

<p>Année universitaire : 2021-2022 Spécialité : Agronomie Spécialisation : Sciences et Ingénierie en Productions Animales (SIPA)</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)<input type="checkbox"/> de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)<input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)<input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)
--	---

Evaluation technique, économique et environnementale de l'introduction de soja dans un système de polyculture-élevage pour améliorer l'autonomie protéique

Par : Margot DUVAL

ARPEEGE

L'Autonomie en Ressources Protéiques & Énergétiques
des Élevages du Grand Est



Soutenu à Rennes, le 12 septembre 2022

Devant le jury composé de :

Président : Yannick Le Cozler

Maître de stage : Alice Berchoux et Mathilde Jouffroy

Enseignant référent : Anne-Lise Jacquot

Rapporteur : Jocelyne Flament

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier mes maîtres de stage, Alice Berchoux et Mathilde Jouffroy, pour leur accompagnement dans la réalisation de ce travail. Un grand merci à toutes les deux de m'avoir fait confiance, tout en me consacrant du temps quand j'en avais besoin.

Je remercie également Estelle Hermant, directrice de l'exploitation du lycée agricole de Rethel, Thierry Hugot et Denis Huart, salariés agricoles de la ferme, Cyprien Buard, étudiant en BTS, et Jean-Baptiste Vanham, enseignant au lycée, pour votre implication dans le suivi d'essai et la collecte des données nécessaires à la réalisation de ce travail.

Merci à Maxime Legris, du service Data'Stat de l'IDELE, pour son aide et sa pédagogie lors du traitement des données zootechniques.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des personnes impliquées dans le projet ARPEEGE qui ont suivi le déroulement de ces travaux et ont répondu à mes interrogations. Merci notamment à Maëva Weens, chargée du suivi du projet ARPEEGE à la Chambre régionale d'Agriculture Grand-Est et à Aurore Baillet, ingénieure développement chez Terres Inovia.

Enfin, merci beaucoup à toute l'équipe IDELE/BTPL de Laxou pour votre bonne humeur et votre accueil chaleureux au sein de l'antenne.

Table des matières

Introduction	1
I. Etude bibliographique	2
1. La polyculture-élevage : un système d'exploitation historique, qui régresse en Grand-Est.....	2
2. L'autonomie alimentaire : un facteur de résilience pour les ateliers d'élevage	3
2.1. Autonomie protéique de la France : un déficit historique.....	3
2.2. Les enjeux de l'autonomie à l'échelle de l'exploitation	5
2.3. Quels niveaux d'autonomie pour les élevages laitiers français ?	5
2.4. Les leviers à mobiliser pour gagner en autonomie alimentaire et protéique	6
3. Etude de la production et de la valorisation des graines de soja en Grand-Est.....	7
3.1. Quel potentiel pour la culture du soja en Grand-Est ?	7
3.2. La valorisation des graines de soja dans la ration des vaches laitières	8
4. Contexte du stage	10
II. Matériel et méthodes	11
1. Effet du toastage des graines de soja sur les performances des vaches laitières.....	11
1.1. Durée de l'essai et dispositif expérimental.....	11
1.2. Matériel expérimental.....	11
1.3. Contrôles et analyses	12
1.4. Traitement des données.....	14
2. Effet de l'introduction de soja sur les performances économiques de la ferme du lycée agricole de Rethel	15
2.1. Matériel expérimental.....	15
2.2. Méthodologie employée pour la simulation.....	15
3. Conséquences du changement de système sur les performances environnementales de l'exploitation.....	17
III. Résultats	18
1. Effet du toastage des graines de soja sur les performances des vaches laitières	18
1.1. Une ingestion similaire entre les deux lots	18
1.2. Une faible évolution des performances zootechniques.....	18
1.3. Un état corporel stable quel que soit le traitement.....	21
1.4. Une marge sur coût alimentaire inférieure avec le soja toasté	22
2. Effet de l'introduction de soja sur les performances économiques de l'exploitation.....	22
2.1. Optimisation du système initial.....	22
2.2. Simulation d'introduction de soja sur l'exploitation	23

3. Influence du changement de système sur les performances environnementales de l'exploitation.....	26
IV. Discussion	27
1. Intérêt technico-économique du toastage des graines de soja	27
1.1. Une amélioration de la valeur nutritive des graines par le toastage	27
1.2. Un niveau d'ingestion inférieur aux prévisions.....	27
1.3. Un effet très limité sur les performances laitières, et un produit lait qui ne permet pas de compenser pas le surcoût lié au toastage.....	27
2. Des économies de charges qui ne compensent pas la réduction du produit cultures	28
3. Des progrès sur l'autonomie et les performances environnementales qui restent limités	29
5. Des conséquences sur le temps de travail à évaluer	29
Conclusion et perspectives.....	30
Références	31
Annexes	37

Liste des sigles et des abréviations

AB : Agriculture Biologique

ACV : Analyse de Cycle de Vie

ADF : Acid Detergent Fiber ; Fibres insolubles dans les détergents acides

ADL : Acide Detergent Lignin ; Lignine insoluble dans les détergents acides

AOP : Appellation d'Origine Protégée

ARPEEGE : Autonomie en Ressources Protéiques et Energétiques des Elevages du Grand-Est

BPR : Balance Protéique du Rumen

CAP'2ER ® : Calcul Automatisé des Performances Environnementales pour des Exploitations Responsables

CB : Cellulose Brute

CGAAER : Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux

CH₄ : Méthane

CO₂ : Dioxyde de carbone

CRAGE : Chambre Régionale d'Agriculture Grand-Est

DAC : Distributeur Automatique de Concentrés

DCS : Digestibilité Pepsine Cellulase

DE1 : Dégradabilité Enzymatique de l'azote en une heure

DECELAIT : DEmarche de Conseil en Elevage LAITier

dMO : Digestibilité apparente de la Matière Organique

DT_N : Dégradabilité Théorique de l'Azote

EBE : Excédent Brut d'Exploitation

FEADER : Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural

GATT : General Agreement on Tariffs and Trade ; Accord général sur les tarifs douaniers et le commerce

GES : Gaz à Effet de Serre

ha : hectare

IDELE : Institut de l'Elevage

LANO : Laboratoire Agronomique Normand

MAT : Matières Azotées Totales

MG : Matière Grasse

MM : Matières Minérales

MP : Matière Protéique

MRP : Matières Riches en Protéines

MS : Matière Sèche

N₂O : Protoxyde d'azote

NDF : Neutral Detergent Fiber ; Fibres insolubles dans les détergents neutres

NEC : Note d'Etat Corporel

OGM : Organisme Génétiquement Modifié

OTEX : Orientation Technico-Economique des EXploitations

PAC : Politique Agricole Commune

PDIA : Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Alimentaire

PDI : Protéines Digestibles dans L'Intestin

PEI : Partenariat Européen pour l'Innovation

PP : Prairie Permanente

PT : Prairie Temporaire

SAU : Surface Agricole Utile

SFP : Surface Fourragère Principale

SSR : Sucres Solubles Résiduels

STH : Surface Toujours en Herbe

TB : Taux Butyreux

TP : Taux Protéique

UEL : Unité d'Encombrement Lait (vaches et chèvres laitières)

UF : Unité Fourragère (énergie nette)

UFL : Unité Fourragère Lait (énergie nette pour la lactation)

Liste des figures

Figure 1 : Carte de l'orientation technico-économique des communes du Grand-Est d'après le recensement agricole de 2020

Figure 2 : Carte de la part des surfaces toujours en herbe (STH) par rapport à la surface communale pour la région Grand-Est

Figure 3 : Bilan français des matières riches en protéines pour l'alimentation animale entre 1973 et 2019

Figure 4 : Exemples de leviers améliorant le niveau d'autonomie alimentaire d'un atelier laitier

Figure 5 : Carte de faisabilité du soja dans la région Grand-Est

Figure 6 : Fonctionnement d'un toasteur mobile

Figure 7 : Structuration de l'expérimentation

Figure 8 : Présentation de l'exploitation du lycée agricole de Rethel

Figure 9 : Structure et utilisations de l'Excédent Brut d'Exploitation

Figure 10 : Schéma du périmètre d'évaluation de la performance environnementale d'une exploitation par l'outil CAP'2ER ®

Figure 11 : Evolution de la consommation de matière sèche à l'auge par VL pendant la période pré-expérimentale selon le lot

Figure 12 : Statistiques descriptives du lait brut moyen selon le lot durant la période expérimentale

Figure 13 : Statistiques descriptives du taux protéique moyen selon le lot durant la période expérimentale

Figure 14 : Statistiques descriptives du taux butyreux moyen selon le lot durant la période expérimentale

Figure 15 : Statistiques descriptives de la quantité de matière protéique moyenne selon le lot durant la période expérimentale

Figure 16 : Statistiques descriptives de la quantité de matière grasse moyenne selon le lot durant la période expérimentale

Figure 17 : Statistiques descriptives du taux de leucocytes moyen (en log 10) selon le lot durant la période expérimentale

Figure 18 : Statistiques descriptives du taux d'urée moyen selon le lot durant la période expérimentale

Figure 19 : Statistiques descriptives de l'évolution de la NEC de chaque lot entre février et avril

Liste des tableaux

Tableau 1 : Indicateurs utilisés pour décrire l'autonomie alimentaire des élevages de ruminants

Tableau 2 : Comparaison des niveaux d'autonomie massique et protéique des exploitations laitières françaises et de celles du Grand-Est

Tableau 3 : Composition chimique et valeur alimentaire des principales graines oléo-protéagineuses et de leurs tourteaux

Tableau 4 : Caractéristiques zootechniques moyennes des deux lots

Tableau 5 : Performances moyennes des deux lots durant la période pré-expérimentale

Tableau 6 : Composition des rations semi-complètes des périodes pré-expérimentale et expérimentale

Tableau 7 : Composition chimique et valeurs nutritives des fourrages distribués

Tableau 8 : Composition chimique et valeurs nutritives des concentrés distribués

Tableau 9 : Valeurs d'ingestion moyenne des rations semi-complètes et totales selon le lot

Tableau 10 : Analyse de variance de la variable production laitière pour l'effet du traitement

Tableau 11 : Analyse de variance des variables taux protéique et taux butyreux pour l'effet du traitement

Tableau 12 : Analyse de variance de la variable matière protéique pour l'effet du traitement

Tableau 13 : Marges sur coût alimentaire comparées entre le lot T et le lot E

Tableau 14 : Postes de produits et de charges permettant d'obtenir l'EBE de la situation initiale

Tableau 15 : Optimisation du système initial et conséquences sur l'EBE

Tableau 16 : Conséquences de l'introduction de soja sur l'EBE de l'exploitation pour une baisse du TP de 2g/kg

Tableau 17 : Conséquences du changement de système sur l'EBE selon les différents scénarios d'évolution des performances laitières

Tableau 18 : Evolution des niveaux d'autonomie de l'exploitation sur la ration des vaches laitières

Tableau 19 : Evolution des performances environnementales à l'échelle de l'exploitation agricole et de l'atelier laitier pour une baisse du TP de 2g/kg

Liste des annexes

Annexe 1 : Structures partenaires du projet ARPEEGE et axes de recherche du projet

Annexe 2 : Estimation des surfaces susceptibles de recevoir du soja dans la rotation par département et par catégorie de faisabilité

Annexe 3 : Schéma du procédé de trituration appliqué aux graines oléo-protéagineuses

Annexe 4 : Grilles de notation utilisées pour les mesures de Note d'Etat Corporel (NEC)

Annexe 5 : Statistiques descriptives des variables mesurées dans l'essai

Annexe 6 : Détail des produits et charges constatés sur l'année 2021 sur l'exploitation du lycée agricole de Rethel

Annexe 7 : Détail des calculs d'optimisation de la situation initiale

Annexe 8 : Charges opérationnelles du soja prises en compte dans la simulation

Introduction

Malgré les atouts agroécologiques qui lui sont attribués, la polyculture-élevage, système de production historique en Grand-Est, a vu son nombre d'exploitations régresser de 35% entre 2010 et 2020. La volatilité des marchés des céréales et les contraintes imposées par l'élevage favorisent en effet l'abandon des ateliers animaux au profit d'une spécialisation en grandes cultures dans les exploitations de la région.

L'autonomie alimentaire, et notamment l'autonomie protéique, permettent de limiter l'exposition des ateliers animaux face à la volatilité des prix des matières premières. La recherche d'autonomie constitue ainsi une voie pour améliorer la résilience des exploitations de polyculture-élevage. Elle permet également de réduire la dépendance française aux protéines importées, ce qui est bénéfique sur le plan environnemental et améliore la traçabilité des filières d'élevage.

Le projet ARPEEGE, pour Autonomie en Ressources Protéiques et Energétiques des Elevages du Grand-Est, s'intéresse à différents leviers techniques permettant d'accroître le niveau d'autonomie des élevages, en travaillant sur la complémentarité entre les productions animales et végétales de la région. La production de soja à destination de l'alimentation animale est une des pistes étudiées dans le projet.

La graine de soja étant la graine la plus riche en protéines du monde végétal, elle présente des atouts pour remplacer les correcteurs azotés importés dans les rations des ruminants. De plus, les progrès génétiques et le changement climatique permettent aujourd'hui de cultiver certaines variétés de soja dans les régions septentrionales du pays comme le Grand-Est.

Il est communément admis que les graines oléo-protéagineuses autoproduites doivent être toastées avant la consommation par les vaches laitières, afin de réduire la part d'azote dégradable dans le rumen, et d'améliorer ainsi leur valeur alimentaire. Un essai réalisé en 2018 à la ferme expérimentale des Trinottières (49) a cependant remis en question l'intérêt du toastage. En effet, dans cet essai les performances des vaches laitières consommant des graines de féverole toastées n'étaient pas améliorées par rapport à la consommation de graines de féverole crues.

Le travail restitué dans le présent rapport avait deux objectifs majeurs :

- Le premier était de définir sous quelle forme introduire le soja dans la ration des vaches laitières : cru ou toasté. Dans ce cadre, une expérimentation a été mise en place sur le troupeau du lycée agricole de Rethel (08).
- Le second consistait à évaluer les conséquences de cette introduction sur les performances techniques, économiques et environnementales d'une exploitation de polyculture-élevage, dans une démarche d'approche globale. Un nouveau système d'exploitation a donc été modélisé à partir de l'exploitation du lycée agricole de Rethel. Ses répercussions sur l'Excédent Brut d'Exploitation (EBE) et l'empreinte carbone de l'exploitation ont ensuite été estimées.

Dans une première partie, une étude bibliographique permet de situer le sujet dans un contexte national et régional, de préciser la problématique et de définir les hypothèses émises quant aux résultats de l'étude. La deuxième partie est consacrée à la méthodologie employée pour répondre aux questions posées. Les résultats sont ensuite présentés, puis discutés.

I. Etude bibliographique

1. La polyculture-élevage : un système d'exploitation historique, qui régresse en Grand-Est

En Grand-Est, 41 000 exploitations agricoles valorisent 3 millions d'hectares, ce qui place la région au 3^{ème} rang national en termes de Surface Agricole Utile (SAU) (Agreste Grand-Est, 2022a ; Agreste Grand-Est, 2021). Ces exploitations sont de grande taille, puisque leur taille moyenne est de 74 hectares (ha) et de 117 ha hors viticulture, tandis qu'elle est de 69 ha à l'échelle de la métropole (Agreste Grand-Est, 2021 ; Agreste, 2021). Bien qu'en termes de nombre d'exploitations, la polyculture-élevage soit à la 3^{ème} place régionale derrière la viticulture et les grandes cultures, elle est l'Orientation Technico-Economique (OTEX) dominante dans la majorité des communes de la région (Agreste Grand-Est, 2022a ; Figure 1).

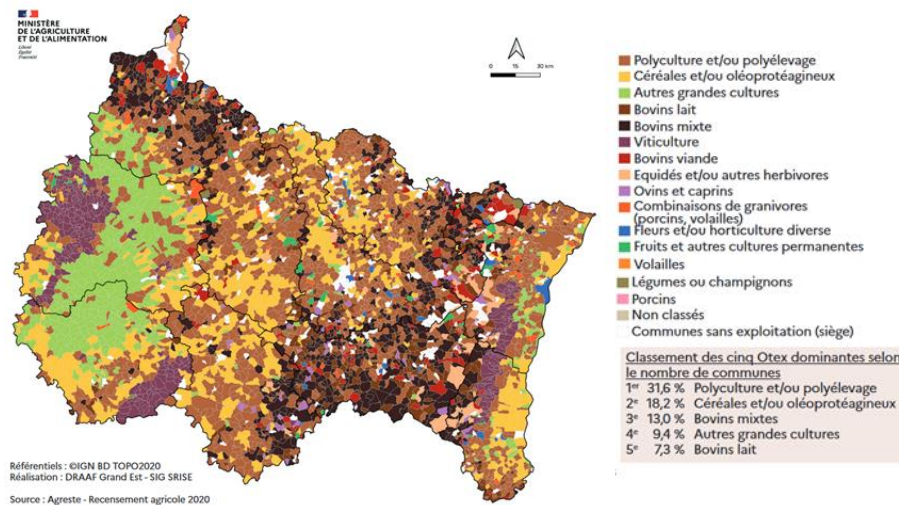


Figure 1 : Carte de l'orientation technico-économique des communes du Grand-Est d'après le recensement agricole de 2020 (Agreste Grand-Est, 2022a).

Le contexte pédoclimatique qui caractérise le centre de la région a limité la spécialisation des exploitations et favorisé le maintien de cette OTEX. En effet, certaines surfaces de cette zone dite « intermédiaire » disposent d'un potentiel agronomique limité du fait de la nature des sols, hydromorphes et argileux (Interbev Grand-Est, 2018 ; Berger et al., 2016). L'intégralité des surfaces des exploitations ne peut donc pas être valorisée pour la production de céréales, ce qui explique que les prairies permanentes (PP) se concentrent dans cette zone et permettent un maintien de l'élevage (Figure 2).

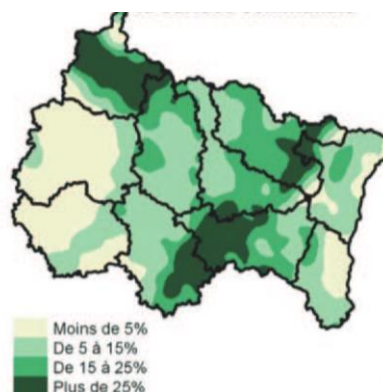


Figure 2 : Carte de la part des surfaces toujours en herbe (STH) par rapport à la surface communale pour la région Grand-Est (Interbev Grand-Est, 2018).

La production bovine est la production animale majoritaire (Interbev Grand-Est, 2018). Ainsi le lait et les produits laitiers représentent 52% du compte de production animale de la région et 31% sont attribués à la viande bovine et aux bovins vivants (Ageste Grand-Est, 2022a).

