

ÉVALUER LES IMPACTS DE PRATIQUES AGROFORESTIERES SUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LE BILAN CARBONE DES ELEVAGES ALLAITANTS EN ARIEGE

Lauréat du Concours « Meilleur mémoire AgroSYS 2019 »

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du Master Sciences et Technologies de
l'Agriculture de l'Alimentation et de l'Environnement
Spécialisation Systèmes d'élevages

Ndèye Awa DIA
Octobre 2019





MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master
Sciences et Technologie de L'Agriculture, de l'Alimentation et de
l'Environnement

Mention : Agronomie et Agro – Alimentaire

Parcours : Systèmes d'Élevage

**ÉVALUER LES IMPACTS DE PRATIQUES AGROFORESTIÈRES SUR
L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LE BILAN
CARBONE DES ÉLEVAGES ALLAITANTS EN ARIÈGE**



Photo : Laurents

Par Ndèye Awa DIA

Année de soutenance : 2019

Structure d'accueil : Institut National de la Recherche Agronomique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master
Sciences et Technologie de L'Agriculture, de l'Alimentation et de
l'Environnement

Mention : Agronomie et Agro – Alimentaire
Parcours : Systèmes d'Élevage

ÉVALUER LES IMPACTS DE PRATIQUES AGROFORESTIÈRES SUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LE BILAN CARBONE DES ÉLEVAGES ALLAITANTS EN ARIÈGE



Photo : Laurents

Par Ndèye Awa DIA
Année de soutenance : 2019

Mémoire préparé sous la direction de :
Pr Charles Henri MOULIN,
Enseignant – chercheur,
Montpellier SupAgro

Structure d'accueil :
INRA

Présenté le : 16/09/2019
devant le jury :
Dr Magali JOUVEN (Montpellier SupAgro)
Pr Charles Henri MOULIN
Dr Amandine LURETTE
Dr Fabien STARK (DRAAF Occitanie)

Maitresse de stage :
Dr Amandine LURETTE
Chargée de recherche,
INRA

Résumé

Évaluer les impacts de pratiques agroforestières sur l'adaptation au changement climatique et le bilan carbone des élevages allaitants en Ariège

Dans le contexte du changement climatique, le double enjeu pour l'agriculture est d'imaginer des systèmes d'élevage permettant une adaptation des exploitations aux effets du changement climatique tout en améliorant son bilan carbone pour permettre une atténuation de la contribution de l'agriculture au changement climatique.

Compte tenu des enjeux actuels auxquels est confrontée l'agriculture, les pratiques agroforestières peuvent retrouver toute leur place dans les itinéraires techniques des exploitations agricoles

Cette étude évalue l'impact des pratiques agroforestières sur l'empreinte carbone et le bilan fourrager d'élevages allaitants ovins et bovins d'Ariège.

Pour faire ce travail, des résultats d'enquêtes ont été utilisés et complétés par les données Inosys et les données du Rami pastoral. Un modèle conceptuel a été élaboré et des scénarios de pratiques agroforestières ont été testés sur l'exploitation bovine avec un simulateur informatique : une éclaircie de 50 ha, une dégradation modérée des conditions climatiques, et une dégradation forte des conditions climatiques.

Ainsi les exploitations ovine et bovine étudiées ont des niveaux d'émissions brutes respectivement de 14,16 kg eqCO₂/kgvv et de 14,21 kg eqCO₂/kgvv. Les émissions nettes sont de -13,97 kg eqCO₂/kgvv pour les ovins et de 4,38 kg eqCO₂/kgvv pour les bovins. Les systèmes d'élevage utilisant l'arbre compensent bien leurs émissions de GES. Leur consommation d'énergie est faible (3333 MJ/ha pour les ovins et 2290 MJ/ha pour les bovins). Les résultats de simulation montrent que la pratique d'éclaircie permet une meilleure résistance des exploitations à la dégradation des conditions climatiques. La diminution de l'autonomie est moins forte lorsqu'il y a éclaircie mais n'est améliorée que de 2 à 3% selon le degré de sévérité de la dégradation des conditions climatiques. La pratique de l'éclaircie peut compenser une partie des pertes de productions fourragères en cas de dégradation des conditions climatiques, et améliorer la résistance des exploitations qui la mettent en œuvre. Une intensification de cette pratique en revanche conduit à une diminution de la séquestration de carbone en forêt et la combustion de bois contribue à également augmenter les émissions de GES atmosphériques.

Mots clés : empreinte carbone, bilan fourrager, pratiques agroforestières, gaz à effet de serre, éclaircie, changement climatique, résistance, adaptation, atténuation, élevage allaitant, stockage carbone

Abstract

Assess the impacts of agroforestry practices on climate change adaptation and the carbon balance of suckler farms in Ariège

In the context of climate change, the dual challenge for agriculture is to imagine farming systems that allow farms to adapt to the effects of climate change while improving their carbon footprint to allow a mitigation of the contribution of agriculture to climate change. Agroforestry can be an interesting solution to meet this dual objective of adaptation and mitigation. This exploratory study aims to develop a framework for assessing the impact of agroforestry practices on the carbon footprint and forage balance of suckler sheep and cattle farms in Ariège.

Different data sources were used to construct two farming models, one bovine and the other sheep. A generic conceptual model has been developed to test the value of adopting agroforestry practices, according to climate scenarios (moderate or severe degradation of climatic conditions). The practice of silvopastoral dwindling has been tested on the sheep farm with a computer simulator.

Thus, the sheep and cattle farms studied have gross emission levels of 14.16 kg eqCO₂ / kgvv (kg of live meat) and 14.21 kg eqCO₂ / kgvv respectively. The net emissions are -13.97 kg eqCO₂ / kgvv for sheep and 4.38 kg eqCO₂ / kgvv for cattle. Tree-based farming systems compensate well their GHG emissions. Their energy consumption is low (3333 MJ / ha for sheep and 2290 MJ / ha for cattle). Simulation results show that thinning practices would allow farms to better resist degrading climatic conditions. The decrease in autonomy is less strong when there is thinning, but it is only improved by 2 to 3% depending on the degree of severity of the degradation of the climatic conditions. The practice of thinning can offset part of the forage production losses in deteriorating climatic conditions, and improve the resistance of the farms that implement it. An intensification of this practice, on the other hand, would lead to a decrease in carbon sequestration in the forest, and the burning of firewood also contributes to increasing GHG emissions.

Key words: carbon footprint, forage balance, agroforestry practices, greenhouse gases, thinning, climate change, resilience, adaptation, mitigation, suckler farms, carbon storage

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier le Pr Charles-Henri MOULIN et Dr Amandine LURETTE pour la qualité de votre encadrement, votre pédagogie, votre disponibilité, votre promptitude à réagir et surtout leur patience dont ils ont fait preuve à de nombreuses reprises. Je leur remercie également pour tout ce que j'ai appris grâce à cette expérience particulièrement riche en connaissance et pour leur persévérance à mon égard. Je garderai toujours de bons souvenirs de vous.

Merci à Mehdi BOUNAB, pour les informations complémentaires qui ont fortement contribué à la réalisation de cette étude.

Merci à Dr Magali JOUVEN, pour votre soutien moral et surtout pour la qualité de vos enseignements. Je garderai de bons souvenirs de vous.

Merci à Dr Natalie AGBAGLA pour votre soutien. À travers elle merci à toute l'équipe pédagogique.

Merci aux doctorantes que je partageais le même bureau et avec qui j'ai passé de très bons moments. Merci particulièrement pour les discussions et les conseils échangés.

Merci à la promotion SYSTEL 2018 - 2019, c'était un grand plaisir de faire votre connaissance et de découvrir toute une diversité culturelle.

Merci à la communauté sénégalaise de Montpellier particulièrement les étudiants de Montpellier SupAgro pour l'accueil si chaleureux et surtout pour les bons plats partagés. Avec vous je ne sentais pas être loin de ma famille.

Merci à Ibra TOURE pour le soutien moral et les encouragements

Merci également au programme Make Our Planet Great Again pour m'avoir octroyé une bourse qui m'a permis de prendre en charge mes frais de vie durant mon séjour en France.

Merci aux personnes qui m'ont soutenu tout au long des différentes étapes de ma vie, je pense particulièrement à mon vénéré guide spirituel, mes grands parents, mes parents, mes frères et sœurs, mes amis (es), bref toute ma Famille. Merci pour tout !

Mention spéciale à ma fille chérie et surtout à mon adorable mari qui n'a jamais cessé de croire en moi et de me soutenir dans toutes circonstances. Toutes mes excuses pour ces périodes d'absence et d'inattention. Maman vous aime du plus profond de son âme. « Sama biir khol lalènn deff ».

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Remerciements	v
Glossaire	viii
Sigles et acronymes	x
Introduction	1
I. Problématique	2
II. État de l’art sur l’empreinte carbone et l’agroforesterie	4
II.1. L’agriculture, victime du changement climatique et source des émissions de GES	5
II.2. Avec un potentiel avéré de stockage de carbone	6
II.2.1. Mécanisme de stockage et déstockage du carbone dans le sol	6
II.2.2. Le sol, source et puits de GES	7
II.3. Agroforesterie et changement climatique	9
II.3.1. L’agroforesterie comme facteur d’adaptation au changement climatique	10
II.3.2. Stockage carbone dans le cadre de l’agroforesterie	12
III. Matériel et méthode	16
III.1. Modélisation du fonctionnement technique de deux exploitations allaitantes	16
III.2. Le modèle conceptuel pour l’évaluation de l’empreinte carbone	17
III.2.1. Le périmètre d’étude : limites du système étudié	17

III.2.2. Les postes d'émission et de stockage et évaluation des différents postes	18
III.3. Participation à la construction d'un simulateur	20
III.4. Scénarios à tester avec le simulateur	21
IV. Résultats et discussions	22
IV.1. Empreinte carbone des exploitations en situation initiale	22
IV.1.1. Consommation d'énergie des exploitations ovines et bovines	22
IV.1.2. Bilan carbone des deux ateliers d'élevage	23
IV. 2. Intérêt d'une éclaircie sylvopastorale pour faire face à une dégradation du climat	27
IV. 3. Impact d'une éclaircie sylvopastorale sur le bilan carbone	29
Conclusion et perspectives.....	32
Références bibliographiques	34
Listes des figures	xi
Annexes	xiii

Glossaire

Adaptation ou stratégie d'adaptation aux changements climatiques : ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter les opportunités bénéfiques.

Agroforesterie : système de gestion durable du sol qui augmente la production totale, associe des cultures agricoles, des arbres, des plantes forestières et / ou des animaux simultanément ou en séquence.

Aléa : phénomène, manifestation physique ou activité humaine susceptible d'occasionner des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques voire des pertes en vies humaines ou une dégradation de l'environnement.

Atténuation du changement climatique : consiste à réduire, par des processus naturels ou des moyens technologiques, la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ou d'améliorer la séquestration du carbone.

Changement climatique : non seulement le changement global de température mais aussi les changements de vent, précipitation, longueur de saisons ainsi que la force et la fréquence d'événements météorologiques extrêmes comme la sécheresse ou les inondations

Effet de serre : un phénomène naturel qui empêche une partie des rayons infrarouges provenant de la Terre de traverser l'atmosphère pour s'échapper dans l'espace.

Empreinte carbone : est une mesure des émissions de gaz à effet de serre (GES) exprimée en unités de CO₂ équivalent pour un produit, une activité, une entreprise ou une personne. Elle cumule les gaz qui affectent le climat en fonction de leur potentiel de réchauffement global (PRG).

Facteur d'émission : coefficient multiplicateur qui permet d'estimer avec une marge d'erreur définie la quantité de polluant émise lors d'une activité. Les résultats sont exprimés en équivalent CO₂.

Impact : effet positif ou négatif qu'un changement a, ou pourrait avoir, sur un phénomène. Par exemple, les variations de rendement des cultures ou de minéralisation des sols sont des impacts des changements climatiques.

Pouvoir de réchauffement global : indique combien de fois le potentiel de réchauffement d'une molécule du gaz est plus élevée par rapport à la molécule de référence du CO₂

Puits de carbone : écosystème capable de fixer plus de CO₂ qu'il n'en émet : c'est-à-dire absorption de CO₂ par divers milieux naturels (océan, forêt...). Pour les écosystèmes terrestres, la fixation du CO₂ pour produire de la biomasse est assurée par la photosynthèse, mais le bilan de carbone doit également faire intervenir les pertes dues au mécanisme de respiration.

Réchauffement climatique : augmentation des températures moyennes de la planète.

Résilience : la résilience peut être entendue comme la capacité d'un système (le système d'élevage par exemple) à expérimenter des perturbations tout en maintenant ses fonctions vitales et ses capacités de contrôle (Holling & Guderson, 2002)

Sensibilité : propension d'un système à être affecté, favorablement ou défavorablement, par la manifestation d'un aléa.

Séquestration : technique permettant de capturer et de stocker durablement le CO₂, donc de réduire les émissions ayant un impact sur le changement climatique.

Système d'élevage : ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé par l'homme, en vue de valoriser des ressources, par l'intermédiaire d'animaux domestiques, pour en obtenir des productions variées ou pour répondre à d'autres objectifs (Landais, 1992).

Sylvopastoralisme : est un mode d'agriculture durable qui concilie objectifs forestiers et pastoraux. Cette pratique d'élevage consiste à faire pâturer la forêt par le bétail pour exploiter les ressources fourragères spontanées situées sous les arbres.

Sigles et acronymes

ACV : Analyse de Cycle de Vie

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie

AFA : Association Française d'Agroforesterie

AGRIPSOL : Agroforesterie pour la protection des sols

AGROSYL : Agro - sylvopastoralisme

CAP'2ER : Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Élevage de Ruminants

CNPF : Centre National de la Propriété Forestière

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique

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

COS : Carbone Organique du Sol

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations

FE : Facteur d'Émission

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (IPCC en anglais)

GIS Sol : Groupement d'Intérêt Scientifique Sol

GMQ : Gain moyen quotidien

GO-PEI : Groupe opérationnel Partenaire Européen Innovant

IDELE : Institut de l'Élevage

INRA : Institut National de Recherches Agronomiques

IPPC : Intergovernmental Panel on Climate Change

MAAF : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

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

MO : Matière Organique

MOD : Matière Organique Digestible

MOND : Matière Organique Non Digestible

MS : Matière Sèche

OMINEA : Organisation et Méthodes des Inventaires Nationaux des Émissions Atmosphériques en France

ONF : Office National des Forêts

PAM : Population Annuelle Moyenne

PP : Prairie Permanente

PT : Prairie Temporaire

PRG : Potentiel de Réchauffement Global

PV : Poids Vif

SAU : Surface Agricole Utile

UGB : Unité Gros Bétail

UMR SELMET : Unité Mixte de Recherche Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux

UNIFA : Union des Industries de la Fertilisation

REACTIF : Recherche sur l'Atténuation du Changement Climatique par l'agriculture et la Forêt

THI : Température Humidity Index

Symboles chimiques :

C : Carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

CH₄ : Méthane

N₂O : Protoxyde d'azote N : Azote

Introduction

En quelques décennies, le changement climatique s'est affirmé comme un objet de recherche central pour la communauté scientifique et comme une question sociale et politique de premier plan (Marquet et Salles, 2014). Le rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014) note que « le réchauffement du système climatique est sans équivoque ». Quel que soit le pays et le degré de sévérité des scénarios de réchauffement climatique envisagé, les projections tendent dans la même direction. Le double enjeu pour l'agriculture est d'imaginer des systèmes de cultures et ou d'élevage permettant une adaptation aux effets du changement climatique sur les exploitations tout en améliorant son bilan carbone pour permettre une atténuation de la contribution de l'agriculture au changement climatique.

Les éleveurs doivent faire face à un contexte économique difficile (Bernstein et al. 2013). La fréquence des sécheresses, de plus en plus régulière, impacte fortement le prix des fourrages, de la paille et des céréales, augmentant ainsi les charges des exploitations d'élevage et menacent leur autonomie fourragère.

Compte tenu des enjeux actuels auxquels est confrontée l'agriculture (réchauffement climatique, hausse du coût des matières premières, attentes environnementales et sociétales, ...), les pratiques agroforestières peuvent retrouver toute leur place dans les itinéraires techniques des exploitations agricoles. L'agroforesterie étant un mode d'exploitation combinant arbre et cultures ou élevage, des bénéfices croisés peuvent naître entre l'arbre, les cultures et les animaux.

L'agroforesterie pourrait être un élément déterminant dans l'adaptation des systèmes d'élevage au changement climatique notamment en contribuant à la diminution de l'empreinte carbone des élevages allaitants, du fait du stockage de carbone dans la biomasse arborée et les sols agroforestier, et à l'amélioration du bilan fourrager des exploitations en cas de sécheresse, grâce aux effets positifs des arbres pour maintenir la production de biomasse herbacée en période de sécheresse. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail. Ce travail est une contribution à un projet en cours en Ariège, Agrosyl.

Dans une première partie, sera évoquée la problématique qui aboutira à des questions de recherche. Ainsi des hypothèses seront formulées ; ce qui nous amènera à parler de l'objectif du travail. Une deuxième partie sera réservée à l'état de l'art sur l'empreinte carbone et sur l'agroforesterie. Dans cette partie, le triple rôle joué par l'agriculture sur le changement climatique et la place de l'agroforesterie et la forêt sur l'atténuation du changement climatique seront abordés. La troisième partie sera consacrée à la méthodologie mise en place pour évaluer l'empreinte carbone des exploitations allaitantes et simuler des scénarios de pratiques agroforestières. Cette dernière aboutira en quatrième partie à la présentation et à la discussion des résultats obtenus par calcul et par simulation. Enfin une conclusion générale sera faite. Dans cette partie, les limites rencontrées seront définies et des perspectives d'avenir de l'étude seront proposées.

I. Problématique

D'après le Réseau Action climat France (2014), les caractéristiques principales du futur climat (2090) en France seraient :

- une augmentation de la température quotidienne moyenne de 2 à 4,1 °C ;
- une variation de la précipitation quotidienne moyenne de 0,2 à -0,6 mm/jour, avec une variation de la précipitation en été de 0,1 à -1,1 mm/jour et 0,6 à -0,7 mm/jour en hiver ;
- une hausse du nombre annuel de jours consécutifs de sécheresse (correspondant à moins de 1 mm de précipitation par jour), augmentation beaucoup plus marquée dans le sud-ouest de la France ;
- une augmentation du nombre de jours de l'année pour lesquels la température maximale est supérieure de 5°C à la référence climatologique : de 36 jours en 1990 à un nombre de jours compris entre 50 et 118 en 2090.

