

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/365232959>

Application de leviers proposés par le Label Bas Carbone – Grandes Cultures sur plusieurs exploitations type : évaluation pluri-critères et calcul de crédits carbone

Conference Paper · November 2022

CITATIONS

0

READS

81

4 authors, including:



Berrodier Marc

ARVALIS Institut du végétal

5 PUBLICATIONS 6 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Laure Nitschelm

ARVALIS Institut du végétal

10 PUBLICATIONS 174 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Hélène Lagrange

ARVALIS Institut du végétal

12 PUBLICATIONS 44 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Nutrient-recycling-from-pilot-production-to-farms-and-fields - ReNu2Farm [View project](#)

Application de leviers proposés par le Label Bas Carbone - Grandes Cultures sur plusieurs exploitations type : évaluation pluri-critères et calcul de crédits carbone

Valérie LEVEAU (1), Hélène LAGRANGE (2), Marc BERRODIER (2), Laure NITSCHHELM (1)

(1) ARVALIS Institut du Végétal, Station expérimentale, 91720 Boigneville

(2) ARVALIS Institut du Végétal, Station inter-Instituts, 6 Chemin de la Cote Vieille, 31450 Baziège

v.leveau@arvalis.fr ; h.lagrange@arvalis.fr ; m.berrodier@arvalis.fr ; l.nitschhelm@arvalis.fr

Avec la collaboration de Coraline DESSIENNE, Geoffroy OUDOIRE, Oscar GODIN, Clémence ALIAGA, Edouard BARANGER, Diane CHEVASSIEUX, Mélanie FRANCHE, Elodie GAGLIARDI, Thomas JOLY, Didier LASSERRE, Jean Luc MOYNIER, Luc PELCE, Romain TSCHÉILLER et Jean-Luc VERDIER (1)

Résumé

L'étude propose d'évaluer la faisabilité et la performance des leviers proposés par le Label Bas Carbone-Grandes Cultures (LBC-GC) sur neuf fermes types grandes cultures, représentatives d'exploitations agricoles françaises performantes dans différentes régions. Les projets LBC-GC proposés sont évalués en écart à la ferme de référence en termes d'émissions GES, de stockage de carbone, de bilan carbone, de réductions d'émissions, de prix de crédits carbone et de co-bénéfices. Les 50 projets mis en place, 6 leviers et 5 combinaisons, ont été choisis en fonction de la situation initiale de chaque ferme type. Huit fermes type sur les neuf étudiées ont un bilan carbone net émetteur de CO₂, allant de 0.5 à 3.5 TeqCO₂ émis par ha et par an. Six fermes stockent du carbone dans leur sol, entre 0.9 et 2.7 TeqCO₂ par ha et par an. 44 projets génèrent des crédits carbone avant rabais allant de 0.01 à 1.24 TeqCO₂ par ha et par an. Pour ces projets, le cout d'équilibre du crédit carbone avant rabais varie entre 4 et 662 €/TeqCO₂ ; 57 % ont un cout supérieur à 50 €. Il est difficile de hiérarchiser les leviers entre eux, les résultats étant différents d'une ferme type à l'autre à levier identique. On peut noter (i) des effets antagonistes entre les RE fertilisation et stockage de certains leviers ; (ii) une additivité importante entre leviers ; (iii) la nécessaire prise en compte de la facilité de mise en place du levier. Des pistes sont identifiées pour enrichir le travail présenté : (i) le nombre de fermes type étudiées ; (ii) des projets intégrant des combinaisons de leviers supplémentaires ; (iii) la comparaison références « spécifique » et « générique » ; (iv) une mesure de la robustesse des projets en fonction du contexte économique et de l'aléa climatique ; (v) une réflexion sur le cout du changement.

Mots clé : Label bas carbone/ Emissions GES/ stockage carbone/ bilan carbone / ferme type/ crédit carbone/ cout d'équilibre

Abstract

This study aims to evaluate the feasibility and efficiency of the "Low Carbon Label for Arable Crops" (LBC-GC) practices on nine typical farms representative of efficient farms located in several French regions. We applied the French Low Carbon Label method on 50 projects divided among the typical farms. All results are expressed in relative value compared to the baseline scenario (i.e., GHG emissions, carbon storage, carbon footprint, emissions reduction, carbon credit prices and co-benefits). We chose the 50 projects, 6 low carbon practices and 5 combinations of practices depending on the baseline scenario for each typical farm. Over the 9 typical farms studied, 8 have a carbon footprint ranging from 0.5 to 3.5 tCO₂ eq emitted per ha and per year. Six farms are storing carbon in their soil, ranging from 0.9 to 2.7 tCO₂ eq stored per ha and per year. In total, 44 projects generate carbon credits ranging from 0.01 to 1.24 tCO₂ eq per ha and per year, before abatement. For these projects, the opportunity cost varies from 4 to 662 €/tCO₂ eq before abatement; 57% has an opportunity cost higher than 50€. Although it is difficult to rank the different low carbon practices since the results varies from one typical farm to another, we can conclude that: (i) there is an antagonist effect between emissions reduction from fertilisation and carbone storage practices; (ii) there is a high additivity between practices; (iii) it is necessary to consider the on-field feasibility for each practice. We have finally identified several perspectives to improve this study: (i) increasing the number of typical farms studied; (ii) integrating new combinations of practices; (iii) comparing "specific" and "generic" baseline scenario; (iv) measuring the project robustness depending on the economic and climatic contexts and (v) evaluating the cost of change.

Keywords: Low carbon Label / GHG emission / Carbon storage / Carbon footprint / Typical farm / Carbon credit / opportunity price.

INTRODUCTION

Dans le contexte de changement climatique, le Label Bas Carbone (LBC) a pour objet d'accompagner la transition agroécologique des exploitations agricoles avec une réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). La méthode Grandes Cultures (LBC-GC) labellisée en 2021 a été rédigée par les instituts techniques (Arvalis, Terres Inovia, ITB, ARTB) avec l'appui d'Agrosolutions, sous le pilotage des syndicats des grandes cultures (AGPM, AGPM, CGB, FOP). Elle propose ainsi un cadre de comptabilisation des émissions et un certain nombre de leviers techniques applicables sur des exploitations de grandes cultures. Ces leviers sont de plusieurs types avec des objectifs tels que la réduction des émissions de GES liées à la fertilisation ou à la consommation de combustibles fossiles et l'augmentation du stockage de carbone dans les sols.

L'objectif de cette étude réalisée par Arvalis-Institut du végétal est triple : (i) identifier dans différents systèmes de production de grandes cultures français les leviers pouvant être mis en œuvre lors d'un projet LBC-GC, (ii) évaluer leur intérêt en termes de durabilité, (iii) produire des références sur l'intérêt de ces leviers. L'étude est réalisée sur plusieurs fermes type de la Fermothèque Arvalis représentant ces systèmes de production. La méthode employée sera décrite puis l'étude d'une ferme type sera détaillée avant de présenter les résultats globaux de l'ensemble des fermes type et projets étudiés.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dans un premier temps, une présentation rapide du LBC- GC est proposée. Puis la démarche proposée se décomposera en plusieurs étapes : (i) modéliser le système de production ; (ii) réaliser un diagnostic carbone des pratiques de l'exploitation ; (iii) définir et mettre en œuvre différents leviers, proposés par le LBC-GC, adaptés à la ferme type sur un projet de cinq ans ; (iv) évaluer l'impact sur les émissions et le stockage de carbone et calculer le potentiel de crédits carbone ; (v) évaluer les impacts économiques, techniques et environnementaux, autres que les émissions, de la mise en œuvre de ces leviers.

1.1. Le Label Bas Carbone Grandes Cultures

1.1.1. Présentation

Le référentiel du Label Bas Carbone a été publié par le décret n°2018-1043 du 28 novembre 2018, révisé par le décret n°2021-1865 du 29 décembre 2021. Il représente un cadre donné par le ministère de la transition écologique pour l'établissement d'un dispositif certifié de comptabilisation de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Il est utilisable dans le marché de la compensation volontaire des émissions de carbone.

Différentes méthodes sectorielles ont d'ores et déjà été proposées et validées par le ministère de la transition écologique. Parmi elles, la méthode Label Bas Carbone Grandes Cultures (LBC-GC) (Soenen et al., 2021) a été validée le 26/08/2021. Elle s'applique à des projets agricoles en France métropolitaine ayant pour objectif d'atténuer le changement climatique via des modifications de pratiques, voire de systèmes, sur les ateliers de grandes cultures. Sur la base du volontariat, les porteurs de projet identifient et mettent en œuvre un cortège de leviers, permettant, à l'échelle de l'exploitation agricole et sur la durée du projet, une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et/ou un stockage de carbone dans les sols, qui compense les émissions

résiduelles. Le terme employé pour expliciter le résultat final (GES + stockage) est « Réductions d'Emissions » ou « RE ».

Des RE directes sur l'exploitation sont comptabilisées : (i) les émissions de N₂O liées aux apports d'engrais minéraux et organiques, à la décomposition des résidus de culture, au pH_{eau} du sol, à la minéralisation basale du sol ; (ii) les émissions de CO₂ liées aux apports d'amendements basiques; (iii) les émissions de CO₂ liées aux consommations de combustibles sont comptabilisées ; (iv) les RE sur l'exploitation tiennent aussi compte des efforts de maintien des stocks et du stockage additionnel de carbone dans les sols.

Des émissions indirectes sont également comptabilisées à l'amont de l'exploitation. Elles sont liées à la fabrication des engrais ou des combustibles.

Enfin, des émissions aval sont comptabilisées, elles sont liées aux consommations de combustibles pour le séchage ou le stockage des récoltes chez les organismes stockeurs.

L'ensemble des RE sont comptabilisées en TeqCO₂/ha.

1.1.2. La mise en place d'un projet LBC-GC

Les étapes décrites dans la méthode LBC-GC sont les suivantes:

- La durée d'un projet est de cinq ans.
- Le choix d'une référence : la référence correspond à une exploitation à laquelle se compare le projet. La méthode LBC-GC décrit deux types de références. Soit le projet se compare à une exploitation « moyenne ». Celle-ci est reconstituée à partir de la rotation réelle de l'exploitation sur laquelle le projet est construit et à partir des pratiques culturales moyennes par culture à l'échelle du département voire de la région. Ces dernières sont répertoriées en annexe de la méthode LBC-GC. C'est une référence dite « générique ». L'autre possibilité est de comparer le projet à une référence dite « spécifique » qui comptabilise les émissions de GES et le stockage du carbone sur l'exploitation pour des pratiques de l'exploitation correspondant à celles existant avant la mise en place du projet LBC-GC. Les pratiques enregistrées sur les 3 années précédant la mise en place du projet sont alors utilisées pour construire le scénario de référence. Les RE calculées sont donc des émissions en moins, que le projet permet d'atteindre, par rapport à la référence ; ainsi que du stockage du carbone en plus (ou un meilleur service de maintien des stocks).
- La description du périmètre de calcul : les calculs des RE se font sur l'atelier grandes cultures des exploitations étudiées. Au sein de cet atelier, différents systèmes de culture (SdC) sont décrits. Ils correspondent à des homogénéités de sol, de climat, de type de conduite (conventionnelle ou bio), de type de succession culturale (présence ou non de légumineuses, de cultures industrielles, de prairies temporaires, de couverts intermédiaires...), de type de travail du sol, de fréquence d'apport de produits organiques. Les calculs de RE sont effectués à l'échelle des systèmes de culture décrits puis agrégés à l'exploitation.