Entre 2010 et 2020, le nombre d'exploitations spécialisées en polyculture-élevage a baissé de 35% en Grand-Est, souvent au profit d'une spécialisation en grandes cultures (Ageste Grand-Est, 2021 ; Berger et al., 2016). Les crises économiques successives dans les secteurs du lait et de la viande, et la charge de travail liée aux contraintes inhérentes à l'élevage, expliquent cet abandon des ateliers animaux (Berger et al., 2016). Pourtant, de nombreux bénéfices sont associés à ces systèmes de production qualifiés d'agroécologiques : maîtrise du cycle des nutriments, allongement des rotations culturales, moindre recours aux intrants et meilleure résilience face aux risques économiques par la diversification des productions (Moraine et al., 2014 ; Perrot et al., 2012). En 2016, le Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux (CGAAER) a établi des recommandations pour favoriser le maintien de ce système de production en région, et l'autonomie protéique des élevages a été identifiée comme un levier favorisant leur résilience (Berger et al., 2016).

C'est dans ce contexte que le projet ARPEEGE a été initié par la Chambre régionale d'agriculture Grand-Est (CRAGE). Regroupant 25 acteurs agricoles de la région, dont l'Institut de l'Élevage (IDELE), au sein d'un Groupe Opérationnel pour une durée de 3 ans, ce projet est financé par le Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural (FEADER) dans le cadre du Partenariat Européen pour l'Innovation (PEI) (Annexe 1). Il a pour objectif de développer et de sécuriser une complémentarité entre les productions végétales et animales, qui soit garante de l'autonomie des élevages du Grand-Est. Pour cela, il est structuré en deux axes prioritaires :

- **Axe 1** : L'accompagnement de coopérations entre agriculteurs céréaliers et éleveurs, afin de favoriser l'autonomie à l'échelle territoriale
- **Axe 2** : La production et l'utilisation de nouvelles ressources protéiques et énergétiques dans les rations, avec notamment l'étude de la structuration d'une filière soja en Grand-Est

2. L'autonomie alimentaire : un facteur de résilience pour les ateliers d'élevage

L'autonomie alimentaire est le rapport entre les aliments produits et les aliments consommés, à l'échelle d'un pays, d'un territoire, ou d'une exploitation agricole (Rouillé et al., 2014). Elle se calcule selon la formule suivante (Paccard et al., 2003) :

$$\text{Autonomie (\%)} = \frac{\text{Quantité d'aliments produits}}{\text{Quantité d'aliments produits} + \text{Quantité d'aliments achetés}}$$

2.1. Autonomie protéique de la France : un déficit historique

A l'échelle française, le niveau d'autonomie en Matières Riches en Protéines* (MRP) utilisées pour l'alimentation animale se situe entre 50 et 60% et a peu évolué depuis 20 ans (Figure 3). La dépendance en MRP importées d'Outre-Atlantique est historiquement liée aux négociations commerciales menées dans les années 50, dans le cadre de l'Accord général sur les tarifs douaniers et le commerce (GATT). A l'époque, les Etats-Unis ont conditionné la mise en place de la Politique Agricole Commune (PAC) à la suppression des droits de douane sur le soja et à l'écartement des MRP des aides agricoles européennes, limitant ainsi le développement des surfaces d'oléo-protéagineux en Europe (Hache, 2015 ; Boucly et Decoret, 2020).

* Matières Riches en Protéines (MRP) : matières premières dosant plus de 15% de protéines

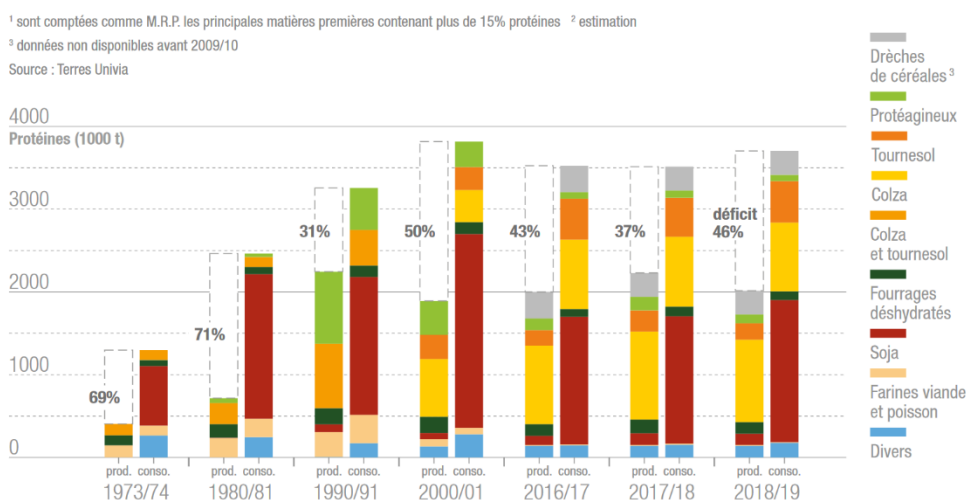


Figure 3 : Bilan français des matières riches en protéines pour l'alimentation animale entre 1973 et 2019 (Terres Univia, 2021).

L'embargo américain sur les exportations de soja de 1973, décidé à la suite de mauvaises récoltes aux Etats-Unis, a conduit à la mise en place du premier « plan protéines » de la PAC (Boucly et Decoret, 2020 ; Schneider et Huyghe, 2015). Par une forte expansion des surfaces cultivées en France entre les années 80 et 90, avec notamment une multiplication par 10 des surfaces en soja, ce plan a permis de diminuer la dépendance en MRP françaises de 38% entre 1974 et 1991 (Schneider et Huyghe, 2015 ; Figure 3). Les surfaces cultivées ont ensuite diminué en France, du fait de l'alignement du prix de ces cultures sur les cours mondiaux après la réforme de la PAC de 1992, et des accords de Blair House limitant la surface agricole dédiée aux oléagineux en Europe à 5 millions d'ha (Schneider et Huyghe, 2015 ; Hache, 2015).

Jusque dans les années 2010, l'intérêt de l'importation de protéines à moindre coût a primé sur le développement de la production de protéines végétales européennes et françaises. En effet, les marges annuelles faibles et variables ainsi que l'absence de nouvelles politiques de soutien pour ces filières les rendent peu compétitives par rapport aux céréales (Peyraud et Duhem, 2013 ; Schneider et Huyghe, 2015 ; Hache, 2015).

Le déficit constaté aujourd'hui est principalement lié à la consommation de soja, qui représente la première source de protéines en France toutes utilisations confondues, et est quasi-exclusivement importé (Peyronnet et al., 2014). Sur la campagne 2020-2021, la France a importé 600 000 tonnes (T) de graines de soja et 3,5 millions de tonnes (T) de tourteau de soja, dont 60 à 70% en provenance du Brésil (France AgriMer, 2022 ; France AgriMer, 2021). Ces matières premières sont essentiellement utilisées en alimentation animale et notamment en filière bovin lait puisque ces animaux consomment 36% du total du tourteau de soja (Cordier et al., 2020).

L'explosion de la demande internationale en protéines végétales depuis une dizaine d'années, notamment du fait du développement des productions animales en Chine, contribue à l'augmentation de la volatilité des cours des matières premières et fragilise les filières animales françaises (Delaby, 2014 ; Pellerin, 2020). Sur l'année 2021, le prix des aliments pour animaux a ainsi augmenté de 11,2% (Agreste, 2022). Les importations de soja en provenance du Brésil sont également vivement contestées pour leurs effets négatifs sur le climat et la biodiversité, du fait de la déforestation induite par l'expansion de la culture du soja dans ce pays (Chambres d'agriculture France, 2021). Afin de réduire la dépendance aux importations de MRP, les pouvoirs publics encouragent la mise en place de projets relatifs au développement des

protéines végétales françaises et à l'amélioration de l'autonomie alimentaire des élevages (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2020).

2.2. Les enjeux de l'autonomie à l'échelle de l'exploitation

L'un des enjeux majeurs de l'autonomie alimentaire en élevage est la sécurisation des systèmes d'alimentation face à la volatilité des prix des matières premières (Rouillé et al., 2014). Le coût alimentaire (c.-à-d. la somme des charges liées aux achats d'aliments et à la production de fourrages) représente environ 50% du coût de production dans les élevages laitiers français (Perrot, 2022 ; Péchuzal et al., 2017). C'est également le facteur qui est le plus souvent impliqué dans les écarts de rémunération entre éleveurs laitiers parmi les différents postes de produits et de charges (Perrot et al., 2021). Ces éléments témoignent de l'existence de marges de progrès sur ce poste pour l'amélioration du revenu et le maintien de la compétitivité des élevages. Même si l'étude menée en 2020 par Seegers et al. n'a pas montré de relation directe entre le taux d'autonomie alimentaire et le coût du système d'alimentation, la recherche d'autonomie alimentaire est, dans les faits, souvent motivée par des raisons de maîtrise du coût de production (Paccard et al., 2003 ; Pruilh, 2016).

L'autonomie alimentaire contribue à renforcer la traçabilité des aliments pour les animaux et répond ainsi à une demande sociétale en termes de qualité des produits (Paccard et al., 2003). Des critères liés au niveau d'autonomie alimentaire peuvent également être intégrés à certains cahiers de charges comme ceux des Appellation d'Origine Protégée (AOP) (Hulin et al., 2019). La recherche d'autonomie peut aussi être un moyen de s'adapter au développement de nouvelles filières de différenciation comme les produits issus d'animaux nourris sans Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) (Inosys Réseaux d'Élevage Grand-Est, 2018).

Enfin, la recherche d'autonomie alimentaire peut être un moyen de réduire l'empreinte carbone des exploitations agricoles, notamment en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux achats d'intrants (Hulin et al., 2019 ; Dollé et al., 2015).

2.3. Quels niveaux d'autonomie pour les élevages laitiers français ?

Dans les exploitations d'élevage herbivore, l'autonomie alimentaire se décline en 9 indicateurs (Tableau 1).

Tableau 1 : Indicateurs utilisés pour décrire l'autonomie alimentaire des élevages de ruminants (Seegers et al., 2020).

3 x 3 = 9 indicateurs	Massique <i>Qté de MS</i>	Protéique <i>Qté de MAT</i>	Energétique <i>Qté d'UF</i>
Fourrages (dont herbe pâturée)	%	%	%
Concentrés	%	%	%
Ration = fourrages + concentrés	%	%	%

On distingue l'autonomie massique, l'autonomie protéique et l'autonomie énergétique selon que l'analyse porte sur les quantités de matière sèche (MS), les quantités de matière azotée totale (MAT) ou sur les quantités d'unités fourragères (UF) consommées par les animaux (Rouillé et al., 2014). Chacune de ces 3 formes d'autonomie peut être calculée sur la ration totale, sur les fourrages ou sur les concentrés.

Les élevages bovins français ont un fort lien au sol ce qui leur permet d'atteindre des niveaux d'autonomie fourragère proches de 100%, qu'elle soit calculée sur la MS, sur la MAT ou sur

les UF (Rouillé et al., 2014). En revanche, l'autonomie en concentrés moyenne est plus faible. En 2000, elle était de 32% pour la MS, de 34% pour les UF de seulement 20% pour la MAT pour les systèmes bovins laitiers, et a peu évolué depuis (Paccard et al., 2003 ; Rouillé et al., 2014).

A l'échelle de la ration totale, l'autonomie massique des ateliers bovins lait français est de 83%, mais leur autonomie protéique moyenne est de seulement 70%, et varie de 57 à 87% selon la part de maïs dans la Surface Fourragère Principale (SFP) de l'atelier (Seegers et al., 2020). Le maïs étant une plante riche en énergie, son utilisation induit des achats de concentrés protéiques dans les élevages, ce qui explique le faible niveau d'autonomie en MAT des concentrés (Delaby, 2014).

A l'échelle du Grand-Est, les niveaux d'autonomie massique et protéique de la ration, des fourrages et des concentrés, ont été évalués à partir de données collectées entre 2014 et 2018 sur les fermes suivies dans le cadre du dispositif Inosys Réseaux d'Élevage (Echevarria et Berchoux, 2021) (Tableau 2).

Tableau 2 : Comparaison des niveaux d'autonomie massique et protéique des exploitations laitières françaises et de celles du Grand-Est

	Massique (qté MS)	Protéique (qté de MAT)
Ration	France : 83% (Seegers et al., 2020) Grand-Est : 86%	France : 70% (Seegers et al., 2020) Grand-Est : 74%
Concentrés	France : 32% (Paccard et al., 2003) Grand-Est : 29%	France : 20% (Paccard et al., 2003) Grand-Est : 23%

Bien que le Grand-Est soit une région de polyculture-élevage, avec des exploitations ayant la capacité de produire leurs propres concentrés, les résultats obtenus en région sont relativement similaires aux moyennes nationales. L'autonomie alimentaire des exploitations de la région et notamment leur autonomie protéique en concentrés pourrait donc être améliorée.

2.4. Les leviers à mobiliser pour gagner en autonomie alimentaire et protéique

L'augmentation du niveau d'autonomie alimentaire d'un atelier d'élevage herbivore passe en premier lieu par une bonne valorisation des ressources présentes sur l'exploitation en travaillant sur la récolte et la conservation des fourrages (Delaby, 2014). L'optimisation de la conduite du troupeau et de l'équilibre de la ration peut également permettre d'accroître l'autonomie par la diminution des besoins du cheptel (Pruilh, 2016) ; Figure 4).

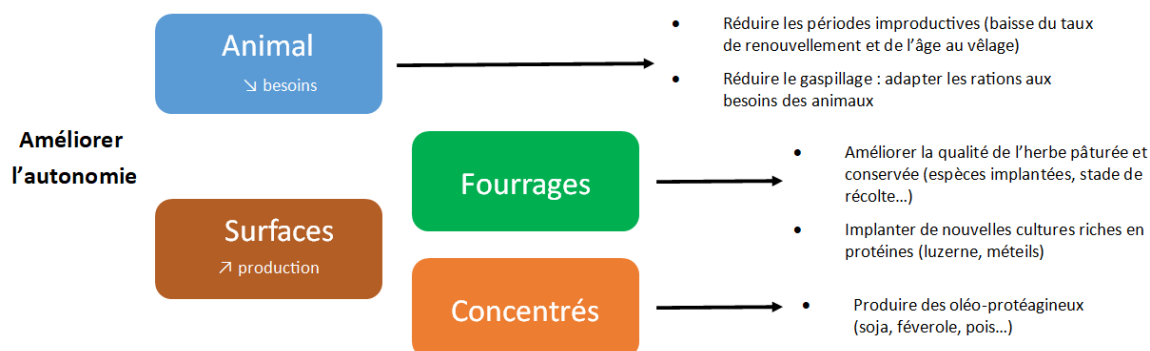


Figure 4 : Exemples de leviers améliorant le niveau d'autonomie alimentaire d'un atelier laitier

Dans un second temps des modifications des systèmes de cultures en place sur l'exploitation peuvent accroître la production de protéines, par la voie des fourrages ou celle des concentrés (Jurquet et Rouillé, 2019). Ainsi, la culture de légumineuses fourragères comme la luzerne ou l'implantation de mélanges de céréales-protéagineux sont des leviers à étudier pour produire des fourrages riches en protéines (Rouillé et al., 2014 ; Pruilh, 2016). Du côté des concentrés, il est possible d'auto-produire des graines oléo-protéagineuses comme le pois, la féverole ou le soja (Delaby, 2014 ; Figure 4).

3. Etude de la production et de la valorisation des graines de soja en Grand-Est

Du fait de leurs caractéristiques nutritionnelles et notamment de leur teneur en MAT les graines oléo-protéagineuses constituent une bonne alternative aux correcteurs azotés importés dans les rations des vaches laitières (Tableau 3).

Tableau 3 : Composition chimique et valeur alimentaire des principales graines oléo-protéagineuses et de leurs tourteaux (¹Tables INRA 2018 ; ²Optival, 2021)

En g/kg de MS :	Graine oléagineuse			Tourteau			Graine protéagineuse		
	Soja ²	Colza ¹	Tournesol ¹	Soja 48 ¹	Colza ¹	Tournesol ¹	Pois ¹	Lupin ¹	Féverole ¹
MAT	392	202	160	526	381	307	233	380	312
PDI	76	86	69	227	169	106	99	124	116
PDIA	25	37	23	172	92	62	40	65	58
BPR	208	65	45	244	144	150	83	201	142

Parmi elles, la graine de soja est la plus riche en MAT puisqu'elle contient environ 40% de protéines. L'utilisation de la graine de soja en tant que correcteur azoté est un levier travaillé au sein du deuxième axe du projet ARPEEGE concernant la production et l'utilisation de nouvelles ressources protéiques et énergétiques dans les rations (Annexe 1).

3.1. Quel potentiel pour la culture du soja en Grand-Est ?

En France, le soja (*Glycine max*) est cultivé depuis les années 1980, dans deux bassins de production historiques que sont le Sud-Ouest et la vallée du Rhône à l'Est de la France (Terres Univia, s.d. (1)). Bien que cette plante soit d'origine tropicale, le changement climatique et les progrès génétiques réalisés en termes de précocité des variétés permettent aujourd'hui de la cultiver sur une partie de plus en plus étendue du territoire français (Schneider et Huyghe, 2015 ; Berard, 2022).

Outre son intérêt pour l'amélioration du niveau d'autonomie protéique des élevages, le soja présente des atouts agroenvironnementaux notables, notamment car cette culture demande peu d'intrants (Parachini et al., 2014). Peu touché par les ravageurs et les maladies, le soja ne nécessite pas d'apport d'insecticide ni de fongicide. De plus, en tant que légumineuse, le soja est capable d'utiliser l'azote atmosphérique pour produire ses propres composants protéiques. Ainsi, aucun apport d'engrais azoté n'est requis (Schneider et Huyghe, 2015). A l'échelle de la rotation, son implantation permettrait également de diminuer les apports d'azote minéral sur la culture suivante du fait des reliquats d'azote laissés par cette culture (Labalette, 2010 ; Parachini et al., 2014).

Dans le cadre du projet ARPEEGE, un travail d'évaluation de la faisabilité et de la potentialité du soja en Grand-Est a été réalisé par Terres Inovia, l'institut technique des huiles et protéines

végétales (Baillet, 2022). La compilation des données collectées par les partenaires du projet a permis de produire des références de rendement moyen du soja par secteur géographique, et de définir des zones favorables ou défavorables à la production de soja selon 4 catégories de faisabilité (favorable, possible, aléatoire ou déconseillé) (Figure 5). En plus d’être exigeante en chaleur, cette culture d’été nécessite une bonne alimentation en eau, le stress hydrique étant le premier facteur limitant son rendement (Terres Univia, s.d. (1) ; Baillet, 2022). Le classement dans chacune des catégories de faisabilité a donc été réalisé par agrégation de données relatives au respect des besoins en eau (réserve en eau des sols, risque de stress hydrique, accès à l’irrigation) et en température (risque de récolte tardive) du soja.

