	10
3.3. Méthodologie de calcul et de quantification de l'impact des leviers sur les flux azotés de trois exploitations.....	11
3.3.1. Sélection des indicateurs	11
3.3.2. Présentation des exploitations types sélectionnées.....	12
3.3.3. Méthode de quantification des flux d'azote	14
3.3.4. Présentation des territoires d'étude.....	16
3.3.5. Méthode de quantification des leviers	17
3.4. Présentation des résultats, validation des hypothèses de modélisation par le consortium Organic4Organic et réalisation de scénarios	17
4. Résultats et discussion	18
4.1. Modélisation des exploitations types et calcul des indicateurs.....	18
4.1.1. Exploitation VL.....	18
4.1.2. Exploitation GC BP	19
4.1.3. Exploitation GC DS	20
4.2. Les leviers identifiés potentiellement favorables à l'autonomie N des exploitations AB	21
4.2.1. Les leviers applicables à l'échelle du territoire	21
4.2.2. Les leviers applicables à l'échelle de l'exploitation	22
4.3. Hiérarchisation des leviers et quantification de leurs impacts sur les flux d'azote des exploitations	23
4.3.1. Présentation des leviers sélectionnés et de leurs hypothèses de modélisation.....	23
4.3.2. Résultats de l'intégration des leviers applicables à l'échelle du territoire	28
4.3.3. Résultats de l'intégration des leviers applicables à l'échelle de l'exploitation	30
4.4. Scénarios élaborés avec la combinaison de plusieurs leviers	33
4.5. Impact de la mise en place des leviers sur la qualité de vie au travail des exploitants agricoles (QVT).....	36

4.6.	Relations entre l'autonomie et les autres indicateurs : circularité, efficience et productivité	38
4.6.1.	Autonomie et circularité	38
4.6.2.	Autonomie, efficience et productivité	40
4.7.	Originalités, limites, pistes d'amélioration du travail et recommandations	42
5.	Conclusion	44
	Bibliographie	46
	Annexes	50

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Fabrice pour son suivi hebdomadaire, ses remarques et ses discussions enrichissantes qui ont grandement contribué à la qualité de ce travail au cours des six derniers mois. Ses conseils et son soutien constant ont été essentiels dans l'avancement de ce mémoire, m'apportant à la fois des orientations claires et une motivation continue.

Je tiens aussi à remercier les membres du consortium Organic4Organic que j'ai eu l'opportunité de rencontrer au cours de divers ateliers. Leur intérêt marqué pour le travail fourni, ainsi que les conseils apportés ont été d'une grande aide pour orienter la suite du travail.

Enfin, je tiens à remercier toute l'équipe SAS pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur quotidienne. Leur soutien amical et leur environnement de travail agréable ont facilité cette période de travail et ont rendu cette expérience particulièrement enrichissante.

Table des abréviations, sigles et acronymes

AB : Agriculture biologique

GC BP : Exploitation en grandes cultures du Bassin Parisien

GC DS : Exploitation en grandes cultures des Deux-Sèvres

IDF : Île-de-France

IEV : Ille-et-Vilaine

N : Azote

PHF : Productivité hors fourrages

SAU : Surface Agricole Utile

TT : Tout territoire

V : Vienne

VL : Exploitation en vaches laitières de Bretagne

1. Introduction

Dans leur ouvrage « La France face aux 9 limites planétaires », publié en 2023 et faisant suite à la Convention Citoyenne pour le climat, les auteurs Baude et al. (2023) ont appliqué à l'échelle de la France le concept des 9 limites planétaires, concept établi en 2009 et qui renvoie à l'établissement d'un « espace de fonctionnement sûr pour l'humanité » (Rockström *et al.*, 2009). Le dépassement de l'une ou plusieurs de ces limites peut entraîner des changements environnementaux majeurs et ainsi menacer l'existence humaine. Six de ces limites ont déjà été dépassées (Richardson *et al.*, 2023), et, parmi elles, nous retrouvons la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote. La quantité rejetée, qui atteint 150 millions de tonnes par an, dépasse largement le seuil maximal fixé à 82 millions de tonnes par an. En moyenne et en France, le surplus d'azote s'élevait à 55 kg/ha de surface cultivée entre 2010 et 2019 (Baude *et al.*, 2023). L'agriculture en est la principale responsable : les sources anthropiques ont doublé la quantité d'azote présente dans l'environnement (Baude *et al.*, 2023). La part de l'agriculture dans l'utilisation mondiale de l'azote d'origine anthropique a été estimée à 85 % (Campbell *et al.*, 2017). Ceci découle de l'avènement de techniques agricoles plus productives associées à l'industrialisation et à la mécanisation de l'agriculture au milieu du 20^{ème} siècle. Ces « progrès » ont conduit les systèmes agricoles vers une très forte spécialisation, engendrant de multiples conséquences environnementales. La surfertilisation ainsi que la mauvaise gestion de l'azote a entraîné un déclin de l'efficacité d'utilisation de l'azote qui s'élève en moyenne à 50% aujourd'hui dans les systèmes de culture conventionnels (Matassa et al., 2023). Cela signifie que seule la moitié de la quantité d'azote appliquée est réellement utilisée par les plantes pour leur nutrition et leur croissance. L'autre moitié est perdue dans l'environnement, altérant la qualité de l'eau, de l'air et perturbant les écosystèmes.

Face à ces conclusions alarmantes, et avec des objectifs pluriels de réduction de l'impact environnemental de l'agriculture, d'amélioration de la santé publique, ou encore de renforcement de la résilience des systèmes alimentaires, la stratégie F2F « Farm to Fork », adoptée en 2020 dans le cadre du Pacte vert, prévoit une expansion de l'AB de 10 % à 25 % de la SAU européenne d'ici à 2030 (Aubert, Poux, 2021). L'AB en tant que réponse à ces problématiques est donc envisagée. Mais, en raison de la réglementation stricte qui proscrie l'utilisation d'engrais azotés d'origine synthétique, l'AB se trouve fortement contrainte par la disponibilité limitée de l'azote. Cette restriction impacte ses rendements, qui sont en moyenne réduits de 25 % par rapport à ceux de l'agriculture conventionnelle (Seufert *et al.*, 2012). Les exploitations AB se retrouvent ainsi dans une position de dépendance vis-à-vis des processus naturels de fixation symbiotique, mais aussi de l'importation de sources organiques recyclées riches en azote, souvent issues de l'agriculture conventionnelle. Or, avec la hausse des prix des combustibles fossiles et l'expansion prévisionnelle des terres en AB, les tensions autour de l'accès à ces sources organiques peuvent se renforcer (Barbieri *et al.*, 2021). Dans ce contexte, optimiser l'usage des

ressources organiques actuelles et élargir les réserves organiques à l'échelle territoriale, en favorisant un modèle d'économie circulaire, constituent des leviers importants pour améliorer l'autonomie azotée à travers un meilleur bouclage des cycles.

Dans cette perspective, il semble primordial d'élaborer des axes de recherche pour améliorer l'autonomie azotée des fermes en agriculture biologique et favoriser ainsi leur développement, tout en reconnaissant que la filière AB est contrainte par de nombreux autres enjeux structurels et économiques. Dans cette optique, le consortium multidisciplinaire Organic4Organic, créé en 2023 et regroupant une vingtaine de scientifiques, étudie les potentiels et les risques des effluents et déchets organiques vis-à-vis de l'autonomie azotée des exploitations en agriculture biologique à travers la circularité des flux de nutriments. Ainsi, ce mémoire a pour ambition de répondre à la problématique suivante : Comment l'intégration de leviers agronomiques, techniques et organisationnels, liés à la gestion des effluents et des déchets organiques, peut-elle améliorer l'autonomie azotée en AB ?

Nous étudierons, dans une première partie, la perturbation du cycle de l'azote ainsi que ses conséquences environnementales, puis l'enjeu de l'autonomie azotée en agriculture biologique, et enfin nous essayerons de qualifier ce qu'est la circularité et comment nous l'avons prise en compte dans notre étude. Une seconde partie décrira la méthodologie employée dans cette étude, tandis qu'une troisième partie sera dédiée à la présentation des résultats. Enfin, une discussion autour des résultats obtenus, du modèle réalisé et des impacts de l'intégration des leviers sur la qualité de vie au travail des exploitants agricoles sera présentée dans une dernière partie.

2. Synthèse bibliographique

2.1. Perturbations du cycle de l'azote et conséquences environnementales

L'azote est un élément chimique fondamental pour la vie sur Terre. Il est présent dans de nombreuses biomolécules vitales, telles que les acides aminés, les protéines, l'ADN et l'ARN. Sous forme de diazote, il est le principal constituant de l'atmosphère (78 %) et joue un rôle crucial dans les processus biologiques et écologiques. Néanmoins, s'il est très abondant à la surface du globe, une très faible partie des êtres-vivants peut en tirer profit, puisque plus de 99% de cet azote est présent sous forme inerte (Peyraud *et al.*, 2012). L'azote restant est présent sous forme réactive, c'est-à-dire capable de participer à des réactions chimiques dans l'environnement. Cela inclut les oxydes d'azote (NO_x), l'ammoniac (NH_3), les nitrates (NO_3^-), les nitrites (NO_2^-) et les composés organiques azotés tels que les acides aminés et l'urée. À l'exception des légumineuses qui ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique N_2 , les plantes ne peuvent utiliser que l'azote sous forme réactif. Ces formes réactives sont donc cruciales pour la croissance des plantes et la fertilité des sols.

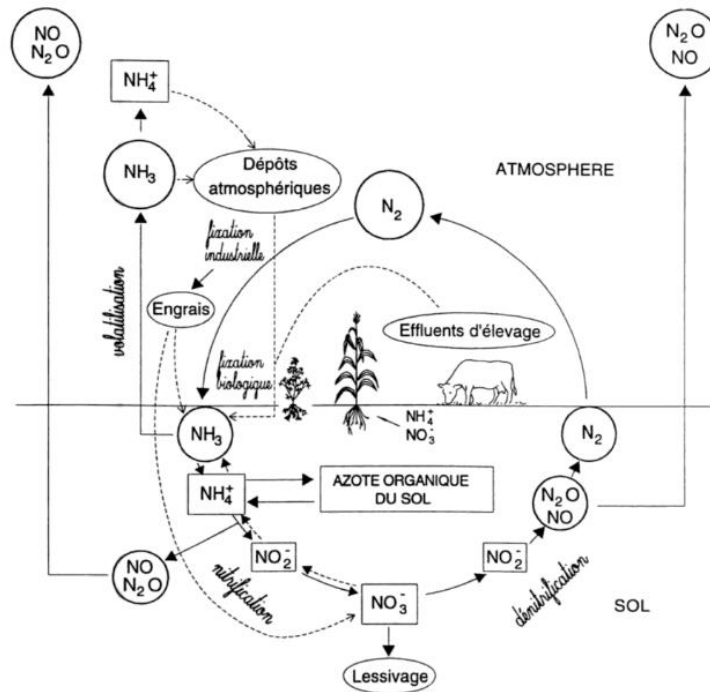


Figure 1 : Le cycle de l'azote (Lemaire et Nicolardot, 1997)

D'après la Figure 1 qui représente le cycle de l'azote, la grande partie des échanges d'azote dans la biosphère est réalisée grâce à :

- 1° la fixation biologique de l'azote atmosphérique (N_2) en ammoniac (NH_3) par des bactéries fixatrices ou par des processus industriels tels que le procédé Haber-Bosch ;
- 2° aux dépôts atmosphériques, sous forme gazeuse (NO_x , NH_3) ou dissous dans les précipitations qui sont transférés de l'atmosphère au sol, et qui sont absorbés par celui-ci ;
- 3° aux différentes transformations de l'azote réactif entre les pools organiques et minéraux du sol. L'azote ammoniacale issu de la fixation et/ou de l'apport d'engrais est ensuite transformé en nitrites (NO_2^-) puis en nitrates (NO_3^-) via le processus de nitrification réalisé par des bactéries nitrifiantes. En parallèle, le processus d'ammonification, qui renvoie à la minéralisation de l'azote organique, est réalisé par les microorganismes du sol qui décomposent la matière organique morte (plantes, animaux, déchets) et libèrent de l'ammoniac (NH_3). L'ammoniac se dissout dans l'eau présente dans le sol et se transforme en ion ammonium (NH_4^+). Les ions ammonium ainsi que les ions nitrates constituent les deux formes d'azote réactives assimilables par les plantes ;
- 4° à la restitution de diazote (N_2) et d'oxydes nitreux (N_2O) dans l'atmosphère par dénitrification via l'action de bactéries dénitrifiantes.

Néanmoins, les activités humaines, telles que la production et la consommation très importante d'engrais de synthèse ou la combustion des combustibles fossiles, perturbent ce cycle naturel de l'azote et entraînent des conséquences environnementales majeures en augmentant la proportion d'azote réactif dans l'environnement. Ces formes réactives se transforment, comme décrites précédemment, et circulent dans l'eau, l'air, le sol et les matières vivantes : on parle alors de cascade azotée. Cette cascade azotée renvoie à une « vision dynamique qui suit l'azote dans les compartiments de l'environnement et qui permet de traduire la complexité du devenir et des impacts de l'azote dans l'environnement » (Peyraud *et al.*, 2012). Les différents types de pertes dans l'environnement sont détaillées ci-dessous.

F1-3 - CIRCULATION DE L'AZOTE DANS LE SYSTÈME DE PRODUCTION AGRICOLE
(d'après Onéma, 2009)

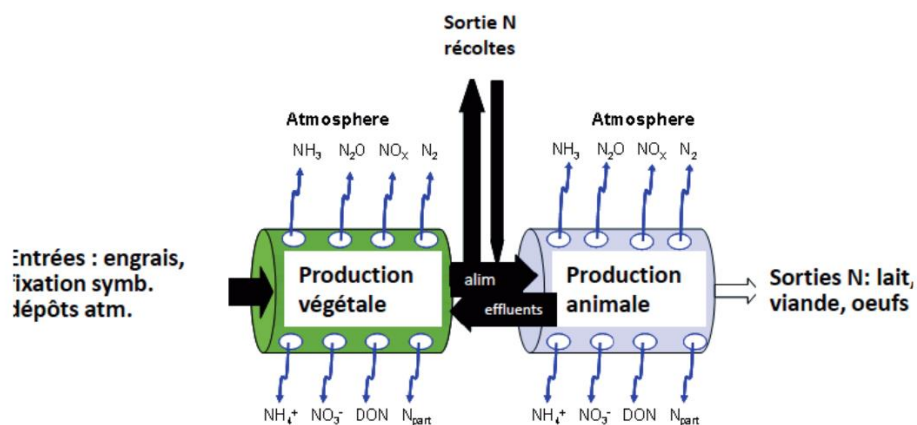


Figure 2 : Circulation de l'azote dans le système de production agricole (Peyraud *et al.*, 2012)

La Figure 2 représente les différents types de fuites qui sont intrinsèques aux systèmes de production végétale et animale. L'intensité des pertes est fortement dépendante des conditions biophysiques (CEC, pH...) et pédo-climatiques (texture du sol, température, vent, précipitations...) du milieu ainsi que des pratiques des exploitants agricoles. Il existe différents types de pertes :

- Les pertes vers l'atmosphère par **volatilisation** : en agriculture, l'apport d'engrais ammoniacaux ou d'effluents d'élevage augmente la quantité d'ammonium (NH_4^+) présente dans le sol. Cet élément chimique, situé à la surface du sol, peut se transformer en ammoniac (NH_3), qui est fortement volatile et qui peut facilement être émis vers l'atmosphère lors de l'épandage des engrais et des effluents, au stockage des effluents et au pâturage.
- Les pertes vers les compartiments aquatiques par **lixiviation** : Les deux formes minérales de l'azote, les ions nitrates et les ions ammonium sont très solubles dans l'eau. Si les ions ammonium, chargés positivement, viennent généralement s'adsorber sur les surfaces négatives des argiles, ce n'est pas le cas de l'ion nitrate, qui est repoussé par leurs charges négatives, et qui peut donc percoler dans les eaux de drainage au-delà de la profondeur d'enracinement

lorsque la quantité en eau du sol dépasse sa capacité de rétention (Peyraud *et al.*, 2012). Sous notre climat, ce phénomène a lieu majoritairement en automne-hiver. Ces pertes de nitrates par lixiviation entraînent l'acidification et l'eutrophisation des cours d'eau.

- Les pertes vers l'atmosphère par **dénitrification** : ce processus biologique est réalisé par des bactéries dénitrifiantes, principalement en conditions anaérobies, où elles transforment les nitrates en azote gazeux (N_2), en oxydes d'azote (NO_x) ou en oxydes nitreux (N_2O) qui retournent vers l'atmosphère ;

La perturbation du cycle de l'azote présente donc des effets écologiques majeurs, que ce soit sur la qualité de l'eau, de l'air, sur la fertilité des sols ou encore sur la biodiversité terrestre. Et ces flux d'azote n'ont cessé d'augmenter depuis le milieu du XX^{ème} siècle.

À titre d'exemple, sur la Figure 3, Le Noé *et al.*, (2019) ont représenté l'évolution des flux d'azote dans un système agroalimentaire en Bretagne entre 1852 et 2010 grâce à la méthode de bilans GRAFS (pour Generalized Representation of Agro-Food Systems) qui permet de mettre en évidence les flux d'azote entre 4 compartiments : les terres arables, les prairies permanentes, les animaux et la population humaine (Le Noé *et al.*, 2019).

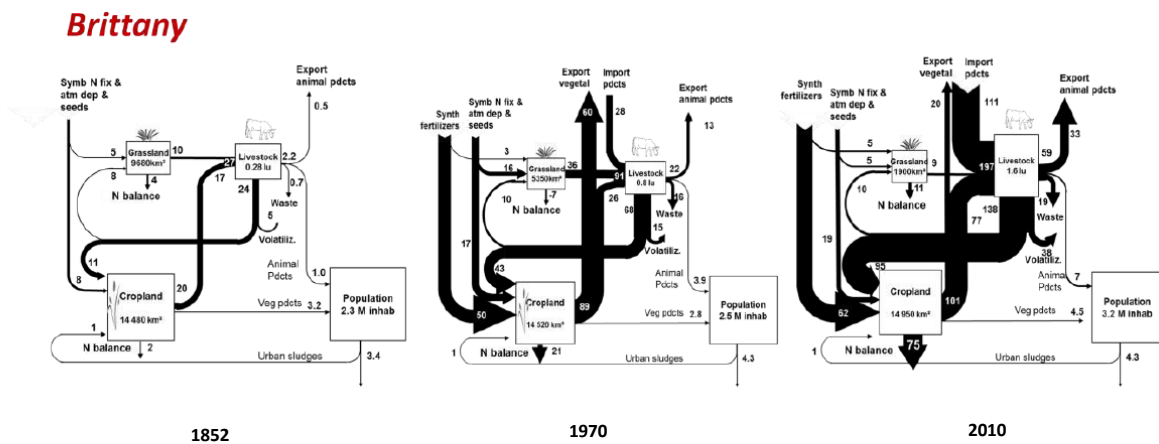


Figure 3 : Représentation GRAFS de la circulation des flux azotés en kgN/ha de SAU/an des systèmes de production agricole bretons en 1852, 1970 et 2010 (Le Noé *et al.*, 2019)

En Bretagne, l'année 1852 est caractérisée par une grande autonomie des systèmes de production agricoles qui peut s'expliquer par une forte complémentarité entre les cultures et l'élevage, une production modérée avec un taux élevé d'autoconsommation et des importations d'azote réactif nulles. En 1970, on observe une forte augmentation de la productivité grâce à une intensification des flux, avec une dépendance croissante aux engrais de synthèse et à l'importation d'aliments pour le bétail, un surplus azoté qui est multiplié par 10, et des exportations de productions végétales et animales. Le système de polyculture-polyélevage persiste en Bretagne, mais ce n'est pas le cas de toutes les régions, comme la Picardie qui se spécialise dès 1970 dans les productions végétales. En 2010, la région bretonne

se spécialise dans l'élevage intensif, avec une densité de cheptel ayant doublé en 40 ans. La grande majorité des productions est exportée. Ces tendances, c'est-à-dire la spécialisation, la dépendance aux engrais de synthèse et l'augmentation des importations/exportations sont observées dans plusieurs régions françaises et ont fortement modifié la répartition des flux d'azote au sein des territoires. En Europe et en 2010, seules 14 % des exploitations conservent le modèle de polyculture-polyélevage, tandis que 52 % des exploitations se spécialisent dans le végétal et 34 % dans l'élevage (Regan *et al.*, 2017). Nous constatons donc que l'augmentation de la production alimentaire et la spécialisation des systèmes agricoles ont décuplé l'utilisation des engrais azotés, perturbant le cycle biogéochimique de l'azote et amplifiant le risque de pertes vers l'environnement.

2.2. L'enjeu de l'autonomie azotée en agriculture biologique

Le recours à l'agriculture biologique comme stratégie de réduction des impacts environnementaux de la production agricole, d'atténuation du changement climatique et de protection de la biodiversité est largement acceptée dans la communauté scientifique. Néanmoins, de nombreuses controverses subsistent quant à la capacité de l'agriculture biologique à nourrir la population dans un monde où le modèle AB serait majoritaire, notamment à cause de la faible disponibilité de l'azote, nutriment essentiel pour la croissance des plantes. L'azote est l'un des principaux facteurs limitant de l'AB qui pénalise ses rendements et son expansion (Seufert *et al.*, 2012). En effet, les systèmes biologiques sont entièrement dépendants d'une part de la fixation biologique de l'azote permise par les légumineuses et, d'autre part, des sources organiques recyclées en azote, qui proviennent souvent d'exploitations conventionnelles. Par exemple, en France, environ 25 % de l'azote fertilisant les fermes AB proviennent de sources non certifiées en agriculture biologique (Barbieri *et al.*, 2021). Cette source d'azote provenant de l'agriculture conventionnelle pourrait donc être amenée à diminuer à mesure que la superficie des terres en AB augmente (Reimer *et al.*, 2023). De plus, les agriculteurs AB doivent faire face à de plus en plus de changements et d'incertitudes : l'utilisation de ressources limitées et coûteuses, le durcissement des réglementations environnementales, la volatilité des prix des productions agricoles... Ces contraintes sont d'autant plus fortes pour les exploitations spécialisées qui sont très vulnérables face aux augmentations du coût des intrants ainsi qu'aux baisses des prix d'une production spécifique.

Nous comprenons alors l'intérêt de trouver des leviers supplémentaires pour favoriser l'expansion de l'agriculture biologique et éviter qu'elle ne soit entravée par la disponibilité de l'azote, un obstacle qu'elle devra surmonter à long terme. Pour favoriser cette autonomie, plusieurs pratiques peuvent être utilisées : l'implantation de légumineuses qui fixent l'azote atmosphérique et le restitue au système à leur destruction (Reimer *et al.*, 2023), le recours à diverses sources organiques du territoire (Reimer *et al.*, 2023), les échanges d'effluents et de résidus de culture entre exploitations spécialisées

(Regan *et al.*, 2017), le recyclage des flux secondaires dans les exploitations mixtes (Puech, Stark, 2023) ou encore l'optimisation des pratiques culturales (Alvanitakis *et al.*, 2024). Néanmoins, l'augmentation de cette autonomie ne doit pas se faire au détriment de la productivité des exploitations agricoles.