1.1.3. Le choix des leviers pour un projet

Pour chaque SdC de chaque exploitation, des leviers de réduction des émissions de GES et/ou de stockage de carbone dans les sols sont choisis. Les choix sont faits dans la liste proposée par la méthode LBC-GC (Tableau 1) :

Tableau 1 – Liste des leviers proposés par la méthode LBC-GC classés selon les trois grands objectifs : réduction des émissions liées aux combustibles fossiles, réduction des émissions liées à la fertilisation, compensation des émissions liées au stockage de carbone dans les sols.

Combustibles	Fertilisation	Stockage C
. ↘ consommation combustible par les engins	. ↘ dose d'azote	. ↗ biomasse restituée par les couverts et les cultures
. ↘ consommation combustible par les moteurs d'irrigation	. Introduction de légumineuses ou cultures à faible besoins en azote	. ↗ apports de produits organiques
. ↘ consommation énergie pour séchage/stockage à la ferme	. Chaulage des sols acide (pHeau < 6.8)	. Insertion et allongement des prairies temporaires ou artificielles
	. Inhibiteurs de nitrification	
	. Réduction volatilisation	

Toutes les pratiques permettant d'atteindre ces objectifs sont utilisables, à condition de comptabiliser à chaque fois les bénéfiques (diminution GES et/ou augmentation stockage C) et les éventuels impacts négatifs (augmentation GES et/ou diminution stockage C). Les modes de calculs de la méthode LBC-GC ne permettant pas d'attribuer telle ou telle RE à un levier, pour chaque projet, c'est l'impact d'un ensemble de leviers qui est comptabilisé.

1.1.4. Mode de calcul des réductions d'émissions et outils certifiés

Les calculs des RE doivent être effectués conformément aux descriptions de la méthode LBC-GC. Les écarts d'émissions GES et de stockage de C sont calculés entre le projet et la référence à l'échelle du SdC puis agrégés à l'échelle de l'exploitation. Des outils de calcul sont aujourd'hui proposés. Ils sont certifiés par des auditeurs indépendants. L'implémentation des équations de calculs de GES telles que décrites dans la méthode LBC-CG (Soenen et al, 2021) et l'utilisation d'un modèle de bilan humique mentionné dans la méthode (AMG, STICS ou AqYield) est vérifiée.

Les émissions de GES sont calculées à partir des assolements, des pratiques de fertilisation minérale et organique, des pratiques de restitutions des résidus de culture, d'implantation ou non de couvert intermédiaire, d'utilisation de combustible fossile. Le stockage du carbone est simulé par un modèle de bilan humique qui intègre des informations sur des résidus aériens et souterrains des cultures et couverts ; les apports de matières organiques exogènes (comme les PRO), le sol et le climat.

1.1.5. Estimation des rabais associés aux projets

La méthode LBC-GC prévoit des calculs de rabais afin de tenir compte des risques d'incertitude dans les calculs réalisés. Différents rabais existent, leur valeur et les RE sur lesquels ils s'appliquent dépendent du risque d'incertitude pris en compte. La méthode LBC-GC propose une équation finale pour comptabiliser les RE labellissables suite à l'application des rabais. A titre d'information, le Tableau 2 ci-dessous donne la liste des rabais et les critères associés, déterminant le niveau du rabais.

Tableau 2– Liste des rabais à appliquer sur les RE d'un projet LBC-GC

Type de rabais		Niveau du rabais
Choix de la référence		de 0 à 10%
Risque de non-permanence des stocks de carbone du sol		de 0 à 20%
Type de données pour les RE combustibles		de 0 à 5%
Type de données pour les simulations d'évolution de stocks de carbone du sol	Météo	de 0 à 2.5%
	C initial	de 0 à 5%
	Autres données sol pHeau , C/N	de 0 à 5%
	Autres données sol argiles, CaCO ₃	de 0 à 5%
	Biomasse et rendements	de 0 à 5%
	PRO	de 0 à 5%
Rabais nda		de 0 à 20 %

Avec, PRO = Produits résiduels organiques, nda = non-démonstration de l'additionalité

1.1.6. Calculs des co-bénéfices

Comme prévu par le décret du 28 novembre 2018, les porteurs de projets doivent informer d'éventuels impacts négatifs significatifs des points de vue environnementaux ou socio-économiques ; ils peuvent également apporter des précisions sur d'éventuels impacts positifs autres que ceux déjà calculés sur les GES et le stockage du C.

La méthode LBC-GC décrit donc une liste de co-bénéfices. Dans cette liste décrite dans le Tableau 3, une partie des indicateurs sont obligatoires, pour tenir les potentiels financeurs informés ou pour sensibiliser sur l'impact des projets ; d'autres indicateurs sont optionnels.

Tableau 3 – Liste des co-bénéfices spécifiés dans la méthode LBC-GC

Co-bénéfices	Obligatoire ou optionnel
Erodabilité des sols	Obligatoire si aléa d'érosion moyen ou fort
Epuisement des ressources fossiles	Obligatoire
Emission d'ammoniac	Obligatoire
Lixiviation de nitrate	Obligatoire
Consommation de phosphore minéral	Obligatoire
Consommation en eau	Obligatoire si irrigation
Pressions par l'usage des produits phyto (IFT)	Obligatoire
Biodiversité : composition paysage ; absence perturbation et configuration du paysage	Optionnel
Demandes sociétales (pouvoir nourricier, production de protéine végétale, réduction de déforestation importée, alimentation des filières bioénergie ou biomatériaux)	Optionnel
Dynamique territoriale (emploi, autonomie, valorisation des ressources locales)	Optionnel
Revenu, temps de travail, charge de travail, conditions de travail	Optionnel

Avec, IFT = indice de fréquence des traitements phytosanitaires

1.2. Les systèmes de production étudiés

1.2.1. Modélisation d'un système de production par une ferme type

La première étape de ce travail consiste à modéliser un système de production présent sur un territoire d'étude. Le fonctionnement technico-économique du système de production est modélisé dans une « ferme type ». Celle-ci a été créée en conjuguant expertise et données observées. La ferme type se caractérise par les informations techniques (structure d'exploitation, types de sol, assolement et rotations, systèmes de culture, parc matériel, main d'œuvre, et itinéraires techniques des cultures) et économiques (prix des matières premières, des intrants et du matériel) (Tavares, 2009). Une fois la description réalisée, le modèle est saisi dans le logiciel SYSTERRE®. Un ensemble d'indicateurs clés de la multi-performance des exploitations agricoles est ensuite calculé (Lairez et al, 2015 et Arvalis, 2010)

1.2.2. Le modèle Systerre

Conçu en 2008 par Arvalis et développé depuis 2017 en partenariat inter-institut avec Terres Inovia, l'Acta et l'ITB, SYSTERRE® permet de réaliser des évaluations de systèmes de culture et de concevoir des alternatives innovantes et multi-performantes d'exploitations de grande culture et de polyculture élevage. Au travers du calcul d'une vingtaine d'indicateurs principaux déclinés par poste et à différents niveaux d'agrégation (i.e. parcelle, culture, mode de conduite, lot de parcelle et exploitation), SYSTERRE® sert à l'élaboration de diagnostics de performance et à la conception de plans de progrès. Le diagnostic de performance d'une exploitation passe par la caractérisation de son fonctionnement. Pour réaliser cette étape, il est nécessaire de consigner les pratiques (observées sur le terrain, moyennes, types...) au travers de la saisie du parc matériel, des parcelles et de leurs surfaces, de la

main d'œuvre, des itinéraires techniques (dates, opérations culturales, intrants et quantités, produits et sous-produits récoltés ou exportés), et des données économiques (fermage, aides PAC, prix des intrants, prix de vente des productions, charges de main d'œuvre, etc.). (Casal et al, 2022)

1.2.3. Choix des systèmes de production

Les systèmes de production étudiés sont des systèmes *performants* sur le plan de la production avec des rendements supérieurs de 10 % à la moyenne régionale et sur le plan des performances économiques. La ferme type se caractérise en général par une surface d'exploitation supérieure et un assolement plutôt diversifié par rapport à la moyenne régionale. Ces fermes type font partie de la Fermeothèque France d'Arvalis, qui existe depuis une vingtaine d'années.

Trois systèmes de production ont été étudiés dans différentes régions et sont représentés par neuf fermes type :

- Deux systèmes avec céréales oléo-protéagineux (COP) et des grandes cultures comme la betterave ou la pomme de terre : les fermes type sont la ferme *Limons Picard* (betterave et pomme de terre) et la ferme *Champagne Crayeuse* (betterave),
- Trois systèmes COP en zone à petit potentiel en sec : la ferme *Plateau de Bourgogne* la ferme *Champagne Berrichonne*, la ferme *Lauragais*,
- Quatre systèmes COP comprenant du maïs avec recours à l'irrigation : ferme *Alsace irriguée*, ferme *Plaine de Lyon gravières irriguée*, ferme *Poitou Charentes irriguée*, ferme *Vallée de l'Adour irriguée*.

1.3. Application du LBC aux fermes type

Les étapes décrites dans la méthode LBC-GC ont été appliquées. Une chaîne de calcul a été mise en place avec pour référence l'exploitation décrite sous SYSTERRE® ; puis les calculs sont réalisés avec deux outils CHN-AMG et Carbon Extract.

1.3.1. Définition de la situation référence spécifique

Seule la référence spécifique telle que proposée par le LBC-GC est étudiée. Elle est caractérisée pour chaque ferme type par les rendements moyens 2016/20 par culture, des itinéraires représentant la pratique moyenne des 3 années de référence. Les sols sont définis et caractérisés dans la « BaseSol » d'Arvalis.

Le contexte économique choisi est un contexte historique. Il correspond à la moyenne des prix de marché des productions 2016/20, aux prix des intrants semences et phytos 2020 et à la moyenne des prix azote et carburant 2018/20.

1.3.2. Calcul des réductions d'émissions et outils mis en œuvre

Le stockage de carbone dans le sol est évalué avec l'outil CHN-AMG proposé par Arvalis. L'outil met en œuvre le modèle AMG-V2 (Andriulo et al. 1999 ; Bouthier et al. 2014 ; Clivot et al. 2019). L'évaluation des émissions GES et des RE est réalisée avec l'outil Carbon Extract proposé par AgroSolutions qui met en œuvre la méthode LBC-GC : stockage du carbone (reprise des résultats du modèle AMG) et émissions liées aux pratiques (fertilisation, consommation de carburant...). Le prototype de l'outil Carbon Extract a été mis à disposition d'Arvalis sous le format d'un script R dès mai 2021. Pour chacun des projets, un fichier d'entrée décrivant les pratiques culturales sur chaque culture pour chaque système de culture est constitué. Les calculs d'émissions GES sont alors effectués et les résultats détaillés par système de culture et par poste d'émissions sont obtenus. Les écarts entre le projet et la référence sont

également calculés sur les mêmes échelles.

Les réductions d'émission aval n'ont pas été prises en compte. Aucun projet ne fait spécifiquement appel au séchage ou au stockage chez l'organisme stockeur.

1.3.3. Réalisation d'un bilan carbone initial

Un bilan carbone de la référence a été réalisé sur chaque ferme type. Il reprend les deux composantes, stockage de carbone et émission de GES dues aux pratiques et à la fabrication des intrants. Il est également réalisé à partir des outils CHN-AMG et Carbon Extract. Il sera exprimé en tonnes équivalent CO₂ (TeqCO₂).

1.3.4. Définition des « projets » par ferme type : choix parmi les leviers proposés par le LBC-GC

Chaque ferme type est caractérisée par son bilan carbone initial et des informations permettant d'identifier des leviers pertinents. A cela est associée l'expertise des ingénieurs régionaux et spécialistes d'Arvalis.