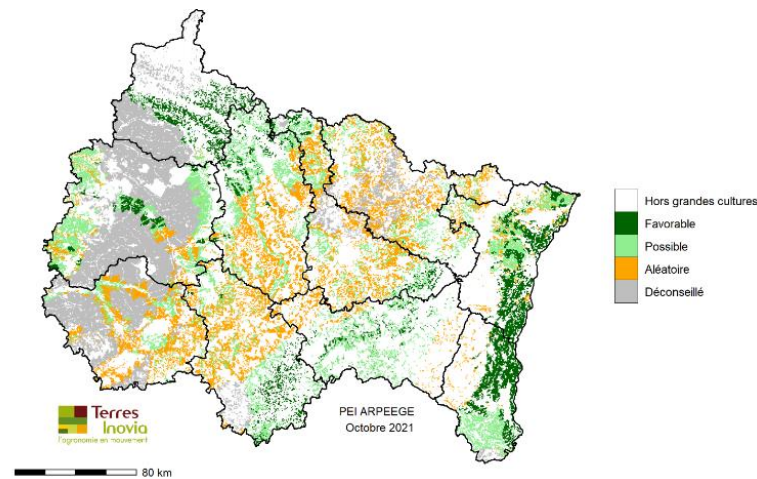


Figure 5 : Carte de faisabilité du soja dans la région Grand-Est (Baillet, 2022).

Ainsi, à l’échelle de la région, 354 000 ha sont qualifiés de favorables à la culture du soja, soit 14% des terres arables de la région. Presque la moitié de ces surfaces se situent en Alsace, bassin de production déjà bien identifié puisque 6 300 ha de soja y étaient implantés en 2020, sur 12 700 à l’échelle régionale (Agreste Grand-Est, 2022a). Ce travail a permis de mettre en évidence un bassin de production potentiel dans les Ardennes. En effet, 60 000 ha seraient favorables au soja dans le département alors que seulement 200 ha y étaient cultivés en 2020 (Annexe 2).

Cette étude a constitué la première étape du travail mené sur la structuration d’une filière soja en région, la seconde portant sur la valorisation des graines récoltées pour l’amélioration de l’autonomie alimentaire des élevages.

3.2. La valorisation des graines de soja dans la ration des vaches laitières

3.2.1. Caractéristiques nutritionnelles et intérêt du traitement thermique

En plus d’être riche en protéines, la graine de soja est également riche en matière grasse (environ 20% de la MS), et donc en énergie (Schneider et Huyghe, 2015 ; Poncet et al., 2003). Cependant, chez la vache laitière, la composition en matière grasse de la ration totale ne doit pas dépasser 5% au risque de pénaliser le fonctionnement du rumen. Ainsi, la quantité maximale de graine de soja pouvant être incorporée dans une ration se situe aux alentours de 3 à 4 kg de matière brute (Legarto et Beaumont, 2006 ; Odienne et al., 2016).

Chez les monogastriques et les jeunes ruminants, les facteurs anti-trypsiques contenus dans la graine réduisent la digestibilité des protéines. Il est donc nécessaire de traiter thermiquement les graines avant leur distribution (Quinsac et al., 2012). L’activité microbienne du rumen des ruminants adultes n’est pas affectée par ces composés. Ainsi, chez ces animaux, l’intérêt du

traitement thermique réside plutôt dans la réduction de la dégradabilité ruminale de l'azote (Mendowski, 2019).

En effet, les protéines contenues dans les graines de soja sont très solubles (Scheider et Huyghe, 2015). La part des protéines dégradées par les micro-organismes du rumen, estimée via la Dégradabilité Théorique de l'azote (DT_N) se situe donc entre 80 et 85% (Poncet et al., 2003). En plus de favoriser les rejets d'azote urinaire par augmentation de la balance protéique du rumen (BPR), cette DT_N élevée limite la part de protéines « by-pass », parvenant à l'intestin grêle sans avoir été dégradées. Ainsi, l'apport de protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire (PDIA) est faible, alors qu'il est le principal moyen d'augmenter l'apport de protéines digestibles dans l'intestin (PDI) afin de satisfaire les besoins en protéines métabolisables de l'animal (Mendowski, 2019 ; Tableau 3).

Lors du traitement thermique des graines, des réactions biochimiques, appelées réactions de Maillard, conduisent à la formation de liaisons entre les protéines et les sucres contenus dans la graine. Ces liaisons protègent les protéines de l'activité microbienne ruminale, augmentant ainsi la part de protéines by-pass. Elles sont ensuite rompues en conditions de pH acide dans la caillette, permettant la digestion des protéines au niveau de l'intestin (Poncet et al., 2003). La valeur protéique des graines oléo-protéagineuses est ainsi améliorée par l'augmentation de leur teneur en PDIA.

3.2.2. Les différents traitements thermiques utilisés

La trituration, l'extrusion et le toastage sont des procédés permettant de traiter thermiquement les graines oléo-protéagineuses. La **trituration** a pour objectif l'obtention d'huile, ce procédé comporte donc des étapes d'extraction mécanique et/ou par solvant, permettant d'abaisser la teneur en matière grasse de la graine et d'obtenir du tourteau (Quinsac, 2014 ; Annexe 3). L'**extrusion** et le **toastage** ne comportent pas de déshuilage. Le maintien de la teneur en matière grasse des graines limite donc leur introduction dans la ration des ruminants en comparaison au tourteau (cf. partie I.3.2.1.).

Contrairement à la trituration et à l'extrusion qui sont des procédés industriels, le **toastage** a l'avantage de pouvoir être réalisé par des installations mobiles traitant de petits volumes de graines (Boutes et al., 2017 ; Bourdois, 2017). Lors de ce procédé, les graines passent à travers une chambre de cuisson contenant de l'air chauffé par un brûleur à fuel, et ressortent du toasteur à une température de 120°C (Figure 6).

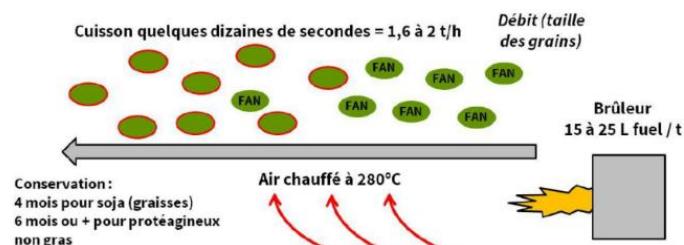


Figure 6 : Fonctionnement d'un toasteur mobile (Jurquet et Boré, 2018 ; d'après GRAPEA 85)

Depuis quelques années, les unités de toastage mobiles, se déplaçant de ferme en ferme, se développent en France. Ce procédé semble ainsi être le plus adapté pour traiter thermiquement des graines autoproduites avant leur distribution aux animaux à l'échelle d'une exploitation.

4. Contexte du stage

Dans le cadre du projet ARPEEGE, l'intérêt de l'introduction de graines de soja toastées en substitution partielle à du tourteau de colza a été évalué par un essai zootechnique réalisé sur la ferme du lycée agricole de Rethel (08) entre janvier et mars 2021. Il a été observé une baisse du taux protéique (TP) de l'ordre de 2 g/kg induisant une baisse du produit lait de 12 €/1000L. Le toastage a représenté un surcoût de 3 €/1000L sur la ration. L'introduction du soja toasté a donc conduit à une baisse de marge alimentaire de 15 €/1000L (Springer, 2021).

Le toastage à la ferme étant un procédé très récent, peu d'essais zootechniques ont été réalisés sur l'impact du toastage des graines oléo-protéagineuses sur les performances des vaches laitières. Un essai réalisé en 2018 à la ferme expérimentale des Trinottières sur des graines de féverole n'a pas montré d'effet du toastage sur la quantité de lait produite et sur les taux de matière utile (Jurquet et Boré, 2018). Au Danemark, la distribution de graines de soja toastées en comparaison à des graines crues n'a pas non plus montré d'effet du toastage sur les performances laitières (Mogensen et al., 2008).

Un second essai zootechnique comparant une ration contenant des graines de soja crues à une ration contenant des graines de soja toastées a donc été mis en place en 2022 au lycée agricole de Rethel. Il a permis de définir la forme la plus appropriée pour l'introduction de graines de soja dans la ration des vaches laitières. Afin d'évaluer les conséquences économiques de l'accroissement de l'autonomie protéique par la production de soja, des simulations ont ensuite été réalisées à partir des données économiques de la ferme du lycée agricole de Rethel. L'influence du changement des systèmes de culture et d'alimentation sur les performances environnementales de l'exploitation a également été étudiée.

Le présent rapport fait état de ces travaux afin de répondre à la question suivante :

Quelles sont les conséquences techniques, économiques et environnementales de l'autoproduction de graines de soja dans un système de polyculture-élevage pour améliorer l'autonomie protéique ?

D'après l'étude bibliographique présentée ci-dessus, 3 hypothèses ont été émises quant aux résultats des travaux présentés dans ce rapport :

Hypothèse 1 : Essai zootechnique – Le toastage n'entraîne pas de différences significatives sur les performances des vaches laitières

Hypothèse 2 : Analyse économique – La baisse des performances laitières liée à la substitution du tourteau de colza par des graines de soja est compensée par la réduction des charges sur les cultures (engrais azotés, produits phytosanitaires) et les économies de tourteau.

Hypothèse 3 : Analyse environnementale – L'introduction du soja dans le système d'exploitation permet d'améliorer les performances environnementales de l'exploitation par la réduction des achats d'intrants et la fixation symbiotique d'azote atmosphérique.

II. Matériel et méthodes

1. Effet du toastage des graines de soja sur les performances des vaches laitières

1.1. Durée de l'essai et dispositif expérimental

D'une durée de 15 semaines, l'essai s'est déroulé du 27 décembre 2021 au 10 avril 2022. Il a débuté par une période pré-expérimentale de 3 semaines où les vaches ont toutes reçu la même ration. Elle a été suivie d'une transition alimentaire de 10 jours amenant chaque lot à sa ration de la période expérimentale qui a débuté le 28 janvier et a duré 10 semaines (Figure 7).



Figure 7 : Structuration de l'expérimentation

Deux lots de 27 vaches laitières réparties en blocs complets et équilibrés ont été constitués à partir du troupeau mixte Prim'Holstein/Jersiais du lycée agricole de Rethel :

- Le lot témoin (T), recevant une ration complétée par des graines de soja crues
- Le lot expérimental (E), recevant une ration complétée par des graines de soja toastées selon le procédé présenté dans la partie I.3.2.2.

1.2. Matériel expérimental

1.2.1. Les critères d'allotement des animaux

Les critères ayant permis de constituer les blocs de vaches répartis aléatoirement dans chacun des deux lots sont les suivants, classés par ordre de priorité :

- La race
- La parité (primipare ou multipare)
- Le niveau de production
- Le Taux Protéique (TP)
- Le stade de lactation

Les données de production laitière utilisées sont celles de deux contrôles laitiers réalisés avant la période d'essai (Tableau 4).

Tableau 4 : Caractéristiques zootechniques moyennes des deux lots

**Moyenne des contrôles laitiers du 22/11/2021 et du 08/12/2021*

	Lot témoin (soja cru)	Lot expérimental (soja toasté)
Effectif	27	27
Prim'Holstein	14	14
Jersiaise	13	13
Multipare	21	21
Primipare	6	6
Date de vêlage moyenne	23/09/2021	18/09/2021
Lait brut (kg/j)*	24,2 ± 6,3	24,1 ± 7,0
Taux protéique (TP) (g/kg)*	36,0 ± 4,1	36,1 ± 4,3
Taux butyreux (TB) (g/kg)*	46,1 ± 7,9	46,0 ± 9,9

Deux autres contrôles laitiers effectués durant la période pré-expérimentale ont permis de vérifier que la mise en lot avait été correctement réalisée (Tableau 5).

Tableau 5 : Performances moyennes des deux lots durant la période pré-expérimentale
*Moyenne des contrôles laitiers du 27/12/2021 et du 11/01/2022

	Lot témoin (soja cru)	Lot expérimental (soja toasté)
Lait brut (kg/j)*	23,4 ± 6,9	23,0 ± 6,3
TP (g/kg)*	36,2 ± 3,7	35,8 ± 3,5
TB (g/kg)*	46,6 ± 7,8	45,0 ± 8,8

1.2.2. L'alimentation des animaux

Les vaches disposaient d'une ration semi-complète renouvelée chaque matin, et repoussée au cours de la journée.

La ration pré-expérimentale est celle classiquement utilisée au lycée agricole de Rethel en période hivernale (Tableau 6). Les rations de la période expérimentale ont été constituées de telle sorte que la ration du lot T et la ration du lot E présentent la même concentration énergétique et la même proportion en concentrés. Durant les 10 jours de transition, les graines de soja crues ou toastées ont été introduites progressivement dans la ration de chacun des deux lots en substitution au tourteau de colza, à raison de 0,2 kg substitué par jour.

Tableau 6 : Composition des rations semi-complètes des périodes pré-expérimentale et expérimentale

Composition en kg MS (% MS)	Ration pré-expérimentale	Ration témoin (soja cru)	Ration expérimentale (soja toasté)
Ensilage de maïs	9,9 (48%)	9,9 (48%)	9,9 (48%)
Ensilage d'herbe	4 (19%)	4 (19%)	4 (19%)
Betterave fourragère	2,4 (12%)	2,4 (12%)	2,4 (12%)
Tourteau de colza	4,1 (20%)	2,4 (12%)	2,4 (12%)
Graine de soja crue	0	1,7 (8%)	0
Graine de soja toastée	0	0	1,7 (8%)
Urée	0,02 (0,1%)	0,02 (0,1%)	0,02 (0,1%)
Minéral	0,2 (1%)	0,2 (1%)	0,2 (1%)
Ingestion totale	20,62	20,62	20,62

L'ensilage de maïs, l'ensilage d'herbe et les betteraves fourragères distribués aux deux lots de vaches durant la totalité de l'essai ont été récoltés sur l'exploitation en 2021. Le tourteau de colza et les graines de soja ont été achetés. Un concentré de production du commerce à 23% de MAT est distribué aux vaches dont la production est supérieure à 24 L/j au distributeur automatique de concentré (DAC). La même quantité d'aliment distribué au DAC a été attribuée aux deux vaches d'un même binôme en début d'essai, et cette quantité est restée fixe tout au long de l'essai. L'ingestion moyenne de concentrés au DAC est de $1,2 \pm 1,5$ kg brut par jour.

1.3. Contrôles et analyses

1.3.1. Valeur des aliments

Valeur des fourrages

Avant l'essai, des analyses chimiques ont été réalisées sur l'ensilage de maïs, l'ensilage d'herbe et les betteraves fourragères afin de déterminer leur valeur alimentaire (Tableau 7). Ces mêmes

analyses ont été reconduites en début de période expérimentale afin de contrôler la stabilité de la valeur des fourrages.

Tableau 7 : Composition chimique et valeurs nutritives des fourrages distribués

	Ensilage de maïs	Ensilage d'herbe	Betterave fourragère
Composition chimique			
MS (%)	33,1	56,8	14,9
MM (g/kg MS)	36	59	40
MAT (g/kg MS)	65	89	37
CB (g/kg MS)	222	274	41
Amidon (g/kg MS)	324	/	/
DCS (%)	67,6	71,9	/
MG (g/kg MS)	26	/	/
SSR (%)	/	12,6	/
NDF (g/kg MS)	456	545	/
ADF (g/kg MS)	225	308	/
ADL (g/kg MS)	21	15	/
Valeur alimentaire			
dMO (%)	70,7	73,5	90
UEL (/kg MS)	1	1,12	/
UFL 2018 (/kg MS)	0,93	1	/
PDI (g/kg MS)	60	69	/
PDIA 2018 (g/kg MS)	10	16	/
BPR (g/kg MS)	-43	-31	/

Valeur des concentrés

Comme pour les fourrages, la composition chimique du tourteau de colza et des graines de soja crues et toastées a été analysée avant l'essai (Tableau 8). Les analyses chimiques sur les fourrages et les concentrés ont été réalisées par le Laboratoire Agronomique Normand (LANO).

Tableau 8 : Composition chimique et valeurs nutritives des concentrés distribués

	Tourteau de colza	Graine de soja crue	Graine de soja toastée
Composition chimique			
MS (%)	87,2	86,5	92,7
MM (g/kg MS)	80,3	55,5	55,0
MAT (g/kg MS)	363,1	427,7	421,6
DE1 (%)	20,2	83,0	32,4
CB (g/kg MS)	145,7	67,0	70,1
MG (g/kg MS)	33,8	207,5	202,7
Valeur alimentaire			
UFL 2018 (/kg brut)	0,88	1,25	1,33
PDI (g/kg brut)	125	83	133
PDIA 2018 (g/kg brut)	79	36	86
BPR (g/kg brut)	134	240	198

1.3.2. Taille des particules de soja

Les graines de soja crues et toastées ont été broyées par petites quantités de façon hebdomadaire avant leur distribution. La taille des particules alimentaires influençant leur dégradabilité ruminale, des analyses granulométriques ont permis de vérifier que les réglages du broyeur permettaient d'obtenir des particules de soja cru et toasté de même taille (Poncet et al., 2003).

1.3.3. Les quantités d'aliments consommées

Les quantités de fourrages et des concentrés distribuées quotidiennement à chaque lot étaient systématiquement pesées par le personnel de la ferme lors de la préparation des rations. Les refus de chacun des lots ont également été pesés chaque jour par la stagiaire.

Les taux de matière sèche des ensilages de maïs et d'herbe ont été déterminés chaque semaine pour réajuster au besoin les quantités de matière brute distribuées aux animaux. Des mesures du taux de matière sèche des refus ont également été réalisées chaque semaine. Ces valeurs ont été déterminées par l'organisme de contrôle laitier Ardennes Conseil Elevage à l'aide d'un appareil d'analyse infra-rouge.

1.3.4. La production laitière et la composition du lait

La quantité de lait brut produite par vache a été mesurée chaque semaine sur deux traites consécutives (soir/matin). Le contrôle laitier était réalisé soit par la stagiaire préalablement formée, soit par un agent de prélèvement d'Ardennes Conseil Elevage (1 semaine sur 2). Les TB et TP, l'urée et le taux de leucocytes du lait ont également été déterminés chaque semaine à partir d'échantillons contenant 50% du lait de la traite du soir et 50% du lait de la traite du lendemain matin, selon le protocole du contrôle laitier. Les analyses de lait ont été effectuées par le laboratoire d'analyses laitières URIANE.

1.3.5. L'état corporel et sanitaire des animaux

L'état corporel des vaches laitières a été évalué en début et en fin d'essai par la stagiaire et un membre du personnel de la ferme, selon la grille de note d'état corporel (NEC) présentée en annexe 4. Tous les événements sanitaires ont été quotidiennement enregistrés.