2.3. La circularité des flux de nutriments : les enjeux autour de sa définition

La circularité est une notion récente qui est largement discutée dans la communauté scientifique ces dernières années en agriculture, mais qui n'est pas consensuelle. Elle peut être interprétée de différentes manières : comme un élément de « contexte », comme un « moyen » d'atteindre des systèmes plus durables, ou comme un « objectif » en soi (Harchaoui *et al.*, 2024). Les études qui considèrent la circularité comme faisant partie d'un « contexte » utilisent généralement des indicateurs de circularité. En revanche, elles ne se concentrent pas exclusivement à leur analyse : la circularité représente un paramètre parmi d'autres, dans une démarche d'évaluation et d'amélioration globale du système agroalimentaire. Les études qui considèrent la circularité comme un « objectif », étudient la circularité comme le chemin à privilégier pour améliorer le système agroalimentaire. Ils s'intéressent à la réduction des intrants chimiques, à l'efficacité et à la réduction des déchets et des pertes, qui sont des aspects souvent associés à la notion de circularité. Il s'agit de réutiliser les déchets du territoire, tels que les excréments animaux et humains et les biodéchets afin de répondre aux besoins en nutriments des systèmes agricoles et d'atténuer la pollution causée par ces nutriments (Verger *et al.*, 2018). Enfin, dans les études qui considèrent la circularité comme un « moyen » pour transformer le système agroalimentaire en profondeur, des changements plus radicaux sont considérés. Il s'agit par exemple de transformer les régimes alimentaires vers une consommation plus végétale, ou de promouvoir les systèmes AB avec des rotations longues et diversifiées (Billen *et al.*, 2021). Certains auteurs s'accordent donc sur le fait que l'économie circulaire devrait être un moyen d'atteindre une durabilité forte qui restreint les systèmes alimentaires aux limites planétaires, de façon à ce qu'aucune d'entre elles ne soit franchie (Grosse, 2010).

La définition de la circularité n'est donc pas consensuelle. Certains ont essayé de poser des principes sur ce concept de circularité, comme Muscat *et al.* (2021) qui ont défini 5 grands principes permettant de caractériser cette circularité dans les agroécosystèmes :

- 1) Le **principe de sauvegarde** et de régénération de la « santé » de nos agroécosystèmes, à travers une utilisation non excessive des ressources, une utilisation de ressources renouvelables, une restauration continue de la qualité des différentes composantes de l'agroécosystème (sols, air, eau) et à travers une plus forte dépendance aux cycles naturels ;

- 2) Le **principe d'évitement** qui caractérise la production et l'utilisation de ressources non essentielles, la perte de ressources essentielles (1/3 de la nourriture mondiale est gaspillée) et qui prévient les différents types de pertes vers l'environnement qui peuvent être évitées ;
- 3) Le **principe de priorisation** qui s'inscrit dans le cadre d'une demande croissante en biomasse, et qui stipule que celle-ci doit déjà être allouée aux besoins humains essentiels (nourriture, vêtements, santé). Il s'agit par exemple de prioriser la production d'alimentation humaine face à la production de ressources destinées à l'alimentation animale ;
- 4) Le **principe de recyclage**, qui encourage la réutilisation des coproduits issus des activités humaines dont on ne peut éviter la production (la paille, le fumier, les déchets d'abattoir, les autres déchets du territoire...) dans les agroécosystèmes. La réutilisation de ces coproduits permet d'enrichir le sol, de fertiliser les cultures ou encore de nourrir les animaux de la ferme ;
- 5) Le **principe d'entropie**, qui préconise de minimiser la consommation énergétique en se rapprochant des processus naturels, en se tournant vers des énergies renouvelables et en utilisant efficacement les ressources rares qui sont utilisées dans les technologies actuelles (métaux rares...) (Muscat *et al.*, 2021)

Ces principes soulignent la complexité derrière la notion de circularité. Cette complexité se reflète également dans la diversité des indicateurs utilisés pour évaluer la circularité. On retrouve par exemple le cycle count (van Loon *et al.*, 2023), le circularity indicator of components (Cobo *et al.*, 2018) ou encore le cycling index (Alvanitakis *et al.*, 2024) ce dernier étant employé dans plusieurs publications. Cet indicateur est pertinent et s'inscrit dans le cadre de notre travail puisqu'il souligne l'importance des flux internes par rapport aux flux totaux du système, et tient compte des pertes inhérentes au système. Néanmoins, en adoptant une approche territoriale, les flux provenant du territoire seront également considérés comme faisant partie de la circularité dans le cadre de notre étude. Ainsi, dans notre travail, la **circularité** peut être considérée comme une **méthode de réduction des pertes par l'optimisation des pratiques**, une façon de **valoriser les déchets externes du territoire** et une opportunité de **valoriser directement les déchets produits sur l'exploitation**, dont le potentiel reste inexploité.

3. Matériels et méthodes

3.1. Méthodologie générale

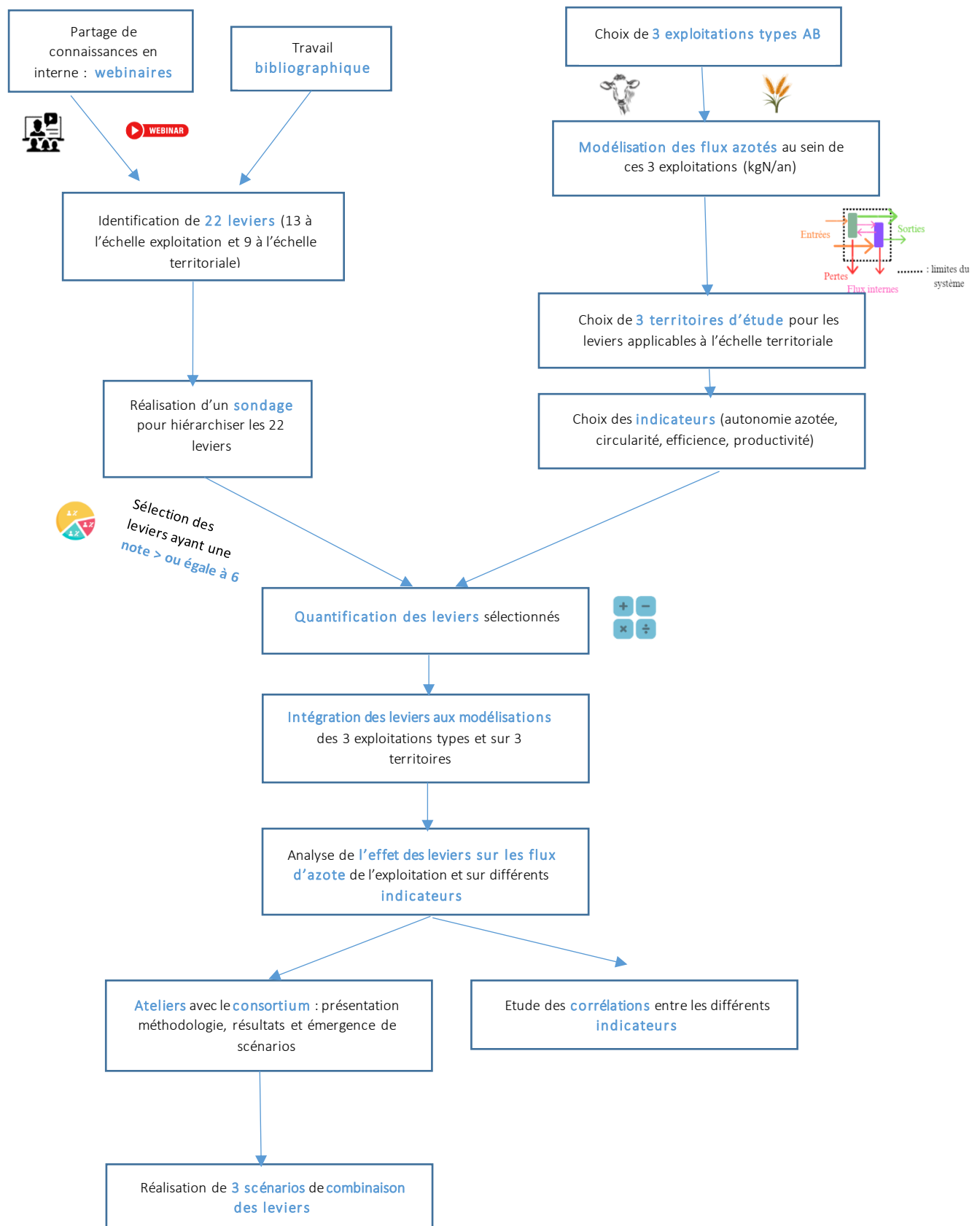


Figure 4 : Méthodologie générale suivie dans le cadre du stage

La Figure 4 présente la méthodologie qui a été suivie tout au long du stage afin de répondre à la problématique posée. Avec un objectif final de modélisation de leviers qui permettent d'augmenter l'autonomie azotée en AB, la première étape a été d'identifier ces leviers. Pour ce faire, un ensemble de 4 webinaires avec les membres du consortium Organic4Organic a été visionné. Ce consortium rassemble à la fois des acteurs scientifiques issus de 14 unités INRAE, ainsi que des partenaires tels que la Fédération Régionale des Agriculteurs Biologiques (FRAB), l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), l'Ademe, l'Institut Agro de Rennes-Angers, le Cirad et l'Agence BIO. Parallèlement à ce partage de connaissances en interne, une étude bibliographique a été menée afin de compléter ces contributions. À la suite de ce travail analytique, 22 leviers d'optimisation de l'autonomie azotée en AB ont pu être identifiés. Ces leviers ont été divisés en 2 catégories : les leviers applicables à l'échelle de l'exploitation, et les leviers applicables à l'échelle du territoire, c'est-à-dire qui nécessitent des ressources externes à l'exploitation, et qui font notamment appel au recyclage des déchets organiques produits sur le territoire. Un sondage a été réalisé auprès des membres du consortium pour hiérarchiser ces leviers, et, à l'issue de ce sondage, 13 leviers ont été sélectionnés et modélisés au sein de systèmes agricoles afin de quantifier leur effet sur l'autonomie. Pour ce faire, nous avons choisi 3 exploitations types en AB avec des systèmes de culture distincts, que nous avons modélisés en termes de flux d'azote (flux entrants, internes et sortants du système de l'exploitation). En parallèle, 3 territoires distincts en termes de densité de population ont été sélectionnés afin de représenter la variabilité des ressources disponibles en fonction du territoire. Les leviers ont donc été formalisés et intégrés à chacune des 3 exploitations et dans les 3 contextes territoriaux pour les leviers territoriaux. Les impacts de l'intégration des leviers sur les flux d'azote dans les modélisations ont été calculés et ont ainsi permis de déterminer différents indicateurs : l'autonomie, la circularité, l'efficacité et la productivité. Les méthodologies de calcul ainsi que les résultats ont été présentés aux membres du consortium afin de discuter des hypothèses de modélisation, de les valider et de s'approprier collectivement l'ensemble des leviers. Certaines idées ont émergé de ces ateliers participatifs, notamment celle de combiner des leviers dans une seule modélisation. Trois scénarios de combinaisons de leviers ont donc été réalisés et les indicateurs mentionnés précédemment ont été calculés. Ainsi, au total, 56 modélisations ont été réalisées. Enfin, les relations entre les différents indicateurs (autonomie, circularité, efficacité et productivité) ont été étudiées.

3.2. Identification et hiérarchisation des leviers permettant d'augmenter l'autonomie des exploitations AB

Comme décrit précédemment, afin d'identifier des leviers permettant d'augmenter l'autonomie azotée des exploitations AB, 11 présentations réalisées par des scientifiques membres du projet Organic4Organic dans le cadre de 4 webinaires organisés durant l'année 2023 ont été visualisées. Les

intervenants avaient pour mission de partager les résultats de leurs études respectives afin de faire avancer la réflexion autour du rôle des effluents et déchets organiques dans la circularité des flux et l'autonomie azotée en AB. Le contenu des 4 webinaires est décrit en Annexe 1. Le premier webinaire présente les flux de nutriments à différentes échelles spatiales, de la planète à la parcelle agricole. Le second porte sur les indicateurs de caractérisation des flux de nutriments (efficience, circularité). Le troisième traite des risques et des freins environnementaux, sanitaires et réglementaires à l'utilisation des produits organiques en AB. Et enfin, le dernier présente des cas de plateformes expérimentales, soit en AB, soit en agroécologie pour illustrer les différents flux de nutriments dans un système de production agricole.

Afin de hiérarchiser ces leviers pour sélectionner ceux qui seront quantifiés et modélisés, nous avons réalisé un questionnaire en ligne pour que chaque participant attribue une note entre 0 à 10 à l'ensemble des leviers identifiés afin d'évaluer leur potentiel à favoriser la circularité et l'autonomie azotée en AB. Ce système de notation est intentionnellement assez ouvert, et repose largement sur l'expertise individuelle de chaque participant. Ce système très ouvert encourage également les membres du consortium à proposer de nouvelles idées ou à identifier des aspects qui n'avaient pas été envisagés initialement. Le questionnaire a été mis en ligne du 03 au 26 avril 2024 et 23 réponses ont été recueillies. Les leviers ayant reçu une note moyenne supérieure ou égale à $\frac{6}{10}$ ont été sélectionnés, et retenus pour leur quantification.

3.3. Méthodologie de calcul et de quantification de l'impact des leviers sur les flux azotés de trois exploitations

3.3.1. Sélection des indicateurs

Afin d'évaluer l'impact de la mise en place des leviers sur les flux azotés des 3 exploitations types qui ont été sélectionnées et qui sont décrites dans la partie suivante, nous avons sélectionné 4 indicateurs : l'efficience d'utilisation de l'azote, l'autonomie azotée, la productivité et la circularité des flux d'azote. Ces 4 indicateurs ont été choisis pour leur capacité à fournir une vue d'ensemble sur les performances de l'exploitation, avant et après la mise en place des leviers. Pour appliquer chacun des indicateurs suivants, le système est considéré comme étant en état d'équilibre stationnaire : les flux d'entrées et de sorties sont considérés comme étant stables au cours du temps. Ces 4 indicateurs sont calculés à l'échelle de l'exploitation agricole de la manière suivante (Tableau 1) :

<i>Indicateur</i>	<i>Unité</i>	<i>Formule</i>	<i>Description</i>	<i>Références</i>
<i>Autonomie azotée</i>	%	$\frac{\text{Entrées "naturelles"} + \text{entrées issues du territoire}}{\text{Entrées totales}} \times 100$	Entrées « naturelles » : fixation symbiotique et déposition atmosphérique Entrées du territoire : entrées issues de l'AB + entrées hors agriculture conventionnelle (ex : biodéchets, urines humaines...)	(Regan <i>et al.</i> , 2017)
<i>Efficienc e azotée</i>	%	$\frac{\text{Sorties productives}}{\text{Entrées totales}} \times 100$	Sorties productives : sorties hors pertes et hors effluents d'élevage qui quittent l'exploitation	(Regan <i>et al.</i> , 2017)
<i>Indice de circularité</i>	%	$\frac{\text{Flux internes} + \text{Flux issus du territoire}^1}{\text{Flux totaux}} \times 100$	Flux internes : flux circulant entre les différentes composantes du système Flux totaux : Flux entrants + Flux internes + Flux sortants	(Kleinpeter <i>et al.</i> , 2023) (Alvanitakis <i>et al.</i> , 2024)
<i>Productivité totale</i>	kgN.ha ⁻¹	$\frac{\text{Sorties productives}}{\text{SAU}}$	Sorties productives : sorties hors pertes et hors effluents d'élevage qui quittent l'exploitation	(Chen <i>et al.</i> , 2016)
<i>Productivité hors fourrages</i>	kgN.ha ⁻¹	$\frac{\text{Sorties productives hors fourrages}}{\text{SAU}}$	Sorties productives hors fourrages : sorties hors pertes, hors effluents d'élevage et hors fourrages	X

Tableau 1 : Présentation des indicateurs sélectionnés pour quantifier l'impact des leviers sur les exploitations

- L'autonomie azotée : elle mesure la capacité du système agricole à se fournir en azote à partir de sources locales du territoire, que ce soit en lien avec l'agriculture biologique ou à travers l'utilisation de ressources autres du territoire, mais non issues de l'agriculture conventionnelle.
- L'efficienc e azotée : elle permet de mesurer la capacité du système agricole à utiliser l'azote de manière optimale, en minimisant les pertes et en maximisant les rendements. Elle reflète la proportion d'intrants qui sont transformés en produits ;
- L'indice de circularité : il permet de quantifier à la fois la réutilisation de l'azote au sein de l'exploitation, mais aussi le recyclage des flux d'azote du territoire et de les exprimer en fonction de l'ensemble des flux de l'exploitation ;
- La productivité totale : elle mesure la capacité du système à produire des sorties productives (produits animaux hors effluents, et produits végétaux) par unité de surface ;
- La productivité hors fourrages : cet indicateur a été ajouté afin de quantifier la proportion de production réellement destinée à l'alimentation humaine. Cet indicateur permet de comparer de manière équitable les exploitations à forte production de fourrages à celles qui n'en produisent pas.

3.3.2. Présentation des exploitations types sélectionnées

Afin de déterminer l'impact de l'intégration de différents leviers, trois exploitations types ont été sélectionnées : une exploitation bretonne de vaches laitières (VL) en AB issue du réseau d'élevage Inosys, et deux exploitations grandes cultures « Bassin Parisien » (GC BP) et « Deux-Sèvres » (GC DS)

¹ Dans les deux publications citées, seuls les flux internes sont intégrés dans la formule du « cycling index » puisque la circularité à l'échelle territoriale n'est pas étudiée. Dans notre étude, nous considérons la circularité à l'échelle de l'exploitation, via la quantité de flux internes, mais également à l'échelle territoriale à travers le recyclage des effluents et déchets organiques du territoire

issues de fermes types Arvalis, Chambre d'agriculture et ITAB (Arvalis, 2019). Ces exploitations types ont été sélectionnées pour représenter des systèmes agricoles variés et ainsi comparer l'effet des leviers en fonction de ces systèmes. De plus, une large quantité de données sur leurs caractéristiques et performances étaient disponibles, et elles incarnent une certaine représentativité de l'existant sur les territoires considérés. Les 3 exploitations types sélectionnées dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- Description de l'exploitation de vaches laitières (VL) :

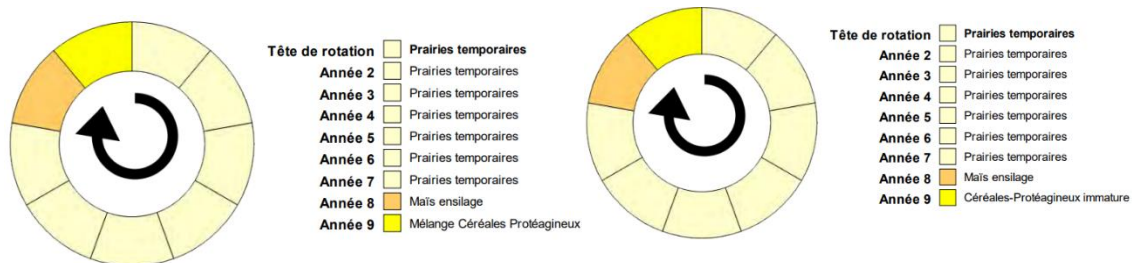


Figure 5 : Les deux rotations de l'exploitation VL

L'exploitation VL a une SAU de 70 ha et contient 86 UGB. La surface en herbe représente 80% de la SAU, les cultures fourragères arrivent en 2ème place avec 12 % de la SAU (maïs ensilage et mélange céréales-protéagineux immatures) et, enfin, il y a une production de grandes cultures sur 8% de la SAU (mélange céréales-protéagineux). L'exploitation suit 2 rotations très similaires (Figure 5), principalement composées de prairies : 7 ans de prairies temporaires, 1 an de maïs ensilage, suivi soit d'un mélange céréales-protéagineux immature soit d'un mélange céréales-protéagineux mature. Avec 65 vaches laitières de races Normande et Prim'Holstein, la production laitière s'élève à 6 388 L/vache.

- Description de l'exploitation en grandes cultures du Bassin parisien (GC BP) :

• **Assolement**

■ Interculture ■ Fertilisation ■ Désherbage manuel

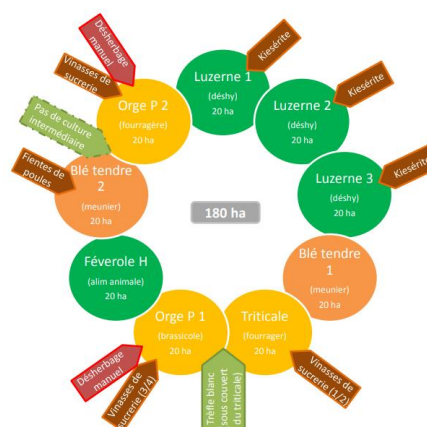


Figure 6 : Rotation de l'exploitation GC BP

L'exploitation type GC BP a été créée en 2008-2010 dans le cadre du CASDAR RotAB et a été remise à jour en 2017. Elle a été renseignée à dire d'experts avec l'appui technique de la Chambre d'Agriculture d'Île-de-France et Arvalis. L'exploitation décrite a une SAU de 180 ha. La rotation est sur 9 ans et débute par 3 ans de culture de luzerne qui sont par la suite déshydratées (Figure 6). Des fertilisants azotés (fientes de poules et vinasses de sucrerie) sont apportées sur les cultures non-légumineuses.

- Description de l'exploitation en grandes cultures des Deux-Sèvres (GC DS) :

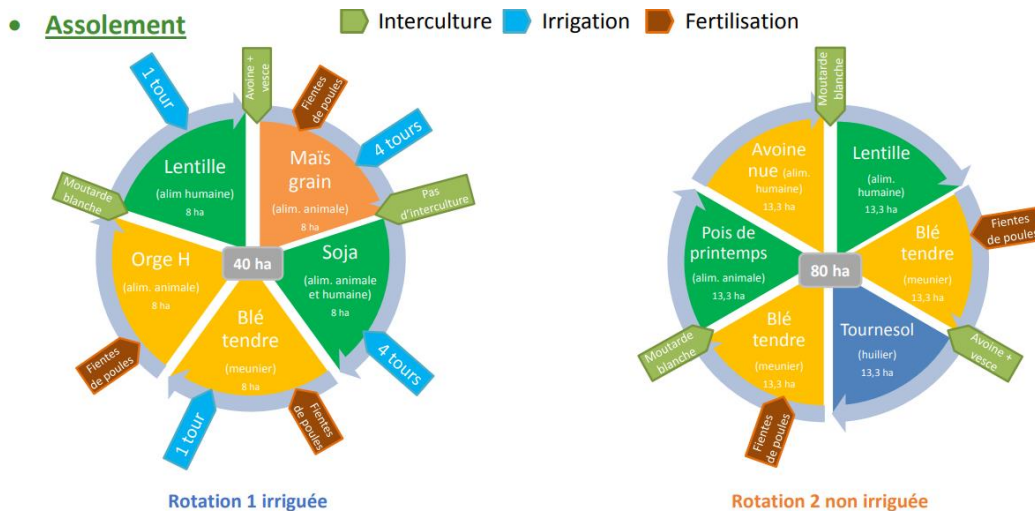


Figure 7 : Les deux rotations de l'exploitation GC DS

De la même façon que l'exploitation précédente, cette exploitation type représente une réalité pouvant être couramment observable dans le contexte pédoclimatique ciblé et a été renseignée à dire d'experts avec l'appui technique de la Chambre d'Agriculture de la Vienne ainsi que la FRAB de Nouvelle-Aquitaine. L'exploitation GC DS a une SAU de 120 ha et repose sur 2 systèmes de culture en fonction de la présence ou non de l'irrigation (Figure 7). La première rotation est irriguée, se déroule sur 5 ans et est constituée de 2 légumineuses. La deuxième rotation n'est pas irriguée, contient également deux légumineuses et se déroule sur 5 ans.

