l'institut Agro
agriculture • alimentation • environnement
SupAgro Montpellier

agrosolutions
Édifier un monde durable

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome
Option Production Végétale Durable

Diversification des assolements avec des cultures à bas niveau d'intrants : dans quelle mesure est-il possible d'accompagner la transition bas-carbone des exploitations agricoles ?

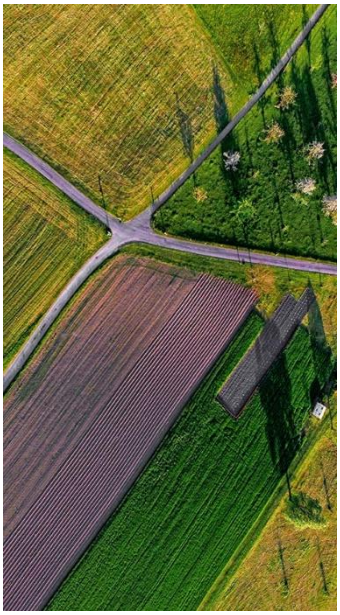
Par Célia RUAU

Année de soutenance : 2021
Organisme d'accueil : Agrosolutions

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome
Option Production Végétale Durable

Diversification des assolements avec des cultures à bas niveau d'intrants : dans quelle mesure est-il possible d'accompagner la transition bas-carbone des exploitations agricoles ?



Par Célia RUAU

Année de soutenance : 2021
Organisme d'accueil : Agrosolutions

Mémoire préparé sous la direction de :
Hugo FERNANDEZ-MENA
Organisme d'accueil :
Agrosolutions
Maître de stage :
Morgane HENAFF

Présenté le : 14 septembre 2021
Devant le jury :
Aurélie METAY (Présidente du jury)
Hugo FERNANDEZ-MENA (Tuteur)
Marc MORAINE (Rapporteur)

Résumé

Titre : Diversification des assolements avec des cultures à bas niveau d'intrants : dans quelle mesure est-il possible d'accompagner la transition bas-carbone des exploitations agricoles?

La diversification des assolements avec des cultures à faibles besoins azotés est un levier d'action intéressant pour la transition carbone du secteur agricole. Ces cultures sont cependant peu plébiscitées par les agriculteurs en raison du manque de structure des filières et de leur faible compétitivité économique par rapport aux cultures de rentes traditionnelles. Ce mémoire a pour objectif d'évaluer la capacité du marché carbone volontaire à accompagner les exploitations agricoles vers la diversification des assolements avec des cultures à faibles besoins azotés. Le potentiel de réductions d'émissions (RE ; émissions de gaz à effet de serre évitées et stockage de carbone) et le coût des crédits carbone (coût d'une tonne de CO_2 évitée) liés à l'insertion de cultures à faibles besoins azotés sur 15% de la SAU ont été calculé sur 5 exploitations appartenant à des régions distinctes. Les cultures à faibles besoins azotés permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle de l'exploitation notamment les émissions liées à la fertilisation azotée. Les systèmes de cultures intégrant du soja ont un potentiel de RE significativement plus élevé que les autres cultures en raison de la capacité de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique de cette légumineuse et de son potentiel de restitution de carbone au sol. L'introduction de cultures à faibles besoins azotés de printemps précédées d'intercultures longues permet d'augmenter la restitution de biomasse au sol et améliore donc le stockage de carbone dans le sol. Enfin, les coûts des crédits carbone générés par l'introduction des cultures à faibles besoins azotés sont élevés au vu du prix actuel de la tonne de CO_2. Le label bas-carbone est en mesure de compenser une partie des frais engagés dans la diversification des assolements mais il est nécessaire de combiner différentes sources de financement pour accompagner au mieux les agriculteurs. Ces résultats montrent que la diversification des assolements est intéressante du point de vue de la transition carbone en plus des autres bénéfices environnementaux. L'accompagnement technique et économique des agriculteurs est essentiel pour mettre en place des pratiques durables permettant de compenser les émissions de GES et d'atténuer les effets du changement climatique.

Mots clés : cultures à bas niveau d'intrants ; diversification ; label bas-carbone ; rotation culturale ; stockage de carbone ; émissions de gaz à effet de serre.

Abstract

Title : Crop diversification with low-input crops : how can we support the low carbon transition of farms ?

Crop diversification with low nitrogen requirement crops is an interesting lever for carbon transition in agriculture. However, these crops are not very attractive to farmers because of the poor sector structuring and their low economic competitiveness compared to traditional crops. The objective of this paper is to assess the capacity of the voluntary carbon market to support farms in diversifying crop rotation with low nitrogen requirement crops. The emission reduction potential (ER ; avoided greenhouse gas emissions and carbon storage) and the cost of carbon credits (cost of one tonne of CO_2 avoided) linked to the insertion of low-nitrogen crops on 15% of the UAA were calculated on 5 farms belonging to different regions. Low-nitrogen crops reduce GHG emissions at the farm level, particularly emissions related to nitrogen fertilisation. Cropping systems incorporating soybeans have a significantly higher ER potential than other crops due to the legume's capacity for symbiotic atmospheric nitrogen fixation and its potential to return carbon to the soil. The introduction of spring crops with low nitrogen requirements preceded by long intercropping increases the restitution of biomass to the soil and therefore improves soil carbon storage. Finally, the costs of carbon credits generated by the introduction of low-nitrogen crops are high given the current price of a tonne of CO_2. The low-carbon label is able to compensate for a part of the costs related to crop diversification, but it is necessary to combine different sources of funding to provide farmers with the best possible support. These results show that crop diversification is interesting from the point of view of the carbon transition in addition to the various environmental benefits. Technical and economic support for farmers is essential to implement sustainable practices that can offset GHG emissions and mitigate the effects of climate change.

Key words : low input crop ; diversification ; low-carbon label ; crop rotation ; carbon storage ; greenhouse gas emission.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier vivement ma maître de stage Morgane Hénaff. Merci pour tes conseils pertinents, ta disponibilité et la confiance que tu m'as accordé tout au long du stage. Je remercie particulièrement Camille Rannou pour son aide sur l'évaluation économique et les frères carbone, Martin et Gauthier pour leur appui régulier sur la réalisation des diagnostics carbone et le travail dans la bonne humeur. Je remercie l'ensemble de la Team carbone pour leur accompagnement et tout ce qu'ils m'ont transmis sur les sujets liés à la transition carbone. C'est avec plaisir que je vais poursuivre de nouveaux projets à vos côtés.

Je remercie les coopératives agricoles qui m'ont accordé des temps d'échanges très intéressants et qui m'ont permis de réaliser cette étude. Je remercie également Vincent Lecomte et Anne Schneider de Terres Inovia pour leurs conseils et leur appui technique sur les cultures de diversification étudiées.

Je remercie mon tuteur Hugo Fernandez-Mena pour sa disponibilité et ses conseils avisés sur le cadrage de mon mémoire ainsi que l'ensemble de l'équipe enseignante de l'option PVD. Un merci particulier à Aurélie Metay qui m'a aidé à m'orienter durant mon parcours.

Je souhaite remercier l'ensemble de mes collègues d'Agrosolutions pour leur accueil au sein leur équipe. Merci pour les bons moments partagés lors des pauses café, des afterworks et pour la bonne humeur quotidienne qui m'a accompagné tout au long du stage.

Je remercie mes colocataires Jessy, Manon et David pour leur accueil chaleureux à Reims et tous les bons moments passés ensemble en cuisine, sur les terrains de tennis ou dans des parties d'Andor effrénées.

Je remercie enfin tout particulièrement ma famille et mes proches qui m'ont soutenu tout au long de mes études et qui ont toujours été de bons conseils. Un grand merci à tous ceux qui ont pris le temps de relire mon mémoire.

Table des matières

Résumé **5**

Abstract **6**

Remerciements **7**

Liste des figures **10**

Liste des tableaux **12**

Liste des annexes **13**

Sigles et acronymes **15**

Introduction **16**

I. Contexte et objectifs de l'étude **17**

I.1. Marché carbone volontaire **17**

I.2. Etude sur le potentiel de la transition bas-carbone dans les exploitations de grandes cultures réalisée par Agrosolutions **19**

II. Etat de l'art **19**

II.1. Réductions d'émissions et stockage de carbone dans l'agriculture **19**

II.2. Diversification des assolements **21**

II.2.1. Approches et bénéfices de la diversification des cultures 21

II.2.2. Freins à la diversification 21

II.3. Les systèmes de cultures à bas niveau d'intrants : un levier pour la transition carbone **22**

II.3.1. Potentiel d'amélioration de l'empreinte carbone 22

II.3.2. Dynamique du carbone et de l'azote dans les systèmes à bas niveau d'intrants 23

II.4. Outils incitatifs à la diversification des assolements **23**

II.3.1. Instruments économiques 23

II.3.2. Marché carbone 24

III. Problématique et démarche **25**

III.1. Problématique, sous questions et hypothèses **25**

III.2. La démarche utilisée **26**

IV. Matériels et méthodes **27**

IV.1. Sélection des cultures à étudier **27**

IV.1.1. Zone d'étude 27

IV.1.2. Caractérisation des cultures de diversification à bas niveau d'intrants 27

IV.1.3. Critères de sélection 28

IV.2. Evaluation des potentiels de réductions d'émissions et de stockage de carbone **30**

IV.2.1. Création de scénarios de référence et des simulations d'insertion des cultures à faibles besoins azotés 30

IV.2.2. Périmètre d'application de la méthode 32

IV.2.3. Calcul des réductions d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle des systèmes de culture 32

IV.3. Evaluation des coûts liés à l'insertion de cultures à faibles besoins azotés dans les rotations 34
IV.3.1. Méthode de calcul de l'impact économique associé au levier 34
IV.3.2. Sources de données utilisées 35
IV.3.3. Coût des crédits carbone 36
IV.4. Analyse de données statistiques 36
V. Résultats 36
V.1. Sélection des cultures de diversification 36
V.1.1. Des cultures à moindre besoins en intrants 36
V.1.2. Faisabilité technique de la mise en place des cultures 37
V.1.3. Freins économiques à la mise en place des cultures 38
V.1.4. Bilan du classement 39
V.2. Potentiels de réductions d'émissions liés à la diversification des cultures 40
V.2.1. Réductions d'émissions associées au stockage de carbone dans les sols 40
V.2.2. Réductions d'émissions associées à la fertilisation 41
V.2.3. Bilan des réductions d'émissions 43
V.3. Potentiels de rémunération liés à la diversification des cultures 44
V.3.1. Variabilité des marges directes des cultures de diversification 44
V.3.1. Evaluation du coût de la transition carbone 45
V.3.2. Evaluation du coût des crédits carbone 47
VI. Discussion 48
VI.1. Discussion des résultats 48
VI.1.1. La diversification des assolements avec des cultures à faibles besoins azotés permet en grande majorité de réduire les émissions de GES totales 48
VI.1.2. Le label bas-carbone semble insuffisant pour accompagner le développement de cultures à faibles besoins azotés 50
VI.2. Discussion des méthodes 51
VI.2.1. Des résultats dépendants du contexte local de chaque exploitation 51
VI.2.2. Les outils de modélisation comme outil de décision pour la transition carbone 52
VI.3. Perspectives 52
Conclusion 54
Bibliographie 55
Annexes 59
Abstract 81
Résumé 82

Liste des figures

Figure 1 : Fonctionnement du label bas-carbone. Crédits : SG/DICOM/19189 – Décembre 2019 18

Figure 2 : Réductions d'émissions mobilisables dans le cadre d'un projet carbone. Le graphique de gauche présente les réductions générées par la mise en place d'un projet de transition carbone. Le graphique de droite présente la quantité de carbone stocké suite à la mise en place d'un projet de transition carbone qui participe aux réductions d'émissions globales. Graphiques issus du guide méthodologique du label bas-carbone (Mai 2020). 18

Figure 3 : Historique et projection des émissions du secteur de l'agriculture entre 1990 et 2050 (en $MtCO_2eq$) – Issu de la SNBC (Mars 2020), utilisation des données de l'inventaire CITEPA 2018. 20

Figure 4 : Prix minimum et maximum des crédits carbone achetés en France en 2014 identifiés dans différentes études : étude I4CE, INFOCC – GERES (Info Compensation Carbone), Ecosystem Marketplace. Les prix moyens sont indiqués en rouge. Source : I4CE 25

Figure 5 : Présentation de la démarche mise en place pour répondre à la problématique, décomposée en 3 phases. 26

Figure 6 : Carte représentant les régions ciblées dans cette étude (Pays Val de Loire, Hauts de France, Centre-Val de Loire, Ile-de-France et Normandie), regroupant les zones de chalandise des 5 coopératives partenaires de l'étude. 27

Figure 7 : Modélisation de la simulation d'insertion d'une culture BNI par rapport au scénario de référence. La culture BNI est introduite sur 15% de la surface totale de l'exploitation. La simulation prend donc en compte une réduction de 15% des autres cultures initialement présentes dans le scénario de référence. Le nouvel assolement est défini pour les 5 années de simulation. 31

Figure 8 : Apports azotés moyens des 15 cultures de diversification identifiées (en bleu) et des quatre cultures principales en France (blé tendre, orge, colza, maïs). Les pourcentages correspondent à la proportion des apports azotés des cultures de diversification par rapport à la moyenne des apports azotés des 4 grandes cultures que sont le blé tendre, l'orge, le colza et le maïs (apport azoté moyen de 189 $uN.ha^{-1}$). 37

Figure 9 : Réductions d'émissions liées au stockage de carbone organique dans le sol (en $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$) en fonction du flux de biomasse restituée au sol (en $TMS.ha^{-1}.an^{-1}$). Les points ont été mis en forme avec des couleurs différentes pour chaque exploitation étudiée. 41

Figure 10 : Réduction de la fertilisation minérale azotée (en %) dans les simulations d'insertion du pois protéagineux, du lin oléagineux et du soja par rapport aux scénarios de référence dans les 5 exploitations d'étude. 42

Figure 11 : Détail des réductions d'émissions (en % par rapport au RE $_{fertilisation}$ totales) associées à la fertilisation lors de l'introduction des cultures de diversification (pois protéagineux, lin oléagineux et soja) dans les 5 régions d'études. 43

Figure 12 : Réductions d'émissions totales (en teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}) définies comme la somme des RE $_{stockage}$ et RE $_{fertilisation}$ pour l'introduction des cultures (pois protéagineux d'hiver, lin oléagineux d'hiver et soja) et de deux variétés de printemps (distinguées avec des rayures). 44

Figure 13 : Variabilité de la marge directe, du produit brut et des charges directes (charges opérationnelles et charges de structure spécifiques) pour les cultures à faibles besoins azotés (pois protéagineux, lin oléagineux et soja) insérées dans les assolements dans les simulations (en €.ha^{-1}). 45

Figure 14 : Coût de l'insertion des cultures à faibles besoins azotés (pois d'hiver, pois de printemps, lin d'hiver, lin de printemps et soja) en €.ha^{-1}.an^{-1}. Les coûts sont évalués par la méthode du budget partiel prenant en compte les différences de produits et de charges générés par le changement d'assolement (introduction de cultures à faibles besoins azotés et substitution de cultures initialement présentes dans l'assolement). Les coûts moyens pour chaque exploitation sont indiqués en gras en dessous de l'histogramme. 46

Figure 15 : Réductions d'émissions (RE) en fonction des coûts d'insertion des cultures à faibles besoins azotés (Cout_levier) selon les cultures BNI insérées dans les assolements (A) ou selon les territoires considérés (B). Les RE sont exprimées en teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1} et les coûts de mise en place du levier en €.ha^{-1}.an^{-1}. 47

Figure 16 : Coût des crédits carbone (€.teqCO_2^{-1}) liés à l'insertion des cultures à faibles besoins azotés (pois protéagineux, lin oléagineux, soja). Deux valeurs sont nulles pour l'exploitation A car le coût du levier est négatif, il n'y a donc pas d'évaluation du coût du crédit carbone. Lorsqu'il n'y aucun coût indiqué, cela signifie qu'aucun crédit carbone n'a été généré par la mise en place du levier (RE négatives). 48

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des cultures de diversification identifiées, classées par famille. 27

Tableau 2 : Echelle de notation pour l'adaptation des cultures aux différents territoires. 29

Tableau 3 : Echelle de notation pour la caractérisation des cultures en fonction des contraintes agronomiques..... 29

Tableau 4 : Echelle de notation pour la caractérisation des cultures en fonction du potentiel du développement des marchés..... 29

Tableau 5 : Echelle de notation des cultures en fonction de leurs rentabilités économiques. 30

Tableau 6 : Noms des exploitations de référence sélectionnées associées aux différentes régions d'études. 30

Tableau 7 : Synthèse des données utilisées pour la construction des scénarios de référence et des scénarios projet et méthode de collecte des données. En vert sont indiquées les modifications techniques associées au changement d'assolement et à l'introduction de la culture BNI..... 32

Tableau 8 : Exemples des éléments favorables et défavorables pris en compte dans le budget partiel pour le calcul économique de l'insertion d'une culture BNI à la place d'une céréale. 35

Tableau 9 : Synthèse des notations des cultures pour chaque indicateur et calcul du bilan total. Le bilan correspond à la somme des notes attribuées à chaque indicateur. 40

Tableau 10 : Réductions d'émissions associées au stockage de carbone organique dans les sols ($RE_{stockage}$ en $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$) lors de l'insertion des cultures à faibles besoins azotés (pois d'hiver, pois de printemps, lin d'hiver, lin de printemps et soja) dans les 5 exploitations de référence. 41

Tableau 11 : Réductions d'émissions associées à la fertilisation minérale et organique (en $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$) lors de l'insertion des cultures à faibles besoins azotés (pois d'hiver, pois de printemps, lin d'hiver, lin de printemps et soja) dans les 5 exploitations de référence. 42

Liste des annexes

Annexe 1 : Leviers de stockage de carbone proposés dans la méthode Label Bas-Carbone Grandes Cultures. 59

Annexe 2 : Assolement des exploitations de référence sur les 5 régions d'étude 60

Annexe 3 : Sélection des systèmes de cultures (SdC) adaptés à l'insertion des cultures de diversification choisies dans cette étude en fonction des types de sol. 61

Annexe 4 : Synthèse des informations à saisir pour calculer les réductions d'émissions. 62

Annexe 5 : Equations permettant de calculer les réductions d'émissions liées à la fertilisation ($RE_{fertilisation}$) issues de la méthode Grandes Cultures du label bas-carbone 63

Annexe 6 : Liste des références utilisées pour les calculs économiques du coût d'insertion des cultures à faibles besoins azotés dans les assolements dans chaque région d'étude. 64

Annexe 7 : Synthèse des informations collectées pour sélectionner les cultures de diversification à étudier. 65

Annexe 8 : Répartition des Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT) moyens des cultures de diversification identifiées et des quatre cultures principales en France (blé tendre, orge, colza, maïs). 69

Annexe 9 : Classification des cultures de diversification en fonction des indicateurs de sélection. 70

Annexe 10 : Sole des cultures de diversification et des cultures principales dans chaque région 72

Annexe 11 : Vérification des hypothèses pour la réalisation de l'analyse de variance (ANOVA) de l'effet de la modalité « culture » sur les réductions d'émissions générées par la mise en place des cultures à faibles besoins azotés. 74

Annexe 12 : Résultats des tests statistiques 75

Annexe 13 : Evolution des stocks de carbone de 0 à 10 ans pour chaque exploitation et pour chaque système de cultures. 76

Annexe 14 : Réductions d'émissions liées à la fertilisation ($RE_{fertilisation}$) exprimées en $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$ de culture à faible besoin azoté insérée dans les assolements. 77

Annexe 15 : Facteurs d'émissions associés aux engrais minéraux 77

Annexe 16 : Fonctionnement du modèle de bilan humique AMG utilisé pour le calcul des RE stockage..... 78

Annexe 17 : Variabilité des rendements modélisés dans les scénarios de référence et les simulations pour les cultures de diversification et les cultures principales des assolements. 79

Annexe 18 : Indices de récolte des cultures étudiées dans les scénarios de référence et dans les simulations..... 79

Annexe 19 : Marges directes du blé tendre, du colza, du maïs et de l'orge dans les exploitations de l'étude..... 80

Sigles et acronymes

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

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

CH_4 : Méthane

CO_2 : Dioxyde de Carbone

ETP : Évapotranspiration Potentielle

GIEC : Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GES : Gaz à Effet de Serre

GtC : Giga tonne de carbone

I4CE : Institute For Climate Economics

IFT : Indice de Fréquence de Traitement

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

IR : Indice de Récolte

LBC : Label Bas-Carbone

MO : Matière Organique

N_2O : Protoxyde d'Azote

PAC : Politique Agricole Commune

RE : Réduction d'Emissions. Ce terme désigne indifféremment des quantités de GES dont l'émission a été évitée ou des quantités de GES séquestrées.

SAU : Surface Agricole Utile

SdC : Système de Culture

SNBC : Stratégie Nationale Bas-Carbone

uN : Unité d'azote

UTCATF : Utilisation des Terres, Changements d'Affection des Terres et Foresterie

Introduction

L'agriculture se situe au cœur des défis liés au changement climatique. Le secteur agricole a contribué à 19% des émissions de gaz à effet de serre (GES) du territoire français en 2019 (Citepa, 2020) mais joue un rôle déterminant via le stockage de carbone dans les sols. Les sols disposent d'un stock de carbone organique élevé (2 400 GtC) par rapport à la quantité de CO_2 contenue dans l'atmosphère estimée à 800 GtC (Pellerin *et al.*, 2019). L'agriculture subit depuis plusieurs années les effets du changement climatique. Des épisodes de gel et de sécheresse intenses frappent l'ensemble du territoire français et provoquent des dégâts considérables. Le changement climatique accentue également les problèmes liés à l'accès aux ressources essentielles pour l'agriculture. D'après le dernier rapport spécial du GIEC (IPCC, 2019), l'augmentation des températures et l'intensification des évènements extrêmes ont contribué à la raréfaction de la ressource en eau, la dégradation des sols et la chute de la biodiversité.

Le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation a présenté un nouveau plan d'action le 23 juin 2021 (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021) permettant d'atteindre les objectifs climatiques fixés par la Stratégie nationale bas-carbone et aux orientations du Plan national d'adaptation au changement climatique 2018-2022 (neutralité carbone en 2050). Le développement de pratiques agricoles permettant d'atténuer les émissions de GES est une priorité pour le secteur agricole tout comme le développement du potentiel de séquestration du carbone dans les sols agricoles et la biomasse (1er et 2ème axe du plan d'actions).

Dans le cadre actuel de la transition agricole, les exploitations agricoles sont incitées à diversifier les assolements. La diversification des cultures présente de nombreux bénéfices pour les exploitations de grandes cultures. Elle génère des bénéfices agronomiques à l'échelle de la rotation culturale (ruptures des cycles des maladies et ravageurs, meilleure valorisation de l'azote, étouffement des adventices) et a également des impacts positifs sur les ressources naturelles (qualité des sols, biodiversité). L'insertion de cultures à faibles besoins azotés permet aussi de réduire les émissions de GES. La production et l'application des intrants azotés génèrent en effet des émissions de protoxyde d'azote (N_2O). Ce gaz à un pouvoir de réchauffement global très important (près de 265 fois le CO_2 ; GIEC, 2013) qui représente environ 42% des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole (Citepa, 2020). L'introduction de légumineuses dans les rotations permet de limiter les apports d'azote grâce à leur capacité de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique et permet de réduire les apports azotés sur les cultures suivantes grâce à la restitution d'azote par les résidus de culture.

La diversification des assolements avec des cultures à faibles besoins azotés apparait comme une stratégie intéressante pour réduire les émissions de GES et valoriser des co-bénéfices sur l'environnement. Cependant, il existe un manque de coordination à l'échelle des filières de production, freinant ainsi le développant de ces cultures par rapport aux cultures de rentes traditionnelles. Il convient donc de trouver des méthodes d'incitation à la mise en place de ce type de pratiques.

Le marché du carbone volontaire pourrait être une opportunité de promouvoir la mise en place de pratiques agricoles permettant d'atténuer les émissions de GES. Le label bas-carbone est un cadre de certification national français qui permet de reconnaitre des réductions d'émissions liées à la mise en place de différents projets, notamment dans le secteur agricole. Ces réductions d'émissions, aussi appelées crédits carbone peuvent ensuite être vendues auprès d'acteurs (entreprises privées, collectivités, citoyens…) souhaitant compenser leurs émissions ou contribuer à la neutralité carbone. L'achat de crédits carbone par des financeurs auprès de porteurs de projet pourrait être un levier pour accompagner le déploiement des cultures à bas niveau d'intrants (cultures BNI), pour rémunérer les surcoûts ou manque à gagner des agriculteurs et ainsi améliorer la compétitivité des cultures BNI vis-à-vis des autres cultures.

Ce mémoire a pour but **d'évaluer la capacité du marché carbone volontaire à accompagner les exploitations agricoles vers la diversification des assolements avec des cultures à bas niveau d'intrants.**

La première partie présentera le contexte actuel du marché carbone volontaire et la mise en place du label bas-carbone dans le cadre de la transition carbone du secteur agricole. L'état de l'art exposera ensuite les leviers d'actions pour la transition carbone, les différents aspects de la diversification des assolements en système de grandes cultures ainsi que les aspects économiques de la transition carbone. La partie suivante permettra de décrire la méthode et les outils mobilisés pour répondre à la problématique. Les résultats seront enfin présentés et discutés en fin de mémoire.

I. Contexte et objectifs de l'étude

I.1. Marché carbone volontaire

Le label bas-carbone (LBC), piloté par le Ministère de la Transition écologique et solidaire avec la collaboration de l'Institut de l'économie pour le climat (I4CE), consiste à certifier des projets permettant de réduire les émissions de GES ou augmenter le stockage de carbone dans les sols. Des financeurs (collectivités, entreprises, citoyens), souhaitant compenser leurs émissions, peuvent acheter des crédits carbone aux porteurs de projets. Un crédit carbone est une unité qui correspond à une tonne équivalent CO_2 évitée. La labellisation est importante pour garantir aux financeurs la qualité et l'intégrité environnementale des projets. La Figure 1 présente le fonctionnement du label bas-carbone de manière schématique.

Figure 1 : Fonctionnement du label bas-carbone. Crédits : SG/DICOM/19189 – Décembre 2019

Un projet carbone permet de réduire les émissions de GES ou d'augmenter la séquestration de carbone par rapport à une situation de référence (Figure 2). Les actions qui peuvent être mises en place dans le cadre du label bas-carbone sont décrites par des méthodes spécifiques. Ces méthodes précisent les conditions de mesure, de suivi et de vérification des projets. Elles sont approuvées par le Ministère afin d'avoir une base commune de calcul pour tous les projets. Les réductions d'émissions sont soumises à une vérification par un tiers indépendant en fin de projet afin d'être reconnues. Un projet carbone doit démontrer qu'il est additionnel, c'est-à-dire qu'il propose la mise en place d'actions **au-delà de la réglementation et des pratiques courantes afin d'accélérer la transition carbone**.