1.4. Traitement des données

Le traitement de données a été réalisé à l'aide du logiciel R, avec l'accompagnement du service Data'Stat de l'IDELE (R Core Team, 2020). Les variables étudiées (lait brut, TB, TP, quantité de matière grasse (MG) et de matière protéique (MP), urée, taux de leucocytes) ont été résumées en calculant leurs moyennes sur la période pré-expérimentale (2 contrôles) et la période expérimentale (10 contrôles) pour chacun des animaux. Ces moyennes ont ensuite été traitées par analyse de covariance, la covariable étant la moyenne de la variable étudiée sur la période pré-expérimentale. Cela a permis de s'affranchir des différences de performances entre les vaches d'un même bloc non liées au traitement et déjà présentes lors de la période pré-expérimentale. Les autres critères pris en compte dans le modèle étaient les suivants : traitement, parité, race, traitement*parité, traitement*race, traitement*covariable.

Le modèle statistique présenté ici n'a pas pu être appliqué aux variables quantité de matière grasse (MG), taux de leucocytes et urée puisque les deux lots n'étaient pas équilibrés sur ces variables non prises en compte pour la mise en lot lors de la période pré-expérimentale.

2. Effet de l'introduction de soja sur les performances économiques de la ferme du lycée agricole de Rethel

2.1. Matériel expérimental

Les données utilisées pour réaliser les simulations économiques sont issues de la comptabilité de la ferme du lycée agricole de Rethel sur l'année 2021. La figure 8 présente les principales caractéristiques de cette exploitation.

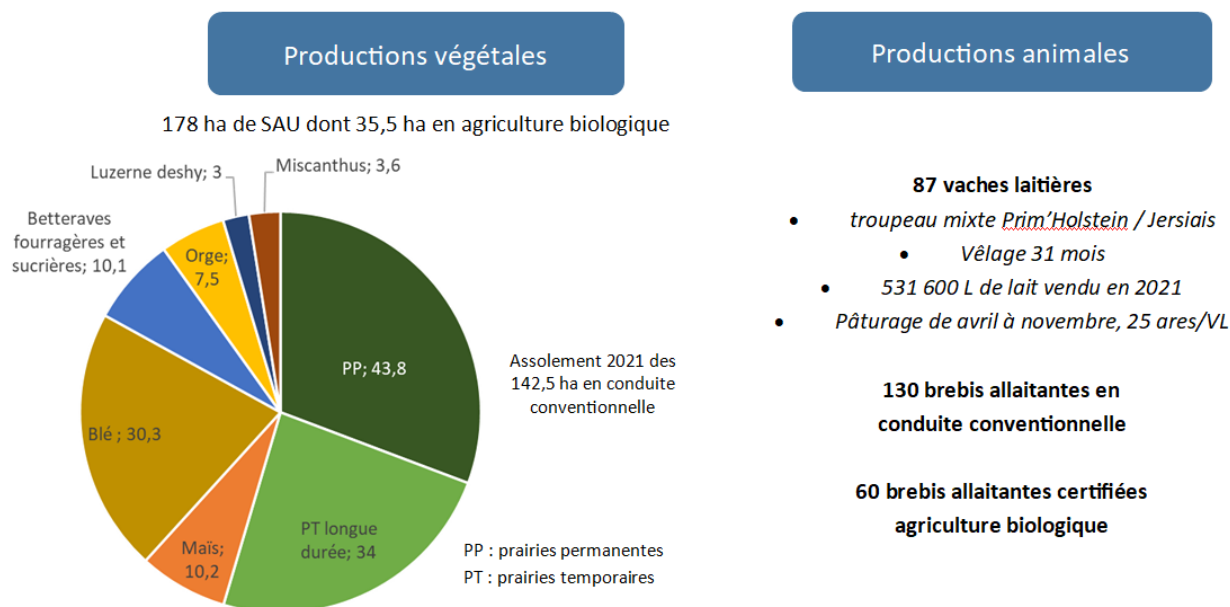


Figure 8 : Présentation de l'exploitation du lycée agricole de Rethel

L'exploitation ayant une vocation pédagogique, elle dispose d'autorisations spécifiques pour avoir plusieurs productions à la fois en conduite conventionnelle et à la fois en conduite agriculture biologique (AB). Les ateliers AB n'interagissant pas avec les ateliers conventionnels, ils ont été écartés de l'étude, dans un souci de simplification de la simulation.

2.2. Méthodologie employée pour la simulation

La méthodologie employée pour la simulation est celle utilisée par les conseillers des réseaux d'élevage du Grand-Est lors de la réalisation d'études de projets en exploitation. Les montants des charges (opérationnelles et de structure) et des produits issus de la comptabilité 2021 de l'exploitation ont été décomposés poste par poste, pour chaque culture et chaque catégorie animale.

2.2.1. Optimisation du système initial

Une étape d'optimisation de la situation initiale a été réalisée préalablement à l'introduction de changements dans les systèmes de culture et les rations des animaux. Cette optimisation a permis de s'assurer que l'on mesurait uniquement l'effet de l'introduction de soja sur les performances économiques de l'exploitation et non l'effet combiné de la mise en place de ce levier et de l'optimisation des pratiques.

Elle a consisté à :

- Evaluer la cohérence du système fourrager de l'exploitation par le calcul du niveau de valorisation des surfaces en herbe grâce à l'outil DEMarche de Conseil en Elevage LAITier (DECELAIT) développé par les réseaux d'élevage du Grand-Est (Caillaud et al., 1999).
- Vérifier l'adéquation des montants de charges de l'atelier culture avec les références de la Chambre d'agriculture des Ardennes. Les charges de culture du soja étant issues de références moyennes, il était important de s'assurer que les niveaux de charges des autres cultures présentes sur l'exploitation étaient en cohérence avec les moyennes régionales.

2.2.2. Introduction de soja dans le système

La simulation a consisté à introduire du soja dans le système de culture, afin de produire les quantités de graines nécessaires à l'introduction de 2 kg brut de soja dans la ration hivernale des vaches laitières, sur le modèle de la ration expérimentale de l'essai zootechnique présenté précédemment.

Les progrès réalisés en termes d'autonomie massique et protéique sur l'alimentation des vaches laitières ont été calculés à partir des teneurs en MS et en MAT ainsi que de la provenance (produits ou achetés) des aliments distribués aux animaux en période hivernale et estivale.

Les conséquences de ce changement de système sur les montants de charges et de produits ont été simulées, afin de calculer une variation d'Excédent Brut d'Exploitation (EBE) liée à l'introduction de soja sur l'exploitation (Figure 9).

Produit brut Ventes +/- variations de stocks Valeur cessions internes et autoconsommations Aides	Charges opérationnelles Engrais, semences, traitements, assurance grêle, aliments (y compris céréales autoconsommées au prix de cession) frais d'élevage	
	Charges de structure hors amortissements, frais financiers et salaires (carburant, entretien, travaux par tiers, fermage, frais généraux, msa)	
	EBE	Annuités Prélèvements privés + salaires Autofinancement

Figure 9 : Structure et utilisations de l'Excédent Brut d'Exploitation (Inosys Réseaux d'Elevage Grand-Est, 2022).

Modifications du système de culture

L'introduction de soja dans le système de culture de l'exploitation s'est faite en prenant en compte :

- Le potentiel agronomique des terres vis-à-vis de cette culture
- Les besoins en fourrages (maïs ensilage, betteraves fourragères) et céréales autoconsommées (orge) par les animaux, déterminant des surfaces obligatoires à assolier chaque année

Les montants de charges et le rendement de la culture de soja sur l'exploitation ont été définis à partir de moyennes régionales, avec l'appui de conseillers spécialisés en productions végétales des structures partenaires du projet ARPEEGE et de Terres Inovia.

Conséquences sur les charges et produits de l'atelier lait

Les quantités de concentrés achetés économisées ont été calculées à partir d'un taux de substitution entre le tourteau de colza et la graine de soja. Ce taux de substitution a été défini après calcul d'une ration complétée par des graines de soja dont l'apport en PDI journalier est égal à celui de la ration distribuée au lycée agricole de Rethel en période hivernale (ration pré-expérimentale de l'essai zootechnique présenté dans ce rapport). Le logiciel INRation V5 RUMIN'AL a été utilisé pour calculer les valeurs alimentaires de ces rations.

Les conséquences du changement de ration hivernale sur les performances des vaches laitières ont été estimées par l'étude de la bibliographie disponible sur l'effet de l'introduction de graines de soja dans l'alimentation des vaches laitières et de l'essai réalisé sur la ferme du lycée de Rethel en 2021 dans le cadre du projet ARPEEGE. Ces résultats ont permis de définir les bornes supérieures et inférieures d'une matrice d'évolution des performances laitières.

3. Conséquences du changement de système sur les performances environnementales de l'exploitation

L'outil CAP'2ER® (Calcul Automatisé des Performances Environnementales pour des Exploitations Responsables) a permis d'estimer les conséquences du changement de système sur les performances environnementales de l'exploitation. Mis au point par l'IDELE, cet outil repose sur le concept de l'analyse de cycle de vie (ACV). Il permet de calculer différents indicateurs environnementaux liés aux pratiques agricoles, de la consommation d'intrants jusqu'à la commercialisation des produits de l'exploitation (Dollé et al., 2015 ; Figure 10).

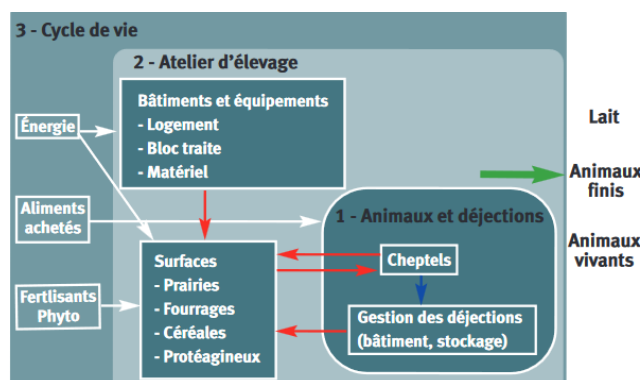


Figure 10 : Schéma du périmètre d'évaluation de la performance environnementale d'une exploitation par l'outil CAP'2ER® (Dollé et al., 2015)

Ces indicateurs permettent d'évaluer les impacts environnementaux (émissions de GES, qualité de l'air et de l'eau, consommation d'énergies fossiles) mais aussi les contributions positives (stockage de carbone, maintien de la biodiversité, performance nourricière) de l'activité agricole. Les émissions de GES (méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O) et dioxyde de carbone (CO₂)) sont converties en équivalent CO₂ (eq. CO₂) par la prise en compte de leur pouvoir de réchauffement. La différence entre les émissions et le stockage de carbone donne l'empreinte carbone nette de l'exploitation ou de l'atelier étudié, exprimée en kg. eq. CO₂/ha de SAU, par L de lait corrigé (40 g/kg de TB et 33 g/kg de TP) ou par kg de viande vive produite.

L'utilisation de cet outil a nécessité la réalisation de deux jours de formation.

III. Résultats

1. Effet du toastage des graines de soja sur les performances des vaches laitières

1.1. Une ingestion similaire entre les deux lots

L'ingestion ayant été estimée par lot, aucun traitement statistique n'a pu être réalisé sur ces données. Durant la période expérimentale, le lot T a ingéré 0,1 kg de MS/j de plus que le lot E (Tableau 9). En moyenne, les vaches ont ingéré 83% des rations présentées dans le Tableau 6.

Tableau 9 : Valeurs d'ingestion moyenne des rations semi-complètes et totales selon le lot

kg de MS/j	Lot témoin (soja cru)	Lot expérimental (soja toasté)
Ration de base	17,0 ± 0,8	17,1 ± 0,8
Concentrés au DAC	1 ± 1,5	1 ± 1,5
Ingestion totale	18,0	18,1

L'ingestion a évolué de façon similaire dans les deux lots tout au long de cette période comme le montre la Figure 11. La période sans mesures observée en mars est liée à une panne du matériel de pesée.

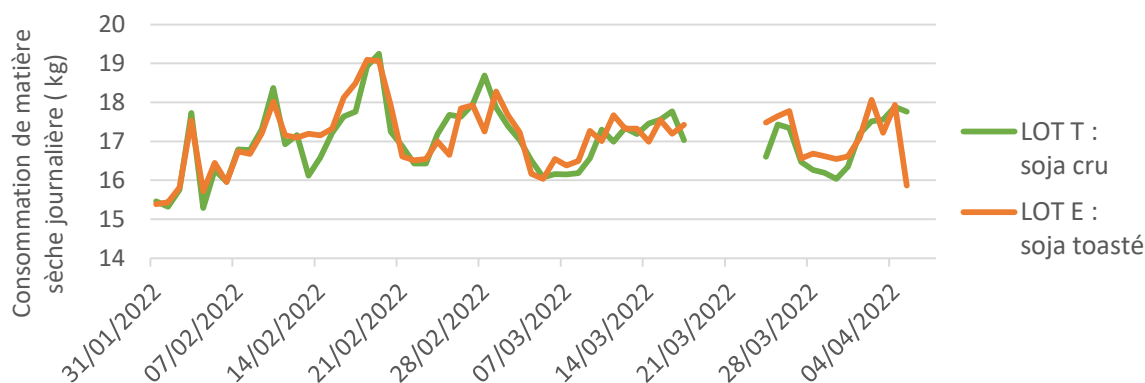


Figure 11 : Evolution de la consommation de matière sèche à l'auge par VL pendant la période expérimentale selon le lot

1.2. Une faible évolution des performances zootechniques

Du fait de problèmes sanitaires constatés sur 2 animaux et ayant affecté leurs performances laitières sur plusieurs contrôles, 2 blocs de vaches ont été écartés de l'étude lors de l'analyse statistique des résultats. L'évaluation des performances zootechniques des animaux selon le traitement porte donc sur 2 lots de 25 animaux.

1.2.1. Aucune différence de production laitière

La Figure 12 représente les statistiques descriptives de la variable lait brut retenues pour l'analyse de variance. Le détail des valeurs est consultable en Annexe 5.

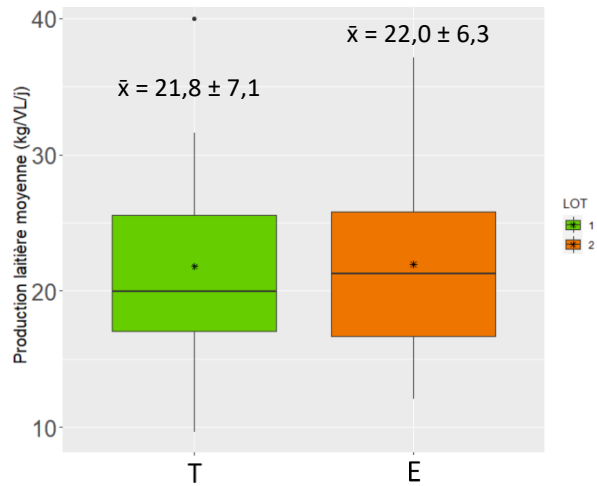


Figure 12 : Statistiques descriptives du lait brut moyen selon le lot durant la période expérimentale

Il n’y a pas de différence de production laitière entre le lot T et le lot E (p -value = 0,13 ; Tableau 10). La production laitière moyenne estimée par le modèle est de 20,5 kg de lait par jour pour le lot T alimenté avec des graines de soja crues contre 21,1 kg de lait par jour pour le lot E alimenté avec des graines de soja toastées.

Tableau 10 : Analyse de variance de la variable production laitière pour l’effet du traitement

Traitement	p-value	Estimation	Erreur Type
Témoïn – soja cru	0,13	20,5	1,3
Expérimental – soja toasté		21,1	1,3

1.2.2. Aucune différence de taux de matière utile

Les Figures 13 et 14 représentent graphiquement les statistiques descriptives des variables taux protéique et taux butyreux retenues pour l’analyse de variance. Le détail des valeurs est consultable en Annexe 5.

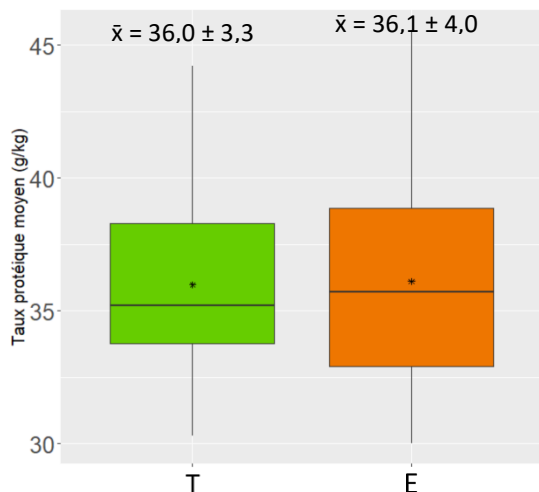


Figure 13 : Statistiques descriptives du taux protéique moyen selon le lot durant la période expérimentale

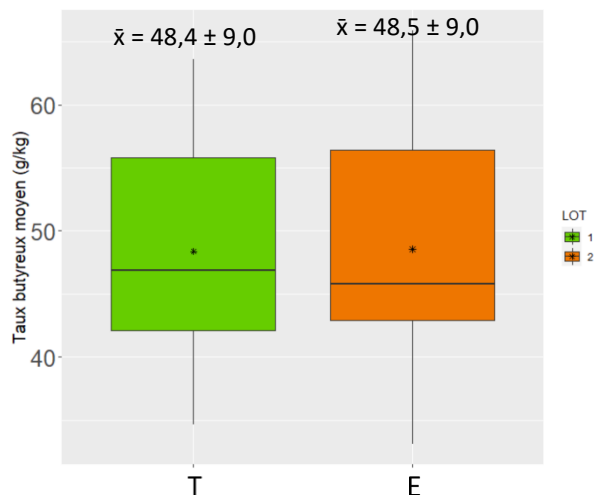


Figure 14 : Statistiques descriptives du taux butyreux moyen selon le lot durant la période expérimentale

Il n’y a pas de différence de taux protéique entre le lot T et le lot E (p -value = 0,88 ; Tableau 12). Le taux protéique moyen estimé par le modèle est de 35,0 g/kg de lait pour le lot T alimenté

avec des graines de soja crues contre 35,4 g/kg de lait pour le lot E alimenté avec des graines de soja toastées. La différence de taux butyreux estimée par le modèle est de +0,7 g/kg de lait en faveur du lot T par rapport au lot E (Tableau 11). Cette différence n'est pas non plus significative (p-value = 0,4).

Tableau 11 : Analyse de variance des variables taux protéique et taux butyreux pour l'effet du traitement

Variable	Traitement	p-value	Estimation	Erreur Type
Taux protéique	Témoin – soja cru	0,88	35,0	0,6
	Expérimental – soja toasté		35,4	0,6
Taux butyreux	Témoin – soja cru	0,40	45,4	1,2
	Expérimental – soja toasté		46,1	1,2

1.2.3. Une production de matière protéique supérieure pour le lot expérimental

Les Figures 15 et 16 représentent graphiquement les statistiques descriptives des variables matière protéique et matière grasse. Le détail des valeurs est consultable en Annexe 5.