Le changement climatique n'épargne pas le département de l'Ariège. Face à ce contexte et pour répondre aux difficultés locales et globales auxquelles est confrontée l'activité d'élevage du département de l'Ariège, le projet AgroSyl vise à développer l'arbre et la forêt dans les systèmes agricoles pour les rendre plus performants et plus résilients. La Chambre d'Agriculture de l'Ariège (C 09) en concertation avec des éleveurs, a fait le bilan des difficultés que rencontre l'activité d'élevage dans les zones de montagne du département. Ils concluent que l'élevage a de plus en plus de mal à faire face aux épisodes de sécheresse successifs. Par ailleurs, ils constatent que l'approvisionnement en paille devient compliqué car les céréaliers de la plaine ariègeoise conservent leur paille pour répondre à des besoins d'amélioration de la fertilité des sols empêchant donc les éleveurs d'avoir accès à une ressource locale et bon marché (Laurents, 2016). Selon les éleveurs, les filières économiques de la viande sont trop incertaines et ne garantissent plus un revenu suffisant et stable.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet AgroSyl, un projet multi-acteur de 5 ans (2016 – 2020) soutenu par l'Union Européenne. L'organisme de conseil et de développement agricole, la Chambre d'Agriculture de l'Ariège, est à l'initiative du projet. Il est le chef de file du GO-PEI AgroSyl, conduit en partenariat avec, l'Institut pour le Développement Forestier et l'UMT Pasto (regroupant l'Institut de l'élevage de Montpellier et l'UMR SELMET). Il est conduit sur le terrain, en particulier, en partenariat avec les agriculteurs de l'association Bois Paysan.

L'objectif de ce projet est d'améliorer la gestion de l'arbre et de la forêt dans les exploitations agricoles en élevage pour les rendre plus performantes et plus résilientes face aux instabilités économiques et climatiques que connaît notre société actuelle. En d'autres termes, AgroSyl veut promouvoir en Ariège des pratiques agricoles en lien avec la forêt, les arbres et le bois pour répondre aux problématiques des exploitations agricoles dans le domaine de l'autonomie fourragère et le bien-être animal. AgroSyl veut apporter des solutions à une demande croissante des agriculteurs du département de l'Ariège pour développer l'usage de l'arbre et de la forêt dans les élevages afin de i) de développer l'agrosylvopastoralisme dans les systèmes herbagers pyrénéens ; ii) de renforcer les capacités d'adaptation des exploitations

d'élevage, notamment face au changement climatique ; iii) de faire monter en compétences les éleveurs et les conseillers sur la conduite des systèmes agrosylvopastoraux (Bounab et al., 2018).

Le diagnostic mené en 2016 (Laurents, 2016) a permis de formuler 10 besoins des exploitations d'élevage ainsi que 34 solutions mobilisant l'arbre pour répondre à ces besoins. Quatre solutions ont été retenues pour être testées sur le terrain : i) l'utilisation de plaquettes forestières comme litière, en élevage bovin, ii) la réalisation d'éclaircies pour faire pâturer en sous-bois, iii) la valoriser des ressources ligneuses – notamment les fruits – pour l'alimentation, iv) la plantation d'arbres fourragers. (Bounab et al., 2018). Ces quatre thématiques se traduisent par la mise en place de 7 pilotes expérimentaux sur 5 fermes pilotes.

La mise en place et le suivi technique de ces pilotes, de 2017 à 2020, doit permettre de réaliser de premières évaluations de ces pratiques agroforestières, à l'échelle parcellaire et sur de petites dimensions (plantation d'une surface de 2 700 m² de d'arbres fourragers par exemple). Une des tâches du projet Agrosyl est de réaliser une évaluation plus globale, à l'échelle de l'exploitation, en considérant la mise en œuvre de la pratique à plus grande échelle.

Au-delà d'une évaluation technico-économique classique (voir par exemple Gautier et Moulin, 2004, qui simule la mise en œuvre d'une pratique de pâturage hivernal en parc boisé en Provence), la problématique du changement climatique nécessite d'élargir les critères d'évaluation des pratiques agroforestières. L'agriculture a des relations ambivalentes avec le climat. Fort contributeur aux émissions de gaz à effet de serre (GES), le secteur de l'agriculture, particulièrement les systèmes d'élevage allaitant, ont aussi une importante potentialité de stockage de carbone et par conséquent une bonne capacité à réduire leur empreinte carbone.

Question de recherche

Deux questions de recherche découlent de cette problématique :

- Les pratiques agroforestières contribuent-elles à l'atténuation de l'impact du changement climatique des exploitations allaitantes ariégeoises ?
- Comment les pratiques agroforestières contribuent à l'adaptation des systèmes d'élevage ariégeois aux changements climatiques ?

Hypothèses

1. L'empreinte carbone des exploitations utilisant l'arbre est faible ;
2. Les exploitations mobilisant l'arbre sont plus résistantes aux changements climatiques, l'arbre permettant une meilleure autonomie des exploitations ;

Objectifs du travail

Les objectifs de ce travail consistent à :

1. Réaliser un modèle conceptuel des élevages allaitants, pour être le support d'un outil de calcul permettant d'évaluer des scénarios de mise en œuvre de pratiques agroforestières ;

2. Évaluer l’empreinte carbone des élevages allaitants (calculer les émissions de gaz à effet de serre et les capacités de stockage de carbone) ;
3. Évaluer l’autonomie fourragère des exploitations ;
4. Simuler la mise en œuvre à grande échelle des pratiques agroforestières sur des fermes pilotes, pour évaluer l’impact de ces pratiques sur l’empreinte carbone (atténuation) et l’autonomie (adaptation).

II. État de l’art sur l’empreinte carbone et l’agroforesterie

Le réchauffement climatique est désormais reconnu par la totalité de la communauté scientifique et politique. Il s’explique par une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) relatifs à l’activité humaine (transport, industrie, agriculture dont l’élevage...).

Les conséquences du réchauffement climatique sont nombreuses et le monde agricole apparaît particulièrement exposé à ce phénomène. L’agriculture a des relations ambivalentes avec le climat : fort contributeur aux émissions de gaz à effet de serre, le secteur de l’agriculture peut aussi potentiellement remplir les fonctions de puits de carbone tout en étant très sensible aux effets des changements climatiques déjà observés et à venir.

L’élevage se trouve un des rares secteurs pouvant compenser une partie voire la totalité de ses émissions de gaz à effet de serre. En effet les surfaces utilisées pour l’alimentation des animaux (prairies, haies, bois, parcours...) sont d’excellent stockeurs de carbone. D’où leur capacité à pouvoir diminuer leur empreinte carbone. L’empreinte carbone nette correspond à la différence entre les émissions de gaz à effet de serre et le stockage de carbone (figure 1). Ainsi l’agroforesterie pourrait être une solution d’adaptation de l’agriculture face aux changements climatiques.

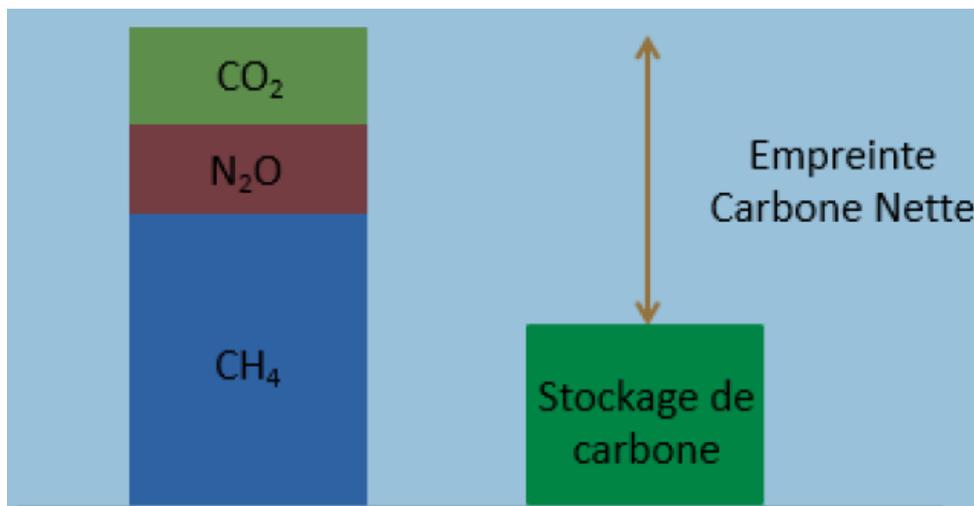


Figure 1 : Empreinte carbone (Source : CAP'2ER)

II.1. L'agriculture, victime du changement climatique et source des émissions de GES

L'agriculture est très vulnérable face aux changements climatiques notamment par rapport à la hausse des températures, la variabilité et l'irrégularité temporaire et spatiale des précipitations, à la dégradation des sols par l'érosion éolienne ou hydrique. En effet, face aux aléas climatiques, le secteur agricole est confronté à de nombreux défis au niveau des cultures / animaux, des sols et de l'équilibre global des agro systèmes que sont :

- Stress thermique et hydrique : l'augmentation des températures d'une part et la variabilité du volume des précipitations d'autre part, laissent présager une augmentation de la fréquence des stress thermique et hydrique. La résultante de ces stress aurait des impacts directs ou indirects sur la production des cultures / des animaux, ainsi que sur le bien-être des animaux (GIEC, 2014).
- Érosion des sols: L'intensification des épisodes pluvieux engendrerait une augmentation des pertes de couches arables (AForCLIM, 2019). De ce fait la levée, la croissance et le rendement des cultures sont directement affectés par l'appauvrissement du sol en éléments nutritifs. Par conséquent l'alimentation des animaux est aussi affectée.
- Déséquilibre des écosystèmes : le changement des aires de répartition de certains agents pathogènes et d'espèces invasives, notamment les insectes, est régulièrement évoqué. Ces changements climatiques pourraient dérégler certaines chaînes trophiques influençant l'équilibre des interactions ravageurs / prédateurs naturels ou pollinisateurs / période de floraison de la végétation.

Cependant l'agriculture ne subit pas seulement les conséquences du changement climatique, elle en est aussi l'un des principaux contributeurs, au travers de l'émission de GES vers l'atmosphère où ils piègent les radiations thermiques ; ce qui augmente ainsi l'effet de serre et contribue au réchauffement global. Par exemple, la contribution de l'élevage aux émissions de GES est non négligeable ; elle est de 18,6%, devant le secteur industriel (6%), selon l'IDELE (2015).

Les principaux Gaz à Effet de Serre (GES) émis par les activités agricoles sont le gaz carbonique (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O) et le méthane (CH₄). Le méthane provient pour la quasi-totalité de l'activité biologique de l'animal, et plus précisément des fermentations digestives des ruminants (80%) et des déjections (20%) (INRA, 2018). L'émission de N₂O est principalement due à la production et à l'épandage d'engrais, et aux effluents d'élevage, fèces et surtout urine, sous forte influence du statut hydrique des sols récepteurs. Le gaz carbonique (CO₂) est quant à lui, produit sur la ferme (chauffage des bâtiments, carburants...) mais aussi en amont de la ferme (processus industriels et transports des intrants). L'ensemble de ces émissions est traduit en équivalent CO₂ (eq CO₂) avec un coefficient en fonction du pouvoir de réchauffement global (PRG) et de leur temps de séjour dans l'atmosphère, soit respectivement 1, 25 et 298 pour le CO₂, le CH₄ et le N₂O (CITEPA, 2019). Concernant l'élevage de ruminants, 80% des émissions sont issues du cycle naturel du

carbone et de l'azote (digestion des ruminants, gestion des déjections animales) et 20% correspondant aux émissions de CO₂ sont liés à l'utilisation d'intrants et d'énergie fossile par les exploitations (Dolle et al., 2015b).

Les principaux postes d'émissions en élevage bovin viande (Figure 2A) sont la fermentation entérique (59%), la gestion des effluents et des apports d'azote au sol (21%), la consommation d'énergie directe (3%) et les intrants (11%) (Dollé et al., 2015a).

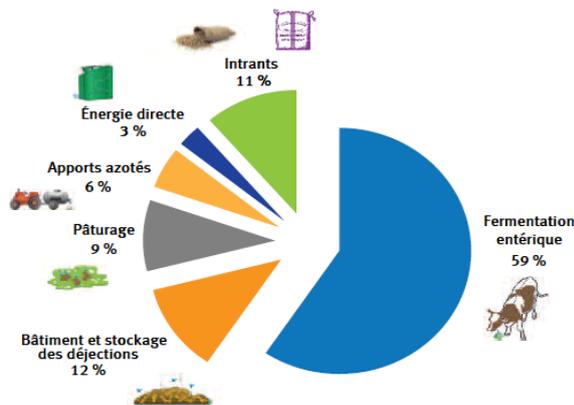


Figure 2A : Postes d'émissions de GES des élevages bovins allaitants
Source : Idele, 2015

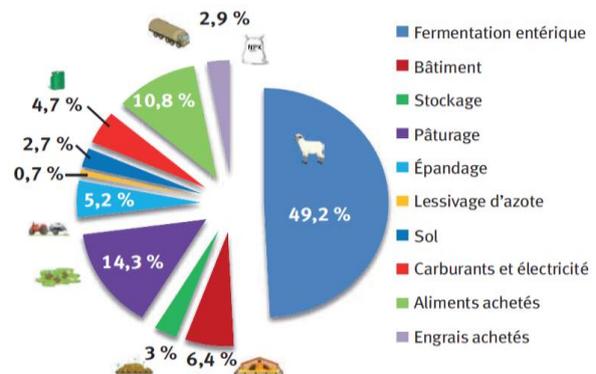


Figure 2B : Postes d'émissions de GES des élevages ovins allaitants
Source : Idele, 2014.

II.2. Avec un potentiel avéré de stockage de carbone

A la différence de nombreux autres secteurs d'activité, l'élevage de ruminants possède la particularité de valoriser des surfaces importantes de prairies, de parcours, de bois... ayant la capacité de stocker de fortes quantités de carbone dans les sols agricoles et forestiers.

II.2.1. Mécanisme de stockage et déstockage du carbone dans le sol

Le stock de carbone dans le sol résulte d'un équilibre entre apports de débris végétaux et d'autres matières organiques (fumier, etc.) et pertes dues à la décomposition de cette matière organique, à la respiration et aux perturbations naturelles ou anthropiques (Niberon, 2016). En effet, au cours du phénomène de photosynthèse, permettant la croissance des végétaux, les plantes absorbent du CO₂ atmosphérique qui sera ensuite stocké sous forme de carbone organique dans leurs organismes. Ainsi, lorsque les plantes retournent au sol, sous forme de feuilles mortes ou de végétaux en décomposition, cela alimente le sol en CO₂ organique. Inversement, la respiration du sol du fait de l'activité des microorganismes qui y sont présents conduit à un relâchement de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. De même, lorsque le sol est retourné pour être cultivé, le carbone emprisonné est libéré. Cet équilibre est lié à la quantité, la diversité et l'activité de la faune et des microorganismes présents dans le sol. L'ensemble de ces processus forme un cycle du carbone (figure 3).

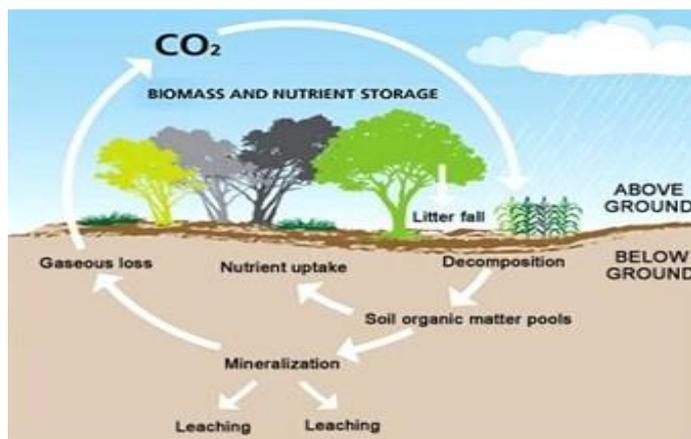


Figure 3 : Cycle du carbone

II.2.2. Le sol, source et puits de GES

Les sols constituent un réservoir majeur de carbone. Ils contiennent plus de carbone que l'atmosphère et la végétation terrestre réunis (figure 4). Ils sont des réservoirs de carbone très importants avec près de 1 500 milliards de tonnes stockés, ce qui représente deux fois le carbone atmosphérique (750 milliards de tonnes) (Chenu et al., 2014).

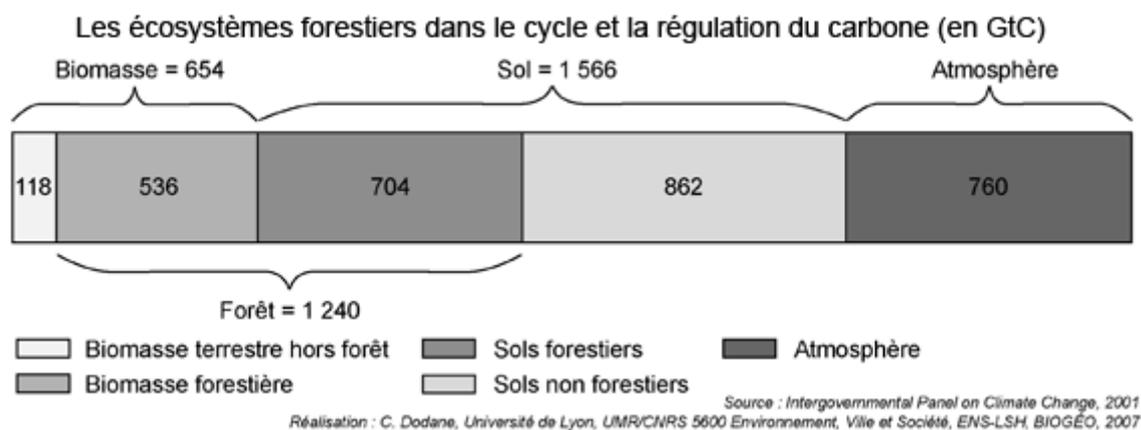


Figure 4 : Stock de carbone (hors océan)

Cependant, le carbone organique du sol (COS) est dynamique et les actions anthropogéniques sur le sol peuvent en faire un puits ou une source nette de gaz à effet de serre (GES).

En tant que source, les sols émettent des GES vers l'atmosphère. La respiration est le principal processus par lequel les sols agissent comme source de GES. Les GES à base de carbone émis par le sol sont le CO₂ et le CH₄.

La séquestration du carbone est un mécanisme par lequel le carbone atmosphérique est fixé et stocké dans le sol et dans la biomasse grâce aux plantes ou aux résidus organiques. A partir du CO₂, la séquestration du carbone comporte trois étapes: 1) le prélèvement de CO₂ dans l'atmosphère via la photosynthèse des végétaux, 2) le transfert de carbone du CO₂ en

biomasse végétale et 3) le transfert du carbone de la biomasse végétale vers le sol dans lequel il est stocké sous forme de carbone organique du sol dans le réservoir le plus instable (Lefevre et al., 2017) due à la minéralisation du carbone organique du sol qui libère du CO₂. Les sols agricoles en particulier les prairies et les haies ont la particularité de stocker durablement le carbone dans les sols. Ce stockage permet de compenser une partie des émissions de gaz à effet de serre liées à la production.

Avec 80 tonnes de carbone stockées par hectare, la prairie permanente fait aussi bien que les sols forestiers et beaucoup mieux que les vergers (50 tonnes) sur les trente premiers centimètres du sol (Sénat, 2018) (figure 5). A ce stock sous prairies, les flux additionnels annuels sont compris entre 570 et 760 kg de carbone (Dollé et al., 2013). Cette moyenne change énormément selon le climat, le type de végétation et le mode de gestion : par exemple, le stockage serait favorisé par des températures et des précipitations élevées, un léger épandage d'engrais azoté, le pâturage comparativement au fauchage.