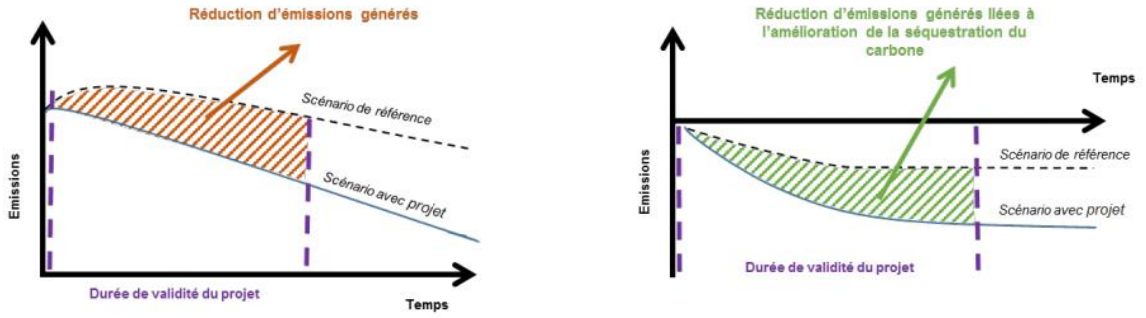


Figure 2 : Réductions d'émissions mobilisables dans le cadre d'un projet carbone. Le graphique de gauche présente les réductions générées par la mise en place d'un projet de transition carbone. Le graphique de droite présente la quantité de carbone stocké suite à la mise en place d'un projet de transition carbone qui participe aux réductions d'émissions globales. Graphiques issus du guide méthodologique du label bas-carbone (Mai 2020).

Le label vise à engager la mise en place de projets vertueux en offrant un **cadre pour la rémunération de pratiques favorables pour le climat**. Il permet d'accompagner les porteurs de projet avec une rémunération basée sur le nombre de crédits carbone générés par le projet et le prix de la tonne de CO_2 négocié entre l'acheteur et le vendeur.

I.2. Etude sur le potentiel de la transition bas-carbone dans les exploitations de grandes cultures réalisée par Agrosolutions

Agrosolutions a contribué à la rédaction de la méthode Grandes Cultures en partenariat avec des instituts techniques des filières grandes cultures. Cette méthode définit le calcul des réductions d'émissions pour la mise en place de pratiques bas-carbone sur les grandes cultures. La méthode a été déposée en décembre 2020 pour instruction aux services du Ministère et a été validée en août 2021. Les leviers de réduction d'émissions de GES et de stockage de carbone mobilisables avec cette méthode sont listés dans l'Annexe 1.

Agrosolutions, Bioline et 5 coopératives partenaires ont lancé une étude pour évaluer le **potentiel de crédits carbone associés à la transition bas-carbone d'un échantillon de fermes** via l'utilisation de la méthode Grandes Cultures. Cette étude a été réalisée sur un panel de 25 exploitations agricoles réparties sur le territoire français. Des enquêtes approfondies réalisées avant ce stage ont permis de définir précisément les pratiques bas-carbone pouvant être mises en place dans les 5 années à venir sur ces exploitations et de caractériser les modifications associées à l'échelle des systèmes de cultures (évolution des rendements, modification d'assolement, de fertilisation, etc.). Les réductions d'émissions associées à la mise en place des leviers sélectionnés avec les agriculteurs ont été calculées pour chaque exploitation agricole.

Cette étude a permis de mettre en évidence la **complexité des dynamiques de stockage de carbone et de réductions d'émissions** lors de la mise en place d'une combinaison de leviers. Certains projets permettent de réduire les émissions de GES totales tandis que d'autres génèrent des émissions supplémentaires (les réductions d'émissions s'étendent de -3,78 teq. CO_2/ha/an à 1,60 teq. CO_2/ha/an avec une moyenne de 0,11 teq. CO_2/ha/an). Il est compliqué d'avoir une vision précise de l'effet de chaque levier sur les réductions d'émissions globales. Les leviers peuvent en effet créer des synergies entre eux ou avoir des effets contraires sur les réductions d'émissions et le stockage de carbone. Le levier « introduction de cultures à faibles besoins en azote » semble être un levier intéressant ayant un fort potentiel d'atténuation des émissions de GES. **Ce mémoire poursuit cette analyse sur le potentiel de crédits carbone de ce levier**.

II. Etat de l'art

II.1. Réductions d'émissions et stockage de carbone dans l'agriculture

Le secteur agricole a un fort potentiel d'atténuation du changement climatique via la réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'augmentation du stockage de carbone dans les sols et la biomasse. Le secteur agricole est à la fois **une source et un puit de carbone**.

Les **principales émissions de gaz à effet de serre** en agriculture sont les suivantes (Citepa, 2020) : 45% d'émissions de méthane (CH_4) liées à la fermentation entérique et au

stockage des effluents d'élevage, 42% d'émissions de protoxyde d'azote (N_2O) liées à l'utilisation des engrais azotés, aux effluents d'élevage et aux résidus de culture et enfin 13% d'émissions de dioxyde de carbone (CO_2) provenant de la consommation d'énergie sur l'exploitation agricole (engins agricoles, serres chauffées, …).

La stratégie Nationale Bas Carbone (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2020) fixe un **objectif de réduction de 46% des émissions de GES du secteur agricole à l'horizon 2050** par rapport à 2015 afin d'atteindre la neutralité carbone (Figure 3). La première orientation propose de réduire les émissions directes et indirectes de N_2O et CH_4. Elle s'appuie sur des projets d'agroécologie et d'agriculture de précision qui permettent d'optimiser le cycle de l'azote afin de réduire au maximum les excédents azotés. Pour les exploitations de grandes cultures, la **réduction de l'utilisation d'intrants azotés** est donc un enjeu majeur pour la réduction des émissions de N_2O. Ce levier d'action a été identifié par l'étude de Pellerin (2013). Les deux sous actions proposées consistent à réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse en valorisant les ressources organiques et à **accroître la part de légumineuses en grandes cultures** et dans les prairies temporaires.

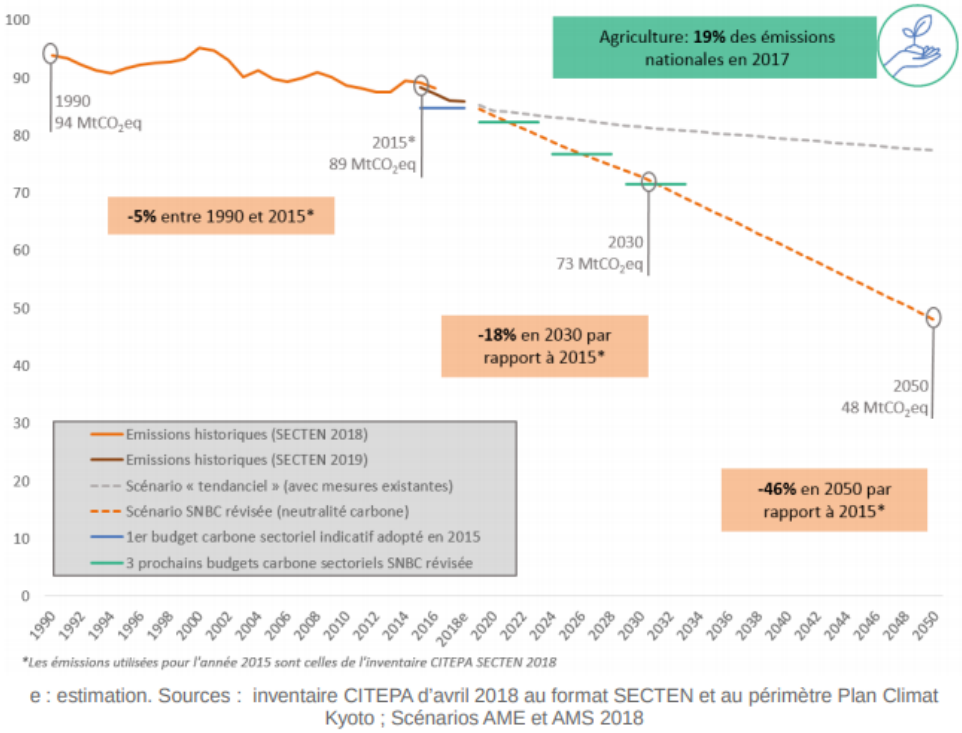


Figure 3 : Historique et projection des émissions du secteur de l'agriculture entre 1990 et 2050 (en $MtCO_2eq$) – Issu de la SNBC (Mars 2020), utilisation des données de l'inventaire CITEPA 2018.

D'autre part, des objectifs sont fixés en termes de stockage de carbone dans les sols agricoles. **L'initiative « 4 pour 1000 »** lancée par la France lors de la COP 21 fixe un objectif de stockage carbone de 0,4% par an sur les 30 à 40 premiers cm du sol. Ce taux de croissance annuel des stocks de carbone permettrait d'atténuer considérablement l'augmentation annuelle des émissions de CO_2. L'INRA a mené une étude permettant d'estimer le potentiel de stockage de carbone des sols agricoles et forestiers en France (Pellerin *et al.*, 2019). Les chercheurs ont montré qu'il est possible d'atteindre un stockage additionnel de +3,2‰ sur les

surfaces agricoles et de +5,1 ‰ si l'on focalise l'étude uniquement sur les surfaces de grandes cultures. Les écosystèmes de grandes cultures sont caractérisés par des stocks plus faibles et représentent donc 86% du potentiel total de stockage carbone dans les sols.

II.2. Diversification des assolements

II.2.1. Approches et bénéfices de la diversification des cultures

Il existe une grande diversité d'approches de la diversification des cultures dans le secteur agricole. Dans leur revue scientifique, Hufnagel, Reckling, et Ewert (2020) ont montrés qu'il n'existe pas de concept théorique commun. La diversification des cultures doit être approchée différemment en fonction des problèmes rencontrés par les agriculteurs et en fonction de la discipline ciblée. Elle doit également s'adapter au contexte agricole de chaque pays et régions. La définition de la diversification des cultures est floue, tant au niveau des cultures considérées qu'au niveau des pratiques mises en œuvre. Les mesures de la diversification des cultures sont caractérisées selon deux échelles : temporelle et spatiale. La succession culturale est établie à l'échelle temporelle tandis que les cultures intercalaires, les cultures associées, les cultures mixtes, le mélange de variétés ou les cultures pièges sont mis en place à l'échelle spatiale. La rotation culturale se définit comme l'organisation de la succession culturale des espèces sur une parcelle. **On s'intéressera dans la suite de ce mémoire à la rotation culturale comme approche de la diversification.**

De nombreux scientifiques ont mis en avant les bénéfices de la diversification des cultures à l'échelle de l'agroécosystème. 30% des études scientifiques localisées en Europe de l'Ouest et de l'Est sont focalisées sur la stratégie de rotation culturale (Beillouin, Ben-Ari, et Makowski, 2019). A partir de leur base de données regroupant 99 méta-analyses, Beillouin et al., (2019) ont montrés que la rotation culturale a des effets positifs sur la biodiversité, la qualité des sols et le niveau de productivité. Les systèmes de production diversifiés défient les systèmes conventionnels moins diversifiés tout en restant productifs et en conservant la fourniture de services écosystémiques (Kremen et Miles, 2012). Le développement croissant des services écosystémiques au fil du temps dans les rotations diversifiées peut également permettre de réduire les besoins en intrants chimiques (Davis *et al.*, 2012). Les systèmes de cultures diversifiés permettent également de réduire les pertes d'éléments nutritifs par lixiviation, favorisant ainsi une meilleure efficacité de l'utilisation des engrais (De Notaris *et al.*, 2018).

II.2.2. Freins à la diversification

Malgré les bénéfices de la diversification des cultures, de nombreux freins bloquent les agriculteurs à introduire de nouvelles cultures dans leurs assolements. La structuration des acteurs autour de cultures dominantes freine le développement des cultures de diversification (Meynard *et al.*, 2013). Pour développer les chaines de valeur de cultures mineures, il est nécessaire de coordonner les acteurs des filières et d'agir simultanément au niveau des débouchés, de l'amélioration des techniques et de la génétique sur les cultures de diversification (Meynard *et al.*, 2018). Le manque de références techniques et d'innovation sur les cultures mineures tend à favoriser la spécialisation des cultures plutôt que la diversification (Roesch-McNally, Arbuckle, et Tyndall, 2018).

Les exploitants agricoles peuvent être réticents à introduire des cultures à bas niveau d'intrants dans leurs assolements du fait de la compétitivité économique vis-à-vis des cultures de rentes traditionnelles. L'étude menée par Zentner *et al.* (2011) basée sur les données économiques de 2007 au Canada montre que le système de culture le plus rentable est le système le moins diversifié. La rentabilité du système présentant une rotation annuelle diversifiée avec des légumineuses est inférieure de 10%. Il ressort également de cette analyse que les systèmes diversifiés sont principalement choisis par des agriculteurs qui prennent des risques. Ces résultats sont spécifiques d'un contexte géographique et économique particulier mais reflètent le discours porté par les agriculteurs sur les principaux freins liés à la diversification en France. Le risque économique associé à l'introduction de cultures à bas niveau d'intrants est une contrainte importante pour les agriculteurs.

Les bénéfices environnementaux de la diversification des cultures sont rarement étudiés d'un point de vue économique. La revue de la littérature de Rosa-Schleich *et al.*, (2019) souligne que les avantages de la diversification des cultures ne sont pas suffisants pour compenser les coûts économiques du changement de pratique à court terme. La PAC n'est pas un levier suffisamment puissant pour favoriser la diversification des filières (Thoyer *et al.*, 2014). La mesure de diversification des cultures proposée dans la réforme du verdissement de la PAC en 2013 a eu un faible impact sur les exploitations agricoles européennes. Seulement 5% des exploitations agricoles ont bénéficié de cette mesure et moins de 1% de la surface agricole totale a été modifiée (Louhichi *et al.*, 2017). Il est nécessaire de trouver de nouvelles incitations pour favoriser la diversification des assolements.

II.3. Les systèmes de cultures à bas niveau d'intrants : un levier pour la transition carbone

II.3.1. Potentiel d'amélioration de l'empreinte carbone

La réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'augmentation du stockage de carbone dans la biomasse et dans les sols peut être étudiée à l'échelle du système de culture. Le système de culture est défini comme une combinaison dynamique d'un système technique et d'un système biophysique appliquée sur un ensemble de parcelles. La construction de systèmes techniques nécessitant moins d'intrants permet de réduire l'impact environnemental de l'exploitation agricole. La diversification des cultures est une approche qui permet de réduire l'utilisation d'intrants à l'échelle du système de culture.

L'introduction de cultures ayant de faibles besoins azotés permet de réduire les émissions liées à la production des engrais. Les légumineuses, capables de fixer l'azote atmosphérique de l'air grâce aux nodosités sur leurs racines, améliorent la disponibilité de l'azote dans le sol pour les cultures suivantes (Peoples *et al.*, 2009). Elles permettent donc de réduire la quantité d'azote à apporter à l'échelle de la rotation. D'autres cultures permettent également de réduire la quantité d'intrants car elles demandent moins de ressource en azote pour leur croissance par rapport aux cultures traditionnellement cultivées (blé, colza, orge, maïs, …). Nemecek *et al.*, (2015) ont mené une étude en France sur l'impact de la diversification des rotations de cultures à l'aide d'analyses du cycle de vie. Il ressort de cette étude que la diversification des rotations culturales assure une meilleure utilisation de l'azote.

La réduction des quantités d'engrais utilisées et l'introduction de légumineuses permettent par exemple de réduire fortement les émissions à l'échelle du système de culture. Les cultures non fertilisées comme les légumineuses permettent de réduire les émissions directes de protoxyde d'azote (N_2O) émises au champ par dénitrification (Carrouée *et al.*, 2012). Des résultats similaires ont été obtenus dans l'étude de Gan *et al.*, (2011) : la diversification des cultures permet de réduire l'empreinte carbone de 7% pour un blé dur précédé d'une culture oléagineuse par rapport à une monoculture de blé, de 17% pour un blé dur précédé d'une légumineuse et de 34% pour un blé dur précédé de deux légumineuses.

D'autres auteurs restent plus nuancés sur les potentiels d'amélioration de l'empreinte carbone lors de l'insertion de légumineuses dans les rotations. Le stockage de carbone est directement dépendant du type de culture produit sur l'exploitation agricole. En effet, le carbone contenu dans la biomasse produite est restitué au sol après la récolte. Les cultures produisant des quantités élevées de biomasse (graminées, céréales) favorisent donc une plus grande restitution de carbone au sol et donc un potentiel de stockage plus important que d'autres cultures (Mathew *et al.*, 2017). Les résidus de cultures des céréales peuvent donc contribuer à un stockage de carbone plus élevé que certaines légumineuses (Chen *et al.*, 2018). La réduction des apports azotés dans les systèmes à faibles niveaux d'intrants peuvent également mener à de faibles rendements et donc avoir un bilan carbone plus élevé qu'un système conventionnel (Peyrard *et al.*, 2016).

II.3.2. Dynamique du carbone et de l'azote dans les systèmes à bas niveau d'intrants

Il existe une dynamique complexe entre l'utilisation d'intrants azotés et le stockage de carbone. Les cycles de l'azote et du carbone dans le sol sont reliés. Il existe une corrélation positive entre la minéralisation de l'azote et le stock total de carbone dans le sol (Attard *et al.*, 2016). L'augmentation de la part de carbone stable dans le sol par humification ne peut avoir lieu sans la présence d'azote. En effet, l'augmentation de la disponibilité de l'azote permet d'accroître la décomposition des résidus de cultures et donc le stockage de carbone (Pellerin *et al.*, 2019). L'utilisation d'intrants azotés permet également de stimuler la production de biomasse et augmente donc la quantité de résidus de cultures restitués au sol. La réduction des apports azotés dans les systèmes de cultures à bas niveau d'intrants réduit les émissions directes de N_2O et les émissions de GES associées à la production des engrais mais limite le stockage de carbone. Il est difficile de trouver un équilibre entre les stocks d'azote et de carbone dans les sols.

II.4. Outils incitatifs à la diversification des assolements

II.3.1. Instruments économiques

Les leviers de réduction d'émissions de gaz à effet de serre et de stockage de carbone sont déployables chez un grand nombre d'agriculteurs mais ils induisent aussi souvent un surcoût. Il est donc essentiel de mettre en place des outils permettant d'inciter la mise en place de pratiques vertueuses pour le climat.

Les politiques incitatives mobilisant des instruments économiques sont généralement plus efficaces que les instruments informationnels (documents d'orientation ou de planification indicatifs, labels environnementaux, …) et les normes (règles, quotas, lois, …) (Pellerin *et al.*, 2019). En effet, les instruments économiques ont pour objectif de modifier les comportements de manière durable en offrant une compensation financière pour la mise en place de bonnes pratiques.

Plusieurs mécanismes économiques permettent d'accompagner les agriculteurs à introduire des cultures à bas niveau d'intrants dans les assolements de grandes cultures. Les agriculteurs peuvent percevoir des aides couplées issues de la Politique Agricole Commune. Les montants minimums de ces aides s'élèvent à 100 €.ha^{-1} pour le soja, les protéagineux (pois, féverole, lupin) et les légumineuses fourragères destinées à la déshydratation (luzerne par exemple), 150 €.ha^{-1} pour la production de semences de légumineuses fourragères et 129 €.ha^{-1} pour la production de chanvre textile (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021a). Le volet agricole du projet France Relance vise à soutenir des projets de développement des protéines végétales avec pour objectif un doublement des surfaces de plantes riches en protéines végétales d'ici 2030[1]. Le marché carbone volontaire est un autre instrument économique. Le levier « introduction de cultures à faibles besoins azotés » proposé dans la méthode Grande Cultures du Label Bas-Carbone peut permettre de générer des crédits carbone s'il améliore le bilan carbone des exploitations. La compensation économique évaluée par rapport aux crédits carbone générés peut être un outil d'incitation économique.

II.3.2. Marché carbone

Les marchés carbone sont définis par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire comme « des outils réglementaires facilitant l'atteinte pour tout ou partie des objectifs de réduction d'émissions de GES déterminés politiquement ». Le protocole de Kyoto signé en 1997 impose des contraintes sur les émissions de GES des pays et met en place un système d'échange de quotas d'émissions (Emissions Trading Schemes – ETS). L'objectif de cette mesure vise à **limiter et réduire les émissions de GES** en appliquant des quotas d'émissions. Ces quotas peuvent être échangés entre différents acteurs (acheteurs et vendeurs). Il s'agit d'un marché de conformité.

L'obtention de crédits carbone sur le marché volontaire vient s'ajouter au système de quotas classiques. La compensation carbone volontaire consiste à **financer la mise en place de projets de réduction d'émissions de GES** pour compenser les émissions générées par les activités d'une organisation. En effet, on considère de manière générale que les émissions de GES ont le même impact sur le climat quel que soit le lieu et l'organisation qui génère ces émissions. Des crédits carbone sont achetés par les organismes souhaitant compenser leurs émissions et reçoivent une certification de réduction d'émissions (chiffrée en tonne équivalent CO_2). Avec la création du Label bas-carbone, le Ministère de la Transition

[1] Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, Communiqué Plan France Relance, 2021. https://agriculture.gouv.fr/france-relance-le-plan-proteines-vegetales-accelere-son-deploiement-avec-26-nouveaux-projets-sur

Ecologique et Solidaire souhaite créer un **cadre pour la certification des réductions d'émissions de gaz à effet de serre en France**.

L'institut I4CE a publié en 2017 une étude sur le marché de compensation carbone volontaire en France en 2015 dans le cadre du projet de référentiel de certification national VOCAL (VOluntary Carbon Land Certification), cofinancé par l'Union Européenne (Tronquet, Grimault, et Foucherot, 2017). Cette étude a permis de montrer qu'il existe une très grande **disparité au niveau des prix moyens d'achat des crédits carbone**. Dans l'enquête de l'institut, les prix moyens des crédits pondérés par les volumes s'étendent de 4 €/teqCO_2 à 24 €/teqCO_2 (Figure 4). Ces résultats sont cohérents avec le rapport du GERES (2015) et les données d'Ecosystem Marketplace (2015).

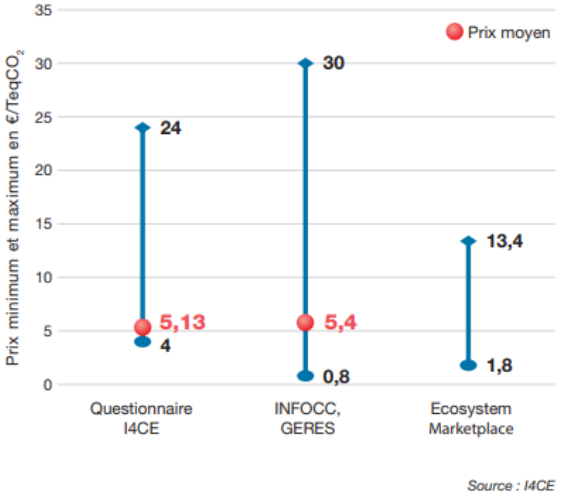


Figure 4 : Prix minimum et maximum des crédits carbone achetés en France en 2014 identifiés dans différentes études : étude I4CE, INFOCC – GERES (Info Compensation Carbone), Ecosystem Marketplace. Les prix moyens sont indiqués en rouge. Source : I4CE

III. Problématique et démarche

III.1. Problématique, sous questions et hypothèses

Les coopératives agricoles sont incitées à accompagner la diversification des assolements des agriculteurs avec des cultures à bas niveau d'intrants sur leurs territoires. Le frein principal à cette diversification pour les agriculteurs est la rentabilité économique de ces cultures à bas niveau d'intrants qui sont souvent moins rémunératrices que les cultures comme le blé, l'orge ou le colza. Le financement issu du marché carbone volontaire pourrait être un levier pour accompagner leur déploiement.

L'objectif de cette étude est donc de répondre à la problématique suivante :
Dans quelle mesure le financement issu des marchés carbone volontaire peut-il contribuer à accompagner la diversification des assolements avec des cultures à bas niveau d'intrants ?

3 sous questions se distinguent pour répondre à cette problématique :

- ***Quelles sont les 3 cultures à bas niveau d'intrants intéressantes d'un point de vue agronomique qui pourraient augmenter leur compétitivité grâce au financement issu du marché carbone volontaire ?***

- ***Quel est le potentiel d'atténuation des émissions de GES et le potentiel de stockage de carbone lors de l'insertion de 3 cultures à bas niveau d'intrants dans les assolements des exploitations sélectionnées dans différentes régions ?***

Hypothèse 1 : on émet l'hypothèse que la diversification des assolements avec des cultures à bas niveau d'intrants permet de réduire les émissions liées à la fabrication des intrants azotés et réduit donc les émissions globales de GES.

- ***Dans quelle mesure, le label bas-carbone permet-il de compenser le manque de compétitivité économique de ces cultures BNI pour accompagner leur déploiement sur les territoires ?***

Hypothèse 2 : le label bas-carbone permet en partie d'accompagner la transition agricole en compensant les frais engagés pour l'insertion des cultures à bas niveau d'intrants. En revanche, on émet l'hypothèse qu'avec les estimations du prix actuel de la tonne de carbone, il ne sera pas suffisant pour accompagner la diversification des systèmes de cultures.

III.2. La démarche utilisée

La démarche utilisée pour répondre à la problématique s'est structurée autour des trois sous-questions présentées ci-dessus. La Figure 5 ci-dessous permet de synthétiser les différentes phases de la démarche.

