



HAL
open science

Analyse et modélisation de leviers d'actions permettant d'accompagner la stratégie bas-carbone de la ferme expérimentale de Trévarez

Camille Richer

► **To cite this version:**

Camille Richer. Analyse et modélisation de leviers d'actions permettant d'accompagner la stratégie bas-carbone de la ferme expérimentale de Trévarez. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-01972301

HAL Id: dumas-01972301

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01972301>

Submitted on 7 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2017-2018

Spécialité :

Biologie, Agrosociétés

Spécialisation (et option éventuelle) :

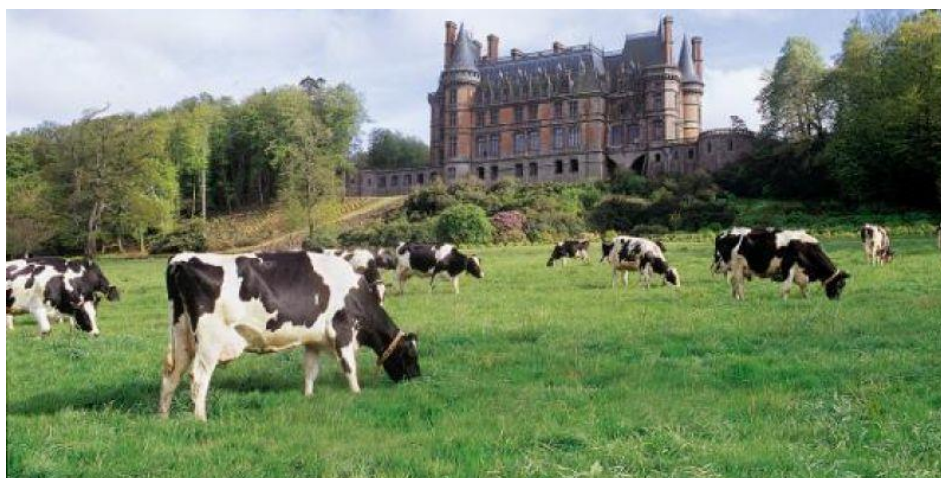
Sciences de l'animal pour l'élevage de demain (SAED)

Mémoire de fin d'études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Analyse et modélisation de leviers d'actions permettant d'accompagner la stratégie bas-carbone de la ferme expérimentale de Trévarez

Par : Camille RICHER



Soutenu à Rennes le 22 Juin 2018

Devant le jury composé de :

Président : Anne-Lise JACQUOT

Maître de stage : Sylvain FORAY

Enseignant référent : Justine FAURE

Rapporteur : Olivier GODINOT

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

« Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France »

disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Remerciements

Premièrement, j'aimerais remercier l'Institut de l'Élevage qui m'a donné l'opportunité de réaliser ce stage de fin d'étude.

Je remercie tout particulièrement Sylvain Foray pour son encadrement. Sa patience et toutes ses explications pour la réalisation du stage et de mon mémoire m'ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances et compétences.

Je voudrais remercier toute l'équipe qui m'a suivi sur Trévarez, Pascal Le Cœur, responsable de la ferme, Elodie Tranvoiz, Solenne Dupré et Valérie Brocard sans qui la réalisation du stage et des nombreuses simulations n'auraient pas été possible.

Je souhaite remercier l'ensemble de l'équipe de l'antenne du Rheu pour son accueil chaleureux et pour leur partage lors des pauses café. Et surtout merci Sarah, ces 6 mois de stages n'auraient pas été pareilles sans toi !

Merci à tous les stagiaires pour les moments passés ensemble. Merci Gaëlle pour nos moments de partages, nos doutes et pas que ! Merci Lisa, les deux mois avec toi auront été les meilleurs ! Et merci également aux stagiaires de Trévarez pour leur accueil qui ont rendu mes visites finistériennes toujours plus rayonnantes.

Et pour finir, je remercie chacune des personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de mon stage.

Table des matières

Remerciements

Abréviations	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	II
1. Introduction.....	1
2. Synthèse bibliographique.....	2
2.1. Gaz à effet de serre, élevage et réchauffement climatique	2
2.2. Améliorer l’empreinte carbone par l’atténuation des émissions de GES	2
2.3. Améliorer l’empreinte carbone par la séquestration du carbone.....	4
3. Matériel et méthodes.....	5
3.1. Présentation de la station expérimentale de Trévarez	5
3.2. Mise en place du système Bas Carbone.....	5
3.2.1. Quel système ?	5
3.2.2. Analyse environnementale	7
4. Résultats.....	10
4.1. Des effets contrastés	10
4.1.1. Indicateurs carbone	10
4.1.2. Indicateurs azote.....	11
4.1.3. Indicateur phosphore	12
4.1.4. Autres indicateurs.....	12
4.2. Le système le plus performant.....	13
5. Discussion	15
5.1. Des effets leviers contrastés	15
5.1.1. Différences entre systèmes à base de soja et colza	15
5.1.2. Différences entre systèmes avec et sans concentrés de production	16
5.1.3. Différences entre systèmes d’âge au premier vêlage de 27 et 24 mois.....	16
5.1.4. Différences entre systèmes fauches tardives et précoces	16
5.1.5. Différences entre les différentes périodes de vêlages	17
5.2. Quel système à mettre en place ?.....	17
5.3. Limites et perspectives de l’étude	18
5.3.1. Limites de la méthode	18
5.3.2. Contraintes du système.....	18
5.3.3. Perspectives de l’étude	18
Conclusion.....	20
Bibliographie.....	21
Annexes.....	24

Abréviations

ACV	Analyse de Cycle de Vie
AGV	Acide Gras Volatile
CAP'2ER®	Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Elevage de Ruminants
CEREOPA	Centre d'Etude et de Recherche sur l'Economie et l'Organisation des Productions Animales
CH ₄	Méthane
CO	Monoxyde de Carbone
CO ₂	Dioxyde de Carbone
COP	Conference of Parties
COVNM	Composé Organique Volatile Non Méthanique
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HFC	Hydrofluorocarbures
IA	Insémination Artificielle
IDELE	Institut de l'Elevage
MAT	Matière Azotée Totale
N	Azote
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NF ₃	Trifluorure d'azote
NO _x	Oxyde d'azote
P	Phosphore
PAC	Politique Agricole Commune
PDIE	Protéines Digestibles dans l'Intestin Grêle permis par l'Energie apportée par l'aliment
PFC	Perfluorocarbures
PP	Prairie Permanente
PRG	Pouvoir Réchauffant Global
PT	Prairie Temporaire
RGA-TB	Ray-Grass Anglais-Trèfle Blanc
RGH-TV	Ray-Grass Hybride – Trèfle Violet
RGI	Ray-Grass d'Italie
SAU	Surface Agricole Utile
SF ₆	Hexafluorure de soufre
SFP	Surface Fourragère Principale
SO ₂	Dioxyde de Soufre
TB	Taux Butyreux
TP	Taux Protéique
UFL	Unité Fourragère Lait
VL	Vaches Laitières

Liste des figures

Figure 1: Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) en 2015 en France par secteurs d'activité

Figure 2: Carte de la zone Arc Atlantique concernée par le programme Interreg

Figure 3: Impacts environnementaux et postes d'émissions associés à l'échelle de l'exploitation agricole

Figure 4: Contribution des différents postes d'émission de Gaz à Effet de Serre en élevage laitier, traitement de base de données des 3348 élevages Carbon Dairy, 2016

Figure 5: Bilan Carbone des fermes laitières bretonnes du réseau Carbon Dairy en 2013

Figure 6: Schéma de base du système bas carbone de Trévarez; gestion de l'alimentation, de la reproduction et de l'assolement

Figure 7: Organigramme représentant l'ensemble des modalités testés sous CAP'2ER®

Figure 8: Méthodologie employée pour calculer les impacts environnementaux dans une ACV

Figure 9: Equation de l'empreinte carbone nette exprimé par les émissions brutes de GES et le stockage carbone (en kg eqCO_2 /litre de lait)

Figure 10: Schéma représentant le bilan des minéraux d'une exploitation agricole

Figure 11: Evolution des valeurs de l'herbe (UFL, MAT) au cours de sa repousse

Liste des tableaux

Tableau 1: Valeurs du Potentiel de Réchauffement Global de GES

Tableau 2: Estimation des impacts de changement d'usage des terres sur le stockage de carbone dans les sols

Tableau 3: Emissions brutes de GES moyennes et empreinte carbone nette du lait avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et potentiel d'atténuation de l'EC nette

Tableau 4: Excédent du bilan d'azote moyen avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

Tableau 5: Potentiel d'azote lixivié moyen avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

Tableau 6: Perte potentiel d'azote vers l'air moyenne avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

Tableau 7: Potentiel de phosphore ruisselé moyen avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

Tableau 8: Consommation d'énergie moyenne avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

Tableau 9: Performance nourricière moyenne avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et potentiel d'atténuation

Tableau 10: Caractéristiques du meilleur (simulation 18) et moins bon (simulation 33) système sur l'empreinte environnementale

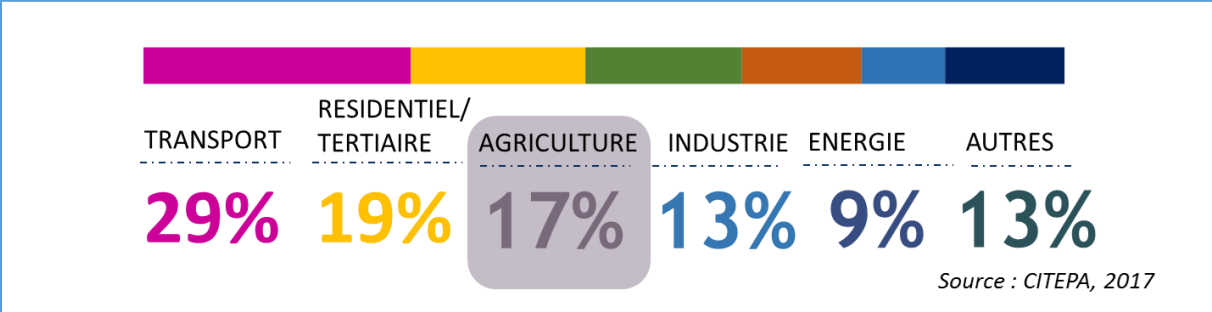


Figure 1: Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) en 2015 en France par secteurs d'activité



Figure 2: Carte de la zone Arc Atlantique (en bleu) concernée par le programme Interreg

1. Introduction

En 1967, la première prévision d'un réchauffement climatique planétaire est anticipée par deux scientifiques, Syukuro Manabe et Richard Wetherald qui prévoient une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (Mitchell, 2015). Dans les années qui suivent, de nombreux pays prennent parti afin de limiter le réchauffement climatique qui devient alors un enjeu mondial et le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) est créé en 1988 pour se charger du suivi scientifique du processus de réchauffement. Ce groupement publie régulièrement des rapports pour dresser le bilan des connaissances scientifiques et évaluer l'importance du réchauffement (Dahan Dalmedico et Guillemot, 2006). En parallèle, de nombreuses conférences internationales sont réalisées, connues sous le nom de COP (Conference of parties). Ces COP permettent un échange international afin de fixer de futurs objectifs avec la signature de nombreux accords tel que l'accord de Kyoto. La dernière conférence marquante est la COP21 effectuée en France en 2015 qui a mené aux accords de Paris ayant un objectif de limiter la hausse de la température globale en dessous des 2°C.

Dans ce contexte, l'agriculture est au centre de nombreuses études qui veulent définir l'impact de celle-ci dans les émissions anthropiques des gaz à effet de serre (GES). Le secteur agricole prend une part importante dans le réchauffement climatique. En France, en 2015, il est le 3^{ème} secteur le plus émetteur de GES sur le territoire français avec 17% des émissions, après le secteur des transports (29%) et celui de l'industrie (19%) (Fig. 1). Depuis 1990, les efforts réalisés ont permis la réduction des émissions des GES d'environ 6% mais des améliorations sont encore possibles. L'élevage contribue en 2015 à près de 15% des émissions de GES dont 10 % par les ruminants et les 5% restant par les autres espèces animales. L'élevage de ruminants est aussi l'un des seuls secteurs à pouvoir compenser une partie de ses émissions grâce au stockage de carbone dans les sols (Foray et Dupré, 2018).

Dans ce contexte, le projet européen Interreg, Dairy-4-Future, piloté par l'Institut de l'Elevage (IDELE), a été lancé début 2018 pour une durée de 4 ans. L'objectif de Dairy-4-Future est d'améliorer la résilience et la durabilité des systèmes laitiers de la zone arc atlantique (Fig. 2) en cherchant par exemple une réduction des coûts de production de 10% mais également une baisse de l'empreinte carbone du lait de 20% (Leclerc, 2018). Ce projet met ainsi en relation dans l'ensemble des régions, 100 fermes pilotes et 10 stations expérimentales dont la station de Trévarez, une ferme expérimentale laitière dans le Finistère.

Dans le cadre du projet Dairy-4-Future et en lien avec les objectifs définis par l'équipe d'encadrement professionnel et technique, la ferme de Trévarez a pour but de mettre en place une stratégie de production de lait engagée dans une stratégie bas carbone. Son cap est de présenter une valeur d'empreinte carbone réduite d'au moins 20% par rapport à la moyenne des élevages laitiers bretons à une échéance de 4 à 5 ans. Pour définir le système bas carbone, un cadre est proposé avec plusieurs options ou leviers d'actions possibles. Afin de définir la structure du système, des simulations sont réalisées sous CAP'2ER[®] (Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Elevage de Ruminants), un outil d'analyse environnementale multicritères développé par IDELE. Ces simulations s'intéressent à la fois aux émissions de GES mais également à d'autres impacts environnementaux (émissions d'ammoniac, lessivage d'azote, ...) afin d'analyser les synergies/antagonismes des leviers étudiés. Ce sont ces différentes étapes qui sont décrites dans ce mémoire de stage.

Ce document dresse dans un premier temps, une synthèse bibliographique portant sur les GES et s'intéresse notamment à la part de l'élevage dans leurs émissions ainsi qu'aux moyens pour les réduire. Une seconde partie présente la ferme expérimentale de Trévarez ainsi que la méthode utilisée pour l'analyse environnementale. Les résultats sont ensuite décrits et alimentent la discussion.

Tableau 1 : Valeurs du Potentiel de Réchauffement Global de GES (CITEPA, 2017)

Gaz	PRG
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298
NF ₃	17200
SF ₆	22800

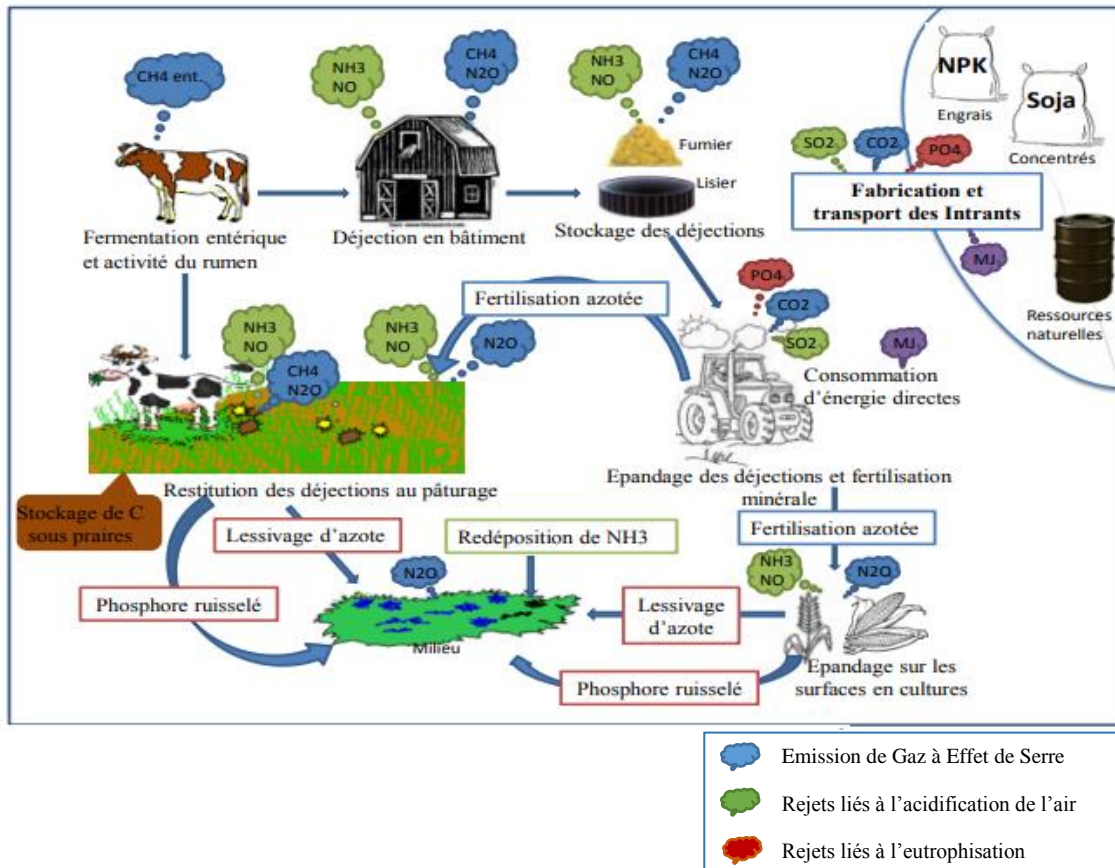


Figure 3: Impacts environnementaux et postes d'émissions associés à l'échelle de l'exploitation agricole (Lorinquer et al., 2013).

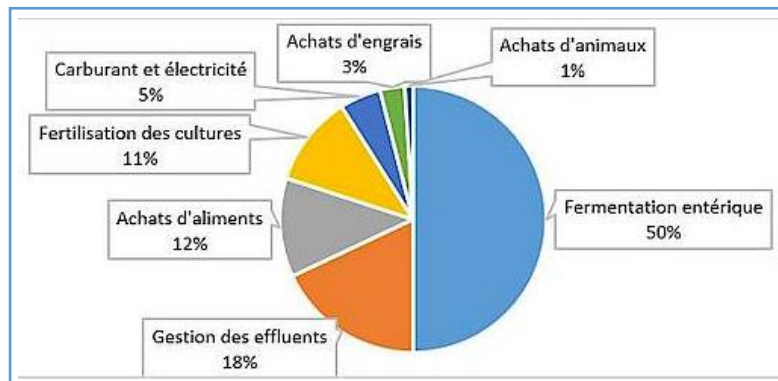


Figure 4: Contribution des différents postes d'émission de Gaz à Effet de Eerre en élevage laitier, traitement de base de données des 3348 élevages Carbon Dairy, 2016 (Danilo et Brocas, 2016)

2. Synthèse bibliographique

2.1. Gaz à effet de serre, élevage et réchauffement climatique

De nombreux GES sont présents dans l'atmosphère, les GES dits directs : dioxyde de carbone (CO_2), protoxyde d'azote (N_2O), méthane (CH_4), hydrofluorocarbures (HFC), perfluorocarbures (PFC), hexafluorure de soufre (SF_6) et trifluorure d'azote (NF_3) et les GES indirects (SO_2 , NO_x , CO et COVM). Une partie de ces GES se retrouve naturellement dans l'atmosphère (CO_2 , N_2O , CH_4) mais leur concentration s'est intensifiée par l'activité anthropique (CITEPA, 2017). Ces GES, par le phénomène d'effet de serre, ont la particularité de réchauffer l'atmosphère par l'augmentation de leurs émissions renforçant le renvoi d'énergie vers le sol. Cela provoque un déséquilibre expliquant l'élévation de la température (Dussud et al., 2016). Chaque GES possède un Potentiel de Réchauffement Global (PRG) plus ou moins important (Tab. 1). Le PRG est un indicateur de l'impact relatif de chaque polluant sur le changement climatique. Il correspond à l'effet radiatif d'un polluant sur une période de 100 ans comparé au CO_2 soit le rapport entre l'énergie renvoyée vers le sol en 100 ans par kg de gaz et celle que renverrait 1 kg de CO_2 (CITEPA, 2017; MTEC, 2018).

Le secteur agricole est responsable de l'émission de 3 GES, le CO_2 , le CH_4 et le N_2O . Il contribue en 2015 à 17% des émissions de GES en France. Ce secteur reste un secteur important d'émissions en contribuant à 69,5% et 86% des émissions totales de CH_4 et N_2O de la France. Mais c'est aussi le premier secteur qui subit les effets d'un changement climatique car, basé sur le vivant, il est fortement dépendant des conditions pédoclimatiques. Une évolution du climat (modification de la pluviométrie, augmentation des températures) ou des événements ponctuels extrêmes (pic de chaleur, inondations) ont un impact sur les cultures et/ou l'élevage. La recherche de leviers pour amoindrir les émissions de GES devient ainsi un enjeu clé pour l'agriculture de demain.