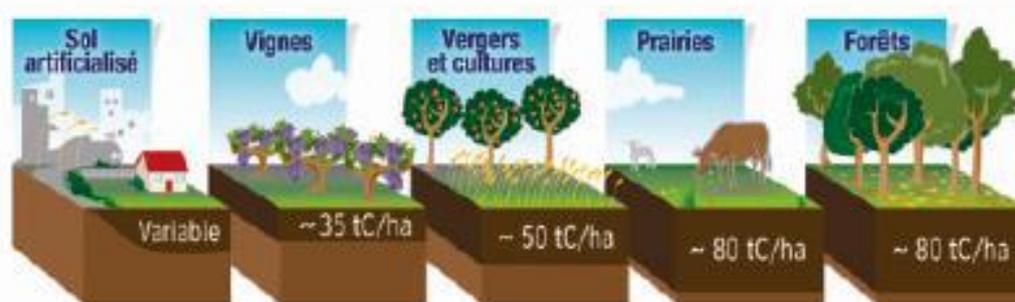
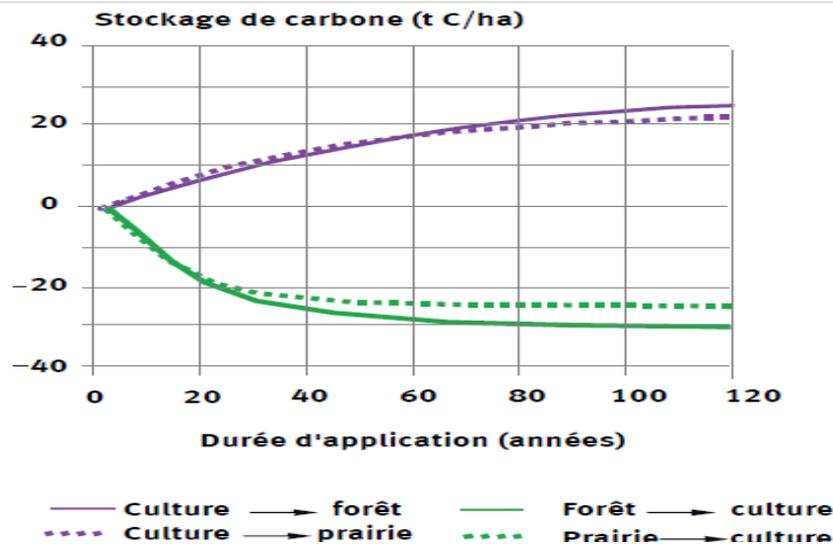


Figure 5 : Stock de carbone dans les sols selon l'usage (Source : GIS sol)

Le stockage du carbone est non linéaire. Rapide durant les 30 à 40 premières années, il ralentit ensuite. Il dépend de la cinétique de décomposition de la matière organique par les microorganismes du sol et tend à terme vers un équilibre où les entrées et les sorties se compensent (Arrouays et al., 2002) (figure 6).

Par ailleurs la conversion d'une prairie ou d'une forêt en culture engendre un déstockage de carbone, du fait du travail de la terre, deux fois plus rapide et deux fois plus important durant les vingt premières années que le stockage induit par la conversion inverse (ADEME, 2014) (figure 6).



Source Arrouays et al. 2002 citée par Idele, 2010

Figure 6 : Évolutions du stock de carbone dans les sols associées aux pratiques provoquant le stockage ou le déstockage de carbone

En France, la place de l'herbe dans la ration alimentaire reste importante. L'herbe représente 65% en moyenne pour les bovins, 80% dans la ration pour les bovins viande. Dans ce cas le stockage compense 30% des émissions de gaz à effet de serre en système laitier herbager (Dollé et al., 2013) et jusqu'à 50% des émissions en systèmes bovin allaitant 100% herbe (Dollé et al., 2009). Le stockage par les prairies et haies permet de compenser entre 30 et 100% des émissions de GES des élevages ovins, selon le système fourrager (IDELE, 2014).

II.3. Agroforesterie et changement climatique

En 2014, un rapport du projet européen AGFORWARD (den Herder et al. 2015), cité par Laurents (2016), désigne l'agroforesterie comme : « Une pratique qui intègre de façon délibérée la végétation boisée (des arbres ou des arbustes) avec des cultures et/ou l'élevage pour profiter des interactions écologiques et économiques résultantes ».

Selon le rapport, cette définition est basée sur une matrice autour des arbres, de l'élevage et des cultures (respectivement en anglais : « trees, livestock et crops »). Comme il est précisé dans la synthèse du séminaire de lancement de l'UMT Pasto (Lurette and Launay 2016), l'agroforesterie est un terme générique qui comprend différentes modalités, une définition de ce terme doit donc intégrer toute cette diversité. La figure 7 montre bien les différentes combinaisons possibles grâce à cette matrice, exposant clairement les limites.

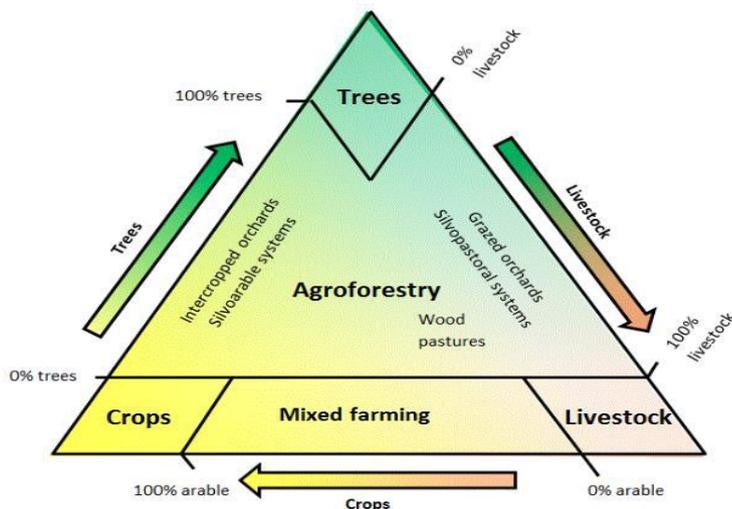


Figure 7 : Matrice arbres, élevage et culture, (den Herder et al. 2015 cité par Laurents (2016))

II.3.1. L'agroforesterie comme facteur d'adaptation au changement climatique

La présence d'éléments arborés est aperçue comme un des facteurs d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre ainsi que comme une mesure d'adaptation du système agricole aux changements climatiques.

Adaptation

- Modification du microclimat permettant de tamponner les extrêmes climatiques pour les cultures et l'élevage (par exemple diminution du stress thermique) ;
- Diversification de la production sur l'exploitation ;
- Création d'habitats diversifiés pour la faune et notamment les insectes (auxiliaires de cultures, pollinisateurs ...) ;
- Pluralité des structures paysagères et des fonctions (production, protection des ressources, augmentation de la biodiversité) assurées par le système agricole lui permettant d'être plus résilient, c'est-à-dire capable de surmonter une perturbation.

Atténuation

- Séquestration du carbone dans le bois et dans le sol.

L'arbre a aussi des influences sur les performances agricoles (végétales comme animales), sur la phénologie et le bien-être des animaux.

▪ Rendement prairial

Au pied des arbres (1m), le rendement prairial est fortement diminué en comparaison au rendement des zones plus éloignées ou sans arbre (PARASOL). Cette diminution est fonction de la densité des arbres sur la parcelle et s'explique par une diminution de la quantité de lumière disponible pour la prairie ainsi que par une compétition racinaire. Ainsi, à l'échelle de la parcelle, il existe un gradient de rendements.

D'après les observations réalisées au sein d'un réseau de parcelles du projet PARASOL, en dehors des zones de compétition avec l'arbre, le rendement prairial peut être supérieur au rendement obtenu dans une parcelle témoin sans arbre. Ainsi, à l'échelle de la parcelle, un pré-verger pourrait produire autant sinon plus qu'une prairie sans arbre. Cependant, cette tendance se maintient uniquement si le pourcentage d'ouverture de la canopée est supérieur à 50 %, c'est-à-dire si la compétition pour la lumière n'est pas trop importante.

- Phénologie

Un décalage des stades de développement des plantes en fonction de leur distance à l'arbre est noté, avec de manière générale un maintien de la surface verte au cours de la saison près des arbres. Cela permettrait un allongement de la période de production de l'herbe favorisant ainsi le pâturage de fin de saison. De plus, la production d'herbe serait répartie de manière plus homogène sur l'ensemble de la saison avec un démarrage de la croissance plus précoce, et une fin plus tardive liée à une réduction du pic de production au milieu du printemps.

- Bien être des bovins et stress thermique

Le bien être des bovins peut être évalué à l'aide d'un indicateur de stress thermique, le THI (Température Humidity Index), qui dépend des données journalières de température et d'humidité relative de l'air. La formule utilisée pour calculer le THI ne prend pas en compte les facteurs de circulation de l'air ou d'exposition directe aux rayons du soleil, qui peuvent accentuer le stress thermique chez les animaux. Les seuils de stress thermiques dépendent du type de ruminants, de la race et de l'âge. Par exemple, le seuil de stress thermique calculé pour les vaches laitières est estimé à 68, alors que chez les bovins à viande, il est estimé à 72 (AForCLIM, 2019).

Pour les bovins laitiers, les épisodes de fortes chaleurs, entraînent très rapidement une diminution de la quantité de lait produite ainsi qu'une altération de sa composition avec une diminution du ratio protéines/matières grasses. Chez les jeunes bovins à l'engraissement, le stress thermique engendre une diminution de l'ingestion et de prise de poids.

Les mesures réalisées par le projet PARASOL (cité par AForCLIM, 2019) au sein d'un réseau de parcelles en France ont montré à l'échelle d'une année, le nombre de jours où le THI dépasse 72 (seuil de stress thermique chez les bovins à viande), est inférieur en agroforesterie à 1 mètre de l'arbre par rapport à des prairies sans arbres au sein desquels le THI est largement supérieur.

- Performances zootechniques

Une expérience menée par l'institut de l'élevage (2016), révèle que des génisses pouvant bénéficier d'ombrage présentent un temps de pâturage journalier supérieur de 30 min et une différence de croissance de 200 g/jour de GMQ (gain moyen quotidien) par rapport à des génisses n'ayant pas accès à l'ombre.

Concernant les ovins, les premiers résultats obtenus par le projet PARASOL suggèrent qu'il existe un lien fort entre la biomasse herbacée présente sur la parcelle (quantité et qualité du fourrage) et les performances des animaux. Cette étude montre également qu'il n'y a pas de

différence significative en termes de prise de poids des agneaux (environ + 200 g/jour) entre 3 dispositifs plus ou moins arborés (entre 1 et 120 arbres/ha).

- **Comportement des ovins**

D'après les observations réalisées par le projet PARASOL, en prairies arborées, les ovins recherchent activement les zones ombragées y compris en dehors des périodes de fortes chaleurs. Cette étude a démontré que, même en présence d'un unique arbre au sein de la prairie, les brebis passent entre 30 et 40 % de leur temps à l'ombre (le houppier ne représentant que 1% de la superficie totale de la parcelle). Parmi les activités de ces ovins, 90% des activités de repos se déroulent à l'ombre. Cependant, il a noté qu'à proximité des arbres les ovins présentent des signes plus fréquents de gêne due à une présence plus importante d'insectes dans les zones d'ombre.

II.3.2. Stockage carbone dans le cadre de l'agroforesterie

On est amené à considérer la forêt parce que les exploitations sur lesquelles nous travaillons associent les arbres à l'élevage.

Stockage de carbone

Le stockage de carbone s'opère dans la biomasse ligneuse aérienne et souterraine des arbres mais également dans les sols.

Stockage de carbone dans le sol

Dans le sol, le stock total de carbone résulte du bilan des entrées organiques (décomposition de la litière aérienne des arbres, résidus de tailles, renouvellement des racines fines, exsudats racinaires) et des sorties par minéralisation.

Une étude menée par le projet Agripsol (2012) estime que le sol d'une parcelle agroforestière, composée d'arbres intra parcellaires âgés de 18 ans associés à des cultures, reçoit environ 40% de matière organique (MO) additionnelle sur une profondeur totale de 2 mètres par rapport à une parcelle agricole témoin.

Le stockage de carbone dans le sol ne se fait donc pas de manière uniforme à l'échelle de la parcelle ; il existe un gradient de carbone avec des teneurs plus importantes à proximité des arbres (Agripsol).

Pour les systèmes agroforestiers en prairie, le stockage additionnel de carbone dans le sol est significatif en dessous de 40 cm de profondeur, car la concentration de carbone organique dans les horizons de surface sont déjà importants.

Il faut cependant noter que le mode de gestion de la parcelle (labour, niveau de fertilisation...), les antécédents culturaux ainsi que la forme du carbone introduit dans le sol influencent évidemment aussi le bilan de carbone.

Stockage de carbone dans les arbres

Le carbone atmosphérique fixé puis stocké au sein de la biomasse aérienne et souterraine des arbres est en fonction de la croissance des arbres.

D'après AForCLIM 2019, les suivis réalisés, par l'UMR System, sur des noyers hybrides dans le Sud de la France, montrent une croissance en diamètre et en hauteur plus importante (+50 % et +40 %, respectivement) sur 10 ans pour les arbres en situation agroforestière (espacement : 13 x 4 mètres) par rapport à une situation forestière (espacement : 7 x 7 mètres). Cette différence s'explique par une disponibilité en ressources plus importante, notamment en lumière, pour les arbres agroforestiers par rapport aux arbres forestiers. De plus, lorsqu'ils sont associés à des cultures, les arbres bénéficient en partie des fertilisations apportées aux cultures.

L'analyse de la bibliographie sur le stockage additionnel de carbone dans les arbres et dans le sol met en évidence une forte variabilité des stockages mesurés suivant le contexte pédoclimatique, le type de système agroforestier (notamment la densité d'arbres) (figure 8)... D'après (Pellerin et al., 2013), l'agroforesterie stocke 3,7 t eqCO₂/ha/an de carbone dans la biomasse et dans le sol, sur une durée de 20 ans, avec comme fourchette une valeur basse autour de 0,4 t eqCO₂/ha/an et une valeur haute de 4,97 t eqCO₂/ha/an. On note donc une très forte incertitude associée au stockage agroforestier. D'après Liagre 2009, la création d'une parcelle d'agroforesterie conduit à stocker annuellement entre 1,5 et 4 tC/ha pour des densités comprises entre 50 et 100 arbres/ha soit en moyenne 2 fois plus qu'un hectare forestier moyen, estimé à 1 tC/ha/an.

Pour ce qui est des haies, selon la même source, les valeurs retenues sont de 0,55 t eqCO₂/ha/an (valeur basse : 0,17 et valeur haute : 0,94) et 0,92 t eqCO₂/ha/an (valeur basse : 0,28 et valeur haute : 1,56), suivant que la haie est introduite dans une parcelle cultivée ou une prairie, sur 60 ou 100 mètres linéaires respectivement.

La conversion des terres arables ou des prairies en agroforesterie représente donc, sur une unité de surface, un potentiel de stockage intéressant sur le long terme d'autant plus que les parcelles agroforestières, contrairement aux forêts, partent d'un stock initial nul (Liagre 2009).

Type d'arbres	Durée de la rotation	Densité d'arbres	Potentiel de stockage (tC/ha/an)	Stockage moyen sur la durée de la rotation (tC/ha)	Stockage final (tC/ha)
Croissance lente	50 ans	50 arbres/ha	1.5	37.5	75
Croissance lente	50 ans	100 arbres/ha	3	75	150
Croissance rapide	15 ans	50 arbres/ha	2	15	30
Croissance rapide	15 ans	100 arbres/ha	4	30	60

Figure 8 : Potentiel de stockage d'une parcelle agroforestière

Source : L'Agroforesterie - Outil de Séquestration du Carbone en Agriculture, INRA et Agroof, 2009

Considérant le carbone stocké par les prairies permanentes, les prairies temporaires et les haies, les cultures intermédiaires, le carbone contenu dans les déjections animales et épandu, l'accroissement annuel de carbone dans les sols associés à l'élevage de ruminants est important.

Le bilan gaz à effet de serre de la filière forêt-bois : leviers à prendre en compte

Les forêts contribuent à l'atténuation du changement climatique à travers deux leviers : un effet séquestration et un effet de substitution (figure 9). Le bilan effet de serre de la filière forêt bois doit prendre en compte ces deux effets qui sont interconnectés dans de complexes échelles temporelles et spatiales (ADEME, 2015). Dans le cadre de cette étude, nous allons plus nous focaliser sur le levier séquestration.

L'effet séquestration : stocker du carbone dans les écosystèmes et dans les produits bois

La photosynthèse permet aux arbres de capter du carbone atmosphérique pendant leur croissance, carbone ensuite stocké dans la biomasse (y compris bois mort et litière) et dans le sol. Dans une forêt tempérée, le stock de carbone se répartit pour environ moitié entre le sol et la biomasse végétale (Rossi et al., 2015). Les conditions climatiques, les types de forêts et de sols, les perturbations naturelles (tempêtes, parasites, incendies...) et les pratiques sylvicoles menées déterminent le niveau de ce stock de carbone et ses variations. Le stock de carbone d'une forêt est évalué à de 1tC/ha/an (Liagre 2009).

Lorsqu'un arbre meurt ou est coupé, une grande partie du carbone qu'il avait stocké au cours de sa croissance va progressivement être rejetée dans l'atmosphère. Ces émissions peuvent avoir lieu en forêt (décomposition du bois mort, y compris rémanents et souches après récolte) ou dans la filière bois (dégradation naturelle ou combustion des connexes et des produits en fin de vie). Le processus peut être plus ou moins rapide. Le menu bois se décompose en quelques années, les souches ou les produits bois en fin de vie peuvent mettre plusieurs dizaines d'années à se dégrader alors que la combustion du bois rejette immédiatement du carbone dans l'atmosphère (ADEME, 2015).

En stockant du carbone pendant leur durée d'usage, les produits bois matériaux constituent un autre réservoir de carbone, toutefois beaucoup moins important que celui des écosystèmes. L'utilisation accrue des produits bois, l'allongement de leur durée de vie (notamment par le recyclage) permettent d'accroître ce stock de carbone.