3.3.3. Méthode de quantification des flux d'azote

Les flux d'azote de chaque exploitation type ont été modélisés dans leur état initial (sans la mise en place des leviers) grâce aux données techniques spécifiques renseignées dans des fiches descriptives, et à l'acquisition de références techniques disponibles dans la bibliographie. Les entrées d'azote prises en compte sont les importations d'engrais, de fourrages, de concentrés, les dépôts atmosphériques ainsi que les entrées via la fixation symbiotique des légumineuses. Selon la littérature scientifique, la déposition atmosphérique oscille entre 0 et 20 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ (Agro Transfert, 2016) et a été fixée à 10

kgN.ha⁻¹.an⁻¹ dans notre étude. En ce qui concerne les entrées d'engrais déjà renseignées dans les cas-types, nous partons de l'hypothèse qu'elles proviennent soit de l'agriculture conventionnelle, soit de sources extérieures aux territoires étudiés. Cela permet d'établir une référence que nous pourrons ensuite comparer aux modélisations intégrant les leviers. Les données d'entrées d'azote considérées telles que les achats de paille, de concentrés et de fertilisant sont disponibles dans les fiches descriptives des exploitations. La fixation symbiotique a été calculée à partir des surfaces et des rendements fournis dans ces fiches et à partir de l'équation ci-dessous :

$$\text{Fixation symbiotique de la culture } x \text{ (kgN/an)} = \text{fixation unitaire culture } x \text{ (kgN/tMS.an)} \times \text{surface occupée par la culture } x \text{ (ha)} \times \text{rendement } x \text{ (tMS/ha)} \times \% \text{ de légumineuses (si mélange)}$$

Équation 1 : Calcul de la fixation symbiotique d'une culture ou d'un mélange de cultures (prairies)

Les valeurs choisies pour les fixations unitaires de chaque culture sont disponibles en Annexe 2. Les dépôts atmosphériques ont été fixés à 10 kgN/ha/an (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2013).

Les sorties d'azote considérées sont les productions animales (lait, viande) et les productions végétales (céréales, fourrages). Les données de production étaient renseignées dans les cas-types et ont permis de calculer les sorties à partir de références bibliographiques concernant les teneurs en N des différents produits. Différents types de pertes ont également été considérés : les pertes d'azote par volatilisation au stockage, au pâturage et à l'épandage, avec un taux de volatilisation qui varie en fonction des produits, par lixiviation avec une valeur moyenne fixée à 18.6 kgN/ha/an (Vandenberghe *et al.*, 2013) et par dénitrification avec une valeur moyenne fixée à 10 kgN/ha/an, avec des variations pouvant aller de 5 à 15 kgN/ha.⁻¹.an⁻¹ dans la littérature scientifique (Agro Transfert, 2016). Enfin, les flux internes, c'est-à-dire les flux qui circulent entre les différentes composantes animale et végétale sous forme de fourrages et fumier sont également pris en compte dans nos modélisations. Pour cela, nous avons calculé les quantités d'azote excrétées à partir des effectifs animaux disponibles dans les fiches descriptives et des données de référence CORPEN pour chaque catégorie d'animal en considérant les temps de pâturage disponibles en Annexe 3. Le bilan fourrager a été calculé à partir des données disponibles dans la fiche descriptive.

La méthode utilisée pour la modélisation des flux d'azote est la méthode du bilan annuel : chaque entité du modèle (végétale, animale, autre...) doit avoir un bilan (entrées-sorties) proche de 0, à 5% près pour que la modélisation soit considérée comme valide. On considère donc que le bilan est acceptable à partir du moment où le défaut de bilan n'excède pas 5%. Le bilan des exploitations de référence a été ajusté par le stockage d'azote dans les sols grâce au stockage/déstockage des prairies sur la base de résultats CAP'2ER, c'est-à-dire avec un stockage maximum de 57.kgN.ha⁻¹.an⁻¹ par les prairies et un déstockage de 85 kgn.ha⁻¹.an⁻¹ suite à la destruction des prairies. Les NUE (« Nitrogen Use Efficiency » pour les productions végétales) et NCE (« Nitrogen Conversion Efficiency » pour les

productions animales) considérés comme étant $\frac{\text{Sorties productives}}{\text{Entrées}} \times 100$, ont été calculées afin de vérifier la cohérence de nos modélisations. Enfin, une étude de sensibilité sur les variables incertaines (fixation, dépôts atmosphériques...) révèle que les variations sur les références les plus incertaines n'affectent pas de manière significative les tendances observées. L'ensemble des modélisations a été réalisé sur le logiciel Excel.

3.3.4. Présentation des territoires d'étude

Pour évaluer l'effet du territoire sur la mise en place des leviers et sur la quantité d'azote disponible, trois territoires présentant des densités de population contrastées ont été sélectionnés. Ces différences de densité permettent de mieux illustrer l'importance du contexte territorial dans l'application et dans l'efficacité des leviers. Seul le facteur « densité de population » a été étudié puisque les leviers territoriaux nécessitent la collecte de certaines ressources du territoire, dont la disponibilité dépend de la taille de la population du territoire en question. Ainsi, les 3 territoires suivants ont été sélectionnés :

- Le département de la Vienne, faiblement peuplé avec une densité de population de 63 habs/km² (Insee, 2024a) ;
- Le département de l'Ille-et-Vilaine, caractérisé par une densité de population intermédiaire de 124 habs/km² (Insee, 2024b) et une activité agricole intense ;
- La région Île-de-France, à forte densité de population avec 1022 habs/km² (Insee, 2024c) et à forte urbanisation ;

Ces trois territoires correspondent également aux territoires dans lesquels sont localisées les trois exploitations types étudiées (VL dans l'Ille-et-Vilaine, GC BP en Île-de-France et GC DS dans la Vienne). Ainsi, les leviers territoriaux ont été appliqués dans les 3 exploitations types, elles-mêmes placées dans trois contextes territoriaux différents. La modélisation d'un levier territorial nécessite donc la modélisation de 9 cas différents.

Mais, parmi les leviers territoriaux, certains n'ont pas été testés dans les trois contextes différents car nous avons supposé qu'ils s'appliqueraient de manière similaire, quel que soit le territoire. Ces leviers utilisent les ressources du territoire de manière indirecte, sans que ces données soient spécifiquement quantifiées pour un territoire précis. Par exemple, les échanges de ressources comme le fourrage ou le fumier entre deux exploitations « voisines » peuvent être modélisés sans avoir besoin de considérer un territoire spécifique, car ces échanges reposent sur des principes généraux de partage des ressources qui s'appliquent de manière uniforme, quel que soit le contexte territorial. Dans le cas des échanges entre exploitations, on considère par exemple qu'un certain pourcentage des céréales produites dans notre

exploitation type A est distribué à une exploitation voisine B, et qu'en retour, la totalité des effluents produits et disponibles de l'exploitation B sont distribués à l'exploitation type A. Par conséquent, ces leviers ont été uniquement mis en œuvre dans les trois exploitations, en partant du principe que leur application suivait les mêmes principes partout. Nous n'avons donc pas considéré la spécialisation des territoires dans notre étude (dans notre travail, un échange céréales-fumier peut aussi bien se faire en Île-de-France qu'en Ile-et-Vilaine).

3.3.5. Méthode de quantification des leviers

Une seconde étude bibliographique a été réalisée afin d'acquérir des données techniques et scientifiques sur l'ensemble des leviers sélectionnés. De manière général, les leviers peuvent agir :

- Sur les entrées en azote de l'exploitation : l'application d'un levier peut entraîner la création d'une nouvelle entrée d'azote (souvent le cas pour les leviers territoriaux), diminuant ou substituant complètement l'entrée d'origine ;
- Sur les flux internes de l'exploitation ; l'application d'un levier peut mener à la création de nouveaux flux internes (ex : introduction de l'élevage, de la méthanisation), à leur diminution ou à leur augmentation ;
- Sur les sorties en azote : les leviers peuvent participer à la modification des pertes en azote, mais aussi à l'augmentation ou à la diminution des rendements ;

Au sein de l'ensemble de nos modélisations, le surplus en azote obtenu grâce à l'insertion d'un levier est compensé par la diminution des fertilisants importés initialement par les exploitations de référence : c'est la règle de substitution (Alvanitakis *et al.*, 2024).

3.4. Présentation des résultats, validation des hypothèses de modélisation par le consortium Organic4Organic et réalisation de scénarios

Une partie de mes résultats a été présentée lors d'un atelier de deux jours réunissant les membres du consortium. Cet atelier avait pour but de discuter des leviers, de leurs hypothèses de modélisation, et des résultats obtenus afin de faire émerger de nouvelles idées de projets de recherche liés à la gestion des effluents et des déchets organiques en AB. Seuls les résultats de l'insertion des leviers sur l'autonomie et la productivité ont été présentés, les autres indicateurs ayant été calculés après cet atelier. Les principaux résultats de l'atelier sont présentés dans le document ressource.

L'une des conclusions de cet atelier a été de proposer d'étudier des combinaisons de plusieurs leviers : plutôt que d'étudier l'effet d'un seul levier, pourquoi ne pas en combiner plusieurs pour

maximiser les impacts positifs sur l'autonomie et la productivité des exploitations agricoles en AB ? Ainsi, à l'issue de cet atelier, 3 scénarios ont été réalisés grâce à la combinaison de divers leviers. Nous avons élaboré 1 scénario par exploitation, intégrant à la fois des leviers applicables à l'échelle de l'exploitation et du territoire. Pour ce faire, les exploitations ont été replacées dans leur contexte territorial d'origine : l'exploitation VL dans le territoire de l'Ille-et-Vilaine, l'exploitation GC BP en Île-de-France et l'exploitation GC DS dans la Vienne. Ces scénarios ont été construits sur la base des résultats obtenus suite à leur modélisation, en optant à la fois pour les leviers les plus adaptés à chaque exploitation et ceux ayant suscité un fort intérêt au sein du consortium.

4. Résultats et discussion

4.1. Modélisation des exploitations types et calcul des indicateurs

Les modélisations suivantes des exploitations types sont disponibles dans le document annexe fourni en complément de ce rapport, sous la forme de fichiers Excel (Annexe 4).

4.1.1. Exploitation VL

On remarque que le principal flux entrant d'azote est obtenu par la fixation symbiotique de la composante végétale permise par les légumineuses des prairies (Figure 8). Les flux internes sont très élevés, puisque la quasi-totalité de l'alimentation animale est produite par l'exploitation, et que les effluents d'élevage produits servent à fertiliser les cultures. Cette exploitation exporte majoritairement du lait, et dans une très faible proportion de la viande, des céréales et des fourrages. Elle a une autonomie de 61.4%, une efficacité 33.7%, une productivité totale (toutes les productions) de 39.4 kgN.ha⁻¹.an⁻¹, une productivité hors fourrages de 37.8 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ et son indice de circularité vaut 51.2 % en raison des flux internes déjà présents au sein de l'exploitation (Tableau 2).

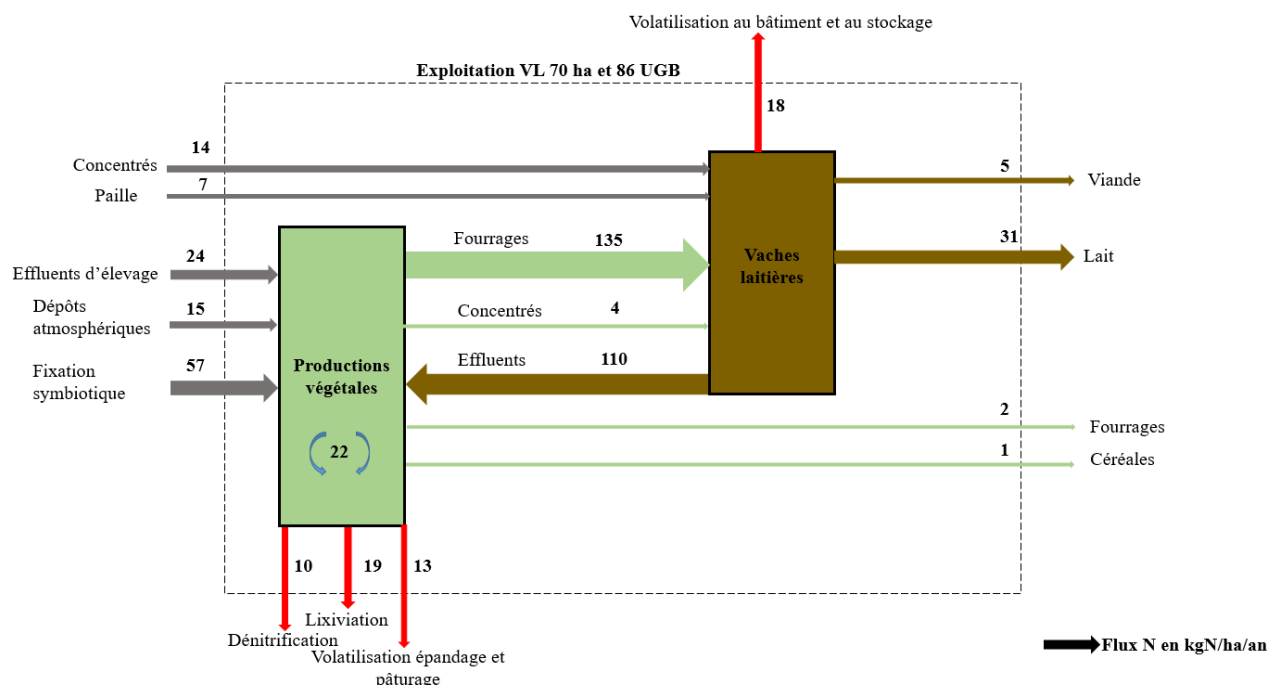


Figure 8 : Modélisation des flux d'azote entrants, internes et sortants de l'exploitation de vaches laitières de Bretagne (VL)

Exploitation	Autonomie	Efficience	Circularité	Productivité totale	Productivité hors fourrages
VL	61.4 %	33.7 %	51.2 %	39.4 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹	37.8 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹

Tableau 2 : Indicateurs appliqués à l'exploitation VL

4.1.2. Exploitation GC BP

Avec 4 années de légumineuses sur une rotation de 9 ans, l'exploitation GC BP repose majoritairement sur la fixation symbiotique comme source d'azote, et importe une faible quantité de déjections pour fertiliser ses cultures (Figure 9). Elle est fortement exportatrice en fourrages avec sa production de luzerne, de triticale fourragère et d'orge fourragère. Son autonomie est de 86.4%, sa productivité totale s'élève à 129.7 kgN.ha⁻¹.an⁻¹, sa productivité hors fourrage vaut 30.8 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ et son indice de circularité est nul puisqu'il n'y a aucun flux internes (Tableau 3).

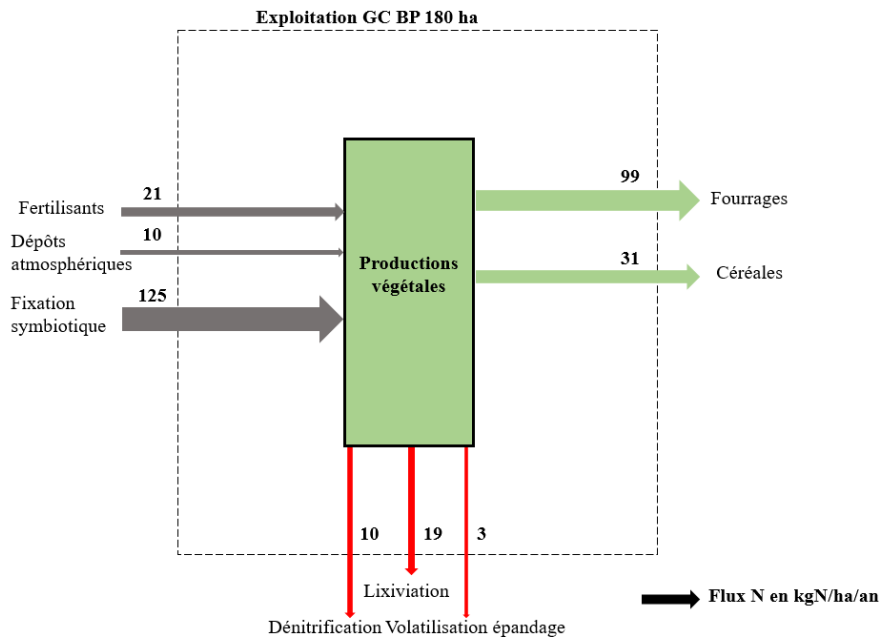


Figure 9 : Modélisation de l'exploitation en grandes cultures du Bassin Parisien (GC BP)

Exploitation	Autonomie	Efficience	Circularité	Productivité totale	Productivité hors fourrages
GC BP	86.4 %	83.1 %	0 %	129.7 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹	30.8 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹

Tableau 3 : Indicateurs appliqués à l'exploitation GC BP

4.1.3. Exploitation GC DS

L'exploitation GC DS repose moins sur la fixation symbiotique que l'exploitation GC BP et importe plus d'effluents. Néanmoins l'apport d'azote via la fixation symbiotique reste aussi important que celui via l'apport d'engrais (Figure 10). Elle ne produit aucun fourrage et exporte uniquement des céréales. Elle a une autonomie de départ de 56.5 %, une productivité totale/productivité hors fourrages de 57.5 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ puisqu'aucun fourrage n'est produit sur l'exploitation et son indice de circularité est également nul (Tableau 4).

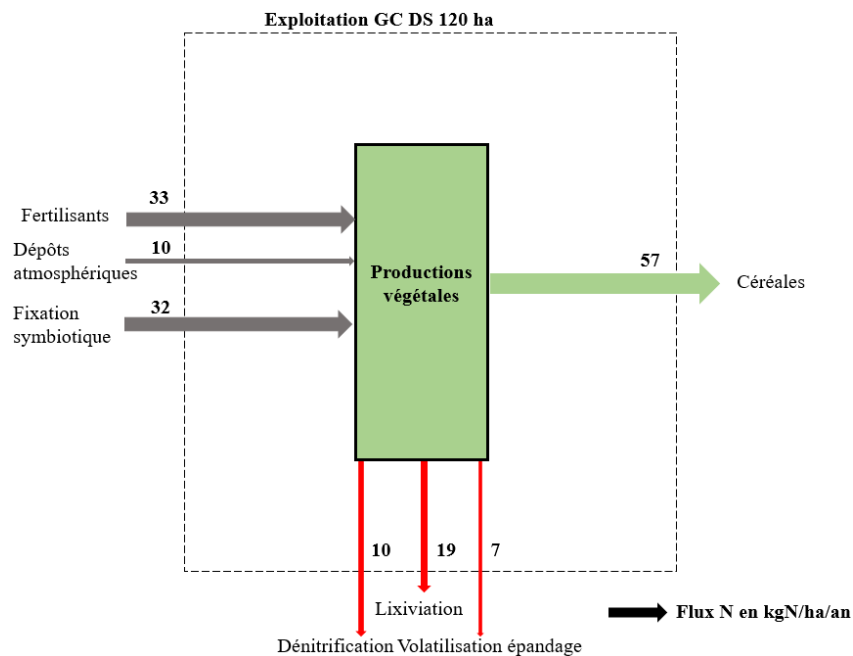


Figure 10 : Modélisation de l'exploitation en grandes cultures des Deux-Sèvres (GC DS)

Exploitation	Autonomie	Efficience	Circularité	Productivité totale	Productivité hors fourrages
GC DS	56.5 %	76.6 %	0 %	57.5 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹	57.5 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹

Tableau 4 : Indicateurs appliqués à l'exploitation GC DS

4.2. Les leviers identifiés potentiellement favorables à l'autonomie N des exploitations AB

Vingt-deux leviers agronomiques, techniques et organisationnels génériques permettant potentiellement d'augmenter l'autonomie N des exploitations AB ont été identifiés. Ces leviers visent à recycler les déchets du territoire, à favoriser les échanges entre les différentes composantes du système, à réduire les pertes et à optimiser les pratiques agricoles. Ils sont détaillés dans les parties suivantes.

4.2.1. Les leviers applicables à l'échelle du territoire

Neufs leviers ont été identifiés à l'échelle du territoire. Ces 9 leviers peuvent être regroupés en 5 catégories et sont présentés sur la Figure 11.

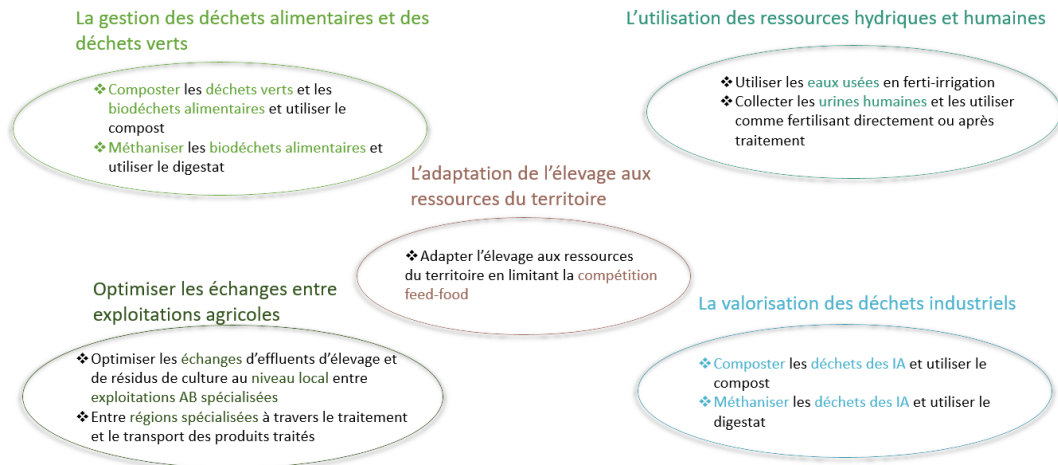


Figure 11 : Présentation des 9 leviers identifiés à l'échelle du territoire

Ainsi, les leviers identifiés à l'échelle territoriale peuvent faire appel : - à la **réutilisation des déchets verts et des déchets alimentaires** sous la forme de compost ou de digestat ; - à la **réutilisation des eaux usées et des urines humaines** ; - à la **réduction de l'élevage pour diminuer la compétition feed-food**, en produisant davantage de ressources destinées à l'alimentation humaine plutôt qu'à l'alimentation animale ; - à l'**organisation d'échanges de flux secondaires** (fourrages, céréales non conformes à l'alimentation humaine et effluents d'élevage) entre exploitations, soit au niveau local entre 2 exploitations AB spécialisées du territoire, soit entre 2 régions spécialisées ; - et à la **valorisation des déchets industriels** à travers l'utilisation de digestat ou de compost de déchets issus des industries agroalimentaires.