Chaque ferme type est décrite par : le type de sol, le pourcentage d'irrigation, le pourcentage de légumineuses dans l'assolement, le pourcentage de surface labourée, le pourcentage de surface avec couverts en inter-culture, la quantité totale d'azote par hectare de surface d'exploitation, la quantité d'azote organique par hectare de surface d'exploitation, la forme d'azote minéral, la forme de produit organique (voir détails Tableau 9).

Plusieurs projets ont été définis pour chaque ferme type. Un projet se définira par la mise en place d'un levier ou d'une combinaison de leviers proposés par le LBC-GC. Selon les leviers, ceux-ci s'appliquent à un ou plusieurs des systèmes de culture de la ferme type. Le pourcentage de surface concernée par le projet est indiqué. Le temps de l'étude étant limité, tous les leviers possibles n'ont pas pu être évalués (voir détails Tableaux 4 et 11).

Dans cette étude, la mise en place des leviers est réalisée dès la première année du projet. Il n'y a pas de période de transition dans leur mise en place ou pour l'apprentissage de nouvelles pratiques. On estime que les pratiques sont maîtrisées immédiatement.

1.3.5. Estimation des rabais associés aux projets

Le calcul des rabais n'a pas été effectué, car la méthode de calcul proposée dans la méthode LBC-GC est en cours de révision. Les résultats seront donc exprimés **hors rabais**, en RE brutes, ou RE avant rabais.

1.3.6. Calculs des co-bénéfices

Les co-bénéfices calculés sont l'IFT, le temps de traction (temps sur parcelle), ainsi que la marge nette. Tous les co-bénéfices obligatoires n'ont pas été étudiés.

1.4. Les leviers/projets étudiés et les hypothèses conjointes

Le tableau 4 reprend les leviers étudiés et les résultats attendus identifiés dans le LBC-GC. Chaque levier est associé à un numéro de projet qui est commun à toutes les exploitations type. Les projets intégrant des combinaisons de leviers sont également numérotés. Les leviers unitaires sont : les formes d'azote minéral (projet 1), l'introduction de cultures avec de faibles besoins en azote (projet 2), la mise en place ou l'augmentation des couverts intermédiaires en surface et/ou en rendement (projet 3), l'utilisation de PRO sur des couverts ou des cultures (projets 4 ou 5), l'introduction de CIVE avec utilisation de digestats (projet 7), et des combinaisons de ces leviers (projets 8 et au-delà). Le levier travail du sol (projet 6) n'a pas été étudié

en unitaire, mais peut être intégré dans d'autres projets (par exemple dans les projets 4).

Tableau 4– Liste des leviers testés dans l'étude et objectifs associés

Leviers	Numéro projet unitaire associé	Numéro projet combinaison de leviers associé	Objectif (voir tableau 1)
Formes d'azote	1	8 ; 9 ; 10 ; 11 et 12	Fertilisation : amélioration efficience des apports pour réduire dose totale d'azote, réduction volatilisation.
Insertion de protéagineux ou cultures à faible besoin en N	2	10 ;11	Fertilisation : réduire dose totale d'azote
Augmentation surface /rendement de couvert	3	11	Stockage carbone : ↗ biomasse restituée par les couverts
Fertilisation des couverts avec des PRO	4		Stockage carbone : ↗ biomasse restituée par les couverts et apport de produits organiques
Fertilisation des cultures avec des PRO (blé - maïs- colza)	5	9 ; 10 ;11	Fertilisation : réduction dose totale d'azote minéral ; Stockage carbone : apport de produits organiques
Intégration de CIVE, apport de digestats et évolution de l'assolement si nécessaire	7	8 ; 11 ; 12	Stockage carbone : ↗ biomasse restituée par les couverts ; apport de produits organiques

Avec, PRO = Produits résiduaire organiques ; CIVE = Culture Intermédiaire à vocation énergétique

1.5. Evaluation de la pluri-performance

1.5.1. Méthode

Lorsque la référence et les projets sont définis, ils sont renseignés dans les outils SYSTERRE®, puis dans CHN-AMG et enfin dans Carbon Extract.

C'est l'écart entre la situation « référence » et le « projet » qui est évalué dans cette étude. Deux natures de résultats sont présentées : les réductions d'émissions (c'est-à-dire l'impact sur les émissions de GES et le stockage de carbone dans le sol), puis les impacts techniques, économiques et environnementaux autres que ceux concernant directement les enjeux carbone.

Des indicateurs permettant d'évaluer les impacts ont été calculés. Ils sont choisis parmi les indicateurs proposés par les trois outils SYSTERRE®, CHN-AMG et Carbon Extract.

Ce sont des indicateurs de performances environnementale, économique et sociale et des indicateurs de « fonctionnement » qui permettent d'explicitier sur le plan

technique les stratégies testées (Tableau 5).

1.5.2. Les indicateurs retenus

Ces indicateurs peuvent être calculés à 2 grains d'organisation et 2 pas de temps : à l'exploitation ou à l'hectare de SAU et sur la durée du projet (5 ans) ou par année de projet. Ce sont les indicateurs par hectare et par an qui seront privilégiés dans cet article.

Tableau 5 – Indicateurs

Indicateur	Unité	Définition
Indicateurs Emissions de GES		
RE Stockage du C avant Rabais	TeqCO ₂ (par ha ou sur l'exploitation/sur 5 ans ou 1 an)	Réduction d'émission de GES par atténuation via le stockage de carbone dans le sol entre la référence et le projet
RE Fertilisation avant Rabais	TeqCO ₂ (par ha ou sur l'exploitation/sur 5 ans ou 1 an)	Réduction d'émission de GES liés à la fertilisation entre la référence et le projet
RE Combustible avant Rabais	TeqCO ₂ (par ha ou sur l'exploitation/sur 5 ans ou 1 an)	Réduction d'émission de GES liés à la consommation de carburant entre la référence et le projet
RE TOTAL avant Rabais	TeqCO ₂ (par ha ou sur l'exploitation/sur 5 ans ou 1 an)	Réduction d'émission de GES totaux (RE stockage + RE fertilisation + RE combustible) entre la référence et le projet
Crédit Carbone avant Rabais	TeqCO ₂ (par ha ou sur l'exploitation/sur 5 ans ou 1 an)	Nombre de Tonnes équivalent CO ₂ non émises entre la référence et le projet (équivalent de la RE TOTAL avant Rabais)
Indicateurs économiques		
Ecart de Marge Nette	€ (par ha ou sur l'exploitation/sur 5 ans ou 1 an)	La marge nette est la différence entre le produit (chiffre d'affaires et aides) et l'ensemble des charges de l'exploitation (intrants, mécanisation, main d'œuvre yc familiale, fermage et autres charges fixes). C'est l'écart entre la référence et le projet qui est calculé. L'écart potentiel de cotisations sociales exploitant n'est pas évalué ici.
Cout/Valeur d'équilibre avant rabais	€ / crédit Carbone	C'est la valeur du crédit carbone qui permet d'atteindre un écart de marge nette nul entre la référence et le projet
Autres indicateurs environnementaux		
Efficience énergétique	%	C'est le rapport entre la production d'énergie brute et la consommation d'énergie brute de l'exploitation
Indicateurs sociaux		
Ecart Heures de traction	Heure par ha et par an	Les heures de traction sont les heures passées par le matériel sur les parcelles.
Indicateurs de fonctionnement		
Ecart IFT	Par ha et par an	L'indice de fréquence de

		traitement traduit un volume de matière active utilisée.
--	--	--

1.5.3. La notion de Crédit Carbone

Le crédit carbone est une unité équivalente à une tonne de CO₂eq non émise ou séquestrée dans le sol. Cette unité est actuellement échangée sur le marché du carbone volontaire. Un crédit carbone peut être émis s'il est obtenu par un projet qui respecte des critères précis d'additionalité, de mesurabilité, de vérifiabilité, de permanence et d'unicité. Ce cadre est assuré par le cadre du LBC et donc la méthode LBC-GC. Les crédits carbone peuvent être vendus à des entreprises, des collectivités ou des particuliers qui sont dans une démarche volontaire de compensation de leurs émissions. Les projets LBC qui font des RE en TeqCO₂ peuvent donc émettre des crédits carbone.

1.5.4. Le cout d'équilibre du Crédit Carbone

Un des objectifs de cette étude est d'évaluer l'impact économique de la mise en place des projets visant à réduire les émissions de GES. L'analyse de l'écart de marge nette entre la référence et le projet apporte une première réponse à cette question. Elle ne fait cependant pas le lien direct avec la réduction d'émission. Un projet peut très bien améliorer ou détériorer la marge, sans pour autant réduire les émissions.

Plusieurs choix méthodologiques étaient possibles :

- Calculer la rémunération des crédits carbone créés par ferme type en fixant plusieurs valeurs de prix de marché, 30, 50, 100, 120, ... € par crédit,
- Calculer un cout d'équilibre, qui mesure une valeur du crédit carbone, avant rabais, compensant la potentielle perte de marge nette par rapport à la référence, liée à un cout supplémentaire ou une perte de produit. Ce cout d'équilibre ne prend néanmoins pas en compte le cout du changement et le risque pris : en effet, dans l'étude menée, on estime que les leviers mis en œuvre par les projets nécessitent une technicité déjà acquise par l'agriculteur. Il ne prend pas non plus en compte d'éventuels couts associés à l'accompagnement à la mise en place des projets (utilisation d'outil de calcul, diagnostic d'exploitation, mandataire...).

C'est le cout d'équilibre avant rabais qui est proposé ici.

1.5.5. Interprétation des résultats

Les résultats sont le plus souvent exprimés en écart par rapport à la référence. Les projets seront classés en plusieurs catégories. Les résultats ont été estimés identiques lorsque (i) les RE total, Stockage, Fertilisation ou Combustible sont comprises entre - 0.01 et + 0.01 TeqCO₂ par hectare et par an (ii) l'écart de marge est compris entre - 5 et + 5 € par hectare et par an.

2. LA FERME TYPE CHAMPAGNE CRAYEUSE

2.1. La référence

La ferme type Champagne crayeuse a une surface de 242 ha en sol de craies. Quatre rotations sont mises en place, avec un assolement diversifié avec 16 % de betteraves, 12 % de colza d'hiver, 38 % de céréales d'hiver, 18 % d'orge de printemps, 11.5 % de légumineuses (7.5 % de luzerne et 4 % de pois protéagineux). Des couverts sont présents sur 40 % de la surface en interculture longue. Le labour est présent sur 48 % de la surface, avant betterave, pois et colza et sur les blés après betterave.

La fertilisation azotée, uniquement minérale, est basée sur de

la solution azotée (86%) et de l'ammonitrate (14%). La quantité apportée est de 150 kgN/ha en moyenne sur l'exploitation.

2.2. Bilan Carbone de la référence

Le bilan annuel carbone de la référence *Champagne crayeuse* est émetteur de CO₂ (tableau 6) : la ferme type émet 1.32 TeqCO₂ par hectare et par an, soit 319 TeqCO₂ pour l'exploitation par an. Pour rappel, le bilan prend en compte émissions de GES et compensation par le stockage du carbone dans les sols. Les émissions GES moyennes dues aux pratiques sont de 2.32 TeqCO₂ par ha et par an ; elles sont dues pour 90 % à la fertilisation et 10 % au carburant. Par contre, la ferme stocke 1.01 TeqCO₂ par ha et par an dans ses sols, ce qui améliore le bilan.

