



HAL
open science

Analyses de la performance agronomique des systèmes de culture innovants

Romario Aronson Clifford Jacques, Guillaume Vitte, Fabien Ferchaud

► **To cite this version:**

Romario Aronson Clifford Jacques, Guillaume Vitte, Fabien Ferchaud. Analyses de la performance agronomique des systèmes de culture innovants. Biologie végétale. 2022. hal-04607119

HAL Id: hal-04607119

<https://hal.inrae.fr/hal-04607119>

Submitted on 10 Jun 2024

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

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

2021-2022

MASTER AETPF
Agrosciences, Environnement, Territoire, Paysage, Forêt

Parcours
Ecosystèmes Agricoles et Forestiers (ECOSAFE)

Analyses de la performance agronomique des systèmes de culture
innovants



Romario Aronson Clifford **JACQUES**

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 29/08/2022

Encadrant UMRT INRAE BioEcoAgro : Guillaume **VITTE**, Ingénieur d'études

Encadrant UMRT INRAE BioEcoAgro : Fabien **FERCHAUD**, Ingénieur de recherche

Tutrice de stage : Alice **MICHELOT-ANTALIK**, Maître de conférences Université de
Lorraine

INRAE, UMR Transfrontalière BioEcoAgro (1158) Hauts-de-France – Equipe AgroImpact, 2
Chaussée-Brunehaut 80200 Estrées-Mons

Remerciements

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mes encadreurs sans qui je n'aurais jamais atteint les objectifs assignés à ce travail. J'exprime toute ma reconnaissance à Guillaume VITTE et Fabien FERCHAUD qui ont suivi l'ensemble de ce travail avec un grand intérêt. Il se sont rendus disponibles, malgré leur emploi du temps souvent très chargé, pour lire et relire mes écrits. J'ai beaucoup apprécié la rigueur et la clarté de leur raisonnement scientifique. Aussi, voudrais-je leur exprimer, ici, mes sentiments respectueux et reconnaissants.

Ma gratitude particulière au projet System-Eco+ (DEPHY EXPE ECOPHYTO II) qui a financé mon stage et à tous les membres de l'Unité de Recherche Transfrontalière BioEcoAgro pour leur convivialité et leur professionnalisme. J'associe à ces remerciements toute son équipe de terrain, particulièrement : Eric GREHAN, Frédéric MAHU et Nicolas COLLANGES qui m'ont accompagné durant toutes les activités de terrain.

J'ajoute une mention spéciale pour mes collègues et amis de bureau : Solenne VOLANT, Adrien SONNET et Célestin VALENTIN pour la collaboration et l'esprit de support qu'ils ont manifestés à mon égard pendant toute la durée de mon stage.

Je n'aurais pas pu mener à bien ce travail sans les conseils et le soutien de ma famille et de mes proches. Ma reconnaissance va donc à mes parents Marie Maguina SEMERVIL JACQUES et Luc Flavien JACQUES, mes frères et sœurs, ma tante Marie Jude SEMERVIL et mon oncle Kénel LOUIS, mes amis Fritzner PIERRE-LOUIS, Ocma JEAN-BAPTISTE et Chelton DESARMES et tous mes proches qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont soutenu tout au long de cette expérience.

Table des matières

Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des annexes	
Liste des sigles et abréviations	
I. Introduction	1
1.1. Hypothèses	2
1.2. Objectifs	2
II. Etat de l’art	2
2.1. La notion de Yield Gap	2
2.1.1. Facteurs limitant le rendement en systèmes de grandes cultures sans élevage	3
2.2. Gestion de l’azote dans les systèmes conventionnels.....	3
2.3. Gestion de l’azote dans les systèmes bas intrants et en Agriculture biologique.....	4
2.3.1. Stratégie de fertilisation azotée	4
2.3.2. Stratégies de limitation des pertes azotées	4
2.4. Gestion des adventices.....	4
III. Matériels et méthodes	5
3.1. Le dispositif expérimental	5
3.1.1. Présentation générale.....	5
3.1.2. Modalités expérimentales.....	6
3.1.3. Successions culturales	7
3.1.4. Itinéraires techniques.....	7
3.2. Mesures réalisées sur les plantes	8
3.2.1. Prélèvements de plantes	8
3.2.2. Traitement au laboratoire des échantillons de plantes.....	8
3.2. Mesure des reliquats d’azote	9
3.3. Base de données	9
3.4. Analyse des données	9
3.4.1. Calculs réalisés	10
3.4.2. Analyses statistiques.....	11
IV. Résultats	11
4.1. Rendement en grain, biomasse à la récolte, indice de récolte et indice de rendement	11
4.2. Composantes du rendement.....	13