2.2. Améliorer l'empreinte carbone par l'atténuation des émissions de GES

La réduction des émissions de GES en élevage laitier passe d'abord par la recherche des différents points clés d'émissions de CH_4 , N_2O et CO_2 (Fig. 3). La principale source d'émission de CH_4 est la fermentation entérique issue du métabolisme des animaux (Fig. 4) (Dollé et al., 2011; Sauvant et al., 2011). Les émissions de CH_4 proviennent aussi de la gestion des déjections (pâturage, bâtiment, stockage) qui émet par ailleurs du N_2O . La nature des apports azotés joue sur l'émission de N_2O qui est liée aux phénomènes de nitrification et dénitrification des apports de fertilisants organiques et minéraux et indirectement résultant du lessivage de nitrates et de la volatilisation de l'ammoniac. Les émissions de CO_2 sont issues de la consommation des énergies fossiles au sein de l'exploitation ainsi qu'à l'impact en équivalent CO_2 généré lors de la fabrication et du transport des intrants (engrais, concentrés, semences,...) (Dollé et al., 2011).

Les principaux leviers d'actions en élevage laitier à mettre en place sont multiples. Il est possible d'agir sur l'alimentation, la productivité et la gestion du troupeau, la fertilisation, la gestion des déjections et les consommations d'énergie.

En alimentation, plusieurs leviers existent. Les premiers passent par la réduction des émissions de CH_4 entérique par 4 leviers :

- La substitution des glucides par des lipides insaturés limite l'activité microbienne dans le rumen limitant ainsi la fermentation et la production d'hydrogène amenant au méthane (Sauvant et al., 2011). Les sources de lipides sont multiples comme la graine de lin, l'huile de tournesol ou de colza, drèche de distillerie, etc... Cependant, l'apport ne doit pas excéder au maximum 4-5% de la ration (Doreau et al., 2017, 2011; Guyader et al., 2016; Martin et al., 2011).

- L'augmentation de la part de concentrés dans la ration diminue la production de méthane entérique grâce à l'augmentation des propionates dans le mélange des Acides Gras Volatiles (AGV). Cependant, les résultats sont satisfaisants à partir de 80% de concentrés dans la ration et l'impact environnemental provoqué par la fabrication et/ou le transport des concentrés va contrebalancer l'effet positif obtenu sur le méthane. L'augmentation des émissions de GES par les déjections est aussi à prendre en compte. Le potentiel de réduction de l'empreinte carbone serait de 0 à 5% (Dollé et al., 2011).
- L'apport d'une alimentation riche en tanins provoque une toxicité sur les méthanogènes. Des fourrages tropicaux riches en tanins, du lotier ou encore du sainfoin peuvent ainsi être apportés. Mais de trop grosses quantités peuvent modifier la digestibilité des animaux.
- L'apport d'additifs alimentaires tels que des huiles essentielles ou du nitrate de calcium atteignent la membrane cellulaire des protozoaires limitant leur activité. Le nitrate de calcium permet de monopoliser l'hydrogène grâce à l'ammoniac produit par sa transformation en nitrite. Cependant, cette production de nitrite peut provoquer de la méthémoglobinémie en cas d'apport excessif et leur efficacité in vivo n'a pas été démontrée (Doreau et al., 2017, 2011; Jouany et Thivend, 2008; Sauvant et al., 2011).

D'autres leviers sont liés à l'alimentation comme, favoriser l'autonomie protéique par l'utilisation de protéagineux ou de légumineuses fourragères et réduire les apports protéiques dans la ration pour limiter la teneur en azote dans les effluents. Produire des protéagineux (pois, féverole, lupin) permet de limiter ou de supprimer l'achat de concentrés. Leur teneur énergétique est proche de celle des céréales malgré une teneur en Matière Azotée Totale (MAT) inférieure à celle du tourteau de soja qui peut compléter la ration en fonction du niveau de production de l'animal (Brunschwig et al., 2001; Froidmont et Bartiaux-Thill, 2003). Favoriser l'autonomie protéique par les légumineuses fourragères (luzerne, trèfle violet, trèfle blanc, ...) permet à la fois une production de protéine supérieure à celle des protéagineux et ont un impact positif sur l'environnement (limite les apports d'azotes). Cependant, les techniques culturales se complexifient surtout au niveau de la récolte. En mélange avec de la graminée, cela donne un compromis intéressant pour la qualité du fourrage, les intérêts agronomiques, économiques et la praticité au travail (Capitain et al., 2003; Feugère et al., 2016; Pfmilin et al., 2003; Protin et al., 2009).

Réduire les apports protéiques est un levier d'action qui limite la teneur en azote dans les effluents et donc les émissions de N₂O associées. Ce levier possède un potentiel d'atténuation d'environ 70 à 123 kg éq.CO₂/vache/an. Il suffit de se limiter au besoin de l'animal, soit une teneur de 100 g PDIE/UFL. Cependant, il est nécessaire d'être vigilant sur le changement de digestibilité du régime qui peut favoriser des émissions supplémentaires de CH₄ (Herisset, 2015; Pellerin et al., 2013). Enfin, l'achat d'aliments moins émetteurs de GES permet de limiter l'impact carbone comme remplacer le soja par du colza. Tous les leviers évoqués ont un potentiel d'atténuation des GES de 2 à 7% (Dollé et al., 2011).

La réduction de l'émission de GES passe également par la gestion de la fertilisation azotée. Un des principaux leviers est la culture de légumineuses à graines (pois, soja, féverole, ...) ou fourragères (luzerne, trèfle, ...) comme cité précédemment (ADEME, 2015). Les légumineuses ont la capacité de fixer l'azote de l'air et de le restituer à la culture suivante. Cela permet de limiter l'apport d'azote minéral et organique. Le potentiel d'atténuation des émissions serait alors de 0,3 à 2 tCO₂ éq./ha/an (ADEME, 2015; Pellerin et al., 2013). Aussi, il est possible de réduire les apports d'azote en valorisant et en optimisant l'utilisation d'engrais. Pour cela, des outils existent permettant de fertiliser une culture en fonction du bilan azoté du sol et des objectifs de rendement. Il est également possible de substituer au maximum l'azote minéral avec de l'organique en optant pour l'enfouissement et en retardant au maximum les apports (ADEME, 2015).

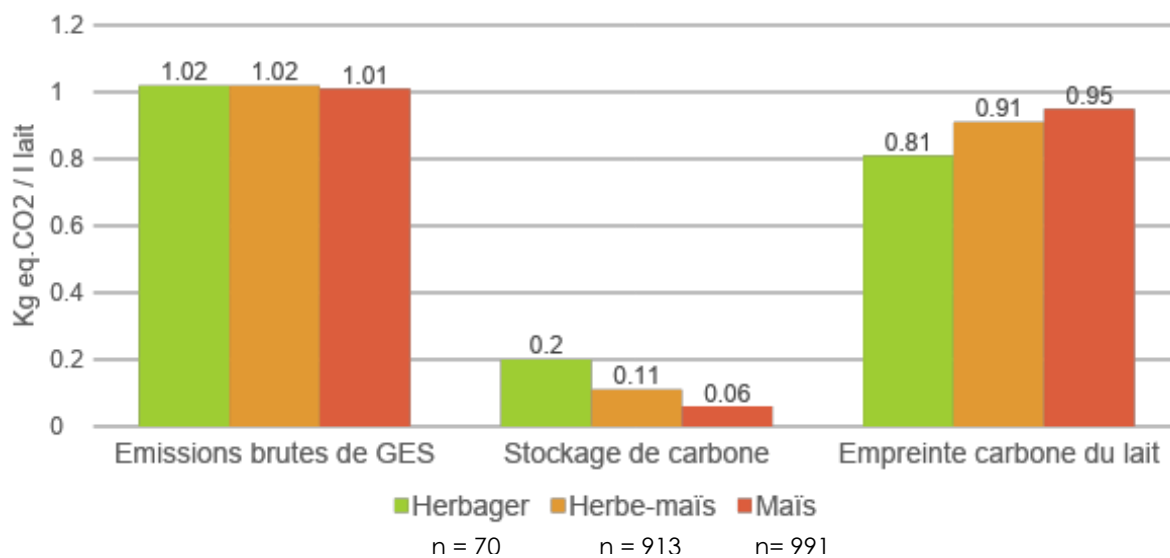


Figure 5: Bilan Carbone des fermes laitières bretonnes du réseau Carbon Dairy en 2013 (Foray et Dupré, 2018)

Tableau 2: Estimation des impacts de changement d'usage des terres sur le stockage de carbone dans les sols (Gac et al., 2010)

Conversion de terres	CO ₂ émis ou capté (t éq.CO ₂ /ha/an)
	Captage de CO₂
Culture -> Prairie permanente	0,84 à 2,75
Culture -> Boisement	0,73 à 2,49
Prairie permanente -> Boisement	- 0,1 à 0,3
	Emissions de CO₂
Prairie permanente -> Culture	2,4 à 4,6
Bois -> Culture	2,75
Bois -> Prairie permanente	0 à 0,7

Une optimisation de la fertilisation aurait un potentiel d'atténuation des émissions de 0,6 à 0,9 tCO₂ éq./ha/an (ADEME, 2015; Pellerin et al., 2013). Enfin, il est possible d'utiliser des inhibiteurs de nitrification pour limiter les émissions de N₂O pour une réduction potentielle de l'empreinte carbone jusqu'à 5%. Cependant les effets de leur utilisation sont encore méconnus (Dollé et al., 2011; Pellerin et al., 2013).

Une meilleure gestion des déjections fait également partie des principaux leviers d'actions. Les déjections produites au pâturage émettent moins que lorsqu'elles sont stockées. Augmenter la part de pâturage limite ainsi les émissions de GES. La digestion anaérobie des déjections évite les émissions de méthane lors du stockage. Grâce à une unité de méthanisation, le biogaz produit (CH₄ + CO₂) peut être valorisé sous forme énergétique. Un abattement de l'empreinte carbone de 5 à 7% est alors possible (Dollé et al., 2011).

Augmenter la productivité du troupeau et améliorer sa gestion permet de baisser l'empreinte carbone par quantité de produit. Pour cela, il est notamment possible de limiter la présence d'animaux peu ou pas productifs (réforme des animaux peu productifs, diminution du taux de renouvellement, baisse de l'âge au premier vêlage, etc...). En travaillant sur la génétique, il est possible d'améliorer l'efficacité alimentaire, d'améliorer la fertilité, d'optimiser les rations, de baisser les dépenses d'entretien, etc... Un potentiel de réduction jusqu'à 10% des émissions est alors possible. Cependant, l'augmentation de la productivité se fait souvent au détriment de la surface de prairie ainsi même si l'empreinte carbone brute sera améliorée, il peut en être autrement pour l'empreinte nette (Dollé et al., 2011).

Les consommations de fioul et d'électricité sont la principale origine des émissions de CO₂. Quelques techniques sont possibles afin de réduire les consommations d'électricité avec la mise en place de pré-refroidisseur de lait, de récupérateur de chaleur ou bien de solaire thermique. Cependant, en France où la production d'électricité est basée sur le nucléaire, le gain sur l'empreinte carbone sera inférieur à 1%. La réduction de consommation de fioul peut se faire en augmentant la part de pâturage (économie sur la mise en place de cultures, de récolte, de distribution des fourrages et d'épandage). Un changement des comportements et des pratiques constitue également un levier avec une conduite économe, en réglant les tracteurs, en réduisant le nombre de transport ou en simplifiant les techniques culturales. Une réduction de 1 à 2% des émissions de GES est non négligeable (Dollé et al., 2011).

2.3. Améliorer l'empreinte carbone par la séquestration du carbone

Le stockage du carbone permet une compensation des émissions brutes de GES. Il est ainsi possible de parler en terme de bilan en considérant les émissions de GES et leur stockage par les prairies. Ce bilan correspond à l'empreinte carbone nette à différencier de l'empreinte brute ne prenant en compte que les émissions de GES (Dolle et al., 2013; Gac et al., 2010).

Les prairies constituent un puit carbone au même titre que les haies (ou bosquets) et peuvent ainsi compensées jusqu'à 40% des émissions de GES en fonction du système fourrager mis en place. L'empreinte carbone nette sera alors plus faible dans un système « 10% de maïs » que dans un système où le maïs est présent au-delà de 30% de la Surface Fourragère Principale (SFP) (Fig. 5). Cependant, le déstockage de carbone est possible et est fortement lié au changement de l'usage des sols (retournement de prairies, déforestation, etc...) (Tab. 2) (Dolle et al., 2013; Gac et al., 2010).

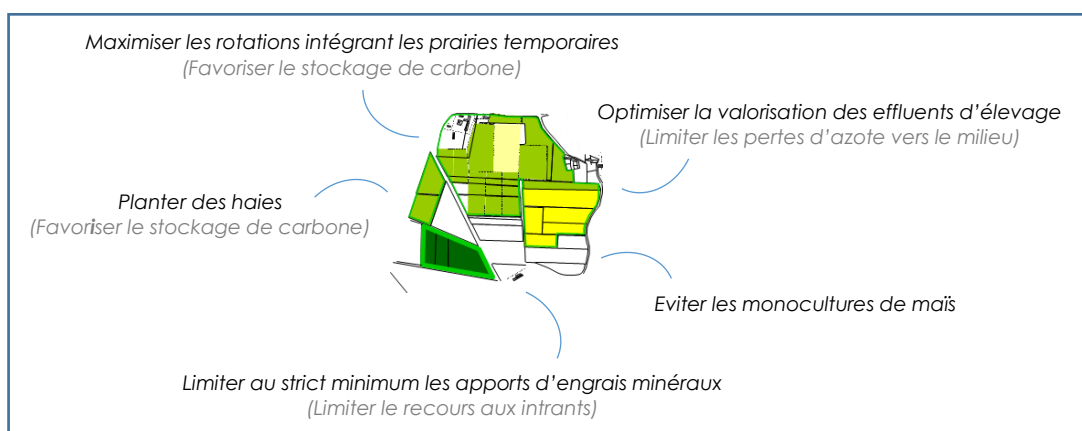
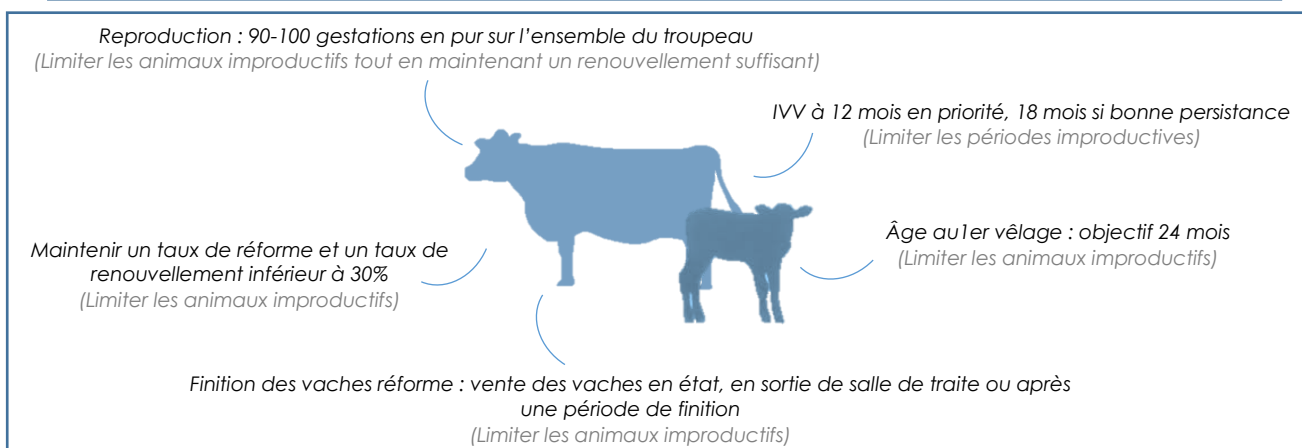
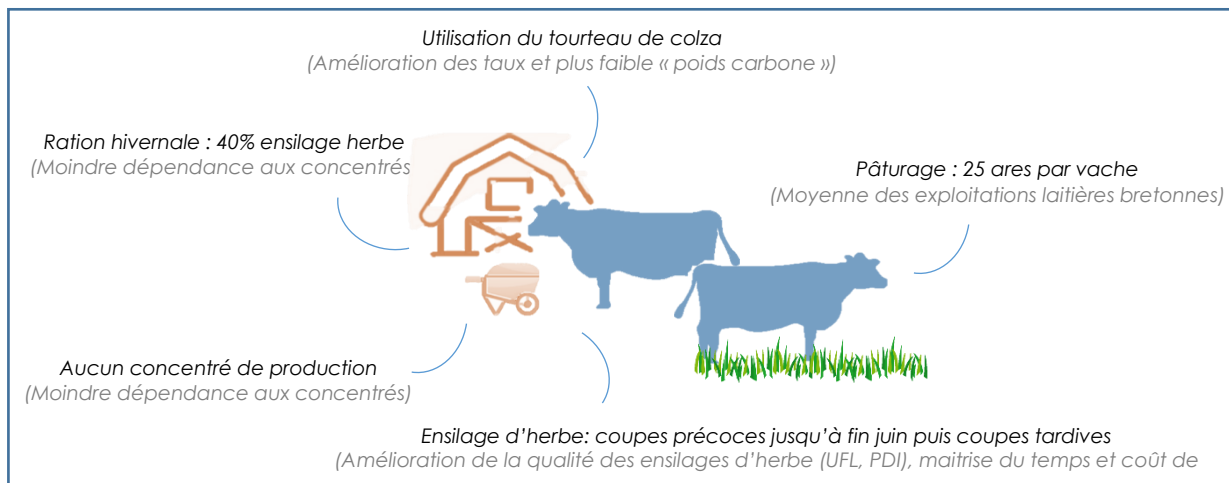
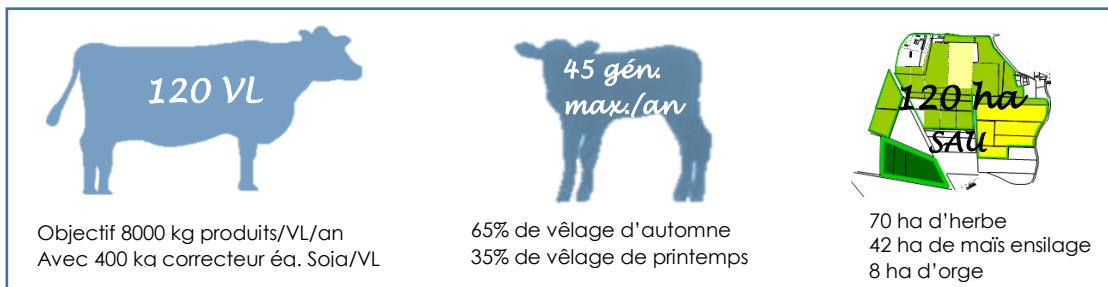


Figure 6: Schéma de base du système bas carbone de Trévarez; gestion de l'alimentation, de la reproduction et de l'assolement

3. Matériel et méthodes

3.1. Présentation de la station expérimentale de Trévarez

La ferme expérimentale de Trévarez est une station de production laitière de la Chambre d'Agriculture de Bretagne, située dans le Finistère (49). De nombreux essais y sont réalisés chaque année avec l'aide de nombreux partenaires dont IDELE.

Composée de 190 vaches laitières (VL) de race Prim'Holstein réparties sur 215 ha de Surface Agricole Utile (SAU), la ferme de Trévarez est divisée en deux systèmes d'exploitation, un système biologique qui ne sera pas étudié et un système conventionnel.

Le système conventionnel, objet de l'étude, possède une SAU de 126 ha où la part de maïs dépasse 30% de la SFP avec un cheptel de 120 VL. Initialement, ce système se scindait en deux systèmes distincts en fonction du système fourrager. Un système S1 plus intensif avec 15 ares accessibles par vaches au pâturage et un système S2 plus pâturant avec 40 ares accessibles par vache. Dans le cadre du projet et afin de proposer un même système bas carbone, ces deux systèmes ont été regroupés pour n'en former qu'un.