4.2.2. Les leviers applicables à l'échelle de l'exploitation

Treize leviers ont été identifiés à l'échelle de l'exploitation. Ils peuvent être regroupés en 3 catégories (Figure 12) :

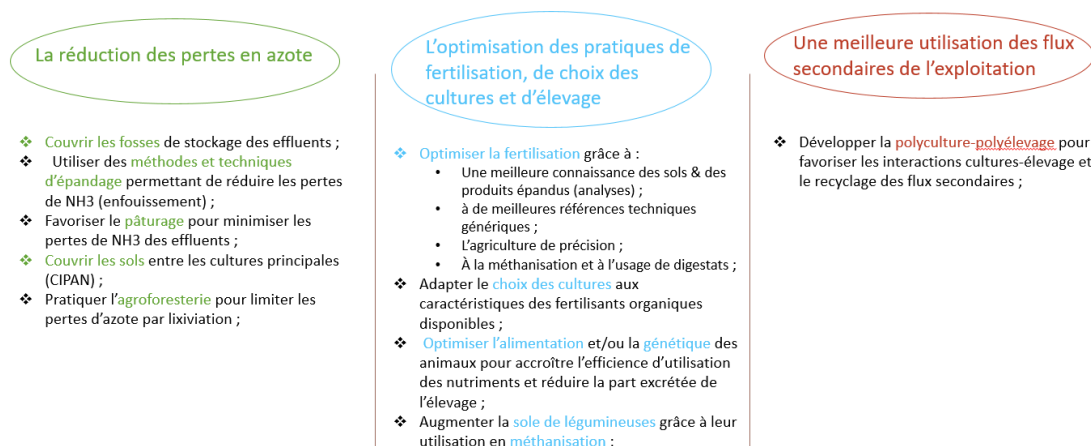


Figure 12 : Présentation des 13 leviers identifiés à l'échelle de l'exploitation

Ainsi, les leviers identifiés à l'échelle de l'exploitation peuvent faire appel : 1) à la **la réduction des pertes en azote**, regroupant des leviers permettant de couvrir les sols, de couvrir les fosses, d'enfouir les produits épandus et de mettre en place des pratiques agroforestières, qui participent à la diminution des risques de pertes par lixiviation et par volatilisation ; 2) à **l'optimisation des pratiques de fertilisation, de choix des cultures et d'élevage**, qui regroupe des leviers permettant d'optimiser les pratiques de fertilisation, soit grâce à des analyses physico-chimiques, soit par l'acquisition de meilleures références, de l'agriculture de précision ou de l'insertion de la méthanisation. On retrouve aussi dans cette catégorie le levier d'adaptation des cultures en fonction des fertilisants organiques disponibles, celui de l'optimisation de l'alimentation animale et/ou de la génétique pour améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments et réduire la part excrétée de l'élevage et enfin le levier d'augmentation de la sole de légumineuses grâce à leur utilisation en méthanisation (CIVE, légumineuses fourragères) ; 3) à la **meilleure utilisation des flux secondaires de l'exploitation grâce à l'introduction d'un modèle en polyculture-polyélevage** au sein des exploitations pour favoriser les complémentarités entre cultures et élevages et recycler les déchets des exploitations ;

4.3. Hiérarchisation des leviers et quantification de leurs impacts sur les flux d'azote des exploitations

4.3.1. Présentation des leviers sélectionnés et de leurs hypothèses de modélisation

À l'issue du questionnaire, 13 leviers ont été sélectionnés, dont 8 à l'échelle de l'exploitation et 5 à l'échelle du territoire, représentés dans le Tableau 5 ci-dessous. Les notes moyennes attribuées à chaque levier sont présentées en Annexe 5. Nous avons élaboré, pour chacun des 13 leviers, un objectif clair, et nous avons déterminé la ou les variables impactées par la mise en place de ces leviers. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 5 ci-dessous.

Nom levier et Objectif	Échelle	Variables impactées, données chiffrées et références
Adopter le modèle polyculture-polyélevage (voir Figure 13) Objectif : Intégrer des animaux pour utiliser les flux secondaires² de l'exploitation	Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> Intégration de monogastriques pour consommer 30 % des céréales produites dans les 3 exploitations ; Intégration de ruminants pour consommer 100% des fourrages produits dans GC BP; NCE³ monogastrique : 0.28 NCE ruminants : 0.17 (Peyraud <i>et al.</i>, 2012) FE⁴ au bâtiment, au stockage et au pâturage : voir Annexe 6 Application : GC BP, GC DS, VL.
Couvrir les sols en période d'interculture Objectif : Maximiser la couverture du sol en période	Exploitation	Intégration d'une couverture (CIPAN) lorsque le sol est nu pendant au moins 3 mois en automne/hiver dans les rotations

² Flux secondaires : flux non consommables par l'homme (fourrages, céréales non conformes et effluents). Nous considérons que 30 % des céréales produites ne sont pas conformes à l'alimentation humaine ;

³ NCE : « Nitrogen conversion efficiency », un NCE égal à 0.28 signifie que 28% de l'azote ingéré par l'animal sera converti en produits utiles (viande, lait...), le reste est excrété ;

⁴ FE : Facteur d'émission

d'interculture pour diminuer les pertes d'azote par lixiviation		<ul style="list-style-type: none"> Diminution de 50 % du taux de lixiviation (Arvalis, 2017) proportionnellement au nombre de CIPAN introduites dans la rotation ; <p>Application : GC BP et GC DS. N'a pas pu être intégré à VL ;</p>
<p>Enfouir les produits épandus</p> <p>Objectif : Réduire les pertes en azote par volatilisation à l'épandage grâce à l'enfouissement des engrais épandus</p>	Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> Abattement entre 50 % et 60 % de la volatilisation à l'épandage en fonction de la nature des engrais épandus lorsque l'enfouissement est possible (Manneville <i>et al.</i>, 2023) ; <p>Application : GC BP, GC DS et VL</p>
<p>Couvrir les fosses de stockage des effluents</p> <p>Objectif : Réduire les pertes en azote par volatilisation grâce à la couverture des fosses de stockage à lisier</p>	Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> Abattement de 60 % de la volatilisation au stockage des lisiers (Manneville <i>et al.</i>, 2023) <p>Application : réalisation d'un autre cas VL avec l'hypothèse que les vaches produisent du lisier et que les génisses produisent du fumier (il n'y avait pas de production de lisier dans le cas de référence)</p>
<p>Optimiser la fertilisation</p> <p>Objectif : Adapter la fertilisation aux besoins des cultures pour diminuer les pertes et maximiser le rendement final</p>	Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de la lixiviation, volatilisation à l'épandage, et de la dénitrification de 30 % ; Augmentation de 10 % du rendement des cultures fertilisées ; <p>Application : GC BP, GC DS et VL</p>
<p>Augmenter la sole de légumineuses <u>VOE 1</u> : introduction de CIVE et méthanisation</p> <p>Objectif : Augmenter la surface dédiée aux légumineuses et les utiliser pour fertiliser les cultures par le biais de la méthanisation</p>	Exploitation	<p>Maximisation des couverts en période d'interculture (identique au levier « Couvrir les sols en période d'interculture »), mais les CIPAN introduites sont remplacées par des CIVE ;</p> <p>Intégration d'une nouvelle composante méthanisation qui méthanise les CIVE. Le digestat obtenu sert à fertiliser les cultures et une baisse de rendement est considérée pour les cultures qui succèdent aux CIVE</p> <p>Application : GC BP, GC DS</p> <ul style="list-style-type: none"> CIVE : composées de 15 % de légumineuses ; Rendement CIVE : 7.5 t/ha ; Rendement de la culture post-CIVE : -20 % (donnée issue d'un entretien réalisé par un membre du consortium) ; Pertes au stockage et à l'épandage du digestat : Annexe 6 ;
<p>Augmenter la sole de légumineuses <u>VOIE 2</u> : méthanisation des légumineuses fourragères pour GC, OU réduction de l'élevage et méthanisation des ressources qui ne sont plus utilisées pour VL</p> <p>Objectif : Augmenter la surface dédiée aux légumineuses et les utiliser pour fertiliser les cultures par le biais de la méthanisation</p>	Exploitation	<p>Création d'une composante méthanisation et restitution du digestat sur les cultures ;</p> <ul style="list-style-type: none"> Réduction de l'élevage de 40 % pour l'exploitation VL, méthanisation des ressources qui ne sont plus utilisées pour l'élevage ; Méthanisation des légumineuses fourragères pour GC BP ; Pertes au stockage et à l'épandage du digestat : Annexe 6 ; <p>Application : GC BP et VL. Pas applicable à GC DS qui ne produit aucun fourrage</p>
<p>Maximiser le temps de pâturage</p> <p>Objectif : Augmenter le temps de pâturage des ruminants pour diminuer les pertes d'azote</p>	Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de 20 % du temps de pâturage pour chaque catégorie d'animaux (voir Annexe 3 pour les temps de pâturage de référence), ce qui réduit les pertes au bâtiment et stockage et augmente celles au pâturage ; <p>Application : VL</p>
<p>Pratiquer l'agroforesterie</p> <p>Objectif : Mettre en œuvre des pratiques agroforestières pour diminuer les pertes en azote par lixiviation</p>	Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> Abattement de 25 % du taux de lixiviation ; (Viaud, Thomas, 2019) <p>Application : GC BP, GC DS et VL</p>
<p>Échanges de flux secondaires entre exploitations AB du territoire</p> <p>Objectif : Créer un écosystème circulaire en redistribuant les parties non comestibles par l'homme (fourrages et céréales non conformes) des ressources végétales à des fermes voisines et en récupérant les effluents qu'elles</p>	Tout territoire	<p>Création de 2 nouvelles entrées provenant des échanges d'effluents avec 2 exploitations voisines (une exploitation de ruminants et une exploitation de monogastriques).</p> <ul style="list-style-type: none"> 100 % des fourrages produits sont distribués à une exploitation de ruminants en échange de leurs effluents ; 30 % des céréales produites sont distribuées à une exploitation de monogastriques en échange de leurs effluents ; NCE ruminants : 0.17 et NCE monogastriques : 0.28 Émissions aux bâtiments, au stockage et à l'épandage : Annexe 6

produisent à partir de ces ressources partagées		Application : GC BP, GC DS et VL Remarque : Ce levier s'applique à n'importe quel territoire. Il n'a pas pris en compte les spécificités d'un territoire en particulier. On suppose que des exploitations voisines peuvent faire ces échanges.
Adapter l'élevage aux ressources du territoire pour limiter la compétition feed-food Objectif : Intégrer des animaux pour utiliser les flux secondaires de l'exploitation, mais avec un cheptel réduit afin de produire davantage de ressources consommables par l'homme et de consacrer moins de ressources à la production animale	Tout territoire	Intégration de 2 nouvelles composantes dans le système : une composante « ruminants » pour l'exploitation GC BP et une composante « monogastriques » pour les 3 exploitations. Réduction de l'élevage de ruminants. Les céréales qui ne sont plus utilisées pour l'alimentation animale sont exportées, tandis que le fourrage non utilisé est restitué au sol pour fertiliser les cultures. <ul style="list-style-type: none"> • Intégration de monogastriques pour consommer 30 % des céréales ; • Intégration de ruminants pour consommer 100 % des fourrages produits ; • NCE monogastriques : 0.28 et NCE ruminants : 0.17 • Réduction de 20% l'élevage de ruminants ; • Restitution des 20 % de fourrages non utilisés au sol ; • Export des 20 % des céréales non utilisées ; • Emissions aux bâtiments, au stockage, au pâturage et à l'épandage : Annexe 6 ; Application : GC BP, GC DS et VL
Utiliser le compost de déchets alimentaires et de déchets verts Objectif : Recycler les biodéchets du territoire pour accroître l'autonomie azotée des exploitations.	Territoire	Création de 2 nouvelles entrées : une entrée « compost de déchets alimentaires » et une entrée « compost de déchets verts ». <ul style="list-style-type: none"> • Données utilisées : voir Annexe 7 : <u>Hypothèse réalisée quant à la collecte des déchets alimentaires</u> : les habitants se trouvant dans une ville dont la densité de population est supérieure à 500 hab/km ² et qui ont accès au réseau d'assainissement collectif voient leurs biodéchets alimentaires collectés Annexe 8 Application : GC BP, GC DS et VL placées dans les 3 contextes territoriaux considérés (Vienne, Ile-et-Vilaine, Île de France)
Utiliser le digestat de déchets alimentaires Objectif : Recycler les biodéchets alimentaires du territoire pour accroître l'autonomie azotée des exploitations.	Territoire	Création d'une nouvelle entrée « digestat de déchets alimentaires » dans le système <ul style="list-style-type: none"> • Données utilisées : voir Annexe 8 <u>Hypothèse réalisée quant à la collecte des déchets alimentaires</u> : les habitants se trouvant dans une ville dont la densité de population est supérieure à 500 hab/km ² et qui ont accès au réseau d'assainissement collectif voient leurs biodéchets alimentaires collectés Application : GC BP, GC DS et VL placées dans les 3 contextes territoriaux considérés (Vienne, Ile-et-Vilaine, Île de France)
Utiliser les urines humaines comme fertilisant Objectif : Recycler les urines du territoire pour accroître l'autonomie azotée des exploitations	Territoire	Création d'une nouvelle entrée « urines » dans le système. <ul style="list-style-type: none"> • Données utilisées : voir Annexe 9 <u>Hypothèse pour la collecte des urines</u> : les habitants raccordés au réseau d'assainissement collectif à l'échelle du département/de la région bénéficient d'une collecte de leurs urines ; Application : GC BP, GC DS et VL placées dans les 3 contextes territoriaux considérés (Vienne, Ile-et-Vilaine, Île de France)

Tableau 5 : Description des leviers sélectionnés et de leur mise en application dans les modélisations des exploitations types

Pour les leviers « utilisation du compost de déchets alimentaires et de déchets verts », « utilisation du digestat de déchets alimentaires », et « utilisation des urines humaines », la quantité d'azote disponible issue la collecte de ces ressources est représentée dans le Tableau 6 ci-dessous. Les méthodologies de calcul correspondantes sont disponibles en Annexe 7 : , Annexe 8 et Annexe 9 respectivement. On observe ainsi une forte disparité entre les 3 territoires, avec une disponibilité très

faible des ressources dans la Vienne, et une disponibilité élevée en Île-de-France. Le levier « utilisation des urines humaines » est celui qui génère la plus grande quantité d'azote disponible.

Territoire	N disponible avec l'utilisation de compost de biodéchets alimentaires et de déchets verts (kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	N disponible avec l'utilisation de digestat de biodéchets alimentaires (kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	N disponible avec l'utilisation des urines humaines (kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Vienne	1.18	0.12	3.2
Ille-et-Vilaine	3.31	0.4	8.5
Île-de-France	18.08	8.97	116.4

Tableau 6 : Azote disponible liée à l'utilisation des ressources du territoire rapporté à la SAU totale de chaque territoire

Deux exemples de modélisation avec l'intégration de leviers sont présents en Figure 13 et en Figure 14 pour l'exploitation GC BP et sont disponibles sous forme de fichier Excel (Annexe 4).

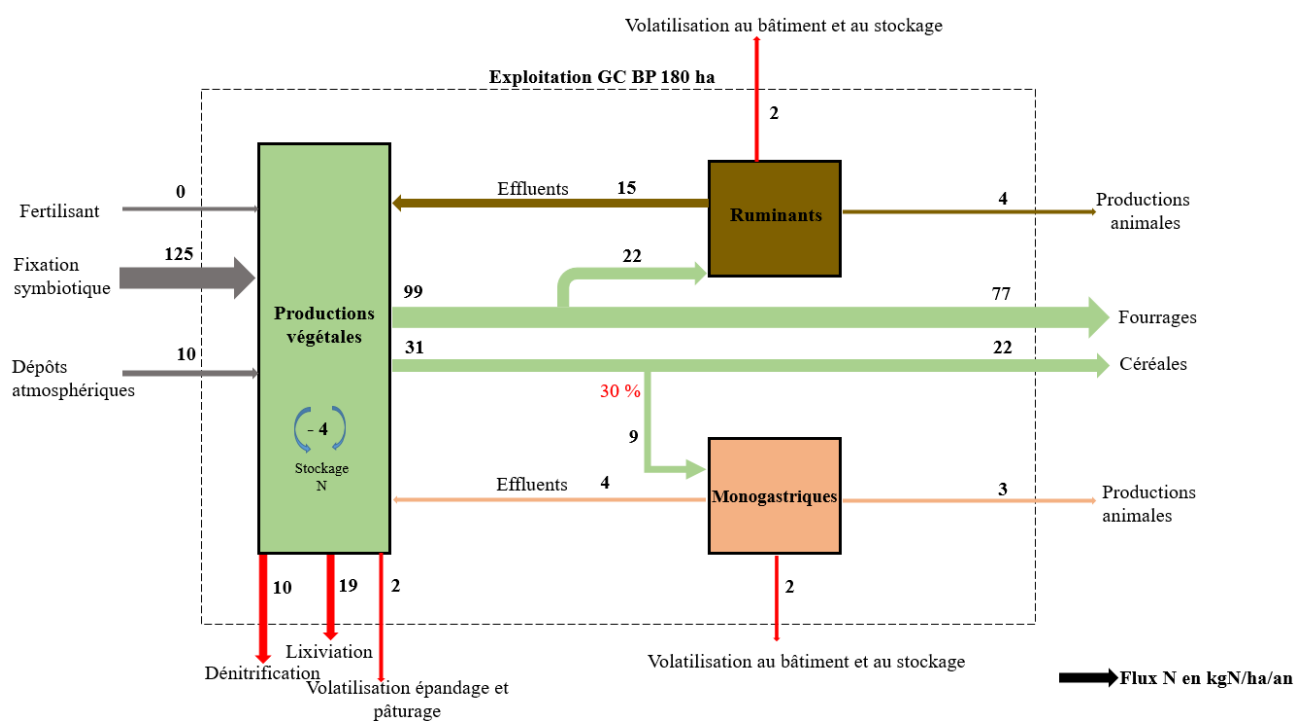


Figure 13 : Exemple 1 : modélisation du levier "polyculture-polyélevage" au sein de l'exploitation GC BP

Exploitation	Autonomie	Efficience	Circularité	Productivité totale	Productivité hors fourrages
GC BP avec levier	100 %	78 %	15.8 %	105 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹	27.8 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹
Comparaison à l'exploitation de référence	+ 13.6 points	- 5.1 points	+ 15.8 points	- 19 %	- 9.7 %

Tableau 7 : Résultats des indicateurs suite à l'intégration du levier "polyculture-polyélevage" au sein de l'exploitation GC BP et comparaison à l'exploitation de référence (sans levier)

L'adoption du modèle de polyculture-polyélevage au sein de l'exploitation GC BP (Figure 13) permet à cette dernière de devenir entièrement autonome en azote (Tableau 7) grâce à son importante production de fourrages. En effet, la totalité des fourrages n'a pas pu être distribuée aux ruminants car une partie seulement suffisait à maintenir un cheptel de taille adéquate pour satisfaire les besoins des cultures avec le retour des effluents d'élevage. Par conséquent, le retour des effluents d'élevage (ruminants comme monogastriques) permet de remplacer complètement l'apport initial de fertilisants dans l'exploitation de référence. Néanmoins, l'introduction de ce levier conduit à une diminution de 5 points de l'efficience à cause de l'augmentation des pertes par volatilisation consécutives à l'introduction de l'élevage. Il y a également une perte importante en productivité totale (-19%) qui s'explique par l'allocation de fourrages aux ruminants, et la diminution de la PHF (-9.7%) s'explique par l'allocation de 30 % de céréales aux monogastriques. Toutefois, en introduisant de nouveaux flux internes dans l'exploitation, la circularité augmente de 15.8 points.

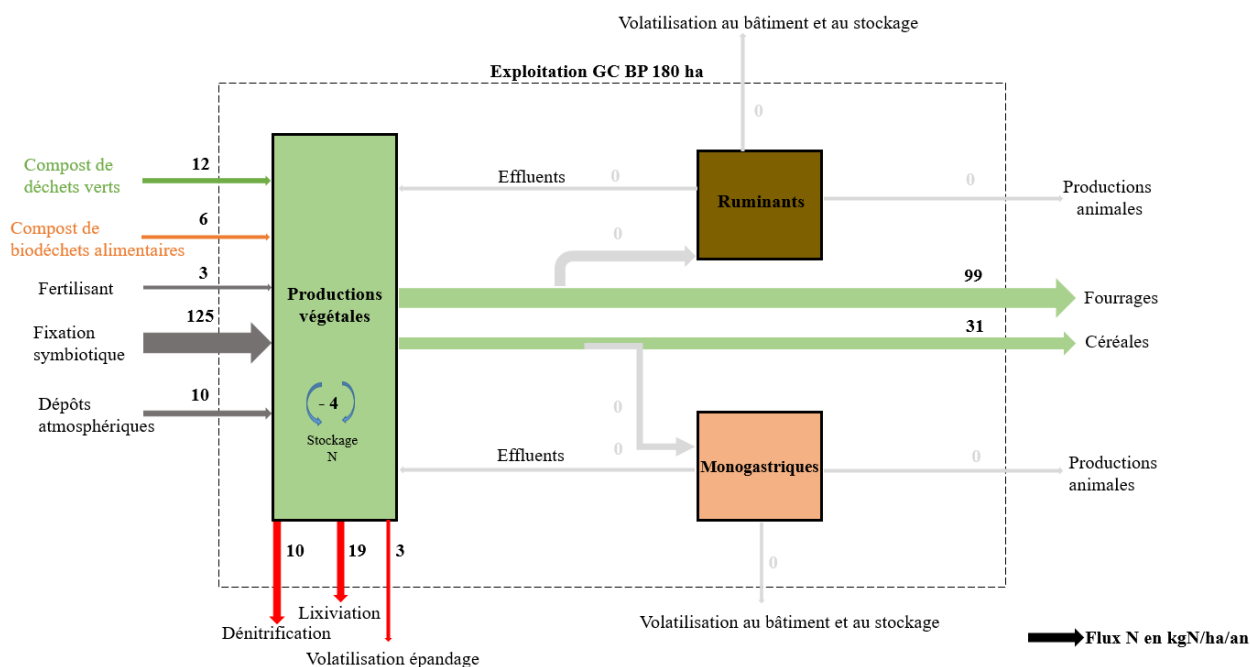


Figure 14 : Exemple 2 : Modélisation du levier "utilisation du compost de biodéchets alimentaires et de déchets verts" au sein de l'exploitation GC BP dans le contexte territorial de l'Île-de-France

<i>Exploitation</i>	<i>Autonomie</i>	<i>Efficienc</i> e	<i>Circularité</i>	<i>Productivité totale</i>	<i>Productivité hors fourrages</i>
<i>GC BP avec levier</i>	98.2 %	83.4 %	5.8 %	129.7 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹	30.8 kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹
<i>Comparaison à l'exploitation de référence</i>	+ 11.8 points	+0.3 points	+5.8 points	0 %	0 %

Tableau 8 : Résultats des indicateurs suite à l'intégration du levier "utilisation du compost de biodéchets alimentaires et de déchets verts" au sein de l'exploitation GC BP dans le contexte territorial de l'Île-de-France et comparaison à l'exploitation de référence (sans levier)

L'utilisation de compost de biodéchets alimentaires et de déchets verts, dans le contexte de l'Île-de-France (Figure 14), permet à l'exploitation d'être autonome en azote à 98.2 % (Tableau 8). L'efficacité est améliorée très sensiblement avec une hausse de 0.3 points puisque l'apport de compost conduit à des pertes par volatilisation à l'épandage plus faibles que l'apport de fertilisants initialement importés dans l'exploitation de référence. L'utilisation des ressources du territoire permet d'augmenter la circularité de 5.8 points. Enfin, ce levier n'agit pas sur la productivité de l'exploitation.