4.2.1. Le poids de mille grains (PMG).....	14
4.2.2. Nombre de grains par m ²	14
4.3. Indicateurs de stress azoté et biotique	14
4.3.1. Indice de nutrition azoté (INN)	14
4.3.2. Biomasse d'adventices	14
4.4. Indicateur de disponibilité en azote : reliquats azotés	15
4.5. Relations entre les indicateurs de stress et le rendement en grain.....	16
4.5.1. Relation entre INN et rendement grain.....	16
4.5.2. Relation entre biomasse d'adventices et rendements	16
4.5.3. Relation entre « RSH + Ferti N » et rendements.....	17
4.5.4. Relation entre les reliquats et les rendements.....	17
4.5.2. Effet d'un précédent légumineuse sur le rendement et les reliquats.....	18
V. Discussion	18
5.1. Rappel des hypothèses.....	18
5.2. Des effets importants de la fertilisation et des reliquats azotés sur les rendements des cultures	18
5.3. Des effets des légumineuses (cultures principales et cultures intermédiaires) sur les rendements des cultures	19
5.4. Un faible effet des adventices sur les rendements des cultures	20
5.5. Des effets d'autres facteurs	20
VI. Conclusion et perspectives	21
Bibliographie	22
Résumé	26
Annexes	27

Liste des figures

Figure 1 : Plan du dispositif SOERE ACBB	5
Figure 2 : Biomasse d'adventices à la floraison de 2019 à 2021	15
Figure 3 : Stock d'azote minéral par traitement de 2011 à 2021	15
Figure 4 : Relation entre INN à la floraison et rendement grain	16
Figure 5 : Relation entre biomasse d'adventices et les rendements grains.....	17
Figure 6 : Relation entre « RSH + Ferti N » et les rendements grains	17
Figure 7 : Effet d'un précédent légumineuse sur le rendement et les reliquats	18

Liste des tableaux

Tableau 1 : Traitements expérimentaux du SOERE ACBB.....	6
Tableau 2 : Fertilisation annuelle par traitement (kg N ha ⁻¹)	7
Tableau 3 : Biomasse de grains, biomasse aérienne à la récolte et indice de récolte des cultures annuelles de 2010 à 2021 pour les différents traitements	12

Liste des annexes

Annexe 1 : Succession culturale sur le SOERE ACBB de 2010 à 2021	28
Annexe 2 : Protocole de traitement des échantillons (stade LAI)	29
Annexe 3 : PMG et nombre de grains par m ² par campagne et par traitement	30
Annexe 4 : Indice de Nutrition Azotée par traitement et par campagne.....	31
Annexe 5 : Biomasse d'adventices par campagne et par traitement.....	32
Annexe 6 : Reliquats sortie d'hiver mesurés par année.....	32
Annexe 7 :Matrice de corrélation par campagne	34
Annexe 8 : Relation entre « RSH + Ferti » et biomasse aérienne.....	36
Annexe 9 : Biomasse d'adventices mesurée avant semis en 2017.....	36

Liste des sigles et abréviations

CEMAGREF : Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts

COMIFER : Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

épi : épis

ESCo : Expertise Scientifique Collective

fs : feuilles sénescentes

fv : feuilles vertes

g : grains

GES : Gaz à Effet de Serre

GIS : Groupe d'Intérêt Scientifique

ICOS : Integrated Carbon Observation System

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires

INN : indice de nutrition azotée

IR : Indice de Récolte

LDAR : Laboratoire Départemental Analyses et de Recherches

N% : teneur en azote mesurée

N_g : nombre de grains par mètre carré

N_c : teneur en azote critique

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

ODBC : Open Database Connectivity

p : pailles

pa : partie aérienne

PMG : Poids de Mille Grains

ps : parties souterraines

psg : protections et supports des grains

q ha⁻¹ : quintal par hectare

RMT Florad : Réseau Mixte Technologique - FLORe Adventice

RSH + Ferti N : somme des valeurs des stock (RSH) et des apports de fertilisation azotée

RSH: Reliquat sortie d'hiver

SDES : Service des données et études statistiques

SI : Système d'Information

SOERE ACBB : Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la
Recherche en Environnement - Agro-écosystème, Cycle Bio-géochimique et
Biodiversité