3.2. Mise en place du système Bas Carbone

3.2.1. Quel système ?

3.2.1.1. Bases du future système

La mise en place du système Bas Carbone est issue d'une suite de réflexions et d'échanges entre la Chambre d'Agriculture de Bretagne et l'Institut de l'Élevage. Ces derniers ont fixés un cadre général sur lequel seront appliqués des leviers d'actions orientés bas carbone. Ce cadre est basé sur des connaissances déjà acquises grâce à d'anciens essais mais également sur la volonté de proposer un système « reproductible » en Bretagne (Fig. 6).

▪ Gestion du troupeau

Le troupeau composé de 120 vaches laitières et de leur suite. L'objectif de production est fixé à 8000 kg/VL produits pour 7300 L vendu. Au pâturage, 25 ares seront consacrés par vache. La ration hivernale sera composée de minimum 40% d'ensilage d'herbe.

Le taux renouvellement est fixé à maximum 30% avec un nombre de génisses suffisant pour les expérimentations en hiver.

Les génisses sont sur aire paillée avec une aire d'exercice raclée (fumier) et les vaches laitières sont sur logette sur sciure avec couloir raclé (lisier).

▪ Assolement et rotation

L'assolement est constitué de 42 ha d'ensilage maïs, de 70 ha d'herbe et de 6 ha d'orge. En plus de la prairie permanente (PP), les rotations mises en place sont de deux natures, celles pour les parcelles proches du bâtiment :

- Colza/Ray-Grass d'Italie (RGI) – Prairie Temporaire (PT) de 5-6 ans
- Double maïs – céréales – PT (4-5 ans)

Celles pour les plus éloignés (non accessibles) :

- Monoculture de maïs – céréales (quelques années)
- PT longues durées (4-5 ans) – Monoculture maïs – Céréales

Les prairies sont composées de RGA-TB et RGH-TV. La part de trèfle dans les prairies est de 10 à 15%, des valeurs assez faibles mais représentatives des élevages du réseau Carbon Dairy, un réseau qui cherche à réduire les émissions de GES des élevages laitiers. Les rotations des parcelles se font en parallèles entre elles de façon à ce qu'il y est constamment les mêmes

surfaces en PT et en maïs. Cet assolement définit le système fourrager de l'exploitation et reste identique pour la suite du travail.

3.2.1.2. *Les leviers d'actions étudiés*

Une étape de recherche bibliographique a permis d'aboutir à l'élaboration de fiches synthétiques des principaux leviers d'actions impliqués dans l'atténuation des GES. Ces fiches, en fonction de la bibliographie existante, expliquent brièvement à quoi correspond chaque levier, quel est son potentiel d'atténuation des émissions de GES (s'il est connu), comment le mettre en place et quelles sont les limites répertoriées (ANNEXE). Ces recherches ont permis en collaboration avec les membres du projet de faire le point sur les leviers d'actions réalisables et envisageables sur Trévarez en plus de ceux déjà envisagés.

Ce rapport décrit 5 leviers d'actions testés sur l'ensemble du système.

- Nature du correcteur azoté

- *Etat des connaissances

L'utilisation du tourteau de colza en substitution au tourteau de soja a plusieurs intérêts. Il permet une amélioration des taux par rapport au tourteau de soja et il possède un impact environnemental moins important.

La différence entre le tourteau de colza et de soja sur les émissions de GES est l'émission indirecte liée à leur fabrication et leur transport, beaucoup plus important pour le tourteau de soja. Dans les références, le facteur d'émission lié à l'utilisation de tourteau de soja est de 1,579 kg eq.CO₂/kg brut de tourteau contre 0,46 kg eq.CO₂/kg brut de tourteau de colza, soit environ presque 3,5 fois plus. Pour la réponse zootechnique, le tourteau de colza permet une augmentation du taux protéique (TP) de 0,3 g/kg de lait et une diminution du taux butyreux (TB) de 1,2 g/kg de lait (Losq, 2016).

- *Application

Pour les simulations, la ration donnée aux animaux (VL et génisses) est restée identique, sauf pour la quantité de correcteur azoté apporté qui est 1,5 fois supérieure avec le tourteau de colza. La production de lait reste identique et les taux sont ajustés.

- Utilisation du concentré de production

- *Etat des connaissances

Les concentrés de production permettent d'équilibrer la ration et d'augmenter le rapport PDIE/UFL permettant d'augmenter la production de lait par vache (Vérité et Delaby, 1998) ce qui peut engendrer une diminution de l'empreinte carbone par unité de produit.

- *Application

Les simulations à base de concentrés de production ont été faites avec l'ajout de 5 kg de concentrés de production distribués en plus les 120 premiers jours après vêlage (soit 80% blé/20% soja, soit 70% blé/30% colza) avec une réponse de 0,7 kg de lait produit en plus par jour et par VL et une baisse de l'ingestion de fourrage de 0,4 kg par VL et par jour. Des concentrés de production sont encore distribués pour la croissance des génisses.

- Stade de récolte de l'herbe

- *Etat des connaissances

Travailler le stade de récolte de l'herbe permet de travailler sur sa qualité (UFL, PDI). Depuis plusieurs années, un essai sur les effets du stade de récolte de l'ensilage d'herbe a été lancé sur Trévarez afin de travailler sur l'autonomie protéique.

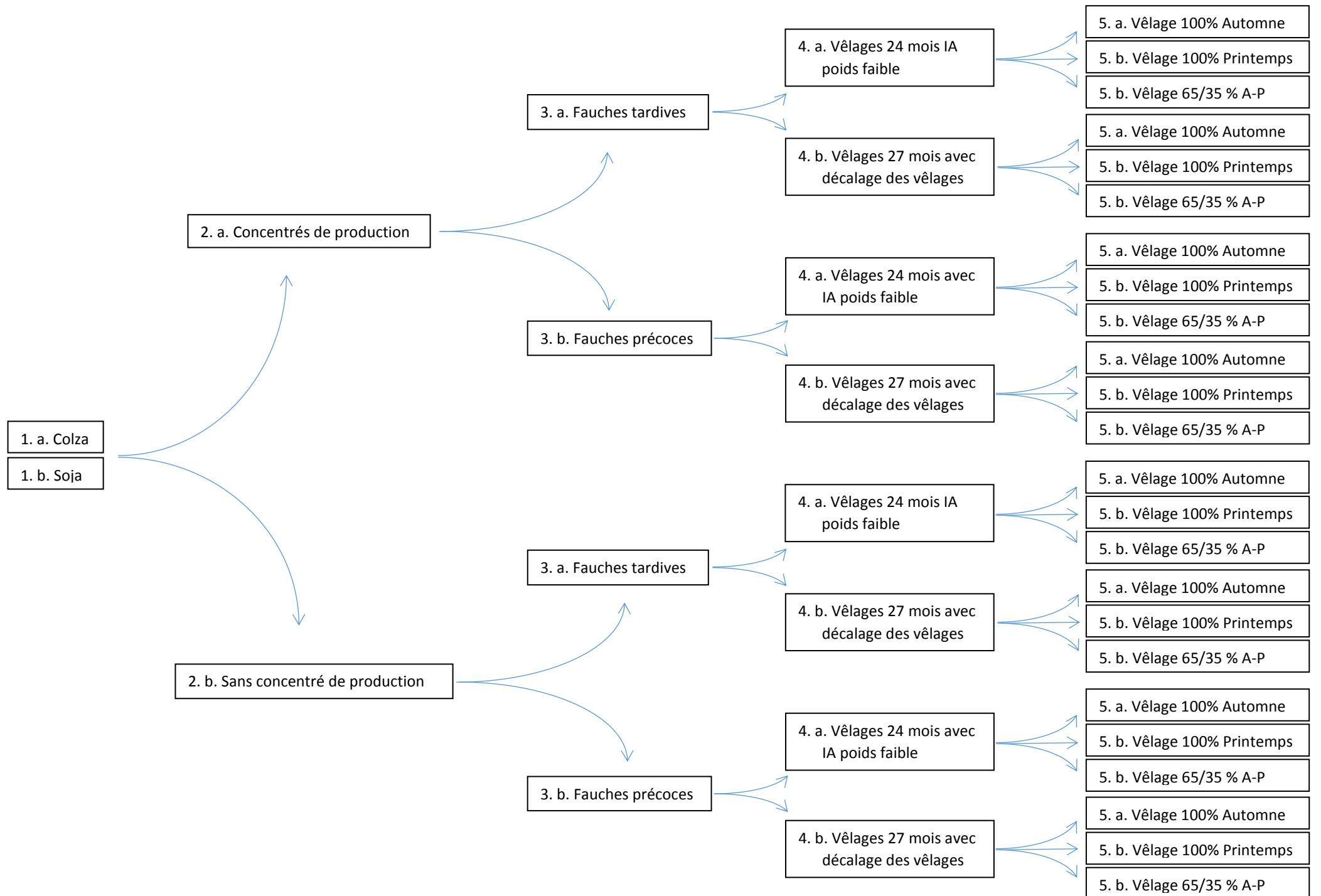


Figure 7: Organigramme représentant l'ensemble des modalités testés sous CAP'2ER®

*Application

Les simulations sont basées sur les valeurs de l'essai de 2014, année où des effets significatifs ont été trouvés. La production de lait augmente de 1,7 kg/VL/jour, le taux protéique gagne 0,9 g/kg de lait seulement chez les multipares et enfin, la quantité de fourrage ingérée augmente de 1 kg/VL/jour.

- Age moyen au premier vêlage

*Etat des connaissances

Passer à un âge moyen au premier vêlage de 24 mois en moyenne contre 27 mois aujourd'hui permettrait de réduire la période improductive des génisses sur l'exploitation. Aujourd'hui, la problématique de Trévezé est le nombre important de génisses 'vides' à 15 mois et qui sont inséminées en décalé. Ces génisses vêlent en moyenne à 30 mois augmentant la moyenne de l'âge au premier vêlage à 27 mois malgré l'objectif des 24 mois. Ces génisses décalées sont en fait des génisses qui n'ont pas atteint le poids nécessaire au moment de l'insémination artificielle (IA).

*Application

Les simulations sur des systèmes avec un âge moyen au premier vêlage de 24 mois ont faites avec des génisses inséminées toutes au même âge. Ceci a un impact sur la production laitière avec une baisse de production en première lactation fixée à - 300 kg par rapport aux autres primipares ayant atteint le poids suffisant.

- Période de vêlages

La décision de passer à des vêlages regroupés à 65% en automne et 35% au printemps a été prise pour avoir un nombre suffisant de génisses pour les essais expérimentaux. Les simulations ont permis de caractériser et évaluer les impacts de ce choix face à des vêlages exclusivement regroupés en automne ou au printemps.

Ces 5 leviers représentent en tout 11 modalités différentes. Afin d'obtenir le système le plus optimal, les leviers n'ont pas été étudiés indépendamment des autres mais avec le maximum d'associations entre chaque modalité pour représenter un maximum de systèmes possibles. 48 systèmes ont été établis correspondants à 48 simulations qui évaluent l'impact environnemental de l'ensemble de chaque système (Fig. 7).

En fonction des leviers et des systèmes, la modification de certains paramètres, tel que l'alimentation des vaches ou encore la pression des animaux, ont pu entraîner la libération de surfaces en herbe qui ont été mises en céréales. La fertilisation minérale et organique a été adaptée en fonction du nouvel assolement et de la quantité de fertilisants organiques disponibles.

3.2.2. Analyse environnementale

3.2.2.1. Outil CAP'2ER®

CAP'2ER®, Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Elevage de ruminants, est un outil d'analyse multicritères qui a été mis en place afin d'évaluer à l'échelle d'une exploitation ou d'un atelier (lait, viande) les impacts sur l'environnement. Ainsi, à travers différents indicateurs en rapport au changement climatique, à l'eutrophisation, la biodiversité, la consommation d'énergie, etc... il permet d'évaluer l'empreinte environnementale des ateliers laitiers et/ou de viande. CAP'2ER® se base sur une méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) en intégrant les impacts directs liés à la conduite du troupeau et indirects liés à l'utilisation d'intrants ainsi que la compensation carbone.

Cet outil permet de sensibiliser les éleveurs et les conseillers dans l'intégration des enjeux environnementaux au sein des exploitations. Notamment grâce à des références ou à d'autres

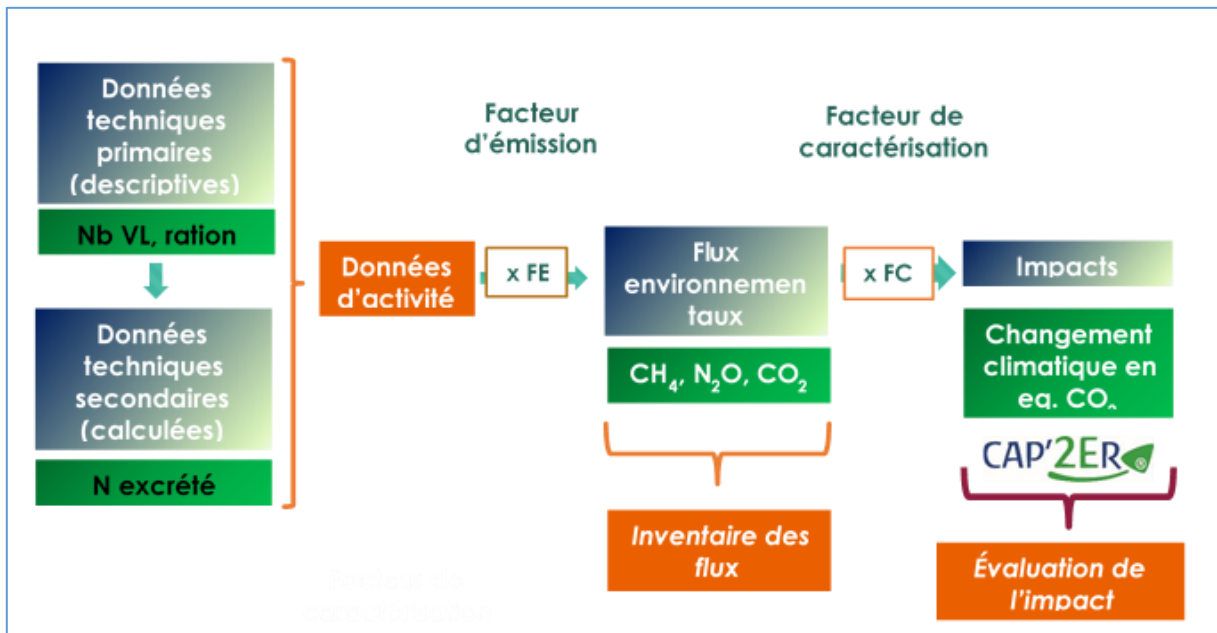


Figure 8: Méthodologie employée pour calculer les impacts environnementaux dans une ACV (Foray & Defrance, 2014)

Emissions brutes de GES - Stockage de carbone = Empreinte carbone nette

 -  =  kg éq. CO₂/l lait

Figure 9 : Equation de l'empreinte carbone nette exprimé par les émissions brutes de GES et le stockage carbone (en kg éqCO₂/litre de lait)

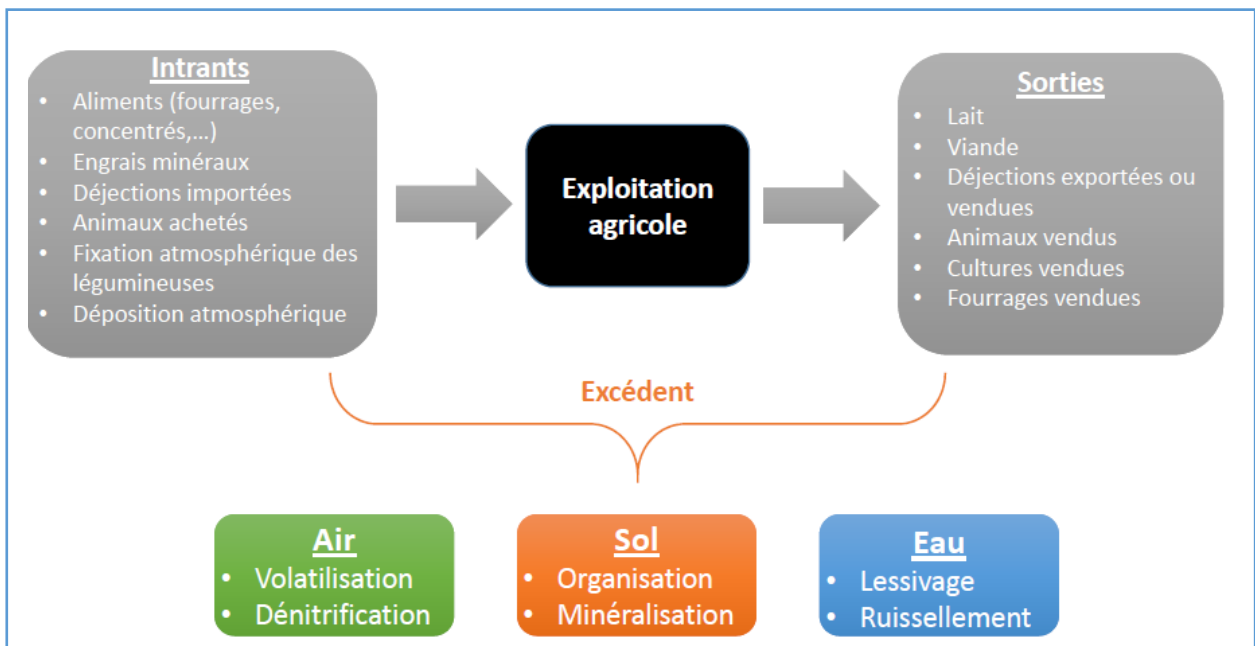


Figure 10 : Schéma représentant le bilan des minéraux d'une exploitation agricole (Foray et al., 2017)

exploitations, il est aussi possible d'agir en identifiant les marges de progrès et en mettant en place des actions pour améliorer l'empreinte environnementale en lien avec technicité et économie pour assurer la pérennité de l'exploitation.

A partir de données techniques primaires renseignées dans l'outil, celui-ci calcule des données techniques secondaires (ex : N excrété). L'ensemble de ces données liées à des facteurs d'émissions caractérisent les flux environnementaux (CH_4 , N_2O , CO_2) qui permettent d'évaluer l'impact environnemental du système (Fig. 8) (Foray et Defrance, 2014). Les facteurs d'émissions proviennent de référentiels spécifiques tel que GES'TIM.

Les données techniques primaires sont nombreuses (environ 150). Elles concernent les informations générales pour situer l'exploitation dans le bon contexte pédoclimatique, le type d'atelier et la main d'œuvre employé. Ensuite, ce sont des données sur la gestion du troupeau et de la reproduction (race, effectif, production, taux de renouvellement, etc...). Les informations sur le type de logement des animaux en bâtiment et leur durée de présence sont aussi renseignés ainsi que les imports/exports d'effluents. Il y a également les informations sur l'assolement, la fertilisation organique et minérale et le type de rotations présentes avec la présence des haies ou bosquets. Toutes les références sur l'alimentation sont nécessaires (les stocks, les achats et l'ingestion des aliments fourragés et concentrés). Enfin, ce sont les données sur la consommation d'énergie (fioul et électricité) qui sont renseignées.

Les informations renseignées pour les simulations sont des données existantes en fonction de ce qui a déjà été réalisé sur la station les années précédentes ou lors d'essais. Les données sont aussi des données prospectives en fonction des hypothèses émises et/ou de la bibliographie existante.

3.2.2.2. Indicateurs étudiés

48 systèmes ont été simulés croisant chaque levier d'action choisi afin d'évaluer l'impact environnemental et la durabilité de l'exploitation en fonction des contraintes imposées par chaque système.

- Emissions brutes de GES, empreinte carbone nette et stockage de carbone

Trois indicateurs en lien avec l'impact sur le climat sont étudiés, les émissions brutes de GES, le carbone stocké en lien avec la présence de prairies permanentes et temporaires et la présence de haies l'empreinte carbone nette (Fig. 9). Tous ces indicateurs sont exprimés en $\text{kg } \text{éqCO}_2/\text{litre de lait}$.

- Bilan des minéraux

L'outil calcule les pertes en azote et phosphore. Il permet notamment à partir du bilan apparent de l'azote d'estimer le potentiel de perte d'azote vers l'air et vers l'eau et son immobilisation dans le sol. Ce bilan des minéraux représente ainsi l'excédent de N et P non mis à profit pour la production (Fig. 10). Il est déterminé à partir de la composition des aliments et des rejets dans les déjections animales. Cet excédent est accompagné de la déposition atmosphérique et de la fixation symbiotique.

Les pertes vers l'air proviennent des émissions de diazote (N_2), de monoxyde d'azote (NO), d'ammoniac (NH_3) et protoxyde d'azote (N_2O) et sont liés aux engrais et aux déjections (bâtiment et pâturage) à leur stockage et leur épandage.