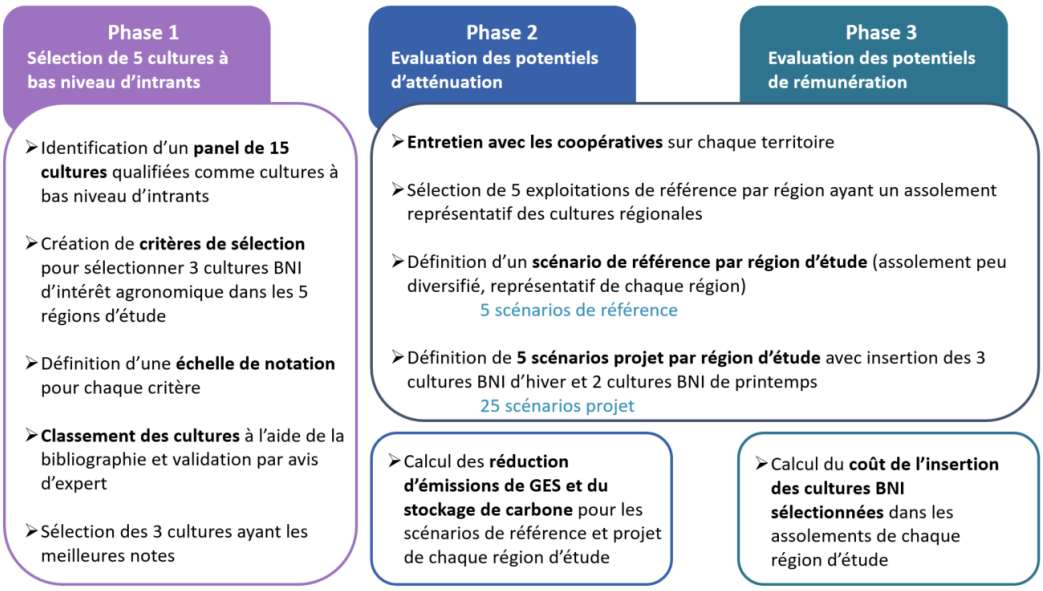


Figure 5 : Présentation de la démarche mise en place pour répondre à la problématique, décomposée en 3 phases.

IV. Matériels et méthodes

IV.1. Sélection des cultures à étudier

IV.1.1. Zone d'étude

Ce stage s'inscrit dans la continuité de l'étude menée entre Agrosolutions, Bioline et les coopératives du réseau InVivo qui consistait à évaluer le potentiel de la transition carbone sur un échantillon de fermes lors de la mise en place de nouvelles pratiques agricoles. Afin d'étudier la variabilité du potentiel de diversification des assolements en grandes cultures, l'étude a été réalisée sur **5 grandes régions administratives** regroupant les zones de chalandise des 5 coopératives partenaires de cette étude : Pays Val de Loire, Hauts de France, Centre-Val de Loire, Ile-de France et Normandie (Figure 6)

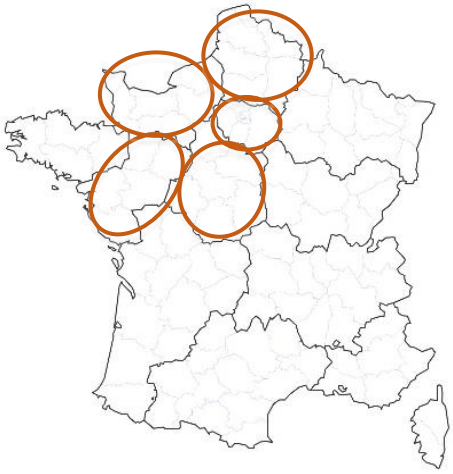


Figure 6 : Carte représentant les régions ciblées dans cette étude (Pays Val de Loire, Hauts de France, Centre-Val de Loire, Ile-de-France et Normandie), regroupant les zones de chalandise des 5 coopératives partenaires de l'étude.

IV.1.2. Caractérisation des cultures de diversification à bas niveau d'intrants

Une étude a été menée par Agrosolutions sur 25 exploitations agricoles pour évaluer le potentiel de la transition carbone (cf. paragraphe I.2.). Suite à la sélection d'un panel de levier pour réduire les émissions de GES, certaines exploitations agricoles ont fait le choix d'insérer de nouvelles cultures à bas niveau d'intrants dans leurs assolements. Cette enquête a permis de recueillir une première liste de culture de diversification. Cette liste a été complétée avec d'autres cultures de diversification identifiées dans la littérature. **Au total, 15 cultures ont été répertoriées** (Tableau 1).

Tableau 1 : Liste des cultures de diversification identifiées, classées par famille.

Fabacées	Poacées	Linacées	Cannabacées	Polygonacées
Pois protéagineux	Sorgho	Lin oléagineux	Chanvre	Sarrasin
Luzerne	Millet	Lin fibre		
Soja	Epeautre			
Féverole	Seigle			
Lentille				
Pois chiche				
Lupin				

Il n'existe pas à l'heure actuelle de définition claire de la notion de cultures à « bas niveau d'intrants » (cultures BNI). Dans cette étude, les cultures BNI sont considérées comme des **cultures à faibles besoins azotés**. L'utilisation de produits phytosanitaires a été étudié en complément mais ne fait pas partie des critères principaux de sélection des cultures. Les

apports moyens azotés (en uN.ha^{-1}) et les IFT moyens sont donnés pour chaque culture listées dans le Tableau 1. Ces indicateurs caractérisant les intrants apportés pour chaque culture de diversification ont été comparés à ceux des 4 grandes cultures principales en France : le blé tendre, l'orge, le colza et le maïs. Ces indicateurs permettent de justifier que l'ensemble des cultures étudiées sont produites à moindres intrants par rapport aux grandes cultures principalement cultivées en France.

IV.1.3. Critères de sélection

Dans cette première étape, nous avons sélectionné 3 cultures de diversification. Ces cultures doivent être pertinentes pour l'amélioration du bilan carbone de l'exploitation. L'objectif de cette étude est d'inciter les agriculteurs à diversifier leur assolement avec des cultures de diversification peu consommatrices en intrants et souvent peu choisies par les agriculteurs car elles sont moins rentables que des cultures de rentes traditionnelles. La sélection des cultures est réalisée sur deux critères :

1. Faisabilité technique : il s'agit de choisir des cultures qui n'aient pas de contrainte technique particulière. L'objectif consiste à inciter leur mise en place dans les assolements dans les 5 années à venir. Il faut donc éviter les cultures ayant des itinéraires culturaux qui présentent des verrous agronomiques.

2. Freins économiques : il s'agit de choisir des cultures dont le marché actuel est structuré ou qui démontre un potentiel de développement. Nous favorisons les cultures ayant une faible rentabilité économique pour soutenir leur développement.

Des indicateurs qualitatifs ont été mis en œuvre pour sélectionner les cultures selon les deux critères présentés précédemment. Des données agronomiques et économiques ont été récupérées à l'échelle nationale pour chaque culture à partir des guides méthodologiques des instituts techniques (Arvalis, Terres Inovia, …) et des fiches cultures de chambres d'agricultures. Les données d'évolution des surfaces agricoles et des rendements produits sont issues du module de données en ligne VISIO de FranceAgriMer (Agreste, 2020). L'évolution des surfaces à l'échelle régionale a été calculée sur 10 ans à partir de la différence entre la surface moyenne 2008-2010 et la surface moyenne 2018-2020. L'utilisation des surfaces moyennes 2008-2010 et 2018-2020 permet de lisser les variations annuelles de production. Il n'y a en revanche pas de données pour l'épeautre, le millet, la luzerne et le sarrasin.

Des notes ont par la suite été attribuées pour évaluer chaque indicateur.

1. Indicateurs de faisabilité technique :

- *Adaptation aux conditions climatiques du territoire* : cet indicateur permet d'évaluer la faisabilité de mise en place des cultures par rapport aux conditions climatiques sur les 5 régions d'étude. Il prend en compte des informations sur les conditions de semis et les préconisations de mise en place des cultures sur différents territoires. La note la plus faible est attribuée aux cultures qui ont des risques de non récolte dans certaines régions ou qui ne sont pas adaptées aux conditions climatiques (Tableau 2). La note intermédiaire est donnée aux cultures qui sont bien adaptées à certains territoires et

incertaine dans d'autres territoires. La note la plus élevée est attribuée aux cultures bien adaptées aux 5 régions.

Tableau 2 : Echelle de notation pour l'adaptation des cultures aux différents territoires.

Echelle de classement	Peu ou pas adapté aux 5 régions	Plus ou moins adaptées aux 5 régions	Bien adapté aux 5 régions
Note	1	2	3

- *Contraintes agronomiques* : cet indicateur permet de rendre compte de la présence de verrous techniques ou contraintes agronomiques pour chaque culture. Il prend en compte les contraintes au niveau des pratiques culturales, du développement de variétés adaptées, du type de matériel utilisé et de la sensibilité aux maladies, ravageurs et adventices. Les notes sont attribuées en fonction du niveau de contrainte technique et agronomique, la note la plus faible étant celle attribuée aux cultures ayant le plus de contraintes (Tableau 3).

Tableau 3 : Echelle de notation pour la caractérisation des cultures en fonction des contraintes agronomiques.

Echelle de classement	Peu ou pas de contraintes	Quelques contraintes	Beaucoup de contraintes
Note	3	2	1

2. <u>Indicateurs des freins économiques</u> :

- *Insertion sur le marché* : l'objectif est d'identifier le marché de chaque culture par rapport à son potentiel de déploiement, à la structuration de la filière, à sa situation face aux concurrents, … Cet indicateur s'appuie sur des données issues d'études de marché et d'analyses économiques des filières de production. L'analyse de l'évolution des surfaces de chaque culture sur les 10 dernières années a permis de mettre en évidence des tendances d'évolution de productions. La note la plus élevée est octroyée aux cultures ayant un marché avec un potentiel de déploiement et inversement pour les cultures n'ayant pas de potentiel de déploiement (Tableau 4).

Tableau 4 : Echelle de notation pour la caractérisation des cultures en fonction du potentiel du développement des marchés.

Echelle de classement	Marché saturé / de niche ou sans potentiel de déploiement	Marché au potentiel de déploiement limité / en cours	Marché avec potentiel de déploiement
Note	1	2	3

- *Rentabilité économique* : cet indicateur reprend les marges brutes moyennes des différentes cultures issues de guides méthodologiques d'instituts techniques ou de fiches cultures régionales. La note la plus haute permet de rendre compte des cultures qui ont une plus faible rentabilité économique (Tableau 5).

Tableau 5 : Echelle de notation des cultures en fonction de leurs rentabilités économiques.

Echelle de classement	Marge brute ≤ 500 €.ha^{-1}	Marge brute]500 ; 800] €.ha^{-1}	Marge brute > 800 €.ha^{-1}
Note	3	2	1

Les notes attribuées à chaque indicateur ont été sommées en un score final. Les 3 meilleurs scores ont permis de faire la sélection des 3 cultures qui ont par la suite été étudiées tout au long de l'étude. Des entretiens avec des responsables agronomiques ou conseillers techniques des 5 coopératives ont été réalisés. Ces échanges ont permis de discuter et valider la sélection des cultures de diversification (validation à dires d'experts) comme des cultures d'intérêt sur les territoires.

IV.2. Evaluation des potentiels de réductions d'émissions et de stockage de carbone

IV.2.1. Création de scénarios de référence et des simulations d'insertion des cultures à faibles besoins azotés

Les simulations mises en place dans le cadre du label bas-carbone ont une **durée de 5 ans**. Les réductions d'émissions sont calculées à partir de la **différence entre les émissions et le stockage de carbone d'un scénario de référence et des simulations d'insertion de leviers**. Ainsi, sur chaque territoire ont été définis **un scénario de référence** et **5 simulations** pour l'insertion des 3 cultures à faibles besoins azotés sélectionnées, dont 2 cultures qui présentent des variétés d'hiver et de printemps. Nous avons choisi un scénario de référence spécifique, c'est-à-dire un scénario basé sur la réalisation d'un diagnostic initial de chaque système de culture d'une exploitation agricole. Le diagnostic est établi à partir des pratiques culturales moyennes des 3 années précédant le début du projet. **Une exploitation agricole de référence a été sélectionnée sur chaque territoire** et validée lors des entretiens avec les coopératives (Tableau 6). Nous avons sélectionné un panel d'exploitations agricoles présentant des assolements représentatifs par rapport aux cultures dominantes de chaque région. L'ensemble des données collectées lors des diagnostics de ces exploitations réalisés en amont de cette étude ont pu être réutilisées dans le cadre de ce mémoire. Des entretiens réalisés avec des responsables techniques des 5 coopératives ont permis de collecter des données pour la création de simulations.

Tableau 6 : Noms des exploitations de référence sélectionnées associées aux différentes régions d'études.

Région d'étude	**Exploitation de référence**
Centre-Val de Loire	Exploitation A
Pays de la Loire	Exploitation B
Normandie	Exploitation C
Hauts-de-France	Exploitation D
Ile-de-France	Exploitation E

IV.2.1.1. Scénario de référence

Dans cette étude, les scénarios de référence de cette étude reposent sur les assolements moyens des 3 dernières années de chaque exploitation. Les assolements moyens des exploitations sont présentés en Annexe 2. Les données d'analyse de sol, de fertilisation minérale et organique et les rendements des cultures des 3 années précédant le projet ont été utilisées pour créer le scénario de référence.

IV.2.1.2. Simulations d'insertion des cultures à faibles besoins azotés

Dans les simulations réalisées, une culture à faible besoin azoté est introduite à hauteur de **15% de la SAU totale** chaque année sur les 5 années de modélisation (Figure 7). Si cette culture était déjà présente dans l'assolement de référence, nous en avons ajouté 15% supplémentaire. Cette proportion de culture à faible besoin azoté a été validée lors des entretiens avec les coopératives. Les échanges avec les coopératives ont également permis de définir les modifications techniques associées au changement d'assolement et à l'introduction des cultures à faibles besoins azotés par rapport au scénario de référence (cultures substituées, rendement, fertilisation, culture intermédiaire, …). Dans la majorité des cas, la culture BNI introduite substitue de manière égale l'ensemble des cultures présentes dans le scénario de référence. Dans certains cas, les responsables techniques des coopératives ont préconisé les cultures préférentielles de substitution. Une attention particulière a été portée à l'adaptation des cultures BNI aux types de sols des différents systèmes de culture. Les contraintes d'implantation des cultures en fonction des types de sol sont résumées dans l'Annexe 3.

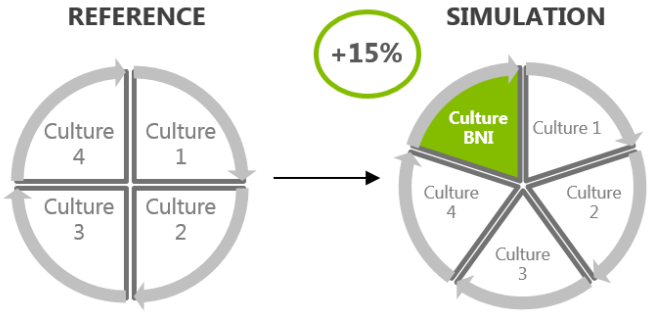


Figure 7 : Modélisation de la simulation d'insertion d'une culture BNI par rapport au scénario de référence. La culture BNI est introduite sur 15% de la surface totale de l'exploitation. La simulation prend donc en compte une réduction de 15% des autres cultures initialement présentes dans le scénario de référence. Le nouvel assolement est défini pour les 5 années de simulation.

La fertilisation minérale des cultures de diversification étudiées a été définie à partir des guides méthodologiques de Terres Inovia. Une réduction de la fertilisation a été prise en compte pour la culture suivant une légumineuse. La dose d'azote restituée par les résidus de culture a été estimée à 15 $uN.ha^{-1}$ à l'aide de la table de minéralisation des résidus de culture définie dans le guide méthodologique COMIFER (ARVALIS - Institut du végétal, INRA, 2012). De la même manière, la restitution azotée des cultures intermédiaires a été estimée à 10 $uN.ha^{-1}$.

Des hypothèses ont été réalisées pour modéliser les simulations. Les rendements des cultures dans les simulations sont égaux aux rendements moyens utilisés dans les scénarios de référence. Seuls les rendements des cultures à faibles besoins azotés ont été adaptés pour chaque région suite à l'entretien avec les coopératives. Les rendements en pois et en lin sont équivalents pour les variétés d'hiver et de printemps. On suppose que la consommation de carburant reste inchangée entre les scénarios de référence et les simulations. Lorsque les informations n'étaient pas disponibles à l'échelle des coopératives, les données issues des guides méthodologiques des cultures ont été utilisées. Le Tableau 7 résume les données utilisées pour construire les scénarios de référence et projet ainsi que la collecte des données.

Tableau 7 : Synthèse des données utilisées pour la construction des scénarios de référence et des scénarios projet et méthode de collecte des données. En vert sont indiquées les modifications techniques associées au changement d'assolement et à l'introduction de la culture BNI.

	RÉFÉRENCE **REF1 - REF2 - REF3**	**PROJET** **A1 - A2 - A3 - A4 - A5**
Collecte de données	➢ Réalisation d'un diagnostic initial de chaque système de culture ➢ Recensement des pratiques culturales des 3 ans avant projet	➢ Réalisation d'enquêtes auprès des coopératives de chaque territoire ➢ Discussion sur les modifications techniques associées au changement d'assolement et à l'introduction d'une culture BNI
	⬇	⬇
Assolement	Assolement des 3 dernières années avant projet	Assolement moyen des 3 années avant projet + 15% de culture BNI - 15% de cultures substituées
Rendement	Rendements des 3 dernières années avant projet	Rendements moyens des 3 années avant projet
Fertilisation minérale et organique	Fertilisation minérale et organique des 3 dernières années avant projet	Fertilisation moyenne des 3 années avant projet Réduction de la fertilisation lors de l'insertion de légumineuses en culture BNI
Cultures intermédiaires	Cultures intermédiaires présentes sur les 3 dernières années avant projet	Culture intermédiaires déjà présentes avant projet + Cultures intermédiaires avant cultures BNI de printemps insérées

IV.2.2. Périmètre d'application de la méthode

La méthode Grandes Cultures du label bas-carbone est applicable aux ateliers de grandes cultures d'une exploitation agricole. Les calculs de réduction d'émissions sont réalisés à l'échelle du **système de culture**. Nous entendons un système de cultures dans notre étude comme la combinaison entre le contexte pédoclimatique et la stratégie culturale.

IV.2.3. Calcul des réductions d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle des systèmes de culture

Les Réductions d'Emissions (RE) correspondent à la différence entre le bilan carbone net de référence de l'exploitation (calculé sur les 3 dernière années) et son bilan carbone net estimé pour les 5 années à venir (scénario de transition avec insertion d'une culture à faible besoin azoté sur 15% de la surface cultivée). Les RE correspondent à la quantité de CO_2 évitée

d'après la méthode de calcul du label bas-carbone. Si les RE sont positives, cela signifie qu'il y a une amélioration du bilan carbone net de l'exploitation entre la période de référence et le projet de transition planifié pour les 5 prochaines années. Les RE générées par l'insertion d'une culture à faible besoin azoté correspondent alors à des crédits carbone.

La méthode d'évaluation des RE est définie dans la méthode Grandes Cultures. Les équations principales sont détaillées ci-dessous. Les calculs ont été réalisés à l'aide d'un calculateur développé par les équipes d'Agrosolutions. Il est nécessaire de remplir un questionnaire reprenant les données du scénario de référence et du scénario projet. Il faut également remplir des données dans l'outil SIMEOS-AMG pour réaliser les modélisations de stockage de carbone. Les informations à saisir sont compilées dans l'Annexe 4.

Les RE totales générées par la mise en place du levier d'insertion de culture à faible besoin azoté sont définies comme la somme des réductions d'émissions classiques, réductions d'émissions indirectes en amont ($RE_{émissions}$), des RE associées au stockage de carbone dans les sols ($RE_{stockage}$) et des RE indirectes à l'aval de l'exploitation (RE_{aval}). Nous ne prendrons pas en compte les RE_{aval} pour le levier « insertion de culture à faibles besoins azotés » qui n'apporte aucune modification significative.

$$RE = RE_{émissions} + RE_{stockage} + RE_{aval}$$

Avec :

- $RE_{émissions}$, les réductions d'émissions effectuées associées aux réductions d'émissions de gaz à effet de serre classiques et aux réductions d'émissions indirectes amont (en teqCO_2)

- $RE_{stockage}$, les réductions d'émissions effectuées associées au stockage de carbone dans les sols par le Projet exprimée en tonnes équivalent CO_2 (en teqCO_2)

- RE_{aval}, les réductions d'émissions indirectes à l'aval de l'exploitation (réduction des émissions de GES liées au séchage des productions, à la production de biomatériaux et de matières protéiques pour l'alimentation animale en substitution au soja) (en teqCO_2)

IV.2.3.1. RE émissions

Les RE classiques comprennent les RE liées à la fertilisation minérale et organique ($RE_{fertilisation}$), les RE liées à la consommation d'énergie fossile pour les engins agricole et l'irrigation ($RE_{combustibles}$) et les RE liées au stockage et au séchage des productions ($RE_{séchage\ stockage}$). Le calcul des $RE_{fertilisation}$ est détaillé dans l'Annexe 5.

$$RE_{émissions} = RE_{fertilisation} + RE_{combustibles} + RE_{séchage\ stockage}$$

Avec :

- $RE_{fertilisation}$: les réductions d'émissions directes et indirectes amont permises par la mise en œuvre des leviers fertilisation sur l'ensemble des systèmes de culture de l'exploitation

- $RE_{combustibles}$: les réductions d'émissions directes et indirectes amont permises par les réductions de consommation d'énergie fossile pour les engins et l'irrigation sur l'ensemble des systèmes de culture de l'exploitation

- $RE_{séchage/stockage}$: les réductions d'émissions directes et indirectes amont permises par les réductions de consommation d'énergie fossiles pour le séchage et stockage des productions sur l'exploitation

IV.2.3.2. RE stockage

La méthode Grandes Cultures comptabilise les RE associées au stockage de carbone organique dans les sols. Ces RE sont calculées à partir de la différence de stocks entre le scénario de référence et les simulations (Delta $_{stockC}$).

$$RE_{stockage} = \mathrm{Delta}_{\mathrm{stockC}} * \mathrm{a}$$

Avec :

- RE $_{stockage}$, la valeur des réductions d'émissions permise par le stockage de carbone dans les sols ; valeur positive ou négative, exprimée en teqCO_2

- Delta_StockC, évaluation de l'évolution du stock de carbone au regard de la référence (en tC)

- a= facteur de conversion tC en teqCO_2 ; a= $\frac{44}{12}$ (IPCC, 2019)

L'évaluation directe de la variation de stock de carbone organique par des mesures sur le terrain n'est pas possible. Elle nécessiterait un effort d'échantillonnage conséquent et un temps d'attente trop long pour percevoir les effets de la mise en place des pratiques stockantes. L'évaluation du delta de stock est donc effectuée à l'aide d'un modèle de simulation de stockage de carbone dans les sols. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons l'outil SIMEOS-AMG (SIMuler l'évolution de l'Etat Organique des Sols) développé par Agro-Transfert-RT qui utilise le modèle de calcul de bilan humique AMG de l'INRA de Laon. Cet outil permet d'obtenir l'évolution de stock de carbone (en $tC.ha^{-1}$) à partir des données du système de culture (rotation culturale, cultures intermédiaires, amendement organique, travail du sol), des données climatiques et du type de sol.

L'outil SIMEOS-AMG fournit également le flux de biomasse (aérienne et souterraine) restituée au sol en fonction des rendements des cultures et de la part restituée au sol. La différence des flux de biomasse entre les simulations et le scénario de référence ont été calculé dans chaque système de culture pour chaque exploitation. Une moyenne a ensuite été calculée à l'échelle de chaque exploitation.

IV.3. Evaluation des coûts liés à l'insertion de cultures à faibles besoins azotés dans les rotations

IV.3.1. Méthode de calcul de l'impact économique associé au levier

Nous avons évalué l'impact économique de l'insertion de cultures à faibles besoins en azote. La méthode du budget partiel évalue les variations sur les charges et les produits en relation avec ce levier mis en place sur les exploitations agricoles.

L'introduction d'une culture dans l'assolement génère des charges opérationnelles supplémentaires (semences, produits phytosanitaires, engrais) et des charges de structure spécifiques comprenant la main d'œuvre et la mécanisation (travail du sol, semis, destruction). L'ensemble de ces charges sont appelées charges directes. Il y a une diminution des charges directes associées aux cultures substituées. Le produit brut correspond à la somme de la valeur de production brute agricole et des aides couplées (hors DPB ; Droits à Paiement de Base). On comptabilise dans cette méthode la réduction des produits bruts des cultures substituées et l'augmentation des produits bruts des cultures insérées.

Dans le cas de l'insertion d'une légumineuse dans l'assolement, l'économie d'azote minéral sur la culture suivante permet de réduire des charges de fertilisation de 15 uN.ha^{-1} (COMIFER, INRA, ARVALIS 2012). Des cultures intermédiaires sont ajoutées avant les cultures BNI de printemps dans les simulations. La mise en place de l'interculture génère des charges de semences et des charges de mécanisation supplémentaires mais permet d'économiser 10 uN.ha^{-1} grâce à la biomasse restituée.

La comparaison du différentiel de charges directes et des produits bruts permet ainsi d'évaluer la marge directe. Nous parlons ici de différentiel de **marge directe**.

$$\begin{aligned} Marge\ directe &= Produit\ brut - Charges\ directes \\ &= (Rendement * Prix\ de\ vente + aides\ couplées) \\ &\quad - (Charges\ opérationnelles + Charges\ de\ structure\ spécifiques) \end{aligned}$$

L'impact économique de la transition est calculé par différence entre les marges directes des deux scénarios, avant et après mise en place du levier sur les 5 années de projet. Les éléments favorables et défavorables pris en compte dans le budget partiel sont détaillés dans le Tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8 : Exemples des éléments favorables et défavorables pris en compte dans le budget partiel pour le calcul économique de l'insertion d'une culture BNI à la place d'une céréale.

	Éléments favorables		Éléments défavorables	
	Produits en plus	Charges en moins	Produits en moins	Charges en plus
Insertion d'une culture BNI à la place d'une céréale	- Produit brut de la culture BNI	- Charges opérationnelles de la céréale (semence, produits phytosanitaires, engrais) - Charges de structure spécifique de la céréale (mécanisation et main d'œuvre) - Économie d'azote minéral après une légumineuse (15 uN.ha^{-1}) et après les cultures intermédiaires (10 uN.ha^{-1}) - Charges associées aux cultures intermédiaires introduites avant les céréales de printemps	- Produit brut de la céréale	- Charges opérationnelles de la culture BNI (semence, produits phytosanitaires, engrais) - Charges de structure spécifique de la culture BNI (mécanisation et main d'œuvre) - Charges associées aux cultures intermédiaires introduites avant les cultures BNI de printemps

IV.3.2. Sources de données utilisées

Dans cette étude, des données ont été adaptées en fonction des régions concernées. Les données de prix de vente et de charges opérationnelles ont été ajustées suite aux informations recueillies auprès des coopératives de chaque territoire et aux données d'enquêtes régionalisées menées par Terres Inovia (Lecomte et Canale, 2021 ; Lecomte, 2021). Le produit a été calculé sur la base des rendements réalisés sur chaque exploitation agricole de référence. Lorsque des données étaient manquantes à l'échelle des coopératives, nous avons utilisé la base de données construite par Agrosolutions présentant des références nationales. Dans cette base de données, les charges opérationnelles sont issues de données provenant de centres de gestion locaux, de chambres d'agriculture départementales, d'organismes de recherche tels qu'Arvalis et l'Inrae et d'organismes privés. Les charges de structure spécifiques (charges de mécanisation et main d'œuvre) sont issues du barème d'entraide agricole de l'APCA 2020-2021 (Chambres d'Agriculture France). Le barème

d'entraide comptabilise les coûts d'amortissement, le gasoil, la réparation et l'entretien du matériel agricole. Les coûts de main d'œuvre sont pris en compte à hauteur de 20 €/heure. L'Annexe 6 résume les références utilisées pour la réalisation des calculs économiques dans chaque région.