SQL : Structured Query Language

t MS ha⁻¹ : tonne de matière sèche par hectare

T : Traitement

t: tiges

UMRT : Unité Mixte de Recherche Transfrontalière

USRAVE : Unité de Service et de Recherche en Analyses Végétales et Environnementales

Y_g : biomasse de grains

Y_{pa} : biomasse aérienne

I. Introduction

Au XXème siècle, l'évolution de l'agriculture vers des systèmes plus spécialisés, l'essor de la mécanisation, de l'innovation variétale et plus particulièrement le recours aux intrants de synthèse (engrais et pesticides) ont permis une augmentation de la productivité qui a permis de satisfaire les besoins alimentaires d'une population croissante. Cette intensification de l'agriculture a eu pour conséquence d'augmenter la productivité, et à contrario une simplification et une homogénéisation des systèmes de production (Tilman et al, 2002). Ce modèle d'agriculture conduit aussi à des externalités négatives sur l'environnement à travers la pollution des sols, de l'eau et de l'air, l'émission de gaz à effet de serre et le déclin de la biodiversité (OCDE, 2019). Par ailleurs, au cours de son essor, les productions agricoles ont été confrontées à de nombreux problèmes économiques, sociaux et éthiques (Ghali, 2014). Toutefois, l'agriculture doit continuer à jouer son rôle qui est de nourrir la population mondiale et cela, dans un contexte de réchauffement climatique et de croissance démographique. Pour faire face à ces enjeux nombreux et complexes (nourrir une population croissante, être compétitive et générer des emplois, réduire sa dépendance des intrants et de l'énergie fossile, maîtriser ses impacts sur l'environnement, assurer l'autonomie des exploitations, s'adapter aux changements climatiques, etc.), il est indispensable pour l'agriculture d'innover, c'est-à-dire d'introduire de nouvelles technologies ou de nouvelles cultures ou de trouver de nouvelles manières de combiner les techniques et les cultures existantes (Meynard, 2012). L'agriculture doit donc opérer une mutation, axée sur l'utilisation des nouvelles technologies et pratiques fondées sur une agronomie et une écologie scientifique où les agriculteurs occupent une place centrale dans la gestion de la production et des écosystèmes (Ghali, 2014).

En systèmes de grandes cultures où les pratiques restent globalement intensives, ce changement de paradigme est une nécessité. Un moyen d'y parvenir serait de réduire les intrants chimiques (engrais et pesticides) appliqués à ces systèmes de cultures car, d'une part, ils représentent des charges importantes pour les exploitations agricoles (70 % des charges d'approvisionnement pour les exploitations Françaises spécialisées en production de céréales, oléagineux et protéagineux) (SDES, 2018) et, d'autre part, des sources de pollution pour l'environnement. Les pesticides sont en effet des liés à des phénomènes de toxicité tandis que les engrais sont plutôt concernés par des phénomènes de pollution. Toutefois, selon une Expertise Scientifique Collective (ESCo) publiée en décembre 2005 par les chercheurs de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et du Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts (CEMAGREF), il est possible de développer des systèmes de culture présentant des performances agronomiques satisfaisantes malgré une forte réduction des traitements chimiques (Butault et al., 2010). En effet, développée depuis quelques années, la conception de systèmes de culture innovants est une démarche qui utilise les connaissances de multiples acteurs pour reconcevoir des systèmes plus économes en produits phytosanitaires (Puech et., 2019).

Ces systèmes de cultures, reposant sur l'usage de pratiques agricoles alternatives à l'utilisation de produits phytosanitaires (ibid) et d'engrais chimiques semblent donc pouvoir aider à la convergence vers des systèmes alimentaires durables et compatibles avec les objectifs fixés pour le climat d'ici la fin du siècle. C'est un des objectifs du SOERE ACBB (Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement - Agro-écosystème, Cycle Bio-géochimique et Biodiversité), qui compare un gradient de systèmes de culture et cherche à comprendre les interactions (synergie ou opposition) qui concourent à l'élaboration des productions agricoles. On se demande en effet : quelles sont les

performances agronomiques effectives de ces systèmes ? Quels sont les facteurs limitants pour leur productivité ?

Rakotovololona (2018) précise que l'alimentation en phosphore, potasse et magnésium est connue pour être satisfaisante dans les Hauts-de-France, car les sols en sont encore bien pourvus grâce à leur passé d'agriculture intensive. Cependant, Ronceux *et al.* (*in press*) estiment que la déficience en azote et l'infestation des adventices sont considérées comme les principaux facteurs limitants en agriculture biologique (AB) (*ibid.*).