Les résultats de l'intégration de l'ensemble des leviers sur les indicateurs, à l'échelle du territoire et de l'exploitation sont présentés respectivement dans les deux parties suivantes et sont exprimés en gains par rapport aux exploitations de référence.

4.3.2. Résultats de l'intégration des leviers applicables à l'échelle du territoire

D'après la Figure 15, qui illustre les impacts de l'intégration des leviers à l'échelle territoriale dans les trois exploitations sur les indicateurs d'autonomie, d'efficacité et de circularité, on remarque que le facteur le plus influent est le territoire. En effet, pour un même levier, les gains sont les plus faibles dans la Vienne, alors qu'ils peuvent être jusqu'à 10 fois plus élevés en Île-de-France. Ce phénomène peut facilement s'expliquer par la disponibilité des ressources non agricoles, qui sont plus abondantes dans un territoire à forte densité de population, par rapport à un territoire à faible densité comme la Vienne. Cette observation est confirmée par le test statistique ANOVA, qui montre un impact significatif du territoire sur la variation en autonomie (p-value de 1.4×10^{-4}), sur la variation en circularité (p-value de 9.7×10^{-3}) et sur la variation en efficacité (p-value de 6.9×10^{-3}). Il y a également un impact significatif de l'exploitation sur la variation en circularité, qui peut s'expliquer par les caractéristiques spécifiques de chaque exploitation. Par exemple, l'impact est moindre sur la circularité de l'exploitation VL qui a déjà une circularité élevée (51,2%) du fait des échanges de fumier et de fourrages/concentrés entre la production végétale et animale, ce qui n'est pas le cas dans les deux autres exploitations spécialisées.

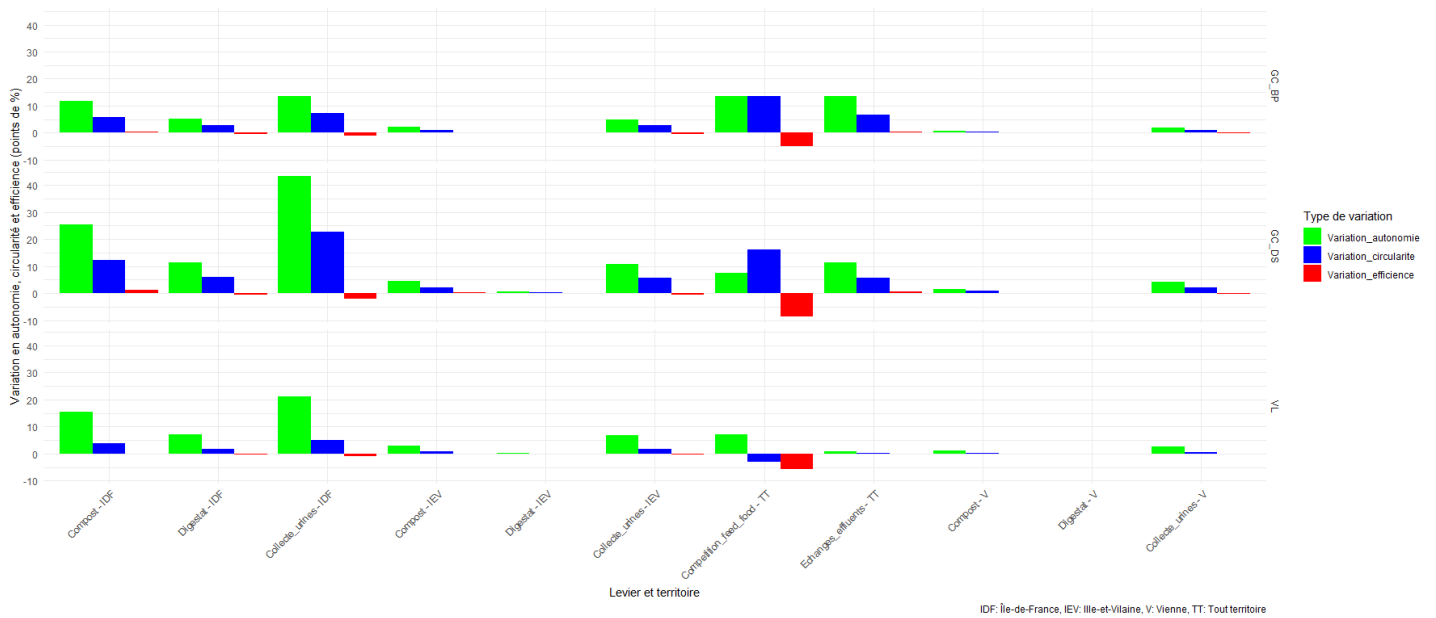


Figure 15 : Variation en autonomie, circularité et efficacité des 3 exploitations placées dans les 3 contextes territoriaux suite à l'intégration des leviers à l'échelle territoriale

Au-delà des territoires, nous constatons que certains leviers, comme la collecte des urines, ont un impact plus marqué sur les différentes variables par rapport à des leviers nécessitant des ressources plus rares sur le territoire, comme le digestat de biodéchets alimentaires. Nous pouvons également remarquer que, dans la grande majorité des cas, l'intégration de ces leviers n'affecte que très peu l'efficacité des exploitations. À l'exception du levier « compétition feed-food », les autres n'impliquent aucun changement structurel au sein de l'exploitation. Ils se contentent de remplacer une entrée initialement issue de l'agriculture conventionnelle ou d'un territoire extérieur à notre étude, par une entrée issue de l'agriculture AB et/ou issue de l'un des 3 territoires étudiés. Dans le cas du levier sur la réduction de la compétition feed-food, on insère un élevage de ruminants et un élevage de monogastriques conformément au levier « polyculture-polyélevage » applicable à l'échelle de l'exploitation dans chacune des fermes, mais en réduisant de 20 % l'élevage de ruminants. Bien que cet ajout conduise à une nouvelle sortie en production animale, elle diminue l'efficacité globale du système puisque de nombreuses ressources, auparavant exportées, sont désormais allouées à la production animale. Ainsi, l'intégration d'animaux conduit à une réduction de l'efficacité du système, que ce soit pour les 2 exploitations spécialisées en grandes cultures, ou pour l'exploitation VL où seul l'atelier de monogastriques a été rajouté. De plus, le fourrage, qui n'est plus utilisé due à la diminution du cheptel, est restitué au sol pour fertiliser les cultures, et n'est plus exporté, contribuant également à la diminution de l'efficacité puisque nous avons pris en compte la sortie en fourrages dans le calcul de l'efficacité. Enfin, l'allocation de 30% des céréales, considérées comme non conformes pour l'alimentation humaine, à l'élevage de monogastriques a également pour impact de réduire également l'efficacité.

En Île-de-France et en Ille-et-Vilaine, l'utilisation des urines humaines et du digestat de biodéchets alimentaires tend à réduire l'efficacité des exploitations. En remplaçant les effluents

traditionnels par des urines ou du digestat, on observe une augmentation de la volatilisation à l'épandage, car ces substituts ont des facteurs d'émission plus élevés que les effluents initialement utilisés (Annexe 6). Ainsi, pour satisfaire les besoins des cultures, une quantité plus importante de ces produits doit être importée, réduisant l'efficacité globale des exploitations.

Les échanges d'effluents, quant-à-eux, permettent aux deux exploitations de grandes cultures de gagner en circularité, en autonomie, et légèrement en efficacité puisque les deux exploitations GC exportent beaucoup de céréales et/ou de fourrages, et donc récupèrent un flux d'effluents important. Cette hausse n'est pas présente chez l'exploitation VL qui n'exporte que très peu de productions végétales et qui obtient donc une quantité très faible d'effluents en échange.

Ainsi, le territoire est le principal facteur guidant les gains en autonomie et en circularité. Les gains les plus significatifs se constatent en Île-de-France, où les ressources (biodéchets, urines...) sont les plus abondantes. En termes d'efficacité, le levier ayant le plus d'impact négatif sur l'efficacité et la productivité des exploitations est l'adaptation de l'élevage pour limiter la compétition feed-food. C'est également le seul levier qui impacte la productivité. Les autres leviers augmentent l'autonomie et la circularité des exploitations sans affecter leur efficacité ou productivité. Toutefois, l'utilisation des urines et de digestat tend également à réduire l'efficacité des systèmes, car une plus grande quantité d'azote doit être importée pour combler les besoins des cultures en raison des pertes par volatilisation, plus élevées que celles des effluents importés initialement.

4.3.3. Résultats de l'intégration des leviers applicables à l'échelle de l'exploitation

D'après la Figure 16, qui représente l'impact de l'intégration des leviers à l'échelle exploitation sur les trois indicateurs, on observe davantage de similarités entre les deux exploitations en grandes cultures bien que l'exploitation n'ait pas un impact significatif sur les variations en autonomie (p-value de 0.71), en circularité (p-value de 0.462) et en efficacité (p-value de 0.852) d'après le test ANOVA. On remarque sur la Figure 16 que l'impact de l'intégration des leviers à l'échelle de l'exploitation a un impact plus important sur l'efficacité que celle des leviers à l'échelle territoriale.

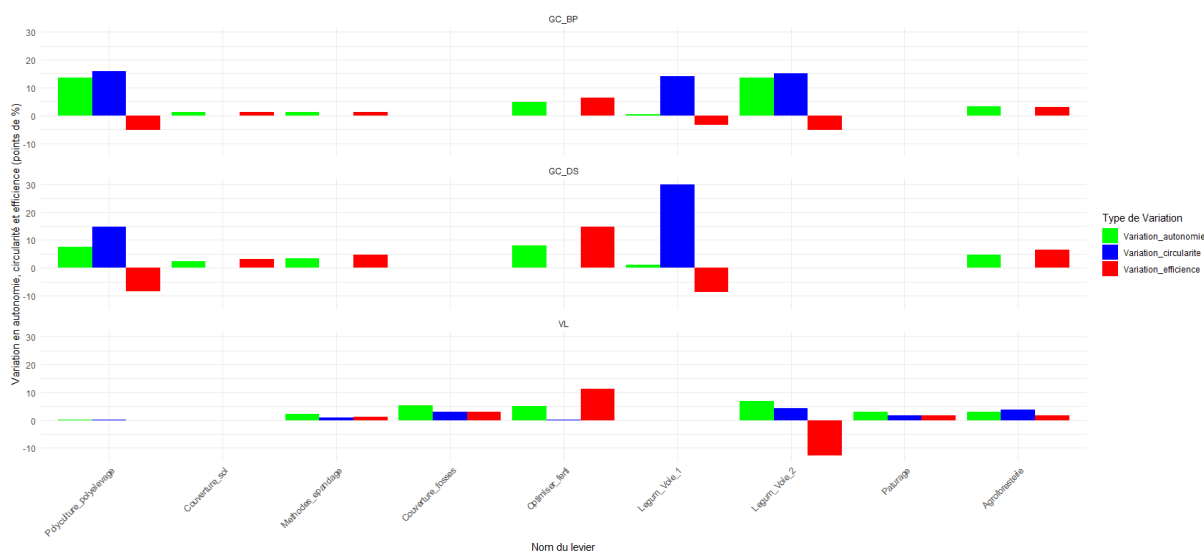


Figure 16 : Variation en autonomie, circularité et efficacité des 3 exploitations suite à l'intégration des leviers à l'échelle de l'exploitation

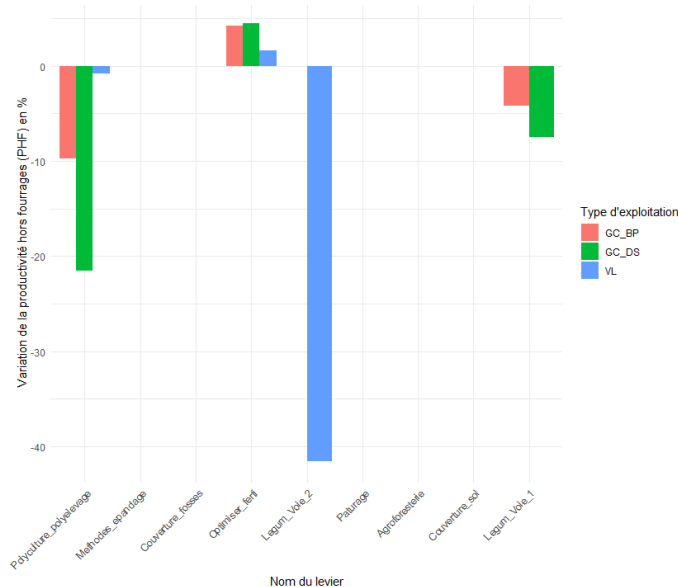


Figure 17 : Variation en productivité hors fourrages (PHF) suite à l'intégration des leviers à l'échelle de l'exploitation

Si l'intégration du modèle de polyculture-polyélevage augmente la circularité, l'autonomie et diminue l'efficacité et la productivité (Figure 17) chez les deux exploitations GC, il n'a pratiquement aucun effet sur l'exploitation VL puisque l'élevage ruminants est déjà présent au sein de cette exploitation. L'augmentation de la circularité et de l'autonomie au sein des deux exploitations GC s'explique par la présence de nouveaux flux internes entre les composantes animale et végétale, tandis que la diminution de la productivité et de l'efficacité peut s'expliquer par l'allocation des ressources végétales aux animaux, qui auparavant été exportées, ainsi que par l'augmentation des pertes.

Le levier sur la couverture du sol via l'intégration de CIPAN a un faible effet sur les deux exploitations GC, et n'a pas pu être intégré à l'exploitation VL dans la rotation. En réduisant les pertes d'azote par lixiviation, l'efficacité et l'autonomie sont améliorées. Cette double augmentation en autonomie et en efficacité se retrouve dans tous les leviers qui permettent de réduire les pertes en azote (couverture du sol, méthodes d'épandage, agroforesterie...). Pour l'exploitation VL, ces leviers de réduction des pertes, auxquels nous pouvons ajouter l'augmentation du temps de pâturage et la couverture des fosses de stockage des effluents, permettent également d'augmenter la circularité puisque c'est la seule exploitation dont la circularité de départ n'est pas nulle (en minimisant les pertes, les flux totaux diminuent donc la circularité augmente). Le levier portant sur l'optimisation de la fertilisation permet d'augmenter l'efficacité et la productivité des 3 exploitations, puisque nous avons considéré une baisse des pertes et une augmentation des rendements des cultures fertilisées.

Le levier « legum_voie1 » qui consiste à remplacer les CIPAN par des CIVE n'a pas pu être appliqué dans l'exploitation VL, et a conduit à une forte augmentation de la circularité, mais à un gain très faible d'autonomie et à une baisse de l'efficacité dans les deux exploitations en grandes cultures. En effet, en remplaçant les CIPAN par des CIVE, l'exportation de ces CIVE dans une unité de méthanisation diminue la quantité d'azote initialement présente dans la composante végétale. En restituant le digestat issu de la méthanisation des CIVE, une quantité d'azote moins importante revient au système en raison des pertes qui ont eu lieu au stockage du digestat et à l'épandage. Mais, l'augmentation de la fixation symbiotique permise par les CIVE permet de compenser cet écart. Néanmoins, le gain d'autonomie reste très limité et l'efficacité est diminuée bien que la circularité soit fortement augmentée. Par contre, la méthanisation des légumineuses fourragères « legum_voie_2 » permet une augmentation de l'autonomie plus importante puisque le fourrage était soit exporté soit donné aux animaux, mais provoque toujours une baisse de l'efficacité et de la productivité totale chez les deux exploitations GC BP et VL où le levier a pu être intégré en raison de leur production de fourrages. Chez l'exploitation VL, cette baisse de l'efficacité s'accompagne par une baisse de la productivité hors fourrages (Figure 17) puisque la réduction de l'élevage de 40% diminue la sortie de productions animales, tandis que la PHF n'est pas modifiée dans l'exploitation GC BP.

Ainsi, le facteur exploitation n'a pas d'impact significatif sur les gains en autonomie, en circularité et en efficacité. Les leviers applicables à l'échelle de l'exploitation ont plus d'impact sur l'efficacité, avec un impact positif constaté pour les leviers de réduction des pertes, et un impact négatif pour les leviers impliquant la méthanisation ou l'introduction de l'élevage, bien qu'il s'agisse des leviers permettant le plus fort gain en autonomie.

En conclusion, grâce à l'intégration de ces leviers sur des cas concrets, nous avons pu mettre en évidence leurs impacts sur les différents indicateurs appliqués aux exploitations types. Si dans certains cas la circularité semble augmenter avec l'autonomie, ce n'est pas toujours le cas. L'efficacité, quant-

à-elle, semble être reliée dans certains cas à l'autonomie, mais pas systématiquement. Ainsi, suite à ces observations, il serait intéressant d'étudier les relations entre les différents indicateurs (autonomie, circularité, efficacité, productivité) pour faire ressortir les situations où les indicateurs évoluent ensemble, et inversement.

4.4. Scénarios élaborés avec la combinaison de plusieurs leviers

Avant d'étudier les relations entre les différents indicateurs, une idée a émergé lors des ateliers réalisés auprès du consortium Organic4Organic : celle de combiner plusieurs leviers pour maximiser l'impact sur l'autonomie azotée des fermes. Ainsi, suite à cette idée, nous avons choisi de réaliser 3 scénarios, 1 scénario par exploitation, en intégrant à la fois des leviers à l'échelle de l'exploitation et du territoire, et en replaçant chaque exploitation dans leur contexte territorial d'origine. Les 3 scénarios (S1, S2 et S3) sont représentés sur la Figure 18 et sont disponibles sous forme de fichier Excel (Annexe 4).

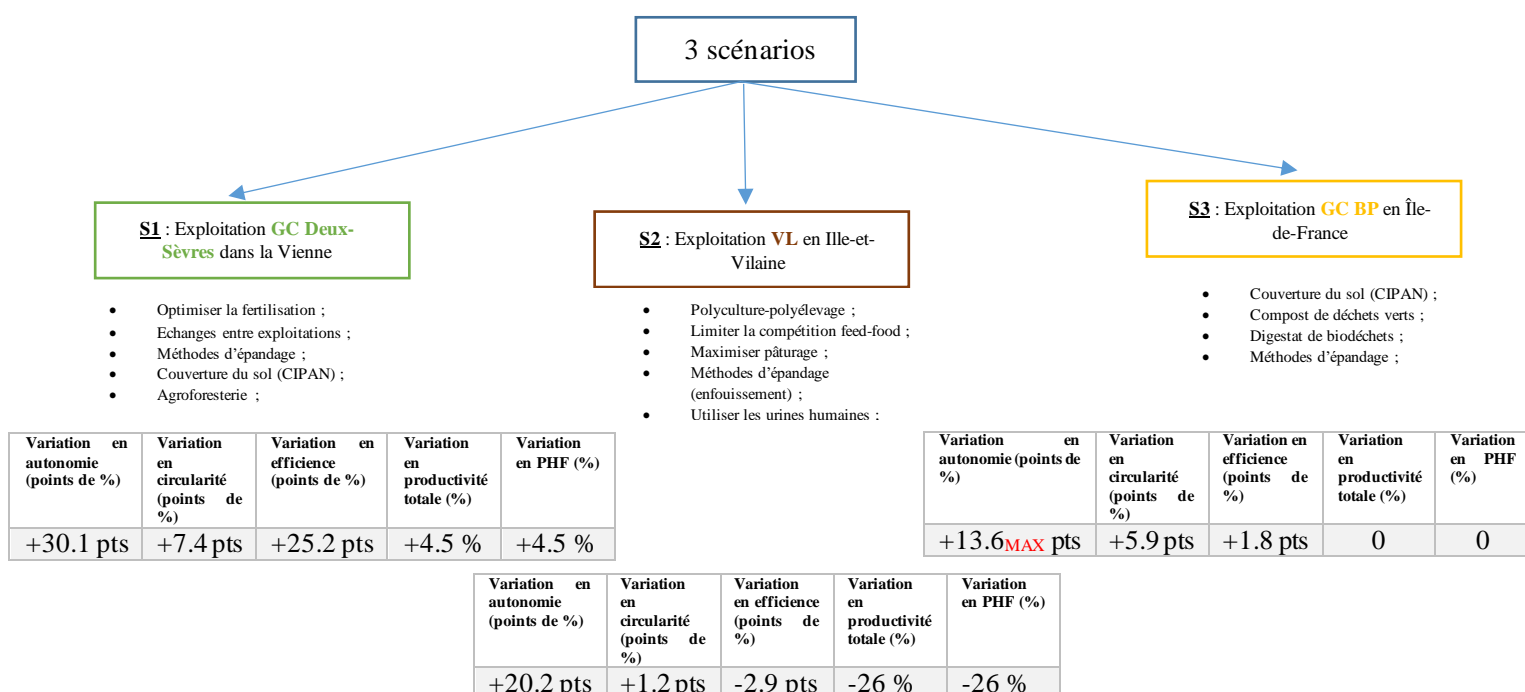


Figure 18 : Présentation des 3 scénarios de combinaisons de leviers pour augmenter l'autonomie azotée des exploitations AB et de leurs indicateurs

○ Scénario 1 : Combinaison de leviers au sein de l'exploitation GC DS dans la Vienne

Ce scénario a été construit grâce à la combinaison de 5 leviers, dont 4 leviers à l'échelle de l'exploitation et un seul à l'échelle territoriale. Prioriser les leviers à l'échelle de l'exploitation semblait être le choix le plus pertinent ici, étant donné que les ressources issues des activités humaines ne sont pas abondantes dans la Vienne. L'ensemble des leviers sélectionnés à l'échelle de l'exploitation

contribuent à la réduction des pertes en azote, soit en diminuant le taux de lixiviation, soit en diminuant le taux de volatilisation. Nous avons vu précédemment que ces leviers permettent à la fois de gagner en autonomie et en efficacité. De plus, l'exploitation GC DS est celle qui dépend le plus de l'import d'effluents extérieurs. Il était donc intéressant d'intégrer le levier permettant les échanges de flux secondaires entre exploitations AB spécialisées, pour qu'elle puisse se fournir localement en cédant sa part de céréales non conforme pour l'alimentation humaine. L'enfouissement de ces produits est alors très important pour diminuer le risque de volatilisation lors de l'épandage. En optimisant ses pratiques de fertilisation, l'exploitation peut également diminuer ses pertes et augmenter ses rendements. Enfin, les périodes d'interculture non couvertes permettent d'insérer des CIPAN pour capter l'azote résiduel et empêcher sa lixiviation, de la même façon que l'intégration de pratiques agroforestières.