IV.3.3. Coût des crédits carbone

Un crédit carbone est une unité qui correspond à une tonne équivalent CO_2 réduite. On évalue le coût du crédit carbone en divisant le coût de l'insertion des cultures à faibles besoins azotés (€.ha^{-1}.an^{-1}) par les réductions d'émissions générées par ce levier (teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}). Le coût d'un crédit carbone correspond donc au coût d'évitement d'une tonne de CO_2.

IV.4. Analyse de données statistiques

On cherche à voir s'il y a des différences significatives au niveau des réductions d'émissions et des coûts de mise en place des cultures de diversification en fonction des territoires et des cultures choisies.

Nous avons établi un jeu de données comprenant 3 types de résultats :

- Les réductions d'émissions (RE, RE $_{stockage}$, RE $_{fertilisation}$)
- Les coûts associés au changement d'assolement
- Les flux de biomasse restituées

Nous avons calculé ces données pour les 5 simulations d'insertions de cultures sur les 5 régions étudiées. Des analyses graphiques et des analyses statistiques ont été effectuées sur ce jeu de données avec le logiciel R (version 4.1.0). Des analyses de variance (ANOVA) avec un risque α de 5% ont été réalisées pour étudier l'effet des modalités (cultures insérées dans les assolements et territoires) sur les variables quantitatives (RE, coût du levier). Les conditions d'application de l'ANOVA (normalité, indépendance et homoscédasticité des résidus) ont été vérifiées. Un test post-hoc de Tukey a été réalisé pour les modalités ayant un effet significatif sur une variable d'intérêt.

V. Résultats

V.1. Sélection des cultures de diversification

La synthèse des informations collectées pour la sélection des 3 cultures à bas niveau d'intrants est présentée en Annexe 7.

V.1.1. Des cultures à moindre besoins en intrants

Sur les 15 cultures de diversification identifiées, la majorité ont des apports azotés inférieurs à 100 uN.ha^{-1} (Figure 8). Le blé tendre, l'orge, le colza et le maïs ont des apports moyens supérieurs à 150 uN.ha^{-1}. Les légumineuses n'ont pas besoin d'apport azoté. Elles fixent directement l'azote atmosphérique par l'intermédiaire d'une symbiose avec les

bactéries rhizobium contenus dans les nodules racinaires des légumineuses. Les apports azotés des autres cultures de diversification sont inférieurs à 50% de l'apport moyen des quatre grandes cultures évalué à 189 uN.ha^{-1} (blé tendre, orge, colza, maïs). Ces cultures de diversification ont donc de faibles besoins azotés par rapport aux grandes cultures de référence.

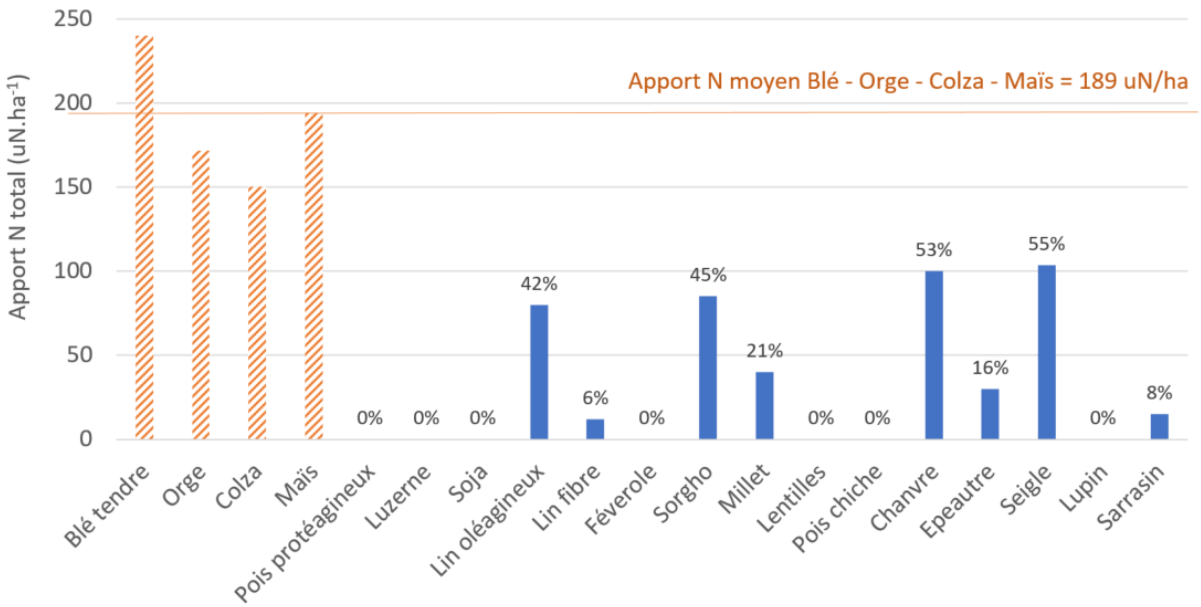


Figure 8 : Apports azotés moyens des 15 cultures de diversification identifiées (en bleu) et des quatre cultures principales en France (blé tendre, orge, colza, maïs). Les pourcentages correspondent à la proportion des apports azotés des cultures de diversification par rapport à la moyenne des apports azotés des 4 grandes cultures que sont le blé tendre, l'orge, le colza et le maïs (apport azoté moyen de 189 uN.ha^{-1}).

L'indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT) représente le nombre de doses de référence de produits phytosanitaires utilisées par hectare au cours d'une campagne culturale. Les IFT moyens des cultures de diversification identifiées varient de 0 à 5,1 (Annexe 8). Parmi les quatre grandes cultures de références, le maïs est la culture qui nécessite le moins de traitement (IFT de 2,9) tandis que le colza est régulièrement traité (IFT de 6,6). Dans l'ensemble, les cultures de diversification sont quasiment toutes inférieures à l'IFT moyen des quatre cultures de référence (IFT de 4,9).

V.1.2. Faisabilité technique de la mise en place des cultures

V.1.2.1. Des cultures adaptées aux conditions climatiques des régions d'études

Les cultures de diversification étudiées sont en grande majorité adaptées aux conditions climatiques des régions d'étude (Annexe 9). Le sorgho et le pois chiche se distinguent car ce sont des cultures plus adaptées au climat méditerranéen, capables de supporter des températures élevées et des stress hydriques relativement importants. Des risques de non récolte du pois chiche dans les régions Normandie et Hauts de France sont indiqués dans le guide méthodologique de l'institut technique Terres Inovia. Ces deux cultures sont donc peu adaptées aux régions d'études situées dans la moitié Nord du territoire français.

Le soja, le lin fibre, la féverole, la lentille, le lupin et le sarrasin sont classés dans la catégorie intermédiaire. Leur production peut être incertaine dans certaines régions et peu documentée dans les guides méthodologiques et les fiches techniques.

V.1.2.2. Des cultures avec peu de contraintes agronomiques

Le soja, le sorgho et le sarrasin sont les 3 cultures ayant le moins de contraintes agronomiques (Annexe 9). En effet, le soja ne nécessite que très peu de traitements contre les maladies et ravageurs, le sorgho ne demande pas de matériel spécifique et le sarrasin est une culture peu contraignante, n'ayant pas de ravageur spécifique. En revanche, l'épeautre et le lupin ont des contraintes agronomiques fortes. L'épeautre n'a pas de variété classée dans le catalogue français et est très sensible aux maladies du pied. Le lupin est une culture technique manquant de références agronomiques et de produits phytosanitaires homologués. Il est très sensible aux conditions climatiques. Les autres cultures listées ont quelques contraintes, qui ne pénalisent toutefois pas complétement leur développement : pois protéagineux, féverole et lentille (risque aphanomyces[2] pour le pois et bruche[3] pour la féverole et la lentille), luzerne (matériel de récolte spécifique), lin oléagineux, lin textile et chanvre (technicité de production / récolte), millet (peu de variété) et enfin le pois chiche (nécessité d'inoculation dans la zone Nord et pas d'inoculum homologué).

V.1.3. Freins économiques à la mise en place des cultures

V.1.3.1. Des cultures ayant un marché avec un potentiel de déploiement

Les 15 cultures de diversification sont peu présentes sur les 5 régions d'études. Les cultures de diversification listées en caractère gras dans le tableau de l'Annexe 10 représentent au total 6% de la proportion de grandes cultures en Centre Val de Loire, 6.8% dans les Hauts de France, 6.3% en Ile de France, 4.9% dans le Pays de la Loire et 12.6% en Normandie. Dans les régions Hauts de France et Normandie, la culture de lin textile occupe la majeure partie de l'assolement des cultures de diversification (respectivement 4.0% et 10.1%). A l'échelle de l'ensemble des régions, le pois protéagineux occupe en moyenne 2% des surfaces de grandes cultures. La proportion des autres cultures varie en fonction des régions de production. Les surfaces de lentille, pois chiche, chanvre, seigle et lupin sont globalement marginales dans l'ensemble des régions d'étude.

L'étude de l'évolution des surfaces sur les 10 dernières années permet de mettre en évidence l'émergence de certaines cultures. Le soja, le sorgho, la lentille et le pois chiche ont des pourcentages d'évolution très élevés (supérieur à 700% pour le soja par exemple). Ces pourcentages d'évolution sont à nuancer car les surfaces de ces cultures sont initialement très faibles voire nulles.

Le potentiel de déploiement des cultures est **dépendant de l'organisation de leurs filières** et peut être très variable d'une culture à une autre dans les différentes régions. Le lin oléagineux, la féverole alimentaire et le pois chiche ont des **marchés structurés** grâce à la coordination des acteurs de la filière. Le marché du lin oléagineux est par exemple structuré

[2] Aphanomyces (*Aphanomyces euteiches) : maladie de la pourriture racinaire du pois*
[3] Bruche : coléoptère, ravageur

autour de l'opérateur Valorex qui propose des contrats à prix garantis pour sécuriser la vente et soutenir les producteurs de graines de lin via notamment la certification Bleu Blanc Cœur. Le pois chiche a un débouché en alimentation humaine mais cette culture n'est pas éligible à la prime protéagineuse et peine à se développer face aux importations massives. Le lupin, le sorgho, la féverole pour l'alimentation animale ont des chaînes de production peu coordonnées ce qui limite leurs potentiels de déploiement. D'autres cultures aux débouchés limités ont uniquement des **marchés de niche** : millet (filière oisellerie marginale), lentilles (marché de niche, contraintes liées aux critères de qualité), épeautre (pas de marché pour l'épeautre non décortiqué), seigle (anciennement cultivé mais fortement concurrencé par le triticale), sarrasin (marché saturé). Certaines cultures ont une situation intermédiaire avec un marché structuré mais en concurrence avec d'autres productions : chanvre (concurrence avec la laine de verre pour l'isolation), lin textile (concurrence avec le coton), luzerne (concurrence des granulés de luzerne avec le soja pour l'alimentation animale).

L'analyse croisée de l'évolution des surfaces et des potentiels de déploiement des marchés permet de mettre en évidence les cultures ayant des potentiels de déploiement les plus prometteurs pour les années à venir (Annexe 9).

V.1.3.2. Des cultures à faible rentabilité

Les cultures de diversification étudiées ont des marges brutes variables (Annexe 9). 6 cultures ont des marges brutes moyennes inférieures à 500 €.ha^{-1} (pois protéagineux, luzerne, féverole, sorgho, millet, sarrasin), 6 autres cultures ont des marges brutes moyennes entre 500 et 800 €.ha^{-1} (soja, lin oléagineux, chanvre, épeautre, seigle et lupin) et seulement trois cultures sont au-dessus de 800 €.ha^{-1} (lin fibre, lentilles, pois chiche).

V.1.4. Bilan du classement

D'après le Tableau 9, deux cultures se détachent du classement avec des notes supérieures ou égales à 10 (pois protéagineux et soja) et 6 cultures ont une note égale à 9 (luzerne, lin oléagineux, féverole, millet, chanvre, sarrasin). En revanche, parmi ces 6 cultures, seulement 3 ont une note supérieure à 1 pour l'indicateur « insertion sur le marché » (lin oléagineux, féverole, chanvre). A la suite des entretiens avec les coopératives, nous avons convenu qu'il serait intéressant d'étudier l'insertion du lin oléagineux dans les assolements de grandes cultures. Cette classification permet donc de sélectionner les 3 cultures d'intérêt pour cette étude : **pois protéagineux, soja, lin oléagineux.**

Tableau 9 : Synthèse des notations des cultures pour chaque indicateur et calcul du bilan total. Le bilan correspond à la somme des notes attribuées à chaque indicateur.

	Adaptation climatique	Contraintes agronomiques	Insertion dans le marché	Marge brute	Bilan
Pois protéagineux	**2,5**	**2**	**3**	**3**	**10,5**
Luzerne	3	2	1	3	9
Soja	**2**	**3**	**3**	**2**	**10**
Lin oléagineux	**3**	**2**	**2**	**2**	**9**
Lin fibre	2	2	1	1	6
Féverole	2	2	2	3	9
Sorgho	1	3	1	3	8
Millet	3	2	1	3	9
Lentilles	2	2	2	1	7
Pois chiche	1	2	1	1	5
Chanvre	3	2	2	2	9
Epeautre	3	1	1	2	7
Seigle	2	2	1	2	7
Lupin	2	1	1	2	6
Sarrasin	2	3	1	3	9

V.2. Potentiels de réductions d'émissions liés à la diversification des cultures

L'objectif de cette partie consiste à évaluer les potentiels de réductions d'émissions de GES associées à la fertilisation et au stockage de carbone lors de l'insertion de cultures à faibles besoins azotés dans les assolements. Les Annexes 11 et 12 présentent les résultats statistiques des analyses de variances ainsi que la validation des hypothèses associée à l'une des analyses.

V.2.1. Réductions d'émissions associées au stockage de carbone dans les sols

L'évolution des stocks de carbone dans les scénarios de référence est différente selon les exploitations (Annexe 13). Les valeurs de RE $_{stockage}$ associées à l'insertion de cultures à faibles besoins azotés sont comprises entre -0,32 et 0,34 teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1} avec une moyenne de -0,06 teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1} (Tableau 10). Le pois protéagineux d'hiver génère des RE $_{stockage}$ négatives pour l'ensemble des exploitations. Les RE $_{stockage}$ les plus élevées sont obtenues pour l'insertion du soja dans les assolements avec une moyenne de 0,12 teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1} sur le panel d'exploitation de l'étude. On remarque que l'introduction des variétés de printemps pour le pois protéagineux et le lin oléagineux permet d'augmenter les réductions d'émissions liées au stockage de carbone de 0,16 à 0,21 teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1} pour le pois et de 0,08 à 0,21 teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1} pour le lin.

Tableau 10 : Réductions d'émissions associées au stockage de carbone organique dans les sols (RE $_{stockage}$ en teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}) lors de l'insertion des cultures à faibles besoins azotés (pois d'hiver, pois de printemps, lin d'hiver, lin de printemps et soja) dans les 5 exploitations de référence.

	Pois d'hiver	Pois de printemps	Lin d'hiver	Lin de printemps	Soja
Exploitation A - Hauts-de-France	-0,17	0,00	0,01	0,08	0,09
Exploitation B - Normandie	-0,32	-0,20	-0,26	-0,16	-0,02
Exploitation C - Pays de la Loire	-0,14	0,07	-0,11	0,10	0,34
Exploitation D - Centre-Val de Loire	-0,12	0,04	-0,13	0,03	0,12
Exploitation E - Ile-de-France	-0,30	-0,14	-0,25	-0,14	0,05
Moyenne	-0,21	-0,05	-0,15	-0,02	0,12

Une corrélation existe entre les réductions d'émissions liées au stockage de carbone organique et le flux de biomasse restituée au sol (Figure 9). Plus le flux de biomasse est élevé et plus les RE $_{stockage}$ sont importantes. La droite de régression linéaire explique 66% de la distribution des points (R^2 = 0,66). On peut noter des flux de biomasse et des réductions d'émissions négatives pour l'exploitation B. Les données qui s'éloignent le plus de la droite de régression sont celles de l'exploitation E.

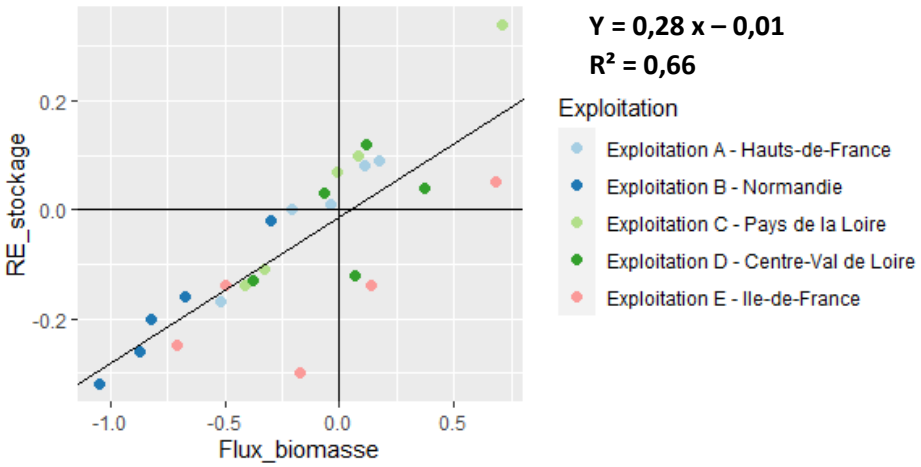


Figure 9 : Réductions d'émissions liées au stockage de carbone organique dans le sol (en teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}) en fonction du flux de biomasse restituée au sol (en TMS.ha^{-1}.an^{-1}). Les points ont été mis en forme avec des couleurs différentes pour chaque exploitation étudiée.

V.2.2. Réductions d'émissions associées à la fertilisation

Les quantités d'engrais azotés apportées ont été réduites dans les projets modélisés sur l'ensemble des exploitations agricoles étudiées (Figure 10). En effet, l'objectif de cette étude vise à réduire la fertilisation en introduisant des cultures à faibles besoins azotés. Les cultures substituées (céréales, oléagineux) ont des besoins azotés élevés pour répondre aux objectifs de production en quantité et en qualité. Le pois protéagineux et le soja n'ont aucun apport azoté et contribue à un apport de 15 uN.ha^{-1} pour les cultures suivantes dans la rotation. Un apport de 70 uN.ha^{-1} est modélisé pour le lin oléagineux.

L'insertion de cultures à faibles besoins azotés à la place de céréales ou d'oléagineux permet de **réduire de 5 à 23% la quantité d'azote apportée** dans l'ensemble des simulations à l'échelle de l'exploitation. Les réductions d'apports d'engrais diffèrent entre exploitations car les doses et la nature des engrais azotés initialement apportés sont propres à chaque exploitation. On observe une **réduction de la fertilisation plus importante pour les légumineuses** (entre 13% et 23%) que pour le lin oléagineux (entre 5% et 10%).

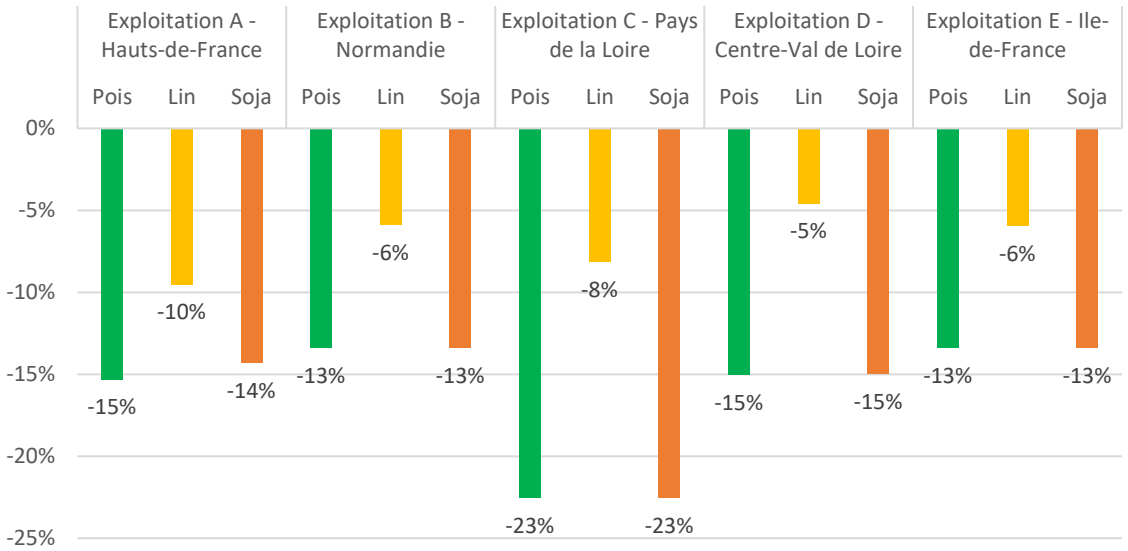


Figure 10 : Réduction de la fertilisation minérale azotée (en %) dans les simulations d'insertion du pois protéagineux, du lin oléagineux et du soja par rapport aux scénarios de référence dans les 5 exploitations d'étude.

Les réductions d'émissions associées à la fertilisation sont **positives** dans toutes les simulations d'insertion des cultures à faibles besoins azotés (Tableau 11). Les $RE_{fertilisation}$ sont équivalentes pour les variétés d'hiver et de printemps pour le pois protéagineux et le lin oléagineux car les mêmes niveaux de fertilisation ont été modélisés. Les $RE_{fertilisation}$ moyennes sur l'ensemble des exploitations s'élèvent à 0,15 $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$ pour le lin oléagineux, 0,28 $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$ pour le soja et 0,29 $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$ pour le pois protéagineux.

Tableau 11 : Réductions d'émissions associées à la fertilisation minérale et organique (en $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$) lors de l'insertion des cultures à faibles besoins azotés (pois d'hiver, pois de printemps, lin d'hiver, lin de printemps et soja) dans les 5 exploitations de référence.

	Pois d'hiver	Pois de printemps	Lin d'hiver	Lin de printemps	Soja
Exploitation A - Hauts-de-France	0,36	0,36	0,26	0,26	0,33
Exploitation B - Normandie	0,28	0,28	0,14	0,14	0,29
Exploitation C - Pays de la Loire	0,26	0,26	0,13	0,13	0,27
Exploitation D - Centre-Val de Loire	0,23	0,23	0,07	0,07	0,23
Exploitation E - Ile-de-France	0,31	0,31	0,15	0,15	0,30
Moyenne	0,29	0,29	0,15	0,15	0,28

La Figure 11 détaille les postes de réductions d'émissions associés à la fertilisation. A l'échelle de l'ensemble des simulations, nous constatons que les RE $_{fertilisation}$ se font pour 49% sur le N_2O, 33% sur les GES en amont liées à la fabrication des engrais minéraux, 8% sur la lixiviation du N_2O et 3% sur la volatilisation du N_2O.

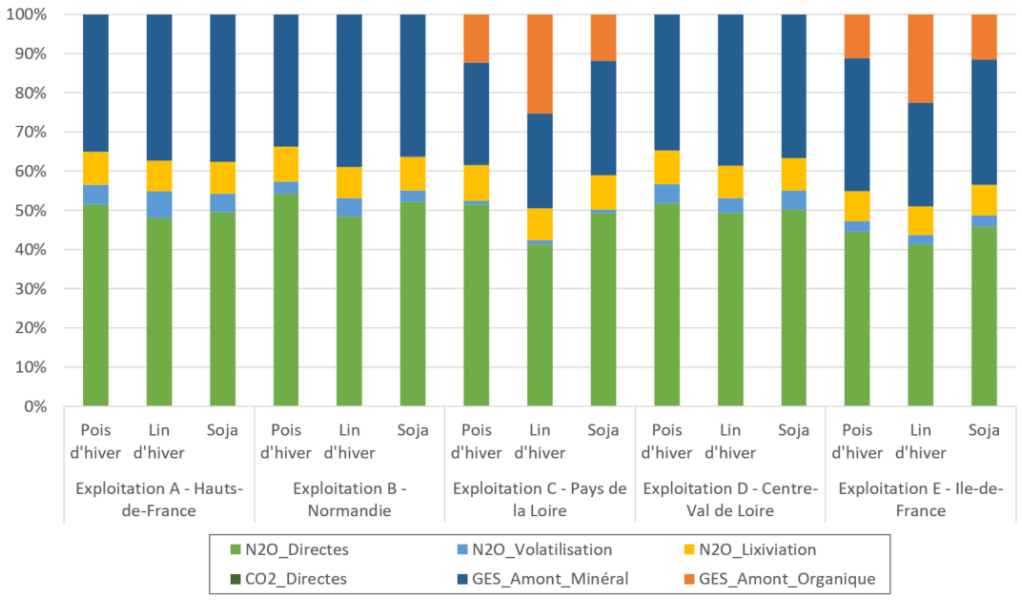


Figure 11 : Détail des réductions d'émissions (en % par rapport au RE $_{fertilisation}$ totales) associées à la fertilisation lors de l'introduction des cultures de diversification (pois protéagineux, lin oléagineux et soja) dans les 5 régions d'études.

V.2.3. Bilan des réductions d'émissions

Les réductions d'émissions globales regroupent les RE $_{stockage}$ et les RE $_{fertilisation}$. L'introduction des cultures à faibles besoins azotés génère **en grande majorité des réductions d'émissions positives** sur l'ensemble des exploitations allant jusqu'à 0,57 $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$ (Figure 12). Quelques modélisations génèrent des réductions d'émissions globales négatives avec un minimum de -0,12 $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$. L'insertion du soja dans les assolements engendre les réductions d'émissions les plus élevées dans toutes les exploitations (de 0,27 à 0,57 $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$), suivi du pois protéagineux d'hiver (de -0,05 à 0,19 $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$) et enfin du lin oléagineux d'hiver (de -0,12 à 0,27 $teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}$). On note en revanche des RE plus importantes pour le lin d'hiver par rapport au pois d'hiver dans l'exploitation A. Les cultures insérées dans les assolements ont un effet significatif sur les réductions d'émissions totales (p-value = 0,001). Le test post-hoc de Tukey permet de mettre en évidence une différence significative des RE obtenues pour l'insertion du soja avec l'insertion du lin d'hiver, lin de printemps et du pois d'hiver. Le soja est donc une culture de diversification qui se distingue par un **potentiel de réduction d'émissions plus élevé** que les autres cultures étudiées. L'Annexe 14 présente les résultats de réductions d'émissions totales par hectare de cultures à faibles besoins azotés introduites dans les assolements.