Les pertes vers l'eau, l'azote lixivié et/ou le phosphore ruisselé sont estimés à partir des données précédentes et de la variation du stock d'azote dans le sol lié à son stockage ou déstockage par les prairies et les cultures. Ainsi :

$$N \text{ lessivé (kg N/ha/an)} \\ = \text{excédent du bilan} + \text{déposition atmosphérique} + \text{fixation symbiotique} \\ - N \text{ stocké} - N \text{ destocké} - \text{pertes gazeuses vers l'air}$$

La quantité de phosphore ruisselé dépend de la composition en phosphore (P_2O_5) des déjections et des engrais minéraux et de leurs quantités épandues. Elle est exprimée en kg P ruisselé/ha/an.

- Autres indicateurs

D'autres indicateurs estimés par l'outil ont permis de jugé d'autres impacts potentiels sur l'environnement ou sur la durabilité de l'exploitation, tel que le maintien de la biodiversité, la performance nourricière ou encore la consommation d'énergie.

Le maintien de la biodiversité est obtenu à partir de tous les éléments agro-écologiques présents sur l'exploitation (bosquets (m^2), haies (ml), arbres isolés (nombre), cours d'eau (m), etc...) et est exprimé en ha éq/an. La performance nourricière fait le bilan du nombre de personnes nourries par année grâce au produit de l'exploitation en fonction du total de protéines animales produites et des besoins d'un individu. Le calcul se base sur la méthode PerfAlim proposé par le Centre d'Etude et de Recherche sur l'Economie et l'Organisation des Productions Animales (CEREOPA). Enfin, la consommation d'énergie est calculée à partir de la quantité d'intrants (engrais, aliments, animaux et paille) qui ont respectivement des facteurs d'émissions en MJ. Les quantités d'électricité et de carburants utilisées dans le système font également partis du calcul. La consommation d'énergie est exprimée en MJ/litre de lait.

3.2.2.3. Analyse des données

L'étude de chaque indicateur qui peut se faire à l'échelle de l'animal ou de la culture, a été faite à l'échelle de l'exploitation car l'intérêt est de se baser sur l'ensemble du système. Les systèmes peuvent ainsi être caractérisés avec l'ensemble des indicateurs pour s'apercevoir que si l'un est amélioré, l'autre n'est pas détérioré.

Pour l'étude de chaque levier et pour connaître le potentiel d'atténuation de l'empreinte carbone associé, chaque système a été comparé à son système « homologue » avec pour seule différence, le levier étudié. Par exemple, pour connaître le potentiel d'atténuation des émissions de GES associé à l'arrêt des concentrés de production, les mêmes systèmes ont été comparés, l'un ayant des concentrés de production et l'autre non.

Tableau 3: Emissions brutes de GES moyennes et empreinte carbone nette du lait avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et potentiel d'atténuation de l'EC nette

(kg éqCO ₂ /litre de lait)	EC Brute EC Nette	EC Brute EC Nette	EC Brute EC Nette	Potentiel d'atténuation moyen de l'EC brute	
<i>Correcteur azotée</i>	<i>Soja</i>	<i>Colza</i>			
	0,96	0,90		5,9%	↘
	0,86	0,80		(min. 4,3%, max. 7,2%)	
<i>Concentrés de production</i>	<i>Avec</i>	<i>Sans</i>			
	0,95	0,92		3,7%	↘
	0,85	0,81		(min. 2,2%, max. 5,1%)	
<i>Age au vêlage</i>	<i>27 mois</i>	<i>24 mois</i>			
	0,94	0,92		1,9%	↘
	0,84	0,82		(min. 1,0%, max. 2,3%)	
<i>Fauches</i>	<i>Tardives</i>	<i>Précoces</i>			
	0,94	0,93		1,1%	↘
	0,83	0,82		(min. 0%, max. 2,2%)	
<i>Période de vêlages</i>	<i>100% automne</i>	<i>100% printemps</i>	<i>65% A - 35% P</i>	<i>Automne</i>	<i>Printemps</i>
	0,94	0,93	0,93	0,3%	+0,7%
	0,83	0,82	0,83	(min.0,max. 1,1%)	(min.0,max.+2,1%)

4. Résultats

La simulation de 48 systèmes a été réalisée pour comparer l'impact environnemental de 5 leviers d'actions différents afin de trouver le système qui répond au mieux aux objectifs de l'étude.

4.1. Des effets contrastés

4.1.1. Indicateurs carbone

- L'utilisation du tourteau de colza

Une nette différence entre les émissions brutes liées au système à base de tourteau de soja et au système à base de tourteau de colza est notable (Tab. 3). En comparant les moyennes des deux types de systèmes, la moyenne des émissions brutes des systèmes à base de tourteau de soja est de **0,96 kg éqCO₂/litre de lait** contre **0,90 kg éqCO₂/litre de lait** pour les systèmes à base de tourteau de colza. Ainsi, passer d'un système à base de soja à un système à base de colza permettrait à la station de Trévarez de diminuer les émissions de GES de **6 %** (min. 4,3% et max. 7,2%). L'analyse faite sur l'empreinte carbone nette montre des résultats similaires avec une moyenne de 0,86 kg éqCO₂/litre de lait pour les systèmes à base de soja contre 0,80 kg éqCO₂/litre de lait pour les systèmes à base de colza, soit un potentiel d'atténuation de 6,5% (min. 4,8%, max. 8,1%).

- L'arrêt du concentré de production

En comparant les moyennes des émissions brutes de GES des systèmes avec des concentrés de production et des systèmes sans, celle des systèmes à base de concentrés de production est d'environ **0,95 kg éqCO₂/litre de lait** contre **0,92 kg éqCO₂/litre de lait** pour les systèmes sans concentré de production (Tab. 3). Ainsi, passer à un système sans concentré de production permettrait une diminution des émissions par litre de lait de **4%** malgré l'augmentation de la production de lait (min. 2,2%, max. 5,1%). L'arrêt des concentrés de production diminue également l'empreinte carbone nette qui passe en moyenne de 0,85 kg éqCO₂/litre de lait à 0,81 kg éqCO₂/litre de lait, soit une baisse de 5% environ (min. 2,2%, max. 5,1%).

- Passage à un âge au premier vêlage de 24 mois

L'étude de l'âge moyen au premier vêlage montre que les émissions brutes des systèmes basés sur un âge moyen au vêlage de 24 mois a tendance à être plus basse que les émissions brutes des systèmes basés sur un âge au vêlage de 27 mois (Tab. 3). En effet, en comparant les moyennes des deux types de systèmes, les émissions brutes moyennes des systèmes en vêlages à 27 mois est d'environ **0,94 kg éqCO₂/litre de lait** contre **0,92 kg éqCO₂/litre de lait** pour la moyenne des systèmes en vêlages 24 mois. Ainsi, baisser la moyenne de l'âge au vêlage permettrait une atténuation moyenne des émissions brutes de **2%** environ (min. 1%, max. 2,3%). Une légère diminution de l'empreinte carbone nette a également été montrée avec une EC nette moyenne de 0,84 kg éqCO₂/litre de lait pour les systèmes en vêlage 27 mois contre 0,82 kg éqCO₂/litre de lait pour les systèmes en vêlages 24 mois, soit une baisse de 2% environ (min. 1,1%, max. 2,5%).

- Passage en fauches précoces

Peu de différence d'émissions brutes existent entre les systèmes de stades de récoltes différentes. En effet, la moyenne des émissions brutes des systèmes basés sur des fauches

Tableau 4: Excédent du bilan d'azote moyen avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

(kg N/ha/an)	Excédent N Min-Max	Excédent N Min-Max	Excédent N Min-Max	Incidence moyenne sur l'indicateur		
<i>Correcteur azoté</i>	<i>Soja</i>	<i>Colza</i>				
	55-82	61-89			+6,5 kg	↗
<i>Concentrés de production</i>	<i>Avec</i>	<i>Sans</i>				
	71-89	55-71			-17 kg	↘
<i>Age au vêlage</i>	<i>27 mois</i>	<i>24 mois</i>				
	56-89	55-88			-2 kg	↘
<i>Fauches</i>	<i>Tardives</i>	<i>Précoces</i>				
	59-89	55-87			-3 kg	↘
<i>Période de vêlages</i>	<i>100% automne</i>	<i>100% printemps</i>	<i>65% A - 35% P</i>	<i>Automne</i>	<i>Printemps</i>	
	60-89	55-83	58-85	-2 kg	+3 kg	↘ ↗

Tableau 5: Potentiel d'azote lixivié moyen avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

(kg N/ha/an)	N lixivié Min-Max	N lixivié Min-Max	N lixivié Min-Max	Incidence moyenne sur l'indicateur		
<i>Correcteur azoté</i>	<i>Soja</i>	<i>Colza</i>				
	0-19	2,8-25			+5 kg	↗
<i>Concentrés de production</i>	<i>Avec</i>	<i>Sans</i>				
	11-25	0-11			-14 kg	↘
<i>Age au vêlage</i>	<i>27 mois</i>	<i>24 mois</i>				
	0-25	0-25			-1 kg	↘
<i>Fauches</i>	<i>Tardives</i>	<i>Précoces</i>				
	2-25	0-22			-4,5 kg	↘
<i>Période de vêlages</i>	<i>100% automne</i>	<i>100% printemps</i>	<i>65% A - 35% P</i>	<i>Automne</i>	<i>Printemps</i>	
	0-25	0-22	0-23	-1 kg	+2 kg	↘ ↗

précoces est légèrement plus faible que celle des systèmes basés sur des fauches tardives, la différence est seulement de **1,1%** avec une moyenne de **0,93 kg éqCO₂/litre de lait** en fauches précoces contre **0,94 kg éqCO₂/litre de lait** en fauches tardives. Sur certains systèmes, le passage en fauches précoces n'a aucun effet sur les émissions brutes qui restent identiques. Leur potentiel d'atténuation va alors de 0 à 2,2%. Les résultats sont similaires pour l'empreinte carbone nette avec une moyenne d'atténuation de 1,1% avec le passage en fauches précoces (min. 0%, max. 2,3%) (Tab. 3).

- Période de vèlages

Il existe très peu voire pas de différence entre les périodes de vèlages. Les résultats tendent à montrer que les émissions brutes sont légèrement inférieures quand 100% des vèlages sont au printemps par rapport à une partition de 65% en automne et 35% au printemps avec une différence moyenne de **0,67%** entre les systèmes (0,68% pour les émissions brutes). A contrario, lorsque les vèlages sont 100% en automne, les émissions brutes sont légèrement supérieures par rapport à la partition 65-35% des vèlages avec une différence **0,33%** (0,45% pour l'empreinte carbone nette). Ainsi, même si une légère différence existe entre les systèmes de périodes de vèlages différentes, cette différence aura un impact minime sur le système final (Tab. 3).

4.1.2. Indicateurs azote

4.1.2.1. *Excédent d'azote et qualité des sols*

L'excédent d'azote est plus important pour les systèmes à base de colza avec en moyenne **6,5 kg N/ha** en plus que les systèmes à base de soja. Les systèmes sans concentré de production ont en moyenne **17 kg/ha** de N en moins que les systèmes à base de concentrés de production. Les systèmes d'âge moyen au premier vèlage de 24 mois ont en moyenne **2 kg/ha** de N en moins excédent par rapport à un âge moyen de 27 mois. En fauches précoces, la quantité de N est en moyenne **3 kg/ha** inférieure qu'en fauches tardives. Pour la partition des vèlages dans l'année, par rapport à des vèlages répartis 65% en automne et 35% au printemps, la quantité d'entrée de N est **2 kg/ha** plus importante pour des vèlages 100% en automne mais **3 kg/ha** moins importante pour des vèlages 100% de printemps (Tab. 4).

La quantité de N stocké dans le sol par les prairies ou les cultures reste la même sur l'ensemble des systèmes qui est de **13,5 kg N/ha**.

4.1.2.2. *Qualité de l'eau*

L'arrêt des concentrés de production permettrait de diminuer en moyenne **14 kg/ha** la quantité de N lixivié chaque année avec des valeurs de lessivage d'azote potentiel de **11 à 25 kg N/ha** pour les systèmes à base de concentrés de production contre **0 à 11 kg N/ha** sans concentré de production. Le passage d'un système en fauches tardives à un système en fauches précoces permettrait de diminuer en moyenne de **4,5 kg** la quantité de N lixivié/ha. Un système en fauches tardives compte à un potentiel de lessivage d'azote de **2 à 25 kg N/ha** contre **0 à 22 kg N/ha** en fauches précoces. Ensuite, diminuer l'âge au premier vèlage diminuerait la quantité potentielle de N lessivé de **1 kg/ha** en moyenne mais avec un potentielle de lessivage minimum et maximum identique de **0 à 25 kg N/ha** (Tab.5).

Le passage d'un correcteur azoté à base de tourteaux de soja à du tourteau de colza détériore à priori la qualité des eaux avec une augmentation de **5 kg N/ha** en moyenne de la quantité de N potentiellement lixivié avec un potentiel de **0 à 19 kg N lixivié/ha** pour le système à base de tourteaux de soja et **2,8 à 25 kg N lixivié/ha** pour le système à base de tourteaux de colza (Tab. 5).

Tableau 6: Perte potentiel d'azote vers l'air moyenne avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

(kg N/ha/an)	Perte N vers l'air	Perte N vers l'air	Perte N vers l'air	Incidence moyenne sur l'indicateur		
<i>Correcteur azoté</i>	<i>Soja</i>	<i>Colza</i>				
	43-51	44-52		+1 kg		↗
<i>Concentrés de production</i>	<i>Avec</i>	<i>Sans</i>				
	46-52	43-48		-3 kg		↘
<i>Age au vêlage</i>	<i>27 mois</i>	<i>24 mois</i>				
	44-52	43-51		-1 kg		↘
<i>Fauches</i>	<i>Tardives</i>	<i>Précoces</i>				
	43-50	44-52		+1 kg		↗
<i>Période de vêlages</i>	<i>100% automne</i>	<i>100% printemps</i>	<i>65% A - 35% P</i>	<i>Automne</i>	<i>Printemps</i>	
	45-52	43-49	44-51	-1 kg	+1 kg	↘ ↗

Tableau 7 : Potentiel de phosphore ruisselé moyen avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

(kg P/ha/an)	P ruisselé	P ruisselé	P ruisselé	Incidence moyenne sur l'indicateur		
<i>Correcteur azoté</i>	<i>Soja</i>	<i>Colza</i>				
	0,164	0,165		+0,28%		=
<i>Concentrés de production</i>	<i>Avec</i>	<i>Sans</i>				
	0,168	0,161		4,63%		↘
<i>Age au vêlage</i>	<i>27 mois</i>	<i>24 mois</i>				
	0,165	0,164		0,63%		=
<i>Fauches</i>	<i>Tardives</i>	<i>Précoces</i>				
	0,164	0,164		0,00%		=
<i>Période de vêlages</i>	<i>100% automne</i>	<i>100% printemps</i>	<i>65% A - 35% P</i>	<i>Automne</i>	<i>Printemps</i>	
	0,164	0,165	0,165	+0,42%	+0,11%	

Tableau 8: Consommation d'énergie moyenne avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et incidence moyenne sur l'indicateur

(MJ/Litre de lait)	Consommation d'énergie	Consommation d'énergie	Consommation d'énergie	Incidence moyenne sur l'indicateur		
<i>Correcteur azoté</i>	<i>Soja</i>	<i>Colza</i>				
	2,7	2,5		7,9%		↘
<i>Concentrés de production</i>	<i>Avec</i>	<i>Sans</i>				
	2,7	2,5		7,8%		↘
<i>Age au vêlage</i>	<i>27 mois</i>	<i>24 mois</i>				
	2,6	2,6		0,0%		=
<i>Fauches</i>	<i>Tardives</i>	<i>Précoces</i>				
	2,6	2,5		2,0%		↘
<i>Période de vêlages</i>	<i>100% automne</i>	<i>100% printemps</i>	<i>65% A - 35% P</i>	<i>Automne</i>	<i>Printemps</i>	
	2,6	2,6	2,6	0,0%	+0,6%	

Regrouper 65% des vèlages en automne et 35% au printemps diminuerait la quantité de N lessivé par rapport aux systèmes avec 100% des vèlages regroupés en automne à une hauteur moyenne de **1 kg N/ha**. Cependant, l'inverse est observé pour les systèmes où les *vèlages sont regroupés 100% au printemps*. Ce serait 2 kg de N lixivé en plus en moyenne sur l'année (Tab. 5).

4.1.2.3. Qualité de l'air

La qualité de l'air est caractérisée par la quantité émise de diazote (N₂), de monoxyde d'azote (NO), d'ammoniac (NH₃) et protoxyde d'azote (N₂O) et correspond à la perte d'azote vers l'air par hectare et par année, exprimée en kg N/ha/an. Comparé aux pertes d'azote vers l'eau, les leviers d'action ne possèdent pas autant d'impacts sur les pertes d'azote vers l'air. La différence entre chaque système est beaucoup moins importante dans son amélioration ou sa détérioration. En effet, l'arrêt des concentrés de production diminuerait en moyenne de **3 kg** les rejets d'azote vers l'air, et le passage à un âge au vèlage moyen de 24 mois les diminuerait de **1 kg** (Tab. 6).

Cependant le passage en fauches précoces va potentiellement détériorer la qualité de l'air avec **1 kg** en moyenne de perte d'azote en plus par rapport à des systèmes en fauches tardives. Le passage à du tourteau de colza donne le même résultat avec **1 kg** de rejets d'azote potentiel vers l'air en plus en moyenne par rapport au tourteau de soja (Tab. 6).

4.1.3. Indicateur phosphore

Pour le ruissèlement du phosphore, la mise en place de leviers d'actions possède peu voire pas d'impact sur les systèmes analysés. En effet, l'arrêt des concentrés de production diminuerait de **4,6%** en moyenne la quantité de P ruisselé et qui diminuerait seulement de **0,6%** avec un âge au vèlage moyen de 24 mois à la place de 27 mois. Le passage en fauches précoces pour l'herbe conservée n'a à priori aucun impact sur la quantité de P ruisselé. Le passage à du tourteau de colza à la place de soja augmenterait seulement de **0,3%** la quantité de P ruisselé. La période de vèlage possède très peu d'impact sur le ruissèlement de P avec seulement potentiellement **0,4% et 0,1%** de rejets en plus pour des vèlages 100% automne et 100% printemps par rapport à 65% des vèlages en automne et 35% au printemps (Tab. 7).

4.1.4. Autres indicateurs

Pour l'ensemble des leviers d'actions, aucun ne semble consommer plus d'énergie avec leur mis en place. En effet, le passage à un système à base de tourteaux de colza, à la place du tourteau de soja réduirait en moyenne la consommation d'énergie par litre de lait de **7,9%** sur l'ensemble des systèmes. Dans le même ordre de grandeur, l'arrêt des concentrés de production diminuerait de **7,8%** en moyenne la consommation d'énergie. Passer en fauches précoces diminuerait également la consommation d'énergie par litre de lait d'environ **2%** sur l'ensemble des systèmes testés. Travailler sur l'âge moyen au premier vèlage n'a pas d'effet sur la consommation d'énergie. Enfin, la partition des vèlages principalement en automne puis au printemps ne consommerait pas plus d'énergie au litre de lait que si les vèlages étaient 100% en automne. Cependant, la consommation augmenterait par rapport à des vèlages réalisés 100% au printemps mais de seulement **0,6%** en moyenne sur l'ensemble des systèmes (Tab. 8).