Tableau 6 – Bilan carbone ferme type *Champagne crayeuse* (en TeqCO₂ par an) *Source : Arvalis – calculs CHN-AMG et Carbon Extract*

En TeqCO ₂ annuel	Exploitation	par hectare
Emissions GES Fertilisation	506	2.09
Emissions N ₂ O (directe et indirecte (Volatilisation - Lixiviation))	297	1.23
Emissions CO ₂ Directe	0	0
Emissions Amont Ferti minérale	209	0.86
Emissions Amont Ferti organique	0	0
Emissions GES Combustible	56	0.23
Stockage carbone Sol (si stockage, baisse des émissions)	243	1.01
Bilan carbone : Emissions – Stockage	319	1.32

2.3. Les projets étudiés

Cinq projets ont été construits en prenant en compte les caractéristiques de la ferme. Quatre projets mettent en place des leviers unitaires, le dernier projet combine plusieurs leviers :

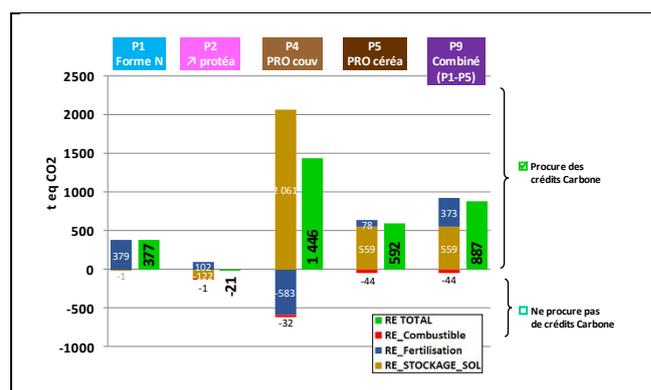
- **Projet 1** : utilisation d'une forme d'azote minéral moins émettrice : remplacement de la solution azotée 39 par du Nexen avec ajustement de la dose d'azote (baisse de 15 %). Cela concerne 86 % de la surface de l'exploitation.
- **Projet 2** : augmentation de la surface d'une culture faiblement consommatrice d'azote. L'exploitation comprenant déjà 11.5 % de légumineuses, seuls 4 % de pois ont été ajoutés en remplacement de colza et d'orge d'hiver.
- **Projet 4** : augmentation de la production de biomasse par la fertilisation des couverts par des PRO. Les couverts couvrant une surface importante, c'est la biomasse produite qui est ciblée. L'apport de fientes de poules entre 2.8 et 3.8 t/ha permet d'augmenter le rendement des couverts de moutarde de 2 tMS par ha. Cela concerne 35 % de la surface de l'exploitation.
- **Projet 5** : remplacement d'une partie de la fertilisation minérale par de la fertilisation organique sur les céréales. Le premier apport de solution azotée 39 est remplacé par l'apport du PRO (fientes de poules entre 2.5 et 3.8 t/ha). Cela concerne 50 % de la surface de l'exploitation.

- **Projet 9** : ce projet combine le projet 1 sur les formes d'azote minéral et le projet 4 sur le remplacement du premier apport de solution azotée 39 par l'apport du PRO (fientes de poules). Cela concerne 86 % de la surface de l'exploitation.

2.4. Les résultats en termes de réduction d'émissions

Aucun projet ne dégrade significativement la situation par rapport à la référence et quatre projets sur cinq améliorent le bilan carbone de la ferme type (Figure 1). C'est le projet 4 avec la fertilisation des couverts qui permet la réduction d'émissions TeqCO₂ la plus importante, 1446 TeqCO₂ sur l'exploitation sur les 5 années du projet, soit 1.2 TeqCO₂ émises en moins par ha et par an. Par ordre d'intérêt, on peut citer ensuite le projet 9 combiné, avec 887 TeqCO₂, puis le projet 5 fertilisation des céréales par des PRO avec 592 TeqCO₂, le projet 1 avec l'évolution des formes d'azote minérale avec 377 TeqCO₂. Le projet 2, avec la légère augmentation de la surface en pois protéagineux, est lui presque neutre avec une légère augmentation des émissions de 21 TeqCO₂ sur les 5 ans. La faible proportion de surface impactée par ce projet et la baisse de biomasse expliquent ces résultats.

Figure 1 – Réduction d'Émissions des GES AVANT Rabais de la Ferme type *Champagne crayeuse* des projets par rapport à la référence (en TeqCO₂ pour l'exploitation sur 5 ans) *Source : Arvalis – Calculs avec Outil CHN-AMG et l'outil Carbon Extract*



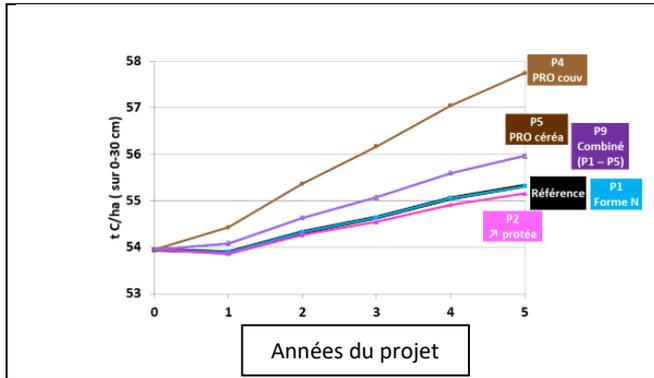
Reprenons les deux composantes de ce bilan.

2.4.1. Le stockage du carbone

Pour rappel, les calculs sont effectués avec l'outil CHN-AMG, modèle AMG-V2 (Clivot et al., 2019).

Comme le montrait le bilan carbone initial, la ferme type *Champagne crayeuse* stocke du carbone. Le projet 1 sur les formes d'azote minéral n'impacte pas le stockage. Tous les autres projets, sauf le projet introduisant des protéagineux, stockent plus de carbone que la référence comme le montre l'évolution des tonnes de carbone sur 0-30 cm sur les cinq années du projet (Figure 2). Ce stockage se traduit par une réduction d'émission pour l'exploitation sur 5 ans allant de 559 à 2061 TeqCO₂.

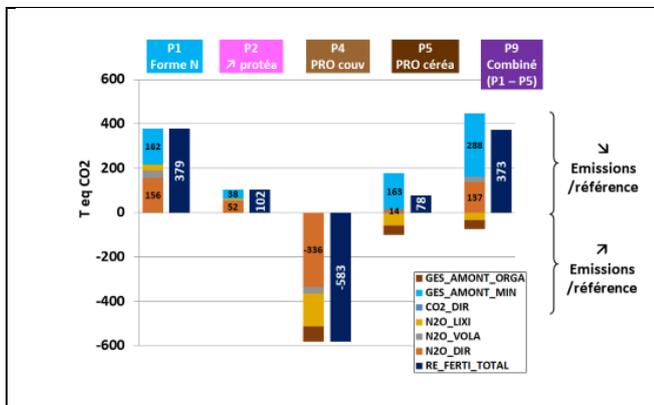
Figure 2 – Stockage carbone de la ferme type *Champagne crayeuse* et des projets associés (en t C/ha sur 0-30 cm)
 Source : Outil CHN -AMG



2.4.2. Les émissions

Les émissions sont principalement liées à la fertilisation (Figure 3). Quatre projets sur cinq réduisent les émissions de GES liées à la fertilisation de 78 à 379 TeqCO₂ sur la période et pour toute l’exploitation. Pour les projets 1 (formes d’azote minéral) et 2 (augmentation des surfaces de pois), les émissions sont réduites sur tous les postes, émissions N₂O comme émissions GES Amont des engrais minéraux. Ces résultats sont dus à des choix de produits moins émetteurs, et des doses d’azote total apporté réduites. Les projets qui intègrent un fertilisant organique (fientes de poules) voient l’apparition d’émissions GES Amont pour le fertilisant organique. Les émissions de N₂O directes et indirectes augmentent également si la quantité d’azote total apporté sur l’exploitation ainsi que les restitutions de résidus de cultures sont augmentés. C’est surtout le cas dans le projet 4. Si les projets 5 (PRO en remplacement de la solution azotée au premier apport céréales) et 9 (combinaison projets 1 et 5) compensent en partie cette augmentation d’émission par une réduction d’émission sur les GES Amont des engrais minéraux, le projet 4 qui ajoute la fertilisation organique à la fertilisation minérale subit une forte augmentation des émissions de N₂O.

Figure 3 – Ecart d’Emissions des GES de la ferme type *Champagne crayeuse* des projets par rapport à la référence (en TeqCO₂ pour l’exploitation sur 5 ans) Source : Arvalis – Calcul avec l’outil Carbon Extract



Les émissions dues aux combustibles, ici le carburant, engendrent peu d’écart entre les projets (Figure 1). Seuls les projets 4, 5 et 9 génèrent des émissions supplémentaires entre 32 et 44 TeqCO₂ sur la période et pour toute l’exploitation, car le nombre de passages sur les parcelles est augmenté par

l’épandage des PRO.

2.4.3. Les crédits carbone et cout d’équilibre avant Rabais générés

- Des crédits carbone avant rabais, c’est-à-dire les réductions d’émissions de tonnes équivalent CO₂, sont générés dans quatre projets sur cinq. Le tableau 7 reprend le nombre de crédits avant rabais à l’exploitation sur la période de 5 ans et par année de projet, ainsi qu’à l’hectare. Les crédits générés avant rabais par hectare et par an varient de 0.31 à 1.2. Le projet 2 est proche de zéro (- 0.02).
- Pour les quatre projets qui génèrent des crédits carbone, trois voient leur marge nette diminuer par rapport à la référence entre -10 et -77 €/ha dans le contexte économique défini. Le dernier projet, le projet 1, est neutre en termes de marge.
- Le cout d’équilibre du crédit carbone avant rabais varie, pour les projets générant des crédits et dont la marge est inférieure à la référence, entre 43 et 67 €/crédit carbone. La méthode de calcul utilisée signifie que si le marché du crédit carbone rémunère le crédit au cout d’équilibre hors rabais et hors cout d’intermédiation, cela compensera uniquement la baisse de marge avant rabais. Il n’y aura aucune rémunération du service rendu. Pour le projet 1, sa marge étant neutre, le cout d’équilibre tel que proposé par la méthode de calcul utilisée serait de zéro hors rabais et cout d’intermédiation.

Pour rappel, ces crédits sont calculés sans prendre en compte les rabais. En considérant qu’il n’y a pas de financement annexe des leviers, et en prenant en compte le mode de recueil de données employé, l’ordre de grandeur des rabais pour cette ferme type serait de 0 à 5% en cas de renouvellement des projets ou de 0 à 19% en cas de non-renouvellement des projets mais maintien des leviers. Cela augmente donc le cout d’équilibre d’autant.

Tableau 7 – Crédits carbone et cout d'équilibre avant Rabais (en TeqCO₂) -Ferme type Champagne crayeuse-Source : Arvalis – calculs CHN-AMG et Carbon Extract

Projets	Nombre Crédit carbone Avant Rabais			Ecart de marge nette (€)		Cout d'équilibre du Crédit carbone AVANT Rabais
	A l'exploitation sur 5 ans	A l'exploitation par an	A l'hectare par an	A l'exploitation par an	A l'hectare par an	(€/CC)
Projet 1 : ↘ de la volatilisation de l'azote par utilisation de formes moins émettrices	377	75	0.31	139	0.5	sans objet
Projet 2 : ↗ de la surface de pois	-21	-4	-0.02	-2 478	-10	pas de crédit
Projet 4 : Fertilisation des couverts avec des PRO (fientes de poules)	1 446	289	1.20	-18 700	-77	65
Projet 5 : Fertilisation des céréales avec des PRO (fientes de poules)	592	118	0.49	-7 983	-33	67
Projet 9 : Combiné	887	177	0.73	-7 693	-32	43

2.4.4. Les co-bénéfices

Deux co-bénéfices ont pu être évalués, le temps de traction, les IFT (Tableau 8).