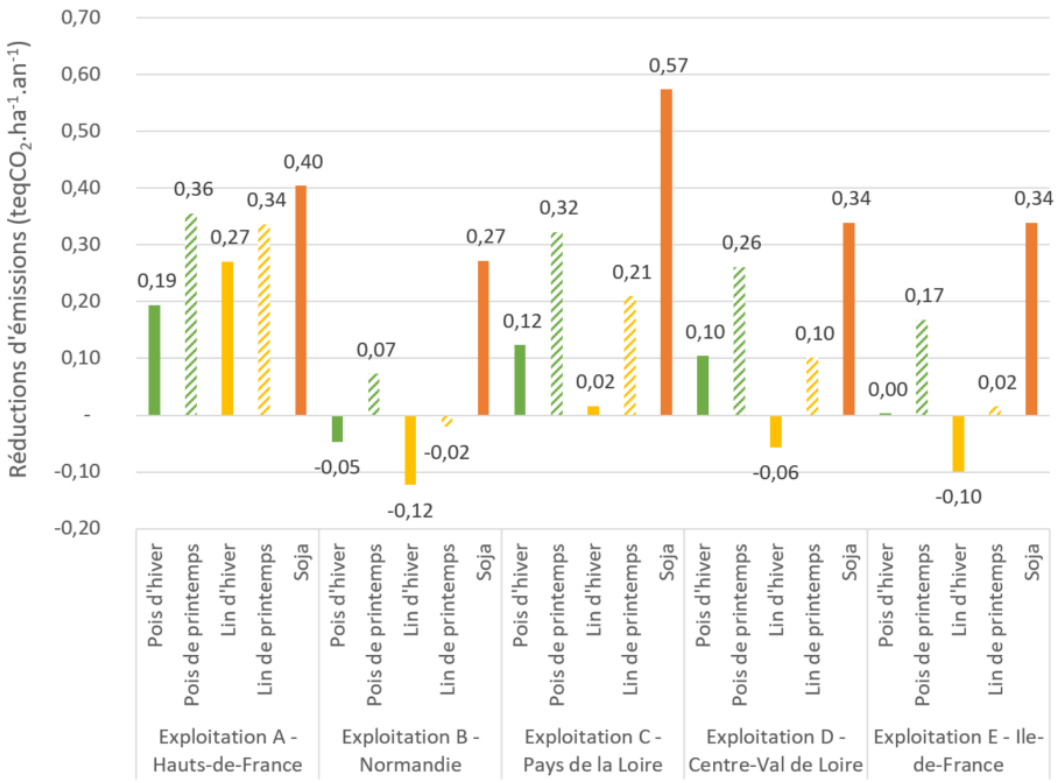


Figure 12 : Réductions d'émissions totales (en teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}) définies comme la somme des RE $_{stockage}$ et RE $_{fertilisation}$ pour l'introduction des cultures (pois protéagineux d'hiver, lin oléagineux d'hiver et soja) et de deux variétés de printemps (distinguées avec des rayures).

Comme il a été montré pour les RE $_{stockage}$, l'introduction des variétés de printemps améliorent les RE totales pour le pois protéagineux et le lin oléagineux dans toutes les exploitations.

Sur la Figure 12, on remarque que l'insertion du pois d'hiver, du lin d'hiver et du lin de printemps génèrent des RE négatives pour l'exploitation B localisée dans la région Normandie. Nous n'observons pas de dynamique particulière des réductions d'émissions pour les autres exploitations. L'ANOVA réalisée ne montre pas de différence significative des RE en fonction des exploitations étudiées (p-value = 0,0671).

V.3. Potentiels de rémunération liés à la diversification des cultures

Cette partie consiste à étudier le coût de l'insertion de cultures à faibles besoins azotés dans les assolements et le potentiel de crédits carbone associé.

V.3.1. Variabilité des marges directes des cultures de diversification

Les marges directes sont calculées comme la différence entre le produit brut et la somme des charges opérationnelles et des charges de mécanisation comprenant le coût de la main d'œuvre. On observe sur la Figure 13 une faible variabilité des données de charges. La variabilité de la marge directe est principalement associée à la variabilité des rendements et

des prix de vente dans les exploitations de chaque territoire. Il en est de même pour les cultures initialement présentes dans les assolements des exploitations.

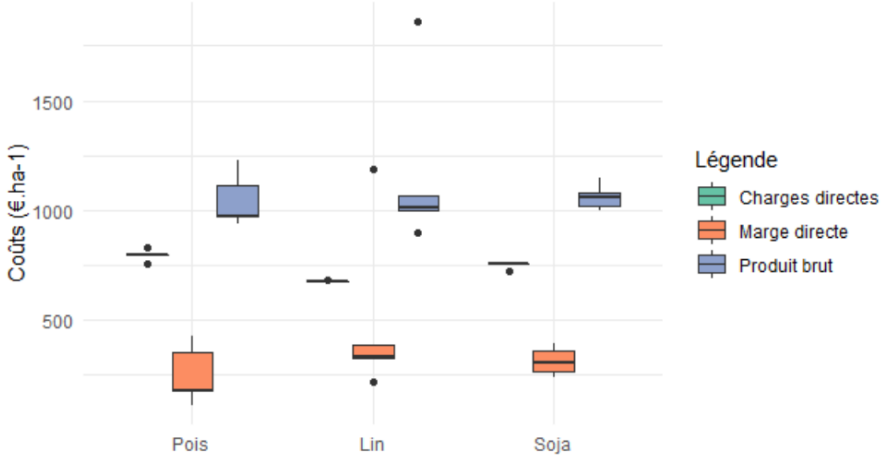


Figure 13 : Variabilité de la marge directe, du produit brut et des charges directes (charges opérationnelles et charges de structure spécifiques) pour les cultures à faibles besoins azotés (pois protéagineux, lin oléagineux et soja) insérées dans les assolements dans les simulations (en €.ha^{-1}).

V.3.1. Evaluation du coût de la transition carbone

L'insertion de cultures à faibles besoins azotés dans les assolements de grandes cultures génère dans la plupart des cas un **coût supplémentaire** (Figure 14). Seules **3 modélisations d'introduction du lin oléagineux induisent des économies de coûts** : insertion du lin d'hiver et du lin de printemps dans l'exploitation A et insertion du lin l'hiver dans l'exploitation E. Le coût de la transition à l'échelle de l'ensemble des exploitations est compris entre - 94 et 127 €.ha^{-1}.an^{-1} avec une moyenne de 37 €.ha^{-1}.an^{-1}. Nous n'observons pas de tendance particulière du coût de la transition en fonction des cultures insérées (p-value = 0,18). On remarque cependant que les coûts moyens se distinguent en fonction des régions d'étude. L'exploitation B sur la région Normandie a le coût moyen d'insertion de cultures BNI le plus élevé, suivi de l'exploitation C (Pays de la Loire), puis l'exploitation D (Centre-Val de Loire) et enfin l'exploitation E (Ile-de-France). Le coût moyen de l'exploitation A est tiré vers le bas car l'insertion du lin qui a un rendement élevé créé une marge directe élevée par rapport aux cultures initialement présentes. L'ANOVA ne permet cependant pas de valider une différence significative du coût de la transition en fonction des régions d'étude car les hypothèses de validité ne l'ANOVA ne sont pas vérifiées.

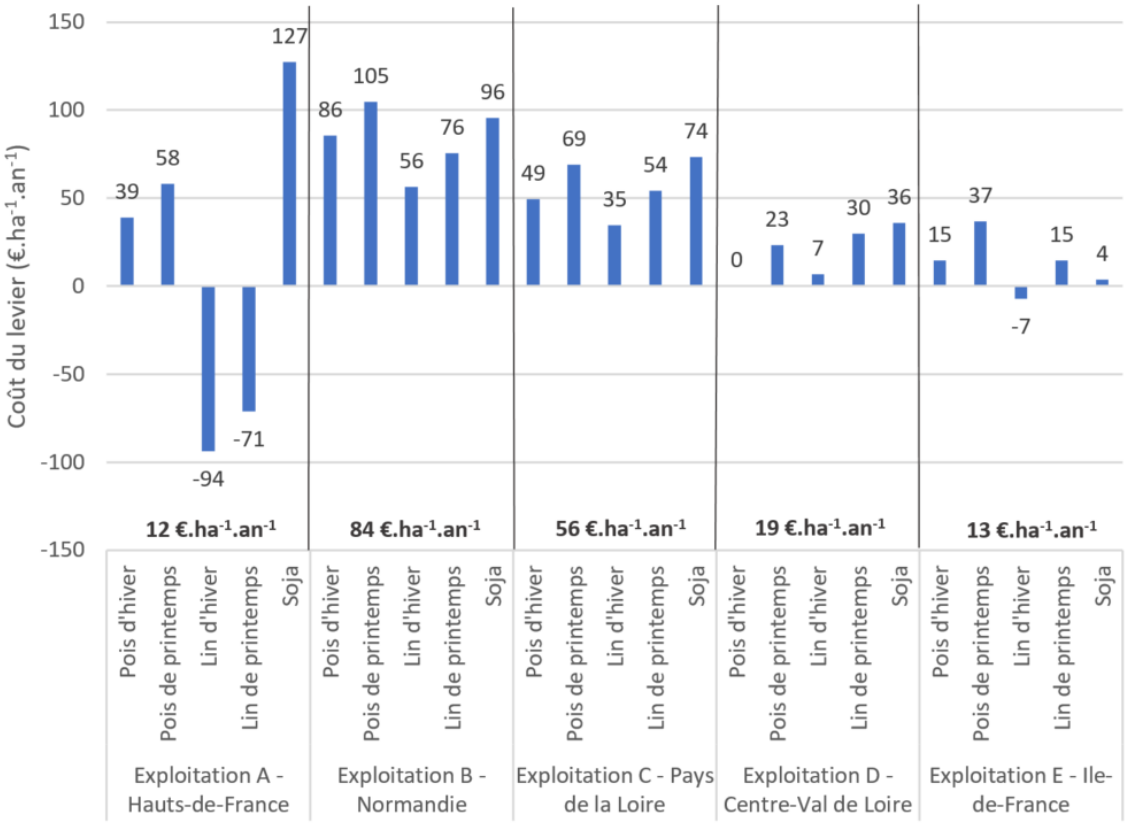


Figure 14 : Coût de l'insertion des cultures à faibles besoins azotés (pois d'hiver, pois de printemps, lin d'hiver, lin de printemps et soja) en €.ha^{-1}.an^{-1}. Les coûts sont évalués par la méthode du budget partiel prenant en compte les différences de produits et de charges générés par le changement d'assolement (introduction de cultures à faibles besoins azotés et substitution de cultures initialement présentes dans l'assolement). Les coûts moyens pour chaque exploitation sont indiqués en gras en dessous de l'histogramme.

La Figure 15 illustre le lien entre les réductions d'émissions (RE) et les coûts d'insertion des cultures à faibles besoins azotés selon les cultures BNI insérées dans les assolements ou selon les territoires considérés. On observe que les cultures se distinguent par des RE différentes (Figure 15.A) tandis que les territoires se distinguent par des coûts différents (Figure 15.B). L'insertion du lin d'hiver et du lin de printemps sur l'exploitation A génèrent des RE positives sans générer de coût supplémentaire. A contrario, l'insertion du lin d'hiver, du lin de printemps et du pois d'hiver sur l'exploitation B produit des RE négatives et un coût associé à la mise en place de ces cultures.

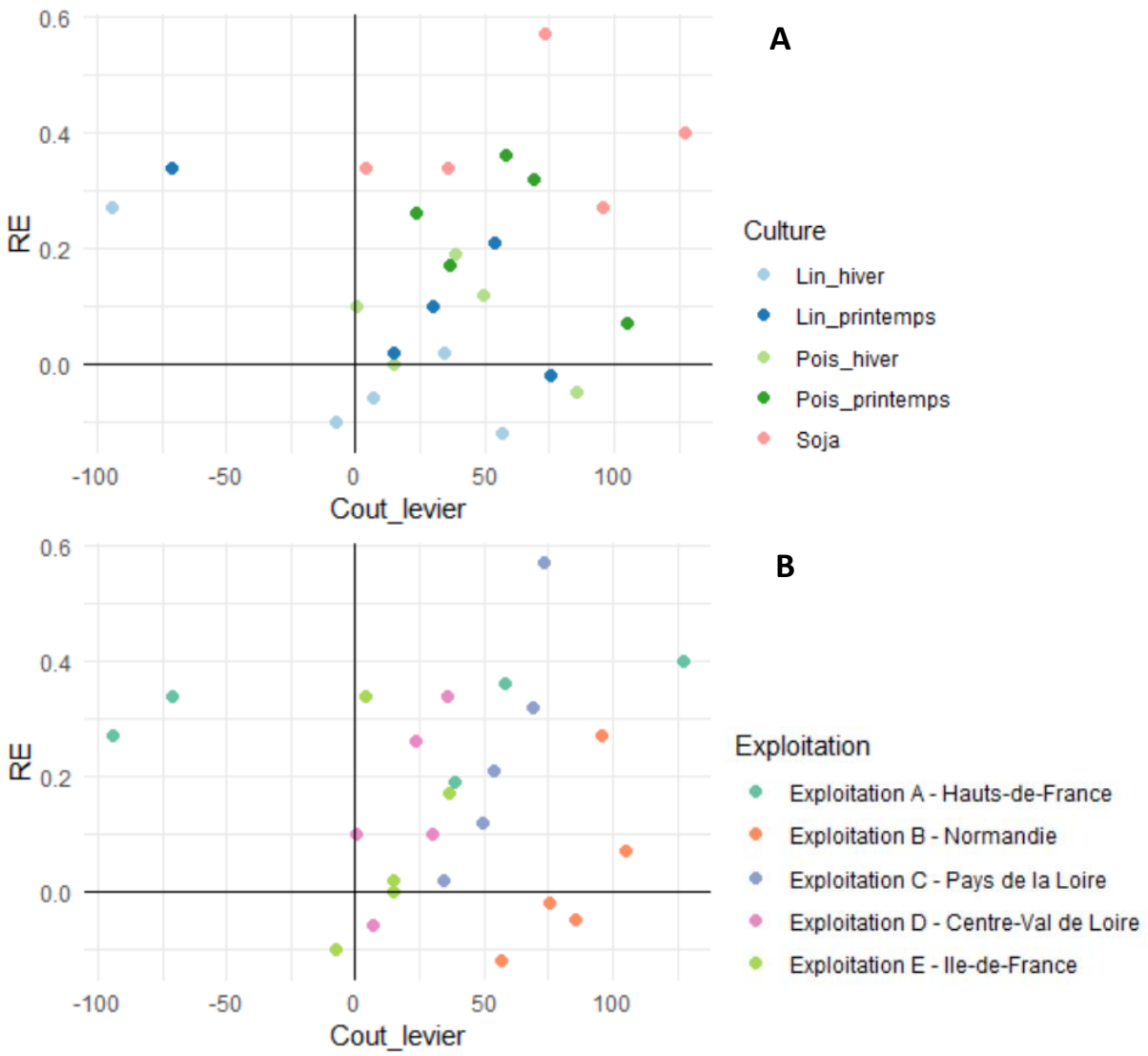


Figure 15 : Réductions d'émissions (RE) en fonction des coûts d'insertion des cultures à faibles besoins azotés (Cout_levier) selon les cultures BNI insérées dans les assolements (A) ou selon les territoires considérés (B). Les RE sont exprimées en teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1} et les coûts de mise en place du levier en €.ha^{-1}.an^{-1}.

V.3.2. Evaluation du coût des crédits carbone

Parmi les 25 simulations réalisées, on retrouve 5 simulations d'insertion de cultures BNI dans les assolements qui ne génèrent pas de crédit carbone. Cela signifie que les réductions d'émissions générées par la mise en place du levier sont négatives. Le coût du crédit carbone n'est donc pas évalué. On remarque également que l'insertion du lin oléagineux d'hiver et de printemps dans l'exploitation A ne génère aucun coût. L'introduction de cette culture crée une marge directe plus élevée que celle du scénario de référence. Sur la Figure 16, on observe que le coût des crédits carbone est compris entre 0 et 4 620 €.teqCO_2^{-1} avec une moyenne de 496 €.teqCO_2^{-1} et une médiane de 205 €.teqCO_2^{-1}. 4 simulations ont des coûts de crédit carbone très élevés : introduction du pois de printemps dans l'exploitation B

(1 445 €.teqCO_2^{-1}), du lin d'hiver dans l'exploitation C (2 184 €.teqCO_2^{-1}), du pois d'hiver (4 620 €.teqCO_2^{-1}) et du lin de printemps dans l'exploitation E (961 €.teqCO_2^{-1}).

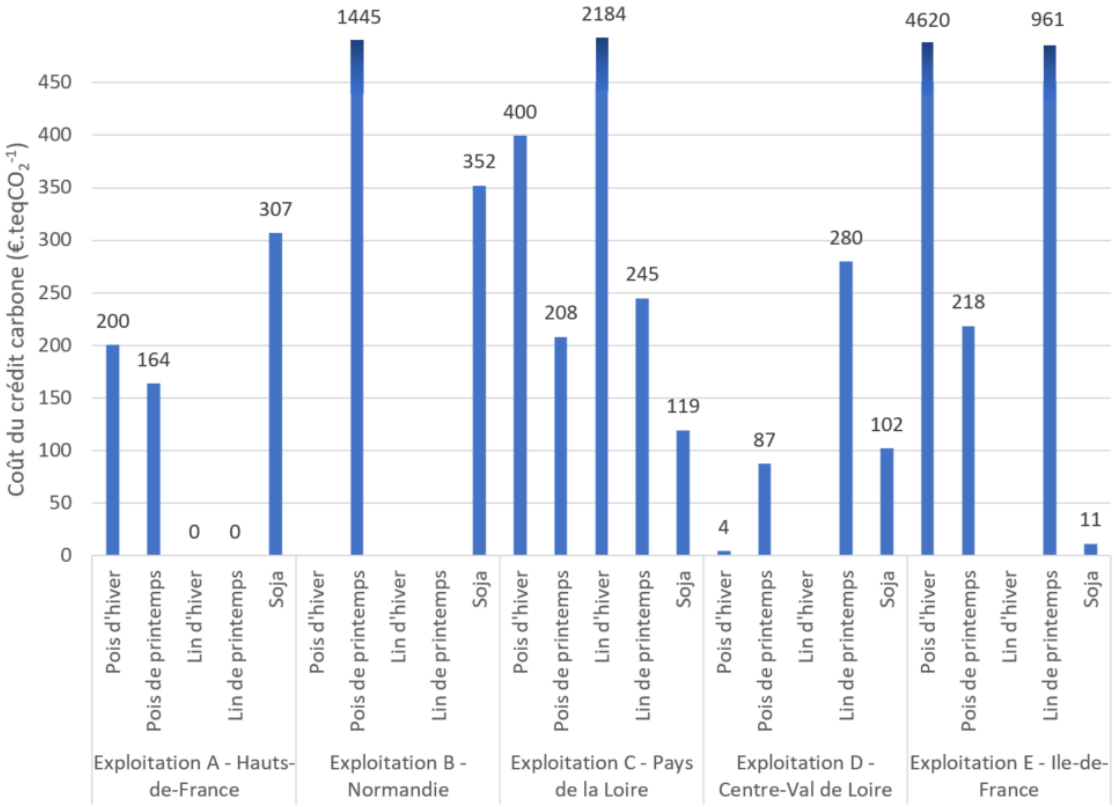


Figure 16 : Coût des crédits carbone (€.teqCO_2^{-1}) liés à l'insertion des cultures à faibles besoins azotés (pois protéagineux, lin oléagineux, soja). Deux valeurs sont nulles pour l'exploitation A car le coût du levier est négatif, il n'y a donc pas d'évaluation du coût du crédit carbone. Lorsqu'il n'y aucun coût indiqué, cela signifie qu'aucun crédit carbone n'a été généré par la mise en place du levier (RE négatives).

VI. Discussion

VI.1. Discussion des résultats

VI.1.1. La diversification des assolements avec des cultures à faibles besoins azotés permet en grande majorité de réduire les émissions de GES totales

Les résultats ont permis de montrer que l'introduction de cultures à faibles besoins azotés permet en grande majorité de réduire les émissions de GES totales (Résultats V.2). La réduction de l'utilisation d'engrais minéraux est le levier principal permettant de réduire les émissions. Les résultats générés pour l'insertion de légumineuses sont cohérents avec les résultats de l'étude de Pellerin et al. (2013). On trouve une RE $_{fertilisation}$ moyenne de 1,90 teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1} de légumineuse insérée et l'INRA a montré un potentiel d'atténuation de 1,58 teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1} de légumineuse insérée. Les engrais azotés ont en effet des facteurs d'émissions élevés compris entre 3,97 kg eqCO_2.kgN^{-1} et 4,99 kg eqCO_2.kgN^{-1} (Annexe 15). La

suppression des apports azotés permet donc systématiquement de réduire les émissions de GES liés à la fertilisation ($RE_{fertilisation}$). L'azote a également un impact différent selon le type d'engrais apporté. La solution azotée et l'urée ont par exemple des facteurs d'émissions plus élevés que l'ammonitrate. Le changement de la nature de l'engrais azoté et de la méthode d'apport (enfouissement ou non de l'azote) peut être une première étape pour réduire les émissions associées à la fertilisation.

Le stockage de carbone est en revanche plus contrasté selon les simulations réalisées et les cultures insérées dans les assolements. Les différents éléments qui peuvent expliquer les variations observées sont détaillés dans les parties suivantes.

VI.1.1.1. Le potentiel de stockage de carbone est différent selon les conditions pédoclimatiques des exploitations agricoles

Les stocks de carbone initiaux à t0 (date des diagnostics d'exploitation) sont compris entre 28,7 et 75,1 $tC.ha^{-1}$ avec une moyenne de 49,9 $tC.ha^{-1}$ (Annexe 13). Ces valeurs de stock de carbone sont cohérentes avec la valeur moyenne de stock de carbone organique identifiée pour les grandes cultures dans l'étude de l'INRA évaluée à 51,6 $tC.ha^{-1}$ (Pellerin *et al.*, 2019). Dans les résultats V.2.1. et l'Annexe 13, on observe également que les stocks de carbone sont différents selon les exploitations et qu'il existe une variabilité au sein même des exploitations avec des dynamiques de stockage différentes en fonction des systèmes de cultures. Les **conditions pédoclimatiques** associées aux exploitations sur chaque territoire ont donc un impact important sur le potentiel de stockage de carbone.

Le stock de carbone initial est le paramètre qui joue le rôle le plus important sur l'évolution du stock de carbone dans les sols (Clivot *et al.*, 2019). Un taux de MO initial élevé aura tendance à diminuer le stockage de carbone tandis qu'un taux de MO faible laisse une marge de progression pour l'augmentation du stockage de carbone. Les **conditions climatiques** (précipitations, ETP, températures) sont les deuxièmes facteurs déterminants l'évolution du stockage de carbone. La **texture et les paramètres du sol** (pH, C/N, …) ont également une influence sur les sorties de carbone du bilan humique. Les sols argileux ont par exemple un taux de minéralisation plus faible que les sols limoneux et les sols sableux.

VI.1.1.2. Le stockage de carbone est dépendant de la nature des résidus de cultures insérées dans les assolements et de la biomasse restituée au sol

L'évaluation de la différence de stock de carbone entre les scénarios de référence et les simulations repose sur le bilan humique AMG (Andriulo, Mary, et Guerif, 1999). L'Annexe 16 illustre le principe de fonctionnement du modèle AMG qui comptabilise en entrée les apports de carbone des résidus organiques (résidus de cultures ou produits organiques) et les sorties de carbone par minéralisation. Les résidus de cultures laissés au sol après la récolte peuvent suivre un processus de minéralisation rapide ou un processus d'humification. L'humification transforme les résidus organiques en carbone actif. Cette dégradation de la matière organique est définie comme le produit entre le coefficient d'humification (k1) et la quantité de biomasse restituée au sol (m). Le coefficient d'humification dépend de la nature

et de la composition des résidus de culture et la quantité de biomasse restituée au sol (m) qui dépend du rendement des cultures et de la proportion de biomasse restituée

Les rendements des cultures de diversification varient selon les territoires étudiés (Annexe 17). Les rendements du pois protéagineux, du lin oléagineux et du soja sont dans la plupart des cas plus faibles que ceux des cultures substituées dans les simulations, à l'exception du colza et du tournesol. **La substitution des céréales par les cultures à faibles besoins azotés peut donc expliquer la réduction du stockage de carbone dans les sols.**

L'indice de récolte IR (rapport entre le rendement d'une culture et la quantité de totale de biomasse produite) permet de calculer la **proportion de biomasse restituée** par les résidus de culture (1-IR). Le pois protéagineux a un indice de récolte élevé et restitue donc moins de biomasse par rapport aux cultures principales de l'assolement (Annexe 18). Le lin oléagineux restitue en revanche plus de biomasse que les céréales (59% pour le lin contre 50% de restitution en moyenne pour les céréales). Le soja possède le pourcentage de restitution le plus élevé des cultures de diversification étudiées. Ces valeurs permettent d'expliquer les **RE plus élevées du soja** par rapport aux autres cultures de diversification. L'étude technique réalisée par Agro Transfert en 2019 (Perrin *et al.*, 2019) confirme que les entrées de carbone humifié du soja sont plus élevées que celles du protéagineux.

La **restitution de la biomasse produite par les cultures intermédiaires** joue également un rôle important dans le stockage de carbone. L'augmentation de 15% de la proportion de cultures intermédiaires lors de l'introduction des variétés de pois et de lin de printemps permet d'augmenter nettement la restitution de biomasse et donc le stockage de carbone dans les sols. Ce résultat est confirmé par l'étude de Perrin *et al.*, (2019) qui montre que la contribution des couverts d'interculture aux entrées de carbone humifié n'est pas négligeable (apport de 400 à 500 kg de carbone humifié par un couvert de 2 tonnes de matières sèches par hectare). Ceci explique les valeurs plus élevées de $RE_{stockage}$ des variétés de printemps précédées d'interculture longues par rapport aux variétés d'hiver. Ce résultat est intéressant d'autant plus que la couverture des sols avec des intercultures permet d'atténuer les pertes de carbone organique du sol (Plaza-Bonilla *et al.*, 2018). En revanche, dans le cas d'une destruction tardive de l'interculture, il existe un risque pour l'implantation de la culture de printemps. Pour une culture de printemps semée tardivement, il peut y avoir un faible taux d'humidité dans le sol et donc des difficultés à la levée pour la culture de printemps.