Ainsi, en augmentant les rendements grâce au levier sur l'optimisation de la fertilisation, nous pouvons exporter plus de céréales à une exploitation voisine, et recevoir en retour plus d'effluents pour fertiliser les cultures, ce qui augmente l'autonomie. Les nutriments contenus dans ces effluents sont mieux utilisés grâce à l'intégration de pratiques de réduction des pertes. Ce scénario permet de gagner sur tous les points : on constate une augmentation de 30.1 points de pourcentage par rapport à l'exploitation de référence et un passage d'une circularité nulle à une circularité de 7.4 % grâce aux échanges entre exploitations. L'efficacité augmente également de manière importante (+25.2 points) grâce à la combinaison de leviers permettant la réduction des pertes. Dans ce scénario, la combinaison de leviers permet d'agrèger les effets positifs sur l'ensemble des indicateurs. L'exploitation devient autonome en azote à 86.6 %.

○ **Scénario 2** : Combinaison de leviers au sein de l'exploitation VL en Ille-et-Vilaine

Ce scénario a également été construit grâce à la combinaison de 5 leviers, en intégrant 3 leviers à l'échelle de l'exploitation et 2 à l'échelle du territoire. Ce scénario repart du cas en polyculture-polyélevage avec un élevage ruminant et un élevage monogastrique, mais en considérant une baisse du cheptel ruminant afin de diminuer les ressources destinées à l'alimentation animale plutôt qu'à l'alimentation humaine (levier permettant de limiter la compétition feed-food). Cette préoccupation est notamment beaucoup ressortie lors des ateliers du consortium, bien qu'elle contribue à la diminution de l'efficacité et de la circularité de l'exploitation. L'augmentation du temps de pâturage des animaux permet de diminuer les pertes d'azote par volatilisation au bâtiment, au stockage et à l'épandage. L'enfouissement des produits épandus hors prairie permet également de diminuer ces pertes. Enfin, pour bénéficier de l'avantage territorial, on peut imaginer qu'une collecte des urines soit réalisée dans le département de l'Ille-et-Vilaine, augmentant l'autonomie et la circularité mais diminuant l'efficacité.

Ce scénario met en évidence que des réductions de cheptels animaux entraînent une baisse de l'efficacité et de la productivité de l'exploitation si aucun autre changement structurel n'est réalisé (ex :

restructuration des assolements). L'augmentation en autonomie (+ 20.2 points de pourcentage) et en circularité (+ 1.2 points de pourcentage) est constatée grâce à l'intégration des autres leviers : urines, enfouissement et pâturage. L'exploitation VL devient autonome en azote à 81.6 %, mais l'atelier végétal est autonome à 100 %.

- **Scénario 3** : Combinaison de leviers au sein de l'exploitation GC BP en Île-de-France

Ce dernier scénario a été réalisé en combinant 4 leviers, 2 à l'échelle de l'exploitation et 2 à l'échelle du territoire. Les leviers les plus efficaces en termes d'autonomie vis-à-vis de cette exploitation tels que la collecte des urines, ou encore les échanges de flux secondaires entre exploitations n'ont pas été intégrés à ce scénario puisqu'ils permettaient, à eux seuls, de combler l'intégralité des besoins des cultures. Il était donc inutile de les combiner à d'autres leviers. Ainsi, pour tout de même profiter des avantages d'un territoire à forte densité de population, l'utilisation de digestat de biodéchets alimentaires et de compost de déchets verts a été sélectionné ici, ce qui a contribué à augmenter la circularité, l'autonomie et dans une moindre mesure l'efficacité de l'exploitation. Nous avons fait le choix de combiner le levier sur le compost de déchets verts et sur le digestat de biodéchets alimentaires, afin d'obtenir un fertilisant et un amendement pour les cultures. L'enfouissement de ces produits permet de diminuer la volatilisation et ainsi d'augmenter l'autonomie et l'efficacité. Enfin, il était également possible d'intégrer des CIPAN pour protéger le sol en période d'interculture longue pour réduire le risque de pertes.

L'ensemble de ces leviers permet à l'exploitation d'être autonome à 100 % en azote, de gagner 5.9 points en circularité et 1.8 points en efficacité. Aucun de ces leviers n'impacte la productivité de l'exploitation.

Ces 3 scénarios permettent de gagner significativement en autonomie mais ont des impacts différents sur l'efficacité et la productivité des exploitations. Le premier, qui combine des leviers de réduction de pertes, d'optimisation des pratiques et d'échanges entre exploitations, permet d'améliorer nettement ces deux indicateurs. Au contraire, le second scénario, construit autour d'une réduction de l'élevage et de l'utilisation des urines humaines, réduit significativement la productivité et l'efficacité, malgré l'insertion de leviers permettant de réduire les pertes. Ce changement structurel, vis-à-vis de l'élevage a donc un impact plus important que l'insertion de pratiques permettant de réduire les pertes. Enfin, le dernier scénario, construit autour de leviers de réduction de pertes et d'importation des ressources du territoire (compost de déchets verts et digestat de biodéchets alimentaires), a un impact nul sur la productivité et l'efficacité. L'augmentation des pertes à l'épandage due à l'utilisation de digestat est donc compensée par la réduction de ces pertes via l'utilisation de compost de déchets verts, moins volatile, et grâce à l'enfouissement ainsi qu'à la couverture des sols. Ainsi, en combinant des

leviers qui ont des effets distincts sur les flux de l'exploitation, on parvient à maximiser l'autonomie tout en neutralisant les impacts négatifs de certains d'entre eux.

4.5. Impact de la mise en place des leviers sur la qualité de vie au travail des exploitants agricoles (QVT)

La liste d'indicateurs choisie n'est pas exhaustive pour quantifier les impacts de l'intégration de ces leviers. En effet, la dimension sociale n'a pas encore été abordée, et il serait pertinent d'examiner l'effet de ces leviers sur la qualité de vie au travail (QVT) des exploitants agricoles AB et sur le travail en agriculture plus généralement. Par exemple, il serait intéressant d'étudier l'impact de la mise en œuvre des scénarios précédemment mentionnés sur l'organisation, le temps de travail, les besoins en expertise, et d'autres aspects, pour les exploitants « fictifs » des exploitations GC DS, VL, et GC BP.

Avec la mise en place des leviers du scénario 1 (optimiser la fertilisation, enfouir les engrais, intégrer des CIPAN, de l'agroforesterie et réaliser des échanges entre exploitations) au sein de l'exploitation céréalière GC DS, de nombreux aspects peuvent être relevés. Tout d'abord, l'optimisation de la fertilisation requiert une planification plus rigoureuse, par exemple pour réaliser des apports au plus proche des besoins des cultures, mais également l'intégration de nouvelles technologies et pratiques telles que l'utilisation de l'agriculture de précision ou le recours aux analyses de sol et des produits épandus. À court terme, cette approche pourrait augmenter le temps de travail, en considérant le temps à consacrer à l'apprentissage et à la mise en œuvre de ces pratiques. Néanmoins, sur le long terme, elle pourrait le réduire en limitant les interventions inutiles et en améliorant l'efficacité des apports. Ensuite, l'enfouissement des engrais épandus nécessite une intervention mécanique supplémentaire donc un temps de travail plus long, mais peut également contribuer à une utilisation plus efficace des engrais, pouvant réduire potentiellement la fréquence des applications nécessaires. L'intégration de CIPAN nécessite une planification supplémentaire et un ajustement des calendriers de culture. De plus, le semis ainsi que la gestion des CIPAN conduit à une augmentation de la charge de travail. Une connaissance est requise sur les rotations culturales et le choix d'espèces adaptées aux conditions pédoclimatiques locales. L'introduction de l'agroforesterie nécessite une reconfiguration des espaces de travail ainsi qu'une révision des pratiques traditionnelles. À court terme, la plantation et l'entretien des arbres les premières années augmentent la charge de travail, mais la fréquence des interventions diminue avec le temps et nécessitent moins de travail que les cultures annuelles, ce qui pourrait réduire cette charge. Néanmoins, des connaissances particulières sont requises sur les interactions entre les arbres et les cultures, sur le choix de l'essence et sur leur organisation spatiale. Enfin, la mise en place d'échanges entre exploitations nécessite une coordination logistique et une bonne entente avec les exploitations voisines. Ce levier peut complexifier la gestion quotidienne, mais contribue aussi à un renforcement des liens communautaires entre exploitants, permettant de réduire l'isolement auquel ils font face. Des

déplacements supplémentaires sont à prévoir, mais l'échange de connaissances et de bonnes pratiques peut être bénéfique pour les deux parties. De plus, ces échanges permettent de bénéficier des côtés positifs et des synergies des systèmes en polyculture-élevage avec un accès à une diversité de ressources importante, sans être confrontés aux fortes contraintes en termes de ressources, d'infrastructures et de charge de travail souvent présentes dans ces systèmes.

La mise en place du scénario 2 (introduire un modèle en polyculture-polyélevage, limiter la compétition feed-food, augmenter le temps de pâturage, enfouir les engrais et utiliser les urines humaines) dans l'exploitation VL située en Ille-et-Vilaine implique également de nombreux changements. L'introduction d'un élevage de monogastriques implique une diversification des tâches et des compétences. La gestion de deux systèmes d'élevage (ruminants et monogastriques) nécessite une organisation plus complexe en matière d'alimentation, de gestion des effluents et de soins à apporter. La réduction de 20 % de l'élevage ruminants nécessite également une réorganisation majeure et une redéfinition des activités agricoles. Finalement, ces deux leviers pourraient se compenser. De plus, l'augmentation du temps de pâturage des animaux simplifie la gestion de l'alimentation, mais cela requiert une bonne gestion des pâturages pour maintenir la qualité des prairies. L'enfouissement des engrais a déjà été abordé précédemment, et n'est pas possible sur les prairies. Enfin, concernant l'utilisation des urines humaines, les exploitants doivent mettre en place un système de stockage approprié, ce qui pourrait représenter un investissement important. De même, les exploitants doivent être attentifs à la planification des épandages, en les apportant au bon moment et en réalisant des ajustements selon le besoin des cultures et des conditions météorologiques. De plus, les exploitants devront se confronter aux aspects réglementaires et sanitaires, ce qui pourrait ajouter des contraintes administratives et nécessiter une veille réglementaire régulière. Cela peut également impliquer de suivre des protocoles stricts de traitement avant l'épandage et d'adopter des pratiques pour minimiser les risques de contamination.

Enfin, la mise en place du scénario 3 (intégration de CIPAN, utilisation de compost de déchets verts, de digestat de biodéchets alimentaires et enfouissement des engrais épandus) au sein de l'exploitation GC BP située dans le Bassin Parisien nécessite une logistique spécifique, notamment pour l'acquisition de compost, son transport et son épandage sur les cultures. De la même façon, l'utilisation de digestats de biodéchets alimentaires nécessite une gestion précise pour leur acquisition et leur stockage. Lorsqu'il est sous forme liquide, il nécessite du matériel adapté pour le stockage et l'épandage afin d'éviter les pertes. De plus, les exploitants doivent développer des connaissances sur le profil en nutriments du digestat et du compost qu'ils utilisent afin d'apporter une quantité de nutriments adaptée aux cultures. En améliorant la fertilité des sols, ces apports peuvent conduire à des augmentations de rendement sur le long terme. Ces pratiques sont généralement bien perçues par les consommateurs, en raison de leurs bénéfices environnementaux à travers le recyclage de déchets, même si certains peuvent être réticents à l'idée d'utiliser des biodéchets alimentaires. Une communication claire et transparente sur les pratiques

agricoles utilisées et leurs avantages pour la durabilité pourrait être nécessaire pour garantir l'acceptabilité sociale. L'intégration de CIPAN et l'enfouissement des produits épandus ont été discutés précédemment.

Ainsi, si la mise en place de ces 3 scénarios est coûteuse en temps et en énergie, elle s'avère tout de même bénéfique sur le long terme en optimisant les pratiques et en améliorant l'efficacité d'utilisation des nutriments. En effet, bien que la planification soit complexe et nécessite des connaissances spécifiques, l'augmentation de la charge de travail reste généralement temporaire, car l'amélioration de l'efficacité des pratiques peut réduire le nombre d'interventions nécessaires. Les scénarios impliquent donc des défis à court terme pour la qualité de vie au travail des agriculteurs, mais ils offrent des opportunités de travail plus durables et gratifiantes sur le long terme.

4.6. Relations entre l'autonomie et les autres indicateurs : circularité, efficacité et productivité

Enfin, pour évaluer les effets des gains d'autonomie induits par l'ensemble des leviers sur les autres indicateurs, analysons les corrélations entre ces derniers : une augmentation de l'autonomie favorise-t-elle également une meilleure circularité ? Se traduit-elle par une baisse d'efficacité et de productivité ? Cette analyse permettra ainsi d'identifier les synergies potentielles entre les différents indicateurs en fonction des types de leviers utilisés.

4.6.1. Autonomie et circularité

D'après la Figure 19, la relation entre la variation en circularité et la variation en autonomie semble linéaire et positive : lorsque la circularité tend à augmenter, l'autonomie augmente également et inversement. Ceci sous-entend que la circularité, à travers des pratiques permettant un meilleur recyclage des nutriments, contribue de manière favorable à l'autonomie N. C'est le cas de l'ensemble des leviers appartenant au Lot 1, qui regroupe principalement des leviers territoriaux, c'est-à-dire ceux impliquant l'utilisation des ressources du territoire. Aucun changement structurel n'est effectué, seule l'importation des ressources extérieures à l'exploitation est considérée. Mais, ce lot intègre également les leviers de réduction de pertes appliqués à l'exploitation VL puisque c'est la seule exploitation où la circularité initiale n'est pas nulle.

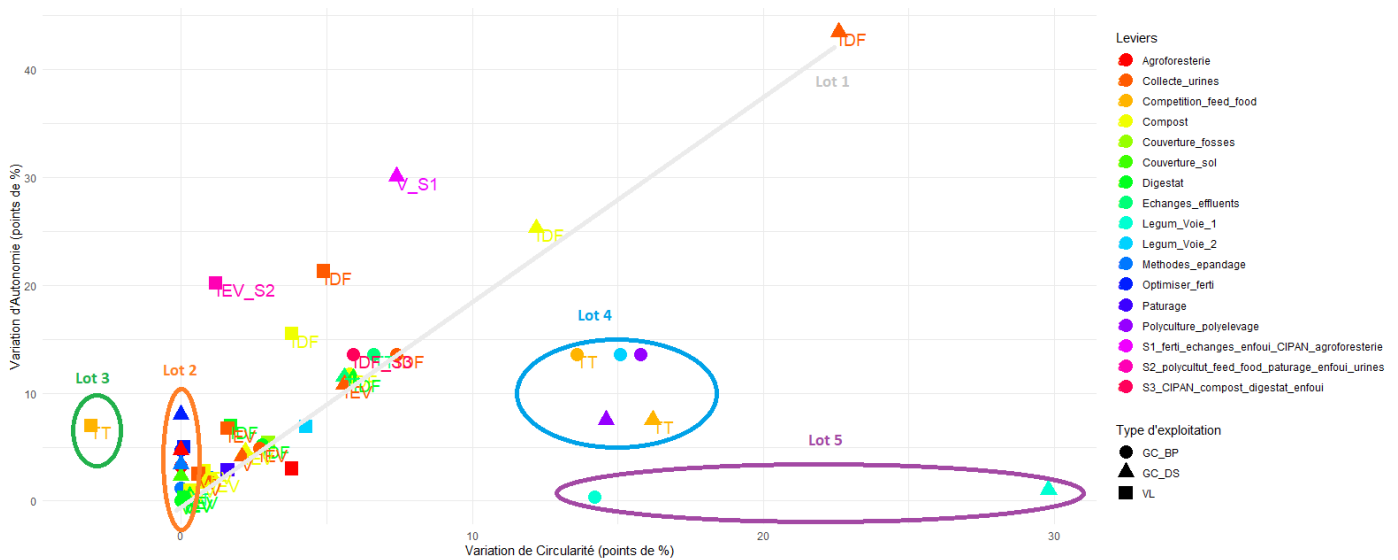


Figure 19 : Variation de l'autonomie en fonction de la variation de circularité

De plus, quelques groupes se distinguent de la tendance générale (**Lot 1**) :

- **Lot 2** : Ce lot regroupe les leviers qui permettent d'augmenter l'autonomie de 0 à 10 points, mais qui n'ont aucun effet sur la circularité. Il regroupe les leviers de réduction des pertes en azote (optimisation de la fertilisation, enfouissement, agroforesterie, couverture des sols...). Ainsi, dans ce groupe, l'augmentation de la circularité est nulle mais l'autonomie augmente grâce à la réduction des pertes. On retrouve majoritairement les exploitations GC dans ce lot, puisque, comme vu précédemment, les leviers de réduction des pertes appliqués à l'exploitation VL permettent un léger gain en circularité ;
- **Lot 3** : Ce lot, construit autour d'un seul levier, est le seul qui permet d'augmenter l'autonomie tout en diminuant la circularité. Il est constitué du levier visant à réduire la compétition feed-food appliqué à l'exploitation VL. Cette diminution de la circularité s'explique par la réduction de l'élevage et donc par la diminution des flux internes, qui étaient plus importants dans l'exploitation de référence. En revanche, l'autonomie augmente puisque la réduction des pertes et la restitution des fourrages au sol, permises par la diminution de l'élevage, permet de conserver davantage d'azote dans le système et de compenser ce surplus en réduisant les intrants importés.
- **Lot 4** : Ce lot est caractérisé par une forte augmentation en circularité (+20-25 points), et une augmentation moyenne en autonomie (+10-15 points). Ce lot regroupe les leviers impliquant de forts changements structurels. En effet, il rassemble les leviers d'insertion de cheptels animaux (levier polyculture-polyélevage, et de réduction de la compétition feed-food) dans les exploitations qui étaient originellement spécialisées en grandes cultures (GC BP et GC DS). L'insertion des élevages de ruminants et de monogastriques permet d'introduire de nouveaux flux internes au sein des exploitations (fourrages, céréales et fumier), et donc d'augmenter la

circularité des exploitations. En parallèle, l'autonomie augmente, car, bien que l'introduction des animaux entraîne une hausse des pertes, le recyclage des flux secondaires, tel que l'utilisation du fumier sur les cultures, permet de réduire l'importation d'intrants extérieurs à l'exploitation. Nous retrouvons également le levier de méthanisation des légumineuses fourragères dans ce lot pour l'exploitation GC BP puisqu'elle produit une part importante de fourrages. La méthanisation de ces fourrages permet d'augmenter significativement les flux internes de l'exploitation et de fertiliser les cultures grâce au digestat, ce qui augmente sa circularité et son autonomie.

- **Lot 5** : Ce lot, basé sur un seul levier, celui de la méthanisation des CIVE, permet une augmentation significative de la circularité mais une très faible augmentation de l'autonomie. En effet, la méthanisation des CIVE augmente les flux internes de l'exploitation, améliorant ainsi sa circularité. Cependant, les pertes durant le processus de méthanisation et à l'épandage du digestat, limitent le gain d'autonomie. En effet, dans le cadre de ce levier, les CIPAN ont été remplacées par des CIVE destinées à la méthanisation. Contrairement aux CIPAN qui restaient dans la composante végétale, l'exportation des CIVE pour la méthanisation retire de l'azote du système végétal. Les pertes lors du stockage et de l'épandage du digestat réduisent la quantité d'azote retournant au système végétal. Cette perte en azote est néanmoins partiellement compensée par l'augmentation de la fixation symbiotique, mais le gain d'autonomie reste très faible.

Ces derniers exemples montrent que, dans la majorité des cas, l'autonomie augmente avec la circularité. La circularité semble donc être l'un des leviers qui permette à une exploitation d'améliorer son autonomie. Néanmoins, ce n'est pas toujours le cas puisque l'intégration de certains leviers a conduit à une augmentation de l'autonomie sans modifier la circularité tandis que d'autres ont permis une augmentation de l'autonomie en baissant la circularité. Enfin, certains engendrent une très forte augmentation de la circularité, alors qu'ils n'augmentent que très peu l'autonomie. Ainsi, ces 2 concepts ne sont pas toujours positivement corrélés.

4.6.2. Autonomie, efficacité et productivité

À présent, nous pouvons nous demander si une augmentation en autonomie signifie nécessairement une diminution en efficacité, ou non.



Figure 20 : Variation de l'efficacité en fonction de la variation de l'autonomie

Dans la Figure 20, nous retrouvons un groupe central, construit autour d'une majorité de leviers territoriaux qui permettent de gagner en autonomie sans trop modifier l'efficacité (Lot 1) puisque les engrais utilisés sont simplement remplacés par d'autres déchets du territoire, ce qui n'impacte pas la quantité d'azote disponible. Néanmoins, certains leviers de ce groupe entraînent une légère diminution de l'efficacité (urines et digestat) puisqu'ils entraînent une augmentation des pertes à l'épandage, ou, à l'inverse, une faible augmentation de l'efficacité due à un substitut moins volatile (compost).

- **Lot 2** : on retrouve à nouveau le groupe de leviers d'optimisation des pratiques agricoles qui permettent d'augmenter l'efficacité et l'autonomie des exploitations à travers la réduction des pertes. Cette tendance semble positive et linéaire ;
- **Lot 3** : ce lot rassemble les leviers qui permettent de gagner en autonomie, mais qui entraînent une baisse en efficacité. Il rassemble les leviers qui entraînent des changements structurels au sein des exploitations : introduction ou réduction de l'élevage et introduction de la méthanisation. Ces leviers permettent d'augmenter l'autonomie grâce à l'introduction de nouveaux flux internes, mais diminuent l'efficacité du fait de l'augmentation des pertes. Ainsi, apporter des changements structurels permet de gagner en autonomie, mais cela se fait au détriment de l'efficacité ;

Ainsi, une augmentation en autonomie n'est pas forcément synonyme d'une diminution en efficacité. Seuls les leviers engendrant des changements structurels tels que l'introduction ou la réduction de l'élevage, ou encore l'insertion de la méthanisation ne conduisent à une baisse importante

de l'efficience. En effet, les leviers territoriaux, qui augmentent fortement l'autonomie dans les territoires à forte densité de population, ont peu d'effets sur l'efficience (les biodéchets les plus volatiles diminuent légèrement l'efficience tandis que les biodéchets les moins volatiles permettent une légère augmentation). Enfin, certains leviers, comme ceux permettant la réduction des pertes, permettent à la fois d'augmenter l'autonomie et d'augmenter l'efficience.