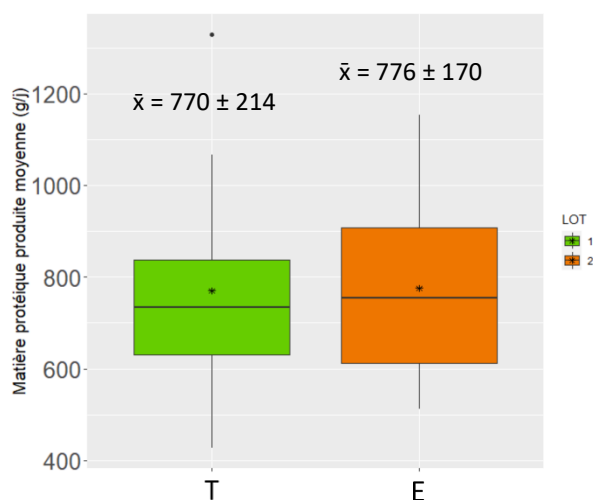


Figure 15 : Statistiques descriptives de la quantité de matière protéique moyenne selon le lot durant la période expérimentale

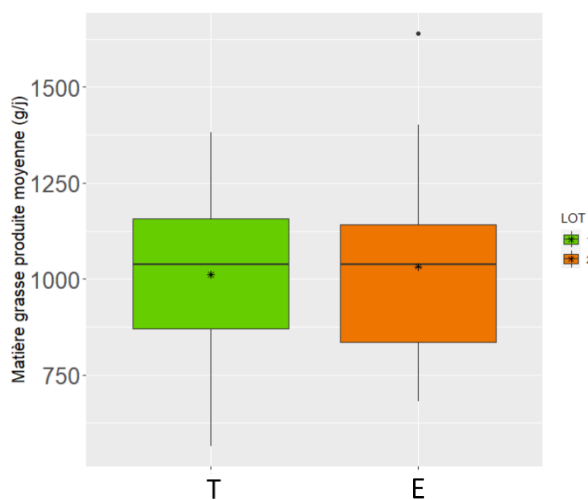


Figure 16 : Statistiques descriptives de la quantité de matière grasse moyenne selon le lot durant la période expérimentale

Les quantités de matières protéiques produites par jour sont différentes selon le traitement (p-value = 0,03 ; Tableau 12). Les vaches ont produit 19 g de matière protéique de plus par jour lorsqu'elles étaient alimentées avec des graines de soja toastées (lot E) par rapport à des graines de soja crues (lot T) selon les estimations du modèle.

Tableau 12 : Analyse de variance de la variable matière protéique pour l'effet du traitement

Traitement	p-value	Estimation	Erreur Type
Témoin – soja cru	0,03	709	40
Expérimental – soja toasté		728	40

Concernant les quantités de matières grasses, les statistiques descriptives montrent que les vaches du lot T ont en moyenne produit 1011 g de MG par jour et les vaches du lot E 1032 g par jour (Figure 16). La quantité de matière grasse n'ayant pas été prise en compte pour

l'allotement, une différence significative était déjà présente entre les deux lots lors de la période pré-expérimentale et le modèle statistique n'a donc pas pu être appliqué à cette variable.

1.2.4. Des comptages cellulaires et un taux d'urée similaires

Les figures 17 et 18 représentent graphiquement les statistiques descriptives des variables taux de leucocytes (en log10) et taux d'urée. Le détail des valeurs est consultable en Annexe 5.

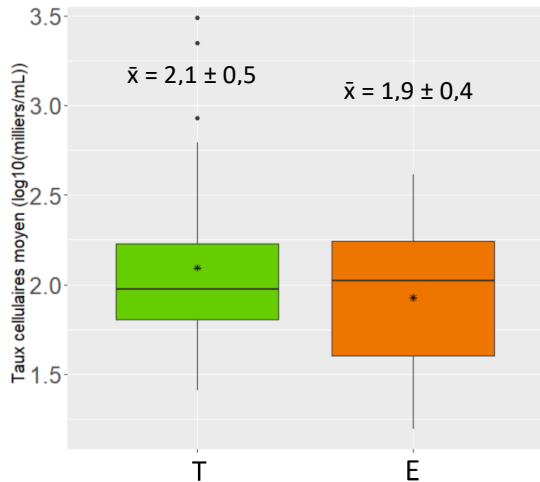


Figure 17 : Statistiques descriptives du taux de leucocytes moyen (en log 10) selon le lot durant la période expérimentale

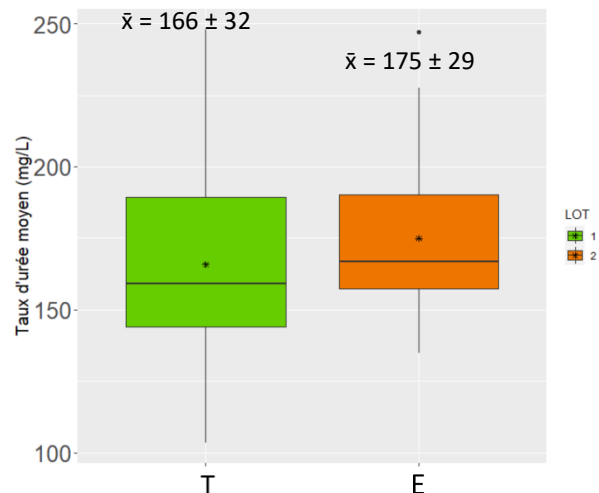


Figure 18 : Statistiques descriptives du taux d'urée moyen selon le lot durant la période expérimentale

Les statistiques descriptives de la variable taux de leucocytes montrent un niveau cellulaire plus élevé dans le lot T par rapport au lot E (2,1 contre 1,9 log10(milliers/mL)), ce qui était déjà le cas en période pré-expérimentale. Concernant le taux d'urée, il ne semble pas différer selon le traitement, avec 9 mg/L d'écart entre les deux lots et des écarts-type aux alentours de 30 mg/L. Pour les mêmes raisons que celles présentées pour la variable quantité de matière grasse, le modèle statistique n'a pas pu être appliqué à ces deux variables.

1.3. Un état corporel stable quel que soit le traitement

L'état corporel des animaux a peu évolué entre le début et la fin de l'essai (Figure 19). La NEC moyenne était de 2,3 pour le lot T en début d'essai et est passée à 2,5 en fin d'essai. La NEC moyenne des vaches du lot E est restée à 2,5 entre le début d'essai et la fin d'essai.

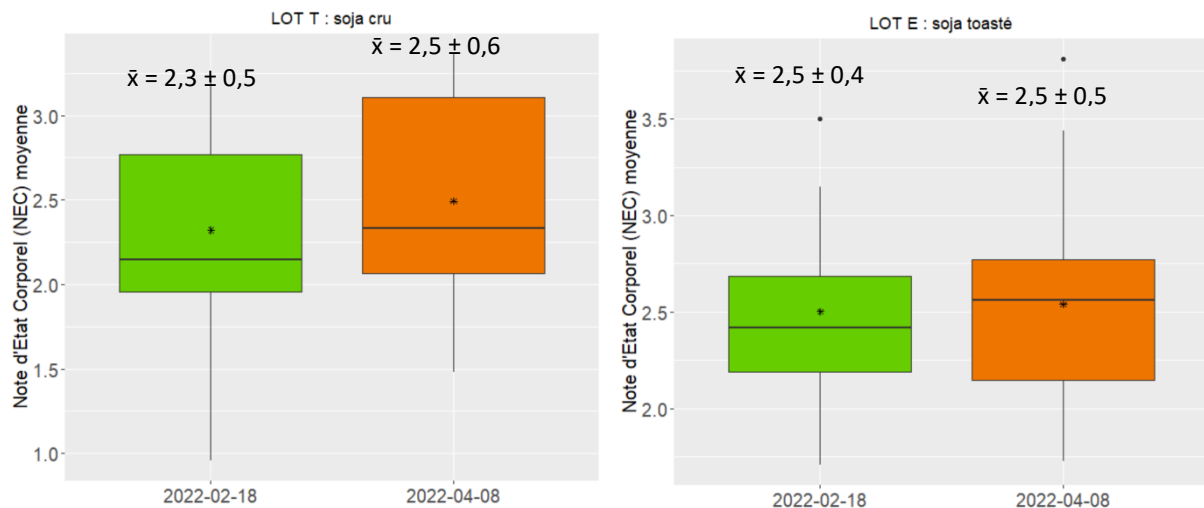


Figure 19 : Statistiques descriptives de l'évolution de la NEC de chaque lot entre février et avril

1.4. Une marge sur coût alimentaire inférieure avec le soja toasté

Les marges sur coût alimentaire des rations T et E ont été calculées à partir des résultats zootechniques de l'essai et du coût des aliments produits (fourrages) et achetés pour l'essai (concentrés). Les résultats de l'essai ne montrant pas d'effet significatif du traitement sur la quantité de lait produite et les taux de matière utile, c'est la moyenne des 2 lots sur ces paramètres qui a été utilisée pour le calcul du produit lait. Le coût alimentaire a été calculé à partir des quantités de matière sèche réellement ingérées par les animaux durant l'essai.

Du fait du toastage, le coût alimentaire est plus élevé pour le lot E que pour le lot T (+ 4 €/1000 L) (Tableau 13). Le produit lait ne variant pas selon le traitement, cette différence de 4 €/1000L se retrouve donc sur la marge alimentaire qui est plus faible pour le lot E par rapport au lot T.

Tableau 13 : Marges sur coût alimentaire comparées entre le lot T et le lot E

	Lot T (soja cru)	Lot E (soja toasté)
Produit lait (€/1000 L)	390	390
Coût alimentaire (€/1000 L)	170	174
Marge sur coût alimentaire (€/1000 L)	220	216

L'hypothèse 1 est donc confirmée puisque le toastage n'influence pas les performances zootechniques des animaux. On peut donc introduire du soja cru dans la ration des vaches laitières.

2. Effet de l'introduction de soja sur les performances économiques de l'exploitation

2.1. Optimisation du système initial

Le Tableau 14 présente les principaux postes de produits et de charges calculés sur la ferme du lycée agricole de Rethel en 2021. Le détail de ces montants par catégorie animale et par culture est disponible en Annexe 6.

Tableau 14 : Postes de produits et de charges permettant d'obtenir l'EBE de la situation initiale

Produits		Charges opérationnelles	
Produit lait	208 140 €	Cultures	38 385 €
		Elevage	123 770 €
Produit viande	63 660 €	Taxes sur produits d'exploitation	1745,3 €
Produit cultures	79 390 €	Charges de structure	
Aides PAC	45 385 €	Main d'œuvre	122 450 €
		Mécanisation	82 085 €
TOTAL	396 575 €	Frais généraux	29 100 €
		Entretien bâtiment	2 150 €
		Fermage	3 370 €
		TOTAL	403 055 €
EBE = - 6 480 € (115 970 € hors main d'œuvre)			

L'optimisation du système effectuée selon la méthode présentée en partie II.2.2.1. a entraîné les changements présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Optimisation du système initial et conséquences sur l'EBE

	Situation initiale	Conséquences de l'optimisation sur le système	Situation optimisée
Produits	396 575 €	+Vente de 41,4 T de blé à 210€/T (5 ha à 8,3 T/ha)	405 275 €
<i>Dont produits végétaux</i>	79 390 €		88 090 €
Charges opérationnelles	163 900 €	-Achat d'amendements : - 5 660€	159 140 €
<i>Dont cultures</i>	38 385 €	+5 ha de blé à 397€/ha -5 ha de PT à 117€/ha	34 125 €
<i>Dont élevage</i>	123 770 €	-Achat de 5 ha de paille : -500€	123 270 €
Charges de structure	239 155 €	+ 5 ha de travaux de moisson à 115€/ha	239 730 €
<i>Dont mécanisation</i>	82 085 €		82 660 €
EBE	- 6 480 €	+ 12 885 € d'EBE	+ 6 405 €

Le calcul des besoins fourragers des animaux montre que 646 T de MS de fourrages sont nécessaires à l'exploitation chaque année (Annexe 7.1). En retranchant les quantités de fourrages produites hors herbe (ensilage de maïs et betteraves fourragères) et les quantités de fourrages achetées (pulpes de betteraves), l'exploitation valorise annuellement 430 T de MS d'herbe sur les 78 ha d'herbe, soit 5,5 T de MS/ha. Selon les références de potentiel de rendement, la valorisation de l'herbe de l'exploitation devrait être de 5,9 T de MS/ha, 73 ha de prairies suffiraient donc pour répondre aux besoins des animaux, ce qui libère 5 ha. Dans le système optimisé, 5 ha de prairie temporaire (PT) ont été remplacés par une culture de vente de référence, le blé.

La comparaison des montants de charges opérationnelles calculés par culture avec les références départementales montre des niveaux de charges élevés pour le poste engrais sur les cultures de l'exploitation (Annexe 7.2). Cet écart entre les charges calculées sur l'exploitation et les références s'explique par l'utilisation d'amendements dits « activateurs de sols ». Après consultation des conseillers spécialisés en productions végétales, l'utilisation de ces produits dans un système polyculture-élevage avec apport de fumier régulier sur les cultures présente peu d'intérêts agronomiques. Ces produits ont donc été retirés des charges de la situation optimisée, ce qui a permis de rapprocher les charges des cultures des références départementales (Annexe 7.2).

2.2. Simulation d'introduction de soja sur l'exploitation

2.2.1. Modifications du système de culture

Pour introduire 2 kg de soja dans la ration hivernale des vaches laitières (du 31/10 au 01/04), il faut récolter environ 25 T de graines. Avec un rendement estimé de 2,5 T/ha sur la zone, 10 ha doivent être assolés chaque année avec cette culture.

Afin de pouvoir répondre aux besoins annuels des animaux en fourrages et céréales autoconsommées, la mise en place du nouveau système de cultures doit conserver les surfaces assolées en maïs ensilage, betteraves fourragères et orge d'hiver. Les betteraves sucrières et la luzerne étant commercialisées sous contrat, les surfaces assolées en 2021 (respectivement 8,1 et 3 ha) doivent également être maintenues dans la simulation. Ainsi, le blé est la seule culture à laquelle le soja peut se substituer dans l'assolement de l'exploitation.

La rotation principale du lycée agricole de Rethel est betterave – blé – maïs – blé. Elle est pratiquée sur 50 ha en situation optimisée, et ces surfaces sont celles qui sont les plus adaptées à la culture du soja. La rotation soja – blé – betterave – blé – maïs y est donc mise en place dans la simulation. Sur 50 ha, elle permet de produire annuellement 10 ha de soja, 10 ha de maïs, 10 ha de betteraves et 20 ha de blé.

Le montant des charges opérationnelles sur le soja est de 384 €/ha et se décompose comme suit (Annexe 8) :

- 114 €/ha de semences de soja, 40 €/ha d'inoculation*, et 25 €/ha de semences d'interculture
- 50 €/ha d'engrais, pour 40 unités de phosphore et 40 unités de potasse
- 130 €/ha de produits phytosanitaires pour le désherbage
- 25 €/ha d'assurance récolte

Pour prendre en compte les arrières-effets de fertilisation du soja sur la culture suivante, une réduction de 20 unités d'azote sur les 10 ha de blé implantés après soja a été appliquée.

2.2.2. Réduction des charges liées à l'achat d'aliment

Le toastage du soja n'ayant pas d'influence sur la production laitière et les taux de matière utile d'après l'essai précédemment présenté, le soja a été intégré dans la ration des vaches laitières sous forme crue. Le remplacement de 1,5 kg brut de tourteau de colza par 2 kg brut de soja cru permet d'obtenir une ration à apport PDI journalier similaire à celui de la ration sans soja (Annexe 9). L'économie de tourteau réalisée sur la période hivernale est ainsi de 19,5 tonnes soit 22 kg/VL.

2.2.3. Influence de l'introduction de soja sur les performances laitières

Il n'existe pas de références sur l'effet de la substitution de tourteau de colza par des graines de soja crues sur les performances des vaches laitières. Différents essais d'introduction de graines de soja crues ou toastées en remplacement de tourteau de soja ou colza montrent une tendance à l'augmentation de la production laitière et à la baisse des taux de matière utile (Legarto et Beaumont, 2006 ; Springer et al., 2021 ; Chapuis et Demarbaix, 2020 ; Demarbaix et al., 2022). Ainsi, dans cette simulation, plusieurs scénarios ont été définis quant aux variations de performances laitières. Il a été estimé que la production laitière pouvait varier de + 0 à + 2 kg/vache et par jour, et que le TB et le TP pouvaient varier de - 2 à - 0 g/kg.

2.2.4. Conséquences de l'introduction de soja sur l'EBE

Le Tableau 16 présente les résultats de la simulation économique dans le cas où les conséquences sur les performances laitières sont celles issues de l'essai zootechnique mené en 2021 au lycée agricole de Rethel. La production laitière et le taux butyreux ne varient pas, et le taux protéique diminue de 2 g/kg. Dans ce cas de figure, les produits diminuent de 19 465 € et les charges de seulement 4 270 €, la perte d'EBE est donc de - 15 195 €.

L'effet de la variation des performances laitières sur le produit lait se situe entre -3 700 € dans le cas où la production laitière reste la même et les taux de matière utile diminuent de 2 g/kg, et + 9 840 € dans le cas où la production laitière augmente de 2 kg/vache/j et les taux de matière utile restent stables. **Ainsi, la variation d'EBE varie de - 2 970 € à - 16 505 € selon l'évolution des performances des animaux** (Tableau 17). L'hypothèse 2 selon laquelle les performances économiques n'étaient pas dégradées par l'introduction de soja est donc infirmée.