VI.1.2. Le label bas-carbone semble insuffisant pour accompagner le développement de cultures à faibles besoins azotés

Le coût associé à l'insertion de cultures à faibles besoins azotés évalué dans cette étude est élevé à l'échelle de l'exploitation. Il est évalué en moyenne à 363 €.ha^{-1} de légumineuse tandis que l'étude de l'INRA en 2013 a évalué le coût à 19 €.ha^{-1} de légumineuse (Pellerin, 2013). Il est difficile de comparer les données d'évaluations économiques entre différentes études. En effet, les méthodes de calculs utilisées sont différentes et les données économiques varient grandement selon les années et les territoires. Les cultures substituées jouent un rôle important dans le coût de l'insertion des cultures à faibles besoins azotés évalué dans cette étude. Les exploitations étudiées dans les différentes régions se distinguent par

des assolements différents. Les marges directes associées aux cultures substituées conditionnent les coûts des leviers. Le blé tendre, le colza et l'orge ont par exemple des hauts rendements qui génèrent des marges directes plus élevées dans l'exploitation B située dans la région Normandie par rapport aux cultures dans les autres exploitations (Annexe 19). Cet élément permet d'expliquer le coût de la mise en place des cultures de diversification en moyenne plus important pour l'exploitation B (V.3.1). Le coût moyen d'insertion des cultures BNI est faible pour l'exploitation E. En effet, l'assolement de référence comprend initialement 42% de cultures de printemps. Le retrait des cultures intermédiaires longues avant les cultures de printemps baisse les charges à l'échelle de l'exploitation.

D'après l'estimation du prix de la tonne équivalent CO_2 dans la littérature (au maximum 24 €.teqCO_2^{-1} ; Tronquet, Grimault, et Foucherot, 2017), l'accompagnement financier des agriculteurs à la diversification des assolements avec le label bas-carbone semble limité. Le coût moyen du crédit carbone est en effet estimé à 496 €.teqCO_2^{-1} sur le panel d'exploitations étudiées (Résultats V.2.3). Les valeurs extrêmes s'expliquent par des RE totales très faibles (<0,1 teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}) qui augmentent fortement le coût des crédits. En enlevant les coûts des crédits dont les RE totales sont inférieures à 0,1 teqCO_2.ha^{-1}.an^{-1}, le coût moyen du crédit carbone est de 216 €.teqCO_2^{-1}. Pour accompagner la transition carbone, il faudrait augmenter le prix de la tonne équivalent CO_2. L'agence de presse Reuters (Buli, Abnett, et Twidale, 2021) indique que le prix de référence des quotas européen (EUA) a récemment atteint 50 €.teqCO_2^{-1}. Un tel montant pour les crédits carbone resterait insuffisant pour compenser la transition par rapport aux coûts évalués dans cette étude.

L'insertion de cultures à faibles besoins azotés permet cependant de valoriser des services écosystémiques (ruptures des cycles des ravageurs et maladies, réduction de l'érosion et du lessivage grâce à la couverture des sols, recyclage de l'azote, …) (Rosa-Schleich *et al.*, 2019). Ces services écosystémiques ne sont pas pris en compte dans l'analyse économique. Les rotations diversifiées permettent au fil du temps de soutenir le développement de ces services et ainsi de réduire de plus en plus le recours aux intrants tout en maintenant la productivité des systèmes de cultures (Davis *et al.*, 2012). Les quantités de produits phytosanitaires nécessaires diminuent dans les systèmes de cultures avec des rotations culturales diversifiées (Lechenet *et al.*, 2014). L'insertion de légumineuses est également intéressante car elle permet de réduire le lessivage des nitrates, de recycler les nutriments et de limiter l'utilisation de pesticides. **La diversification des cultures pourrait donc engendrer des économies de coûts à long terme** sur l'exploitation agricole grâce aux services environnementaux générés. Malgré le coût de mise en place du levier, il s'agit d'une solution prometteuse pour mettre en place des systèmes de production durables.

VI.2. Discussion des méthodes

VI.2.1. Des résultats dépendants du contexte local de chaque exploitation

Les simulations d'insertion de cultures à faibles besoins azotés ont été effectuées à partir des données d'exploitation agricoles réelles des 3 dernières campagnes culturales. Les résultats de RE et les évaluations économiques **dépendent donc du contexte spécifique relatif à chaque exploitation.** Les années présentant des conditions climatiques défavorables,

entrainant le développement de maladies et ravageurs, ont pénalisé les rendements moyens des cultures. On retrouve de faibles rendements pour le maïs dans l'exploitation D (rendement de 4,7 $t.ha^{-1}$), pour le colza dans l'exploitation A (rendement de 2,2 $t.ha^{-1}$) et pour la betterave dans l'exploitation E (rendement de 62 $t.ha^{-1}$). Malgré les aléas climatiques, les rendements réalisés ont été conservés pour modéliser les bilans carbone réels des exploitations. Ces données ont une influence sur la rentabilité des cultures. Il faut donc prendre en compte cette variabilité dans l'analyse des résultats concernant les cultures citées précédemment. Viguier *et al.*, (2021) a montré que la diversification des cultures est à étudier à l'échelle des exploitations agricoles au vu des contextes pédoclimatiques et économiques spécifiques.

Les autres données relatives à la fertilisation organique et minérale (forme d'engrais utilisée et dose appliquée), à la restitution des résidus de cultures et à la gestion des intercultures dépendent des choix techniques pris par chaque agriculteur. **Ces choix sont fortement dépendants des conditions locales** (type de sol, organisation du parcellaire, climat).

VI.2.2. Les outils de modélisation comme outil de décision pour la transition carbone

Cette étude a été réalisée à l'aide d'un outil de modélisation du potentiel d'atténuation des émissions de GES (méthode grandes cultures du label bas-carbone). L'utilisation de la modélisation est adaptée à l'évaluation du potentiel de réduction d'émissions lors de la mise en place de pratiques bas-carbone. Cette méthode d'analyse permet de rester flexible sur les leviers mis en place et permet d'isoler simplement différents paramètres. Elle suggère en revanche la mise en place d'hypothèses lorsque toutes les données ne sont pas disponibles. La modélisation est particulièrement adaptée pour l'évaluation du stockage de carbone dans les sols. En effet, la mesure sur le terrain des stocks de carbone est compliquée car elle s'évalue sur une longue durée et nécessiterait un effort d'échantillonnage conséquent à l'échelle des parcelles. L'outil SIMEOS-AMG, utilisé pour l'évaluation du stockage de carbone, est basé sur un modèle robuste permettant une adaptation fine des données associées aux systèmes de cultures (rotation culturale, cultures intermédiaires, fertilisation organique, type de sol, …). L'étude de Clivot *et al.*, (2019) montre qu'il y a une corrélation fine entre le stock de carbone mesuré et simulé avec l'outil SIMEOS-AMG. Il peut cependant subsister des incertitudes sur l'évolution du stock de carbone du sol suite à la mise en place de nouvelles pratiques. L'incertitude sur le stockage de carbone pourrait atteindre 30% dans le cas de la mise en place de pratiques permettant un stockage élevé (Yogo *et al.*, 2021).

VI.3. Perspectives

Cette étude a été réalisée à l'échelle d'un panel de 5 exploitations situées dans des régions distinctes. Cet échantillon de données est plutôt faible. Chaque simulation demande en effet un temps de collecte de données et de synthèse important pour calculer les réductions d'émissions et le coût de mise en œuvre des leviers. Il pourrait être intéressant de multiplier les simulations d'insertion de cultures à faibles besoins azotés au sein d'un même territoire. Augmenter le nombre de répétitions pourrait ainsi permettre d'améliorer la puissance statistique des tests effectués sur le jeu de données et de renforcer l'analyse.

Au niveau de l'analyse économique, les données régionalisées ont servi de première approche à l'évaluation du coût d'insertion des cultures BNI à l'échelle des différents territoires. L'utilisation des données économiques réelles des agriculteurs permettrait d'évaluer plus finement les coûts d'insertion des cultures à faibles besoins azotés.

Face à la demande sociétale et environnementale, les coopératives agricoles souhaitent accompagner les agriculteurs sur la mise en place de pratiques bas-carbone. L'agriculteur devra être capable d'optimiser ses choix de production au regard des potentiels d'atténuation des émissions et de la durabilité de ses pratiques. Il serait donc intéressant de poursuivre cette étude en évaluant les potentiels de réductions d'émissions d'autres pratiques agricoles. Le déploiement de l'outil digital CarbonExtract permettant de simuler l'impact carbone de nouvelles pratiques est au cœur des projets qu'Agrosolutions va mener par la suite sur la transition bas-carbone de l'agriculture.

Conclusion

Cette étude a permis d'identifier des cultures à faibles besoins azotés intéressantes pouvant être insérées dans les assolements des exploitations de grandes cultures comme levier bas-carbone. Le soja, le pois protéagineux et le lin oléagineux sont trois cultures qui ne nécessitent pas ou peu d'apport azoté et qui n'ont pas de verrou agronomique particulier. Ces cultures ont un marché structuré qui démontre un potentiel de déploiement sur les 5 régions d'études (Hauts de France, Normandie, Pays de la Loire, Centre-Val de Loire et Ile de France).

Ces trois cultures permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle de l'exploitation, notamment les émissions liées à la fertilisation azotée. Les $RE_{fertilisation}$ concernent principalement le protoxyde d'azote (N_2O) émis directement sur les parcelles et les GES associés à la fabrication des engrais minéraux. Les $RE_{stockage}$ sont variables selon les simulations et dépendent de nombreux facteurs. La quantité de carbone humifié issu des résidus de cultures a un effet sur les entrées de carbone tandis que le type de sol, le taux de matière organique initial et les conditions climatiques ont des effets sur les sorties de carbone du bilan humique. Les réductions d'émissions globales sont significativement différentes selon les cultures insérées dans les assolements. Les systèmes de cultures intégrant du soja ont un potentiel de RE significativement plus élevé que les autres cultures en raison de la capacité de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique de cette légumineuse et de son potentiel de restitution de carbone au sol. L'introduction de cultures à faibles besoins azotés de printemps précédées d'intercultures longues permet d'augmenter la restitution de biomasse au sol et améliore donc le stockage de carbone dans le sol. Parmi le panel d'exploitations agricoles de cette étude, il n'y a en revanche pas de différence significative des RE selon les territoires étudiés.

Le coût de l'insertion des cultures à faibles besoins azotés est élevé dans la plupart des simulations effectuées. Les coûts sont fortement dépendants des cultures substituées dans les assolements de référence. Les coûts des crédits carbone associés à l'insertion des cultures BNI sont élevés par rapport au prix actuel de la tonne de CO_2. Le label bas-carbone est en mesure de compenser une partie des frais engagés dans la diversification des assolements mais il est nécessaire de combiner différentes sources de financement pour accompagner au mieux les agriculteurs.

Par la suite, l'augmentation du nombre de répétitions pourrait être intéressant pour renforcer la puissance des tests effectués dans cette étude. L'évaluation du potentiel d'atténuation des émissions de GES pour la mise en place d'autres pratiques agricoles pourrait être intéressante. Cela permettrait d'orienter les choix de production des agriculteurs au regard des réductions d'émissions de GES et des potentiels de rémunération par le marché carbone volontaire.

Bibliographie

Agreste. 2020. *Statistique Agricole Annuelle (SSA)*. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2107/detail/. Consulté le 16/05/2021.

Andriulo A., Mary B., et Guerif J. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*. 19(5), p. 365-377.

Attard E., Le Roux X., Charrier X., Delfosse O., Guillaumaud N., Lemaire G., et Recous S. 2016. Delayed and asymmetric responses of soil C pools and N fluxes to grassland/cropland conversions. *Soil Biology and Biochemistry*. 97, p. 31-39.

Beillouin D., Ben-Ari T., et Makowski D. 2019. A dataset of meta-analyses on crop diversification at the global scale. *Data in Brief*. 24, p. 103898.

Buli N., Abnett K., et Twidale S. 2021. EU carbon price hits record 50 euros per tonne on route to climate target. Dans : *Reuters*.

Carrouée B., Schneider A., Flénet F., Jeuffroy M.H., et Nemecek T. 2012. Introduction du pois protéagineux dans des rotations à base de céréales à paille et colza : impacts sur les performances économiques et environnementales. *Innovations Agronomiques*. (25), p. 125-142.

Chen J., Heiling M., Resch C., Mbaye M., Gruber R., et Dercon G. 2018. Does maize and legume crop residue mulch matter in soil organic carbon sequestration? *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 265, p. 123-131.

Citepa. 2020. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten.

Clivot H., Mouny J.-C., Duparque A., Dinh J.-L., Denoroy P., Houot S., Vertès F., Trochard R., Bouthier A., Sagot S., et Mary B. 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software*. 118, p. 99-113.

Davis A.S., Hill J.D., Chase C.A., Johanns A.M., et Liebman M. 2012. Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health. *PLoS ONE*. 7(10), p. e47149.

De Notaris C., Rasmussen J., Sørensen P., et Olesen J.E. 2018. Nitrogen leaching: A crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 255, p. 1-11.

Gan Y., Liang C., Wang X., et McConkey B. 2011. Lowering carbon footprint of durum wheat by diversifying cropping systems. *Field Crops Research*. 122(3), p. 199-206.

GIEC. 2013. *AR5 - 5ème rapport*.

Hufnagel J., Reckling M., et Ewert F. 2020. Diverse approaches to crop diversification in agricultural research. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 40(2), p. 14.

IPCC. 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.

Kremen C. et Miles A. 2012. Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *Ecology and Society*. 17(4), p. art40.

Lechenet M., Bretagnolle V., Bockstaller C., Boissinot F., Petit M.-S., Petit S., et Munier-Jolain N.M. 2014. Reconciling Pesticide Reduction with Economic and Environmental Sustainability in Arable Farming. *PLoS ONE*. 9(6), p. e97922.

Lecomte V. 2021. *Tableur référentiel des conduites du soja en agriculture conventionnelle en France métropolitaine*.

Lecomte V. et Canale C. 2021. *Synthèse : observatoire des résultats économiques à la production 2018-2019 et estimations 2020.*

Louhichi K., Ciaian P., Espinosa M., Colen L., Perni A., et Paloma S.G. y. 2017. Does the crop diversification measure impact EU farmers' decisions? An assessment using an Individual Farm Model for CAP Analysis (IFM-CAP). *Land Use Policy*. 66, p. 250-264.

Mathew I., Shimelis H., Mutema M., et Chaplot V. 2017. What crop type for atmospheric carbon sequestration: Results from a global data analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 243, p. 34-46.

Meynard J.-M., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M.-B., Charlier A., et Messéan A. 2018. Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. *Agronomy for Sustainable Development*. 38(5), p. 54.

Meynard J.-M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Fares M., Le Bail M., et Magrini M.-B. 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. *INRA (France)*. (Rapport d'étude), p. 226.

Ministère de la Transition écologique et solidaire. 2020. *Stratégie nationale bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone.*

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 2021a. *La Politique Agricole Commune 2015-2022. Annexe 7 : Les paiements couplés dispositions en vigueur depuis la campagne 2019.*

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 2021b. *Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC 2). Plan d'action climat du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.*

Nemecek T., Hayer F., Bonnin E., Carrouée B., Schneider A., et Vivier C. 2015. Designing eco-efficient crop rotations using life cycle assessment of crop combinations. *European Journal of Agronomy*. 65, p. 40-51.

Pellerin S. 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).

Pellerin S., Bamière L., Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Bellassen V., Cardinael R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Daroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A.-I., Guenet B., Houot S., Klumpp K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri-Aubry S., Meziere D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Therond O., Viaud V., Grateau R., Perchec S.L., Savini I., et Rechauchère O. 2019. Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût?, p. 118.

Peoples M.B., Brockwell J., Herridge D.F., Rochester I.J., Alves B.J.R., Urquiaga S., Boddey R.M., Dakora F.D., Bhattarai S., Maskey S.L., Sampet C., Rerkasem B., Khan D.F., Hauggaard-Nielsen H., et Jensen E.S. 2009. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis*. 48(1-3), p. 1-17.

Perrin A.-S., Duparque A., Mouny J.-C., Clivot H., et Trochard R. 2019. Systèmes de culture innovants : Évaluer l'évolution du statut organique des sols. *Perpsectives Agricoles*. 466, p. 19-24.

Peyrard C., Mary B., Perrin P., Véricel G., Gréhan E., Justes E., et Léonard J. 2016. N2O emissions of low input cropping systems as affected by legume and cover crops use. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 224, p. 145-156.

Plaza-Bonilla D., Nogué-Serra I., Raffaillac D., Cantero-Martínez C., et Justes É. 2018. Carbon footprint of cropping systems with grain legumes and cover crops: A case-study in SW France. *Agricultural Systems*. 167, p. 92-102.

Roesch-McNally G.E., Arbuckle J.G., et Tyndall J.C. 2018. Barriers to implementing climate resilient agricultural strategies: The case of crop diversification in the U.S. Corn Belt. *Global Environmental Change*. 48, p. 206-215.

Rosa-Schleich J., Loos J., Mußhoff O., et Tscharntke T. 2019. Ecological-economic trade-offs of Diversified Farming Systems – A review. *Ecological Economics*. 160, p. 251-263.

Thoyer S., Després C., Bail M.L., Meynard J.M., et Messean A. [s d]. La diversification des cultures pour limiter les impacts environnementaux : freins et leviers agronomiques et économiques en France. Quelques propositions pour les exploitations, les filières et la PAC. , p. 13.

Tronquet C., Grimault J., et Foucherot C. 2017. Etude Climat : Potentiel et déterminants de la demande volontaire en crédits carbone en France. *I4CE Institute For Climate Economics*.

Viguier L., Cavan N., Bockstaller C., Cadoux S., Corre-Hellou G., Dubois S., Duval R., Keichinger O., Toqué C., Toupet de Cordoue A.-L., et Angevin F. 2021. Combining diversification practices to enhance the sustainability of conventional cropping systems. *European Journal of Agronomy*. 127, p. 126279.

Yogo W.I.G., Clivot H., Wijmer T., Ceschia E., Ferchaud F., Reynders S., et Soussana J.-F. 2021. Analyse des méthodologies d'évaluation et de suivi du bilan carbone des sols et recommandations pour l'écriture d'une méthode grande culture dans le cadre du label Bas-Carbone. Rapport ADEME. Convention n*18-03-C0034. p. 57.

Zentner R.P., Basnyat P., Brandt S.A., Thomas A.G., Ulrich D., Campbell C.A., Nagy C.N., Frick B., Lemke R., Malhi S.S., Olfert O.O., et Fernandez M.R. 2011. Effects of input management and crop diversity on economic returns and riskiness of cropping systems in the semi-arid Canadian Prairie. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 26(3), p. 208-223.

Annexes

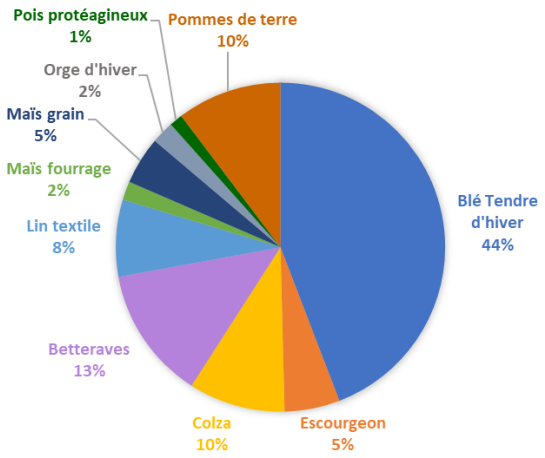
Annexe 1 : Leviers de stockage de carbone proposés dans la méthode Label Bas-Carbone Grandes Cultures.

Tableau 1 : Liste des leviers de stockage de carbone dans les sols et de réduction des émissions de GES mobilisables dans le cadre de la méthode grandes cultures du label bas-carbone

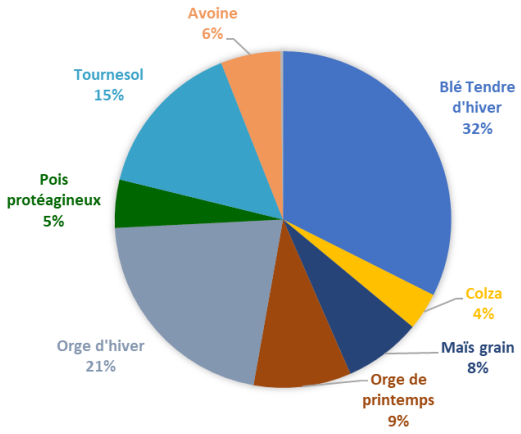
Leviers de stockage de carbone dans les sols	Leviers de réduction des émissions de GES
Augmenter la quantité de biomasse restituée par les couverts végétaux, par exemple par l'intégration ou extension des couverts végétaux dans les rotations.	**Réduire la dose d'azote minéral apportée** sur le système de culture • Ajustement du calcul de dose prévisionnelle grâce à une meilleure prise en compte des apports et des objectifs de rendements réalistes • Prise en compte des conditions climatiques pour le déclenchement des apports • Utilisation d'outils de pilotage Modulation intraparcellaire
Augmentation des restitutions par les résidus de cultures (restitution des résidus, augmentation de la production de biomasse par unité de surface notamment via l'implantation de cultures plus productives, le recours à l'irrigation…)	**Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé** par la plante en limitant la nitrification/dénitrification, la volatilisation et la lixiviation – Agir sur la nitrification/dénitrification : • Utilisation d'inhibiteurs de nitrification • Chaulage des sols acides (uniquement pour les pHeau initial < 6.8 et dans l'objectif d'atteindre une valeur de 6.8) • Utilisation de formes d'engrais moins émettrices (réduction de l'utilisation des formes uréiques, inhibiteurs d'uréase) Enfouissement des apports organiques et minéraux
Augmentation des apports de matières amendantes ou fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) sur l'exploitation (effluents d'élevage, composts, déchets urbains et industriels, digestats …)	**Introduire des légumineuses fixatrices d'azote dans la rotation** (en culture principale, associée ou intermédiaire) ou des **cultures/variétés à plus faible besoin en azote**
Insertion et allongement des prairies temporaires et artificielles (luzerne par exemple) dans les rotations	

Annexe 2 : Assolement des exploitations de référence sur les 5 régions d'étude

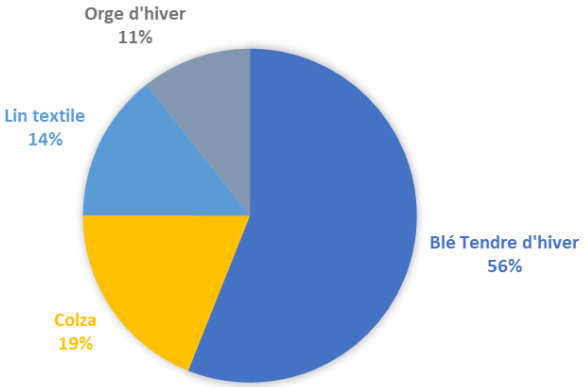
Exploitation A



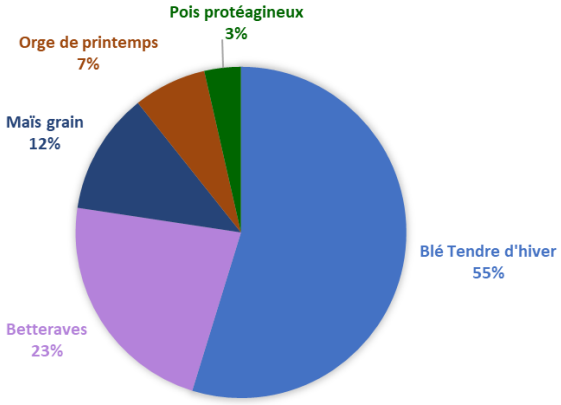
Exploitation D



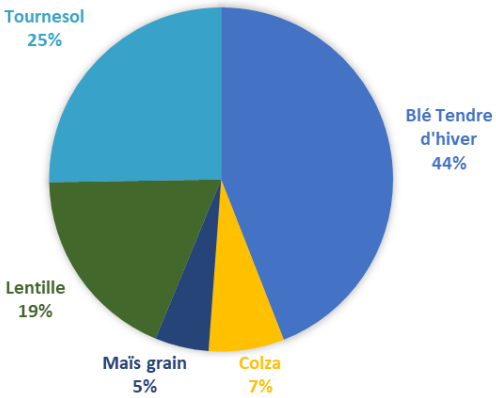
Exploitation B



Exploitation E



Exploitation C



Annexe 3 : Sélection des systèmes de cultures (SdC) adaptés à l'insertion des cultures de diversification choisies dans cette étude en fonction des types de sol.

Tableau 1 : Contraintes associées au type de sol pour l'insertion du pois protéagineux, du lin oléagineux et du soja.

Culture	Contraintes en fonction du type de sol
Pois protéagineux	Privilégier des sols profonds. Eviter les sols argileux lourds et les limons battants hydromorphes. Eviter les sols séchants (sols très superficiels ou caillouteux).
Lin oléagineux	Privilégier des sols profonds. Eviter les terres blanches et les terres très séchantes (sols très sableux et argilo-calcaires très superficiels).
Soja	Eviter les sols calcaire (avec un taux de calcaire actif supérieur à 10%).

Source : Guides méthodologiques Terres Inovia, 2020

Tableau 2 : Sélection des systèmes de cultures dans lesquels sont insérés le pois protéagineux, le lin oléagineux et le soja dans les simulations pour chaque exploitation.

Culture	Exploitation A	Exploitation B	Exploitation C	Exploitation D	Exploitation E
Pois protéagineux	Pas sur SdC1 et SdC3	Pas sur SdC2	Sur tous les systèmes de cultures	Sur tous les systèmes de cultures	Sur tous les systèmes de cultures
Lin oléagineux	Sur tous les systèmes de cultures	Pas sur SdC2	Sur tous les systèmes de cultures	Sur tous les systèmes de cultures	Sur tous les systèmes de cultures
Soja	Sur tous les systèmes de cultures	Pas sur SdC2	Sur tous les systèmes de cultures	Pas sur SdC1 et SdC4	Sur tous les systèmes de cultures

Annexe 4 : Synthèse des informations à saisir pour calculer les réductions d'émissions.

Tableau 1 : Informations à saisir pour calculer les RE $_{fertilisation}$. Les données sont à remplir pour les 3 dernières années et les 5 années de simulation.