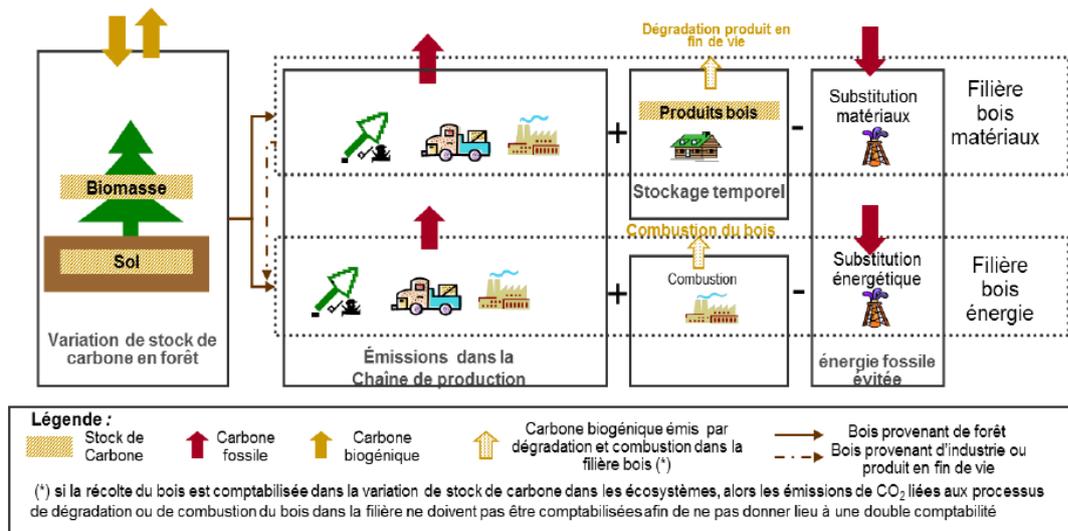


Figure 9 : Représentation des émissions et absorptions de carbone de la filière forêt bois (Source ADEME, 2015).

L'effet de substitution : éviter les émissions issues d'énergies fossiles pour la production d'énergie et de matériau

L'utilisation de produits bois évite d'avoir recours à d'autres matériaux énergivores comme notamment l'aluminium, le béton ou l'acier et permet ainsi d'éviter des émissions de CO₂ (Arrouays, 2002). L'utilisation de bois pour produire de l'énergie permet d'éviter des émissions issues de la combustion d'énergies fossiles, c'est l'effet de substitution énergétique. En effet 1m³ de bois rond utilisé directement pour la production de chaleur dans l'industrie et le secteur collectif en substitution d'énergies fossiles permet d'éviter environ 0,5 t CO₂ (ADEME, 2015).

III. Matériel et méthode

Le matériel, constitué de deux exploitations pilotes, est traité en premier lieu. Puis vient la méthode avec le modèle conceptuel, pour l'évaluation de l'empreinte carbone, constitué du périmètre du système, des postes d'émission et l'évaluation de ces postes selon les lignes directrices du GIEC. Enfin une évaluation des émissions de la production et de la combustion de bois a été faite.

III.1. Modélisation du fonctionnement technique de deux exploitations allaitantes

Deux exploitations ont été étudiées : une exploitation ovine allaitante et une exploitation bovine allaitante. Les enquêtes de Laurents (2016) et les données fournies par la chambre d'agriculture de l'Ariège nous ont permis de retranscrire / modéliser la situation initiale de deux exploitations appartenant aux exploitations pilotes du projet Agrosyl. Ces données ont été complétées par celles issues des Réseaux d'élevage Inosys (2018) pour l'exploitation ovine et (2016) pour l'exploitation bovine. Les références du Rami Pastoral (Rami pastoral, 2019) ont été utilisées concernant la production des landes et des bois selon les différentes saisons.

L'exploitation ovine est constituée par un troupeau de race Tarasconnaise de 1200 brebis avec une lutte entre le 15 octobre et le 15 novembre avant l'entrée en bâtiment (voir en annexe I, II et III le schéma démographique, le calendrier d'alimentation et le calendrier de zootechnique du troupeau). Les agneaux sont sous leurs mères et sont vendus à deux mois. L'exploitation dispose 342 ha de SAU composés de prairies permanentes, de prairies temporaires et de parc boisés. 25 vaches de ses voisins pâturent certains bois durant deux mois de l'année (mai – juin). Les données Inosys, issues du cas-type Système Ovin Spécialisé, de grande dimension transhumant, situé en piémont des Pyrénées centrales (Inosys, 2018) ont été utilisées afin de préciser le système d'alimentation.

Le troupeau bovin est conduit en race pure limousine avec une production de broutards légers. Constituée par un troupeau de 90 mères et 45 génisses, la lutte a eu lieu du mois de janvier au mois de mai (voir en annexe IV et V les schémas de démographique et le calendrier de conduite du troupeau). L'exploitation bovine vend des broutards maigres aux maquignons. Elle dispose d'une superficie 179 ha de SAU composé de prairies permanentes, de prairies temporaires, de landes et de bois. L'exploitation produit également du bois de buche. Comme pour l'exploitation précédente, le cas type système spécialisé broutards légers limousins naisseur en piémont des Pyrénées des données Inosys a été utilisé (Inosys 2016) afin de préciser le système d'alimentation.

III.2. Le modèle conceptuel pour l'évaluation de l'empreinte carbone

Le modèle conceptuel représente l'atelier de production, les surfaces, les intrants utilisés et les produits de sortie (figure 10). Il indique aussi les flux qui existent entre ces différents éléments. Le modèle est paramétré à travers les facteurs d'émission des différents postes et les capacités de stockage des surfaces.

III.2.1. Le périmètre d'étude : limites du système étudié

Le périmètre de l'étude comprend l'ensemble des stades de production, sur l'exploitation et en amont de celle-ci (du berceau aux portes de la ferme), selon une approche cycle de vie. Cela concerne l'atelier de production (animaux en production et de renouvellement), les surfaces destinées à l'alimentation de l'atelier d'élevage et l'ensemble des intrants (énergie, aliments ...) utilisés par l'exploitation. Les bâtiments et matériels sont exclus du champ de l'étude. Leurs émissions ne sont pas prises en compte car la méthode d'évaluation reste complexe (Veysset et al., 2014) et représentent moins de 5% de l'impact (Dollé et al., 2011).

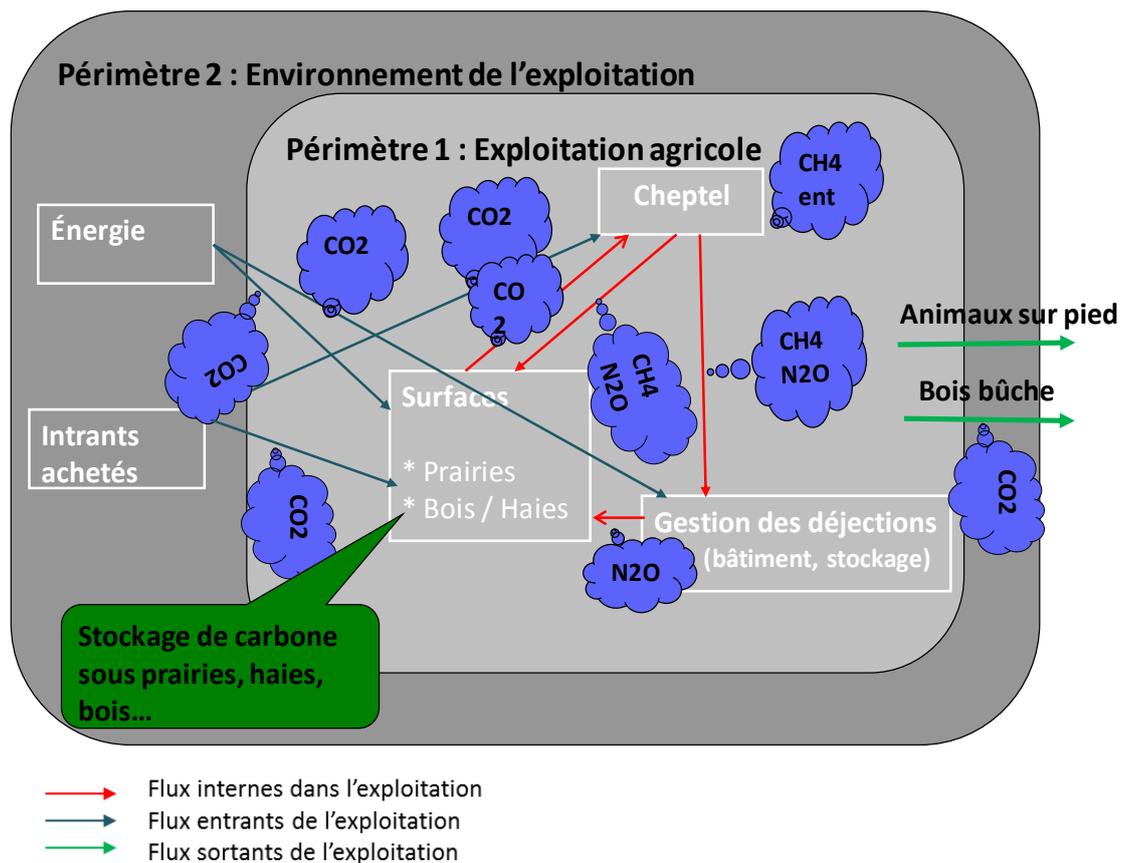


Figure 10 : Modèle conceptuel des élevages allaitants (adapté de IDELE, 2015)

III.2.2. Les postes d'émission et de stockage et évaluation des différents postes

Les exploitations d'élevage sont des systèmes complexes avec des interactions multiples entre le cheptel et les surfaces mobilisées. Une évaluation globale à l'échelle du système nous permettra de donner une vision représentative de l'impact environnemental. Cette évaluation des émissions de GES permet la détermination de l'empreinte carbone brute. La prise en compte du stockage de carbone aboutit à l'appréciation de l'empreinte carbone nette.

Ils sont constitués de six principaux postes.

Les émissions de GES sont calculées selon les lignes directrices du GIEC (Groupement Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat), qui proposent une méthodologie internationale et des préconisations pour la réalisation de ces inventaires selon 3 niveaux de précision croissant (annexe VI, VII, VIII, IX) :

- Un niveau 1 (dit Tier 1), qui propose des données et équations par défaut, non spécifiques au pays ;
- Un niveau 2 (dit Tier 2), qui propose à l'utilisateur d'appliquer des coefficients basés sur des données spécifiques au pays ou à la région (données d'activités plus détaillées, coefficients spécifiques au pays).
- Un niveau 3 (dit Tier 3), qui propose à l'utilisateur d'utiliser des modèles et des systèmes de mesures d'inventaire adaptés aux circonstances nationales, (données d'activité à résolution plus élevée, échelles spatiale et temporelle supérieures, etc.) permettant d'aboutir à des estimations avec un meilleur niveau de certitudes.

Le GIEC préconise d'utiliser les niveaux Tier 2 ou Tier 3 pour les « catégories clés », c'est à dire les catégories les plus émettrices, ce qui est le cas des activités agricoles. Les émissions de GES calculées dans ce travail s'inscrivent dans cette approche de Niveau 2. En effet, les émissions sont calculées à partir des méthodes d'estimation de facteurs d'émission spécifiques au territoire français : conditions pédoclimatiques, pratiques d'élevage et itinéraires cultureux....

- ❖ La fermentation entérique : émissions de méthane issues de l'activité biologique des animaux de l'atelier.

Les émissions de CH₄ entérique sont dues à la dégradation et la fermentation anaérobie des aliments dans l'appareil digestif des ruminants par des microorganismes. Les émissions de méthane sont basées sur la matière organique (MO) de la ration. Le méthane entérique se forme à partir de la matière organique digestible (MOD) et le méthane des déjections (au bâtiment, stockage, pâturage) à partir de la matière organique non digestible (MOND). Les émissions de GES de la fermentation entérique des animaux se calculent sur la base de l'effectif annuel moyen des animaux et du facteur d'émission de la fermentation entérique (en kg de CH₄ / animal).

- ❖ La gestion des déjections : émissions de méthane et de protoxyde d'azote issues de la gestion des déjections (pâturage, bâtiment, stockage). Ces émissions recouvrent les émissions de GES liées à la gestion des déjections animales qui ont lieu au bâtiment, au stockage, au pâturage et lors de l'épandage de ces déjections. Ce poste génère l'émission de deux gaz différents : le CH₄ et le N₂O.
Des données de références ou facteurs d'émission (au bâtiment, au stockage, au pâturage, épandage) sont utilisés. Par exemple au pâturage, elle est calculée selon l'effectif des animaux et le facteur d'émission.
- ❖ Les apports azotés : émissions de protoxyde d'azote liées aux phénomènes de nitrification et dénitrification des apports directs d'azote par la voie de la fertilisation organique. Elles sont obtenues à partir de l'effectif des animaux, de la quantité d'azote épandue et du facteur d'émission du N₂O à l'épandage.
- ❖ L'énergie directe : émissions de CO₂ résultant de la combustion de fioul sur l'exploitation et émissions de CO₂ résultant de la production d'énergies fossiles consommées (électricité et fioul). Elle est calculée en utilisant le facteur d'émission (FE) du fioul ou de l'électricité et le nombre de kW ou le nombre de litres de fioul consommés (voir annexe X).
- ❖ Les intrants : impact en équivalent CO₂ généré lors de la fabrication et du transport des intrants (engrais, aliments du bétail, semences) ; il s'agit en particulier de CO₂ d'origine énergétique. Les émissions sont obtenues par la quantité d'intrants achetée et le facteur d'émission correspondant à chaque intrant (voir annexe X). On n'affecte actuellement pas d'énergie et d'émissions de GES aux pailles, considérées comme un sous-produit (Gestim 2010).
- ❖ Le stockage de carbone : stockage de carbone additionnel sous forme de matière organique stable dans le sol (sous haies, prairies, bois...) résultant de la consommation de CO₂ atmosphérique par photosynthèse.
Depuis quelques années, le stockage de carbone commence à être pris en compte dans les ACV en élevage. Prendre en compte cet aspect permet d'obtenir un bilan net des émissions de GES (Dollé *et al.*, 2013). Une méthode d'évaluation mis en place prend en compte le stockage par les prairies permanentes (PP), temporaires (PT), les parcours, les haies, les bois et le déstockage par les cultures. La distinction entre PP et PT permet de considérer le stockage/déstockage lié à l'intégration d'une PT dans une rotation (voir annexe 11).
Les quantités de carbone stockées sont obtenues à partir des capacités de stockage des différents usages des sols et de la surface occupée par ces sols.

Concernant le calcul du stockage de carbone après une éclaircie, la moitié de la capacité de séquestration du carbone sur la surface éclaircie est seulement pris en compte. En effet, dans une forêt tempérée, le stock de carbone se répartit pour environ moitié entre le sol et la biomasse végétale (Rossi *et al.*, 2015).

❖ **Émissions de GES liés à l'exploitation du bois**

Les émissions relatives aux chantiers forestiers sont intégrées au bilan carbone total des forêts et des produits bois. Ces émissions sont liées principalement aux chantiers de reboisement, d'abattage mécanisé, de bûcheronnage, de débardage et de transport des grumes.

Ces émissions vont varier selon le type de chantier et donc le type d'engin utilisé (gyrobroyeur, tracteur, abatteuse, débardeuse...) et le temps d'utilisation de ces machines qui a un impact sur la consommation d'huiles et d'engrais. Ainsi les émissions de GES liées à l'exploitation forestière sont obtenues à partir du facteur d'émission lié à l'exploitation de bois par mètre cube de bois exploité (ADEME, 2017).

❖ **Émissions de GES liés à la combustion du bois**

Deux gaz à effet de serre sont libérés par la combustion du bois : le dioxyde de carbone (biogénique et fossile) et le méthane (biogénique et fossile). Le dioxyde de carbone biogénique émis par la combustion du bois n'a pas d'impact sur le changement climatique, car il correspond intégralement au dioxyde de carbone absorbé au cours de la croissance de la plante en amont (ADEME, 2015), encore faut-il que le développement du parc forestier soit maintenu en équilibre avec son exploitation (Sawerysyn, 2012).

Une analyse du cycle de vie (ACV) du bois énergie (Base Carbone ADEME) permet d'évaluer la contribution en gaz à effet de serre de toutes les opérations mises en jeu (bûcheronnage, débardage, transports, etc..) pour passer de la « pépinière à la cendre ». La combustion émet 1,542 kgCO₂ émis par kg de bois bûche ; 1 m³ de bois de chauffage bien séché à l'air durant au moins 1 an est estimé à 500 kg (Base Carbone ADEME).

III.3. Participation à la construction d'un simulateur

A partir des connaissances et des données mobilisées lors de l'élaboration du modèle conceptuel des 2 situations initiales, un simulateur a été implémenté en langage GAMA (<https://gama-platform.github.io/>). Le langage GAMA permet de représenter explicitement les entités composant le système étudié. Elle permet d'étudier un système à différents niveaux et de prendre en compte l'hétérogénéité des entités composant le système.

Le simulateur décrit sur une période de 5 ans, les composantes du système telles que décrites dans la partie précédente.

En entrée du simulateur, au-delà des données structurelles (surfaces, cheptel, etc.) et de conjoncture économique, les variables concernent la production et la gestion des stocks de fourrages. Un profil de pousse de l'herbe est donné pour chaque type de surface représenté. Puis le mode d'exploitation de chaque parcelle est défini, avec les dates de coupe et d'entrée et sortie des animaux au pâturage. Enfin, le calendrier prévisionnel de distribution du fourrage

est calculé pour une année normale. Le stock de fourrages dans la grange est initialisé de façon à assurer la demande pendant la période hivernale.

En sortie, le simulateur calcule les différents éléments du bilan de la production et de l'utilisation des fourrages (en bâtiment et sur les parcelles), ainsi que les principaux résultats zootechniques et les indicateurs de calculs de l'empreinte carbone.

L'autonomie fourragère potentielle (AFp) est calculée à partir de la formule :

$$AFp = \text{Offre} / \text{Demande} ;$$

Offre = la biomasse disponible pour le pâturage + la production de foin

Demande = le prélèvement des animaux au pâturage + les besoins des animaux en foin.

III.4. Scénarios à tester avec le simulateur

L'intérêt du simulateur est de pouvoir évaluer l'impact de scénarios de mise en œuvre de pratiques agroforestières sur l'empreinte carbone de l'exploitation et son autonomie fourragère potentielle. Le simulateur a été utilisé pour tester des scénarios de pratiques agroforestières. La pratique d'éclaircie sylvopastorale a ainsi été testée pour l'exploitation ovine. En effet la pratique d'éclaircie va permettre l'accès de la lumière au sol ; ce qui va favoriser la production de l'herbe au niveau des sous-bois et ainsi augmenter la biomasse disponible pour le pâturage, avec un moindre impact d'une sécheresse sur la production en sous-bois comparé à la production de biomasse dans un milieu ouvert (prairie, pelouse). Le coefficient de pousse de biomasse augmente les premières années sur les surfaces éclaircies, puis diminue au fur et à mesure que la canopée se referme. Ainsi quatre scénarios ont été testés :

- **Scénario 1** : Situation initiale (SI 1B) avec arrêt de fauche chez le voisin (66 tonnes de fourrages en moins), donc exploitation en situation de déficit fourragère ;
- **Scénario 2** : Situation initiale avec éclaircie de 50 ha de bois fermé (SI 1B + éclaircie) pour combler le déficit en fourrage de l'exploitation. Pour une solution plus durable et pour pallier ce déficit une éclaircie de 50ha de forêt est simulée.
- **Scénario 3** : Situation initiale avec dégradation des conditions climatiques (SI 1B + dégradation condition climatique f ou F) qui provoque une perte de production de fourrages, ainsi que de biomasse disponible au pâturage. Deux types de dégradation des conditions climatiques sont appliqués ; un fort (F) et un modéré (f). Pour cela, une réduction du coefficient de pousse est appliquée mensuellement (par exemple pour une dégradation des conditions climatiques forte : de janvier à décembre les coefficients de pousse sont multiplié par les valeurs suivantes : [1.0,1.0,1.0,0.5,0.2,0.5,0.5,1,1,1,1,1]. Lors de la mise en œuvre de dégradation des conditions climatiques, le modèle considère que les différents types de surfaces ne sont pas affectés avec la même intensité, des coefficients de résistances sont donc appliqués comme suit : [PP::0.1,PT::0.1,bois ouvert::0.8, bois fermé ::0.8,landes::0.8,haies::0.8].