* La bactérie symbiotique du soja (*Bradyrhizobium japonicum*) étant naturellement absente des sols français, une première culture de soja doit être inoculée

Tableau 16 : Conséquences de l'introduction de soja sur l'EBE de l'exploitation pour une baisse du TP de 2g/kg

	Situation optimisée	Conséquences de l'introduction de soja	Situation avec soja
Produits	405 275 €		385 810 €
<i>Dont produits végétaux</i>	88 090 €	- 17 400 € de vente de blé	70 690 €
<i>Dont produit lait</i>	208 140 €	- 2 g/kg de TP en hiver : - 2390 €	205 750 €
<i>Dont aides PAC</i>	45 385 €	+ Aide soja 32,5€/ha : 325 €	45 710 €
Charges opérationnelles	159 140 €		154 120 €
<i>Dont cultures</i>	34 125 €	-10 ha de blé à 397€/ha +10 ha de soja à 384€/ha	33 875 €
<i>Dont élevage</i>	123 270 €	- 20 unités d'azote : 116 € - 19,5T de tourteau de colza +Achat de 10 ha de paille : 1000€	118 500 €
Charges de structure	239 730 €		240 480 €
<i>Dont mécanisation</i>	82 660 €	+ Broyage de 25 T de soja à 30€/T	83 410 €
EBE	+ 6 405 €	- 15 195 € d'EBE	- 8 790 €

Tableau 17 : Conséquences du changement de système sur l'EBE selon les différents scénarios d'évolution des performances laitières

LAIT =	TB =	TB -2
TP =	- 12 805 €	- 14 115 €
TP -2	- 15 195 €	- 16 505 €
LAIT +2	TB =	TB -2
TP =	- 2 970 €	- 4 340 €
TP -2	- 5 470 €	- 6 840 €

2.2.5. Influence de l'introduction de soja sur l'autonomie alimentaire de l'exploitation sur la ration des vaches laitières

Les quantités de soja introduites dans la ration des vaches laitières représentent 8% de la MS ingérée pendant la période hivernale, soit 5 mois de l'année, et seulement 3% de la MS ingérée annuellement par les animaux. Ce changement de ration permet d'augmenter l'autonomie massique sur la ration moyenne annuelle des vaches laitières de 3%, et l'autonomie protéique de 8%. Les autonomies massique et protéique calculées sur les concentrés étaient initialement nulles et ont augmenté respectivement de 14 et 24% (Tableau 18).

Tableau 18 : Evolution des niveaux d'autonomie de l'exploitation sur la ration des vaches laitières

	Autonomie	Sans soja	Avec soja
Ration	Massique (% MS)	74	77
	Protéique (% MAT)	57	65
Concentrés	Massique (% MS)	0	14
	Protéique (% MAT)	0	24

3. Influence du changement de système sur les performances environnementales de l'exploitation

Dans le cas où l'introduction de soja dans la ration des vaches laitières engendre une baisse de TP de 2 g/kg, les évolutions techniques mises en place permettent de réduire les émissions de GES de 325 kg eq. CO₂/ha de SAU à l'échelle de l'exploitation, soit une réduction de 5 % (Tableau 19). C'est principalement la réduction de - 16 % de la fertilisation azotée sur les surfaces, liée à la substitution de surfaces en blé par du soja, qui engendre cette baisse. L'implantation d'une interculture avant le soja conduit au stockage de 33 kg eq. CO₂/ha de SAU supplémentaires par rapport à la situation sans soja (+ 4 %). Du fait de la réduction des achats de concentrés et d'engrais azotés, l'excédent du bilan d'azote est également réduit de 9 kg d'azote/ha.

A l'échelle de l'atelier laitier, la réduction des émissions de GES permet de diminuer l'empreinte carbone de 0,03 kg eq. CO₂/L de lait corrigé, soit une baisse de 3 %. Elle est liée à la baisse des achats d'aliments et des émissions engendrées par la fermentation entérique. En effet, l'introduction du soja, aliment riche en matière grasse, dans la ration des vaches laitières permet de diminuer les quantités de méthane produites dans le rumen (Pellerin et al., 2013).

Les scénarios d'évolution des performances laitières influencent le nombre de L de lait corrigé produit. Ainsi l'empreinte carbone de l'atelier lait du système simulé varie de 0,94 kg eq. CO₂/L de lait produit dans le cas d'une baisse de taux de matière utile sans variation de la quantité de lait produite, à 0,90 kg eq. CO₂/L de lait produit dans le cas d'une augmentation de la quantité de lait produite sans variation des taux de matière utile. La baisse de l'empreinte carbone de l'atelier lait engendrée par l'introduction de soja dans le système d'exploitation varie donc de - 2 à - 6 %.

L'hypothèse 3 selon laquelle l'introduction de soja améliorerait les performances environnementales de l'exploitation est donc confirmée.

Tableau 19 : Evolution des performances environnementales à l'échelle de l'exploitation agricole et de l'atelier laitier pour une baisse du TP de 2g/kg

		Situation optimisée	Introduction de soja
Evolution technique	Surface en soja (ha)	0	10
	Surface en cultures de vente (ha)	80	70
	Apport moyen azote minéral (kg/ha)	81	68
	TP moyen annuel (g/kg)	34,1	33,3
	Tourteau de colza atelier lait (T)	123	103
	Graines de soja vaches laitières (T)	0	25
Exploitation agricole	Emission de GES (kg eq. CO ₂ /ha SAU)	6 257	5 932
	Stockage carbone (kg eq. CO ₂ /ha SAU)	734	767
	Excédent du bilan azote (kg N/ha SAU)	56	47
Atelier lait	Emission de GES (kg eq. CO ₂ /L lait corrigé)	1,07	1,05
	Stockage carbone (kg eq. CO ₂ /L lait corrigé)	0,11	0,11
	Empreinte carbone nette (kg eq. CO ₂ /L lait corrigé)	0,96	0,93

IV. Discussion

1. Intérêt technico-économique du toastage des graines de soja

1.1. Une amélioration de la valeur nutritive des graines par le toastage

Les analyses de valeur alimentaire réalisées sur les graines de soja montrent une réduction de la dégradabilité ruminale de l'azote par le toastage. La valeur de dégradabilité enzymatique de l'azote en une heure (DE1) est ainsi réduite de 61 % entre le soja cru et le soja toasté (Tableau 8). Cela conduit à une augmentation de la valeur PDIA de + 50 g/kg, qui se répercute sur la valeur PDI des graines toastées. A l'échelle de la ration présentée dans le Tableau 6, cela représente 83 g de PDI de plus par jour pour la ration du lot E par rapport à la ration du lot T.

1.2. Un niveau d'ingestion inférieur aux prévisions

L'ingestion a été mesurée à l'échelle de chaque lot du fait de l'absence d'auges de pesée individuelle. Les ingestions moyennes des lot T et E sont restées proches tout au long de l'essai, mais toujours en dessous de l'ingestion prévisionnelle. La présence de deux races dans le troupeau a compliqué la prévision d'ingestion de MS par vache. Elle peut expliquer que l'objectif d'ingestion fixé dans l'essai ait été surestimé, les vaches de race Jersiaise ayant une capacité d'ingestion inférieure à celle des Prim'Holstein. En effet, la ration prévoyait une ingestion à l'auge de 20,6 kg de MS/j par vache dans les deux lots, et les vaches ont en moyenne ingéré 17 kg de MS/j seulement (Tableau 6 ; Tableau 9). De plus, durant les 4 dernières semaines de l'essai, le nombre de places à l'auge était inférieur d'environ 10% au nombre de vaches présentes dans la stabulation. Cela pourrait expliquer une ingestion inférieure à celle attendue, du fait de la concurrence entre les animaux (von Keyserlingk et Weary, 2010).

Ainsi, les quantités totales d'énergie et de protéines ingérées par jour sont inférieures aux prévisions. En prenant en compte l'ingestion réelle des animaux, soit 83% de la ration totale, l'ingestion de graines de soja toastées ou crues n'est plus que de 1,4 kg de MS/vache/j, et la ration E n'apporte plus que 68 g de PDI par jour de plus que la ration T.

1.3. Un effet très limité sur les performances laitières, et un produit lait qui ne permet pas de compenser pas le surcoût lié au toastage

L'absence de variations de production laitière et des taux de matière utile ne permettent pas d'obtenir un produit lait compensant le surcoût du toastage, dégradant ainsi la marge alimentaire. Différents éléments pourraient expliquer l'effet limité du toastage sur les performances laitières.

L'efficacité marginale de l'utilisation des PDI est d'environ 20 % (Brun-Lafleur, 2010). Ainsi, une hausse de l'apport PDI journalier de 68 g/j conduirait à une augmentation de la synthèse de matière protéique d'environ 14 g/j. Cette augmentation de 14 g/j correspond à la différence attendue de matière protéique calculée par INRA 2018 à l'aide du logiciel RUMIN'AL. Ces éléments sont cohérents avec les observations faites dans cet essai, puisque les vaches alimentées avec du soja toasté ont produit 19 g de matières protéiques en plus par jour que celles alimentées avec du soja cru. Cette hausse ne suffit pas à faire évoluer le TP, qui n'a pas différé selon le lot.

D'après INRA 2018, la différence attendue de production laitière entre la ration du lot T et la ration du lot E est de + 0,5 kg/j. Le toastage des graines de soja n'a cependant pas eu d'effet significatif sur la production laitière.

Outre la faible efficacité marginale des PDI, la maîtrise du processus de toastage et la taille des particules de graines distribuées aux vaches pourraient expliquer que l'effet du toastage sur les performances laitières soit limité dans cet essai. En effet, le toastage mobile est un procédé non-industriel sur lequel très peu de recherches ont été entreprises à ce jour. Une intensité et/ou une durée de chauffage trop élevées réduisent la digestibilité intestinale des protéines en limitant l'absorption des acides aminés dans l'intestin grêle (Poncet et al., 2003 ; Mendowski et al., 2019). Le recours aux traitements thermiques pourrait également réduire la teneur en acides aminés indispensables des graines et notamment en lysine (Mendowski et al., 2019 ; Mogensen et al., 2008). La réalisation d'analyses de la teneur en acides aminés des graines crues et toastées aurait permis de mieux comprendre l'effet du toastage sur les caractéristiques des graines de soja. De plus, la protection ruminale apportée par le traitement thermique pourrait être diminuée si les graines sont broyées trop finement (Poncet et al., 2003). Ainsi l'optimum granulométrique pour distribuer des graines torréfiées serait de 2,9 mm selon Tice et al. (1993), alors que la taille moyenne des particules de graines distribuées dans l'essai était de 1,3 mm quel que soit le lot.

Enfin, il est possible que les équipements disponibles sur le lieu de l'étude aient influencé les résultats, une ferme de lycée agricole ne disposant pas de matériel conçu pour l'expérimentation. Notamment, le godet mélangeur utilisé pour la distribution de la ration ne permettait pas de peser les fourrages de manière aussi précise que le fait une mélangeuse, ni de mélanger assez les aliments pour obtenir une ration homogène. La vétusté du DAC a également pu limiter la précision des quantités d'aliments distribués.

2. Des économies de charges qui ne compensent pas la réduction du produit cultures

La simulation d'introduction de soja sur l'exploitation en conjoncture 2021 conduit à une baisse de charges non suffisante pour compenser la perte de produits. Les cours des intrants expliquent que les économies réalisées par le changement de système soient limitées. En effet, les engrais azotés achetés en fin d'année 2020 et utilisés pour la production des céréales récoltées en 2021 étaient relativement peu chers par rapport aux prix constatés actuellement. Sur le blé, la solution azotée apportée a coûté 174 €/T, soit 0,58 € l'unité d'azote. Le prix de la solution azotée a augmenté de + 57,9 % sur l'année 2021 et valait 595 €/T au 30 décembre 2021 soit 1,98 € l'unité d'azote (Agreste, 2022 ; Web-Agri, 2022a). L'économie de concentrés distribués aux vaches laitières est également restreinte. En effet, le prix moyen auquel l'exploitation a acheté le tourteau de colza en 2021 était plutôt faible (296 €/T). Le prix du tourteau de colza a augmenté de 22,6 % sur l'année 2021, et a atteint 500 €/T en février 2022 (Agreste, 2022 ; Web-Agri, 2022b). De plus, la quantité achetée en moins représente seulement 16 % des quantités annuellement consommées par l'ensemble du troupeau laitier (vaches et génisses).

Le potentiel de rendement des cultures sur l'exploitation explique que la perte de produits engendrée par le changement de système de culture soit importante. En effet, le potentiel de rendement du blé est élevé au lycée agricole de Rethel : 83 quintaux (qtx) par ha en 2021, contre 74 qtx/ha en moyenne pour la région (Agreste Grand-Est, 2022b). Ainsi, la suppression de 10 ha de blé conduit une perte de produits de 17 400 €. Le rendement du soja a été estimé à 25 qtx/ha, contre 29 qtx/ha de moyenne à l'échelle nationale en 2021 (Terres Inovia et Terres Univia, 2021). Cette culture mobilise donc beaucoup de surfaces pour produire les quantités nécessaires à l'introduction du soja dans la ration.

Les conséquences de l'introduction de soja dans la ration sur les performances des vaches laitières ont également beaucoup d'influence sur le résultat de la simulation, avec un écart de produit lait de 13 535 € entre le scénario le plus favorable et celui le plus défavorable.

L'intérêt de l'introduction de cette culture pour l'autoconsommation des animaux est donc fortement dépendant du prix des intrants (engrais et aliments), de la valorisation des autres cultures de l'exploitation (rendements et prix de vente), ainsi que des variations de performances laitières engendrées par le changement de ration. Le montant de l'aide couplée à la production de soja, fixé à 32,5 €/ha en 2021 et estimé à 104 €/ha dans la nouvelle PAC de 2023 devrait être plus favorable à la culture de soja (Inosys Réseaux D'Elevage Grand-Est et Ile-de-France, 2022).

Il aurait été intéressant d'étudier l'effet de l'introduction de soja dans un système conduit en agriculture biologique, où les rendements en blé sont limités par l'interdiction d'utilisation des engrais de synthèse et les aliments concentrés sont chers.

3. Des progrès sur l'autonomie et les performances environnementales qui restent limités

L'introduction de soja permet d'économiser 22 kg de tourteau de colza par vache et par an, ce qui améliore l'autonomie protéique de la ration des vaches laitières de 8 %. A l'échelle de l'exploitation, le progrès réalisé est plus faible, puisque aucun changement n'a été effectué sur l'alimentation des génisses et des brebis allaitantes. L'évolution des performances environnementales est également limitée, avec une réduction de l'empreinte carbone de l'atelier lait comprise entre - 2 et - 6 % selon les performances laitières.

D'autres leviers techniques permettent d'augmenter l'autonomie protéique d'une exploitation tout en améliorant ses performances environnementales, sans modification profonde du système d'exploitation. Par exemple, dans une simulation réalisée par les Réseaux d'Elevage des Hauts-de-France, l'implantation de 3,5 ha de méteil fourrager en remplacement de la même surface en maïs ensilage permet de diminuer les achats de correcteur azoté de 300 kg/VL/an sans pénaliser les performances laitières. Dans cette simulation, l'empreinte carbone de l'atelier lait est améliorée de 6 % et aucune perte d'EBE n'est constatée (Castellan et al., 2021).

5. Des conséquences sur le temps de travail à évaluer

Outre l'aspect économique et environnemental, il est nécessaire de s'intéresser à la dimension sociale pour évaluer la durabilité du système d'exploitation simulé. Des références de temps de travail moyen au champ par culture ont été produites dans le cadre du projet CASDAR PhytoEl et sont intégrées à l'outil CAP'2ER® (données non publiées). Ainsi, la culture de blé nécessite 4,2 heures de travail par ha et celle soja 3,5 heures. L'implantation de 10 ha soja ferait donc économiser 7 h de travaux des champs à l'année.

Au niveau de l'atelier laitier, l'introduction du soja nécessite de broyer les graines avant de les distribuer, régulièrement et par petites quantités pour que les graines broyées ne rancissent pas. La charge de travail engendrée par cette tâche dépend de ses conditions de réalisation (prestation de service ou personnel de l'exploitation, performance du matériel utilisé...). L'ajout de graines de soja dans la ration des animaux complique également sa distribution, avec un aliment à peser en plus et une augmentation du risque d'erreurs dans les quantités de chaque constituant à apporter aux animaux.

Conclusion et perspectives

L'essai conduit à la ferme expérimentale de Rethel avait pour but d'évaluer l'effet du toastage des graines de soja à la ferme sur les performances des vaches laitières. Bien que le traitement thermique ait amélioré la valeur alimentaire des graines toastées en réduisant la dégradabilité de l'azote dans le rumen, cet essai n'a pas démontré d'effet du procédé testé sur la production laitière et les taux de matière utile (TB et TP). Cette absence d'effet peut s'expliquer par une efficacité des PDI faible. La maîtrise du processus de toastage et de la taille des particules de graines distribuées aux animaux ont également pu influencer les résultats. Le traitement appliqué aux graines a engendré des coûts supplémentaires par rapport à la distribution de graines crues, son intérêt technico-économique n'a donc pas été démontré dans cet essai. Ainsi, la simulation d'introduction de graines de soja dans le système d'exploitation a été réalisée avec des graines de soja crues.

Les répercussions du changement de système étudié sur les performances économiques de la ferme du lycée agricole de Rethel sont négatives pour l'année 2021, avec une perte d'EBE située entre - 2 970 et - 16 505 €. La réduction des charges permise par la recherche d'autonomie en concentrés ne permet pas de couvrir la baisse de produits, qui dépend fortement de la variation du produit lait déterminée par la réponse des vaches laitières au changement de ration. Dans un contexte de prix des intrants et des cultures différent, les conclusions pourraient être moins défavorables à la culture du soja. L'intérêt économique de l'autoproduction de soja est également tributaire du contexte pédoclimatique de l'exploitation qui détermine les rendements. Un niveau de soutien public alloué aux oléo-protéagineux supérieur serait un moyen d'encourager la recherche d'autonomie protéique par la production d'oléo-protéagineux. La valorisation des efforts entrepris par les éleveurs pour accroître leur niveau d'autonomie alimentaire pourrait également se faire par le biais d'un cahier des charges mettant en avant le caractère local de la production et apportant une plus-value sur le prix du lait.

Dans le contexte de la simulation, la perte d'EBE engendrée par l'introduction de soja peut s'avérer conséquente, les performances environnementales de l'exploitation sont sensiblement améliorées et la charge de travail ne semble pas être diminuée. La durabilité du système mis en place est donc remise en question et l'intérêt de raisonner l'autonomie en concentrés à l'échelle de l'exploitation se pose.

L'échelle territoriale semble un bon compromis pour l'approvisionnement en concentrés. Les coopérations entre céréaliers et éleveurs étudiées dans le projet ARPEEGE représentent une piste à explorer. Elles pourraient limiter l'exposition des exploitations à la volatilité des cours des matières premières en lissant les variations de prix sur plusieurs années par le biais de contrats. Le développement d'une filière de production de soja local est une autre piste intéressante. Il permettrait d'investir dans un outil de trituration produisant du tourteau et facilitant ainsi l'incorporation du soja produit dans la ration des vaches laitières à l'image de ce qui est mis en place pour la filière AOP Comté en région Bourgogne-Franche-Comté (Terre Comtoise, 2015).

Références

Agreste, 2021. Recensement agricole 2020 : Surface moyenne des exploitations agricoles en 2020 : 69 hectares en France métropolitaine et 5 ha dans les DOM [en ligne]. *Primeur*, 5. Disponible sur : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Pri2105/Primeur%202021-5_Recensement-Agricole-2020.pdf [consulté le 29/03/2022].

Agreste, 2022. Intrants agricoles – En 2021, la plus forte hausse de prix des intrants depuis 2011 [en ligne]. *Synthèses conjoncturelles*, 385. Disponible sur : <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/SynCpr22385/consyn385202203Cpr-V2.pdf> [consulté le 12/05/2022].