Assolement	**Fertilisation minérale et organique**	**Autres**
Parcelles de l'exploitation	Nom et type d'engrais	Consommation GNR (L) (Gazole Non Routier)
Surface (ha)	Composition NPK (%)	
Culture	Dose apportée (kg/ha)	
Export des résidus de cultures (oui/non)		
Rendement (t/ha)		
Culture intermédiaire		
Biomasse produite (tMS/ha)		

Tableau 2 : Informations à saisir pour calculer les RE $_{stockage}$ dans l'outil SIMEOS-AMG. Les données sol sont issues des analyses de sol réalisées sur les exploitations agricoles.

Rotation culturale	**Cultures intermédiaires**	**Produits organiques**	**Données sol**	**Climat**
Culture	Espèce	Type	Argile (g/kg)	ETP Annuelle (mm)
Rendement (t/ha)	Biomasse produite (tMS/ha)	Dose (kg/ha)	$CaCO_3$ (g/kg)	Pluie Annuelle (mm)
Fréquence culture (%)	Fréquence	Fréquence	pH	Température moyenne annuelle (°C)
Fréquence de restitution des résidus			Azote totale (g/kg)	
Type de travail du sol			C sur N	
Profondeur travail du sol (cm)			Cailloux (%)	
Irrigation moyenne (mm/ha/an)			Densité apparente	
			C organique (g/kg)	
			Teneur MO (%)	

Annexe 5 : Equations permettant de calculer les réductions d'émissions liées à la fertilisation ($RE_{fertilisation}$) issues de la méthode Grandes Cultures du label bas-carbone

$$RE_{fertilisation} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{p} (Emissions_ha_ferti_ref_i - Emissions_ha_ferti_Projet_{i,k}) * Surf_{i,k}$$

$$Emissions_ha_ferti_ref_i = \left[\sum_{k=-3}^{-1} \frac{EGES_fertilisation_{i,k}}{Surf_{i,k}} \right] * \frac{1}{3}$$

$$Emissions_ha_ferti_Projet_{i,k} = \frac{EGES_fertilisation_{i,k}}{Surf_{i,k}}$$

Avec :

- Emissions_ha_ferti_ref $_i$: les émissions de GES (directes et indirectes) associées à la fertilisation du scénario de référence par hectare de SAU du système de culture i de l'exploitation (teqCO_2/ha)

Emissions_ha_ferti_Projet $_{i,k}$:les émissions de GES (directes et indirectes) associées à la fertilisation en année k du scénario Projet par hectare de SAU du système de culture i de l'exploitation (teqCO_2/ha)

- Surf $_{i,k}$: la surface agricole utile du système de culture i en année k du Projet

- n : le nombre de systèmes de culture de l'exploitation

- p : la durée du Projet, p=5 au maximum

- EGES_fertilisation $_{i,k}$: *les émissions de GES (directes et indirectes) associées à la fertilisation du système de culture i en année k. Elles incluent les émissions de N_2O directes au champ et indirectes après volatilisation et lixiviation ainsi que les émissions associées à la fabrication et au transport des intrants pour la fertilisation des cultures (engrais minéraux azotés, fumure de fond, engrais organiques)* (teqCO_2)

- k : l'année du calcul. Pour l'intensité de référence, les 3 années précédant le début du Projet sont considérées pour calculer le scénario de référence. Si t est l'année du démarrage du projet, alors les années t-3, t-2 et t-1 devront être utilisées pour calculer la référence. Pour l'intensité Projet, les 5 années après le début du Projet sont à considérer, soit t à t+4

$$EGES_fertilisation_{i,k} = \left[\left[\left(N2O_directes_{i,k} + N2O_volatilisation_{i,k} + N2O_lixiviation_{i,k} \right) * \frac{44}{28} * PRG_{N2O} \right] + CO2_directs_{i,k} + GES_amont_min_{i,k} + GES_amont_org_{i,k} \right] / 1000$$

Avec :

- PRG_{N2O} : le pouvoir réchauffant du N_2O

Annexe 6 : Liste des références utilisées pour les calculs économiques du coût d'insertion des cultures à faibles besoins azotés dans les assolements dans chaque région d'étude.

	Rendements	**Prix de vente**	**Charges opérationnelles**	**Charges de mécanisation**
Exploitation A - Hauts-de-France	Entretien coopérative	Entretien coopérative + Terres Inovia + Référence données Agrosolutions	Terres Inovia + Référence données Agrosolutions	Barème d'entraide (APCA)
Exploitation B - Normandie	Entretien coopérative	Entretien coopérative + Terres Inovia + Référence données Agrosolutions	Terres Inovia + Référence données Agrosolutions	Barème d'entraide (APCA)
Exploitation C – Pays de la Loire	Entretien coopérative	Entretien coopérative	Entretien coopérative	Barème d'entraide (APCA)
Exploitation D - Centre-Val de Loire	Entretien coopérative	Entretien coopérative + Terres Inovia + Référence données Agrosolutions	Terres Inovia	Barème d'entraide (APCA)
Exploitation E - Ile-de-France	Entretien coopérative	Entretien coopérative + Terres Inovia	Terres Inovia + Référence données Agrosolutions	Barème d'entraide (APCA)

Annexe 7 : Synthèse des informations collectées pour sélectionner les cultures de diversification à étudier.

Culture	Adaptation conditions climatiques	Contraintes agronomiques	Insertion sur le marché	Sources
Pois protéagineux	Pois d'hiver pas conseillé a proximité de la bordure maritime allant de la Bretagne jusqu'au Nord pas de Calais : climat doux et humide qui favorise le développement de maladies aériennes. Pois de printemps peut être cultivé dans toute la France.	Progrès sur les variétés au niveau du rendement et de la tenue de tige, PMG assez élevés. Résistance au gel et teneur en protéines variables. Progrès en rendement et tenue de tige également sur les variétés de printemps. Risque aphanomyces (à gérer avec le test prédictif de potentiel infectieux) mais moins de risque sur le pois d'hiver.	3ème source de protéines végétales après le gluten de blé et le soja grâce au développement des technologies d'extraction et la non allergénicité du pois. Marché en développement grâce à une diversité de nouveaux ingrédients pour répondre aux besoins des formulations agroalimentaires (protéines texturées de pois). Unité de transformation Vic-sur-Aisne, unité d'extrusion Fougeré (Cavac), unité décorticage pour exportation (Rouen). Projet Far'Innov Hauts de France (farines riches en protéines).	Guide de culture 2019 Pois Terres Inovia. Magrini et al 2016. Fiche pois protéagineux chambre d'agri du Lot. Aspect économique : Panneau Cultures avenir 2018 Chambre d'agriculture Centre Val de Loire. Etude technologique : évaluation du potentiel de développement de trois cultures d'oléoprotéagineux - Pole IAR (Février 2021).
Luzerne	Résistance à la sécheresse, tolère de fortes températures. Résistance au froid dépendant de la variété. Sensible aux excès d'eau.	Matériel spécifique pour la récolte (faucheuse, râteau faneur, round-baller, …). Dessiccation, andainage, battage. 3 à 4 coupes par an. Inoculer la bactérie pour la fixation symbiotique (pas systématique), manque de connaissance des techniciens. Exigence du Service Officiel de Contrôle pour luzerne porte-graine. Amendement calcaire : 800 à 900 kg de carbonate tous les ans.	Peu de débouché en valorisation énergétique de la biomasse. Projet Protéo'Luz (Hauts de France_valorisation pour monogastriques). Potentiel de valorisation en lien avec les élevages. Volonté des éleveurs de gagner au autonomie fourragère et protéique.	La luzerne, Chambre d'agriculture Normandie (édition 2013). Luzerne, Chambre d'agriculture Bourgogne (août 2014).
Soja	Culture d'été résistante à la sécheresse. Besoins en eau selon les régions. Peu de soja en région Hauts de France et Normandie.	Inoculation des bactéries indispensables les premières années pour la fixation symbiotique. Très peu de traitements contre les maladies ou ravageurs (faible IFT). Eviter les sols trop calcaires.	Chute de près de 40% des importations françaises de soja depuis 10 ans. Surfaces françaises multipliées par 8. Objectif de substitution des 500 000 t de tourteaux de soja non OGM consommés par an en France et majoritairement importés. Fort développement des filières d'élevage de qualité qui devrait bénéficier au soja français. Marché en forte croissance des protéines végétales : protéines de soja 65% du marché. Potentiel de valorsiation du soja non OGM local.	Guide de culture soja 2019 Terres Inovia, Etude technologique : évaluation du potentiel de développement de trois cultures d'oléoprotéagineux - Pole IAR (Février 2021).
Lin oléagineux	Possibilité de cultiver le lin dans toute la France pour lin d'hiver et de printemps. Sensibilité aux gelées tardives pour lin d'hiver.	Eviter les parcelles à forte pression de graminées (le lin est une plante peu couvrante). Double récolte des graines et des pailles de lin, opération technique et date d'intervention réduite (il faut trouver le compromis entre la maturité des graines et des pailles).	Production variable au cours du temps malgré la forte croissance de la filière Bleu Blanc Cœur. Faible compétitivité face aux importations. Production de 46 400 t. Importation de 95 000 t de tourteau de lin et de 42 000 t de graines entières (2018). Souvent produit en contrat de gré à gré entre un agriculteur et un organisme de collecte (pour sécuriser prix de vente). Valorex premier utilisateur de graines de lin en France. Marché structuré et dépendant de l'opérateur Valorex. Extrudeur prévu sur le site de Fougeré de la CAVAC (85).	Guide de culture lin oléagineux 2020 Terres Inovia. La filière lin oléagineux, Valorex. Meynard et al., 2018.

Culture	Adaptation conditions climatiques	Contraintes agronomiques	Insertion sur le marché	Sources
Lin fibre	Lin fibre qui s'étend de plus en plus dans les zones les plux exposées au stress hydrique de printemps. Lin fibre retrouvé principalement en Normandie, Ile de France et Hauts de France (réseaux d'essais variétés).	Culture adaptée à une implantation sans labour. Zinc élément essentiel, indispensable à sa croissance. Rouissage du lin à terre (étape délicate dépendante des conditions climatiques) nécessaire pour l'extraction des fibres lors du teillage.	80 % de la production de lin exportée en Inde et en Chine (frein au développement dans le cadre de la pandémie du Covid 19). Marché principalement à l'export. Quinzaine d'acteurs de la première transformation en France (certains ont créé des plateformes communes de commercialisation pour peser suffisamment face au principal acheteur Chinois). Recherches de nouveaux débouchés (nouveaux matériaux composites biosourcés dans les secteurs	Choisir et décider Lin Fibre Synthèse nationale 2020 - Arvalis. CIPALIN (Comité Interprofessionnel de la Production Agricole de Lin), AGPL (Association Générale des Producteurs de Lin), Fédération Syndicale du Teillage Agricole de Lin
Féverole	Sensibilité au froid, à la sécheresse. Féverole d'hiver intéressante dans le Centre-Ouest de la France. Déconseillé de semer de la féverole d'hiver dans le Nord Pas de Calais (résistance au gel insuffisante).	Difficulté de lutte contre la bruche de la féverole (qui réduit la qualité des graines). Menace d'interdiction des fongicides (1 seule substance active encore autorisée).	Marché en forte croissance des protéines végétales. La féverole, 2ème protéagineux après le pois, pourrait connaitre une dynamique plus importante (augmentation des surfaces d'ici 5 ans, amélioration variétés). Production de 177 000 t + 25 000 t importations (2020). Projet LEGGO légumineuses Grand Ouest, Projet Normandie (vaches laitières), Projet Far'Innov Hauts de France (farines riches en protéines). Exportation 54% en Egypte pour l'alimentation humaine (2013). 43% exportés pour l'alim animale en Espagne Italie (ruminants) et Norvège (poissons).	Guide de culture féverole 2020 Terres Inovia. Etude technologique : évaluation du potentiel de développement de trois cultures d'oléoprotéagineux - Pole IAR (Février 2021).
Sorgho	Besoins en températures élevées (entre 1600 et 1980 °Cj).	Pas de matériel spécifique pour sa conduite. Sensibilité aux adventices. Efforts de recherche en amélioration variétale importants par rapport à la taille de la filière. Intégration dans les essais agronomiques d'Arvalis (2013). Culture relativement peu développée en France qui n'est donc peu ou pas confrontée aux problèmes d'insectes ou de maladies.	Collecteur Soufflet, silo sécheur à Vénizy (89). Filière Axereal oisellerie.	Choisir et décider Sorgho Synthèse nationale 2020-2021 ARVALIS. Le millet Chambre d'agriculture Centre Val de Loire (pour référence économiques Sorgho).
Millet	Résistance à la sécheresse, culture d'été à cycle court.	Peu de variétés disponibles. Culture extensive. Peu de maladies et peu de problèmes de ravageurs. Attention particulière aux mauvaises herbes d'été. Eviter les parcelles trop infestées en graminées (ray grass en particulier). Vigilance à la récolte pour garder un grain blanc.	Filière Axereal oisellerie sur le marché de Grande-Bretagne et de la Belgique. Production française aujourd'hui concurrencée par l'Ukraine. Collecteurs qui s'engagent auprès des agriculteurs sur un volume et un prix. Prix maintenu ces dernières années mais reste sensible aux fluctuations du marché.	Fiche Millet Bio 2017 Agridea. Le millet Chambre d'agriculture Centre Val de Loire (2019). Le millet : fiche technique 2016, association Terra Millet.

Culture	Adaptation conditions climatiques	Contraintes agronomiques	Insertion sur le marché	Sources
Lentilles	Sensible aux excès d'eau et au stress hydrique en fin de cycle. Résistance au gel et à un climat sec. Pas d'information pour le semis dans les régions Hauts de France et Ile de France.	Solutions de désherbage limitées (choisir de préférence des parcelles "propres"). Peu d'herbicides disponibles donc intervention chimique post semis souvent inévitable. Lutte alternative à ne pas dégliger en complément. Sensibilité à Aphanomyces euteiches et sclérotinia (aucune solution). Culture qui supporte mal les sols compactés (travail du sol primordial). Bruche de la lentille. Pas d'inoculation contrairement au soja. Adaptation du matériel sans investissement particulier.	Principales zones de production : Auvergne lentille verte du Puy (AOC, AOP), lentille bonde de Saint Flour (IGP, Label Rouge), lentille verte du Berry (Label Rouge, IGP), Champagne avec la lentille rosée (semée en hiver). Aussi présente dans l'Yonne et l'Aube. Transformation voie sèche lentille à Valencienne (2020). Projet Far'Innov Hauts de France (farines riches en protéines). 25 000 tonnes produites en 2015 (ANILS) et environ 30 000 tonnes importées par an. Marché de niche et contraintes liées aux critères de qualité spécifiques à l'alimentation humaine mais potentiel de développement avec tendances à la consommation de plus de protéines végétales.	Guide de lentille 2021 Terres Inovia. Aspect économique : Panneau Cultures avenir 2018 Chambre d'agriculture Centre Val de Loire.
Pois chiche	Adapté au climat méditerranéen, capable de supporter des stress hydriques relativement importants sans impact potentiel de rendement. Risque important de non récolte en Normandie et Hauts de France. Culture sensible à l'excès d'eau et à l'asphyxie racinaire.	Bactéries qui permettent la symbiose pas présentes dans tous les sols français. D'après la carte du guide Terres Inovia, absence du mésorhizobium dans la zone Nord France et pas d'inoculum homologué à ce jour sur le marché français. Mise en place des nodosités dans le Sud de la France. Besoin d'azote si pas de mesorhizobium.	Importation de la majorité du pois chiche consommé (état des lieux 2015). Production uniquement sous contrat. Non éligible à la prime protéagineuse.	Guide de culture Pois chiche 2021 Terres Inovia. Aspect économique : Panneau Cultures avenir 2018 Chambre d'agriculture Centre Val de Loire.
Chanvre	Bonne résistance à la sécheresse. Absorbe facilement les fortes pluies grâce à son pivot profond et fasciculé.	Aucun traitement phytosanitaire en végétation. Absence d'inervention entre le semis et la récolte. Etalement de la charge de travail aux périodes denses pour grandes cultures mais organisation de chantier importante à la récolte (matériel spécifique : faneuse, andaineuse et presse). Utilisation obligatoire de semences certifiées. Travail du sol profond (système racinaire en pivot). Faux semis pour réduire adventices. Pas d'herbicide nécessaire. Pas de moyen de lutte curative efficace contre l'orobanche rameuse mais il existe des variétés moins sensibles. Lutte génétique en cours contre l'orobanche rameuse (niveau d'infestation qui a fortement diminué). Maladies peu impactantes. Rarement des dégâts majeurs avec les ravageurs.	France leader Européen du chanvre (1/3 production européenne en 2019). Graines (11% du volume récolté) et pailles (89% du volume) représentent respectivement 21% et 79% de la valeur économique issue de la culture. La filière chanvre est une petite filière (300 salariés et 17 900 ha cultivés en France en 2020), dynamique au niveau des acteurs et de l'innovation produits. Acteurs de la sélection variétale : Fédération des Producteurs de Chanvre R&D semence (9 personnes), Cop des Producteurs de semences de Chanvre (CCPSC, 9 personnes), Terres Inovia, Union des transformateurs (UTC). Culture contractualisée qui impose une proximité avec un transformateur.	Guide méthodologique de la culture de chanvre 2020, Terres Inovia. Interchanvre. Planète Chanvre.

Culture	Adaptation conditions climatiques	Contraintes agronomiques	Insertion sur le marché	Sources
Epeautre	S'adapte mieux que le blé aux conditions climatiques rudes et aux sols peu fertiles, en régions d'altitude.	Céréale sensible aux maladies du pied (piétin verse, piétin échaudage, oidium, rouille). Sensible à la verse. Pas d'inscription au catalogue de variétés d'épeautre en France. Variétés qui proviennent de Belgique, Suisse, Allemagne.	Peu ou pas de marché pour l'épeautre non décortiqué, l'épeautre décortiqué peut avoir une très bonne valorisation en AB. Volumes importants à stocker et peu de débouché au niveau du stockage. Besoins en épeautre de l'élevage en général assez faibles. Pas de possibilité de vendre le surplus à un organisme stockeur.	Cultiver petit et grand épeautre en Agriculture Biologique, Chambre d'agriculture Ardennes - Aube - Marne - Haute-Marne.
Seigle	Céréale très rustique qui supporte les sols froids, acides, pauvres et superficiels. Senisbilité à l'excès d'eau.	Très sensible aux rouilles (en particulier la rouille dispersée). Très sensible à l'ergot. Sensible à la verse.	Culture anciennement très présente (rustique, adaptée aux sols acides peu fertiles) mais fortement concurrencée par le triticale depuis une quinzaine d'années. Très forte régression. Facteurs antinutritionnels qui limitent son incorporation dans les rations animales.	Guide Culture du seigle, Conduites techniques des cultures, Juillet 2018, Chambre d'agriculture Saône et Loire.
Lupin	Lupin de printemps déconseillé dans les secteurs où le stress hydrique et thermique sont fréquents au mois de juin-juillet et sur les parcelles à faible réserve utile. Zone déconseillée sur partie Est des Hauts de France et Ile de France. Attention aux zones calcaires dans la région Centre et aux zones avec risques de gel.	Culture technique (manque de références agronomiques et produits phytosanitaires homologués). Forte sensibilité aux variations climatiques. Menace d'interdiction des fongicides (2 substances actives encore autorisées). Sensibilité aux adventices, plante peu couvrante (peu de solution chimique, mais désherbage mécanique facilement envisageable). Il est conseillé d'inoculer pour la première fois. Travail du sol incontournable (labour indispensable un mois avant semis). Peu de ravageurs nuisibles.	Marché du lupin moins avancé que ceux du pois et de la féverole, pas dans une dynamique de croissance à cause d'un manque de débouchés (filière récente en France). Filière très structuré dans l'Ouest pour l'alimentation humaine (Site de production Pays de la Loire). Contrat de lupin d'hiver et de printemps dans les Hauts de France. L'alimentation humaine est mieux valorisée que l'alimentation animale. Aide couplée aux protéagineux (170 €/ha). Grand intérêt pour l'alimentation animale (35-40% de protéines dans la graine) mais faibles volumes disponibles et polymère non digestible par les monogastriques.	Guide Lupin blanc 2019 Terres Inovia. Etude technologique : évaluation du potentiel de développement de trois cultures d'oléoprotéagineux - Pole IAR (Février 2021).
Sarrasin	Tolérance à la sécheresse. Sensibilité au froid (fleurs qui avortent à partir de 3°C). Très exigent en eau jusqu'à la floraison (période de forte croissance) et demande ensuite un temps sec et chaud pour une bonne fécondation.	Peu contraignant, adapté aux sols superficiels. Absence de ravageur, plante etouffante.	Bassin de production : Bretagne, Limousin, Centre, Bourgogne. Marché saturé (2018). Culture "opportuniste".	Aspect économique : Panneau Cultures avenir 2018, Chambre d'agriculture Centre Val de Loire. Fiche technique Sarrasin bio Région Ile de France.

Annexe 8 : Répartition des Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT) moyens des cultures de diversification identifiées et des quatre cultures principales en France (blé tendre, orge, colza, maïs).

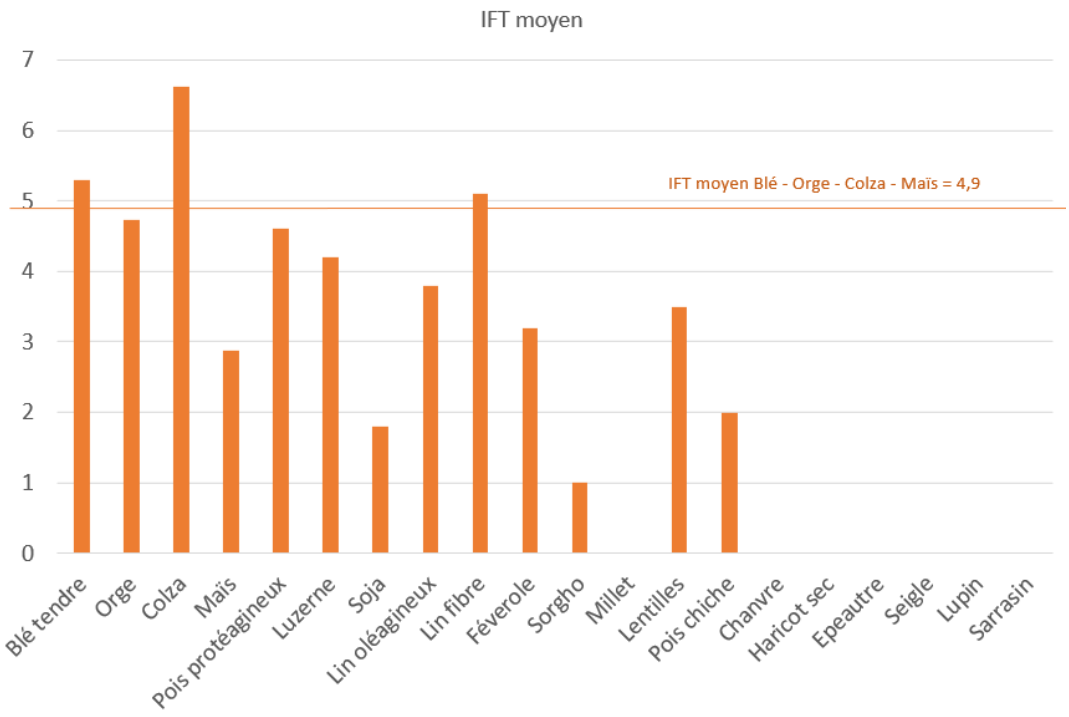


Figure 1 : Indicateurs de Fréquence de Traitements Phytosanitaires (IFT) moyens pour les cultures de diversification identifiées et des quatre cultures principales en France (blé tendre, orge, colza, maïs).

Annexe 9 : Classification des cultures de diversification en fonction des indicateurs de sélection.

Tableau 1 : Classification des cultures pour l'indicateur « adaptation aux conditions climatiques »

	Peu ou pas adapté	**Plus ou moins adapté**	**Bien adapté**
Pois protéagineux		X (pois d'hiver)	X (pois de printemps)
Luzerne			x
Soja		x	
Lin oléagineux			x
Lin fibre		x	
Féverole		x	
Sorgho	x		
Millet			x
Lentilles		x	
Pois chiche	x		
Chanvre			x
Epeautre			x
Seigle		x	
Lupin		x	
Sarrasin		x	

Tableau 2 : Classification des cultures pour l'indicateur « contraintes agronomiques »

	Beaucoup de contrainte - verrou agronomique	**Quelques contraintes**	**Peu ou pas de contrainte**
Pois protéagineux		x	
Luzerne		x	
Soja			x
Lin oléagineux		x	
Lin fibre		x	
Féverole		x	
Sorgho			x
Millet		x	
Lentilles		x	
Pois chiche		x	
Chanvre		x	
Epeautre	x		
Seigle		x	
Lupin	x		
Sarrasin			x

Tableau 3 : Classification des cultures pour l'indicateur « insertion sur le marché »

	Marché saturé / de niche ou sans potentiel de déploiement	**Marché au potentiel de déploiement limité / en cours**	**Marché avec potentiel de déploiement**
Pois protéagineux			x
Luzerne	x		
Soja			x
Lin oléagineux		x	
Lin fibre		x	
Féverole		x	
Sorgho	x		
Millet	x		
Lentilles		x	
Pois chiche	x		
Chanvre		x	
Epeautre	x		
Seigle	x		
Lupin	x		
Sarrasin	x		

Tableau 4 : Classification des cultures pour l'indicateur « marge brute »

	< 500 €/ha	**Entre 500 et 800 €/ha**	**> 800 €/ha**
Pois protéagineux	x		
Luzerne	x		
Soja		x	
Lin oléagineux		x	
Lin fibre			x
Féverole	x		
Sorgho	x		
Millet	x		
Lentilles			x
Pois chiche			x
Chanvre		x	
Epeautre		x	
Seigle		x	
Lupin		x	
Sarrasin	x		

Annexe 10 : Sole des cultures de diversification et des cultures principales dans chaque région

Tableau 1 : Synthèse de l'analyse surfacique des cultures de diversification (inscrites en caractère gras) en comparaison des cultures majoritairement présentes sur le territoire français (blé tendre, blé dur, orge, colza et maïs) sur les 5 régions d'étude. Le tableau indique pour chaque région la surface de culture en 2020 (en ha), la proportion par rapport à la surface de grandes cultures, et l'évolution des surfaces sur les 10 dernières années calculées à partir des moyennes des surfaces de 2008-2010 et 2018-2020.