Les IFT sont très peu impactés par les projets. Le projet 2 (augmentation de la surface en pois), permet de réduire l'IFT de 1 %. Les temps de traction par ha augmentent de 15 à 21 % pour les projets intégrant de l'épandage de PRO : cela représente 0.5 à 0.8 heures par ha supplémentaire.

Tableau 8– Co-bénéfices -Ferme type Champagne crayeuse- Ecart par rapport à la référence. Source : Arvalis – calculs SYSTERRE®

Projets	Temps de traction par ha (h)	IFT par hectare
Projet 1 : ↘ de la volatilisation de l'azote par utilisation de formes moins émettrices	=	=
Projet 2 : ↗ de la surface de pois	+0.2%	-0.9%
Projet 4 : Fertilisation des couverts avec des PRO (fientes de poules)	+15%	+0.3%
Projet 5 : Fertilisation des céréales avec des PRO (fientes de poules)	+15%	+0.3%
Projet 9 : Combiné	+20%	+0.3%

3. RESULTATS DES 9 FERMES TYPE

3.1. Présentation des fermes type

L'objectif de l'étude est d'étudier la mise en œuvre du LBC-GC sur trois types de systèmes de production dans des régions différentes. Les fermes type se distinguent par leur surface, leur type de sol, la composition de leur assolement et le recours ou non à l'irrigation. Elles sont décrites dans le tableau 9.

L'analyse par rapport aux enjeux carbone montre déjà des différences sur des propriétés inerrantes aux fermes (sol, climat) et sur les leviers potentiellement mobilisables :

- Les types de sol allant du limon profond en *Limons Nord* aux graviers pour la *Plaine de Lyon*.
- Le recours ou non à l'irrigation et le type d'énergie utilisée. Dans les fermes avec irrigation, c'est l'énergie électrique qui est utilisée.
- La présence ou non de cultures à faible besoin en azote : 7 fermes sur 9 ont déjà des légumineuses. Cependant la proportion reste faible.
- Le travail du sol : deux fermes seulement ont recours au labour sur 100 % de leur surface. Les autres conservent le labour sur 15 à 50 % de la surface, sauf la ferme *Plateau de Bourgogne*, qui ne laboure pas.
- Les cultures intermédiaires : dans le respect de la réglementation et selon l'assolement, les surfaces en cultures intermédiaires varient entre 0 et 43%.
- Les formes d'azote : aucune ferme n'utilise de l'azote organique. Toutes utilisent au moins deux formes d'azote, de la solution azotée 39 ou de l'urée 46 et de l'ammonitrate 33.5.

Tableau 9 : Caractéristique des fermes type – Source Fermothèque Arvalis

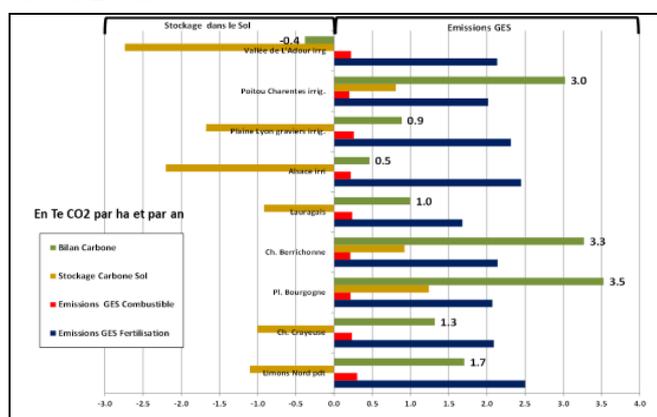
Références ferme type	Limons Nord (Lim N)	Champagne Crayeuse (Ch C)	Plateau Bourgogne (PI B)	Champagne Berrichonne (Ch B)	Lauragais (Lg)	Alsace dominante maïs irriguée (Alsi)	Vallée de l'Adour Irriguée (Vai)	Poitou Charentes irriguée (PCi)	Plaine Lyon graviers irriguée (PILGi)
SAU (ha)	228	242	210	320	177	105	100	105	160
Type de sol	limons	craie	argilo-calcaire	argilo-calcaire	terrefort moyen	sol superficiel de Hardt	alluvions + chalosse	groies superficielles et profondes	graviers profonds
% surface irriguée	-	-	-	-	-	100%	66%	30%	70%
% légumineuse (yc Soja)	-	11.5 %	-	4.7%	4.5 %	5%	6%	4%	2.5%
% labour	40%	48%	-	15%	44%	100%	54%	52%	100%
% cultures intermédiaires	43%	40%	24%	10%	0%	20%	20%	6%	19%
N moyen (kgN/ha)	170	150	162.5	161	133	195	180	156	177
N minéral moyen (kgN/ha)	170	150	162.5	161	133	195	180	156	177
N organique moyen (Ntot/ha)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forme N minéral	Solution N39 Ammonitrate 33.5	Solution N39 Ammonitrate 33.5	Solution N39 Ammonitrate 33.5 Sulfate d'amminium	Solution N39 Ammonitrate 33.5 Urée	Urée Ammonitrate 33.5	Urée Ammonitrate 33.5	Urée Ammonitrate 33.5	Urée Ammonitrate 33.5	Urée Ammonitrate 33.5

3.2. Bilan carbone de la référence

Huit fermes sur les neuf étudiées ont un bilan carbone annuel de la référence émetteur de CO₂ (Figure 4) : elles émettent entre 0.5 et 3.5 TeqCO₂ par hectare et par an. La ferme type *Vallée de l'Adour* est la seule ferme avec un bilan carbone positif : 0.4 TeqCO₂ par hectare et par an, elle compense ses émissions par du stockage de carbone dans les sols, et va même au-delà.

Toutes les fermes ont des émissions dues aux itinéraires techniques entre 1.7 et 2.5 TeqCO₂ par hectare et par an liées à la fertilisation et 0.2 à 0.3 TeqCO₂ liées aux combustibles. Par contre, six fermes type, *Limons nord avec pomme de terre*, *Champagne crayeuse*, *Plaine de Lyon gravières*, *Alsace* et *Vallée de l'Adour*, *Lauragais*, stockent du carbone dans leur sol, entre 0.9 et 2.7 TeqCO₂ par hectare et par an. Les trois autres déstockent entre 0.8 et 1.2 TeqCO₂ par hectare et par an.

Figure 4 – Bilan Carbone des fermes type (en TeqCO₂ par hectare et par an) *Source : Arvalis –Calculs CHN-AMG et Carbon Extract*



3.3. Choix des projets

Ce sont 50 projets qui ont été évalués sur les neuf fermes type. Les caractéristiques des fermes type par rapport au carbone ont orienté le choix des leviers en 12 types de projet. Les projets numérotés de 1 à 5 sont la mise en place de leviers unitaires. Les projets suivants sont des combinaisons de leviers (Tableau 11) :

- Projet 1 - les formes d'azote dans les 9 fermes type : remplacement de la solution azotée 39 et de l'urée par de l'ammonitrate et du Nexen. Un ajustement de dose a été réalisé lorsque pertinent.
- Projet 2 - l'introduction ou l'augmentation de la surface en légumineuses ou cultures à faible besoin en azote dans les 9 fermes type avec des surfaces qui peuvent varier de 3 à 32 % de la SAU: en *Limons nord*, de pois pour l'alimentation animale ou du lin fibre sont introduits ; en *Plateau de Bourgogne*, du pois pour l'alimentation animale, de la luzerne et du tournesol (30 % de la surface) ; en *Poitou Charentes irriguée*, *Plaine de Lyon gravières irriguée*, du soja sur 6 à 12 % ; dans les autres fermes, c'est une augmentation de la surface en pois pour l'alimentation animale (*Ch. Crayeuse*, *Poitou Charentes*, *Ch. Berrichonne* et *Lauragais*) ou en soja (*Alsace dominante maïs irriguée* ou *Vallée de l'Adour*) qui est proposée.
- Projet 3 - augmentation des surfaces en couvert dans 7 fermes type : en fonction de l'assolement, soit la

mise en place de couverts (*Alsace*, *Vallée de l'Adour*, *Lauragais*), soit l'augmentation de la surface des couverts sur des inter-cultures courtes et augmentation de la durée des couverts sur les inter-cultures longues (*Limons nord*, *Ch. Berrichonne*), ou l'augmentation des couverts avant certaines cultures de printemps (*Alsace*, *Vallée de l'Adour*, *Plaine de Lyon gravières irriguée*) voire changement du type de couvert avec augmentation de rendement (*Plaine de Lyon gravières irriguée*).

- Projet 4 - fertilisation avec PRO des couverts existants pour augmenter la biomasse produite sur 2 fermes type : les PRO peuvent être différents selon les fermes selon les offres possibles. Pour la *Champagne crayeuse*, apport de fientes de poules ; en *Alsace*, apport de lisier de porc.
- Projet 5 - fertilisation avec PRO en remplacement du premier apport sur céréales à paille d'hiver ou sur maïs ou réduction de l'apport de colza sortie hiver sur 5 fermes type : apport sur céréales à paille de 3 PRO différents, fumier de poulet de chair, fientes de poules, digestat en *Limons Nord* ; apport de fientes de poules sur céréales en *Champagne crayeuse* ; en *Plateau de Bourgogne*, apport de compost ou de fientes de poules ; en *Champagne Berrichonne*, apport de fientes séchées de poules pondeuses ou de boues urbaines compostées ; apport de lisier de porc sur maïs en *Alsace*.
- Projet 7- introduction de CIVE et utilisation du digestat pour fertilisation de la CIVE sur 4 fermes type : introduction d'une CIVE d'hiver seigle avant maïs sur 30 % de la surface d'exploitation pour *Vallée de l'Adour* ; modification de l'assolement en *Plateau de Bourgogne* sur 17 % de la surface avec remplacement du colza par du tournesol pour introduire une CIVE d'hiver seigle ; introduction d'une CIVE d'hiver seigle avant tournesol sur 7 % de la surface d'exploitation en *Champagne Berrichonne* ; introduction d'une CIVE d'hiver triticale avant sorgho et soja sur 9 % de la surface d'exploitation en *Lauragais*.
- Projet 8 - Combiné : formes d'azote minérale, introduction d'une CIVE d'hiver seigle avant pomme de terre sur 39 % de la surface d'exploitation dans la ferme *Limons nord*. La CIVE est fertilisée par le digestat. La pomme de terre est également fertilisée en pré-semis par le digestat en remplacement de la solution azotée. La solution azotée est également remplacée par de l'ammonitrate comme dans le projet 1.
- Projets 9, 10 – Combiné : combinaisons des projets unitaires de 1 à 5 sur 3 fermes type : le projet 9 sur la ferme *Champagne crayeuse* combine les projets 1 et 5 ; le projet 10 combine les projets 1, 2 et 5 sur la ferme *Plateau de Bourgogne* et sur la ferme *Limons nord*.
- Projet 11 – Combiné : combinaisons des projets unitaires de 1 à 3 intégrant un allègement du travail du sol sur 2 fermes type : pour rappel dans le projet 3, *Champagne Berrichonne* combine en plus l'association colza/féverole ; le *Lauragais* combine également le projet 7, CIVE avec digestat.
- Projet 12 - Combiné – Combinaison des projets sur *Limons nord* qui combine les projets 1, 3 et 5 et une association colza/féverole ainsi qu'une limitation du travail du sol en pomme de terre (buttage).