Agreste Grand-Est, 2021. Recensement agricole 2020 – Une agriculture régionale relativement préservée malgré la poursuite de la baisse démographique [en ligne]. *Etudes*, 6. Disponible sur : https://www.prefectures-regions.gouv.fr/grand-est/content/download/90552/580635/file/2021-06-etudes%20RA_grand-est_vf.pdf [consulté le 17/06/2022].

Agreste Grand-Est, 2022a. Mémento de la statistique agricole [en ligne]. Edition 2021. Disponible sur : https://draaf.grand-est.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/memento2021_cle44cccf.pdf [consulté le 23/07/2022].

Agreste Grand-Est, 2022b. Productions agricoles – Bilan 2021 : des cours globalement en hausse mais des charges qui augmentent [en ligne]. *Conjoncture*, 6. Disponible sur : https://draaf.grand-est.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/2022-06-bilan2021_cle091578.pdf [consulté le 03/08/2022].

Baillet A., 2022. Etude du bassin de production de soja en Grand Est : volet agronomique – projet ARPEEGE [en ligne]. Disponible sur : https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/049_Inst-Acal/RUBR-productions-agricoles/ARPEEGE/Etude_du_bassin_de_production_du_soja_en_Grand_Est_ARPEEGE-202206.pdf [consulté le 22/06/2022].

Berard S., 2022. Guide de culture soja 2022 [en ligne]. Terres Inovia. Disponible sur : <https://www.terresinovia.fr/o/commerce-media/products/454326/guide-soja/4122454/Guide%20de%20culture%20soja%202022?download=false&title=fichier.pdf> [consulté le 20/05/2022].

Berger Y., Hubin-Dedenhys S. et Toussaint X., 2016. Avenir des systèmes de polyculture-élevage en Lorraine [en ligne]. Rapport CGAAER, 15143. Disponible sur : <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/164000784.pdf> [consulté le 12/04/2022].

Boucly M. et Decoret P.M., 2020. L'Europe agricole au défi de sa souveraineté protéinique. *Annales des Mines - Réalités industrielles*, 2020, 83-87.

Bourdois P., 2017. Toaster collectif pour gagner en autonomie [en ligne]. *Entraid'*. Disponible sur : <https://www.entraid.com/articles/toaster-collectif-pour-gagner-en-autonomie-alimentaire> [consulté le 20/07/2022].

Boutes J.L., Colette S., Daveau B., Faverdin P., Jurquet J., Mathieu Y., Rouverand S. et Trou G., 2017. Glossaire de l'alimentation protéique [en ligne]. Disponible sur : https://operaconnaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=171842 [consulté le 20/07/2022].

Brun-Lafleur L., Delaby L., Husson F. et Faverdin P., 2010. Predicting energy × protein interaction on milk yield and milk composition in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 93 (9), 4128-4143.

Caillaud D., Albert M., Berard G., Loubette R., Renard J.P., Teinturier T., Delmotte E., Getto G., Leclair A., et Zsitko J.M., 1999. Conception, mise au point et développement d'une démarche de conseil en élevage laitier (DECELAIT) en région Lorraine. *Rencontres Recherches Ruminants*, 6, 87.

Castellan E., Belot P.E., Pechuzal Y., Fourdin S., Charroin T., Lebrun A., Laurent M., Berchoux A., Chouteau A., Tirard S., Coueffé D. et Dupire O., 2021. Empreinte carbone, leviers de réduction en élevage bovin lait [en ligne]. IDELE. Disponible sur : <https://idele.fr/detail-dossier/empreinte-carbone-leviers-de-reduction-en-elevage-bovin-lait> [consulté le 11/08/2022].

Chambres d'agriculture France, 2021. Autonomie alimentaire des élevages herbivores français : où en sommes-nous ? [en ligne]. *Analyses et perspectives*, n°2105. Disponible sur : https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/National/Analyses-perspectives_2105_autonomie-alimentaire-herbivore-mars-2021VF2.pdf [consulté le 09/06/2022].

Chapuis D. et Demarbaix A., 2020. Utilisation de graines de Féveroles ou Soja toastées pour des vaches laitières. *Rencontres Recherches Ruminants*, 25, 385.

Cordier C., Saille M., Courtonne J.Y., Duflot B., Cadudal F., Perrot C., Brion A., Lecadre P., Peyronnet C. et Baumont R., 2020. Analyse des flux de matières premières en alimentation animale en France [en ligne]. Document édité par le GIS Avenir Elevages, 6p. Disponible sur : https://www.gis-avenir-elevages.org/content/download/3692/36051/version/1/file/synthese_Avenir_Elevages_2020.pdf [consulté le 10/06/2022].

Delaby L., 2014. L'autonomie alimentaire en élevage laitier. Colloque régional « Renforcer le lien au sol des élevages bretons », Pontivy, France.

Demarbaix A., Chapuis D., Berchoux A. et Boré R., 2022. Utilisation de graines de soja toastées dans l'alimentation des vaches laitières. IDELE. Compte-rendu d'essai. Disponible sur : https://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FspacesStore%2F5e532490-92f4-48f7-9e04-da63273e2e8e&cHash=bc28f065cc6e236b37e9f1b710e3dae4 [consulté le 10/08/2022].

Dollé J.B., Moreau S., Brocas C., Gac A., Raynal J. et Duclos A., 2015. Elevage de ruminants et changement climatique. Institut de l'Elevage, Collection l'Essentiel.

Echevarria L. et Berchoux A., 2021. L'autonomie à l'échelle des systèmes d'exploitation dans le Grand-Est – Etude à partir de la base de données Diapason du dispositif Inosys Réseaux d'Elevage Grand-Est. Comité de pilotage du GO PEI ARPEEGE, 11 mars 2021.

France AgriMer, 2021. Compétitivité des filières agroalimentaire françaises [en ligne]. Rapport. Disponible sur : https://www.franceagrimer.fr/content/download/66944/document/20210623_Rapport%20comp%C3%A9titivit%C3%A9%202020.pdf [consulté le 19/04/2022].

France AgriMer, 2022. Conjoncture oléoprotéagineux – Février 2022 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/68303/document/NCO-OLE-PANORAMA-MARCHE-2022-02.pdf?version=1> [consulté le 20/04/2022].

Hache, E., 2015. Géopolitique des protéines. Revue internationale et stratégique, 97, 36-46.

Hulin S., Arranz J.M., Jost J. et Spelle C., 2019. L'autonomie alimentaire en filières fromagères AOP, entre lien au terroir et agro-écologie [en ligne]. Disponible sur : http://www.rmtfromagesdeterroirs.com/wp-content/uploads/2019/04/AUTONOMIE-ALIMENTAIRE-COMPLET_HD_v3.pdf [consulté le 30/06/2022].

Inosys Réseaux d'Élevage Grand-Est, 2018. Produire du lait issu d'aliments sans OGM [en ligne]. IDELE. Collection Théma. Disponible sur : https://meurthe-et-moselle.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/54_Produire_du_lait_issu_d_aliments_sans_OGM_Vf.pdf [consulté le 25/07/2022].

Inosys Réseaux d'Élevage Grand-Est, 2022. Exploitations allaitantes : positionnez vos résultats économiques de 2021 [en ligne]. Chambre d'Agriculture des Ardennes. Disponible sur : https://ardennes.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/045_Inst_Ardennes/RUB_Techniques/Bovin_viande/Poitionnez_vos_resultats_eco_BV_2021.pdf [consulté le 27/07/2022].

Inosys Réseaux D'Élevage Grand-Est et Ile-de-France, 2022. Grandes tendances et évolutions de la PAC 2023-2027. IDELE. Collection Théma. Disponible sur : https://operaconnaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=176908 [consulté le 09 août 2022] [consulté le 01/08/2022].

Interbev Grand Est, 2018. Atlas Grand Est de l'élevage herbivore [en ligne]. Disponible sur : <https://www.la-viande.fr/sites/default/files/article/telechargements/fichiers/Atlas%20Grand-Est.pdf> [consulté le 10/06/2022].

Jurquet J. et Boré R., 2018. Effet du toastage de graines protéagineuses sur les performances des vaches laitières – résultats d'essai à la ferme expérimentale des Trinottières. IDELE. Collection Résultats.

Jurquet J. et Rouillé B., 2019. Efficience et autonomie : nouveaux regards sur l'alimentation des vaches laitières. 6^{ème} Conférence Grand Angle Lait, Paris, France.

Labalette F., Bourrel C., Jouffret P., Lecomte V., Quinsac A. et Ledoux S., 2010. Panorama et futur de la filière soja en France. OCL, 17 (46), 345-355.

Optival, 2021. Valorisation des graines de protéagineux/oléagineux. Présentation lors de la démonstration de toastage « Toastage : Quels intérêts sur nos systèmes d'élevage » organisée par la FRCUMA du Grand-Est, Boncourt-sur-Meuse.

Legarto J. et Beaumont B., 2006. Détermination des seuils d'incorporation de la graine de soja crue dans l'alimentation des vaches laitières. CR Institut de l'Élevage.

Mendowski S., 2019. Utilisation digestive des graines protéagineuses traitées, et leur valorisation par les vaches laitières. Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne (2017-2020).

Mendowski S., Chapoutot P., Chesneau G., Ferlay A., Enjalbert F., Cantalapiedra-Hijar G., Germain A. et Nozière P., 2019. Effects of replacing soybean meal with raw or extruded blends containing faba bean or lupin seeds on nitrogen metabolism and performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 102 (6), 5130-5147.

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2020. La stratégie nationale protéines végétales [en ligne]. Disponible sur : <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/122401?token=dc98a625cc3622c17aa5120fa897a4b074ba9e3958299ac37c11d4df1e5ae22d> [consulté le 23/07/2022].

Mogensen L., Lund P., Kristensen T. et Weisbjerg M.R., 2008. Effects of toasting blue lupins, soybeans or barley as supplement for high-yielding, organic dairy cows fed grass-clover silage ad libitum. *Livestock Science*, 115, 249-257.

Moraine M., Duru M., Nicholas P., Leterme P. et Therond O., 2014. Farming system design for innovative crop-livestock integration in Europe. *Animal*, 8 (8), 1204-1217.

Odienné C., Jacqueroūd M.P., Rouillé B., 2016. Les graines de soja dans la ration des ruminants. Collection fiches techniques.

Paccard P., Capitain M. et Farruggia A., 2003. Autonomie alimentaire des élevages bovins laitiers. *Rencontres Recherches Ruminants*, 10, 89-92.

Péchuzal Y., Rubin B., Deraedt M. et Coueffé D., 2017. Etude des systèmes de production d'avenir pour le lait de vache français [en ligne]. Disponible sur : <https://www.franceagrimer.fr/content/download/54667/document/ETU-LAI-Syst%C3%A8mes+de+production+d%27avenir+lait+de+vache-2017.pdf> [consulté le 24/06/2022].

Pellerin S., 2020. Autonomie protéique des élevages et gestion de l'azote : quels sont les enjeux ? [en ligne]. Rencontres régionales de la recherche, du développement et de la formation (3RdF), Déc 2020. Disponible sur : https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/3RDF2020-Actes_DEF.pdf [20/04/2022].

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

Perrot C., Caillaud D. et Chambaut H., 2012. Economies d'échelle et économies de gamme en production laitière. Analyse technico-économique et environnementale des exploitations de polyculture-élevage françaises. *Rencontres Recherches Ruminants*, 19, 33-36.

Perrot C., Péchuzal Y., Deraedt M., Mathieu P., Huchon J.C., Rubin B. et Lebrun A., 2021. Structure et évolution des coûts de production en élevages laitiers : identification des leviers de maîtrise des charges [en ligne]. Disponible sur : <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/67716/document/ETU-LAIT-Maitrise%20des%20couts%20de%20production%202021.pdf?version=1> [27/06/2022].

- Perrot C., 2022. Prix de revient du lait de vache – RICA [en ligne]. Idele. Disponible sur : <https://idele.fr/detail-article/prix-de-revient-du-lait-de-vache-rica> [25/04/2022].
- Peyraud J.L. et Duhem K., 2013. Les élevages laitiers et le lait demain : exercice d'analyse prospective. INRAE Productions Animales, 26 (2), 221–230.
- Peyronnet C., Lacampagne J.P., Le Cadre P. et Pressenda F., 2014. Les sources de protéines dans l'alimentation du bétail en France : la place des oléoprotéagineux. OCL, 21 (4), D402.
- Peyronnet C., 2021. Evaluation du potentiel de valorisation du tourteau de soja en France [en ligne]. Rencontres Francophones Légumineuses, 3. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=YAhdq9TRbE8&t=864s> [20/07/2022].
- Poncet C., Remond D., Lepage E. et Doreau M., 2003. Comment mieux valoriser les protéagineux et oléagineux en alimentation des ruminants. Fourrages, 174, 205-229.
- Pruilh C., 2016. Les leviers pour gagner en autonomie alimentaire. Réussir Lait, 298, 28-30.
- Quinsac A., Labalette F., Carré P., Janowski M. et Fine F., 2012. Comment valoriser dans l'alimentation animale, les graines de soja produites en France ? Comparaison de deux procédés de transformation : l'aplatissage-cuisson-pression et l'extrusion-pression. OCL, 19 (6), 347-357.
- Quinsac A., 2014. Des outils de transformation adaptés aux bassins de production régionaux [en ligne]. Colloque National Soja, Toulouse, France. Disponible sur : <http://docplayer.fr/34739409-Des-outils-de-transformation-adaptes-aux-bassins-de-production-regionaux.html> [20/07/2022].
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rouillé B., Devun J. et Brunschwig P., 2014. L'autonomie alimentaire des élevages bovins français. OCL, 21 (4), D404.
- Seegers J., Kentzel M., Fagon J., Jousseins C., Morin E., Etienne L. et Bossis N., 2020. Etat des lieux de l'autonomie alimentaire et protéique dans les ateliers d'élevage herbivores [en ligne]. Journées IRD en Occitanie. Disponible sur : https://idele.fr/inosys-reseau-elevage/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FspacesStore%2F872d3c75-e9f0-4652-b5a9-12d31ca928b6&cHash=1fdc5764b27016c41124b9d420be8954 [17/03/2022].
- Schneider A., et Huyghe C., 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Editions Quae, 512p.
- Springer G., Berchoux A., Hermant E., Rouillé B. et Weens M., 2021. Valorisation technique et économique de graines de soja produites et toastées dans la région Grand-Est dans l'alimentation des vaches laitières – Compte-rendu d'essai sur la ferme du lycée de Rethel (08) [en ligne]. Mémoire de stage, ESA Angers. Disponible sur : https://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FspacesStore%2Fa317d54d-31ca-4292-9435-fe72483f9687&cHash=cdfc9c80e8e6b858295cfbd27c54901f [consulté le 14/04/2022].
- Terre Comtoise, 2015. Le soja de pays chez nous et pour nous [en ligne]. Lettre d'infos n°35. Disponible sur : <https://www.terrecomtoise.com/sites/default/files/documents/pages/newsletter-35-mai-2015.pdf> [consulté le 12/08/2022].

Terres Inovia et Terres Univia, 2021. Bilan de récoltes – une très belle année pour le soja [en ligne]. Disponible sur : <https://www.terresinovia.fr/-/bilan-de-recoltes-une-tres-belle-annee-2021-pour-le-soja> [consulté le 08/08/2022].

Terres Univia, s.d. (1). Soja [en ligne]. Disponible sur : <https://www.terresunivia.fr/cultures-utilisation/les-especes-cultivees/soja> [consulté le 11/07/2022].

Terres Univia, s.d. (2). Tourteaux d'oléagineux [en ligne]. Disponible sur : <https://www.terresunivia.fr/produitsdebouches/alimentation-animale/tourteaux-d-oleagineux> [consulté le 26/07/2022].

Terres Univia, 2021. Chiffres clés - Plantes riches en protéines - 2020 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.terresunivia.fr/sites/default/files/chiffres%20cl%C3%A9s/TU-CC20-plantes-riches-en-prot%C3%A9ines2.pdf> [consulté le 22/03/2022].

Tice E.M., Eastridge M.L. et Firkins J.L., 1993. Raw Soybeans and Roasted Soybeans of Different Particle Sizes. 1. Digestibility and Utilization by Lactating Cows. *Journal of Dairy Science*, 76 (1), 224-235.

Von Keyserlingk M.A.G et Weary D.M., 2010. Review: Feeding behaviour of dairy cattle: Measures and applications. *Canadian Journal of Animal Science*, 90, 303-309.

Web-Agri, 2022a. Cotations de l'engrais [en ligne]. Disponible sur : <https://www.web-agri.fr/marches-agricoles/engrais> [consulté le 08/08/2022].

Web-Agri, 2022b. Marché des Tourteaux [en ligne]. Disponible sur : <https://www.web-agri.fr/marches-agricoles/tourteaux> [consulté le 08/08/2022].