	CENTRE VAL DE LOIRE			HAUTS DE France		
Surface	Surf_2020 (ha)	% / GC	Δ Surf_10 ans (%)	Surf_2020 (ha)	% / GC	Δ Surf_10 ans (%)
Blé tendre	554 505,0	34,9%	-9%	768 395,0	61,1%	-2%
Blé dur	78 190,0	4,9%	-28%	704,0	0,1%	54%
Orge	329 175,0	20,7%	15%	171 425,0	13,6%	-12%
Colza	195 765,0	12,3%	-23%	137 911,0	11,0%	13%
Maïs	149 250,0	9,4%	12%	75 150,0	6,0%	-20%
Pois protéagineux	31 900,0	2,0%	5%	25 235,0	2,0%	-21%
Soja	6 085,0	0,4%	1322%	265,0	0,0%	1443%
Lin oléagineux	-	0,5%	87%	-	0,1%	-20%
Lin textile	1 249,5	0,1%	221%	50 314,3	4,0%	118%
Féverole	13 440,0	0,8%	192%	5 851,0	0,5%	-88%
Sorgho	21 530,0	1,4%	289%	505,0	0,0%	753%
Lentille	6 436,4	0,4%	282%	662,7	0,1%	1553%
Pois chiche	2 015,6	0,1%	21841%	332,0	0,0%	47%
Chanvre	403,9	0,0%	600%	187,3	0,0%	209%
Seigle	4 745,0	0,3%	-36%	1 387,0	0,1%	83%
Lupin	305,0	0,0%	-8%	54,0	0,0%	149%

	ILE DE France			NORMANDIE		
Surface	Surf_2020 (ha)	% / GC	Δ Surf_10 ans (%)	Surf_2020 (ha)	% / GC	Δ Surf_10 ans (%)
Blé tendre	194 290,0	42,9%	-10%	422 620,0	50,0%	-3%
Blé dur	3 620,0	0,8%	-42%	990,0	0,1%	-31%
Orge	100 770,0	22,3%	29%	130 850,0	15,5%	22%
Colza	60 705,0	13,4%	-10%	120 300,0	14,2%	10%
Maïs	51 275,0	11,3%	14%	39 610,0	4,7%	2%
Pois protéagineux	12 305,0	2,7%	-32%	11 110,0	1,3%	-17%
Soja	2 795,0	0,6%	29208%	265,0	0,0%	NA
Lin oléagineux	-	0,1%	-6%	-	0,0%	-16%
Lin textile	3 602,9	0,8%	71%	85 245,8	10,1%	99%
Féverole	6 150,0	1,4%	-75%	6 490,0	0,8%	-69%
Sorgho	740,0	0,2%	471%	1 000,0	0,1%	1119%
Lentille	741,7	0,2%	870%	474,9	0,1%	2077%
Pois chiche	153,8	0,0%	NA	329,3	0,0%	5942%
Chanvre	1 162,2	0,3%	500%	362,1	0,0%	-26%
Seigle	435,0	0,1%	-33%	590,0	0,1%	34%
Lupin	20,0	0,0%	-77%	180,0	0,0%	-27%

	PAYS DE LA LOIRE		
Surface	Surf_2020 (ha)	% / GC	Δ Surf_10 ans (%)
Blé tendre	304 152,0	38,3%	-3%
Blé dur	19 870,0	2,5%	-23%
Orge	85 798,0	10,8%	43%
Colza	71 696,0	9,0%	45%
Maïs	143 175,0	18,0%	-5%
Pois protéagineux	12 710,0	1,6%	26%
Soja	1 065,0	0,1%	722%
Lin oléagineux	-	0,5%	115%
Lin textile	193,7	0,0%	129%
Féverole	5 169,0	0,7%	47%
Sorgho	7 324,0	0,9%	174%
Lentille	1 675,2	0,2%	1792%
Pois chiche	357,8	0,0%	3700%
Chanvre	3 510,3	0,4%	247%
Seigle	1 779,0	0,2%	10%
Lupin	1 356,0	0,2%	-8%

Annexe 11 : Vérification des hypothèses pour la réalisation de l'analyse de variance (ANOVA) de l'effet de la modalité « culture » sur les réductions d'émissions générées par la mise en place des cultures à faibles besoins azotés.

- <u>Validation de l'hypothèse de normalité</u>

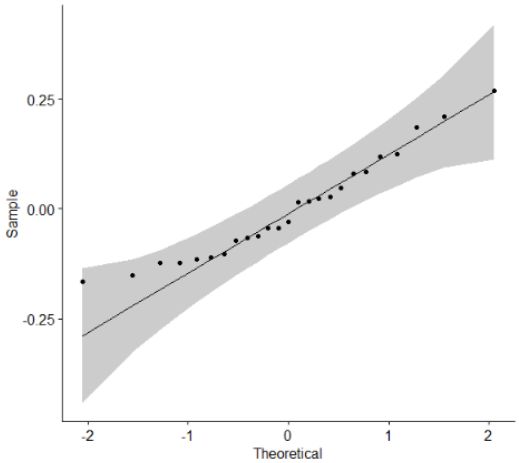


Figure 1 : Graphique QQ plot des résidus

```
> shapiro_test(residuals(model))
# A tibble: 1 x 3
  variable         statistic p.value
  <chr>                <dbl>   <dbl>
1 residuals(model)     0.947   0.215
```

Figure 2 : Test de Shapiro-Wilk

- <u>Validation de l'hypothèse d'homogénéité des variances</u>

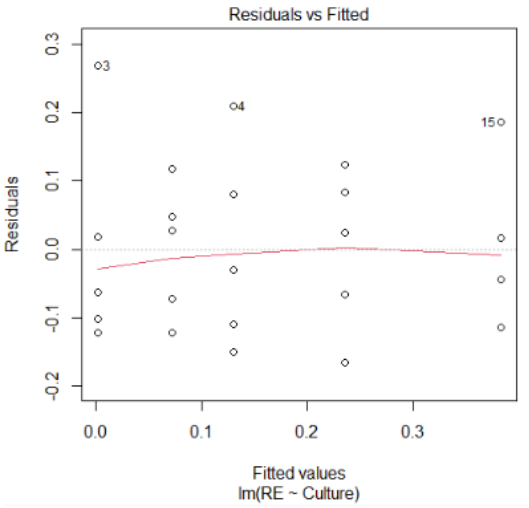


Figure 3 : Graphique représentant la dispersion des résidus pour valider l'hypothèse d'homogénéité des variances

```
> resultat %>% levene_test(RE ~ Culture)
# A tibble: 1 x 4
    df1   df2 statistic     p
  <int> <int>     <dbl> <dbl>
1     4    20     0.177 0.948
```

Figure 4 : Test de Levene

Annexe 12 : Résultats des tests statistiques

```
> ano1 <- aov(RE ~ Culture, data=resultat)
> summary(ano1)
            Df Sum Sq Mean Sq F value  Pr(>F)
Culture      4 0.4173 0.10433   6.755 0.00131 **
Residuals   20 0.3089 0.01544
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

Figure 1 : Résultat de l'ANOVA pour étudier l'effet des cultures de diversification insérées dans les assolements sur les réductions d'émissions générées.

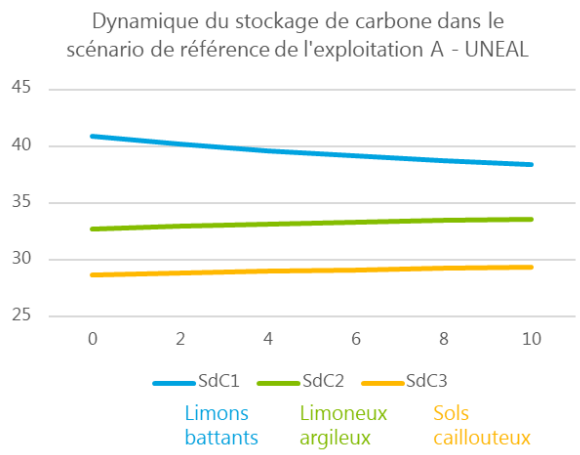
```
> ano2 <- aov(RE ~ Exploitation, data=resultat)
> summary(ano2)
             Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Exploitation  4 0.2554 0.06385   2.712 0.0592 .
Residuals    20 0.4708 0.02354
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

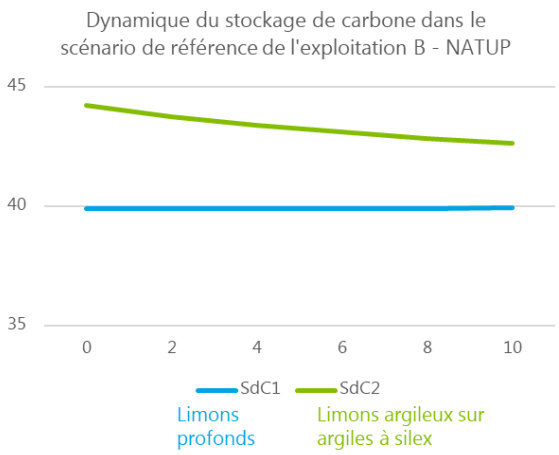
Figure 2 : Résultat de l'ANOVA pour étudier l'effet des exploitations sur les réductions d'émissions générées.

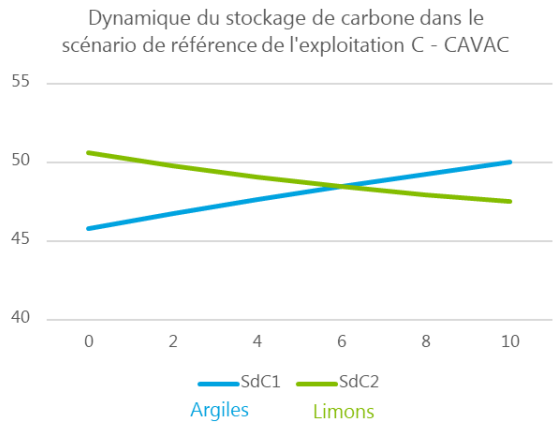
```
> ano4 <- aov(Cout_levier ~ Culture, data=resultat)
> summary(ano4)
            Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Culture      4  15309    3827   1.749  0.179
Residuals   20  43763    2188
```

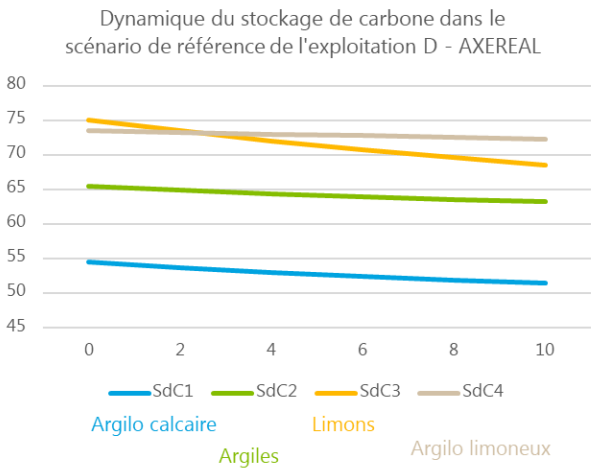
Figure 3 : Résultat de l'ANOVA pour étudier l'effet des cultures de diversification insérées sur le coût de l'insertion de ces cultures dans les assolements.

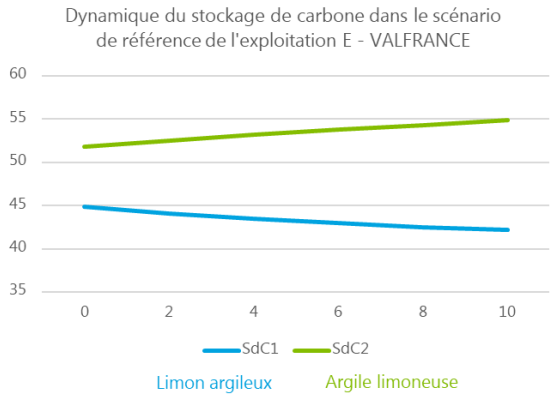
Annexe 13 : Evolution des stocks de carbone de 0 à 10 ans pour chaque exploitation et pour chaque système de cultures.











Annexe 14 : Réductions d'émissions liées à la fertilisation (RE $_{fertilisation}$) exprimées en teqCO$_2$.ha^{-1}.an^{-1} de culture à faible besoin azoté insérée dans les assolements.

	Pois d'hiver	Pois de printemps	Lin d'hiver	Lin de printemps	Soja
Exploitation A - Hauts-de-France	2,4	2,4	1,8	1,8	2,2
Exploitation B - Normandie	1,8	1,8	0,9	0,9	1,9
Exploitation C - Pays de la Loire	1,7	1,7	0,8	0,8	1,8
Exploitation D - Centre-Val de Loire	1,5	1,5	0,5	0,5	1,6
Exploitation E - Ile-de-France	2,0	2,0	1,0	1,0	2,0

Annexe 15 : Facteurs d'émissions associés aux engrais minéraux

Tableau 1 : Tableau du référentiel engrais présentant les facteurs d'émissions associés aux engrais minéraux, issu de la méthode Grandes Cultures du Label bas-carbone.

Composants_engrais_mineraux	**FE (kg eqCO$_2$.kg^{-1} élément nutritif)**	**Unité**
Ammonitrate (33,5% N)	3,97	kg eqCO$_2$.kgN^{-1}
Ammonitrate calcaire (27%N)	4,18	kg eqCO$_2$.kgN^{-1}
Solution azotée (30%N)	4,99	kg eqCO$_2$.kgN^{-1}
Solution azotée (30%N) enfouie dans les 12 heures	4,99	kg eqCO$_2$.kgN^{-1}
Urée (46% N)	4,54	kg eqCO$_2$.kgN^{-1}
Urée avec inhibiteur d'uréase (%46n)	4,54	kg eqCO$_2$.kgN^{-1}
Urée (46%N) enfouie dans les 12 heures	4,54	kg eqCO$_2$.kgN^{-1}
Engrais azoté moyen	4,51	kg eqCO$_2$.kgN^{-1}
Triple Superphosphate (46% P2o5)	1,45	kg eqCO$_2$.kgP$_2$O$_5$$^{-1}$
Monoammonium phosphate (11%N + 54% P$_2$O$_5$)	1,82	kg eqCO$_2$.kgP$_2$O$_5$$^{-1}$
Diammonium phosphate (18% N + 46% P$_2$O$_5$)	3,02	kg eqCO$_2$.kgP$_2$O$_5$$^{-1}$
Engrais phosphate moyen	1,45	kg eqCO$_2$.kgP$_2$O$_5$$^{-1}$
Chlorure de potasse (60% K$_2$O)	0,71	kg eqCO$_2$.kgK$_2$O^{-1}
Nitrate de potassium (44% N$_2$O + 14% N)	2,74	kg eqCO$_2$.kgK$_2$O^{-1}
Engrais potassique moyen	0,71	kg eqCO$_2$.kgK$_2$O^{-1}

Annexe 16 : Fonctionnement du modèle de bilan humique AMG utilisé pour le calcul des RE stockage.

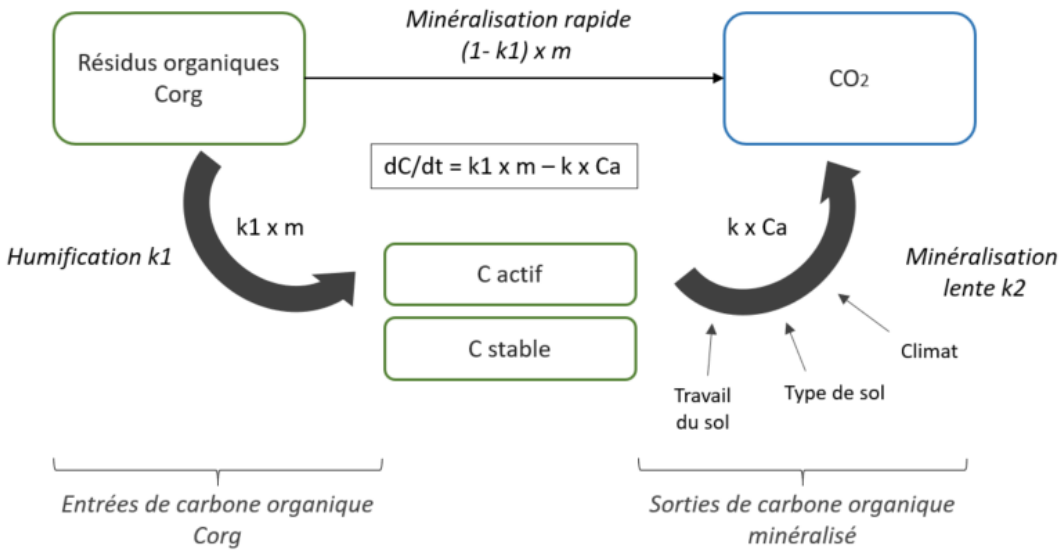


Figure 1 : Schéma du fonctionnement du modèle de bilan humique AMG. Les entrées de carbone sont égales à k1 x m, avec k1 le coefficient d'humification et m la masse de carbone frais des résidus de culture. Les sorties de carbone sont égales à k x Ca, avec k le taux de minéralisation annuelle et Ca le stock de carbone actif du sol. La différence de stock entre les entrées et sorties est donc défini par l'équation : dC/dt = k1 x m – k x Ca.

Annexe 17 : Variabilité des rendements modélisés dans les scénarios de référence et les simulations pour les cultures de diversification et les cultures principales des assolements

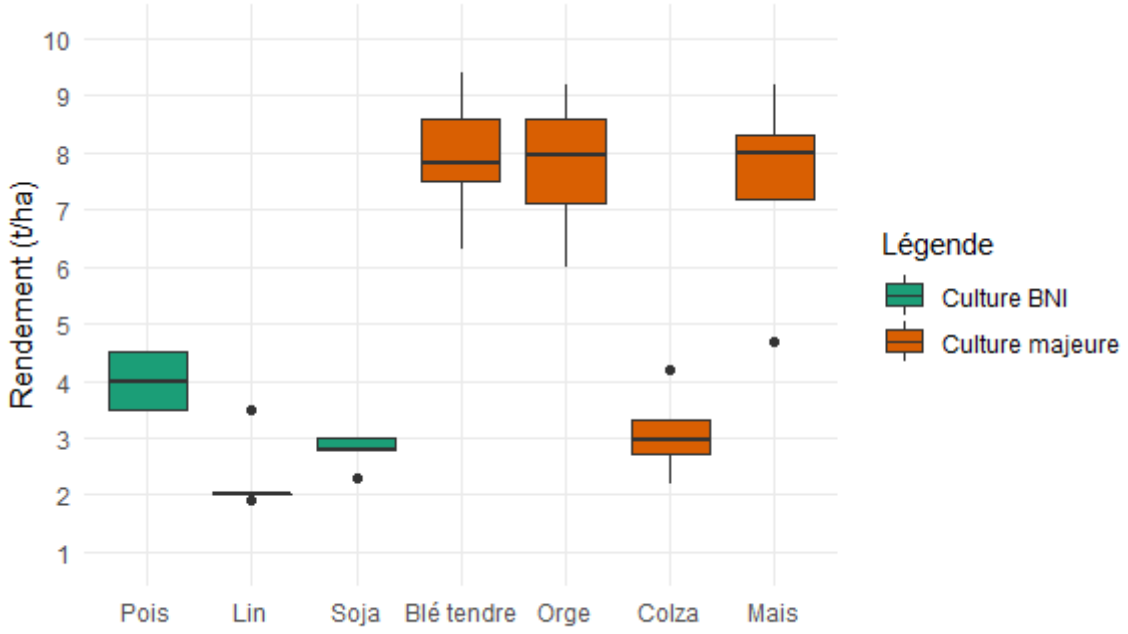


Figure 1 : Variabilité des rendements des cultures de diversification étudiées et des cultures principales substituées dans les scénarios projet. Les rendements du pois, du lin et du soja utilisés dans les modélisations ont été choisis pendant les entretiens avec les coopératives de chaque territoire. Les rendements des cultures substituées correspondent aux rendements moyens des cultures pendant les 3 années de référence pour chaque exploitation.

Annexe 18 : Indices de récolte des cultures étudiées dans les scénarios de référence et dans les simulations

Tableau 1 : Indice de récolte (IR) des cultures de diversification étudiées et des cultures principales substituées dans les assolements des exploitations de l'étude. Le pourcentage de biomasse restituée (% biomasse restituée) est égal à 1 – IR.

	Indice de récolte (IR)	% biomasse restituée
Pois protéagineux	58%	42%
Lin oléagineux	41%	59%
Soja	32%	68%
Blé tendre	49%	51%
Colza	29%	71%
Maïs grain	49%	51%
Orge	50%	50%
Tournesol	40%	60%

Annexe 19 : Marges directes du blé tendre, du colza, du maïs et de l'orge dans les exploitations de l'étude.

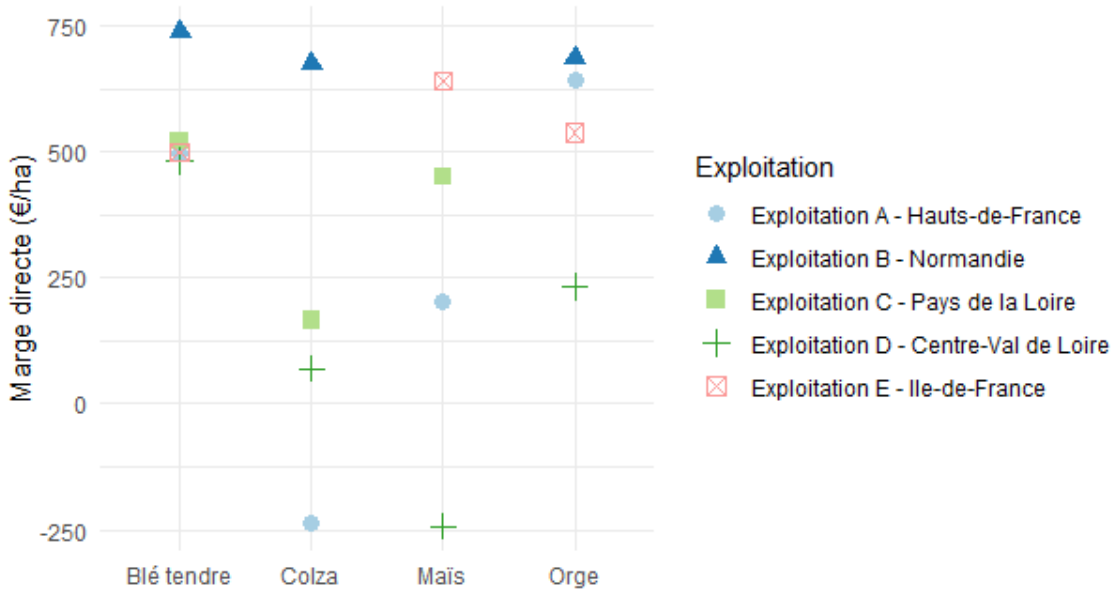


Figure 1 : Variabilité des marges directes du blé tendre, du colza, du maïs et de l'orge évaluées pour chaque exploitation d'après les données issues des entretiens réalisés avec les coopératives et les rendements moyens réalisés sur les exploitations agricoles.

Abstract

Title : Crop diversification with low-input crops : how can we support the low carbon transition of farms ?

Crop diversification with low nitrogen requirement crops is an interesting lever for carbon transition in agriculture. However, these crops are not very attractive to farmers because of the poor sector structuring and their low economic competitiveness compared to traditional crops. The objective of this paper is to assess the capacity of the voluntary carbon market to support farms in diversifying crop rotation with low nitrogen requirement crops. The emission reduction potential (ER ; avoided greenhouse gas emissions and carbon storage) and the cost of carbon credits (cost of one tonne of CO_2 avoided) linked to the insertion of low-nitrogen crops on 15% of the UAA were calculated on 5 farms belonging to different regions. Low-nitrogen crops reduce GHG emissions at the farm level, particularly emissions related to nitrogen fertilisation. Cropping systems incorporating soybeans have a significantly higher ER potential than other crops due to the legume's capacity for symbiotic atmospheric nitrogen fixation and its potential to return carbon to the soil. The introduction of spring crops with low nitrogen requirements preceded by long intercropping increases the restitution of biomass to the soil and therefore improves soil carbon storage. Finally, the costs of carbon credits generated by the introduction of low-nitrogen crops are high given the current price of a tonne of CO_2. The low-carbon label is able to compensate for a part of the costs related to crop diversification, but it is necessary to combine different sources of funding to provide farmers with the best possible support. These results show that crop diversification is interesting from the point of view of the carbon transition in addition to the various environmental benefits. Technical and economic support for farmers is essential to implement sustainable practices that can offset GHG emissions and mitigate the effects of climate change.

Key words : low input crop ; diversification ; low-carbon label ; crop rotation ; carbon storage ; greenhouse gas emission.

Résumé

Titre : Diversification des assolements avec des cultures à bas niveau d'intrants : dans quelle mesure est-il possible d'accompagner la transition bas-carbone des exploitations agricoles?

La diversification des assolements avec des cultures à faibles besoins azotés est un levier d'action intéressant pour la transition carbone du secteur agricole. Ces cultures sont cependant peu plébiscitées par les agriculteurs en raison du manque de structure des filières et de leur faible compétitivité économique par rapport aux cultures de rentes traditionnelles. Ce mémoire a pour objectif d'évaluer la capacité du marché carbone volontaire à accompagner les exploitations agricoles vers la diversification des assolements avec des cultures à faibles besoins azotés. Le potentiel de réductions d'émissions (RE ; émissions de gaz à effet de serre évitées et stockage de carbone) et le coût des crédits carbone (coût d'une tonne de CO_2 évitée) liés à l'insertion de cultures à faibles besoins azotés sur 15% de la SAU ont été calculé sur 5 exploitations appartenant à des régions distinctes. Les cultures à faibles besoins azotés permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle de l'exploitation notamment les émissions liées à la fertilisation azotée. Les systèmes de cultures intégrant du soja ont un potentiel de RE significativement plus élevé que les autres cultures en raison de la capacité de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique de cette légumineuse et de son potentiel de restitution de carbone au sol. L'introduction de cultures à faibles besoins azotés de printemps précédées d'intercultures longues permet d'augmenter la restitution de biomasse au sol et améliore donc le stockage de carbone dans le sol. Enfin, les coûts des crédits carbone générés par l'introduction des cultures à faibles besoins azotés sont élevés au vu du prix actuel de la tonne de CO_2. Le label bas-carbone est en mesure de compenser une partie des frais engagés dans la diversification des assolements mais il est nécessaire de combiner différentes sources de financement pour accompagner au mieux les agriculteurs. Ces résultats montrent que la diversification des assolements est intéressante du point de vue de la transition carbone en plus des autres bénéfices environnementaux. L'accompagnement technique et économique des agriculteurs est essentiel pour mettre en place des pratiques durables permettant de compenser les émissions de GES et d'atténuer les effets du changement climatique.

Mots clés : cultures à bas niveau d'intrants ; diversification ; label bas-carbone ; rotation culturale ; stockage de carbone ; émissions de gaz à effet de serre.