La performance nourricière de l'ensemble des systèmes a également été étudiée. La mise en place des leviers d'actions détériore plutôt cet indicateur avec une baisse du nombre de personnes nourries par an. Passer à un système colza par rapport au soja ne changerait pas la performance nourricière du système. Le même résultat est obtenu avec le passage d'un âge au premier vèlage moyen de 24 mois où le nombre de personnes nourries diminuerait seulement en moyenne de **0,1%**. Ce nombre est plus important avec l'arrêt des concentrés de production

Tableau 9: Performance nourricière moyenne avec la mise en place de 5 leviers d'actions (correcteur azoté, concentrés de production, âge au premier vêlage, stade de récolte de l'herbe & période de vêlage) et potentiel d'atténuation

	Nombre de personnes nourries/an	Nombre de personnes nourries/an	Nombre de personnes nourries/an	Potentiel d'atténuation moyen	
Correcteur azoté	<i>Soja</i>	<i>Colza</i>			
	3664	3664		0,0%	=
Concentrés de production	<i>Avec</i>	<i>Sans</i>			
	3741	3587		4,1%	↘
Age au vêlage	<i>27 mois</i>	<i>24 mois</i>			
	3666	3662		0,1%	=
Fauches	<i>Tardives</i>	<i>Précoces</i>			
	3581	3747		+4,6%	↗
Période de vêlages	<i>100% automne</i>	<i>100% printemps</i>	<i>65% A - 35% P</i>	<i>Automne</i>	<i>Printemps</i>
	3684	3640	3669	0,4%	+0,8%

Tableau 10: Caractéristiques du meilleur (simulation 18) et moins bon (simulation 33) système sur l'empreinte environnementale

	Simulation 18	Simulation 33
	Colza	Soja
	Sans concentré de production	Avec concentrés de production
	Fauches précoces	Fauches tardives
	Vêlage 24 mois	Vêlage 27 mois
Bilan système		
Production laitière corrigée (l/VL/an)	7497	7619
TB (g/kg)	39,7	38,5
TP (g/kg)	31,6	31,3
g concentrés/litre de lait	77,53	135,2
Autonomie protéique (%)	79,47	73,03
Changement climatique		
Emissions brutes (kg éqCO2/litre de lait)	0,88	1
Empreinte carbone nette (kg éqCO2/litre de lait)	0,77	0,89
Stockage carbone (kg éqCO2/litre de lait)	0,106	0,105
Azote et phosphore		
Bilan N (kg N/ha)	64,82	78,61
N stocké (kg N/ha)	13,52	13,52
Potentiel de perte N dans l'air (kg N/ha)	46,23	47,49
Potentiel de lessivage de N (kg N/ha)	5,07	17,6
P ruisselé (kg P/ha)	0,16	0,168
Stockage-biodiversité-énergie		
Maintien de la biodiversité (ha éq/an)	644,5	644,5
Consommation de l'énergie (MJ/litre de lait)	2,36	2,81
Performance nourricière (Nb de personnes nourries/an)	3674	3690

avec une diminution potentielle de **4,1%** en moyenne de personnes nourries par an sur l'ensemble des systèmes. La période de vèlages a peu d'effet sur cet indicateur avec seulement **0,4%** de personnes nourries en moins en moyenne pour les systèmes avec 65% de vèlages d'automne et 35% de printemps par rapport à des vèlages 100% d'automne mais **0,8%** de personnes nourries en plus par rapport à des vèlages 100% de printemps (Tab. 9).

Le maintien de la biodiversité en ha éq/an est identique à chaque système ce qui s'explique par le fait que les éléments agro-écologiques ne sont jamais modifiés. Sa valeur est de 644,5 ha éq.

Le stockage de carbone est identique à tous les systèmes sauf ceux où des surfaces en culture ont été ajoutées et des surfaces en prairies temporaires enlevées. Cela concerne pratiquement tous les systèmes à base de colza avec des concentrés de productions sauf quand les vèlages sont 100% en automne. Pour ces derniers systèmes le stockage carbone varie de 113 548 kg éqCO₂/an pour les systèmes avec plus de surfaces modifiées en cultures à 119 021 kg éqCO₂/ha pour les systèmes avec le moins de surfaces modifiées. Sinon, les autres systèmes qui conservent leur SAU identique ont un stockage carbone de 119 127 kg éqCO₂/an.

4.2. Le système le plus performant

Pour avoir un impact environnemental le moins important possible et parmi l'ensemble des leviers testés dans l'étude, le profil retenue est un système à base de tourteaux de colza, sans concentré de production avec un ensilage d'herbe récolté en fauches précoces, des génisses qui vèlent en moyenne à 24 mois et une répartition des vèlages de 65% en automne et 35% au printemps (Tab. 10).

Ce système est un système avec une production laitière corrigée de 7497 L/VL/an avec un TB de 39,7 g/kg de lait et un TP de 31,6 g/kg de lait. La quantité de concentrés utilisés est de 77,53 g/litre de lait. L'autonomie protéique est de 79,47%.

Au niveau des indicateurs de changement climatique, les émissions brutes de GES sont de 0,88 kg éqCO₂/litre de lait et son empreinte carbone nette de 0,77 kg éqCO₂/litre de lait avec un stockage carbone de 0,106 kg éqCO₂/litre de lait. Parmi tous les systèmes, ce système est celui qui possède les plus basses valeurs d'empreintes carbone excepté le même système avec des vèlages 100% réalisés au printemps qui ne correspond donc pas aux critères choisis au départ pour avoir un nombre de génisses suffisants.

Pour le bilan des minéraux, l'excédent d'azote est de 64,82 kg N/ha. La quantité de N stocké dans le sol est de 13,52 kg N/ha. 46,23 kg N/ha sont potentiellement perdus vers l'air et 5,07 kg N/ha sont potentiellement lixiviés avec 0,160 kg P/ha ruisselé. Parmi tous les systèmes, il n'est pas celui qui rejette le moins d'azote vers l'air et/ou vers l'eau (idem pour le phosphore). Cependant, le meilleur système du point de vue des rejets azotés et phosphatés est un système à base de soja qui détériore trop l'empreinte carbone qui est alors trop élevée (0,93 kg éqCO₂/litre de lait pour les émissions brutes et 0,82 kg éqCO₂/litre de lait pour l'EC nette).

Le maintien de la biodiversité est assuré par 644,5 ha éq. La consommation d'énergie est de 2,36 MJ/litre de lait et ce sont 3674 personnes qui peuvent être nourries avec ce système.

En comparaison, le moins bon système est un système à base de tourteaux de soja, avec des concentrés de production avec un ensilage d'herbe récolté en fauches tardives et des génisses qui vèlent en moyenne à 27 mois.

La production laitière corrigée de ce système est de 7619 L/VL/an avec un TB de 38,5 g/kg de lait et un TP de 31,3 g/kg de lait. La quantité de concentrés utilisés est de 135,2 g/litre de lait et l'autonomie protéique est de 73,03%.

Pour les indicateurs de changement climatique, les émissions brutes de GES sont de 1,00 kg eqCO_2 /litre de lait et l'empreinte carbone nette est de 0,89 kg eqCO_2 /litre de lait, soit respectivement environ 14 et 16% de plus que le meilleur système. Le stockage carbone est de 0,105 kg eqCO_2 /litre de lait.

Le bilan des minéraux est caractérisé par un excédent de N de 78,61 kg N/ha, dont 13,52 kg N/ha reste stockés dans le sol, 4,49 kg N/ha sont potentiellement des pertes vers l'air et 17,6 kg N/ha sont potentiellement lixiviés ce qui représente presque 3,5 fois plus d'azote lixivié que le meilleur système. 0,168 kg P/ha est potentiellement ruisselé.

La même quantité de carbone est stockée par an et la surface de maintien de biodiversité est également identique au meilleur système. La consommation d'énergie est plus importante avec 2,81 MJ/litre de lait et le nombre de personnes nourries est de 3690.

5. Discussion

Cette dernière partie se compose en trois sections. Les différences entre chaque système en fonction des leviers d'actions sont expliquées dans un premier temps suivi d'une discussion sur le système retenu en fonction des objectifs fixés au départ pour finir sur les limites et les perspectives de l'étude.

5.1. Des effets leviers contrastés

A partir des résultats précédents et en comparant l'ensemble des systèmes, 4 groupes se distinguent sur leur impact environnemental ; les systèmes à base de tourteaux de soja avec des concentrés de productions, ceux à base de tourteaux de soja sans concentré de production, les systèmes à base de tourteaux de colza avec des concentrés de production. Enfin, les systèmes à base de tourteaux de colza sans concentré de production.

5.1.1. Différences entre systèmes à base de soja et colza

Les systèmes à base de tourteaux de soja se différencient des systèmes à base de tourteaux de colza au niveau de l'empreinte carbone mais également sur les rejets d'azote. Les systèmes à base de soja ont à priori une empreinte carbone (brute et nette) relativement plus élevée que les systèmes à base de colza s'expliquant par le fait que le facteur d'émission de CO₂, en kg éqCO₂/kg de MB achetée par l'achat du tourteau de soja est presque 3,5 fois plus élevé que celui lié à l'achat d'un tourteau de colza lié à sa fabrication et son transport. Ainsi, la substitution du soja au colza permet de diminuer, sur le système de Trévarez, de 5 à 8% environ les émissions de GES. Des résultats similaires, avec une diminution de 3 à 7% des émissions sont présentés dans une étude qui présente l'effet de leviers d'actions sur les émissions de GES (Dollé et al., 2011).

Cependant, les rejets d'azote paraissent globalement plus élevés pour les systèmes à base de tourteaux de colza. La principale cause est liée à l'ingestion totale d'azote de la ration qui est plus importante dans les rations à base de colza. La teneur en azote de la ration dépend de la teneur en MAT en g/kg de MS des fourrages et de MB des concentrés. Même si la MAT du tourteau de soja (425 g/kg de MB) est plus élevée que celle du tourteau de colza (350 g/kg de MB), la quantité de tourteaux ingérés est 1,5 fois plus importante pour les systèmes à base de tourteaux de colza. Ceci a deux conséquences, la première est que l'excédent du bilan apparent du système est plus important car l'entrée d'azote liée aux concentrés est plus importante pour des sorties identiques (lait & viande). La deuxième est que les rejets d'azote dans les déjections sont plus importants car ils dépendent en partie de l'azote ingéré. Les émissions d'azote en bâtiment, au pâturage, au stockage ou à l'épandage sont donc plus importantes, dégradant la qualité de l'air même si la différence serait de +1,4 kg N perdu/ha maximum sur l'ensemble de nos systèmes. La qualité de l'eau est également plus détériorée en système à base de colza car comme cité précédemment, l'excédent du bilan du système est plus important. Même si la fixation symbiotique est plus importante en système soja (max. 3,6 kg N/ha) lié à des surfaces en PT plus importantes, cela ne compense pas le fait que la quantité d'azote dans le sol est plus importante pour les systèmes à base de colza.

La consommation d'énergie est plus importante pour les systèmes soja car de la même manière que les émissions de GES pour l'EC, le facteur d'émission d'énergie en MJ/kg de MB de soja est 2,5 fois plus élevé que celui de colza.

Même si remplacer le soja par du colza ne représente pas le levier le plus efficace dans la réduction des rejets d'azote ou de phosphore, il l'est dans la réduction des émissions de GES parmi tous ceux étudiés pour la ferme de Trévarez et constitue donc un levier clé.

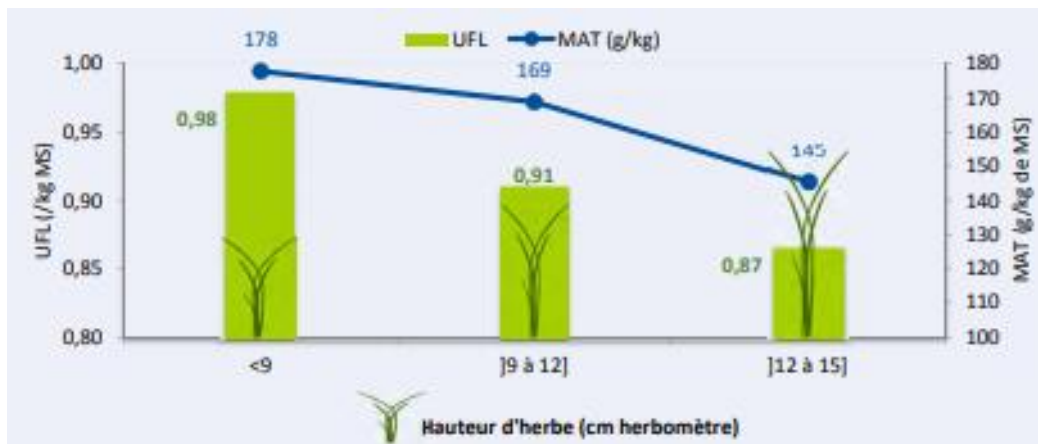


Figure 11: Evolution des valeurs de l'herbe (UFL, MAT) au cours de sa repousse (Bellot et al., 2017)

5.1.2. Différences entre systèmes avec et sans concentrés de production

Les systèmes avec et sans concentrés de production se différencient également sur l'empreinte carbone, les rejets azotés et la consommation d'énergie. L'empreinte carbone par litre de lait est moins importante pour les systèmes sans concentré de production (-5% d'émission de GES). Les rejets azotés sont également moins importants que ce soit vers l'air et plus particulièrement vers l'eau. Ce s'explique par la quantité de concentrés par litre de lait achetés et ingérés beaucoup moins importante ($\approx 2,3$ fois moins) pour les systèmes sans concentré de production. Les facteurs d'émissions de CO₂ ou d'énergie sont multipliés à des quantités d'intrants plus importantes pour les systèmes avec des concentrés de production augmentant les émissions de GES totales et la consommation d'énergie. Ensuite, la quantité totale d'azote ingéré est aussi plus importante, augmentant sa teneur dans les déjections et donc, comme vu précédemment, l'excédent d'azote est plus important, dégradant a priori la qualité du sol et de l'air et de l'eau.

L'analyse de ce levier avait pour but de vérifier si augmenter la production pouvait diminuer l'empreinte carbone par unité de produit. Les simulations avec le postulat émis au départ montrent que ce n'est pas le cas avec cette stratégie (ajout de concentrés de production pour produire plus de lait). Des conclusions similaires ont été tirées d'une étude travaillant sur l'atténuation des émissions de GES (Vellinga et al., 2011) ainsi qu'une étude qui montre que l'efficacité de ce levier, augmenter la production de lait, dépend du système étudié (Gerber et al., 2011). En plus de dégrader l'empreinte carbone, les rejets d'azote sont plus importants dégradant le milieu. Cependant, un système à base de concentrés de production a l'avantage d'avoir une meilleure performance nourricière grâce à la production de lait plus importante.

5.1.3. Différences entre systèmes d'âge au premier vêlage de 27 et 24 mois

Diminuer l'âge moyen au premier vêlage de 27 mois à 24 mois permet de diminuer la durée de présence d'animaux non productifs sur l'exploitation et ainsi diminuer les émissions de GES et/ou les autres rejets. Pour le système de Trévarez, passer à un âge au premier vêlage moyen de 24 mois permet de diminuer la pression en UGB à 160,5 UGB/an contre 164,5 UGB/an pour les vêlages à 27 mois diminuant ainsi la quantité d'aliments ingérés et les quantités de rejets comme les déjections ou le CH₄ entérique. Une diminution de 2% des émissions de GES serait alors observée, ce qui correspond à l'ordre de grandeur présenté dans l'étude sur les effets des leviers qui estiment une diminution de 0 à 5% des émissions de GES grâce à la gestion du troupeau et de son renouvellement (Dollé et al., 2011). En plus de la diminution de l'EC, passer à des âges au premier vêlage de 24 mois réduirait de l'azote lixivié et les pertes d'azote vers l'air.

La réduction de l'âge au premier vêlage ne constitue pas le levier le plus efficace dans la diminution des émissions des GES surtout à Trévarez où la moyenne était déjà à 27 mois mais la réduction de 2% des émissions reste non négligeable.

5.1.4. Différences entre systèmes fauches tardives et précoces

Travailler sur le stade de récolte de l'herbe permet de travailler sur la valeur nutritive de l'herbe afin de gagner en autonomie protéique et d'améliorer les performances. Des essais ont déjà montré que l'herbe au stade précoce possède des valeurs en MAT et en UFL plus importantes (Fig. 11) (Bellot et al., 2017). De plus, un essai en cours sur la ferme de Trévarez a déjà montré en 2014 une augmentation de la production laitière et du TP chez les multipares. Grâce aux données de l'essai, le passage en fauches précoces permettrait de réduire de 1% les émissions de GES par litre de lait.

Les émissions d'azote vers l'air augmenteraient ainsi que la quantité de méthane entérique produit car la teneur en MAT de l'ensilage est plus importante augmentant les rejets

rejets d'azote dans les déjections. Le méthane entérique quant à lui augmente car la digestibilité de la matière organique de l'herbe en fauches précoces est plus importante augmentant l'activité méthanogène et donc les rejets. Enfin, la consommation de carburant augmente avec le nombre de coupes réalisées et augmentant ainsi la quantité de CO₂ émis. Ainsi, avec la quantité de lait produit qui augmente, l'EC est améliorée mais pas d'un écart important. La quantité d'azote lixivié diminuerait et la production de lait qui augmente n'est pas négligeable d'un point de vue économique.

5.1.5. Différences entre les différentes périodes de vèlages

L'empreinte environnementale des systèmes avec des vèlages exclusivement regroupés au printemps est meilleure que pour les systèmes avec des vèlages regroupés en automne. Cela s'explique par le fait que le niveau d'ingestion des vaches et la quantité de concentrés sont plus importants pour les vaches qui vèlent en automne. Cela implique une augmentation des rejets dans les déjections, une augmentation des émissions de CO₂ lié aux concentrés et également une augmentation des émissions de méthane entérique. Pour la mise en place d'un système avec un faible impact environnemental, les vèlages de printemps sont préférables sauf si des contraintes, comme à Trévarez, existent. De plus, la production de lait des systèmes en vèlages d'automne est plus importante, l'impact économique est donc aussi à prendre en compte.

5.2. Quel système à mettre en place ?

La mise en place du système bas carbone sur la ferme de Trévarez doit répondre à plusieurs objectifs. Premièrement, la diminution de l'empreinte carbone du lait doit atteindre 20% dans les 4 à 5 années de suivi, soit une empreinte carbone située entre 0,6 et 0,8 kg éqCO₂/litre de lait pour les émissions brutes de GES et entre 0,5 et 0,7 kg éqCO₂/litre de lait pour les émissions nettes, afin notamment de faire partie (voire de dépasser) du top 10 des élevages du réseau Carbon Dairy, un projet national ayant pour but de diminuer les émissions de GES de 20% de ses élevages. L'autre objectif majeur est de ne pas compromettre la rentabilité économique du système laitier et la viabilité au travail. Enfin, le système doit présenter une faible empreinte environnementale globale (faibles pertes d'azote, de phosphore, etc ...).

L'empreinte carbone la plus basse parmi tous les systèmes simulés est de 0,88 kg éqCO₂/litre de lait pour les émissions brutes et de 0,77 kg éqCO₂/litre de lait pour l'empreinte nette, s'approchant des objectifs fixés en rentrant dans le top 10 des élevages du réseau Carbon Dairy ayant entre 20 et 40% de surface de maïs dans leur SFP. L'empreinte carbone nette de ces élevages est de 0,78 kg éqCO₂/litre de lait et de 0,88 kg éqCO₂/litre de lait.

Pour aller plus loin, les références Carbon Dairy montrent que les meilleurs élevages ayant moins de 20% de maïs dans leur SFP ont une empreinte carbone nette de 0,66 kg éqCO₂/litre de lait et une empreinte carbone brute de 0,81 kg éqCO₂/litre de lait. Pour atteindre ces niveaux de performance, il serait nécessaire de réorienter le système de Trévarez avec une part d'herbe plus importante. Cependant, cette décision remettrait en cause le choix d'avoir fixé 25 ares/VL. Deux choix s'offrent pour la poursuite de l'étude, soit garder les mêmes objectifs et changer le système en augmentant la surface en prairie, soit garder le même système pour rester dans la moyenne bretonne et garantir une répétabilité en fixant une EC minimale.

Le système proposé n'est pas celui qui possède les plus faibles rejets azotés ou phosphatés mais il constitue un bon compromis entre émissions de GES et rejets. Les systèmes à base de tourteaux de soja sont ceux qui rejetteraient le moins d'azote mais leur empreinte carbone est trop élevée pour répondre aux objectifs de l'étude. Les rejets potentiels d'azote du

système proposé restent cependant meilleurs que le bilan des élevages laitiers de l'ouest (Foray et al., 2017).

5.3. Limites et perspectives de l'étude

5.3.1. Limites de la méthode

La première limite se trouve au niveau de la récupération de données. La majorité de celles-ci sont estimés sur du prospectif qui instaure un biais de réalisme. Il n'est pas certain que dans la mise en place du dispositif, la réalité soit la même. Cela peut être mieux que ce qui est escompté mais aussi moins bien, tel que la production de lait, l'âge au premier vêlage, etc... Certains indicateurs de l'outil sont très sensibles au changement de certains paramètres, les résultats pourraient ainsi être différents. L'autre biais de réalisme est lié au fait que l'outil de modélisation ne pourra jamais retranscrire les phénomènes et interactions réelles et leur variabilité.

Ensuite, l'outil ne prend pas en compte l'aspect génétique qui serait très complexe à mesurer. Mais cela biaise également un peu les résultats car tous les animaux n'ont pas les mêmes réponses en matières de productions ou de rejets. En plus, le travail sur la génétique pour limiter les rejets tout en gardant une production constante voir en l'augmentant serait intéressant.