- **Scénario 4** : Situation initiale avec dégradation des conditions climatiques (faible ou fort) et éclaircie de 50 ha de bois fermé (SI 1B + dégradation des conditions climatiques f ou F + éclaircie) pour compenser les pertes en fourrage et de biomasse disponible pour pâturage.

IV. Résultats et discussions

Les résultats sont présentés en trois parties. Dans un premier temps l’empreinte carbone des exploitations en situation initiale est présentée, puis l’intérêt d’une éclaircie sylvopastorale pour faire face à une dégradation du climat et en dernier point l’impact d’une éclaircie sylvopastorale sur le bilan carbone. Les différents résultats présentés sont discutés au fur et à mesure.

IV.1. Empreinte carbone des exploitations en situation initiale

IV.1.1. Consommation d’énergie des exploitations ovines et bovines

La consommation d’énergie est exprimée en MJ et constitue trois principaux postes que sont la consommation directe d’énergie, avec le fioul et l’électricité, et la consommation d’énergie indirecte, via la production de l’alimentation achetée (les deux exploitations ne font pas de fertilisation minérale).

L’électricité constitue le poste le moins important pour les deux exploitations (14% pour les ovins et 19% pour les bovins). Cependant le poids du fioul diffère largement au niveau des deux exploitations, l’exploitation bovine est celle la plus consommatrice en fioul. Au même titre que le poids de l’alimentation qui constitue le poste le plus important pour l’exploitation ovine (figure 11).

Ramenée à l’hectare de SAU, la consommation d’énergie de l’exploitation bovine est de 2290MJ/ha est celle de l’exploitation ovine est de 3333 MJ/ha.

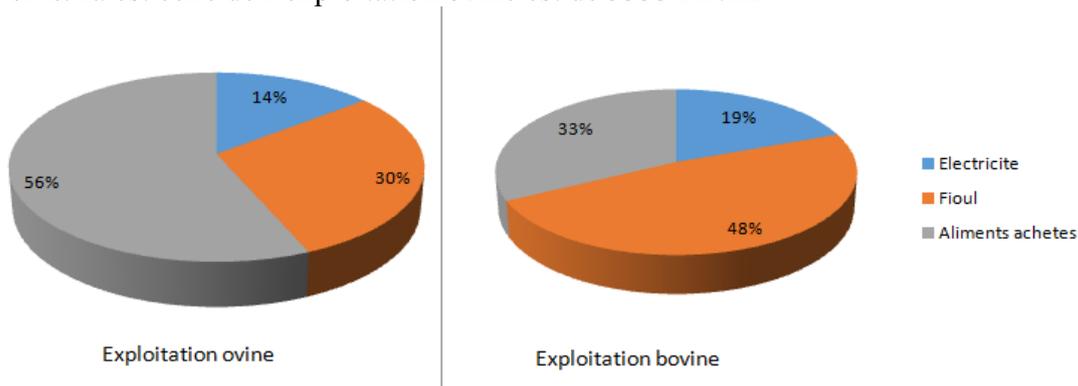


Figure 11 : Postes de consommation d’énergie des exploitations « ovine et bovine allaitant »

Ces résultats sont proches avec ceux de l’IDELE (2013) sur l’étude de la consommation d’énergie des exploitations ovines allaitantes du Sud-Ouest. En effet dans les exploitations spécialisées zone fourragère l’alimentation représente le poste le plus important avec 54% puis le fioul avec 23% et enfin l’électricité qui pèse pour 11%. Cependant la différence

majeure entre ces exploitations ovines allaitantes du Sud-Ouest et notre cas d'étude est que la fertilisation minérale représente 11% de la consommation d'énergie. Ce qui n'est pas le cas de notre exploitation qui ne pratique pas cette fertilisation minérale. Ceci pourrait être une explication sur les différences obtenues entre les résultats.

Pour le cas des exploitations bovines allaitantes du Sud-Ouest (IDELE 2010), l'énergie indirecte représente le poste le plus important avec plus de 60% (alimentation 35% et fertilisation 27%) puis l'énergie directe qui représente 39% (fioul 33%, électricité 6%). Ce qui n'est pas le cas de notre étude où l'énergie directe constitue le poste le plus lourd 67% (fioul 48%, électricité 19%) et l'énergie indirecte constituée seulement du poste alimentation représente 33% de la consommation d'énergie. Comme pour l'exploitation ovine, la non pratique de la fertilisation minérale de notre exploitation pourrait être à l'origine des différences obtenues entre les résultats des deux études. Néanmoins la consommation d'énergie obtenue est comparable avec les résultats du Casdar Agneau bio (2016) où l'énergie directe représente 80,65%. Cette différence vient du fait que la fertilisation constitue un poids à ne pas négliger (27%) pour les exploitations bovines allaitantes du Sud-Ouest ; ce qui n'est pas le cas de notre exploitation qui ne pratique pas la fertilisation.

La consommation d'énergie des exploitations est très faible (2290MJ/ha pour les bovins et 3333MJ/ha pour les ovins) comparée aux résultats trouvés au niveau de la bibliographie. D'après IDELE (2013), les ovins allaitants spécialisés en zone pastorale du Sud-Ouest ont une consommation de 9988 MJ/ha et les systèmes naisseurs engraisseurs une consommation de 6983 MJ/ha IDELE (2010).

Ce qui peut nous amener à dire que les deux exploitations sont très économes en énergie. Ceci peut être expliqué en partie par la non utilisation de l'engrais minéral et par la faible dépendance des aliments venant de l'extérieur (exploitation bovine qui n'achète que du foin).

IV.1.2. Bilan carbone des deux ateliers d'élevage

La contribution des principaux postes d'émission met l'accent sur la part prépondérante du méthane dans les deux exploitations : 70 % pour les bovins et 61% pour les ovins (figure 12). La fermentation entérique représente 81% du méthane total émis par les bovins et 86% du méthane total émis par les ovins. Les émissions de méthane et de protoxyde d'azote pour le poste gestion des déjections (bâtiment, au stockage et au pâturage) pèsent pour 26% pour les bovins et 22% pour les ovins. Les émissions de N₂O et de CH₄ à l'épandage sont presque similaires dans les deux exploitations (10% pour l'exploitation bovine et 11% pour l'exploitation ovine). Concernant les émissions de CO₂, dues à la consommation d'énergies directes ; elles sont faibles et sont similaires dans les exploitations (4%). Le poids des intrants constitués essentiellement des aliments achetés est aussi faible dans les exploitations (9% de concentrés pour les ovins et de 2% de fourrages pour les bovins). (Voir figure 13)

Les émissions brutes de GES sont de 423 t eqCO₂ pour les l'exploitation bovine et de 510 t eqCO₂ pour l'exploitation ovine (Figure 14). Les stockages de carbone à travers les différentes surfaces utilisées pour l'alimentation des animaux sont respectivement de 265 t eqCO₂ et 1013 t eqCO₂. Les stockages permettent de compenser les émissions brutes de CO₂ à hauteur de 62,65% pour les bovins et de 198,63% pour les ovins. L'empreinte carbone nette des exploitations est donc de 158 t eqCO₂ pour les bovins et -503 t eqCO₂ pour les ovins (figure 14).

Ramenées au kilogramme de viande vive l'empreinte brute est de 14,16 kg eqCO₂/kgvv et celle nette -13,97 kg eqCO₂/kgvv pour les ovins. Pour les bovins, l'empreinte brute est de 14,21 kg eqCO₂/kgvv et celle nette de 4,38 kg eqCO₂/kgvv.

Les émissions de GES pour la production de bois sont presque nulles comparées aux émissions de GES de l'atelier d'élevage ; elles sont de 0,2% pour les bovins et 0,12% pour les ovins (figure 12). Cela confirme les propos de l'ADEME (2015) qui soulignent que les GES émis pour l'exploitation du bois sont considérés comme nuls vue leurs parts dans le bilan global des GES.

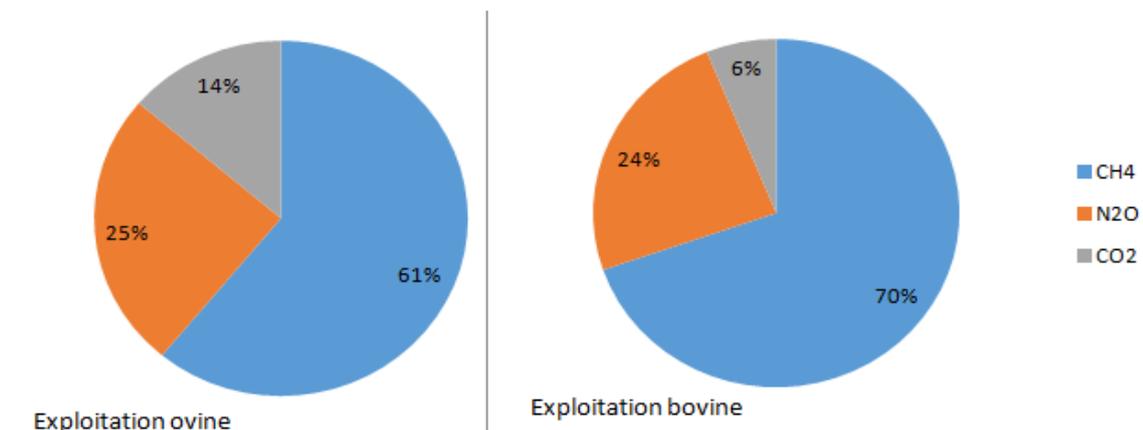


Figure 12 : Part des GES des deux exploitations

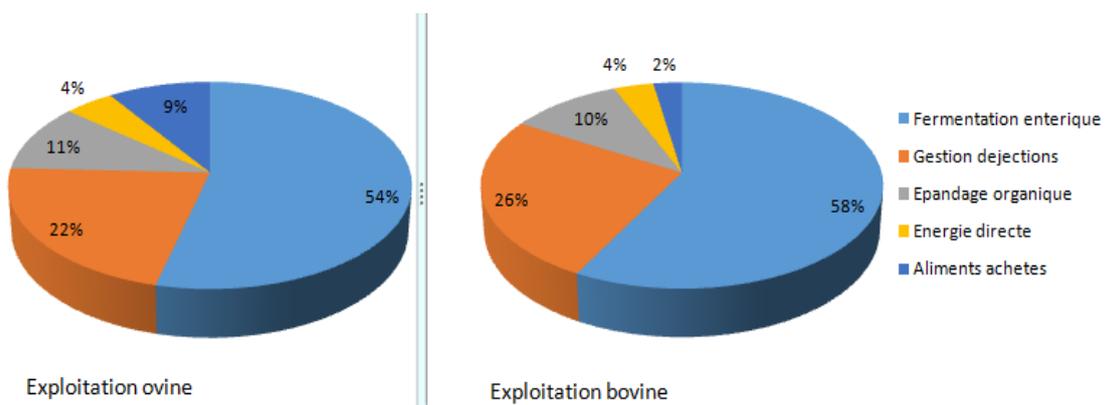


Figure 13 : Part des postes d'émissions des exploitations bovine et ovine allaitantes

Les différents résultats trouvés pour l'émission des GES des bovins sont conformes avec la bibliographie. Ainsi Dollé et al., (2015a) donnent les mêmes tendances. La fermentation entérique représente 59%, la gestion des déjections (21%), la consommation d'énergie directe (3%) et les intrants (11%). La différence obtenue pour la part des intrants pourrait s'expliquer par le fait que les exploitations étudiées par l'auteur utilisent de la fertilisation minérale, ce qui n'est pas le cas de notre exploitation.

La différence observée sur la gestion des déjections pourrait avoir comme explication par le fait que l'exploitation bovine passe beaucoup de temps en bâtiment (140 jours) car, au pâturage, les déjections sont beaucoup moins émettrices que celles produites en bâtiment puis stockées (IPCC 2006).

Pour l'exploitation ovine, la différence majeure notée avec la bibliographie est la part du méthane entérique et des intrants. Les travaux de Béchu et al., (2014), tirés des Réseaux d'élevage (2010), dans le vademecum pour la filière ovine allaitante montrent que la part du méthane entérique est de 49,2% et les intrants pour 14%. La différence trouvée pour les intrants pourrait être la même explication, l'utilisation ou non des engrais minéraux. Cependant nous n'avons pas beaucoup d'éléments de comparaison sur la filière ovine concernant la fermentation entérique des ovins pour voir si nous sommes proches d'autres résultats d'étude ou pas. Mais quoi qu'il en soit elle reste toujours le poste le plus important. Pour ce qui est de l'empreinte carbone, les résultats obtenus pour bovins sont comparables à ceux de Gac et al., (2010). En effet, pour son échantillon de systèmes allaitants spécialisés, les émissions moyennes brutes sont de 15,44 kg eqCO₂/kg VV et celles nettes de 8,52 kg eqCO₂. Les valeurs obtenues sont aussi comparables aux empreintes carbone estimées lors des premiers travaux de l'Institut de l'Élevage (Dollé et al., 2009) comprises entre 12 - 20 kg eqCO₂ pour la brute et de 6 - 12 kg eqCO₂ pour la nette. Elles sont aussi similaires à celles de Dollé et al. (2015b) qui sont de 14,3 kg eqCO₂ pour l'empreinte brute et 8,7 pour l'empreinte nette. Même constat avec les résultats obtenus par SOLAGRO (2010) qui donnent 14,2 kg eqCO₂ d'empreinte brute.

Le taux de compensation carbone des bovins est aussi en phase avec la bibliographie. En effet Dollé et al. (2009) disent que cette compensation peut aller jusqu'à 50% des émissions en systèmes bovins allaitants 100% herbe. Gac et al. (2010) présentent des taux de compensation de 52% pour les systèmes allaitants spécialisés naisseurs et 53% pour les systèmes allaitants spécialisés naisseur engraisseurs de bœuf.

La présence de prairies permanente et temporaire n'étant pas en rotation avec des cultures avec une stratégie d'alimentation tournée vers la valorisation de l'herbe auxquelles s'ajoute quelques surfaces de haies et de bois sont la signature de cette bonne compensation (62,65%) obtenue pour les bovins.

Pour les émissions de GES, peu de références sont disponibles en production ovine allaitante. Ainsi l’empreinte brute obtenue pour notre cas d’étude est similaire à l’empreinte brute obtenue par Gac et al. (2015) cité par Dolle et al. (2015a) qui est de 13 kg eqCO₂ pour les systèmes agneaux à l’herbe. Nos résultats sont proches de ceux de Gac (2016) ; empreinte brute comprise entre 15 kg eqCO₂ pour les herbagers et 20 kg eqCO₂ pour les pastoraux. Leurs empreintes nettes sont de -2,4 kg eqCO₂ pour les herbagers des élevages conventionnels et de -3,4 kg eqCO₂ pour les élevages bio.

Le taux de compensation obtenu avec les études de Gac (2016) sur le projet Casdar Agneau biologique sont comparables avec le taux de compensation de notre cas d’étude. D’après ses conclusions les bio font mieux sur la compensation carbone (91% en moyenne) et les pastoraux sont même des stockeurs nets avec 112% de compensation.

L’empreinte carbone brute des exploitations étudiées sont très similaire à celle retrouvée dans la bibliographie. Cependant elles compensent mieux leurs émissions de GES.

La présence importante de prairies permanente et temporaire n’étant pas en rotation avec des cultures avec une stratégie d’alimentation tournée vers la valorisation de l’herbe auxquelles s’ajoute quelques surfaces de haies et beaucoup de surfaces de bois (~ 200 ha) sont la signature de cette forte compensation (198,63%) obtenue pour les ovins.

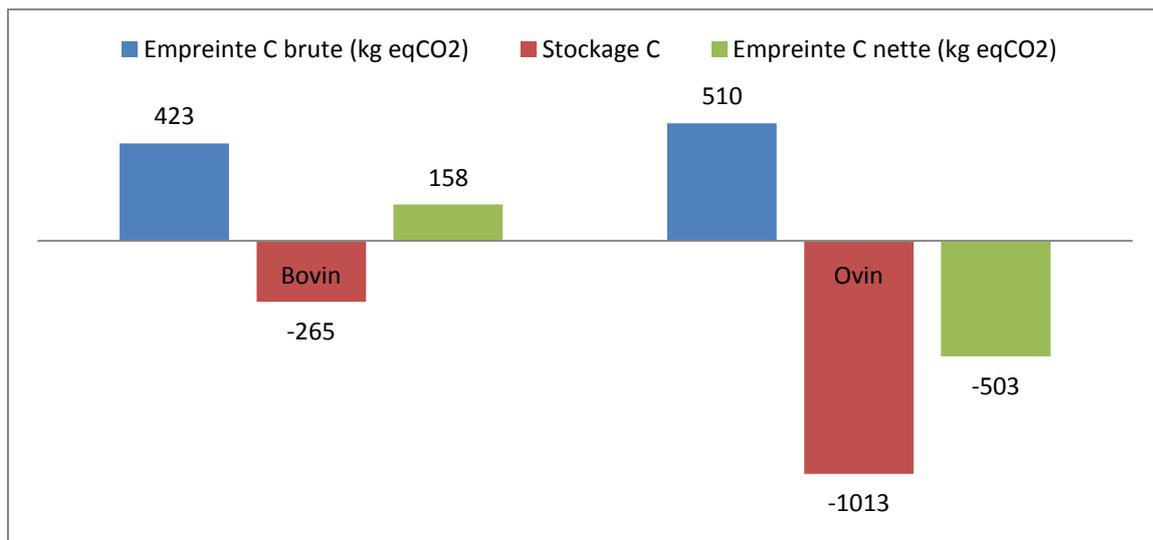


Figure 14 : Empreinte carbone des exploitations bovine et ovine allaitantes

IV. 2. Intérêt d'une éclaircie sylvopastorale pour faire face à une dégradation du climat

La figure 15 présente le bilan fourrager de l'exploitation « ovin allaitant » avec les quatre scénarios testés avec le simulateur.

❖ Bilan fourrager de la situation initiale de l'exploitation

En situation initiale, l'exploitation est en déficit fourrager ; elle a une autonomie potentielle de 95% (figure 16). Pour combler ce manque, l'éleveur fauchait 66 tonnes de foin sur des surfaces de ses voisins.

❖ Simulation d'une éclaircie de 50 ha de forêt sans la fauche chez le voisin

La réalisation d'une éclaircie ne modifie pas les productions en fourrage stockées mais permet d'augmenter la biomasse disponible au pâturage.

Avec cette pratique l'exploitation pourrait couvrir presque les besoins fourragers des animaux. Elle est en autonomie fourragère potentielle de 98% (figure 16). Néanmoins, pour tirer profit de cette augmentation de biomasse, il faudrait modifier le système d'alimentation, en valorisant bien la biomasse disponible au pâturage (266 t MS disponible pour le pâturage pour un besoin de 227 t MS dans le calendrier actuel de pâturage). Cela permettrait de diminuer les besoins en foin (317 t MS).