3.4. Les résultats en termes de réductions d'émissions

3.4.1. 44 projets génèrent des crédits carbone

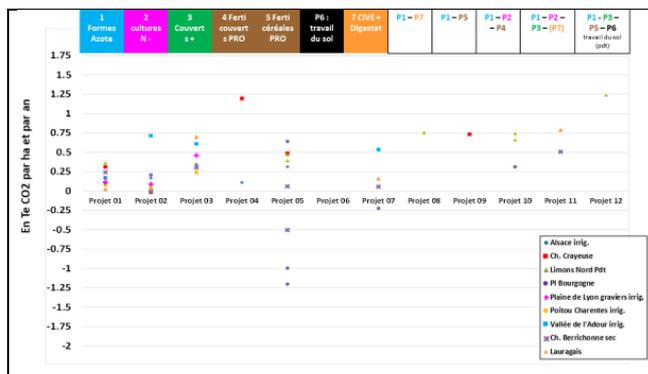
44 projets sur 50 génèrent des réductions d'émissions avant rabais (RE TOTAL) (Figure 5). Ils dégagent donc des crédits carbone avant rabais entre 0.01 et 1.24 crédits par hectare et par an :

- 9 projets génèrent entre 0.01 et 0.1 crédit carbone avant rabais par ha et par an,
- 22 projets génèrent entre 0.1 et 0.5 crédit carbone avant rabais par ha et par an,
- 11 projets génèrent entre 0.5 et 1 crédit carbone avant rabais par ha et par an,
- 2 projets génèrent plus de 1 crédit carbone avant rabais par ha et par an

6 projets génèrent plus d'émissions que la référence.

Figure 5 – Crédits carbone avant rabais générés par les 50 projets des 9 fermes type (en TeqCO₂ par hectare et par an)

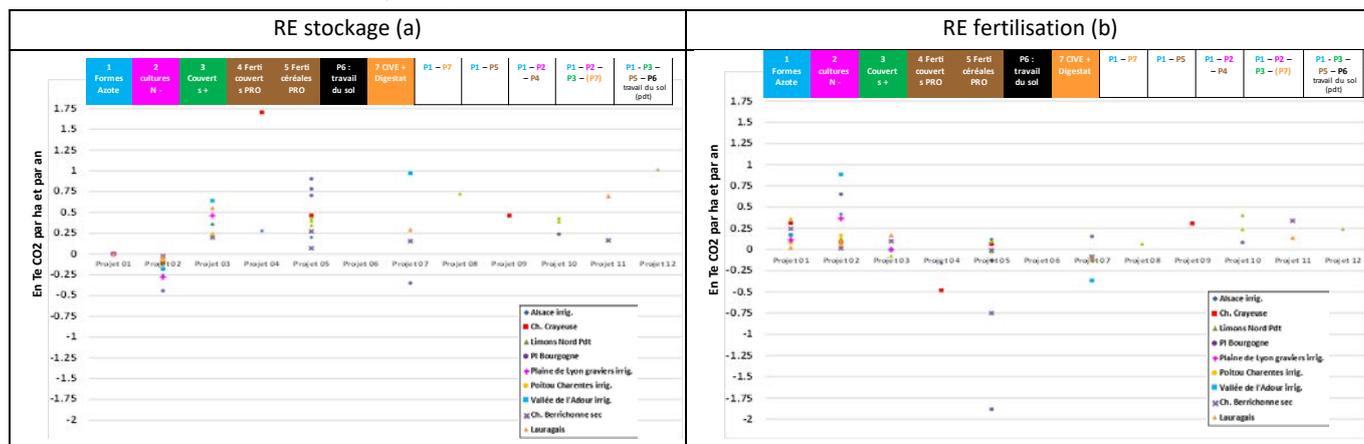
Source : Arvalis –Calculs CHN-AMG et Carbon Extract



Parmi les 44 projets générant des crédits carbone avant rabais (Figure 5):

- 26 permettent une augmentation du stockage de carbone dans le sol, 9 sont neutres (écart compris entre -0.01 et + 0.01 TeqCO₂) et 9 déstockent par rapport à la référence. (Figure 6a)
- 32 permettent une réduction des émissions liées à la fertilisation, 5 sont neutres (écart compris entre -0.01 et + 0.01 TeqCO₂) et 8 émettent plus que la référence. (Figure 6b)
- 26 projets sont neutres par rapport aux émissions de combustibles, 19 émettent plus que la référence, entre 0.01 et 0.07 TeqCO₂ supplémentaires par hectare et par an.

Figure 6– RE stockage (a) et RE fertilisation (b) avant rabais générés par les 50 projets des 9 fermes type (en TeqCO₂ par hectare et par an) Source : Arvalis –Calculs CHN-AMG et CarbonExtract



3.4.2. Des leviers plus ou moins efficaces

Deux résultats sont à retenir : (i) le potentiel de crédits carbone diffère selon les leviers ; (ii) pour un même levier, le potentiel de crédits carbone diffère selon les fermes type (Tableau 12).

Les deux leviers unitaires P1 (évolution de la forme d'azote minérale), et P3 (augmentation de biomasse par les couverts via la surface ou l'allongement de la période avec effet sur le rendement) ont un effet positif allant de 0.02 (Lauragais) à 0.36 (Limons nord) TeqCO₂ avant rabais par ha et par an pour P1 et de 0.24 (Poitou Charentes irriguée) à 0.70 (Lauragais) TeqCO₂ avant rabais par ha et par an pour P3. Dans les projets P1, le nombre de crédits dépend de la forme initiale d'azote apportée ainsi que de la quantité. Pour le projet P3, ce sont la surface concernée par l'implantation de nouveaux couverts, la biomasse produite et le potentiel de stockage des sols qui comptent.

L'intérêt de l'introduction ou de l'augmentation de la surface de cultures à plus faible besoin en azote (P2), que ce soit du pois,

de la luzerne, du soja, du tournesol ou encore du lin, va dépendre de la surface concernée, mais surtout de la culture remplacée. La perte de biomasse restituée liée au remplacement d'une culture comme le colza ou le maïs grain entraîne une réduction du stockage de carbone dans le sol et contrebalance en partie les réductions d'émissions permises par la baisse de la fertilisation azotée. Dans les 10 projets étudiés, le stockage de carbone diminue entre 0.02 (Ch. Berrichonne) et 0.44 (Pl. Bourgogne) TeqCO₂ avant rabais par ha et par an. Les crédits carbone sont positifs dans 9 fermes sur 10 et vont de -0.02 (Ch. Crayeuse) à 0.71 TeqCO₂ (Vallée de l'Adour) par ha et par an.

Le levier utilisation de PRO (P4, P5), soit pour remplacer de l'azote minéral sur les cultures, soit pour augmenter le rendement des couverts par un apport d'azote organique génère ou non des crédits carbone dans un intervalle allant de -1.2 (Pl Bourgogne) à +1.2 (Ch. Crayeuse) TeqCO₂ par ha et par an. La nature du PRO utilisé explique en partie cet écart important. En effet, les PRO diffèrent par leur niveau d'émission

de GES amont (pour la fabrication). Le facteur d'émission amont (Agribalyse3.0, Koch et al., 2020) varie de 0.63 TeqCO₂ par tonne de compost végétal à 0.02 à 0.03 TeqCO₂ par tonne de fumier de volailles ou de fientes de volailles ou encore du digestat. Deux projets étudiés sur la ferme *Plateau de Bourgogne* illustre cette problématique. Seuls les PRO utilisés diffèrent : le projet fertilisant les couverts avec un PRO à base de compost de déchets verts entraîne une augmentation des émissions Fertilisation de 1.88 TeqCO₂ par hectare et par an. Le projet utilisant le PRO Fientes de volailles génère aussi une augmentation des émissions Fertilisation, mais de 0.13 TeqCO₂ par hectare et par an. Là encore, on observe deux effets antagonistes : dans tous les cas, on observe une augmentation des émissions liées à la Fertilisation et une réduction liée au stockage du C dans le sol.

L'introduction de CIVE (P7) a un effet contrasté sur le bilan carbone des quatre fermes type étudiées : pas de crédits carbone pour la ferme type *Plateau de Bourgogne* (-0.22 TeqCO₂/ha/an), entre 0.06 et 0.16 TeqCO₂/ha/an pour les fermes type *Ch. Berrichonne* et *Lauragais*, et enfin un nombre de crédits plus élevé pour la ferme *Vallée de l'Adour* (+ 0.54 TeqCO₂/ha/an). L'intérêt par rapport au carbone va dépendre de la CIVE et de son impact soit sur l'assolement, s'il doit être modifié, soit sur la culture suivante (baisse de rendement par exemple si l'implantation est retardée). Dans le cas de *Plateau de Bourgogne*, la rotation est modifiée et un couple CIVE d'hiver seigle – tournesol est introduit à la place du colza. Dans ce cas, la biomasse totale restituée est réduite et le stockage de carbone dans le sol diminue plus que la réduction des émissions fertilisation. Le potentiel de rendement de la CIVE aura également un impact sur la génération de crédits carbone : les fermes à plus petit potentiel dégageront moins de crédit à surface équivalente.

3.4.3. Une additivité des leviers intéressante

Tableau 10 – Evolution du bilan carbone des 9 fermes type en fonction des projets *Source : Arvalis –Calculs CHN-AMG et Carbon Extract*

	Bilan Carbone initial	Nombre de crédits carbone par ha et par an pour les projets P1 à P7 (en TeqCO ₂ par ha et par an)						Evolution du bilan carbone en fonction des leviers (en % du bilan carbone initial)					
		P1	P2	P3	P4	P5	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P7
Limons Nord pdt	1.70	0.36	0.01 à 0.26	0.26		0.39 à 0.47		21%	0 à 5 %	15%		23 à 28 %	
Ch. Crayeuse	1.32	0.31	-0.02		1.20	0.49		24%	-1%		91%	37%	
Pl. Bourgogne	3.53	0.10	0.21			-1.2 à 0.64	-0.22	3%	6%			-34 à +18%	-6%
Ch. Berrichonne	3.30	0.24	-0.01	0.30		-0.5 à 0.06	0.06	7%	-0.3%	9%		-15 à +2%	2%
Lauragais	1.00	0.02	0.05	0.70			0.16	2%	5%	70%			16%
Alsace irri	0.46	0.18	0.17	0.34	0.11	0.31		38%	36%	75%	24%	68%	
Plaine Lyon graviers irrig.	0.90	0.12	0.09	0.46				13%	10%	51%			
Poitou Charentes irrig.	3.02	0.08	0.01 à 0.09	0.24				3%	0 à 3 %	8%			
Vallée de L'Adour irrg	-0.38	0.17	0.71	0.61			0.54	44%	187%	160%			141%

3.5. Ces projets ont un cout

Sur les 44 projets qui génèrent des crédits carbone avant rabais, 29 perdent de la marge (entre -6 €/ha et - 106 €/ha/an) , 10 ont une marge stable (entre - 5 €/ha et + 5 €/ha), 5 ont une marge supérieure à la référence (de + 6 à +118 €/ha/an). (Figure 7 - Tableau 12)

Quand cela a été possible, l'additivité des projets a été calculée. Elle est la comparaison des RE entre un projet combiné et la somme des RE des projets unitaires correspondants. Les quelques projets combinant plusieurs leviers unitaires montrent une bonne additivité des leviers pour générer des crédits carbone. Elle est par exemple de 80 % pour la ferme type *Limons nord avec pomme de terre* dont le projet 10 reprend les projets P1, P2, P5. On peut citer également le projet 9 (P1, P5) de la *Champagne crayeuse* avec une additivité de 90 %, le projet 11 (P1, P2, P3) de *Champagne Berrichonne* avec une additivité de 95 % ou le projet 11 du *Lauragais* (P1, P2, P3, P7) avec une additivité de 85 %.

Rappelons que la facilité de mise en œuvre des leviers n'est pas identique en termes d'apprentissage technique (nouvelle culture, couverts, utilisation des PRO), d'organisation du travail et matériel nécessaire (formes d'azote, PRO...), de mise en place de filière (CIVE – culture à faible besoin en azote...) ou encore de risque lié au climat (couvert – CIVE).