5.3.2. Contraintes du système

▪ Contraintes pédoclimatiques

La situation pédoclimatique de la station de Trévarez engendre des contraintes sur le système. Par exemple, la production de foin est très limitée dans cette zone géographique, l'ensilage d'herbe est alors préconisé mais celle-ci possède une digestibilité plus importante augmentant les émissions de méthane entérique. Un autre exemple est l'impossibilité d'implanter de la luzerne dans la rotation qui aurait limité l'apport de fertilisant permettant de diminuer les émissions de GES jusqu'à 0,3 t $\text{eqCO}_2/\text{ha}/\text{an}$ pour son introduction dans une PT (Pellerin et al., 2013).

▪ Contraintes économiques

Les contraintes économiques limitent forcément les choix du possible. Premièrement, il est indispensable de garder une viabilité économique dans le système. Ensuite, les investissements sont limités. Sinon, la mise en place d'un méthaniseur, de panneaux solaires, etc... pourraient être envisageable afin d'obtenir un système optimal.

5.3.3. Perspectives de l'étude

▪ Perspectives d'analyses

5 leviers ont été testés dans cette étude parmi une multitude possible. Lors des discussions avec la Chambre d'Agriculture de Bretagne, d'autres leviers ont été évoqués. Ce sont des leviers qui peuvent être mis en place sur la station de Trévarez et qu'il serait intéressant d'étudier :

- Gestion de l'alimentation en gagnant en autonomie protéique : de la féverole de printemps peut être implantée à la place de la céréale dont la vente n'est pas forcément économiquement intéressante. Cela peut permettre de diminuer l'achat de tourteaux et protéger un peu la culture suivante pour réduire l'apport de fertilisants et produits phytosanitaires. L'aspect économique est important dans ce levier dont l'étude n'est pas à négliger.

L'achat de protéagineux a également été évoqué. Leur culture n'est pas possible à Trévarez, mais leur achat possède un coût économique et leur disponibilité sur le territoire est à vérifier.

- Gestion du troupeau et de la reproduction. Plusieurs stratégies dans la gestion des génisses étaient possibles mais seulement une a pu être analysée. Deux autres stratégies étaient possibles pour atteindre un âge moyen au premier vêlage de 24 mois. La première est de pousser toutes les génisses et surtout celles ayant un poids plus faible aux concentrés afin d'accélérer leur croissance et d'être sûr que le poids minimum est atteint pour l'IA (Le Cozler et al., 2009). La seconde était d'augmenter le nombre de génisses gardées afin de vendre les génisses décalées en amouillantes et d'avoir un bon nombre de génisses avec un poids minimum atteint pour un vêlage moyen à 24 mois. Ces deux stratégies permettraient effectivement de réduire l'âge moyen au premier vêlage mais les émissions de GES seraient plus importantes. L'analyse de ces stratégies auraient permis de voir si garder une production laitière plus importante aurait compensé l'augmentation des émissions de GES par unité de produit.

Une dernière stratégie sur la gestion des génisses aurait pu être analysée, c'est le fait d'arrêter totalement la distribution de concentrés de production, d'avoir un âge au premier vêlage de 30 mois et de comparer s'il est préférable de limiter l'apport de concentrés ou de réduire la période improductive des animaux.

- Gestion de la fertilisation. L'épandage de lisier est aujourd'hui assuré grâce à une buse palette. L'utilisation d'un pendillard et/ou d'un injecteur permettrait de limiter les émissions de N₂O vers l'air et ainsi de réduire les émissions de GES.

La partie fertilisation des simulations a été basée sur le Plan Prévisionnel de Fumure (PPF) 2017/2018 qui peut être optimisé au niveau organique avec par exemple, l'arrêt de la fertilisation des prairies avant leur retournement et la mise en place d'une culture de maïs.

▪ Perspectives dans le projet

Premièrement, l'aspect économique n'a pas pu être traité dans cette étude, mais son analyse est indispensable afin de vérifier la cohérence du système proposé. Cette approche se fera avec le suivi de la mise en place du système mais des objectifs peuvent déjà être fixés sur la base du système proposé (coût alimentaire, coût de production, etc...).

Ensuite, la suite du projet va être la mise en place du système bas carbone dont il faudra assurer le suivi. Le suivi de cette mise en place mais également des réponses environnementales et économiques. Des indicateurs pourront être suivis mensuellement, trimestriellement ou annuellement pour suivre l'évolution du système.

Des essais expérimentaux pourront être mis en place afin de tester d'autres leviers telles que l'utilisation de lipides dans la ration à la place des glucides ou d'additif alimentaire afin de réduire les émissions de méthane entérique (Jouany et Thivend, 2008; Sauvart et al., 2011).

De multiples outils de mesures existent et peuvent être intégrés à Trévarez. Des chambres statiques, installées sur les prairies mesurent les flux de protoxyde d'azote (N₂O) (Thieriot, 2012). Le calcul du flux instantané de CO₂ est réalisable grâce à la méthode Eddy Correlation, aussi appelé méthode des « fluctuations turbulentes » qui permet de voir les échanges de flux entre l'atmosphère et les écosystèmes (Arriga et al., 2017). Un autre outil qui peut être mis en place est le Laser Methane Detector qui permet de mesurer les émissions de méthane entérique directement au niveau de l'animal. Tous ces outils pourraient permettre d'évaluer les mesures entreprises sur les GES et donner une idée des progressions réalisées.

6. Conclusion

La mise en place de 5 leviers d'actions différents a pu être simulé dans CAP'2ER® à travers 48 systèmes. Ces 5 leviers sont la substitution du tourteau de soja par du tourteau de colza, l'arrêt des concentrés de production, le passage de fauches tardives à fauches précoces pour l'ensilage d'herbe, le passage à un âge moyen au premier vêlage de 27 mois à 24 mois et la différence entre des vêlages groupés en automne ou au printemps. Ainsi, pour une empreinte environnementale la plus faible possible, et avec les leviers testés, le système optimal est un système à base de tourteau de colza, sans concentré de production avec un ensilage d'herbe en coupes précoces, un âge au premier vêlage de 24 mois et des vêlages regroupés au printemps. Pour une empreinte carbone nette la plus faible possible, la surface de prairie doit être maximisée afin d'optimiser le stockage de carbone.

Ainsi, pour réduire au maximum les émissions de GES, le système doit répondre aux besoins de l'animal en maximisant l'autonomie protéique pour limiter l'achat de concentrés qui possèdent un impact indirect important. Le système doit également réduire au maximum les apports protéiques pour limiter les rejets dans les effluents. Enfin, réduire la présence d'animaux improductifs sur l'exploitation semble également efficace.

Pour la suite du projet, le cadre du système ayant été déterminé, le suivi de sa mise en place devra être assuré à travers des indicateurs de production (production, etc...), des indicateurs environnementaux (empreinte carbone, etc...) et des indicateurs économiques (coût alimentaire, etc...). Enfin, la mise en place de dispositifs de mesures pourra permettre l'étude de l'évolution de l'empreinte environnementale du système.

Références bibliographiques

- ADEME, 2015. Agriculture & Environnement : des pratiques clefs pour la préservation du cli... [WWW Document]. ADEME. URL <http://www.ademe.fr/agriculture-environnement-pratiques-clefs-preservation-climat-sols-lair-economies-denergie> (accessed 5.30.18).
- Arriga, N., Rannik, Ü., Aubinet, M., Carrara, A., Vesala, T., Papale, D., 2017. Experimental validation of footprint models for eddy covariance CO₂ flux measurements above grassland by means of natural and artificial tracers. *Agricultural and Forest Meteorology* 242, 75–84.
- Bellot, P.-E., Adam, H., Anselme, F., Bombrun, S., Curtil, J.-M., Delaby, L., De La Serve, S., Gaudillière, N., Grevillot, M., Mondière, A., Deleau, D., Belot, P.-E., 2017. Bien conduire le pâturage pour optimiser la valorisation de l’herbe. Recueil de connaissances et de références, in: *Méthodes & Outils*. Groupe Herbe de Franche-Comté.
- Brunschwig, P., Chénais, F., Morel D’Arleux, F., 2001. La complémentation azotée des régimes pour vaches laitières [WWW Document]. idele.fr. URL http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/la-complementation-azotee-des-regimes-pour-vaches-laitieres.html (accessed 6.4.18).
- Capitain, M., Farruggia, A., Paccard, P., 2003. Vers une amélioration de l’autonomie en protéines des élevages bovins laitiers et aspects environnementaux. *Fourrages* 174, 259–269.
- CITEPA, 2017. Rapport National d’Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto. 33-35.
- Dahan Dalmedico, A., Guillemot, H., 2006. Changement climatique : Dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques. *Sociologie du Travail, Sciences et souverainetés* 48, 412–432.
- Danilo S. Brocas C., 2016. Emissions de gaz à effet de serre et contributions positives de l’élevage laitier Carbon Dairy : les éleveurs français sur la bonne voie [WWW Document]. Idele.fr. URL <http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-contributions-positives-de-lelevage-laitier-carbon-dairy-les-1.html> (accessed 6.4.18).
- Dollé, J.-B., Agabriel, J., Peyraud, J.-L., Faverdin, P., Manneville, V., Raison, C., Gac, A., Le Gall, A., 2011. Les gaz à effet de serre en élevage bovin : évaluation et leviers d’action. *INRA Productions Animales* 24 (5), 415–432.
- Dollé, J.-B., Faverdin, P., Agabriel, J., Sauvant, D., Klumpp, K., 2013. Contribution de l’élevage bovin aux émissions de GES et au stockage de carbone selon les systèmes de production. *Fourrages* 181–191.
- Doreau, M., Martin, C., Eugène, M., Popova, M., Morgavi, D.-P., 2011. Leviers d’action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. *INRA Productions Animales* 24 (5), 461–474.

- Doreau, M., Martin, C., Morgavi, D.-P., 2017. Réduire les émissions de méthane entérique par l'alimentation des ruminants. *Viandes & Produits Carnés* 33 (2).
- Dussud, F.-X., Joassard, I., Wong, F., Duvernoy, J., Morel, R., 2016. *Repères - Chiffres clés du climat France et Monde - Edition 2016* 60.
- Feugère, H., Brajot, C., Martignac, S., Rapp, P., Antoine, A., Brochier, R., Sago, L., 2016. En route vers l'autonomie alimentaire grâce à l'herbe. *Herbe & fourrages* 32.
- Foray, S., Dupré, S. 2018. Conférence de Presse « Bas Carbone » à Trévarez. Conférence de Presse. 20 Avril 2018, Saint-Goazec.
- Foray, S., Billy, C., Manneville, V., Dollé, J.-B., Le Gall, A., Vertes, F., Godinot, O., 2017. Gestion de l'azote dans les systèmes d'élevages herbivores. Evaluation et amélioration de l'efficacité de l'azote, réduction des transferts vers les milieux aquatiques, in: Institut de l'Élevage, Résultats. p. 100.
- Foray, S., Defrance, P., 2014. Mise au point et évaluation de systèmes laitiers performants et durables : Application de l'analyse environnementale sur les fermes de Derval, Trévarez et Blanche-Maison. Biennales des stations expérimentales professionnelles laitières du grand ouest. 6 février 2014.
- Froidmont, E., Bartiaux-Thill, N., 2003. Utilisation du lupin et du pois dans l'alimentation des vaches laitières hautes productrices. *Fourrages* 174, 285–292.
- Gac, A., Dollé, J.-B., Le Gall, A., Klumpp, K., Tallec, T., Mousset, J., Eglin, T., Bispo, A., Peyraud, J.-L., Faverdin, P., 2010. Le stockage de carbone par les prairies : Une voie d'atténuation de l'impact de l'élevage herbivore sur l'effet de serre, in: Institut de l'Élevage, Collection L'Essentiel. p. 12.
- Gerber, P., Vellinga, T., Opio, C., Steinfeld, H., 2011. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livestock Science, Special Issue: Assessment for Sustainable Development of Animal Production Systems* 139, 100–108.
- Guyader, J., Doreau, M., Morgavi, D.P., Gérard, C., Loncke, C., Martin, C., 2016. Long-term effect of linseed plus nitrate fed to dairy cows on enteric methane emission and nitrate and nitrite residuals in milk. *Animal* 10 (7), 1173–1181.
- Herisset, R., 2015. Tourteaux tannés + urées : pour plus d'efficacité des protéines de la ration. *Terra* n°469, février 2015.
- Jouany, J.-P., Thivend, P., 2008. La production de méthane d'origine digestive chez les ruminants et son impact sur le réchauffement climatique. *Management & Avenir* 20 (6), 259–274.
- Le Cozler, Y., Peyraud, J.L., Troccon, J.L., 2009. Effect of feeding regime, growth intensity and age at first insemination on performances and longevity of Holstein heifers born during autumn. *Livestock Science* 124, 72–81.
- Leclerc, M.-C., 2018. Dairy-4-Future, diffuser les innovations pour un élevage laitier plus résilient dans l'Espace Atlantique [WWW Document]. idele.fr. URL <http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/dairy-4-future-diffuser-les-innovations-pour-un-elevage-laitier-plus-resilient-dans-lespace-atlant.html> (accessed 6.4.18).
- Lorinquer, E., Beguin, E., Raison, C., Dollé, J.-B., Gac, A., Moreau, S., Manneville, V., Charroin, T., Ferrand, M., Defrance, P., Castellan, E., Tirard, S., Pelletier, E., Fougère,

- M., 2013. Concilier des systèmes laitiers innovants, productifs et respectueux de l'environnement. *Innovations Agronomiques* 30, 59–74.
- Losq, G., 2016. Sans droit à produire supplémentaire, le tourteau de colza reste-t-il intéressant ? *Terra* n°530, avril 2016.
- Martin, C., Pomiès, D., Ferlay, A., Rochette, Y., Martin, B., Chilliard, Y., Morgavi, D.-P., Doreau, M., 2011. Methane output and rumen microbiota in dairy cows in response to long-term supplementation with linseed or rapeseed of grass silage- or pasture-based diets. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production* 71, 243–247.
- Mitchell, J., 2015. Prof John Mitchell: How a 1967 study greatly influenced climate change science [WWW Document]. *Carbon Brief*. URL <https://www.carbonbrief.org/prof-john-mitchell-how-a-1967-study-greatly-influenced-climate-change-science> (accessed 6.6.18).
- MTES, 2018. Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Edition 2018 [Publications, Datalab, 2017] : Observation et statistiques [WWW Document]. URL <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2669/1072/chiffres-cles-climat-france-europe-monde.html> (accessed 6.4.18).
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoît, M., Butault, J.-P., Chenu, C., Colnenne-David, C., De Cara, S., Delame, N., Doreau, M., Dupraz, P., Faverdin, P., Garcia-Launay, F., Hassouna, M., Hénault, C., Jeuffroy, M.-H., Klumpp, K., Aurélie, M., Moran, D., Recous, S., Samson, E., Savini, I., Pardon, L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA 92.
- Pfimlin, A., Arnaud, J.-D., Gautier, D., Le Gall, A., 2003. Les légumineuses fourragères, une voie pour concilier autonomie en protéines et préservation de l'environnement. *Fourrages* 174, 183–203.
- Protin, P.-V., Corre-Hellou, G., Naudin, C., Trocahrd, R., 2009. Impact des pratiques de fertilisation sur la productivité des prairies et mélanges céréales - protéagineux et qualité du fourrage. *Fourrages* 198, 115–130.
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S., Serment, A., Broudiscou, L., 2011. Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants. *INRA Productions Animales* 24 (5), 433–446.
- Thieriot, P., 2012. Flux de protoxyde d'azote (N₂O) et de méthane (CH₄) dans les pâturages issus de la déforestation en Amazonie française (Guyane) (Mémoire). Université de Picardie Jules Verne, France.
- Vellinga, T.V., de Haan, M.H.A., Schils, R.L.M., Evers, A., van den Pol–van Dasselaar, A., 2011. Implementation of GHG mitigation on intensive dairy farms: Farmers' preferences and variation in cost effectiveness. *Livestock Science* 137, 185–195.
- Vérité, R., Delaby, L., 1998. Conduite alimentaire et rejets azotés chez la vache laitière. Interrelations avec les performances. *Rencontres Recherches Ruminants* 5, 8.

Annexes

Présentation sous forme de fiches des leviers d'actions liés à l'alimentation, à la gestion du sol, à la gestion de la fertilisation et la gestion du troupeau

L'ALIMENTATION**REDUCTION DU CH4 ENTERIQUE****2 voies possibles****Réduction de la production d'hydrogène (sans diminuer la production d'AGV)**

↗ la part du propionate dans les AGV (utiliser l'H produit par l'acétate et le butyrate)

↘ la population de protozoaires (fort producteurs d'H)

Utiliser l'hydrogène autrement que pour former du CH4

↘ la population de méthanogènes en bloquant une étape biochimique

Dévier l'utilisation d'H vers d'autres voies biochimiques : acétogénèse, réduction nitrates/sulfates/acides organiques

Apport de lipides à la place des glucides**Quels intérêts ?**

Méthode reconnue la plus efficace pour limiter les émissions de CH₄ entérique ; Pour 1% de lipide en plus dans la ration, ce serait 4% d'émissions de CH₄ en moins.

Pas de fermentation des lipides dans le rumen donc pas de production de H

Action négative sur les protozoaires

Réduction de l'activité des bactéries cellulolytiques (production de H) et méthanogènes grâce aux lipides polyinsaturés.

- Graine de lin (Acide gras polyinsaturé)
Action sur les protozoaires (+ augmentation des acides gras oméga 3 du lait et diminution des acides gras saturés)

Comment ?

Un apport de 2-3% dans la ration peut se révéler efficace pour réduire la méthanogénèse. A une teneur en acide gras de lin de 7% dans la ration, une réduction jusqu'à 50% de CH₄ peut être visible et une réduction de 10 à 15% pour une teneur de 4 % dans la ration (plus réalisable).

La forme extrudée est conseillée.

Limites ?

Les résultats diffèrent à l'étranger

Un apport excessif peut se traduire par une limitation du niveau d'ingestion des animaux, un accroissement dans les produits de certains AG monoinsaturé *trans* et par une tendance à la peroxydation des lipides.

- L'herbe jeune de printemps offre un apport en acides gras polyinsaturés lorsqu'elle est donnée avec peu de concentrés mais il n'existe pas d'étude sur son effet sur la production de méthane
- Autres sources de lipides possibles : huile de tournesol, huile de colza, drèche de distillerie avec solubles (moins efficace que le lin sauf donné en plus grande quantité)

La réponse dépend aussi de la ration associée. Elle est plus prononcée lors de l'utilisation de graines de lin avec une ration à base de foin qu'avec de l'ensilage de maïs. Et elle est plus prononcée avec de l'ensilage d'orge que du foin. Avec des AG à chaîne moyenne, elle est plus prononcée avec une ration riche en concentrés qu'avec une ration riche en fourrage.

Attention au coût qui peut être important.

Attention à vérifier des impacts possibles sur les performances dans animaux ou environnementaux.

Les résultats sont variables en fonction des AG et des publications.

Augmentation de concentrés dans la ration**Quels intérêts ?**

Diminution de la production de méthane grâce à l'augmentation de la part de propionate dans le mélange des AGV

Comment ?

Résultats sensibles pour une ration composée de 20 à 50% de concentrés qui constitue la moyenne nationale.

Résultats très marqués à partir de 80% de concentrés dans la ration.

Limites ?

Impact environnemental par la fabrication, le transport, etc... des concentrés.

Le coût d'achat est à prendre en compte.

Augmentation des émissions liées aux déjections.

Alimentation riche en tanins

Quels intérêts ?

Réduit le CH₄ grâce à une action toxique sur les méthanogènes.

Baisse de la digestibilité et donc baisse de la fermentation des glucides.

Comment ?

Ce sont surtout les tanins condensés qui ont été étudiés et dont l'efficacité a été prouvée.

Consommation en fourrage ou extrait ajouté à la ration.

Fourrages tropicaux riches en tanins, lotier ou sainfoin (qui sont également des légumineuses).

Limites ?

Attention à ne pas trop impacter la digestibilité des animaux lorsqu'ils sont utilisés en trop grande quantité.

Certains résultats restent encore incertains et des publications se contredisent.

Le coût est à évaluer.

Additifs alimentaires

- Extraits de plantes ou huiles essentielles

Quels intérêts ?

Les plantes sont riches en saponine qui atteint la membrane cellulaire des protozoaires.

Comment ?