En analysant la variation de la productivité en fonction de l'évolution de l'autonomie, nous constatons les mêmes tendances que celles présentées dans la Figure 20, qui représente la variation de l'efficience en fonction de l'autonomie. En effet, nous retrouvons un premier lot, autour des leviers territoriaux et des leviers de réduction des pertes, qui permet d'augmenter l'autonomie mais qui n'a pas d'effet sur la productivité, un deuxième lot autour du levier de l'optimisation de la fertilisation qui permet d'augmenter les rendements et donc la productivité hors fourrages, et un dernier lot (polyculture-polyélevage, compétition feed-food et méthanisation de CIVE) qui permet de gagner en autonomie mais de perdre en productivité, puisque des flux auparavant exportés sont désormais recyclés dans le système.

4.7. Originalités, limites, pistes d'amélioration du travail et recommandations

L'originalité de ce travail réside dans l'étude et la quantification concrète et pratique de l'effet de leviers souvent mentionnés de manière théorique et générique dans la littérature, appliquées à trois exploitations types. De même, la modélisation des exploitations, avant et après intégration des leviers, permet une meilleure représentation de l'impact de ces leviers sur les fermes agricoles. En effet, des leviers répandus peuvent avoir des effets négligeables, tandis que d'autres, moins populaires, peuvent avoir des effets plus significatifs sur les indicateurs choisis.

Les indicateurs sélectionnés permettent de représenter de manière globale et simplifiée le fonctionnement de l'exploitation d'un point de vue des flux azotés. Les indicateurs de productivité, d'efficience et d'autonomie sont largement utilisés dans la littérature scientifique. Néanmoins, le manque de consensus autour du concept de circularité, rend difficile le choix d'un indicateur. De manière générale, les leviers étudiés impactent la circularité, telle que définie, c'est-à-dire avec la part des flux internes et des flux provenant du territoire dans les flux totaux. Néanmoins, d'après nos résultats, certains leviers ont un impact nul sur la circularité. C'est le cas des leviers de réduction des pertes appliqués aux exploitations GC. En effet, les GC n'ont aucun flux interne, et aucun flux provenant du territoire, donc, d'après cet indicateur, la circularité est nulle. Or, conformément à ce que l'on a vu précédemment, la réduction des pertes est l'une des caractéristiques principales de la circularité. De fait, l'indicateur choisi ne reflète pas entièrement la circularité du système, qui est une propriété très complexe à évaluer.

Par ailleurs, plusieurs limites et pistes d'amélioration ont été identifiées au cours du travail, notamment lors de la présentation des résultats au cours des différents ateliers.

La première remarque, assez générale et également ressortie au cours des ateliers, est qu'il serait intéressant de prendre en compte la dimension temporelle lors de l'application des leviers, en distinguant les effets « courts termes » des effets « longs termes ». Elle est notamment ressortie lorsque l'on discutait des différences entre l'apport d'un compost et l'apport d'un digestat : le digestat sera plus facilement et plus rapidement minéralisé, tandis que le compost aura davantage de bénéfices sur le long terme. Le rendement sera donc impacté de façon différente selon l'échelle de temps considérée, et cet effet temporel n'est pas intégré à notre modélisation.

Ensuite, des remarques plus spécifiques à chaque levier ont été discutées. Par exemple, pour le levier agroforesterie, où l'on a considéré une diminution de 25 % des pertes d'azote par lixiviation, il aurait été possible de considérer également des pertes de productions, étant donné qu'il y a une perte de surface productive, à moins qu'il y ait en parallèle une valorisation du bois.

Concernant le levier sur l'adaptation de l'élevage aux ressources du territoire, où l'on a considéré que 30 % des céréales non conformes de l'exploitation allaient être distribuées aux monogastriques pour leur alimentation, on aurait pu considérer ce flux interne plutôt comme une entrée du territoire, en estimant la quantité de céréales non conformes en fonction de la productivité de chacun des territoires en céréales, ce qui aurait permis une analyse plus contextualisée. De même, les interprétations des résultats liés à l'intégration de ce levier peuvent prêter à confusion. En effet, pour obtenir les variations de chaque indicateur, nous comparons la situation avec levier à la situation de référence. Or, dans le cas des GC, il n'y a pas d'élevage dans l'exploitation, alors que dans la situation finale, il y a un élevage que l'on a volontairement réduit, pour limiter la compétition feed-food. Mais, en comparant cette situation avec la situation de départ, ce n'est pas la réduction de l'élevage que l'on a évaluée, mais bien l'introduction de l'élevage. C'est pourquoi l'on obtient des résultats très différents pour ce levier entre les exploitations GC et l'exploitation VL sur les variations des différents indicateurs.

Dans le levier préconisant de réaliser des échanges de flux secondaires entre exploitations AB spécialisées du territoire, nous avons supposé que la totalité des effluents d'élevage des ruminants allaient être donnés à l'exploitation de référence. Or, nous n'avons pas pris en compte le pâturage des animaux, et donc l'azote excrété directement au champ. Nous avons donc surestimé la quantité d'azote provenant des effluents d'une exploitation de ruminants qui revient à l'exploitation de référence.

Pour l'ensemble des leviers ayant recours à l'utilisation des ressources du territoire, nous avons considéré qu'elles étaient uniformément réparties sur la SAU totale du territoire. Or, dans les faits, ce n'est pas forcément réalisable. Par exemple, les apports de compost sont souvent concentrés aux alentours des plateformes de compostage, généralement situés à proximité des villes, ce qui limite leur utilisation sur certaines parties du territoire.

Enfin, une limite majeure à ce travail, est que nous n'avons pas pris en compte la réglementation AB concernant les produits épandables ou non. Nous avons envisagé divers leviers sans nous soucier de leur conformité à la réglementation. L'hypothèse sous-jacente est qu'il est nécessaire de rechercher et d'évaluer le potentiel de sources organiques alternatives pour satisfaire les besoins en azote de l'agriculture biologique et ainsi soutenir son développement, en lien avec les diverses stratégies adoptées par les pouvoirs publics.

Ainsi, dans la continuité de ce travail, je recommanderais à l'entreprise d'étudier, spécifiquement pour chacun des leviers, la réglementation de l'AB pour analyser leur faisabilité actuelle et future. Pour cela, il serait pertinent de consulter des acteurs de la filière AB, ce qui permettrait d'identifier clairement les obstacles à leur mise en œuvre. Par exemple, l'adoption de l'économie circulaire se heurte à divers défis, qu'ils soient d'ordre réglementaire, logistique ou géographique avec la dispersion des exploitations sur le territoire. S'ajoutent à cela l'acceptation limitée par les consommateurs, le besoin de développer et de diffuser des technologies adaptées, ainsi que les incertitudes concernant les investissements et les incitations économiques du côté des exploitants (Borrello *et al.*, 2016). Cette démarche favoriserait non seulement l'avancée de la réflexion, mais aussi la construction de pistes de recherche pour déterminer si ces leviers sont nuisibles ou bénéfiques vis-à-vis du développement de l'agriculture biologique. Dans une démarche plus participative, regrouper l'ensemble des parties prenantes (agriculteurs, consommateurs, distributeurs, pouvoirs publics...) et organiser des ateliers de co-construction sur le même modèle que ceux réalisés dans le cadre du consortium, pourrait aider à identifier des solutions adaptées aux besoins et contraintes spécifiques de chacun, tout en assurant une meilleure acceptation et adoption des leviers proposés.

De même, il serait intéressant, pour poursuivre ce travail, d'étudier l'impact de l'intégration de ces leviers sur d'autres nutriments tels que le carbone, le potassium ou encore le phosphore. Il est plus pertinent de réaliser des études multicritères pour améliorer l'évaluation de l'impact et d'adopter, consécutivement, de bonnes stratégies de gestion (Alvanitakis *et al.*, 2024).

5. Conclusion

En conclusion, les exploitations en agriculture biologique peuvent emprunter plusieurs voies, souvent complémentaires, pour renforcer leur autonomie en azote. Ces voies ont des impacts divers sur les indicateurs étudiés, et leur combinaison peut maximiser les performances des exploitations. Le premier axe d'amélioration repose sur la mobilisation des ressources territoriales. Ces leviers conduisent à une augmentation de la circularité, et ne modifient que très légèrement l'efficacité en fonction des ressources utilisées et de leur potentiel de volatilisation. Le deuxième chemin, permettant d'augmenter

l'efficacité pour toutes les exploitations et la circularité dans les exploitations où cet indice n'est pas nul, consiste à mettre en place des pratiques de réduction des pertes. Enfin, le dernier chemin, et le plus radical, implique des changements structurels profonds tels que l'introduction de l'élevage dans les exploitations spécialisées, la réduction de l'élevage ou encore l'introduction de la méthanisation. Bien que ces pratiques augmentent significativement la circularité, elles peuvent entraîner, comme observé dans notre étude, une baisse notable de l'efficacité selon le type d'exploitation initial. Ainsi, la combinaison de leviers, à la fois à l'échelle de l'exploitation et du territoire, permet de compenser les effets des uns et des autres : les leviers territoriaux, qui permettent à une exploitation de gagner en autonomie et en circularité, peuvent être facilement combinés avec des leviers d'optimisation de pratiques à l'échelle de l'exploitation, qui permettent d'augmenter son efficacité ou de compenser la perte d'efficacité liée à certains autres leviers, comme ceux impliquant des changements structurels. Ces différents chemins offrent donc aux exploitations des leviers diversifiés pour améliorer leur autonomie en azote, en tenant compte des spécificités de chaque système et des territoires, et en ayant une vision claire de l'impact de chacun de ces leviers sur les performances globales de l'exploitation.

Enfin, tout au long de ce travail, j'ai pu mettre en pratique plusieurs principes éthiques fondamentaux de l'ingénieur : la créativité, la transparence et la responsabilité. En effet, j'ai mobilisé la créativité en réfléchissant à des leviers adaptés aux exploitations et innovants, tout en restant transparente dans la méthodologie adoptée et l'analyse des résultats, en exposant clairement les impacts de l'intégration de ces leviers, notamment d'un point de vue social. Enfin, la responsabilité a guidé mes choix, en sélectionnant des leviers qui sont à la fois respectueux de l'environnement et alignés sur les objectifs de durabilité à travers la réduction des pertes et le recyclage de déchets organiques. Ce travail illustre ainsi un engagement profond envers une ingénierie éthique et responsable, au service d'une agriculture durable.

Bibliographie

AGRO TRANSFERT, 2016. Leviers mobilisables pour la gestion de l'azote en agriculture biologique. [en ligne]. 2016. [Consulté le 20 février 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2016/02/Fiche-cycle-de-lazote-fev-2018.pdf>

ALVANITAKIS, Manon, KLEINPETER, Vivien, VIGNE, Mathieu, BENOIST, Anthony et VAYSSIÈRES, Jonathan, 2024. A substance flow analysis to assess the potential benefits of livestock based circularity for nutrient use efficiency and carbon return to soils in the agro-food-waste system of a tropical island. *Agricultural Systems*. 1 août 2024. Vol. 219, pp. 104046. DOI 10.1016/j.agsy.2024.104046.

ARVALIS, 2017. Interculture - Quelle est l'efficacité des couverts intermédiaires pièges à nitrate ? ARVALIS [en ligne]. 14 septembre 2017. [Consulté le 27 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/interculture-quelle-est-lefficacite-des-couverts-intermediaires-pieges-nitrate>

AUBERT, Pierre-Marie et POUX, Xavier, 2021. La stratégie «De la fourche à la fourchette»: une trajectoire d'innovation ambitieuse et réaliste pour le système alimentaire européen. *IDDRI* [en ligne]. 2021. [Consulté le 29 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/billet-de-blog/la-strategie-de-la-fourche-la-fourchette-une-trajectoire>

BARBIERI, Pietro, PELLERIN, Sylvain, SEUFERT, Verena, SMITH, Laurence, RAMANKUTTY, Navin et NESME, Thomas, 2021. Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. *Nature Food*. mai 2021. Vol. 2, n° 5, pp. 363-372. DOI 10.1038/s43016-021-00276-y.

BAUDE, Manuel, CERISIER-AUGER, Alexis, DASSIBAT, Quentin, DOSSA-THAUVIN, Valérie, GONDRAN, Natacha, JACOD, Anne, LARRIEU, Christelle, MARQUIS, Manuel, MARSAUCHE, Maud, MOCHEL, Loïc, PAGÈS, Emmanuelle, PARIS, Sandrine et TROMEUR, Eric, 2023. La France face aux 9 limites planétaires. *La France face aux neuf limites planétaires* [en ligne]. 2023. [Consulté le 29 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/la-france-face-aux-neuf-limites-planetaires/livre>

BILLEN, Gilles, AGUILERA, Eduardo, EINARSSON, Rasmus, GARNIER, Josette, GINGRICH, Simone, GRIZZETTI, Bruna, LASSALETTA, Luis, NOË, Julia Le et SANZ-COBENA, Alberto, 2021. Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth*. 18 juin 2021. Vol. 4, n° 6, pp. 839-850. DOI 10.1016/j.oneear.2021.05.008.

BORRELLO, Massimiliano, LOMBARDI, Alessia, PASCUCCHI, Stefano et CEMBALO, Luigi, 2016. The Seven Challenges for Transitioning into a Bio-based Circular Economy in the Agri-food Sector. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture*. 2016. Vol. 8, n° 1, pp. 39-47. DOI 10.2174/221279840801160304143939.

CAMPBELL, Bruce, BEARE, Douglas, BENNETT, Elena, HALL-SPENCER, Jason, INGRAM, John, JARAMILLO, Fernando, ORTIZ, Rodomiro, RAMANKUTTY, Navin, SAYER, Jeffrey et SHINDELL, Drew, 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society* [en ligne]. 12 octobre 2017. Vol. 22, n° 4. [Consulté le 4 juillet 2024]. DOI 10.5751/ES-09595-220408. Disponible à l'adresse : <https://www.ecologyandsociety.org/vol22/iss4/art8/>

CHAMBRE D'AGRICULTURE, 2019. *Guide du compostage à la ferme* [en ligne]. [Consulté le 7 mars 2024]. Disponible à l'adresse : https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/Agroenvironnement/Guide-compostage-crao2019.pdf

CHEN, Minpeng, SUN, Fu et SHINDO, Junko, 2016. China's agricultural nitrogen flows in 2011: Environmental assessment and management scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*. 1 août 2016. Vol. 111, pp. 10-27. DOI 10.1016/j.resconrec.2016.03.026.

COBO, Selene, DOMINGUEZ-RAMOS, Antonio et IRABIEN, Angel, 2018. Trade-Offs between Nutrient Circularity and Environmental Impacts in the Management of Organic Waste. *Environmental Science & Technology*. 31 août 2018. Vol. 52. DOI 10.1021/acs.est.8b01590.

GROSSE, François, 2010. Is recycling “part of the solution”? The role of recycling in an expanding society and a world of finite resources. *S.A.P.I.E.N.S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society* [en ligne]. 4 février 2010. N° 3.1. [Consulté le 4 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://journals.openedition.org/sapiens/906>

HARCHAOU, Souhil, GRILLOT, Myriam, COURTONNE, Jean-Yves et MADELRIEUX, Sophie, 2024. A review of socio-metabolic research on circularity in agri-food systems and pathways to action. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* [en ligne]. 10 mars 2024. [Consulté le 4 juillet 2024]. DOI 10.1007/s10705-024-10344-x. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10705-024-10344-x>

KLEINPETER, Vivien, ALVANITAKIS, Manon, VIGNE, Mathieu, WASSENAAR, Tom, LO SEEN, Danny et VAYSSIÈRES, Jonathan, 2023. Assessing the roles of crops and livestock in nutrient circularity and use efficiency in the agri-food-waste system: A set of indicators applied to an isolated tropical island. *Resources, Conservation and Recycling*. 1 janvier 2023. Vol. 188, pp. 106663. DOI 10.1016/j.resconrec.2022.106663.

LE NOE, Julia, BILLEN, Gilles et GARNIER, Jacques, 2019. Trajectoires des systèmes de production agricole en France depuis la fin du XIXe siècle : une approche biogéochimique. [en ligne]. 1 janvier 2019. [Consulté le 15 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/335569461_Trajectoires_des_systemes_de_production_agricole_en_France_depuis_la_fin_du_XIXe_siecle_une_approche_biogeochemique

MANNEVILLE, Vincent, VERGÉ, Xavier, GRÉGOIRE, Mathilde et ANDRÉ, Emma, 2023. Leviers d'action pour réduire les émissions d'ammoniac en élevage bovins. [en ligne]. 2023. [Consulté le 28 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F11a1b639-ae09-48bb-b558-570ec90eaa5a&cHash=ae10618686f6f515faaf0d0a7f6bebe0

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES, 2013. Les surplus d'azote et les gaz à effet de serre de l'activité agricole en France métropolitaine en 2010. [en ligne]. 2013. Disponible à l'adresse : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/chiffres-stats448-nopolu-en-2010-septembre2013.pdf>

MUSCAT, Abigail, DE OLDE, Evelien M., RIPOLL-BOSCH, Raimon, VAN ZANTEN, Hannah H. E., METZE, Tamara A. P., TERMEER, Catrien J. A. M., VAN ITTERSUM, Martin K. et DE BOER, Imke J. M., 2021. Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nature Food*. août 2021. Vol. 2, n° 8, pp. 561-566. DOI 10.1038/s43016-021-00340-7.

OEB, 2021. Chiffres clés des déchets en Bretagne - Édition 2021 | Observatoire de l'environnement en Bretagne. [en ligne]. 2021. [Consulté le 29 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://bretagne->

environnement.fr/notice-documentaire/chiffres-cles-dechets-bretagne---edition-2021-donnees-analyses-observatoire-environnement-bretagne

PEYRAUD, Jean-Louis, CELLIER, Pierre, AARTS, Frans, BELINE, Fabrice, BOCKSTALLER, Christian, DELABY, Luc, DOURMAD, Jean-Yves, DUPRAZ, Pierre, DURAND, Patrick, FAVERDIN, Philippe, FORELLI, Jean Louis, GAIGNÉ, Carl, KUIKMAN, Peter, LANGLAIS, Alexandra, LE GOFFE, Philippe, LESCOAT, Philippe, NICOURT, Christian, ROCHETTE, Philippe, VERTÈS, Françoise et VEYSSET, Patrick, 2012. *Les flux d'azote liés aux élevages : Réduire les pertes, rétablir les équilibres* [en ligne]. Expertise scientifique collective. [Consulté le 15 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/17aef1aba067c1dd60ea83749d74ceea.pdf>

PUECH, Thomas et STARK, Fabien, 2023. Diversification of an integrated crop-livestock system: Agroecological and food production assessment at farm scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1 mars 2023. Vol. 344, pp. 108300. DOI 10.1016/j.agee.2022.108300.

REGAN, John T, MARTON, Silvia, BARRANTES, Olivia, RUANE, Eimear, HANEGRAAF, Marjoleine, BERLAND, Jérémy, KOREVAAR, Hein, PELLERIN, Sylvain et NESME, Thomas, 2017. Does the recoupling of dairy and crop production via cooperation between farms generate environmental benefits? A case-study approach in Europe. *European Journal of Agronomy*. 1 janvier 2017. Vol. 82, pp. 342-356. DOI 10.1016/j.eja.2016.08.005.

REIMER, Marie, OELOFSE, Myles, MÜLLER-STÖVER, Dorette, MÖLLER, Kurt, BÜNEMANN, Else K., BIANCHI, Silvia, VETEMAA, Airi, DREXLER, Dóra, TRUGLY, Bence, RASKIN, Ben, BLOGG, Hugh, RASMUSSEN, Anton, VERRASTRO, Vincenzo et MAGID, Jakob, 2023. Sustainable growth of organic farming in the EU requires a rethink of nutrient supply. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* [en ligne]. 14 juillet 2023. [Consulté le 27 avril 2024]. DOI 10.1007/s10705-023-10297-7. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10297-7>

RICHARDSON, Katherine, STEFFEN, Will, LUCHT, Wolfgang, BENDTSEN, Jørgen, CORNELL, Sarah E., DONGES, Jonathan F., DRÜKE, Markus, FETZER, Ingo, BALA, Govindasamy, VON BLOH, Werner, FEULNER, Georg, FIEDLER, Stephanie, GERTEN, Dieter, GLEESON, Tom, HOFMANN, Matthias, HUISKAMP, Willem, KUMMU, Matti, MOHAN, Chinchu, NOGUÉS-BRAVO, David, PETRI, Stefan, PORKKA, Miina, RAHMSTORF, Stefan, SCHAPHOFF, Sibyll, THONICKE, Kirsten, TOBIAN, Arne, VIRKKI, Vili, WANG-ERLANDSSON, Lan, WEBER, Lisa et ROCKSTRÖM, Johan, 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*. 15 septembre 2023. Vol. 9, n° 37, pp. eadh2458. DOI 10.1126/sciadv.adh2458.

ROCKSTRÖM, Johan, STEFFEN, Will, NOONE, Kevin, PERSSON, Åsa, CHAPIN, F. Stuart, LAMBIN, Eric F., LENTON, Timothy M., SCHEFFER, Marten, FOLKE, Carl, SCHELLNHUBER, Hans Joachim, NYKVIST, Björn, DE WIT, Cynthia A., HUGHES, Terry, VAN DER LEEUW, Sander, RODHE, Henning, SÖRLIN, Sverker, SNYDER, Peter K., COSTANZA, Robert, SVEDIN, Uno, FALKENMARK, Malin, KARLBERG, Louise, CORELL, Robert W., FABRY, Victoria J., HANSEN, James, WALKER, Brian, LIVERMAN, Diana, RICHARDSON, Katherine, CRUTZEN, Paul et FOLEY, Jonathan A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature*. septembre 2009. Vol. 461, n° 7263, pp. 472-475. DOI 10.1038/461472a.

SEUFERT, Verena, RAMANKUTTY, Navin et FOLEY, Jonathan A., 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*. mai 2012. Vol. 485, n° 7397, pp. 229-232. DOI 10.1038/nature11069.

SOCIÉTÉ NATIONALE D'HORTICULTURE DE FRANCE, 2021. *L'urine comme engrais au jardin ? Oui, mais...* [en ligne]. [Consulté le 8 mars 2024]. Disponible à l'adresse :

<https://www.snhf.org/wp-content/uploads/2020/10/LURINE-COMME-ENGRAIS-au-jardin-Oui-mais-%E2%80%A6.pdf>

VANDENBERGHE, C., DE TOFFOLI, Marc, F., Bachelart, O., Imbrecht, LAMBERT, Richard et JM, Marcoen, 2013. Contrôle de l'azote potentiellement lessivable dans le sol en début de période de lixiviation. Etablissement de valeurs de référence. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*. 1 janvier 2013. Vol. volume 17, pp. 231-236.