3.4.4. Un bilan carbone initial amélioré partiellement

Le bilan carbone initial des fermes montre que 8 sur 9 d'entre elles émettent (Figure 4). Les 44 projets qui génèrent des crédits carbone permettent d'améliorer partiellement le bilan carbone initial.

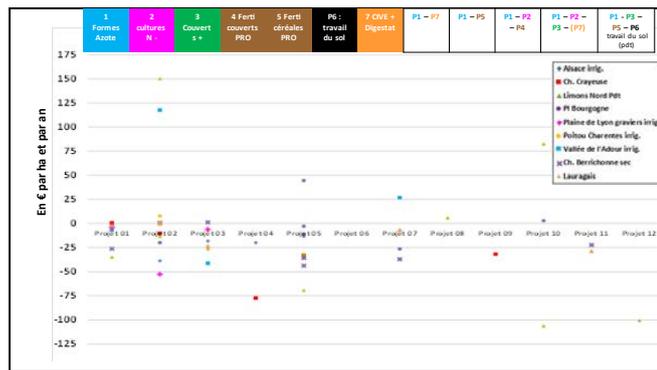
Pour les fermes avec un bilan initial émetteur, aucun des projets unitaires ou combinés ne permet de compenser les émissions à 100 %. (Tableau 10).

Le projet P1 améliore le bilan de 2 à 38 % selon les fermes. Le projet P2 de 0.03 à 10 %. Le projet P3 de 8 à 75 %. Les projets P4 et P5, de 2 à 91 %. Le projet P7 de 2 à 16 %.

Dans le cas de la ferme type *Vallée de l'Adour*, tous les projets améliorent encore le bilan déjà positif, entre 44 et 187 %.

Sur les 5 projets qui dégradent le bilan carbone, 1 projet a une marge supérieure et quatre dégradent la marge (entre -10 €/ha et - 44 €/ha/an). Enfin, 1 projet est neutre en carbone et en marge.

Figure 7– Ecart de marge par rapport à la référence des 50 projets des 9 fermes type (en € par hectare et par an) *Source : Arvalis –Calculs CHN-AMG – Carbon Extract -SYSTERRE®*



Les écarts de marge ont plusieurs sources : baisse ou augmentation du produit (si évolution d'assolement), voire des aides (introduction de légumineuses), mais également des différences de charges, principalement intrants, puis mécanisation.

Il est difficile d'associer une perte de marge à un levier particulier. Pour les 44 projets générant des crédits carbone, pour un même levier, selon les fermes, l'écart de marge du projet à la référence peut varier fortement entre les fermes, de 36 €/ha/an pour le projet P1 jusqu'à 171 €/ha/an pour le projet P2 avec introduction de cultures à faible besoin en azote. Cela s'explique notamment par des cultures introduites et des cultures remplacées différentes.

Il est possible qu'une évolution du contexte économique, c'est-à-dire, prix des cultures et prix des intrants, impacte ces écarts.

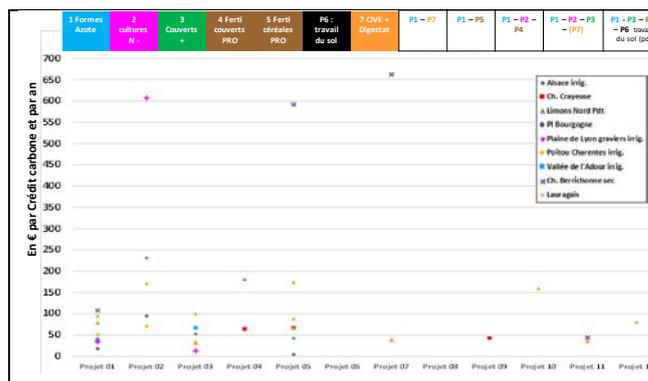
3.6. Un cout d'équilibre des crédits carbone très variable

Sur les 44 projets qui génèrent des crédits carbone avant rabais, 29 perdent de la marge (entre -6 €/ha et -106 €/ha/an). Leur cout d'équilibre du crédit carbone avant rabais varie fortement entre 4 et 662 €/TeqCO₂ (Figure 8). Pour les 10 projets dont l'écart de marge à la référence a été considéré comme neutre, le cout d'équilibre avant rabais d'un crédit carbone s'établirait entre 4 et 79 €/TeqCO₂/an.

Sur les 39 projets, 8 % ont un cout d'équilibre avant rabais inférieur à 25 €, 26 % entre 25 et 50 €, 31% entre 50 et 100 € et 26 % supérieurs à 100 € ; 9 % ont une marge neutre, mais positive (entre 0 et 5 €/ha), pour lesquelles le cout d'équilibre n'est pas calculé. Ces couts d'équilibre sont pour la plupart supérieurs au prix de marché actuel. Rappelons que ce cout d'équilibre ne prend pas en compte les rabais ni les couts annexes (mise en place du projet, intermédiaires). L'ordre de grandeur des rabais de cette étude serait de 0 à 9% en cas de renouvellement de projet ou de 0 à 34% en cas de non renouvellement du projet mais maintien des leviers.

Pour un même levier, le cout d'équilibre varie du simple au triple, voire peut être multiplié par dix, entre les fermes. Par exemple, pour le projet 2 qui introduit des cultures à plus faible besoin en azote, il évolue entre 95 et 231 €/TeqCO₂ pour quatre fermes. Le cout d'équilibre de la cinquième est de 607 €/TeqCO₂.

Figure 8– Cout d'équilibre des crédits carbone avant rabais générés par les 44 projets des 9 fermes type (en € par TeqCO₂ non émises par hectare et par an) *Source : Arvalis –Calculs CHN-AMG – Carbon Extract -SYSTERRE®*



3.7. Les co-bénéfices

Les co-bénéfices évalués sont l'évolution de l'IFT par hectare et du temps de traction par hectare (Tableau 12).

Peu de projets étudiés ont un impact sur l'IFT moyen de la ferme. Seuls les projets modifiant l'assolement voient leur IFT modifié : le projet 2 avec l'introduction de cultures à plus faible besoin en azote, le projet 7 avec l'introduction de CIVE et les projets combinés enregistrent la plus forte variation des IFT entre -26 % et + 5 %. C'est en *Plateau de Bourgogne* que la réduction est la plus forte, 26 %, avec le projet 2 qui met en place l'introduction de pois, luzerne et tournesol à la place de colza sur 30 % de la surface. La ferme type *Poitou Charentes* enregistre une hausse de 5 % sur le projet 2. L'introduction de CIVE (projet 7 et 8) implique une augmentation de l'IFT de 1 à 7 % pour 3 fermes type (*Limons nord, Champagne crayeuse, et Champagne Berrichonne*) et une baisse de 21 % pour la quatrième (*Plateau de Bourgogne*).

Le temps de traction par ha varie de - 3 à + 21 % dans 44 projets qui génèrent des crédits carbone. Les projets P1 et P2 font peu évoluer le temps de traction, moins de 3 % pour toutes les fermes concernées sauf une. Le projet P3 est neutre pour 3 fermes et génère une augmentation du temps de traction par ha de 10 à 13 % pour 3 fermes. Les projets 4 à 7 génèrent dans tous les cas une augmentation de temps de traction avec les couverts supplémentaires, les apports de PRO ou l'introduction de CIVE et l'épandage de digestats.

4. DISCUSSION

4.1. Les fermes type

Les fermes type étudiées représentent des exploitations performantes en termes de performance économique et en termes de pratiques techniques. L'application du LBC-GC a été réalisée avec une référence spécifique (historique de la ferme). Il pourra être intéressant de compléter l'étude avec des projets identiques, mais une référence générique. Travailler des fermes type représentant des exploitations avec des pratiques plus moyennes serait également pertinent, en intégrant dans les leviers une « optimisation » des pratiques.

Avec 9 fermes type, l'étude est encore loin de représenter l'ensemble des systèmes de grandes cultures français. Le travail continue avec d'autres fermes type :

- complétant les systèmes présents par des fermes type situées dans d'autres régions.

- de nouveaux systèmes comme des fermes mettant en œuvre l'agriculture dite de conservation ou en agriculture biologique.

4.2. Les projets étudiés

Les leviers étudiés ne sont pas exhaustifs, de même que les combinaisons de leviers. Le plan de simulation devra être complété pour les fermes existantes avec de nouveaux leviers unitaires, lorsqu'ils sont pertinents, par exemple le travail du sol, mais surtout avec plus de combinaisons de leviers comme cela a été réalisé sur certaines fermes : par exemple combiner les leviers 1 à 5, voire 7 dans toutes les fermes.

4.3. L'évaluation des projets

La prise en compte des rabais après la mise à jour de la méthode aura un impact sur les résultats, puisqu'on estime des rabais pouvant aller de 0 à 34 % pour les projets étudiés.

Une évaluation plus complète des co-bénéfices, au-delà de l'évolution de l'IFT et du temps de traction annuel par hectare sera nécessaire, car la méthode LBC-GC a demandé l'évaluation obligatoire de 4 à 6 co-bénéfices selon le système de production (type de sol, présence d'irrigation). L'érosion des sols dans certaines régions, la lixiviation de nitrate ou encore l'émission d'ammoniac devront être évalués.

Il sera également pertinent d'accompagner les résultats d'un test de robustesse par rapport aux hypothèses techniques proposées. Ces hypothèses se basent sur l'expertise et/ou des références expérimentales régionalisées. Malgré tout, le cas particulier de la ferme et l'aléa climatique peuvent faire évoluer ces résultats techniques. Il est donc intéressant d'encadrer ces références moyennes. Plusieurs exemples peuvent être cités : rendement des couverts, y compris les CIVE, rendement des nouvelles cultures...).

4.4. Les référentiels utilisés

Les référentiels utilisés pour effectuer les calculs sont ceux fournis par la méthode LBC-GC. Ils concernent en particulier les facteurs d'émission liés à la fertilisation (GES directs et indirects). Parmi ces référentiels, les facteurs d'émission amont de produits organiques, issu d'Agribalyse 3.0 (Koch et al., 2020), impactent fortement les résultats des projets intégrant de la fertilisation avec des PRO. Ces référentiels sont actuellement en discussion au sein d'un groupe d'experts du GIS REVALIM. Les experts étudient la méthode et le périmètre de calcul afin d'identifier des biais possibles, notamment sur l'allocation des émissions entre le produit initial transformé et le produit final utilisé pour la fertilisation dans le cas de PRO transformés. Selon les résultats de cette étude, les résultats des projets étudiés (en particulier P4, P5 et leurs combinatoires dans P7, P8, P9, P10 et P12) pourraient être modifiés significativement. Les RE Fertilisation serait impactées, et par conséquent les RE total et les coûts de crédits carbone.

4.5. L'évaluation des performances hors bilan carbone

4.5.1. Compléter les deux indicateurs clés

Cette évaluation s'est centrée sur deux indicateurs, la marge nette et le cout d'équilibre du crédit carbone. Trois compléments permettraient d'enrichir la robustesse des résultats :

- Evaluer la robustesse économique en testant d'autres contextes économiques de prix de marché des

cultures et des intrants (engrais et carburant principalement). L'étude s'appuie sur les prix moyens 2016/20 pour les cultures et 2018/20 pour les intrants engrais et carburants. Des contextes différents basés sur les rapports de prix entre les cultures et les engrais/carburants permettraient une évaluation de la robustesse des leviers.

- Compléter le cout d'équilibre avant rabais par un cout d'équilibre rabais déduit.
- Compléter le cout d'équilibre par une évaluation des couts des intermédiaires pour monter les projets.