Extrait de plante (extrait d'ail, de thé) ou huiles essentielles

Limites ?

Efficace en in vitro (processus ruminal simplifié), pas de résultats in vivo ou inefficace car l'effet sur les protozoaires serait limité dans le temps.

- Nitrate de calcium

Quels intérêts ?

Le nitrate de calcium se transforme en nitrite, puis en ammoniac qui utilise l'hydrogène.

Comment ?

La production d'ammoniac impose d'employer une ration pauvre en azote fermentescible (ensilage de maïs).

Limites ?

Attention à la santé de l'animal, la méthémoglobinémie est possible. Elle est liée à l'apparition de nitrite dans le rumen en cas de dosage excessif de nitrate (effet limité en cas d'apport progressiste)

Attention à l'image du nitrate auprès du consommateur et des éleveurs

Graine de lin + nitrate -> Réduction CH₄, pas d'impact sur qualité du lait, mais réduction de la production, ...

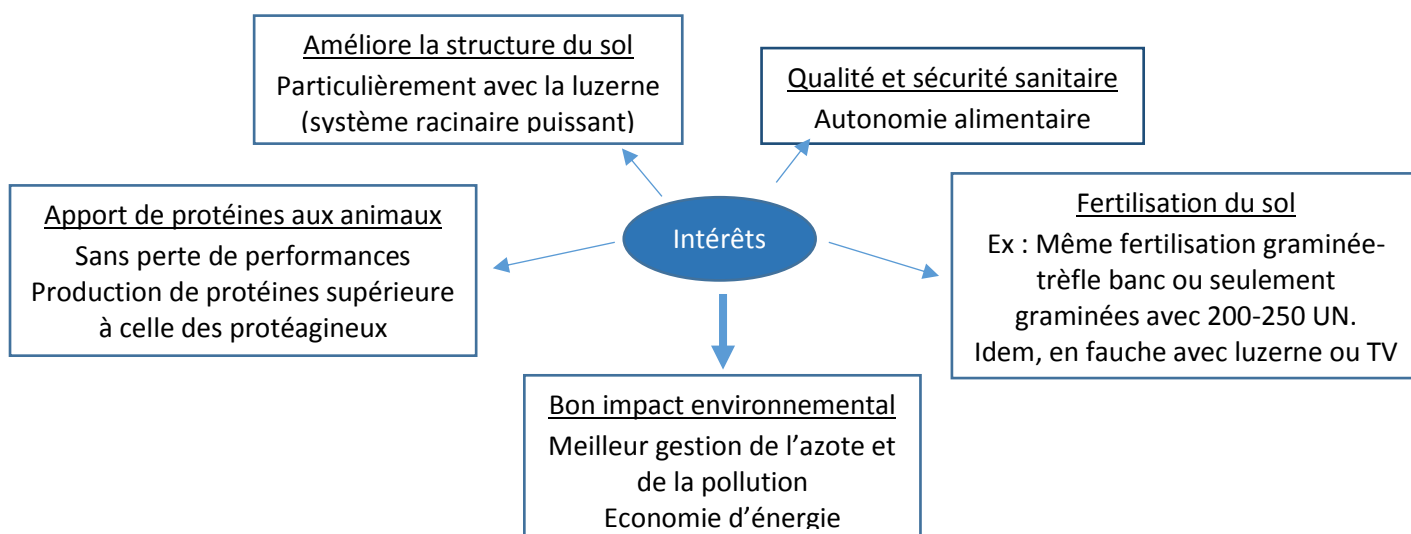
Doreau M., Martin C., Eugène M., Popova M., Morgavi D.P. (2011). Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. INRA Productions Animales. 24(5), pp 461-474.

Doreau M., Martin C., Morgavi D.P. (2017). Réduire les émissions de méthane entérique par l'alimentation des ruminants. Viandes & Produits Carnés. VPC-2017-33-2-7.

Guyader J., Doreau M., Morgavi D.P., Gérard C., Loncke C., Martin C. (2016). Long-term effect of linseed plus nitrate fed to dairy cows on enteric methane emission and nitrate and nitrite residuals in milk. Animal. 10 :7, pp 1173-1181.

Martin C., Pomiès D., Ferlay A., Rochette Y., Martin B., Chilliard Y., Morgavi D.P., Doreau M. (2011). Methane output and rumen microbiota in dairy cows in response to long-term supplementation with linseed or rapeseed of grass silage or pasture-based diets. Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production. 71, pp 243-247. 26

Sauvant D., Giger-Reverdin S., Serment A., Broudiscou L. (2011). Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants. INRA Productions Animales. 24(5), pp 433-446.

FAVORISER L'AUTONOMIE PROTEIQUE PAR LES FOURRAGES**Légumineuses fourragères****Comment ?**

Luzerne ou Trèfle ou les deux

Recommandation d'un apport d'azote en début printemps

Eviter les retournements d'automne avec les trèfles (minéralisation rapide)

Limites ?

Récolte et conservation difficiles

L'enrubannage est le mieux adapté, et le foin si le temps est favorable

Coûts importants (récolte, ...)

⇒ Compromis avec un fourrage légumineuses-graminées
Cela lève les freins économiques et pratiques

Compromis avec un mélange de légumineuses et graminées

+ D'étalement sur l'année :
pour du pâturage d'été (luzerne et trèfle violet) ou pour produire en cas d'excès de T°

+ De couverture du sol (surtout en sols hétérogènes) : limite le salissement

+ De facilités pour la conservation en fourrage humide

+ De MAT à l'ha et une densité azotée plus élevée

PAS de fertilisation azotée

Quel mélange ?**Objectif de Fauche**

2 à 3 ans : RGH diploïde + TV
+ 3 ans : Luzerne + TV diploïde ou féтуque élevée

Objectif de Fauche et Pâturage

+ 3 ans et sol drainant : multi-espèces (RGA, dactyle, féтуque élevée, luzerne, TV, TB)
+ 3 ans et sol à tendance hydromorphe : éviter la luzerne

Pour plus de 45% de légumineuses, la teneur en MAT sera supérieure à 12%. Elle sera de 16% pour un pourcentage de 70% de légumineuses dans le mélange.

Plus il y a de légumineuses dans le mélange, plus la teneur en MAT sera élevée ainsi que la MS. Ainsi le risque de verse sera plus important et donc la date de récolte optimale dépendra du mélange.

Capitain M., Farruggia A., Paccard P. (2003). Vers une amélioration de l'autonomie en protéines des élevages bovins laitiers et aspects environnementaux. Fourrages. 174, 259-269 pp.

Feugère H., Brajot C., Martignac S. Rapp P., Antoine A., Brochier R., Sago L. (2016). En route vers l'autonomie alimentaire grâce à l'herbe. Herbe & fourrages. www.herbe-fourrages-limousin.fr.

Pflimlin A., Arnaud J.D., Gautier D., Le Gall A. (2003). Les légumineuses fourragères, une voie pour concilier autonomie en protéines et préservation de l'environnement. Fourrages. 174, 183-203 pp.

Protin P.V., Corre-Hellou G., Naudin C., Trocahrd R. (2009). Impact des pratiques de fertilisation sur la productivité des prairies et mélanges céréales - protéagineux et qualité du fourrage. Fourrage. 198, 115-130 pp.

AUTONOMIE EN CONCENTRES**Utilisation des protéagineux****Quels intérêts ?**

La production de protéagineux permet de limiter ou supprimer l'achat d'aliments riches en protéines.

Les protéagineux ont des valeurs énergétiques proches des céréales.

La teneur en MAT est inférieure de 25 à 30% de celles des tourteaux de soja

Graine de :	Pois	Féverole	Lupin
Teneur en amidon :	45%	38%	0%
	Aussi peu de matière grasse que les céréales		3 à 5 fois plus de matière grasse
	MAT de 35% (le lupin est le plus riche)		

Comment ?

	Pois	Féverole	Lupin
Performances zootechniques	Aussi bonnes qu'avec les tourteaux	Aussi bonnes que les tourteaux	Lait plus riche en matière grasse (légère baisse du TP)
Correcteur unique ?	Oui pour 25-28 kg de lait	Oui pour 25-28 kg de lait	Oui pour 28-32 kg de lait
Association avec du tourteau ?	+ 15 à 25% de tourteaux tannés (soja et colza) au-delà et en fonction de la production recherchée	+ 15 à 25% de tourteaux tannés (soja et colza) au-delà et en fonction de la production recherchée	+ 15 à 20% de tourteaux tannés (soja et colza) au-delà et en fonction de la production recherchée
Dose journalière	5 à 6 kg/jour/vache	4 à 6 kg/jour/vache	Jusqu'à 6 kg/jour/vache

Etapes principales :

- 1) Conserver les graines entières
Récolter 15% d'humidité ou moins, attention à l'humidité du stockage
- 2) Broyer ou aplatir grossièrement les graines avant la distribution
Evite les flambées fermentaires et les pertes d'N dans le rumen
- 3) Etaler la distribution au cours de la journée
Augmentation de la part de concentrés avec des protéagineux
3 repas par jour
- 4) Surveiller la fibrosité de la ration
- 5) Assurer une transition (2-3 semaines)

⇒ Pour remplacer 1 kg de soja 48, il faut compter 2,6 kg de pois, 1,6 kg de lupin ou 2,5kg de féverole

Limites ?

Rester vigilants pour maintenir une bonne rumination.

Peut nécessiter encore l'utilisation des tourteaux tannés.

AMELIORER LA TENEUR DES MAT DES FOURRAGES PAR LE STADE DE RECOLTE

Exemple d'un essai dans la ferme expérimentale de Mauron

Le but de l'essai était de mesurer l'effet d'une date de récolte précoce sur la valeur nutritive des prairies de fauches, les conséquences sur le rendement et l'évolution de la flore.

Pour cela, 2 stades de récolte sont prévus :

- une récolte "précoce" au stade montaison de la graminée
- Une récolte "témoin" au stade début épiaison de la graminée.

Les mesures faites sont les rendements, les taux de légumineuses et les valeurs alimentaires.

La fertilisation correspond à 150-180 UN/an sur les graminées pures (en fonction du climat) et de 50 UN sur les graminées-légumineuses en sortie hiver à partir de la 2^{ème} année

Les résultats :

- RGH

Traitement	MAT (%)	UFL	UFV	PDIN (g/kg MS)	PDIE (g/kg MS)
Précoce	19,2	1,00	0,97	123	99
Témoin	13,3	0,89	0,84	85	87

Taux de MAT et valeurs nutritives du RGH au 1^{er} cycle d'exploitation

La fauche précoce augmente fortement la valeur alimentaire MAIS il existe une perte de rendement d'environ 15% sur l'ensemble des cycles (-50% au 1^{er} cycle).

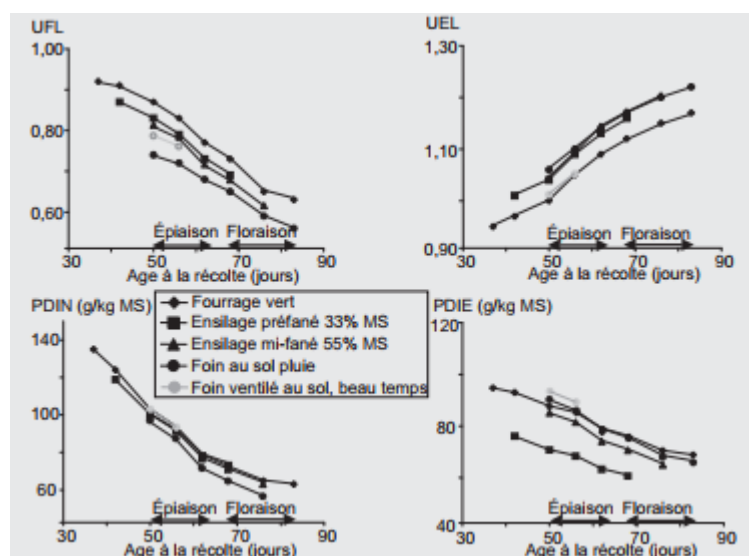
- RGH + TV

Traitement	Cycle	Taux de TV (%)	MAT (%)	UFL	UFV
Précoce	C1	4	11,2	0,98	0,95
	C2	23	9,3	0,96	0,92
	C3	57	14,8	0,88	0,83
Témoins	C1	2	8,8	0,90	0,85
	C2	13	7,2	0,90	0,85

Taux de MAT et valeurs UFL, UFV du RGH-TV

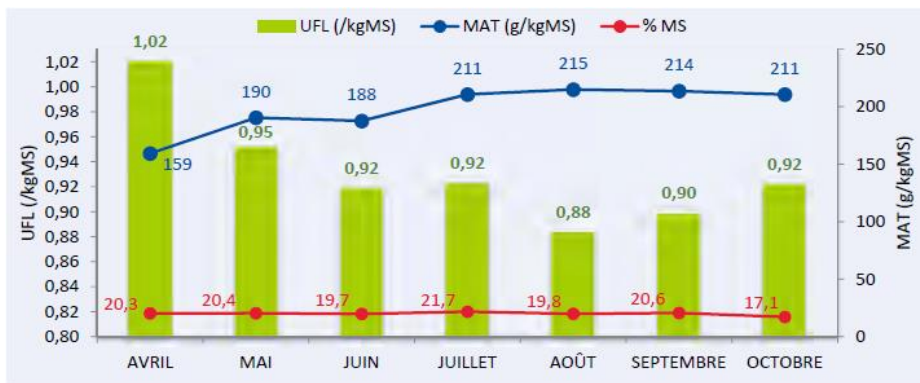
La fauche précoce ne pénalise pas le rendement annuel malgré une perte importante sur le 1^{er} cycle.

Exemple d'une synthèse faites par Baumont et al. (2009)



Effet des pratiques sur la valeur alimentaire des fourrages (Baumont et al., 2009)

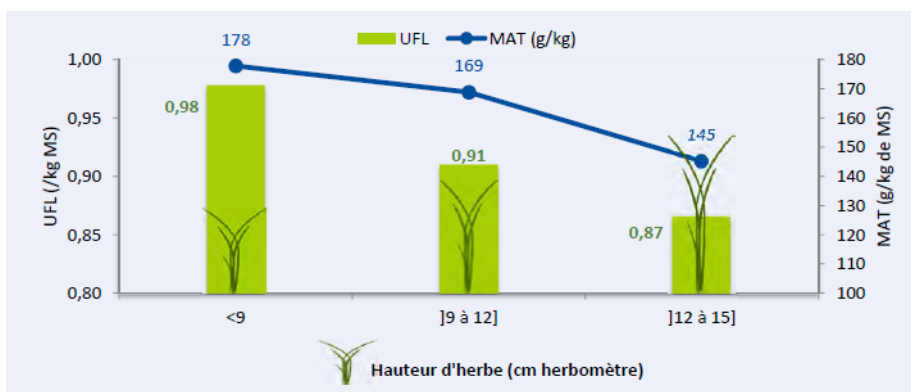
Valeurs alimentaires de l'herbe pâturée



Au mois de mai, la valeur de l'herbe est équivalente d'une VL18

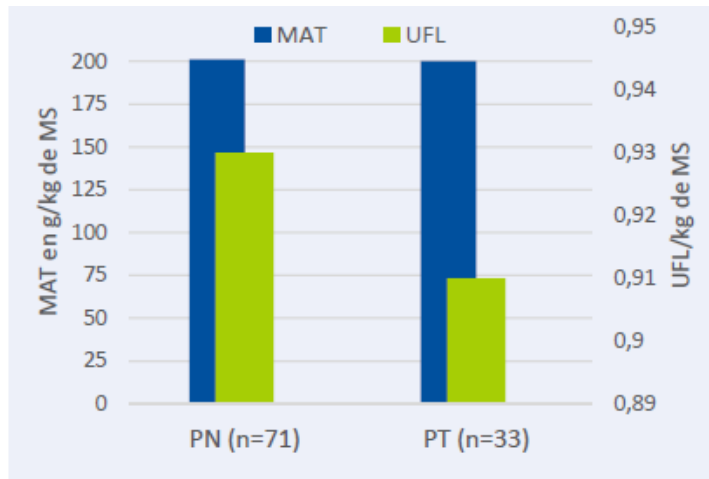
Il n'y a pas de déclin de la MAT au cours de la saison (concentration en juillet) et l'herbe d'automne reste encore bonne.

Valeurs alimentaires d'échantillons d'herbe récoltés dans des prairies permanentes pâturées en Franche-Comté



Il existe une dégradation de la qualité de l'herbe quand elle dépasse 12 cm (optimal entre 8 et 12 cm).

Evolution des valeurs de l'herbe au cours d'une repousse



La MAT est identique entre les PN ou les PT.

Valeurs nutritives entre prairies naturelles et prairies temporaires

OPTIMISER LA GESTION DES PRAIRIES

Quels intérêts ?

Les prairies rendent de nombreux services écosystémiques

- Protection contre l'érosion,
- Stockage du carbone,
- Préservation de la biodiversité,
- Recyclage de l'N,
- Economie d'intrants,
- Réduction des émissions de GES,
- Filtration et régulation des flux d'eaux,
- ...

Ces intérêts sont d'autant plus importants quand les prairies restent longtemps en place.

Elles sont aussi intéressantes d'un point de vue économique (surtout avec l'implantation de légumineuses).

Impacts environnementaux

<u>Qualité des sols</u>	<u>Qualité de l'air</u>	<u>Qualité des eaux</u>	<u>Energie</u>
Impact + sur la structure des sols, le teneur en MO, la biodiversité et prévention contre l'érosion	Limite les émissions de NH ₃	Pertes de nitrates limitées avec des PP MAIS chargement élevé au pâturage et surfertilisation des PT augmentent les risques de lixiviation.	Réduit les consommations de la fabrication d'intrants (concentrés, engrais de synthèse), du travail du sol, de la récolte, de la mise en stock et de la distribution des aliments

Potentiel d'atténuation des émissions de GES

En cas de maintiens des surfaces de prairies, estimation à 2,5 Mt éq. CO₂ de réductions de GES en 2030

Détail de l'abattement des émissions de GES par l'optimisation de la gestion des prairies, en kg CO₂ éq./ha/an (Pellerin S. et al., 2013)*.

Mesures	Stockage de C	N ₂ O (engrais, sol, effluents)	CH ₄ (effluents, fermentation entérique)	CO ₂ (carburant)
1 - Allonger la durée de pâturage	-	22	22	6
2 - Accroître la durée des prairies temporaires	520	54	-	38
3 - Réduire la fertilisation minérale azotée	-	52	-	-
4 - Améliorer la valorisation des prairies permanentes	1 416	-7	-22	-447

*Une valeur négative correspond à des émissions accrues; le stockage de C est calculé sur 20 ans. Hors émissions induites.

Plus de stockage de C et économie d'intrants azotés et carburants
+ réduction de concentrés (réduction des GES)

Comment ?

- Allonger la durée de pâturage
Sortie plus tôt au printemps, et rentrée plus tard en automne
- Accroître la durée des PT, à au moins 5 ans
- Réduire la fertilisation minérale azotée des prairies les plus intensives
Introduction de légumineuses (économie de 12% des apports d'N)
- Améliorer la valorisation des PP peu productives en augmentant le chargement animal ou la fertilisation

Limites ?

Il faut prendre en compte le changement climatique qui peut :

- Avoir un impact positif en allongeant la période de pâturage.
- Avoir un impact négatif en cas de périodes/d'épisodes de sécheresse accrue, etc.. Il sera difficile de maintenir des PP.

ADEME. (2015). Optimiser la gestion des prairies. Agriculture et environnement. www.ADEME.fr/mediatheque.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Aurélie M., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L. (2013). Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 92 p.

DES TECHNIQUES CULTURALES SIMPLIFIEES

Semis direct ou travail du sol simplifié

Quels intérêts ?

Les TCS limitent les consommations de fuel, réduisent les risques d'érosions et stimulent l'activité biologique du sol.

Impacts environnementaux

<u>Energie</u>	<u>Qualité des sols</u>	<u>Qualité des eaux</u>
Economie de 20 à 40% des besoins en carburants (5 à 12% des dépenses directes d'énergie)	↗ de la MO de 25-30% en 30 ans en surface Effet positif sur la biodiversité, l'amélioration de la structure du sol et la réduction des risques d'érosion	Moins d'érosion mais plus de recours aux produits phytosanitaires ?