Les déficits de rendements liés aux adventices peuvent être particulièrement importants si aucune action n'est menée pour leur gestion. Sur le blé, les pertes mondiales liées aux adventices varient de 7.7% à 23% (Oerke, 2006). En France, la perte de rendements sur les parcelles non traitées est estimée à 26 q ha⁻¹ pour le blé, 3.5q ha⁻¹ pour le colza et 4.1 q ha⁻¹ pour le tournesol (Cordeau *et al.* 2016).

C'est dans cette perspective que nous réalisons notre stage, sur le SOERE ACBB, financé dans le cadre du projet System-Eco+ (DEPHY EXPE ECOPHYTO II), au sein de l'Unité Mixte de Recherche Transfrontalière (UMRT) 1158 BioEcoAgro à INRAE Hauts-de-France. Dans ce projet, il a été proposé d'étudier des systèmes de culture qui ont pour objectifs de réduire conjointement les pesticides et les engrais azotés de synthèse, ce sont les systèmes conduits en agriculture biologique (T7 et T8) ; et des systèmes intermédiaires dit à bas intrants (T4 et T5).

Le SOERE ACBB est un dispositif de longue durée, prévu pour au moins 20 ans. Implanté depuis 2010 sur une surface de 22 ha, il s'intéresse à l'évaluation des impacts environnementaux des agro-écosystèmes. Il étudie plus particulièrement l'évolution des systèmes de grandes cultures et l'introduction de cultures pour fournir de la biomasse énergétique. Le but est de prendre en compte les impacts de différentes pratiques culturales sur la dynamique des cycles biogéochimiques et les conséquences sur l'eau, l'air et la biodiversité et, *in fine*, évaluer leurs impacts sur l'environnement (INRAE, 2021).

1.1. Hypothèses

Dans le cadre de ce travail, nous cherchons à tester les hypothèses suivantes :

- i) Les écarts entre les rendements en AB, bas intrants et conventionnels sont majoritairement dus aux facteurs azote (H1) et bio-agresseurs (principalement les adventices) (H1')
- ii) De tous les traitements, ceux en AB présentent les plus faibles rendements (H2)
 $T1=T2=T3=T6>T5=T4>T8>T7$

1.2. Objectifs

Au cours de ce stage, nous allons essayer d'identifier et d'interpréter les effets des systèmes de culture innovants sur le rendement des cultures et d'analyser l'influence des facteurs biotiques et abiotiques et de leurs interactions sur les déficits de rendement (yield gap). En d'autres termes, le travail consistera à :

- Calculer chaque année les rendements sur différents traitements ;
- Quantifier les écarts de rendements entre les traitements ;
- Identifier les facteurs pouvant expliquer ces écarts de rendement ;

II. Etat de l'art

2.1. La notion de Yield Gap

La Yield Gap Analysis consiste à estimer le rendement potentiel de la culture, mesurer les rendements réels, puis calculer l'écart entre ces deux rendements, ou Yield Gap. L'analyse

consiste ensuite à expliquer les causes de cet écart de rendement en identifiant les facteurs responsables.

Le rendement potentiel est le niveau maximum de production permis par la génétique, si le rendement est uniquement contraint par les « growth defining factors » (CO₂, rayonnement, température, génétique) (Van Ittersum et Rabbinge, 1997). Le rendement potentiel peut être connu via l'expérimentation, la statistique ou la modélisation (Lobell et al, 2009). Les facteurs explicatifs du Yield Gap sont relatifs à la plante, au sol, ou à l'itinéraire technique. On peut discerner deux types de facteurs : les facteurs limitant la croissance (l'eau et les nutriments) et les facteurs réduisant la croissance (les ravageurs, les adventices, les maladies et les polluants).

Dans notre travail, nous ne sommes pas sur une démarche complète de Yield Gap Analysis car nous n'avons pas un rendement potentiel. En revanche le rendement du traitement T1 peut constituer une référence pour le dispositif SOERE ACBB, dans la mesure où il utilise la même culture, la même variété, qu'il est semé à la même date, il reçoit une fertilisation et une protection phytosanitaire de référence par rapport aux autres traitements du système. Dans une certaine mesure, une moyenne des traitements T1, T2 et T3 peut constituer la référence, si on fait l'hypothèse que le travail du sol et la gestion des résidus de culture n'influencent pas le rendement des cultures). Ainsi, nous pourrions étudier les écarts aux systèmes bas intrants et AB (T4, T5, T7 et T8), à ces références.