Une mesure plus précise de l'impact sur l'organisation du travail et la faisabilité climatique des leviers compléterait l'évaluation. Deux exemples peuvent être cités : le passage de l'azote liquide à une forme solide, l'épandage des PRO ou le chantier récolte des CIVE d'hiver – semis de la culture de printemps qui suit.

4.5.2. Le cout du changement

Enfin la prise en compte d'un cout du changement serait pertinente : la prise de risque prise par l'agriculteur liée à l'apprentissage technique des leviers mis en œuvre, mais aussi peut-être au manque de références techniques de certains leviers.

5. CONCLUSION

La démarche proposée ici permet d'évaluer la faisabilité et la performance des leviers proposés par le LBC-GC.

Huit des fermes type grandes cultures sur les neuf étudiées ont un bilan carbone émetteur allant de 0.5 à 3.5 TeqCO₂ émis par ha et par an, la dernière a un bilan positif de 0.4 TeqCO₂ par ha et par an. Néanmoins déjà aujourd'hui, six fermes sur neuf stockent du carbone dans leur sol, entre 0.9 et 2.7 TeqCO₂ par ha et par an. Les 50 projets mis en place ont été choisis en fonction de la situation initiale de la ferme type. Ces projets comprennent 6 leviers et 5 combinaisons de leviers sont proposées : 44 projets génèrent des crédits carbone avant rabais allant de 0.01 à 1.24 TeqCO₂ par ha et par an. Pour les fermes avec un bilan initial émetteur, aucun des projets unitaires ou combinés ne permet de compenser les émissions à 100 % et ainsi d'atteindre la neutralité carbone. Pour les projets dégageant des crédits carbone, le cout d'équilibre avant rabais du crédit carbone varie entre 4 et 662 €/TeqCO₂. 57 % de ces projets ont un cout d'équilibre avant rabais supérieur à 50 €. Il est difficile de hiérarchiser les leviers entre eux, les résultats étant différents d'une ferme type à l'autre pour un même levier. Cela montre l'importance de multiplier les cas d'étude pour proposer des références sur les enjeux. Cependant on peut déjà noter (i) des effets antagonistes entre les RE fertilisation et RE stockage de certains leviers et l'importance de prendre en compte à la fois les émissions de GES et le stockage du carbone dans les sols pour évaluer le bilan carbone d'une exploitation; (ii) une additivité importante entre les leviers dans les premières combinaisons testées; (iii) la nécessaire prise en compte de la facilité de mise en place du levier notamment en termes d'organisation du travail.

Un certain nombre de pistes sont identifiées pour enrichir le travail présenté. Elles concernent (i) le nombre de fermes type étudiées; (ii) la nature des projets en intégrant des combinaisons de leviers; (iii) la comparaison références « spécifique » et « générique »; (iv) une mesure de la robustesse des projets proposés en fonction du contexte économique et de l'aléa climatique; (v) une réflexion sur le cout du changement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRIULO A., MARY B., GUÉRIF J., (1999). Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* 19, 365-377.
- ARVALIS institut du végétal (2010) : SYSTERRE® : Méthode de calcul d'indicateurs. Guide utilisateur.
- BOUTHIER A, DUPARQUE A, MARY B, SAGOT S, TROCHARD R, LEVERT M, HOUOT S, DAMAY N, DENOROY P, DINH J-L, BLIN B, GANTEIL F. 2014. Adaptation et mise en oeuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture élevage. *Innov. Agron.* 34:125–139
- CASAL L., BERRODIER M., JOUY L., WISSOCQ A., ROUILLON C., 2022. SYSTERRE® : un outil d'évaluation de la multi performance des systèmes de culture aux multiples usages ; Phloème 2022
- CLIVOT, H., MOUNY, J.-C., DUPARQUE, A., DINH, J.-L., DENOROY, P., HOUOT, S., VERTÈS, F., TROCHARD, R., BOUTHIER, A., SAGOT, S., MARY, B., (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environ. Model. Softw.* 118, 99–113. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004PHLOEME_ref_biblio
- Décret n°2018-1043 et arrêté du 28 novembre 2018, révisé par le décret n°2021-1865 du 29 décembre 2021 (consultation web [Legifrance \(legifrance.gouv.fr\)](https://www.legifrance.gouv.fr))
- KOCH P. and SALOU T., 2020. AGRIBALYSE®: Rapport Méthodologique- Volet Agriculture- Version 3.0 ; version initiale v1.0 ; 2014. Ed ADEME, Angers, France. 319 p.
- SOENEN B., HENAFF M., LAGRANGE H., LANCKRIET E., SCHNEIDER A., DUVAL R., STREIBIG J.-L.. 2021. Méthode Label Bas-Carbone Grandes Cultures (version 1.0). 133p. Ce document est disponible sur le site du MTE (<https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone>)
- LAIREZ J., FESCHET P. et al. (coord.): Agriculture et développement durable. Guide pour l'évaluation multicritère ; 2015. Educagri éditions/Editions QUAE.
- TAVARES, O. (2009) ; Les "Fermes de Boigneville (91)": Evaluation multicritères de quatre stratégies de production après 20 ans d'expérimentation.

LISTE DES ABRÉVIATIONS :

CIVE = Culture Intermédiaire à vocation énergétique

COP = Céréales et oléo-protéaginaires

GES : Gaz à effet de serre

IFT = Indice de fréquence des traitements phytosanitaires

LBC : Label Bas Carbone

LBC-GC: Label Bas Carbone Grandes Cultures

NDA = Non-démonstration de l'additionalité

PRO = Produits résiduels organiques

RE: Réductions d'émissions

SAU = Surface Agricole Utile

SdC: Systèmes de cultures

TeqCO₂ = Tonnes équivalent CO₂

Tableau 11 – Liste des projets mis en place par ferme type

Projet	Leviers choisis	Nbre FT	% SAU	Limons Nord	Champagne Crayeuse	Plateau Bourgogne	Champagne Berrichonne	Lauragais	Alsace dominante maïs irriguée	Vallée de l'Adour irriguée	Poitou Charentes irriguée	Plaine Lyon graviers irriguée
1	Formes d'azote	9	44 à 97 %	x	x	X	x	x	x	x	x	x
2	Protéagineux/cultures faible besoin N	9	3 à 32 %	xx	x	X	x	x	x	x	xx	x
3	Augmentation des couverts (surface – durée) Assoc. Colza/Féveroles (Ch B)	7	11 à 57 %	x			x	x	x	x	x	x
4	Fertilisation des couverts avec PRO	2	24 à 32 %		x				x			
5	Fertilisation des céréales (blé/maïs) ou du colza avec PRO	5	23 à 70 %	x x x	x	x x x (colza)	x x (colza)		x			
7	CIVE/ Digestat sur CIVE avec évolution assolement si nécessaire	4	7 % à 34 %			X	x	x		x		
8	Forme N + CIVE/Digestat sur culture (pomme de terre)	1	34 à 98 %	x								
9	Forme N (P1)+Fertilisation avec PRO des céréales (P5)	1	50 à 86 %		x							
10	Forme N (P1) + protéagineux (P2)+ Fertilisation avec PRO (P5)	2	90%	X		X (colza)						
11	Forme N (P1)+ Protéagineux (P2) + Couverts (P3) + CIVE/ Digestat (P7) + Assoc. Colza/Féveroles (Ch B)	2	49%				x	X				
12	Forme N (P1)+ Couverts + PRO sur céréales (digestat) (P5) + Assoc. Colza/Féveroles + travail du sol pdt	1	94 à 100%	x								

Lim N : Limons Nord avec pdt – Ch C : Champagne crayeuse – Pl B : Plateau Bourgogne – Ch B : Champagne Berrichonne – Lg : Lauragais- Als : Alsace dominante maïs irriguée-VAl : Vallée de l'Adour irriguée –PCI : Poitou charentes irriguée – PILGi : Plaine de Lyon graviers irriguée

Tableau 12– Résultats par type de levier étudié (sur les 50 projets des 9 fermes type)

Leviers	Numéro projet associé	Objectif (voir tableau 1)	Fermes type	% de surface concernée par le projet	Nombre de « RE total » avant rabais /ha /an (T eqCO2) (1)	Nombre de RE fertilisation /ha /an (T eqCO2)	Nombre de RE Stockage /ha /an (T eqCO2)	Nombre de RE Combustible /ha /an (T eqCO2)	Ecart de marge €/ha/an	Cout d'équilibre avant Rabais €/crédit carbone	Co bénéfiques Ecart IFT %/ha/an	Co bénéfiques Temps de traction h/ha/an
Formes d'azote	1 ; (8 ; 9 ; 10, à 12)	Fertilisation : amélioration efficacité des apports pour réduire dose totale d'azote, réduction volatilisation.	Toutes	44 à 97 %	+0.02 à +0.36	+0.1 à +0.36	-	-	-35 à +1	18 à 108	-	-
Insertion de protéagineux ou cultures à faible besoin en N	2 ; (10 à 12)	Fertilisation : réduire dose totale d'azote	Toutes	3 à 32 %	-0.02 à +0.71	-0.02 à + 0.71	-0.44 à -0.02	-0.02 à + 0.01	--56 à +150	71 à 607	- 26 à + 2 %	- 3 à + 21 %
Augmentation des couverts (surface, durée, rendement)	3 ; (11 ; 12)	Stockage C : ↗ biomasse restituée par les couverts	LimN - Alsi PCi - PILGi Vai -Ch B -Lg	11 à 57 %	+0.24 à +0.70	-0.08 à +0,17	+0.2 à +0.64	-0.03 à + 0.01	-41 à +1	14 à 100	0 à +2%	-1 à + 13 %
Fertilisation des couverts avec des PRO	4	Stockage C : ↗ biomasse restituée par les couverts et apport de produits organiques	ChC - Alsi	24 à 32 %	-0.11 à + 1.2	-0.48 à -0.16	+0.28 à +1.70	-0.03 à -0.01	-77 à -20	65 à 180	--	+2 à + 15 %
Fertilisation des céréales avec des PRO (blé et maïs)	5 ; (9 ; 10 à 12)	Fertilisation : réduction dose totale d'azote minéral ; Stockage C : apport de produits organiques	LimN- ChC Alsi – PIB -Ch B	23 à 70 %	-1.2 à + 0.64	-1.88 à + 0.12	+0.07 à +0.9	-0.05 à 0	-69 à +45	4 à 592	-	+1 à +20 %
Intégration de CIVE, apport de digestats et évolution de l'assolement si nécessaire	7 ; (8)	Stockage C : ↗ biomasse restituée par les couverts ; apport de produits organiques	ChC- Vai - Ch B-Lg	7 à 34 %	-0.22 à + 0.54	-0.36 à +0.16	-0.35 à +0.97	-0.07 à -0.01	-37 à + 27	39 à 662	-21 % à + 7 %	+ 6 à + 18 %
Combinaisons de leviers : formes azote, PRO, couverts, protéagineux, CIVE, travail du sol...	8 à 12	Augmenter le stockage et réduire les émissions liées à la fertilisation	LimN- ChC PIB – Ch B- Lg	34 à 98 %	+0.31 à +1.24	+0.08 à +0.34	+0.17 à +1.02	-0.05 à -0	- 106 à +6	36 à 160	- 26 % à +4 %	-2 à + 20 %

Lim N : Limons Nord avec pdt – Ch C : Champagne crayeuse – PI B : Plateau Bourgogne – Ch B : Champagne Berrichonne – Lg : Lauragais- Alsi : Alsace dominante maïs irriguée-VAi : Vallée de l'Adour irriguée –PCi : Poitou charentes irriguée – PILGi : Plaine de Lyon graviers irriguée

: pour rappel, si RE total positif, génère des crédits carbone