Potentiel d'atténuation des GES

En 2030 :
 1 Mt éq. CO₂/an pour le travail superficiel
 3,7 Mt éq. CO₂/an pour le labour tous les 5 ans
 5,7 Mt éq. CO₂/an pour le semis direct
 (Pellerin et al., 2013)

Diminution des consommations de carburants de 20 à 40 l/ha, soit 60 à 120 kg eq. CO ₂ /ha/an non émis	Augmentation de N ₂ O d'environ 45 kg eq. CO ₂ /ha/an les 5 à 10 1 ^{ères} années	Stockage additionnel de 0 à 550 kg eq. CO ₂ /ha/an
--	---	---

L'abandon du labour implique l'introduction de cultures intermédiaires pour maîtriser les adventices. Celles-ci engendrent une faible hausse de la consommation de carburant (7 l/ha en moyenne), mais une hausse significative du stockage de carbone dans le sol (env. 300 kg éq. CO₂/ha/an). (Voir fiche sur les cultures intermédiaires)

Comment ?

Une évolution du système de cultures est nécessaire notamment avec l'allongement des rotations pour casser les cycles biologiques des adventices

Pratiques	Outils de travail du sol	Enfouissement des résidus et adventices	Consommation de carburant
Labour ou labour occasionnel	Charrue à versoir	Total	Elevée
Pseudo-Labour	Machine à bêcher, charrue à disque, chisel, ...	Partiel mais fort	Moyenne
Itinéraire sans labour avec décompactage	Outils de travail superficiel + lames ou dents pour le décompactage	Partiel	Moyenne
Strip-till (travail en bande)	Strip-tillers, rota-semis	Partiel	Faible à très-faible
Travail superficiel	Dents, disques, chisels, herses, cultivateurs...	Partiel	Faible
Semis-direct	Semoir pour semis direct	Nul	Très faible

Limites ?

Le fait de ne plus pratiquer le retournement du sol pour enfouir les adventices entraîne une gestion intégrée du désherbage au risque d'accroître l'utilisation de produits phytosanitaires (jusqu'à 30%).

Une baisse de rendement est possible s'il y a de mauvaises maîtrises techniques.

Les bilans des GES restent encore incertains car ils se font sur le long terme. Des précisions restent à faire sur les techniques, les outils, ...

Les émissions de GES sont très variables selon le type de sol (oxygénation, humidité, ...)

Exemple : Des TCS en sols peu oxygénés et très humides conduit à des émissions de N₂O importantes et un stockage carbone plus réduit (moins de biomasse).

Le **bilan GES** peut alors être **négatif** par rapport au labour.

ADEME, 2015. Des techniques culturales simplifiées. Agriculture et environnement. www.ADEME.fr/mediatheque.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Aurélie M., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L. (2013). Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA,³⁴ 92 p.

INTRODUIRE DES CULTURES INTERMEDIAIRES

Quels intérêts ?

- Réduire les pertes de nitrate vers les masses d'eau (surtout l'automne),
- Protection d'un sol sensible à l'érosion,
- Restructuration du profil cultural,
- Réduction de la fertilisation azotée avec des légumineuses,
- Augmentation de la MO du sol,
- Stocker du carbone si combinés à une « simplification » du travail du sol (**voir fiche TCS**)

Impacts environnementaux

Qualité des eaux	Qualité des sols	Qualité de l'air	Energie
<p>↘ des fuites nitrates jusqu'à 50% avec une bonne implantation.</p> <p>Variable en fonction du couvert, du type de sol et du climat</p>	<p>Enrichissement de la couche arable en C organique d'environ 0,5%/an.</p> <p>Effet positif sur la biodiversité et l'érosion</p>	<p>Réduction d'émissions des particules et de NH₃</p>	<p>Légère amélioration du bilan énergétique des cultures (↘ de la fertilisation azotée)</p>

Potentiel d'atténuation des GES

1,1 Mt eq. CO₂/an en 2030 → 30% d'économie directes et indirectes lié à la baisse de fertilisation azotée

Tableau 1 : Impact moyen sur les émissions de protoxyde d'azote (N₂O)

Espèce(s) de CI	Effet sur la fertilisation de la culture suivante (kgN/ha évité)	Effet sur les émissions directes et indirectes (kg eq. CO ₂ /ha/an évité)	Effet sur les émissions en amont (kg eq. CO ₂ /ha/an évité)
Graminées	5	28	30
Crucifères phacélie	15	84	90
Légumineuses	20	112	120

Stockage additionnel de 480 à 1265 kg CO₂/ha/an

Limites ?

Surcoût économique possible avec 20 à 60€/ha en plus (mécanisation et semences). Cela peut être compensé par des économies d'engrais et l'augmentation des rendements après des légumineuses.

Hausse de la consommation de carburant de 0 à 15 l/ha (semis et destruction). Cela contribue à des émissions de 0 à 50 kg eq. CO₂/ha/an

Tous les effets positifs sont corrélés à la quantité de biomasses produite et la date de son incorporation. Ainsi, la phase d'implantation et de développement doit être soignée pour optimiser les bénéfices.

La fertilisation minérale est interdite. Il est donc préférable d'intégrés de la légumineuse en mélange.

Les effets se font sur le long terme et les effets annuels sont variables.

Comment ?

Quelles espèces, pour quel potentiel de piégeage ?

Famille	Espèces	Potentiel de piégeage de l'N	Autre
Crucifères	Moutarde, navette, radis, colza...	Très bon	<ul style="list-style-type: none">• Famille la plus largement utilisée (moutarde blanche)• Système racinaire pivotant favorable à une bonne structure du sol• Production de molécules régulatrices de certains ravageurs, maladies et adventices• La présence de colza dans la rotation exige un recours limité aux crucifères.• Certaines espèces sont fourragères
Graminées	Avoine, seigle, raygrass italien, moha, sorgho...	Bon à très bon	<ul style="list-style-type: none">• Forte diversité d'espèces permettant de s'adapter à de nombreux contextes• À proscrire avant céréale• Espèces utilisables comme fourrage
Légumineuses	Vesce, féverole, gesce, trèfle, lotier, luzerne	Moyen	<ul style="list-style-type: none">• Fixation de l'azote de l'air• En cultures pures, à écarter des situations où l'azote minéral du sol est fortement disponible (capacité de piégeage modérée)• Permettent de réduire la fertilisation azotée sur les cultures suivantes.• Forte diversité d'espèces permettant de répondre à de nombreuses attentes (ex. : floraison pour les insectes auxiliaires, biomasse élevée, utilisation comme fourrage)
Composées	Tournesol, niger	Moyen à très bon	<ul style="list-style-type: none">• À éviter dans les rotations avec tournesol• À semer très précocement
Hydrophyllacée	Phacélie	Bon à très bon	<ul style="list-style-type: none">• Famille non cultivée en culture principale, pouvant donc être intégrée dans la plupart des rotations• Floraison mellifère• Nécessité d'un lit de semence fin
Polygonacée	Sarrasin	Très bon	<ul style="list-style-type: none">• Utilisable en interculture courte• Limite les adventices.• Parfois récoltable (culture dérobée semée derrière orge ou pois d'hiver)

www.ademe.fr

ADEME, 2015. Introduire des cultures intermédiaires. Agriculture et environnement. www.ADEME.fr/mediatheque.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Aurélie M., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L. (2013). Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 92 p.

INTEGRATION DES ARBRES DANS LES SYSTEMES AGRICOLES

Quels intérêts ?

- Régulation des flux d'eau,
- Lutte contre l'érosion,
- Atténuation du stress thermique (cultures et élevages),
- Stockage de carbone,
- Refuge et trame biodiversité,

Impacts environnementaux

<u>Energie</u>	<u>Qualité des sols</u>	<u>Qualité des eaux</u>	<u>Biodiversité et pression phytosanitaire</u>
Les machines qui gèrent les arbres consomment du carburant compensé par l'utilisation du bois qui peut être source d'énergie	Augmentation de la teneur en MO. réduction du risque d'érosion	Ruissèlement et lixiviation limités par les racines et baisse de la surface fertilisée.	Contribution à la diversité florale et faunique et permet la lutte intégrée des cultures grâce aux auxiliaires
	<u>Qualité de l'air</u>	Mais compétition sur l'eau dommageable aux cultures	
	Les arbres font obstacles au transfert de gaz, poussières, molécules volatiles. Non quantifié.		

Potentiel d'atténuation des émissions de GES

Le stockage de C dans la biomasse et les sols est estimé en moyenne à 1 tC/ha/an, soit 3,7 tCO₂ éq./ha/an sur 20 ans pour une agroforesterie à faible densité et entre 0,55 et 0,92 tCO₂ éq./ha/an pour des haies (0,04 et 0,4 tC/ha/an)

Potentiel d'atténuation estimé à 2,8 millions de tCO₂ éq./ha/an en 2030

Comment ?

3 possibilités :

- Arbre en bordure,
- Haies en périphérie des parcelles,
- Agroforesterie en faible densité d'arbre en plein champs.

L'agroforesterie peut permettre :

- de produire de bois d'œuvre,
- une diversification,
- l'utilisation d'arbres mellifères,
- un meilleur aspect paysager,
- d'augmenter le bien-être animal,
- d'apporter une protection intégrée des cultures,
- un intérêt pour la chasse,...

Limites ?

Une concurrence d'usage des sols peut engendrer une perte de surface et de rendements des cultures annuelles.

Il existe une concurrence en eau mais un enracinement profond la limite.

Une densité élevée d'arbre peut engendrer un milieu plus frais et plus humide pouvant favoriser le développement de maladies foliaires.

OPTIMISER LA FERTILISATION AZOTEE

Valoriser les engrais organiques

Quels intérêts ?

Impacts environnementaux

Un surplus de fertilisation se traduit par des pertes vers l'environnement sous forme de protoxyde d'azote (N₂O), d'ammoniac (NH₃) et de nitrate(NO₂).

Energie

Economie d'environ 636 ktep/an en 2030 (soit près de 20% de la consommation d'énergie indirecte due aux engrais à la ferme)

Qualité des eaux

Réduction des pertes de nitrate et risque d'eutrophisation

Qualité de l'air

Réduction des émissions d'NH₃ et d'oxyde d'azote

Qualité des sols

Limitation de l'acidification

Potentiel d'atténuation des émissions des GES

5 mt éq. CO₂/an en 2030
+ économie dans la fabrication des engrais

Amélioration du bilan d'émissions de **0,6 à 0,9 t éq CO₂/ha/an** :

- Réduction des émissions directes de N₂O de **500 kg éq CO₂/ha/an**,
- Réduction des émissions indirectes de N₂O après volatilisation d'ammoniac et lixiviation des nitrates de **40 et 55 kg éq. CO₂/ha/an** respectivement,
- Réduction des émissions induites dues à la fabrication et transports d'engrais estimé à **280 kg eq. CO₂/ha/an**,
- Faible réduction de consommation de fioul de 2 l/ha/an (si un épandage enlevé), soit **6,5 kg eq. CO₂/ha/an**.

Comment ?

La fertilisation raisonnée utilise une dose optimale d'azote pour satisfaire les besoins d'une culture.

Des outils (tel que la méthode Comifer) permettent de piloter la fertilisation azotée avec un diagnostic de l'état de nutrition azotée du couvert, des règles de décision et des techniques permettant d'ajuster les apports en fonction des besoins et des objectifs de rendements.

Ces ajustements peuvent se faire en fractionnement les apports, avec un enfouissement des engrais ou grâce aux technologies de précisions. Les différents leviers peuvent être :

- De mieux raisonner et piloter le niveau des doses appliquées :
En généralisant l'usage des outils de calculs de bilan d'N et de pilotage de la fertilisation avec des **objectifs de rendements réalistes**.
Economie d'N minéral estimé à **20 kgN/ha** (moyenne basse pour céréales)
- De substituer de l'N minéral de synthèse par de **l'N organique** :
Prise en compte des apports d'N organique dans le calcul de la dose à apporter
Economie d'engrais minéraux de **15 kgN/ha** en moyenne (variable selon les cultures et utilisation)
- D'**optimiser** l'efficacité de l'N apporté :
Retarder le 1^{er} apport au printemps sur les grandes cultures d'hiver (fort reliquat azoté). Cela permet de supprimer le 1^{er} apport et reporte une partie de la dose sur l'apport suivant.
Économie de **15 kg N minéral/ha**.

Enfouir et localiser les engrais dans le sol lors des semis de printemps (accroît l'efficacité des apports)
Économie de **12 kg N minéral/ha**.

Ajouter un inhibiteur de nitrification (le DMPP est pris comme référence). Celui-ci est associé qu'à une fraction des apports d'N pour laisser de l'N rapidement disponible.
Économie de **10 kg N minéral/ha**.

Les différents leviers peuvent être combinés entre eux.

Limites ?

Très variable en fonction du contexte pédoclimatique.

Il faut prendre en compte le réchauffement climatique dans les années à venir. La hausse des températures augmente la minéralisation de l'N en automne (selon la disponibilité en eau).

On ne connaît pas les impacts sur la biodiversité des sols.

CULTIVER DES LEGUMINEUSES

Pour réduire l'utilisation d'intrants de synthèse

Quels intérêts ?

Une légumineuse capte l'azote de l'air, ne nécessite pas d'N minéral et restitue l'N pour les cultures suivantes ou associées.

Impacts environnementauxEnergie

Moins d'utilisation d'engrais azotés peut réduire d'environ 380 ktep/an les consommations d'énergies primaires.

Qualité de l'air

La baisse de fertilisation minérale réduit les émissions de NH₃ et de NO_x associés.

Qualité des sols

Les légumineuses fourragères maintiennent la structure du sol, sa fertilité, favorise la vie microbologique et la présence de microfaune.

Qualité des eaux

Réduction d'utilisation d'engrais azotés

Des précautions sont à prendre pour maîtriser les fuites de nitrate après une légumineuse.
→ Couvrir le sol en interculture et prendre en compte l'N fourni à l'échelle de la rotation.

Potentiel d'atténuation des émissions des GES

Remplacer des cultures annuelles fertilisées par des légumineuses à hauteur de 40% en PT réduirait les émissions de GES de 1,4 Mt éq. CO₂/an en 2030
+ économie de fabrication et transport des engrais de synthèse

Ramenée à l'ha de légumineuse introduite, l'atténuation est de l'ordre de 2 tCO₂ éq./ha/an en grande culture et de 0,3 tCO₂ éq./ha/an en PT

Tableau 1 : Détail de l'abattement des émissions de GES par l'introduction de légumineuses, en t CO₂ éq./ha/an

	N ₂ O (engrais)	CO ₂ (carburant)	CO ₂ (fabrication et transport des intrants)
Grande culture	1,1	Non significatif	0,9
Prairie temporaire	0,17	Non significatif	0,16

Ces chiffres ne prennent pas en compte l'impact de la substitution du soja pour l'alimentation animale.

Comment ?

- Légumineuses fourragères : luzerne, sainfoin, lotier, trèfle blanc, trèfle violet.
Peuvent être cultivées en prairies artificielles, ou en association au sein de PT ou PP.
L'autonomie de nutrition azotée d'une prairie d'association est en général assurée lorsque la part de légumineuses dépasse 30% de la biomasse présente.
- Légumineuses à graines : pois, soja, féverole, lupin

Exemple : Par rapport à un précédent de céréales à paille, le pois permet d'économiser 20 et 60 kg N/ha sur le blé ou le colza suivant. L'impact des légumineuses se mesure à l'échelle de la succession culturale.

Voir fiches alimentation et cultures intermédiaires

Limites ?

Les légumineuses fourragères présentent une sensibilité au stress.

Les émissions de N₂O liées au retournement des prairies avec légumineuses sont variables.

Les impacts positifs sur la qualité du sol existent pour des rotations longues et diversifiées.

Quels intérêts ?

Augmenter la productivité permet de baisser l'empreinte carbone par quantité de produit :

Selon plusieurs études, l'amélioration de l'empreinte carbone est à hauteur de 0,03 à 0,26 kg CO₂/kg lait.


Cependant ces chiffres sont remis en cause car ils sont variables selon le système de production (intrants, bâtiment/pâturage, ...). Une augmentation de la productivité est au détriment de la surface de prairies, ainsi, l'empreinte carbone brute s'améliore mais se détériore pour l'empreinte carbone nette. De plus, un taux de renouvellement plus faible permet une diminution de l'empreinte carbone (20 à 39 gCO₂/kg lait pour une diminution du taux de 5 et 9%) due à la baisse d'animaux non productifs sur l'exploitation.

Comment ?

- Meilleure gestion du troupeau :
 - Réforme des animaux peu productifs
 - Gestion sanitaire efficace
 - Adaptation aux changements de l'environnement, ...⇒ Potentiel de réduction des émissions de GES de 2 à 5%
- Amélioration génétique :
 - Amélioration de l'efficacité alimentaire → Potentiel de réduction des émissions de CH₄ de 3,1% sur 25 ans
 - Efficience de production par une meilleure fertilité,
 - Valorisation optimale de la ration,
 - Baisse des dépenses d'entretien,
 - Amélioration de la santé⇒ Réduction de l'empreinte carbone de 0 à 10%

Limites ?

Dépend du type d'allocation

	Diplôme : Master Spécialité : Biologie, Agrosociétés Spécialisation / option : Sciences de l'Animal pour l'Elevage de Demain Enseignant référent : Justine FAURE
Auteur(s) : Camille RICHER Date de naissance : 28/08/1995	Organisme d'accueil : Institut de l'Elevage Adresse : 149 Rue de Bercy 75012 Paris
Nb pages : 20 Annexe(s) : 1	Maître de stage : Sylvain FORAY
Année de soutenance : 2018	
<u>Titre français</u> : Analyse et modélisation de leviers d'actions permettant d'accompagner la stratégie bas carbone de la ferme expérimentale de Trévarez	
<u>Titre anglais</u> : Analysis and modeling of levers for action to support the low carbon strategy of the Trévarez experimental farm	
<p>Résumé. Dans un contexte de recherche de diminution de l'empreinte environnementale des exploitations, la ferme expérimentale laitière de Trévarez restructure son système d'exploitation pour un système dit « Bas-Carbone ». Grâce à l'outil CAP'2ER[®], un outil de modélisation multicritères d'empreintes environnementale, 5 leviers d'actions ont été testés par la simulation de 48 systèmes. Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) diminueraient de 4 à 7% en substituant le tourteau de soja à du tourteau de colza. L'arrêt des concentrés de production diminuerait de 2 à 5% les émissions de GES. La diminution de l'âge moyen au premier vêlage de 27 mois à 24 mois a un potentiel d'atténuation des émissions de GES de 1 à 2%. Travailler sur le stade de récolte de l'herbe permettrait de diminuer de 0 à 2% les émissions de GES en passant de fauches tardives à précoces. Regrouper les vêlages au printemps émettrait 1% de GES en plus que regrouper les vêlages en automne. Mais le système de Trévarez impose des vêlages 65% en automne et 35% au printemps qui émettrait 0,7% de GES en plus que 100% des vêlages regroupés au printemps.</p> <p>La combinaison de tous ces leviers donnerait des émissions brutes de GES de 0,88 kg éq.CO₂/litre de lait et l'empreinte carbone nette de 0,77 éqCO₂/litre de lait. Cependant, ces résultats ne correspondent pas aux objectifs initiaux (EC nette = 0,5-0,7 éq.CO₂/litre de lait). L'augmentation de la surface en prairie permettrait d'optimiser le stockage de carbone et de diminuer l'empreinte carbone nette du système.</p>	
<p>Abstract. In a context of research for reducing the environmental footprint of farms, Trévarez, a experimental dairy farm is restructuring its system for a so-called "Low Carbon" system. Thanks to the CAP'2ER[®] tool, a multi-criteria modeling tool for environmental footprints, 5 levers for action have been tested by the simulation of 48 systems. Greenhouse Gas (GHG) emissions would decrease by 4 to 7% by substituting soybean meal for rapeseed meal. Stopping production concentrates would reduce GHG emissions by 2-5%. Decreasing average age at first calving from 27 months to 24 months has a GHG mitigation potential of 1-2%. Working on the grass harvest stage would reduce GHG emissions by 0 to 2% from late to early reaping. Grouping calvings in the spring would emit 1% more GHG than calving in the fall. However, the Trévarez system requires calves 65% in the fall and 35% in the spring, which would emit 0.7% of GHGs in addition to 100% of the calvings in the spring.</p> <p>The combination of all these levers would give gross GHG emissions of 0.88 kg CO₂ eq / liter of milk and the net carbon footprint of 0.77 CO₂eq/liter of milk. However, these results do not correspond to the initial objectives (net EC = 0.5-0.7 eq.CO₂/liter of milk). Increasing the grassland area would optimize carbon storage and reduce the net carbon footprint of the system.</p>	
Mots-clés : Empreinte Carbone, Leviers d'actions, Gaz à Effet de Serre, Simulations Key Words: Carbon Footprint, Levers for action, Greenhouse Gases, Simulations	