❖ Simulation de scénarios de dégradation des conditions climatiques (faible et fort)

La dégradation des conditions climatiques a un impact négatif sur l'autonomie fourragère potentielle de l'exploitation. En effet que cette dégradation soit faible ou forte, elle occasionne des baisses drastiques de la biomasse disponible pour le pâturage des animaux selon le degré de sévérité de la dégradation. La baisse de la biomasse disponible pour le pâturage est de 16,7% par rapport à la situation initiale, dans le cas du scénario de dégradation faible des conditions climatiques. Son autonomie fourragère est alors de 73% (figure 16).

Cette baisse de biomasse disponible pour le pâturage est beaucoup plus sévère pour une dégradation forte des conditions climatiques ; elle est de 31,1%. Dans ce cas l'autonomie fourragère de l'exploitation est seulement 42% (figure 16).

Dans tous les cas cette situation de dégradation des conditions climatiques amène l'exploitation à ne plus satisfaire les besoins des animaux car l'offre en fourrage (biomasse disponible à pâturer et foin fauché) ne peut plus satisfaire la demande des animaux (besoins en foin et prélèvement au pâturage).

❖ Simulation d'une éclaircie à partir de la situation avec dégradation des conditions climatiques

Une pratique d'éclaircie sur cette situation (situation avec dégradation des conditions climatiques) favorisera une augmentation de la biomasse disponible pour le pâturage mais ne parvient pas à combler ce sévère déficit. La figure 16 montre que la pratique de l'éclaircie permet d'augmenter de 2 à 3% la biomasse disponible au pâturage selon qu'on a respectivement une dégradation des conditions climatiques faible ou forte.

Dans tous les cas, la pratique d'éclaircie a des avantages sur la production de la biomasse disponible pour les animaux (figure 17) en permettant l'accès de la lumière et du soleil au sol, mais ne concerne pas la production de fourrage fauché. Cette biomasse supplémentaire améliore l'autonomie fourragère potentielle et nécessite de modifier le système d'alimentation pour réduire le fourrage distribué au profit du prélèvement au pâturage.

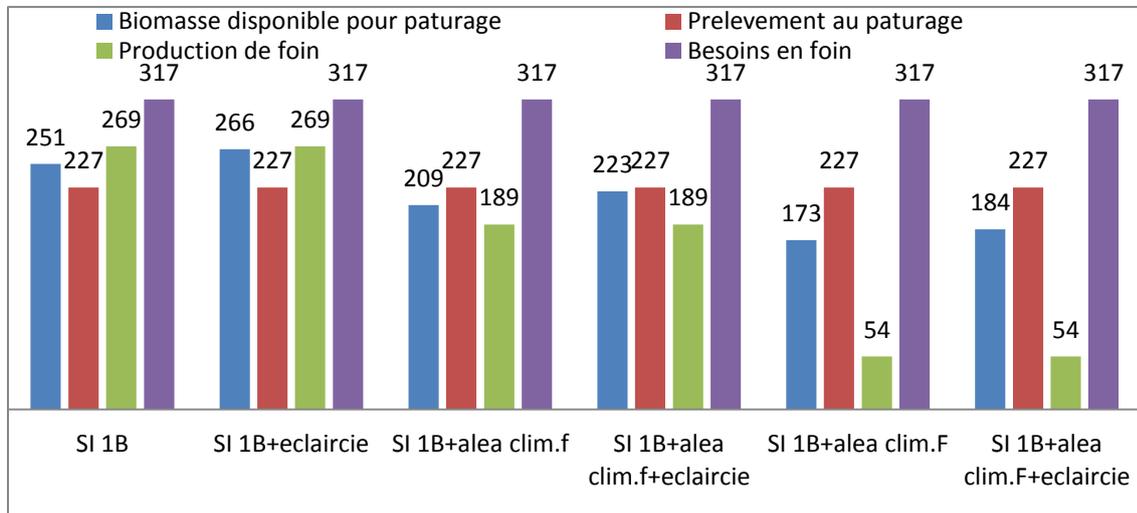


Figure 15 : Bilan fourrager de l'exploitation ovine allaitante des différents scénarios testés

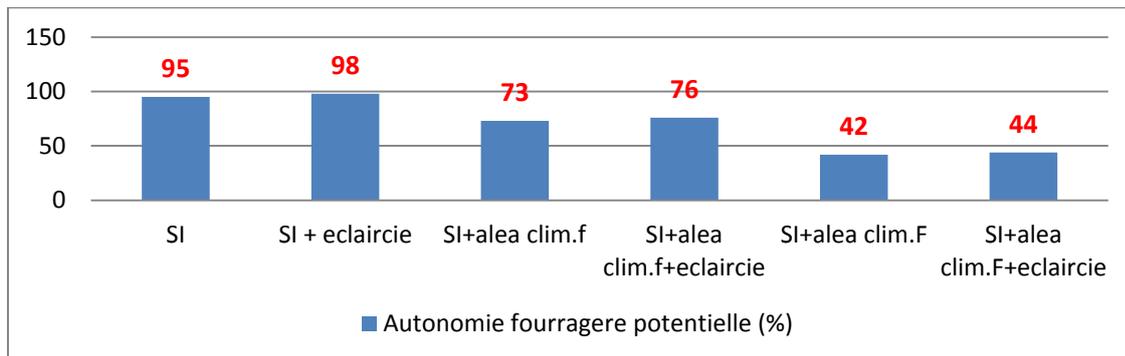


Figure 16 : Autonomie fourragère potentielle de l'exploitation ovine allaitante des différents scénarios

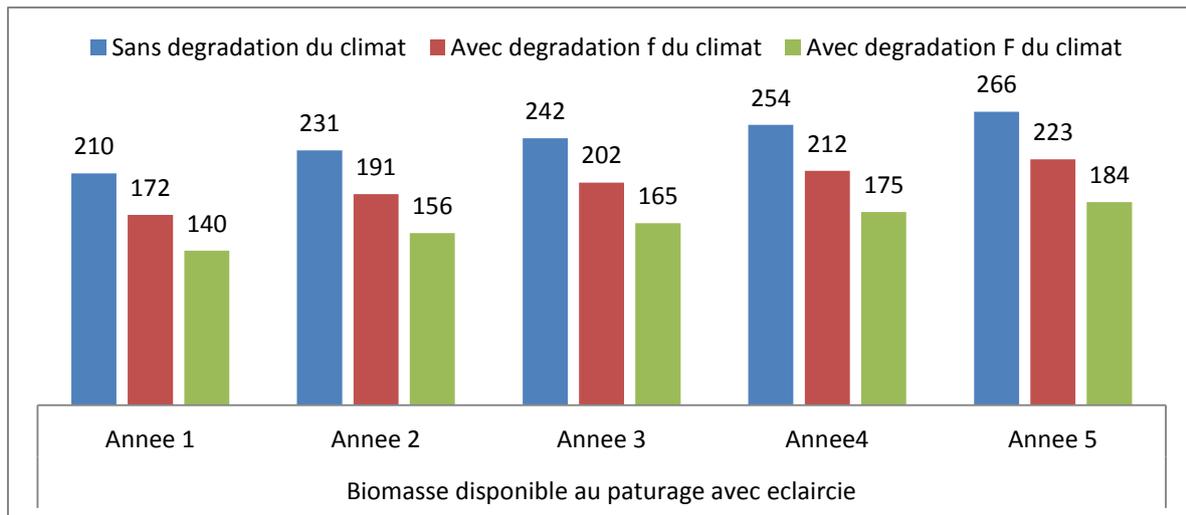


Figure 17 : Biomasse disponible au pâturage avec éclaircie

La pénétration de la lumière et du soleil va aussi favoriser le développement du diamètre des troncs des arbres et de leurs houppiers. Ce développement des houppiers des arbres, à un certain moment, va recouvrir la parcelle d'ombre. Ce qui ne sera plus favorable à la poussée du tapis herbacé et l'exploitation va se retrouver dans sa situation initiale de déficit fourrager. Donc elle doit penser à refaire une autre éclaircie au bout d'un certain temps.

En fait la pratique d'éclaircie permet une meilleure résistance à la dégradation des conditions climatiques. Qu'elle soit faible ou forte la diminution de l'autonomie est moins forte lorsqu'il y a éclaircie. Résultats auxquels on s'attendait, c'est ce qu'on a mis en entrée du modèle (au moins le simulateur reproduit bien le comportement attendu).

Cependant avec cette pratique sylvopastorale l'autonomie n'est améliorée que de 2 à 3%. En effet la part de la biomasse produite en sous bois est faible : 15 t MS de plus pour la situation initiale, par rapport à 520 t MS de biomasse à prélever (pâturage + foin) soit 2,9 % de la biomasse à prélever en situation initiale. Cette biomasse en sous-bois éclairci a un faible pouvoir tampon parce qu'elle pèse très peu dans le bilan fourrager global.

IV. 3. Impact d'une éclaircie sylvopastorale sur le bilan carbone

Lorsqu'il y a une éclaircie, une grande partie du carbone stocké au sein des arbres au cours de leurs croissances va progressivement être rejetée dans l'atmosphère. Le processus peut être plus ou moins rapide selon l'utilisation du bois mais la combustion du bois rejette immédiatement du carbone dans l'atmosphère (ADEME, 2015). Dans une forêt dite bien gérée, les émissions ne sont pas comptées, car ces dernières sont compensées par la croissance de la biomasse qui prend place par ailleurs (Base Carbone ADEME).

En plus l'éclaircie va permettre à l'exploitation de produire 3000 m³ (60 m³ / ha) de bois bûche pour le chauffage. Ce bois de chauffage peut être autoconsommé en partie par la famille (pratique très courante chez les éleveurs, Laurents, 2016). Cela permet de réduire la consommation d'énergie fossile ou d'électricité pour le chauffage (substitution énergétique).

Le surplus de bois de chauffage peut être vendu afin d'augmenter et varier les revenus. D'après l'ADEME (2017), 0,5 tCO₂ est évitée par mètre cube de bois utilisé à des fins énergétiques. L'utilisation de bois pour produire de l'énergie permet d'éviter des émissions issues de la combustion d'énergies fossiles (émissions de CO₂) (Arrouays, 2002). En effet 3000 m³ de bois de buche permet alors d'éviter 1200 tonnes eqCO₂. Néanmoins, la combustion des 3 000 m³ de bois bûche utilisés pour le chauffage entraîne des émissions de 1 596 tonnes de CO₂.

La figure 18 présente le bilan carbone de l'exploitation ovine sur quatre ans. Ainsi en situation initiale où il n'y a pas eu d'éclaircie, l'empreinte carbone nette de l'exploitation se réduit à l'empreinte nette de l'atelier ovin. A l'année de l'éclaircie, l'empreinte nette de l'exploitation a augmenté avec la diminution du stockage de carbone au niveau des bois mais aussi à cause des émissions de GES dues à l'exploitation du bois pour réaliser l'éclaircie (30 tonnes de CO₂ émis). En année 3 où le bois a été utilisé comme bois de chauffage après séchage, l'empreinte carbone nette de l'exploitation a fortement augmenté à cause des fortes émissions de GES liées à la combustion (1596 tonnes de CO₂ émis). En année 4, il n'y a pas eu d'exploitation ni de combustion, l'empreinte nette de l'exploitation a donc fortement diminué. Cependant pour renouveler cette pratique d'éclaircie, l'exploitant doit laisser un pas de temps suffisant pour que le flux annuel net de stockage (de l'ordre de 400 t eqCO₂) compense l'émission de 1 200 t eqCO₂ de l'année 3. En trois ans après l'année 2 (émission liée à la combustion), le bilan est nul. Il faut donc attendre 4 ans au moins pour permettre la compensation du carbone émis lors de la combustion du bois et pour que le système (ovin + bois) fonctionne bien comme un puit de carbone. Ce qui est en phase avec les avis de l'ADEME, 2015 qui dit qu'il y a un délai temporel, un « temps de retour carbone », nécessaire avant l'obtention de bénéfices en termes de gaz à effet de serre évités.

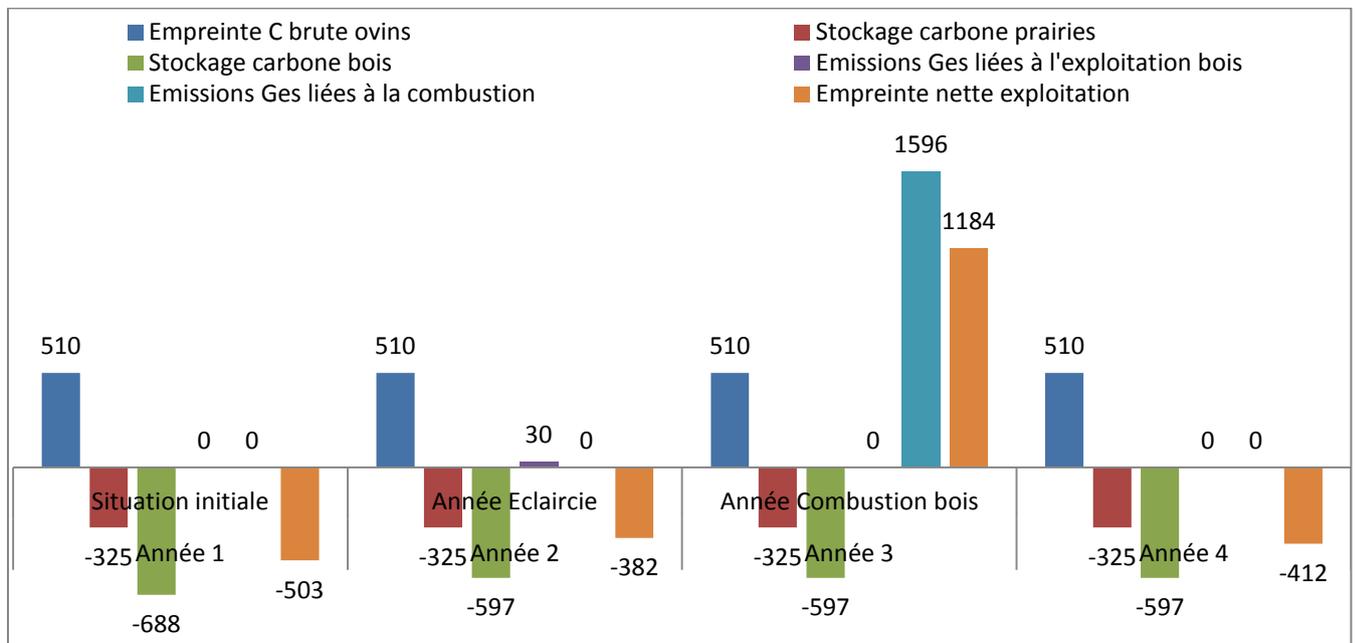


Figure 18 : Bilan carbone de l'exploitation ovine pratiquant une éclaircie sylvopastorale

Ces résultats sont en phase avec les travaux de Rossi et al., (2015) qui soutiennent que le bois est un des combustibles qui émet le plus de GES, se situant au même niveau que le charbon. Ils soulignent que le carbone libéré lors de sa combustion est stocké au cours de la croissance de l'arbre. Mais pour que cette source d'énergie soit réellement durable (neutre vis à vis du carbone), il faut que l'ensemble du carbone libéré par combustion du bois énergie corresponde à l'ensemble du carbone fixé par la croissance des arbres, et ce durant la même période et à l'échelle mondiale.

Comparées aux coupes rases, les éclaircies ont un moindre impact bien qu'elles induisent une modification du microclimat forestier. Elles réduisent temporairement la quantité de matière organique qui arrive au sol, que ce soit via les apports de litière ou les apports par la rhizosphère (Rossi et al., 2015). Toutefois, les coupes d'éclaircie permettent aux arbres restant d'augmenter leur accroissement courant, via l'extension de leur houppier et de leur surface foliaire. La perte de matière organique est donc rapidement compensée (Lemée, 1987 cité par Rossi et al., 2015).

Néanmoins l'intensité et la fréquence des éclaircies peuvent avoir des impacts négatifs sur les stocks de carbone. Un temps de retour est nécessaire pour compenser le déstockage de carbone causé par cette éclaircie sylvopastorale. Au niveau de la biomasse aérienne, les stocks de carbone sont plus importants dans les peuplements éclaircis modérément (maintien de 12 gros bois/ha) que dans des peuplements exploités de façon plus dynamique (aucun arbre dépassant le diamètre d'exploitabilité n'est conservé) (Nunery et Keeton, 2010 ; Lecoq & al., 2008 cités par Rossi et al., 2015). Ils défendent aussi que plus la fréquence des éclaircies est élevée, plus forte sera la diminution du stock de carbone. Gershenson & al., (2011) préconise un pas de temps minimal d'exploitation de 10 ans. Tout prélèvement en forêt a donc un impact tant sur le stock de carbone de la biomasse aérienne que sur le sol. Mais le flux annuel de stockage sous les bois en fonction de la densité du peuplement reste une source d'incertitude dans modèle. De même que la manière dont évolue la dynamique du stockage en fonction des éclaircies.

La substitution du bois comme énergie est à considérer de manière prudente. En effet la production de bois énergie est préjudiciable aux enjeux environnementaux. Non seulement les pratiques d'éclaircies ont des impacts sur le stockage de carbone mais aussi sur l'érosion, la disparition de certaines espèces (baisse de la biodiversité), l'appauvrissement des sols, etc...

Conclusion et perspectives

Dans l'étude réalisée, nous avons étudié le bilan carbone et le bilan fourrager deux cas d'exploitations ovine et bovine allaitantes du département de l'Ariège. Un modèle conceptuel des exploitations a été réalisé et un simulateur visant à tester l'impact des pratiques agroforestières a été développé. Les impacts d'une pratique sylvopastorale (éclaircie) ont été évalués sur la production de biomasse fourragère et sur le bilan carbone.

Le bilan carbone des exploitations ovines et bovines allaitantes est cohérent avec les résultats retrouvés au niveau de la bibliographie. En effet, l'empreinte brute est de 14,16 kg eqCO₂/kgvv et celle nette -13,97 kg eqCO₂/kgvv pour les ovins et pour les bovins, l'empreinte brute est de 14,21 kg eqCO₂/kgvv et celle nette de 4,38 kg eqCO₂/kgvv.

Les exploitations ovines et bovines étudiées ont des niveaux d'émissions brutes similaires avec celles retrouvées au niveau de la bibliographie. Cependant elles ont des émissions nettes beaucoup moins importantes ; donc elles compensent mieux leurs émissions de GES que les autres systèmes. Cette bonne compensation peut trouver sa justification par le fait que les éleveurs ne font pas de rotation entre les prairies permanentes et des cultures mais aussi par la disposition des exploitations d'importantes surfaces d'éléments arborés qui sont de bons stockeurs, par le sol forestier et par la biomasse. D'où l'intérêt de l'arbre qui permet aux exploitations de présenter une empreinte carbone moins importante que celles qui n'en disposent pas. Enfin, connaissant le niveau global d'émission de GES et le potentiel de séquestration carbone des élevages utilisant des arbres, on réalisera une première approche de l'impact global du sylvopastoralisme en prenant en compte les conséquences microclimatiques sur le système de production et notamment sur son autonomie fourragère et énergétique. Il ne s'agira donc pas simplement de considérer l'arbre comme élément stockant du carbone mais aussi comme facteur pouvant induire des économies énergétiques, à travers la substitution énergétique, à l'extérieur du système.