Annexes

Annexe 1 : Structures partenaires du projet ARPEEGE et axes de recherche du projet

Le porteur de projet, la Chambre régionale d'agriculture Grand-Est (CRAGE) et 25 partenaires :



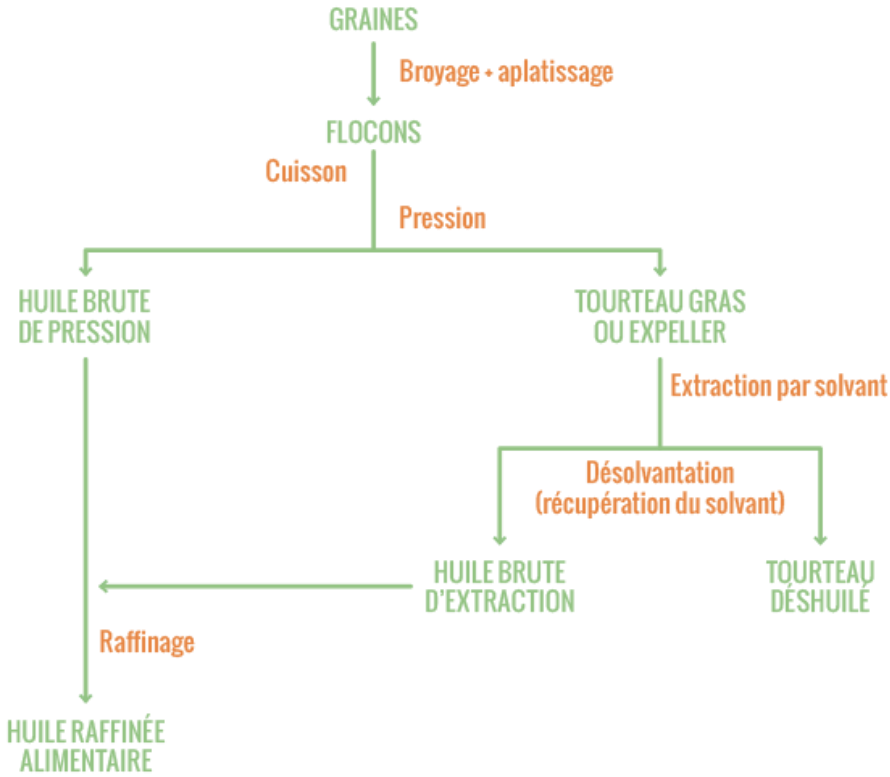
Structuration du projet en 2 axes comprenant plusieurs actions et sous actions :

AXE 1 : MODELES DE COOPERATION ET CONTRACTUALISATION ENTRE POLYCLTEURS & ELEVEURS	
CST Diagnostic	1.A. Identification de bassins de production et de bassins de consommation
	<p>1.A.1 Caractérisation des différents bassins et évaluation des besoins réciproques, des attendus des partenariats polyculteurs/éleveurs Où se trouvent les besoins et de quelle nature sont-ils (fourrages/protéines ?) Diagnostic macro à l'échelle Grand Est Diagnostic micro à l'échelle de petites régions naturelles</p> <p>1.A.2. Etude de cultures innovantes à introduire dans les rotations De quelles ressources peut-on espérer disposer et où les implanter ?</p>
CST Contractualiser	1.B. Etude à la mise en place de nouveaux contrats sur un ou deux territoires donnés
	1.B.1. Identification et étude de cas de contractualisations déjà existantes sur le territoire Bibliographie et état des lieux Projets existants Témoignages et descriptions de coopérations existantes
	1.B.2. Volet sociologique de l'action Analyse sociologique des motivations, freins et leviers Sur des contrats existants (Lien avec l'action 1.B.1) En accompagnement de la mise en place de nouvelles coopérations (Lien avec l'action 1.B.4)
	1.B.3. Volet systémique Analyse multicritère des coopérations mises en place
	1.B.4. Volet technique Méthodologie et outils opérationnels Mise en place de nouvelles coopérations
	COPIL - PEI ARPEEGE 5
AXE 2 : COMMENT CO-CONSTRUIRE UNE FILIERE SOJA NON OGM DANS LE GRAND EST ?	
CST Diag	2.A. Diagnostic territorial de filière, de la production végétale à l'alimentation animale, jusqu'au produit fini
	2.A.1. Enquête qualitative auprès des acteurs impliqués dans la filière Identification d'un contexte porteur dans le Grand Est pour du soja produit localement à destination de l'alimentation animale
	2.A.2 Evaluation du besoin en protéines (dont le soja) pour les exploitations d'élevage du Grand Est Etude des consommations en matières protéiques et niveau de dépendance des exploitations Simulation, Evolution des trajectoires
CST Valoriser	2.A.3. Etude de la valorisation économique de tourteaux de soja issus d'une production locale non OGM chez les fabricants d'aliments
	2.B. Volet Cultiver
	2.B.1. Faisabilité et potentialités de la culture du soja en Grand Est 2.B.2. Optimisation de la culture 2.B.3. Etude des flux logistiques
CST Cultiver	2.C. Volet Transformer
	2.D. Volet Valoriser
	2.D.1. Synthèse bibliographique 2.D.2. Volet expérimental 2.D.3. Suivi technico-économique de troupeaux consommateurs de sources protéiques alternatives 2.D.4. Quels sont les impacts sur les systèmes d'élevage bovin provoqués par la recherche d'autonomie alimentaire 2.D.5. Homogénéisation des recommandations et diffusion
	COPIL - PEI ARPEEGE

Annexe 2 : Estimation des surfaces susceptibles de recevoir du soja dans la rotation par département et par catégorie de faisabilité (Baillet, 2022).

Territoire	Surface favorable	Surface possible	Surface aléatoire	Surface déconseillé
Ardennes	60 859	7 166	379	138 644
Aube	494	47 283	121 316	210 272
Marne	26 104	135 779	42 728	351 751
Haute-Marne	33 358	68 526	106 280	15 707
Meurthe-et-Moselle	13 724	72 080	103 186	23 410
Meuse	26 154	109 171	121 883	1 371
Moselle	872	57 773	119 784	60 907
Vosges	18 333	74 048	27 021	0
Bas-Rhin	96 139	60 921	29 751	0
Haut-Rhin	77 929	41 557	8 169	4 260
Grand Est	353 967	674 304	680 497	806 322

Annexe 3 : Schéma du procédé de trituration appliqué aux graines oléo-protéagineuses (Terres Univia, s.d. (2))



Annexe 4 : Grilles de notation utilisées pour les mesures de Note d'Etat Corporel (NEC)

Grille de Notation Etat Corporel (NEC) de l'Institut de l'Elevage

Note arrière

note	0	1	2	3	4	5
	Très malade ou famélique	« très concave »	« concave »		« convexe »	Au maximum du gras
Fosse caudale	4 doigts + très profonde, très divisé	4 doigts Se divise en deux creux	« 2 à 3 doigts »	« 1 à 2 doigts »	« 1 doigt »	0 doigt
Pointe des fesses	Peau + os	Os bien net	triangle	Vague triangle	cercle	Noyé, sans contours
Vertèbres de la queue	Parfaitement dessinées	Bien visibles	On peut les compter	On ne les compte pas	bourrelets	Larges bourrelets
Peau au toucher sur os	Peau collée	Peau presque collée	Ne colle pas	Petite couche de gras	Couche de gras	Bonne couche de gras

Note avant

note	0	1	2	3	4	5
Profil-type	Très malade, famélique	« très concave »	« concave »	« Ni concave, ni convexe »	« convexe »	« maximum du gras »
Liaison colonne - hanche	Très très creux	Très creux	creux	Légèrement creux	droite	bombé
Pointe de hanches	Peau + os	Angles très nets	Angles nets	Angles flous	Angles arrondis	Très arrondis
Apophyses transverses	Dessin de l'os net, visible	creusées à plus de 1/2	creusées à 1/4	Non visibles	non visibles courbe arrondie	invisibles, creux du flanc comblé
Peau au toucher	Collée à l'os	Peau presque collée	Ne colle pas	Petite couche de gras	Couche de gras	Bonne couche de gras

Annexe 5 : Statistiques descriptives des variables mesurées dans l'essai

	Variable	Unité	N	Minimum	Moyenne	Médiane	Maximum	Ecart-type
Lot 1	Lait brut	Kg/VL/j	25	9,6	21,8	19,9	40,0	7,1
Lot 2			25	12,1	22,0	21,3	37,2	6,3
Lot 1	Taux protéique	g/kg	25	30,3	36,0	35,2	44,2	3,3
Lot 2			25	30,0	36,1	35,7	45,5	4,0
Lot 1	Taux butyreux	g/kg	25	34,7	48,4	46,9	63,6	9,0
Lot 2			25	33,1	48,5	45,8	65,9	9,0
Lot 1	Matière protéique	g/VL/j	25	427	770	733	1328	214
Lot 2			25	512	776	753	1154	170
Lot 1	Matière grasse	g/VL/j	25	564	1011	1037	1382	218
Lot 2			25	682	1032	1038	1639	234
Lot 1	Taux de leucocytes (en log10)	milliers/mL	25	1,4	2,1	2,0	3,5	0,5
Lot 2			25	1,2	1,9	2,0	2,6	0,4
Lot 1	Taux d'urée	mg/L	25	103	166	159	248	32
Lot 2			25	135	175	167	247	29
Lot 1	NEC début	/	25	1,0	2,3	2,1	3,2	0,5
Lot 2			25	1,7	2,5	2,4	3,5	0,4
Lot 1	NEC fin	/	25	1,5	2,5	2,3	3,4	0,6
Lot 2			25	1,7	2,5	2,6	3,8	0,5

Annexe 6 : Détail des produits et charges constatés sur l'année 2021 sur l'exploitation du lycée agricole de Rethel

PRODUITS	CHARGES OPERATIONNELLES
<p>Lait : 208 140 € 531 558 L à 389€/1000 L (laiterie UCANEL) 2510 L à 630 €/1000 L (cantine du lycée)</p>	<p>Elevage : 123 770 € Aliments : 82 200 € <i>Dont aliments VL : 60 460 € (698€/VL)</i> <i>Aliments autres bovins : 12 595 € (340€/UGB)</i> <i>Aliments ovins : 8 040 € (61€/brebis)</i> Achat paille : 1 100 €</p>
<p>Viande : 63 660 € Atelier lait : 30 200 € <i>Dont réformes : 14 610 € (915€/tête)</i> <i>Dont veaux : 3 355 € (120€/tête)</i> <i>Dont génisses et jeunes bovins : 12 235 (645€/tête)</i></p> <p>Atelier ovin : 29 380 € <i>Dont agneaux : 26 970 € (132€/tête)</i> <i>Dont réformes : 2 410€ (70€/tête)</i></p> <p>Vente de viande en direct : 4 085 €</p>	<p>Contrôle laitier : 6 110 € (70€/VL)</p> <p>Insémination : 11 790 € (135€/VL)</p> <p>Vétérinaire : 8 130 € (57€/UGB)</p> <p>Divers élevage : 15 540 € (108€/UGB) (parage, tonte, hygiène de traite, asséchant...)</p>
<p>Cultures : 79 390 € Blé : 251T à 210€/T = 52 720 € Bett. sucrières : 691T à 28,6€/T = 19 770 € Orge : 14T à 230€/T = 3 220 € Miscanthus : 41,9 T à 80€/T = 3 350 € Luzerne : 3,7 T à 90 € T = 330 €</p>	<p>Cultures : 38 385 € Blé : 445€/ha → 13 490 € Bett. sucrières : 937€/ha → 7 585 € Orge : 400€/ha → 3 000 € Maïs ensilage : 686€/ha → 6 995 € Bett. fourragères : 929€/ha → 1 860 € Prairies permanentes : 16€/ha → 720 € Prairies temporaires : 117€/ha → 3 985 € Luzerne : 250€/ha → 750 € Miscanthus : 0€</p>
<p>Aides PAC : 45 385 €</p>	<p>Taxes sur produits d'exploitation : 1745 €</p>
<p>TOTAL : 396 575 €</p>	<p>TOTAL : 163 900 €</p>
	CHARGES DE STRUCTURE
	<p>Main d'œuvre : 122 450 €</p>
	<p>Mécanisation : 82 085 €</p>
	<p>Frais généraux : 29 100 € Assurances : 8 520 € Eau : 7 260 € Electricité : 4 685 € Autres : 8 635 €</p>
	<p>Entretien bâtiment : 2 150 €</p>
	<p>Fermage : 3 370 €</p>
	<p>TOTAL : 239 155 €</p>

Annexe 7 : Détail des calculs d'optimisation de la situation initiale

Annexe 7.1. : Calcul du niveau de valorisation de l'herbe selon la méthode DECELAIT

Besoins fourragers			
Catégorie animale	Effectifs moyens annuels	Besoins annuels en T de MS/animal	TOTAL
Vaches laitières	87	5,3	461 T de MS
Génisses laitières			120 T de MS
- 0 à 6 mois	8,5	0,35	
- 6 à 12 mois	8,5	0,9	
- 12 à 24 mois	25	2,97	
- + de 24 mois	16	2,2	
Mâles laitiers	3	3	9 T de MS
Brebis	131	0,430	56 T de MS
TOTAL			646 T de MS
Production de fourrages			
Fourrage	Surface (ha)	Rendement (T de MS/ha)	TOTAL
Maïs ensilage	10,2	14	143 T de MS
Betteraves	2	16,4	33 T de MS
TOTAL			176 T de MS
Achats de fourrages			
Fourrage			Quantité
Pulpes de betteraves			41 T de MS
TOTAL			41 T de MS
Niveau de valorisation de l'herbe			
<p>Besoins – Production et achats d'autres fourrages = $646 - 176 - 41 = 430$ T de MS d'herbe valorisées chaque année</p> <p>$430 / 77,8$ ha de surfaces en herbe = 5,5 T de MS/ha</p>			
Potentiel de valorisation de l'herbe			
Selon le potentiel de la petite zone agricole et le niveau de fertilisation, références DECELAIT			
Type de prairie	Surface (ha)	Rendement potentiel (T de MS/ha)	TOTAL
Permanente	43,8	5,5	241 T de MS
Temporaire	34	6,5	221 T de MS
TOTAL			462 T de MS
Surplus			32 T de MS

Annexe 7.2. : Ajustement des montants de charges par cultures constatés sur l'exploitation


Situation initiale				
Culture	Engrais	Semences	Traitements	Total
Blé	187 €/ha	129 €/ha	104€/ha	420 €/ha
Betteraves	349 €/ha	252 – 260 €/ha	278€/ha	879 – 887€/ha
Orge d'hiver	183 €/ha	57€/ha	135€/ha	375 €/ha
Maïs ensilage	322 €/ha	206€/ha	108 €/ha	636€/ha
Fourchette de références Chambre d'Agriculture des Ardennes				
Culture	Engrais	Semences	Traitements	Total
Blé	148 à 182€/ha	80 €/ha	115 à 130€/ha	343 – 392€/ha
Betteraves	220 - 256 €/ha	252 – 276 €/ha	206 - 359 €/ha	678 – 891 €/ha
Orge d'hiver	136€/ha	80€/ha	115 – 130€/ha	330 – 346 €/ha
Maïs ensilage	215 - 279 €/ha	199€/ha	57€/ha	462 – 535 €/ha
Situation optimisée (sans amendements activateurs de sol)				
Culture	Engrais	Semences	Traitements	Total
Blé	140€/ha	129 €/ha	104€/ha	373€/ha
Betteraves	244€/ha	252 – 260 €/ha	278€/ha	774 – 782€/ha
Orge d'hiver	136€/ha	57€/ha	135€/ha	328€/ha
Maïs ensilage	265€/ha	206€/ha	108 €/ha	579€/ha

Annexe 8 : Charges opérationnelles du soja prises en compte dans la simulation

Charge	Montant	Source des données
Engrais	50,4€/ha	40 U de chaque, référence pour objectif de rendement de 25qtx/ha, prix de l'unité de 0,73€ pour P et 0,53€ pour K (charges lycée de Rethel)
Dont Phosphore (P)	29,2€/ha	
Dont Potassium (K)	21,2€/ha	
Semences	114€/ha	80% de semences de ferme (80€/ha si graines à 600€/T) 20% de semences certifiées (250€/ha) 700 000 grains/ha, PMG de 190g
Inoculation	40€/ha	Prix moyen inoculation d'après Terres Inovia
Traitements	130€/ha	Prix moyen d'une stratégie herbicide complète d'après Vivescia et Terres Inovia
Assurance	25€/ha	Prix moyen assurance cultures lycée de Rethel
Interculture	25€/ha	Prix semence CIPAN avoine de printemps selon Arvalis
TOTAL : 384 €/ha		

Annexe 9 : Sorties RUMIN'AL permettant de calculer la quantité de tourteau de colza substituée par le soja

	Ration sans soja	Ration avec soja
Ensilage de maïs (kg MS)	9,9	9,9
Ensilage d'herbe (kg MS)	4	4
Betteraves fourragères (kg MS)	2,4	2,4
Tourteau de colza (kg MS)	4,1	2,8
Soja cru (kg MS)	0	1,7
VL 23 (kg MS)	1	1
Minéral (kg MS)	0,2	0,2
Urée (kg MS)	0,02	0,02
PDI (g/j)	1939	1937

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agronomie Spécialisation / option : Sciences et Ingénierie en Productions Animales Enseignant référent : Anne-Lise Jacquot
Auteur(s) : Margot Duval Date de naissance : 23/04/1998	Organisme d'accueil : IDELE Adresse : 9 rue de la Vologne, 54520 Laxou
Nb pages : 60 Annexe(s) : 9	Maîtres de stage : Alice Berchoux et Mathilde Jouffroy
Année de soutenance : 2022	
Titre français : Evaluation technique, économique et environnementale de l'introduction de soja dans un système de polyculture-élevage pour améliorer l'autonomie protéique	
Titre anglais : Technical, economic and environmental assessment of the introduction of soybean in a mixed crop-livestock system to improve protein autonomy	
Résumé (1600 caractères maximum) :	
<p>La production de soja est un levier pour accroître l'autonomie protéique des élevages. Le toastage des graines de protéagineux améliore leurs valeurs alimentaires, il est donc recommandé avant de les distribuer aux ruminants. L'intérêt de ce traitement thermique pour l'amélioration des performances des vaches laitières (VL) est cependant remis en question. Les objectifs de l'étude sont de définir sous quelle forme introduire les graines de soja dans la ration des VL et d'évaluer les conséquences de l'autoconsommation de soja sur la durabilité d'une exploitation de polyculture-élevage. Dans ce cadre, une expérimentation comparant les performances de deux lots de 27 VL alimentés avec des graines de soja crues ou toastées a été mise en place sur le troupeau du lycée agricole de Rethel (08). Un nouveau système d'exploitation produisant du soja a ensuite été modélisé sur cette ferme. Ses répercussions sur l'Excédent Brut d'Exploitation (EBE) et l'empreinte carbone de l'exploitation ont été évaluées. Le toastage n'a pas permis d'améliorer les performances des VL (quantité de lait et taux de matière utile), son intérêt technico-économique n'a donc pas été démontré dans cet essai. La simulation d'autoproduction de soja conduit à une perte d'EBE située entre -2 970 et -16 505 € et l'empreinte carbone de l'atelier laitier est diminuée de 2 à 6 % selon les hypothèses d'évolution de performances laitières retenues. La recherche d'autonomie par les concentrés conduit à des pertes économiques et à une légère amélioration des performances environnementales. Elle ne semble donc pas pertinente dans le contexte de prix des intrants et des céréales de l'année étudiée.</p>	
Abstract (1600 caractères maximum) :	
<p>Soybean production is a lever to increase the protein autonomy of farms. Toasting of soybeans improves their feeding value and is therefore recommended before they are distributed to ruminants. However, the interest of this heat treatment for improving dairy cows' performance is questioned. The objectives of the study are to define the form in which soybeans should be introduced in the ration of dairy cows and to evaluate the consequences of soybean self-consumption on the sustainability of a mixed crop-livestock farm. Within this context, an experiment comparing the performances of two groups of 27 dairy cows fed with raw or toasted soybeans was set up on the herd of the agricultural college of Rethel (08). A new operating system producing soybeans was then modeled on this farm. Its impact on the Gross Operating Surplus (GOS) and the carbon footprint of the farm were estimated. Toasting did not improve the performance of the cows (quantity of milk and rate of useful matter), so its technical and economic interest was not demonstrated in this trial. The simulation of self-production of soybeans leads to a loss of GOS between -2 970 and -16 505 €. The carbon footprint of the farm is reduced by 2 to 6 %. The search for autonomy through concentrates leads to economic losses and little improvement in environmental performance. It does not seem relevant in the context of input and cereal prices of the year studied.</p>	
Mots-clés : Autonomie protéique, graines de soja, toastage, vaches laitières Key-words : Protein autonomy, soybean, toasting, dairy cows	