VAN LOON, Marloes P., VONK, Wytse J., HIJBEEK, Renske, VAN ITTERSUM, Martin K. et TEN BERGE, Hein F. M., 2023. Circularity indicators and their relation with nutrient use efficiency in agriculture and food systems. *Agricultural Systems*. 1 avril 2023. Vol. 207, pp. 103610. DOI 10.1016/j.agsy.2023.103610.

VERGER, Yoann, PETIT, Caroline, BARLES, Sabine, BILLEN, Gilles, GARNIER, Josette, ESCULIER, Fabien et MAUGIS, Pascal, 2018. A N, P, C, and water flows metabolism study in a peri-urban territory in France: The case-study of the Saclay plateau. *Resources, Conservation and Recycling*. 1 octobre 2018. Vol. 137, pp. 200-213. DOI 10.1016/j.resconrec.2018.06.007.

VIAUD, Valérie et THOMAS, Zahra, 2019. Une réflexion sur l'état des connaissances des fonctions du bocage pour l'eau dans une perspective de mobilisation pour l'action. *Sciences Eaux & Territoires*. 2019. Vol. Numéro 30, n° 4, pp. 32-37. DOI 10.3917/set.030.0032.

Annexes

Annexe 1 : Description des webinaires visionnés et des présentations pour identifier les leviers favorisant l'autonomie azotée en AB	51
Annexe 2 : Choix des fixations unitaires pour chaque culture, et du % de légumineuses dans les prairies	52
Annexe 3 : Azote excrété et temps de pâturage considérés en fonction des catégories d'animaux.....	53
Annexe 4 : Modélisations sous fichier Excel	54
Annexe 5 : Notes attribuées à chaque levier à l'issue du sondage	55
Annexe 6 : Les différents facteurs d'émission (FE)	56
Annexe 7 : Quantité d'azote disponible liée à l'utilisation de compost de déchets alimentaires et de déchets verts	57
Annexe 8 : Quantité d'azote disponible liée à l'utilisation de digestat de déchets alimentaires	59
Annexe 9 : Quantité d'azote disponible liée à l'utilisation des urines humaines	60

Les 4 webinaires regroupant 11 présentations

- **Webinaire N°1, « Les flux de nutriments aux différentes échelles spatiales : de la planète à la parcelle agricole » - 30/03/2023**
 - ❖ Christian Schader (FiBL) - Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture: the nitrogen challenge (Muller *et al.*, 2017).
 - ❖ Gilles Billen (CNRS)- Les flux d'azote et de phosphore dans le système agro-alimentaire de la France et de ses régions: situation actuelle et scénarios prospectifs pour 2050 (Le Noe *et al.*, 2019).
 - ❖ Olivier Godinot, Nadège Edouard, Francine De Quelen, Florent Levasseur (Institut Agro, INRAE) - Flux de nutriment en agriculture : de la parcelle à l'exploitation
- **Webinaire N°2, « Les différents indicateurs de caractérisation des flux de nutriments : efficacité, circularité... » - 26/05/2023**
 - ❖ Marloes van Loon (Wageningen University & Research) - Circularity indicators and their relation with nutrient use efficiency in agriculture and food systems (van Loon *et al.*, 2023).
 - ❖ Jonathan Vayssières (CIRAD) - Évaluer le rôle des cultures et de l'élevage dans l'autonomie, la circularité et l'efficacité d'utilisation des nutriments dans les agro-écosystèmes et les systèmes agri-alimentaires (Kleinpeter *et al.*, 2023).
- **Webinaire N°3, « Les risques et freins environnementaux sanitaires et réglementaires à l'utilisation de produits organiques en AB » - 23/06/2023**
 - ❖ Catherine Experton, Niels Bize (Agence Bio, FRAB) - Utilisation des PRO sur terres agricoles labellisées AB : contexte, cadrage, explications et évolutions.
 - ❖ Pascal Piveteau (INRAE) – PAnHealth, un consortium Métabio pour une gestion intégrée des sants des sols, des végétaux et des animaux en Agriculture Biologique : focus sur les risques sanitaires associés aux intrants organiques.
- **Webinaire N°4, « Les flux de nutriments dans les systèmes de production agricole: le cas de plateformes expérimentales en AB ou agroécologie » - 6/10/2023**
 - ❖ Sandra Novak, (INRAE) – OasYs : un dispositif expérimental pour concevoir et évaluer un système bovin laitier agroécologique adapté au changement climatique (Novak *et al.*, 2022).
 - ❖ Thomas Puech, Fabien Stark (INRAE) - Exploitation de polyculture-élevage de Mirecourt (Puech, Stark, 2022).
 - ❖ Stéphane Ferchaud, Fabrice Beline (INRAE) – Porganic : un dispositif expérimental pour des recherches en production porcine biologique (Ferchaud *et al.*, 2022).
 - ❖ Esther Guillot (INRAE) – Alénya : unité expérimentale dédiée à l'élaboration de systèmes agroécologiques innovants en production maraîchère sous serres et abris plastiques de pleine terre.

Annexe 2 : Choix des fixations unitaires pour chaque culture, et du % de légumineuses dans les prairies

<i>Fixation unitaire (kgN/tMS.an)</i>	<i>Rasmussen et al 2012</i>	<i>Vertes</i>	<i>Duc et al.</i>	<i>CAP2ER</i>	<i>Choix pour modèle</i>
<i>Haricot</i>		18.75	28		30
<i>Pois</i>		35	28		30
<i>Pois chiche</i>			28		30
<i>Lupin</i>		25	28		30
<i>Féverole</i>		25	28		30
<i>Vesce</i>			28		30
<i>Lentille</i>			28		30
<i>Soja</i>		22.5	42.5		30
<i>Trèfle blanc</i>	33-41	52.7	20.5	38.7	37
<i>Trèfle violet</i>	24-28	36.4	20.5	24	26
<i>Luzerne</i>	31-32	28	20.5	24	31.5
<i>Prairie permanente</i>		3-5	6.4	3.9	% Leg*37
<i>Prairie temporaire</i>	8-15	6-10	7.7	7.7	% Leg*37
<i>Fourrage mixte</i>					% Leg * fixation leg considérée

<i>Type</i>	<i>% de légumineuses</i>
<i>Prairie permanente</i>	15 %
<i>Prairie temporaire</i>	25 %

Annexe 3 : Azote excrété et temps de pâturage considérés en fonction des catégories d'animaux

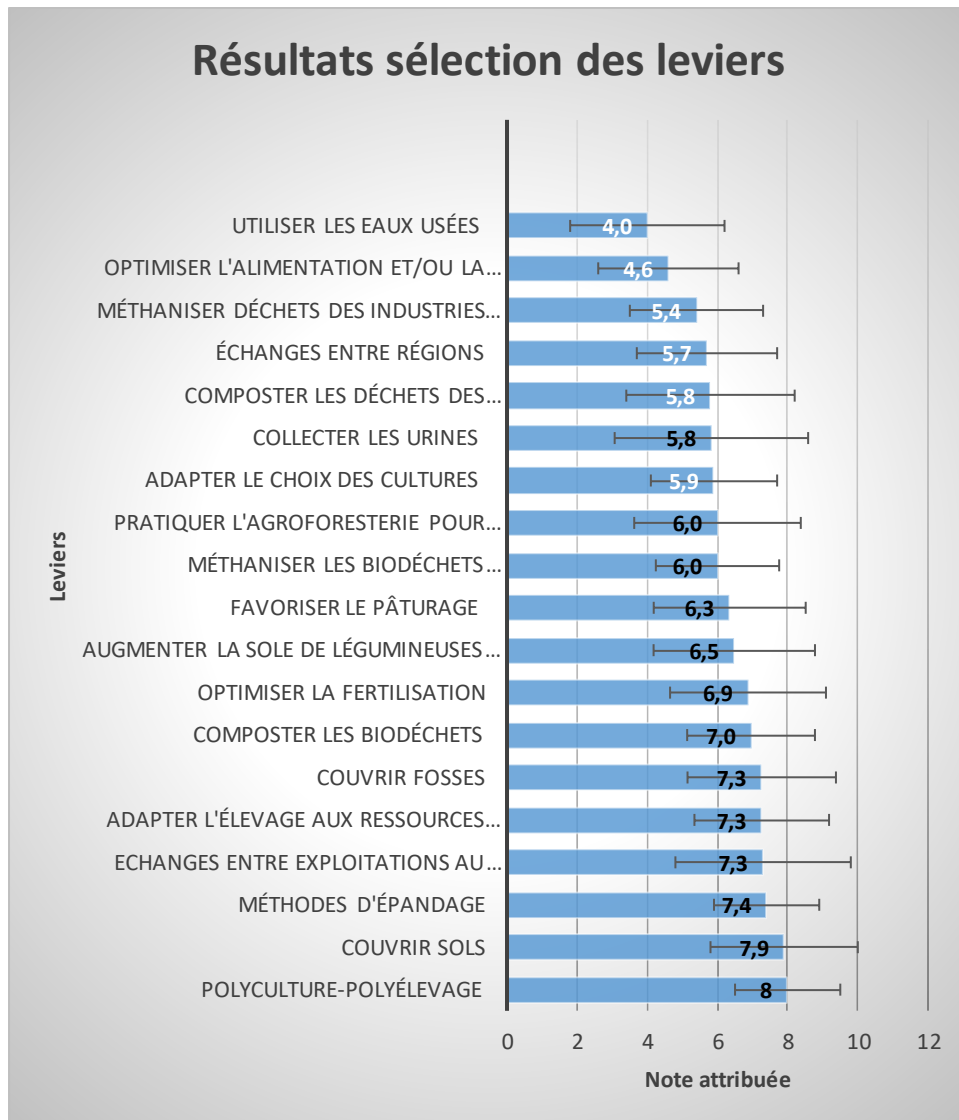
Catégorie d'animaux	Temps de pâturage (%)	N excrété (kgN/animal/an)
<i>Vaches laitières (VL)</i>	54	106
<i>Génisses laitières renouvellement > 2 ans</i>	64	67
<i>Génisses laitières renouvellement 1 à 2 ans</i>	64	67
<i>Veaux</i>	52	7

Annexe 4 : Modélisations sous fichier Excel

Les 56 modélisations réalisées dans le cadre de cette étude sont disponibles sur demande sous fichiers Excel. Néanmoins, les modélisations présentées dans le rapport sont directement disponibles dans un fichier annexe, joint en complément de ce rapport. On retrouve donc :

- Les 3 modélisations sans levier des exploitations types de référence ;
- La modélisation du levier « polyculture-polyélevage » au sein de l'exploitation GC BP ;
- La modélisation du levier « utilisation de compost de déchets alimentaires et de déchets verts » au sein de l'exploitation GC BP dans le contexte territorial de l'Île-de-France ;
- Les 3 scénarios ;

Annexe 5 : Notes attribuées à chaque levier à l'issue du sondage



Annexe 6 : Les différents facteurs d'émission (FE)

<i>FE au bâtiment et au stockage</i>	<i>FE à l'épandage du fumier cas VL</i>	<i>FE au pâturage</i>	<i>FE épandage fertilisant non connu</i>	<i>FE épandage vinasses de sucreries</i>	<i>FE épandage fientes de poules</i>	<i>FE épandage digestat</i>	<i>FE épandage urines</i>
0.33	0.11	0.08	0.15	0.15	0.20	0.25	0.25

<i>FE au bâtiment et au stockage fumier</i>	<i>FE stockage du digestat</i>
0.33	0.05

Annexe 7 : Quantité d'azote disponible liée à l'utilisation de compost de déchets alimentaires et de déchets verts

Hypothèse retenue pour les biodéchets alimentaires : les habitants résidant dans une commune dont la densité de population est d'au moins 500 habitants par kilomètre carré et qui sont connectés au réseau d'assainissement collectif voient leurs biodéchets alimentaires collectés. Méthode : sélectionner les villes du département/région ayant une densité de population \geq à 500 hab/km². Puis appliquer le % de personnes du département qui ont accès au réseau d'assainissement collectif au nombre d'habitants des villes sélectionnées.

Pour les déchets verts : valeurs directement trouvées dans la littérature.

Quantité de biodéchets alimentaires collectés : 54.5 kg/hab

Teneur en N des biodéchets alimentaires : 10 kgN/t

Pertes au compostage des biodéchets alimentaires : - 30 %

Pertes au compostage des déchets verts : - 15 %

- **Méthodologie de calcul pour le territoire de la Vienne :**
 - **Biodéchets alimentaires** : 79 % des personnes de la Vienne ont accès à un réseau d'assainissement collectif. 112 258 habitants peuvent donc bénéficier d'une collecte de leurs biodéchets. Avec les 54.5 kg/hab de biodéchets alimentaires collectés, il y a une collecte totale de $54.5 \times 112\,258 = 6\,118$ t. Or, il y a 10 kgN/t de biodéchets alimentaires, donc il y a $10 \times 6\,118 = 61\,180$ kgN disponible via la collecte des biodéchets alimentaires. Néanmoins, il y a 30 % de pertes au compostage, ce qui signifie que seuls $0.7 \times 61\,180 = 42\,826$ kgN sont réellement disponibles après le processus de compostage. Nous pouvons donc répartir cette quantité d'azote sur la SAU totale de la Vienne (505 728 ha) : $42\,826 / 505\,728 = 0.08 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$.
 - **Déchets verts** : 156 kg/habs collectés en déchets verts pour une population de 448 749 habitants en 2022. Il y a donc $156 \times 448\,749 = 70\,005$ t de déchets verts collectés. Or, il y a 9.5 kgN/t de déchets verts, donc $9.5 \times 70\,005 = 665\,047.5$ kgN disponible via la collecte des déchets verts dans la Vienne. Il y a 15 % de pertes en azote lors du processus de compostage, donc seuls $0.85 \times 665\,047.5 = 565\,290$ kgN sont disponibles. Nous pouvons donc répartir cette quantité d'azote sur la SAU totale du territoire : $565\,290 / 505\,728 = 1.1 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ disponible via l'utilisation de compost de déchets verts.
- **En Ille-et-Vilaine** : même méthode avec les données suivantes :
 - **Biodéchets alimentaires** : Nombre d'habitants se trouvant dans une ville dont la densité de population est supérieure ou égale à 500 hab/km² et qui ont accès à un réseau d'assainissement collectif : 322 579 personnes ;
 - **Déchets verts** : 165 475 t de déchets verts collectés en 2018
- **En Île-de-France** :
 - **Biodéchets alimentaires** : 10 153 103 personnes peuvent bénéficier d'une collecte de leurs biodéchets alimentaires ;
 - **Déchets verts** : 900 000 t de déchets verts collectés ;

En réalisant la même méthode pour les 2 autres territoires, nous obtenons :

<i>Territoire</i>	<i>SAU totale du territoire (ha)</i>	<i>Azote disponible avec l'utilisation de compost de déchets alimentaires (kgN.ha⁻¹.an⁻¹)</i>	<i>Azote disponible avec l'utilisation de compost de déchets verts (kgN.ha⁻¹.an⁻¹)</i>
<i>Vienne</i>	505 728	0.08	1.1
<i>Ille-et-Vilaine</i>	440 456	0.28	3.03
<i>Île-de-France</i>	616 667	6.28	11.8

Annexe 8 : Quantité d'azote disponible liée à l'utilisation de digestat de déchets alimentaires

Hypothèse retenue pour les biodéchets alimentaires : les habitants résidant dans une commune dont la densité de population est d'au moins 500 habitants par kilomètre carré et qui sont connectés au réseau d'assainissement collectif voient leurs biodéchets alimentaires collectés. Méthode : sélectionner les villes du département/région ayant une densité de population \geq à 500 hab/km². Puis appliquer le % de personnes du département qui ont accès au réseau d'assainissement collectif au nombre d'habitants des villes sélectionnées.

Quantité de biodéchets alimentaires collectés : 54.5 kg/hab.

Teneur en N des biodéchets alimentaires : 10 kgN/t

Nous n'avons considéré aucune perte durant le processus de méthanisation

Pertes à l'épandage du digestat : 25 %

Méthode pour la Vienne :

- *Nombre total d'habitants ayant une collecte de leurs biodéchets alimentaires : 112 258 habitants (calculé précédemment) ;*
- *Or, 54,5 kg de biodéchets alimentaires collectés/hab, donc il y a $54,5 \times 112\,258 = 6\,118\,061$ kg = 6 118 t de biodéchets alimentaires collectés à Vienne.*
- *Or il y a 10 kgN par tonne de biodéchets, ce qui signifie qu'il y a au total $10 \times 6\,118 = 61\,180$ kgN disponible via la collecte des biodéchets alimentaires à Vienne.*
- *Et SAU Vienne : 505 728 ha donc il y a $61\,180/505\,728 = 0,12$ kgN/ha disponible.*

<i>Territoire</i>	<i>Nombre d'habitants qui peuvent bénéficier d'une collecte</i>	<i>SAU territoire (ha)</i>	<i>Azote disponible avec l'utilisation de digestat (kgN.ha⁻¹.an⁻¹)</i>
<i>Vienne</i>	<i>112 258</i>	<i>505 728</i>	<i>0.12</i>
<i>Ille-et-Vilaine</i>	<i>322 579</i>	<i>440 456</i>	<i>0.4</i>
<i>Île-de-France</i>	<i>10 153 103</i>	<i>616 667</i>	<i>8.97</i>

Annexe 9 : Quantité d'azote disponible liée à l'utilisation des urines humaines

A l'échelle du département, on utilise le nombre de personnes qui sont en assainissement collectif. Si on lève les contraintes technique et sanitaire, on peut calculer la quantité d'urine (et donc d'azote) disponible au sein du département, et la répartir de manière uniforme sur la SAU du territoire.

Quantité moyenne d'urine produite par jour par habitant : 1.5 L

Concentration en azote dans les urines : 8.7 g/L

Pertes à l'épandage des urines : 25 %

Méthodes pour la Vienne :

- Quantité d'urine produite/an = Nb de personnes en assainissement collectif * Quantité d'urine produite/personne/jour* 365j= 340 466*1,5*365= 186 405 135 L/an*
- Quantité d'N dispo/an=Quantité totale d'urine produite/an*Concentration en N dans les urines (g/L) = 186 405 135*8,7= 1 621 724 675 gN= 1 621 724,675 kgN/an*
- Quantité d'N dispo/ha SAU totale = Quantité d'N dispo/an / SAU totale= 1 621 724,675/505 728 = 3,2 kgN/ha/an disponible*

<i>Territoire</i>	<i>Nombre de personnes en assainissement collectif</i>	<i>SAU territoire (ha)</i>	<i>Azote disponible avec l'utilisation des urines (kgN.ha-1.an-1)</i>
<i>Vienne</i>	<i>340 466</i>	<i>505 728</i>	<i>3.2</i>
<i>Ille-et-Vilaine</i>	<i>789 403</i>	<i>440 456</i>	<i>8.5</i>
<i>Île-de-France</i>	<i>15 074 768</i>	<i>616 667</i>	<i>116.4</i>

Comment améliorer l'autonomie azotée en AB avec les effluents et déchets organiques ?
Vers une approche circulaire

How to increase nitrogen self-sufficiency in OF using effluents and organic waste ?
Towards a circular approach

Mots-clés : Autonomie, Azote, Agriculture biologique, Effluents, Déchets organiques, Circularité
Key-words : Self-sufficiency, Nitrogen, Organic farming, Effluents, Organic Waste, Circularity

Résumé :

Le développement de l'agriculture biologique (AB) est soutenu par les pouvoirs publics qui ont pour ambition d'augmenter la SAU dédiée à l'AB de 10 % à 30 % en Europe d'ici à 2030. Cependant, la disponibilité limitée de l'azote (N) constitue un frein biophysique majeur à son développement. En effet, elle est dépendante des processus naturels et des ressources organiques locales. Optimiser l'utilisation de ces ressources et évaluer le potentiel de ressources organiques alternatives est donc primordial pour favoriser son développement à travers l'amélioration de son autonomie. Pour répondre à cet objectif, nous avons modélisé les flux d'N de 3 exploitations AB et nous avons modélisé l'impact de 13 leviers, en considérant 3 territoires différents. Nous avons également réalisé 3 scénarios mobilisant plusieurs leviers. Ces modélisations ont permis de quantifier les gains d'autonomie obtenus et de les relier à d'autres indicateurs de fonctionnement des exploitations tels que la circularité, l'efficacité et la productivité. L'intégration des leviers a conduit à une augmentation de l'autonomie N pour les 3 exploitations allant de +0.1 à +43.5 points de pourcentage. Les combinaisons de leviers ont conduit à des gains de +13.6 à +30.1 points. L'analyse des liens entre les différents indicateurs montre que l'augmentation de la circularité tend à augmenter l'autonomie N dans la plupart des cas. Cependant, l'optimisation des pratiques permet également de gagner en autonomie sans modifier la circularité. Enfin, ces leviers d'optimisation ainsi que ceux liés à la mobilisation des ressources du territoire augmentent l'autonomie sans forcément réduire l'efficacité. Cependant, les changements structurels des exploitations tels que l'introduction de l'élevage, la réduction de la compétition feed-food ou encore l'intégration de la méthanisation conduisent à des gains d'autonomie mais réduisent l'efficacité. Ce travail quantifie les différents chemins pour augmenter l'autonomie des exploitations AB, à travers la mobilisation des ressources du territoire, la réduction de pertes et les changements structurels, qui devront être combinés pour atteindre l'autonomie N de l'AB.

Abstract :

The development of organic farming (OF) is supported by public authorities, aiming to increase the agricultural area dedicated to OF from 10% to 30% by 2030. However, the limited availability of nitrogen (N) constitutes a major biophysical constraint to its development. Indeed, OF relies on natural processes and local organic resources. Optimizing the use of these resources and assessing the potential of alternative organic resources is therefore essential to promote its development by improving its autonomy. To achieve this objective, we modelled the N flows of 3 organic farms and evaluated the impact of 13 levers, considering three different territories. We also created three scenarios involving multiple levers. These models allowed us to quantify the increase in autonomy achieved and link them to other indicators of farm performance, such as circularity, efficiency, and productivity. The integration of the levers led to an increase in N autonomy for the three farms, ranging from +0.1 to +43.5 percentage points. The combinations of measures resulted in an increase of +13.6 to +30.1 percentage points. The analysis of the relationships between the various indicators shows that increasing circularity tends to increase N autonomy in most cases. However, optimizing practices also leads to increase autonomy without altering circularity. Finally, these optimization measures, as well as those related to mobilizing territorial resources, increase autonomy without reducing efficiency. On the other hand, structural changes in the farms, such as introducing livestock, reducing feed-food competition or integrating anaerobic digestion, lead to increase autonomy but reduce efficiency. This work quantifies the different pathways to increasing the autonomy of OF through the mobilization of territorial resources, the reduction of losses, and structural changes, which must be combined to achieve N autonomy in OF.

Nombre de pages du document final : 45

Demandeur (entreprise, organisme...) :
INRAE RENNES