L'évaluation de la mise en œuvre d'éclaircie nous a permis de comprendre que cette pratique sylvopastorale a un impact positif sur la biomasse disponible pour le pâturage. Dans le cas d'une dégradation des conditions climatiques faible ou fort, elle permet de diminuer l'impact de la dégradation sur la production de biomasse par rapport à une exploitation qui ne fait pas cette pratique. Cependant les résultats ne sont pas spectaculaires car pour un quart des surfaces en bois éclaircies (50 ha), l'exploitation n'augmente que 2 à 3% de plus par rapport à son autonomie fourragère potentielle.

Les pratiques agro forestières / sylvopastorales comme les éclaircies ont une influence sur la production de la biomasse utilisable pour le pâturage des animaux avec ou sans aléa climatique. Comme indiquées en dessus, les pratiques d'éclaircies favorisent le développement de l'herbe. Par conséquent pour ne pas gaspiller l'herbe disponible pour le pâturage des animaux et pour bénéficier des avantages des éclaircies, l'éleveur doit réaménager la conduite alimentaire du troupeau. En effet il doit réduire le temps que les animaux passent en bergerie en leur faisant pâturer plus de temps et par conséquent le surplus

de l'herbe est utilisé par les animaux mais aussi ce qui va permettre de diminuer les émissions de GES en bâtiment, au stockage et pendant l'épandage. Ainsi en maximisant le temps passé à la pâture, l'éleveur limite aussi sa consommation d'intrants (électricité, concentrés) et par conséquent il limite ses émissions de GES.

Cependant une intensification de la pratique d'éclaircie des forêts aura une incidence sur l'évolution de la séquestration du carbone dans les écosystèmes. Cette incidence se traduit souvent par une diminution de la séquestration de carbone en forêt. Les produits du bois utilisés pour la combustion contribueront aussi à augmenter les émissions de GES atmosphériques. Néanmoins les émissions de CO₂ dues à la combustion du bois de chauffe sont compensées par le stockage de l'arbre au moment de sa croissance mais il faudra que la forêt soit bien gérée (Base Carbone ADEME).

Un des points forts de cette étude est le système sylvopastoral étudié qui se différencie des autres systèmes par l'exploitation par les animaux d'une forêt. L'autre est que c'est un travail exploratoire pour l'équipe de recherche sur l'empreinte carbone des systèmes agrosylvopastoraux.

Le travail doit se poursuivre en intégrant d'autres critères d'évaluation, notamment l'évaluation économique, les conditions de travail dans exploitations et le bien - être des animaux. Il est nécessaire de compléter le simulateur afin d'avoir tous ces éléments d'évaluation.

Pour les perspectives pour l'équipe de recherche, nous recommandons :

- Affiner la méthodologie pour le calcul du bilan carbone en faisant des tests de sensibilité étant donné que les facteurs d'émissions utilisés sont des estimations ;
- Évaluer l'impact environnemental étant plus large qu'évaluation des GES seulement, il conviendra d'élargir la démarche à d'autres indicateurs d'impact comme la préservation de la biodiversité... Les systèmes d'élevages de ruminants présentent des atouts, comme la contribution au maintien de la biodiversité ;
- Pour apprécier la durabilité des exploitations, la prise en compte des indicateurs économiques et condition de travail doivent venir en complément de l'indicateur environnemental ;
- Intégrer dans le simulateur les différentes pratiques agroforestières qui ont été testé dans les 7 pilotes notamment l'utilisation des arbres fourragers (le murier blanc).

Références bibliographiques

- ADEME, 2018. Agroforesterie en système d'élevage ovin : étude de son potentiel dans le cadre de l'adaptation au changement climatique. Synthèse, 19p
- ADEME, 2017. Faire un diagnostic carbone des forêts et des produits bois à l'échelle d'un territoire. Rapport, 118p
- ADEME, 2015. Forêt et atténuation du changement climatique. Les avis de l'ADEME, Paris, juin 2015, 12p
- ADEME, 2014. L'énergie de l'agro écologie, une solution pour le climat, 15p
- AForCLIM, 2019. Éléments agro forestiers, outils d'atténuation et d'adaptation de l'agriculture face aux changements climatiques, 69 p
- Agrech, Gilles. 2001. *Plantation d'arbres en prairie pâturée*. Éditions Quae
- Agriculture et Territoire. Chambre d'Agriculture de Bretagne 2014. Outil de référence pour la réalisation du Plan prévisionnel de fumure azote, 32 p
- AGROOF. 2013. "Appel À Projets R&D REACTIF 2 'REcherche Sur l'Atténuation Du Changement Climatique Par l'agriculture et La Forêt' - Étude D'impact Du Microclimat Agroforestier Adulte En Systèmes D'élevage Ovin - Parasol." <http://parasol.projet-agroforesterie.net/>
- Agroforesterie pour la protection des sols AGRIPSOL, <https://www.agripsol.projet-agroforesterie.net/>. Consultée le 14 mai 2019.
- Anel B., A. Cogliastro, A. Olivier et D. Rivest. 2017. Une agroforesterie pour le Québec. Document de réflexion et d'orientation. Comité agroforesterie, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec. 73 p.
- Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J. C., Jayet, P. A., Soussana, J. F., Stengel, P., & Bureau, D. (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre (stocker du carbone dans les sols agricoles de France), 334p
- Béchu T., Dollé J-B, Gac A., Leclerc M-C., Lorinquer E., Manneville V., Moreau S., Guinot C., Orlianges M., 2014. Comprendre les enjeux environnementaux de l'élevage ovin. Un Vademecum pour la filière allaitante. Institut de l'Élevage, Interbev. 24 p
- Béral C., Andueza D., Ginane C., Bernard M., Liagre F., Girardin N., Emile J-C., Novak S., Grandgirard D., Deiss V., Bizeray D., Moreau J-C., Pottier E., Thierry M., Rocher A.,
- Bernstein, Lenny, R. K Pachauri, Andy Reisinger, Lenny Bernstein, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Équipe de rédaction principale, and Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2013. Changements climatiques 2007: rapport de synthèse : un rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. <http://site.ebrary.com/lib/ualberta/Doc?id=10785011>.
- Bounab M., Nozieres-Petit M.O., Moulin C.H. 2018. Reconcevoir la place de l'arbre dans les systèmes d'élevage allaitant herbagers de montagne : exemple d'une démarche d'innovation en Ariège. 4p
- Bordet A-C., Bochu J-L., Toucheemoulin O.. Références PLANETE 2010, Fiche 10 - Production « Bovins viande ». Toulouse : SOLAGRO, 2010, 9 p.
- Centre d'Ecodéveloppement des Villarceaux. 2012. "Dispositif Agroforestier de La Bergerie de Villarceaux." http://www.agroof.net/agroof_dev/agroof_villarceaux.html

- Chambre d'agriculture de l'Ariège <https://ariege.chambre-agriculture.fr/actualites/toutes-nos-actualites/detail-de-lactualite/actualites/agrosyl-vers-des-elevages-plus-autonomes-grace-aux-arbres-et-au-bois/>
- Chenu, C., Klumpp, K., Bispo, A., Angers, D., Colnenne, C., & Metay, A. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles: évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations agronomiques*, 37, 23-37.
- CITEPA (2019). 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, 746p
- Corroyer, Nathalie. 2014. "Initial Stakeholder Meeting Report: Grazed Orchards in France." <https://www.agforward.eu/index.php/fr/vergers-patures-en-france.html>.
- CITEPA (2019). Rapport OMINEA – 16^{ième} édition, 922p
- Coulon, Frédéric, Christian Dupraz, Fabien Liagre, Philippe Pointereau, and Sous-Direction des Espaces Naturels. 2000. "Étude Des Pratiques Agroforestières Associant Des Arbres Fruitiers de Haute Tige À Des Cultures Ou Des Pâtures." *Rapport Au Ministère de L'environnement, Solagro*.
http://www.academia.edu/download/39560258/Etude_des_pratiques_agroforestires_assoc20151030-12617-telcaa.pdf
- Dia'Terre version 4.0 (2015). Synthèse du guide de la méthode outil de diagnostic énergie –gaz à effet de serre des exploitations agricoles, ADEME.
- Dollé, J. B., Moreau, S., Brocas, C., Gac, A., Raynal, J., & Duclos, A. (2015a). Élevage de ruminants et changement climatique. *Institut de l'Élevage*, 24 p
- Dollé, J. B., Brocas, C., Gac, A., Moreau, S., & Le Gall, A. (2015b). Élevage bovin et changement climatique. *Viandes & Produits Carnés*, 11 p
- Dollé J.-B., Faverdin P., Agabriel J., Sauvart D., Klumpp K. (2013). Contribution de l'élevage bovin aux émissions de GES et au stockage de carbone selon les systèmes de production. *Fourrages*, 215, 181-191.
- Dollé, J. B., Agabriel, J., Peyraud, J. L., Faverdin, P., Manneville, V., Raison, C., ... & Le Gall, A. (2011). Les gaz à effet de serre en élevage bovin: évaluation et leviers d'action. *Productions Animales*, 24(5), 415.
- Dollé, J. B., Gac, A., & Le Gall, A. (2009). L'empreinte carbone du lait et de la viande bovine. *Renc. Rech. Ruminants*, 16, 233-236.
- Felten, B., Martin G., Theau, J.P., Thenard V., Magne, M-A, Duru, M. (2010). Conception de systèmes d'élevage adaptés au changement climatique. Projet Climfourrel, Midi- Pyrénées, Série Les Focus PSDR3.
- Gac, A. (2016). Évaluation environnementale de l'agneau biologique. *Casdar AgneauxBio - Juillet 2016*
- Gac, A., Cariolle, M., Deltour, L., Dollé, J. B., Espagnol, S., Flénet, F., ... & Malaval, C. (2011). GES'TIM—des apports pour l'évaluation environnementale des activités agricoles.
- Gac, A., Manneville, V., Raison, C., Charroin, T., & Ferrand, M. (2010). L'empreinte carbone des élevages d'herbivores: présentation de la méthodologie d'évaluation appliquée à des élevages spécialisés lait et viande. *Renc. Rech. Rum*, 17, 335-342.
- Gac, A., Deltour, L., Cariolle, M., Dollé, J. B., Espagnol, S., Flénet, F., ... & Malaval, C. (2010). GES'TIM, Guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre. *Version, 1*, 155.

- Gautier, D., & Moulin, C. H. (2004). Intérêts du pâturage hivernal sur parcours pour les exploitations ovines: exemple des Préalpes du Sud. *Productions Animales* 4 (17), 275-286. (2004).
- Gershenson A., Barsimantov J., Ecoshift consulting, 2011. Accounting for carbon in soils, *Climate action reserve white paper*, 46 p.
- GIEC (2014). Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p
- IDELE, 2016. Estimation des flux d'azote associés aux ovins caprins et équins et à leurs systèmes fourragers, 35p
- IDELE, 2015. Élevage des ruminants et changement climatique, 24p
- IDELE, 2013. Consommation d'énergie des exploitations ovines allaitantes du Sud Ouest, 9p
- IDELE, 2010. Consommation d'énergie des exploitations bovines viande du Sud Ouest, 6p
- INRA, 2018. Élevage gaz à effet de serre et stockage carbone
- IPPC (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories - volume 4 Agriculture, forestry and Other Land Use
- Laurents Guilhem (2016). Quelles pratiques agroforestières en Ariège? État des lieux des pratiques associant l'arbre, la forêt et l'élevage dans le département de l'Ariège. Étude réalisée dans le cadre du projet GO-PEI AgroSyl 2016-2020
- Lecocq F., Seynave I., Couture S., 2008, Gestion forestière et carbone, *Rapport final convention particulière AgroParisTech - ONF n°2, Nancy-AgroParisTech*, 128 p.
- Lefevre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). Carbone organique du sol: Une richesse invisible. Publication lancée lors du colloque international sur le carbone organique du sol (GSOC) qui s'est tenu au siège de la FAO (Rome, 21-23 mars 2017)
- Lemée G., 1987, Dynamique de fermeture par régénération et évolution morphométrique du hêtre dans les vides d'une forêt non exploitée (réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau), *Société d'écologie Ed. Paris, Bulletin d'écologie*, vol. 18, n°1, pp. 1-11.
- Liagre, F. (2009). L'agroforesterie. Outil de séquestration du carbone en agriculture. *Rapport de recherche*, 18. <http://www.agroforesterie.fr/documents/Agroforesterie-Outil-de-Sequestration-du-Carbone-en-Agriculture.pdf>
- Mansard, L., Vigan, A., Meuret, M., Lasseur, J., Benoit, M., Lecomte, P., & Eugène, M. (2018). An enteric methane emission calculator (DREEM) built to consider feed diversity: Case study of pastoral and sedentary farming systems. *Small Ruminant Research*, 167, 6-15.
- Marquet, V., & Salles, D. (2014). L'adaptation au changement climatique en France et au Québec. Constructions institutionnelles convergentes et diffusions contrastées. *Critique internationale*, (1), 73-91.
- McAdam, J. 2014. "Initial Stakeholder Meeting Report: Grazed Orchards in Northern Ireland, UK." <https://www.agforward.eu/index.php/fr/vergers-paturees-en-irlande-du-nord.html>.
- Moreau, S., Manneville, V., Morel, K., Agabriel, J., & Devun, J. (2013). Le compromis performances de production et impacts environnementaux: méthode et analyse des résultats dans les élevages bovin allaitants. *Renc. Rech. Ruminants*, 20, 311-314.
- Nibéron C. (2016). La séquestration du carbone dans les sols. Rapport Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France aux Etats-Unis, 3p

- Novak, Sandra, and Jean-Claude Emile. 2015. "System Report: Agroforestry for Ruminants in France." INRA. <https://www.agforward.eu/index.php/fr/agroforesterie-avec-des-ruminants-france.html>
- Nunery J. S., Keeton W. S., 2010, Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products, *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n°. 8, pp. 1363–1375
- 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., Metay A., 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 (France), 92 p.
- Rami Pastoral (2019). Module informatique
- Réseau Action climat France, 2014. Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques. Recueil d'expériences territoriales. 60 p. <https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2017/06/Adaptation-de-l%E2%80%99agriculture-aux-changements-climatiques-%E2%80%93-Recueil-d%E2%80%99expe%CC%81riences-territoriales.pdf>. Consultée le 10 avril 2019.
- Rossi, M., André, J., & Vallauri, D. (2015). Le carbone forestier en mouvements. Éléments de réflexion pour une politique.
- Sawerysyn, J. P. (2012). La combustion du bois et ses impacts sur la qualité de l'air. *Air pur*, 81, 7-16.
- Sénat (2018). Stocker plus de carbone dans les sols : un enjeu pour le climat et pour l'alimentation. Les notes scientifiques de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 6p
- UNIFA et ADEME, 2012. Guide méthodologique pour le calcul du bilan des émissions de gaz à effet de serre, 68 p
- Vermorel, M., Jouany, J. P., Eugène, M., Sauvant, D., Noblet, J., & Dourmad, J. Y. (2008). Évaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *INRA Prod. Anim*, 21(5), 403-418.
- Veysset P., Lherm M., Bébin D., Roulenc M., Benoit M., 2014. Variability in greenhouse gas emissions, fossil energy consumption and farm economics in suckler beef production in 59 French farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 188: 180-191.

Listes des figures

Figure 1 : Empreinte carbone (Source : CAP'2ER)

Figure 2A : Postes d'émissions de GES des bovins

Figure 2B : Postes d'émissions de GES des ovins

Figure 3 : Cycle du carbone

Figure 4 : Stock de carbone (hors océan)

Figure 5 : Stock de carbone dans les sols selon l'usage (Source : GIS sol)

Figure 6 : Évolutions du stock de carbone dans les sols associées aux pratiques provoquant le stockage ou le déstockage de carbone

Figure 7 : Matrice arbres, élevage et culture, (den Herder et al. 2015 cité par Laurents (2016))

Figure 8 : Potentiel de stockage d'une parcelle agroforestière

Figure 9 : Représentation des émissions et absorptions de carbone de la filière forêt bois

Figure 10 : Modèle conceptuel des élevages allaitants (adapté de l'IDELE, 2015)

Figure 11 : Postes de consommation d'énergie des exploitations « ovin et bovin allaitant »

Figure 12 : Part des GES des deux exploitations

Figure 13 : Part des postes d'émissions des exploitations bovine et ovine allaitantes

Figure 14 : Empreinte carbone des exploitations bovine et ovine allaitantes

Figure 15 : Bilan fourrager de l'exploitation ovine allaitante des différents scénarios testés

Figure 16 : Autonomie fourragère potentielle de l'exploitation ovine allaitante des différents scénarios

Figure 17 : Biomasse disponible au pâturage avec éclaircie

Figure 18 : Bilan carbone de l'exploitation ovine en situation éclaircie

Liste des annexes

Annexe I : Schéma démographique du troupeau ovin allaitant

Annexe II : Calendrier d'alimentation du troupeau ovin allaitant

Annexe III : Calendrier zootechnique du troupeau ovin allaitant

Annexe IV : Schéma démographique du troupeau bovin allaitant

Annexe V : Calendrier zootechnique du troupeau bovin allaitant

Annexe VI : Évaluation GES exploitation ovin allaitant

Annexe VII : Paramètres, valeurs et références exploitation ovin allaitant

Annexe VIII : Évaluation GES exploitation bovin allaitant

Annexe IX : Paramètres, valeurs et références exploitation bovin allaitant

Annexe X : Consommation d'énergie par poste

Annexe XI : Capacité de stockage des différents usages du sol

Annexe XII : Stockage carbone de l'exploitation ovin allaitant

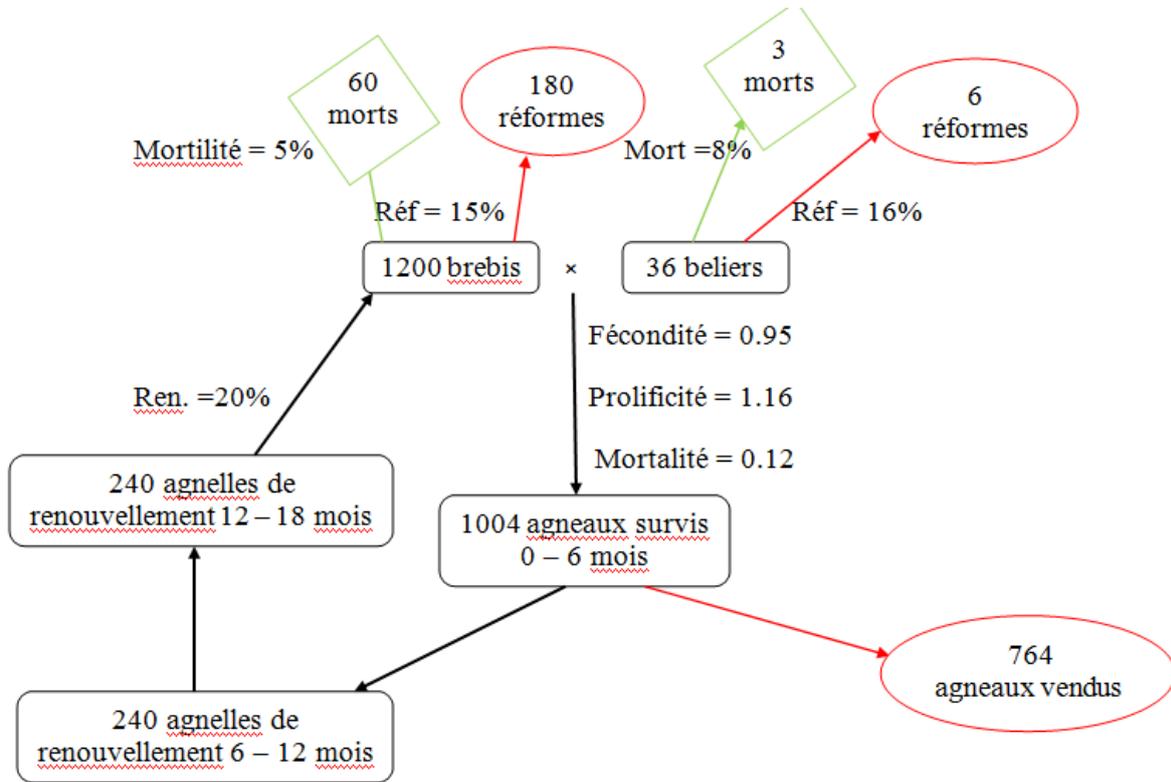
Annexe XIII : Stockage carbone de l'exploitation bovin allaitant