2.1.1. Facteurs limitant le rendement en systèmes de grandes cultures sans élevage

Les systèmes de grandes cultures bas intrants font face à plusieurs facteurs limitants qui diminuent leurs rendements [...] (Amossé, 2013). En grandes cultures biologiques, le premier facteur limitant majeur est le déficit en azote assimilable par les plantes. Le second est la concurrence des adventices. En effet, ces dernières entrent en compétition avec les cultures de vente pour l'eau, la lumière et les nutriments limitant ainsi leur développement et leurs performances en termes de rendements (ibid). Face à une infestation importante, et en l'absence de produits phytosanitaires, les producteurs ont recours au désherbage mécanique. Néanmoins, une grande fréquence de ces désherbages mécaniques peut entraîner une perte de pieds de la culture et renforcer la compaction du sol, un autre facteur limitant de la production céréalière (ibid).

2.2. Gestion de l'azote dans les systèmes conventionnels

La gestion des engrais azotés est un enjeu majeur de l'activité agricole, à la fois sur le plan économique et sur le plan environnemental (Ravier, 2017). Ainsi, en systèmes de grandes cultures conventionnelles, la fertilisation azotée est raisonnée par la méthode du bilan prévisionnel dit « COMIFER ».

Cette méthode consiste à déterminer la dose d'engrais nécessaire et suffisante pour atteindre les objectifs de production fixés. Elle établit une comparaison entre les besoins de la culture en azote minéral et les différents flux qui alimentent le stock d'azote minéral dans le sol pendant la période de croissance de la culture (Anglade, 2015). Elle se base sur le principe selon lequel l'état final d'un système correspond à son état initial (quantité d'azote à l'ouverture du bilan) additionné de ce qui est entré (engrais, minéralisation nette de l'humus du sol, produits résiduels organiques, minéralisation nette de résidus de récolte, Minéralisation nette de résidus de culture intermédiaire, apports atmosphériques, ...) et soustrait de ce qui est sorti (azote absorbé par la culture à l'ouverture et à la fermeture du bilan, pertes d'azote par lixiviation, volatilisation / dénitrification...) (COMIFER, 2013). Le bilan se définit donc sur une période donnée, avec une date d'ouverture et une date de fermeture. La mesure du reliquat azoté (ou reliquat sortie hiver) permet de quantifier l'azote minéral à l'ouverture du bilan. Il

s'agit du seul poste mesuré, tous les autres postes étant estimés ou calculés à l'aide de tables de référence ou de modèles (ibid) dont l'outil AzoFert.

2.3. Gestion de l'azote dans les systèmes bas intrants et en Agriculture biologique

L'alimentation en phosphore, potasse et magnésie n'étant pas un facteur limitant pour les cultures dans les Hauts-de-France (Rakotovololona, 2013), l'objectif de la fertilisation en AB et dans les systèmes bas intrants pratiqués dans cette région est de maintenir un bon niveau de fertilité azotée des sols en introduisant de l'azote dans le système et en minimisant les pertes aux différents moments du cycle (Agro-transfert, 2017).

2.3.1. Stratégie de fertilisation azotée

La fertilisation azotée des systèmes AB repose uniquement sur l'utilisation d'azote organique ou biologique par l'introduction de légumineuses. Les systèmes à bas intrants utilisent à la fois les principes de fertilisation des systèmes AB et l'utilisation d'engrais minéraux comme les systèmes conventionnels.

Selon Agro-transfert (2017), les stratégies utilisées pour introduire de l'azote organique et biologique comprennent :

- L'introduction de légumineuses en cultures principales pluriannuelles (luzerne, trèfles...) ou annuelles (pois, féverole...), et en interculture (trèfles, vesce...) pour favoriser la fixation de l'azote de l'air ;
- L'apport de produits organiques (compost, fumier, fientes, vinasses...) pour augmenter la teneur en matière organique du sol et donc le pool d'azote potentiellement minéralisable,
- La restitution des résidus de cultures et de cultures intermédiaires pour augmenter la teneur en matière organique du sol.

2.3.2. Stratégies de limitation des pertes azotées

Le même organisme précise que les stratégies de limitation des pertes reposent sur :

- L'enfouissement des engrais organiques (fumiers, fientes...) rapidement après épandage ou fertilisation localisée pour limiter les pertes par voie gazeuse.
- La gestion adaptée de l'interculture pour limiter les pertes par lixiviation durant l'hiver.