Annexe XIV : Potentiel de réchauffement global des différents gaz

Annexe XV : Table de conversion des unités de gaz

Annexes

Annexe 1 : Schéma démographique du troupeau ovin allaitant



Annexe II : Calendrier d'alimentation du troupeau ovin allaitant

Calendrier		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Gestion du troupeau		A la bergerie		Sortie des brebis Agnelage	Les animaux pâturent, pas d'affouragement. 2 visites par jour.							Rentrée des animaux à la bergerie. Date variable selon la production de glands et d'herbe.	
Pâturage uniquement	Parc de 114 ha			↔ Du 1 au 10	↔ Pacage des 25 vaches du voisin				↔ Du 4 au 28		↔ Du 1 au 15 Brebis seules		
	Parc de 95 ha Contient la parcelle expérimentale						↔ Du 16 juin au 25 juillet			↔ Du 15 au 30		Les animaux tournent entre les parcs tous les 4-5 jours. ²	
	Parc de 85 ha					↔ Du 1 au 15			↔ Du 29 au 15				
	Prairies temporaires 20 ha			↔ Pâturage tournant du 11 mars au 31 mai ¹				↔ Du 26 juillet au 3 août		↔ Du 1 au 15 Agnelles seules			
Fauche uniquement					↔ Coupe 1		↔ Coupe 2		↔ Éventuelle coupe 3				
	Luzerne 18 ha					↔		↔		↔			

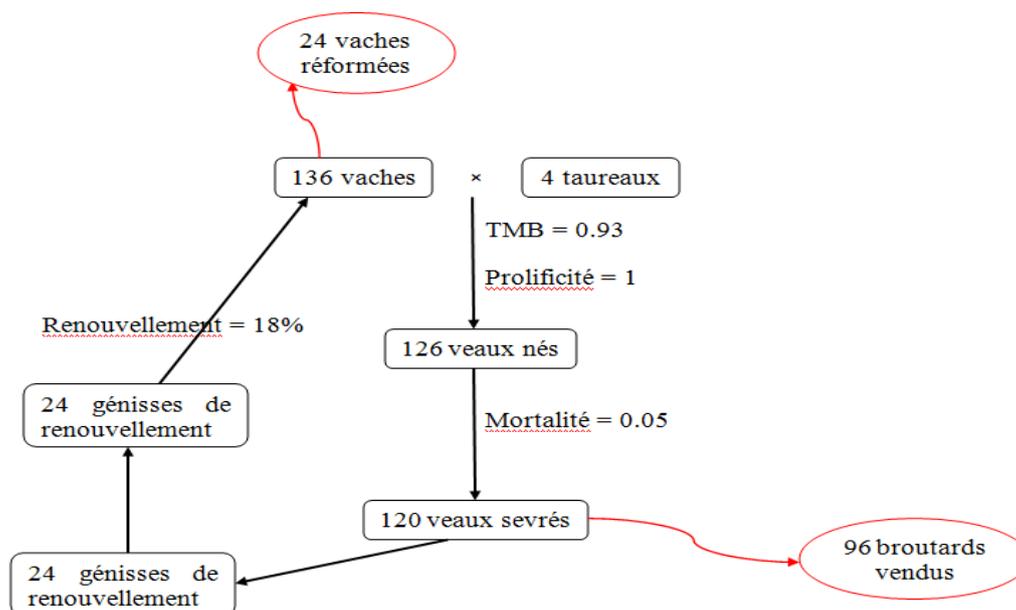
Légende

- ↔ Pâturage des brebis et agnelles
- ↔ Pâturage des vaches du voisin
- ↔ Coupes

Annexe III : Calendrier zootechnique du troupeau ovin allaitant

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Lutte												
Mise bas												
Vente												
Bergerie												

Annexe IV : Schéma démographique du troupeau bovin allaitant



Annexe V : Calendrier zootechnique du troupeau bovin allaitant

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Lutte	Lutte											
Mise bas	Mise bas								Mise bas			
Vente	Vente			Vente	Vente	Vente	Vente	Vente				
Stabulation	Stabulation											Stabulation

Annexe VI : équations pour le calcul des émissions de GES - exploitation ovin allaitant

Postes d'émission	Équations	Références
CH4 entérique	$CH4_{entérique} = FE_{CH4\ ent.} * PAM$	IPCC, 2006
CH4 pâturage	$CH4_{pâturage} = FE_{CH4\ pat.} * PMA$ où $FE_{CH4\ dej.\ pat.} = SV\ (kg/j) * Nb\ jours\ au\ pâturage/an * Bo\ (m^3/kgSV) * FC\ (kg/m^3) * FCM_p$	Rapport OMINEA, 2019
CH4 déjections bâtiment	$CH4_{déjections\ bâtiment} = FE_{CH4\ dej.\ bat.} * PMA$ où $FE_{CH4\ dej.\ bat.} = SV\ (kg/j) * Nb\ jours\ au\ bâtiment/an * Bo\ (m^3/kgSV) * FC\ (kg/m^3) * FCM_f$	Rapport OMINEA, 2019
CH4 stockage déjections	$CH4_{stockage\ déjections} = FE_{stock.\ dej.} * quantité\ de\ fumier / an$	Dollé et al., 2011
N2O déjections bâtiment	$N2O_{déjections\ bâtiment} = FE_{dej.\ bat.} * PAM * N_{excré.\ bat.} * (N - N2O)$	IPCC, 2006
N2O stockage déjections	$N2O_{stockage\ déjections} = FE_{stock.\ dej.} * PAM * N_{Stock.\ dej.} * (N - N2O)$	IPCC, 2006
N2O excrétiens pâturage	$N2O_{excrétiens\ pâturage} = FE_{excré.\ pat.} * PAM * N_{excré.\ pat.} * (N - N2O)$	IPCC, 2006
N2O épandage	$N2O_{épandage} = FE_{épand.\ org.} * PAM * N_{épan.}$	IPCC, 2006
CO2	$FE_{fioul} * Nb\ litre\ de\ fioul\ utilisé$ $FE_{electr.} * kwh\ consommé$ $FE_{concentré} * kg\ concentré\ brut$	(Dollé et al., 2011) Cap2er

Annexe VII : Paramètres pour le calcul des émissions de GES - exploitation ovin allaitant

Paramètres	Noms	Valeurs	Références
PAM	Population annuelle moyenne		
FE _{CH4 ent.}	Facteur d'émission méthane entérique	11 kg CH4/an/tête	Veremol et al., 2008
FE _{stock. dej.}	Facteur d'émission stockage déjections	4,5 kg CH4/an/tête	Gest'im, 2010
FE _{dej. bat.}	Facteur d'émission déjections en bâtiment	0,005 kg N-N2O/ kg Nex	OMINEA, 2019
FE _{stock. dej.}	Facteur d'émission stockage déjections	0,005 kg N-N2O/ kg N _{Stock. dej.}	OMINEA, 2019
FE _{excré. pat.}	Facteur d'émission excrétion au pâturage	0,01 kg N-N2O/ kg N _{excré. pat.}	OMINEA, 2019
FE _{épan. org.}	Facteur d'émission épandage organique	0,01kg N2O / N _{épan.}	OMINEA, 2019
N _{excré. bat.}	Azote excrété en bâtiment	3,9 kg /an/couple mere-agneau	IDELE, 2016
N _{Stock. dej.}	Azote stockage déjections	1,17 kg /an/couple mere-agneau	IDELE, 2016
N _{excré. pat.}	Azote excrété au pâturage	8,8 kg /an/couple mere-agneau	IDELE, 2016
N _{épan.}	Azote épandable	11,5 kg /an/couple mere-agneau	IDELE, 2016
SV	Solides volatils excrétés	0,63	OMINEA, 2019
Bo	Capacité de production maximale de CH4	0,19	OMINEA, 2019
FC	Facteur de conversion de m3 de CH4 en kilogramme de CH4	0,67	OMINEA, 2019
FCM _p	Facteur de conversion en méthane pour pâture	1%	OMINEA, 2019
FCM _f	Facteur de conversion en méthane pour fumier	1%	OMINEA, 2019
(N – N2O)	Passage de N à N2O	1,57	Ges'tim, 2010

Annexe VIII : équations pour le calcul des émissions de GES - exploitation bovin allaitant

Postes d'émission	Équations	Références
CH4 entérique	$FE_{CH4\ ent.} * Nb\ vache\ allaitante$	Ges'tim
CH4 pâturage	$FE_{CH4\ pat.} * Nb\ UGB * Nb\ jour\ au\ pâturage / 1000$	Ges'tim
CH4 déjections au bâtiment	$FE_{CH4\ dej.\ bat.} * Nb\ UGB * T_{bat.}$ (en litière accumulée et aire raclée)	Ges'tim
CH4 stockage déjections	$FE_{CH4\ stock.dej.} * Nb\ vaches * Q\ fumier * T_{stock.}$	Ges'tim
N2O déjections au bâtiment	$FE_{N2O\ dej.bat.} * Nb\ UGB * T_{bat.}$ (en litière accumulée et aire raclée)	Ges'tim
N2O stockage déjections	$FE_{N2O\ stock.dej.} * Nb\ vaches * quantité\ N\ stocké\ en\ fumier * T_{stock.} / 1000$	Ges'tim
N2O excréctions au pâturage	$(15\%N\ urine + 0.4\%N\ feces) * 1,5 * 44 / 28\ kg\ N2O * Nb\ ha * T_{pat.}$	Ges'tim
N2O épandage	$FE_{N2O\ epan.} * quantité\ N\ apporté$	Ges'tim
CO2	$FE_{CO2\ fioul} * litre\ de\ fioul\ consommé\ par\ l'exploitation$ $FE_{CO2\ electr.} * kwh\ consommé\ par\ l'exploitation$ $FE_{CO2\ fourrage} * quantité\ fourrages\ achetés$	Ges'tim Cap'2er Cap'2er

Annexe IX : Paramètres pour le calcul des émissions de GES - exploitation bovin allaitant

Postes d'émission	Noms	Valeurs	Références
$FE_{CH4\ ent.}$	Facteur d'émission méthane entérique	72 kg CH4	Ges'tim
$FE_{CH4\ pat.}$	Facteur d'émission méthane au pâturage	0,8 g CH4	Ges'tim
$FE_{CH4\ dej.bat.}$	Facteur d'émission méthane déjections en bâtiment. (en litière accumulée et aire raclée)	36,5 kg CH4	Ges'tim
$FE_{CH4\ stock. dej.}$	Facteur d'émission méthane au stockage déjections	4,5 kg CH4	Ges'tim
$FE_{N2O\ dej.bat.}$	Facteur d'émission protoxyde d'azote déjections en bâtiment	0,10 kg N2O	Ges'tim
$FE_{N2O\ stock. dej.}$	Facteur d'émission protoxyde d'azote stockage déjections	4,7 g N2O	Ges'tim
$FE_{N2O\ excré.pât.}$	Facteur d'émission protoxyde d'azote déjections au pâturage		Ges'tim
$FE_{N2O\ épan.}$	Facteur d'émission protoxyde d'azote à l'épandage	1%	Ges'tim
$FE_{CO2\ dir. indier}$	Facteur d'émission CO2 fioul Facteur d'émission CO2 électricité Facteur d'émission CO2 fourrages	3,06 kg CO2 0,548kg eq CO2	Ges'tim Ges'tim Cap'2er
Nb UGB	Nombre d'unité de gros bétail	124	enquêtes
$T_{bat.}$	Temps en bâtiment	140 jours	enquêtes
$T_{stock.}$	Temps stockage fumier		enquêtes
$T_{pat.}$	Temps au pâturage	225	enquêtes
N urines	Quantité d'azote dans les urines		Calcul
N fécès	Quantité d'azote dans les fécès		Calcul
Q fumier	Quantité de fumier	1.15 t/ animal/ mois de présence	CA Bretagne, 2002

Annexe X : Consommation d'énergie par poste

	Postes d'émissions	Données techniques utilisées	Formules de calcul	Facteurs d'émission (FE)
Énergies directs	Énergies directes	Consommation d'électricité	Kwh consommés	10,4MJ [°] / kwh
		Consommation de carburants	Litres de fioul consommés	45,7MJ/litre
Énergies indirects	Énergies liées aux intrants (fabrication et transport)	Nature et quantité des intrants achetés	Énergies indirectes (MJ) = \sum (Quantité intrants * FE _{MJ})	(43,4MJ) ^{°°} /kg (13,3MJ) ^{°°°} /kgMS

Source : CAP'2ER

[°] Coefficients électricité et fioul

^{°°} FE_{MJ} concentrés achetés

^{°°°} FE_{MJ} fourrages achetés

Annexe XI : Capacité de stockage des différents usages du sol

Type de couvert	Stockage / déstockage carbone	Sources
Prairie permanente	+570 kg /ha /an	Dollé et al., 2013
Prairie temporaire (PT sur PT)*	+570 kg /ha /an	Dollé et al., 2013
Prairie temporaire en rotation avec culture	+80 kg /ha /an	Dollé et al., 2015 a
Parcours	+250 kg /ha /an	Dollé et al., 2013
Retournement de prairie	-950 kg / ha /an	Arrouays et al 2002
Haies	+250 kg / 100m linéaire de haie	Ges'tim, 2010
	+100 kg /ha /an**	

*Valeur valable que PT sur PT

**A défaut de connaître le linéaire de haies, on applique un stockage moyen a l'ha de SAU considérant 100m linéaire / ha.

Annexe XII : Stockage carbone de l'exploitation ovin allaitant

Types de couverts	Superficie (ha)	Stockage C/ha/an (kg)	Stockage C (t)	Stockage (t CO2)
Prairies temporaires	49	570	27,93	102,41
Prairies permanentes	106,6	570	60,762	222,794
Bois	187,8	1000	187,8	688,6
Total			276,492	1013,804

Annexe XIII : Stockage carbone de l'exploitation bovin allaitant

Types de couvert	Superficie (ha)	Stockage (kgC/ha/an)	Stockage C (t)	Stockage (t CO2)
Prairies temporaires	2,4	570	1,37	5,016
Prairies permanentes	71,6	570	40,81	149,644
Parcours landes	100,6	250	25,15	92,22
Bois	4,81	1000	4,81	17,64
Total	179,41		72,14	264,51

Annexe XIV : Potentiel de réchauffement global des différents gaz

Gaz à effet de serre	Pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans
Méthane (CH ₄)	25
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	298
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1

Source : CITEPA 2019

Annexe XV : Table de conversion pour les unités de gaz

	Facteur multiplicatif
Passage de C à CO ₂	44/12
Passage de C à CH ₄	16/12
Passage de N à N ₂ O	44/28

Évaluer les impacts de pratiques agroforestières sur l'adaptation au changement climatique et le bilan carbone des élevages allaitants en Ariège

Dans le contexte du changement climatique, le double enjeu pour l'agriculture est d'imaginer des systèmes d'élevage permettant une adaptation des exploitations aux effets du changement climatique tout en améliorant son bilan carbone pour permettre une atténuation de la contribution de l'agriculture au changement climatique.

Compte tenu des enjeux actuels auxquels est confrontée l'agriculture, les pratiques agroforestières peuvent retrouver toute leur place dans les itinéraires techniques des exploitations agricoles

Cette étude évalue l'impact des pratiques agroforestières sur l'empreinte carbone et le bilan fourrager d'élevages allaitants ovins et bovins d'Ariège.

Pour faire ce travail, des résultats d'enquêtes ont été utilisés et complétés par les données Inosys et les données du Rami pastoral. Un modèle conceptuel a été élaboré et des scénarios de pratiques agroforestières ont été testés sur l'exploitation bovine avec un simulateur informatique : une éclaircie de 50 ha, une dégradation modérée des conditions climatiques, et une dégradation forte des conditions climatiques.

Ainsi les exploitations ovine et bovine étudiées ont des niveaux d'émissions brutes respectivement de 14,16 kg eqCO₂/kgvv et de 14,21 kg eqCO₂/kgvv. Les émissions nettes sont de -13,97 kg eqCO₂/kgvv pour les ovins et de 4,38 kg eqCO₂/kgvv pour les bovins. Les systèmes d'élevage utilisant l'arbre compensent bien leurs émissions de GES. Leur consommation d'énergie est faible (3333 MJ/ha pour les ovins et 2290 MJ/ha pour les bovins). Les résultats de simulation montrent que la pratique d'éclaircie permet une meilleure résistance des exploitations à la dégradation des conditions climatiques. La diminution de l'autonomie est moins forte lorsqu'il y a éclaircie mais n'est améliorée que de 2 à 3% selon le degré de sévérité de la dégradation des conditions climatiques. La pratique de l'éclaircie peut compenser une partie des pertes de productions fourragères en cas de dégradation des conditions climatiques, et améliorer la résistance des exploitations qui la mettent en œuvre. Une intensification de cette pratique en revanche conduit à une diminution de la séquestration de carbone en forêt et la combustion de bois contribue à également augmenter les émissions de GES atmosphériques.

Mots clés : empreinte carbone, bilan fourrager, pratiques agroforestières, gaz à effet de serre, éclaircie, changement climatique, résistance, adaptation, atténuation, élevage allaitant, stockage carbone

Pour citer cet ouvrage :

DIA Ndèye Awa, 2019. Évaluer les impacts de pratiques agroforestières sur l'adaptation au changement climatique et le bilan carbone des élevages allaitants en Ariège. Mémoire de Master 2, parcours Systèmes d'Élevage, Montpellier SupAgro. 36 p. + annexes.