2.4. Gestion des adventices

Il existe aujourd'hui différentes stratégies de gestion des adventices des grandes cultures dans les systèmes bas intrants. Morison et al. (2008) distinguent les moyens agronomiques qui favorisent la compétition de la culture vis-à-vis des adventices (favoriser les variétés, les espèces étouffantes, mise en place d'associations d'espèces, association des modifications de date de semis et de date de fertilisation azotée) et les moyens qui consistent à perturber le cycle de vie des mauvaises herbes (mobiliser les effets des travaux du sol avant semis, le désherbage mécanique...). Au cours d'une série de rencontres réalisées en décembre 2015 par le GIS (Groupe d'Intérêt Scientifique) et le RMT Florad (Réseau Mixte Technologique - FLORe Adventice), Angevin et al. (2016) ont identifié un ensemble de stratégies se déclinant en 5 grandes voies pour 17 leviers. Il s'agit de :

- S'opposer au développement des plantes levées
- Occuper les niches pour ne pas laisser d'espace vacant
- Epuiser le stock et éviter sa réalimentation
- Diversifier les rotations pour réduire les plages favorables aux adventices ciblées
- Favoriser les pratiques visant à accroître l'efficacité du désherbage

III. Matériels et méthodes

3.1. Le dispositif expérimental

3.1.1. Présentation générale

L'étude a été menée sur le dispositif expérimental de long terme SOERE-ACBB-GC (Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement - Agro-écosystème, Cycle Bio-géochimique et Biodiversité – Grandes Cultures). Cette expérimentation a débuté en 2010, à Estrées-Mons (80), sur le Centre INRAE des Hauts-de-France (49.873 N, 3.032 E). Elle est gérée par l'Unité de Recherche Transfrontalière BioEcoAgro, en partenariat avec l'Unité Expérimentale Grandes Cultures Innovation Environnement (UE GCIE).

De 2010 à 2021, la température moyenne annuelle est de 11°C, la pluviométrie moyenne annuelle de 658 mm et l'évapotranspiration potentielle de 731 mm (INRAE, 2022). Les parcelles sont situées sur un sol limoneux profond (Haplic Luvisol d'après la classification FAO).

D'une superficie totale de 22 ha, le dispositif est divisé en 3 grandes parties (Figure 1). La partie principale (11 ha) est constituée de 24 parcelles d'environ 0,4 ha, où sont répartis 6 traitements (T1 à T6) aléatoirement distribués dans 4 blocs. La deuxième partie (8 ha) est composée de 2 grandes parcelles de 4 ha qui sont utilisées pour la mesure des flux d'eau et de dioxyde de carbone avec des tours à flux. On y retrouve uniquement les traitements T5 et T6. La troisième partie (3 ha), ajoutée au dispositif en 2016, est constituée de 6 parcelles d'environ 0.4 ha, réparties en 3 blocs. Elle a permis de créer 2 traitements supplémentaires (T7 et T8), qui sont gérés selon le cahier des charges de l'agriculture biologique afin d'évaluer des systèmes sans intrants chimiques.

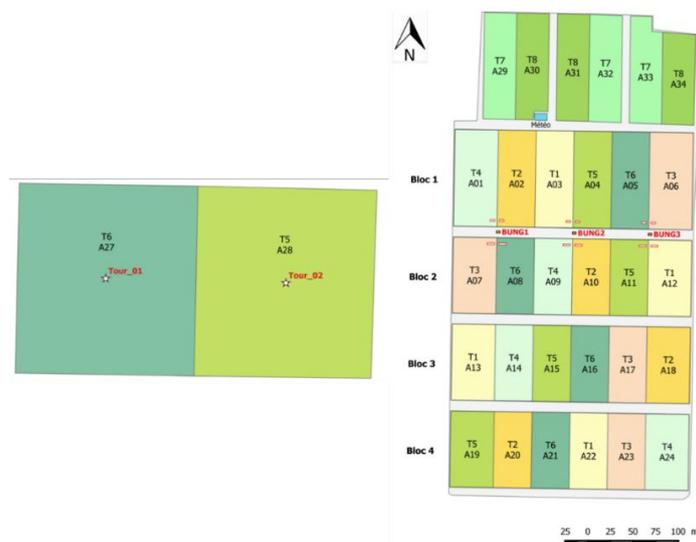


Figure 1 : Plan du dispositif SOERE ACBB

L'objectif de ce dispositif est d'évaluer l'impact à long terme de différentes pratiques culturales sur les principaux compartiments de la biosphère : les plantes, le sol, l'eau, l'air, la biodiversité du sol, etc. Il s'agit en particulier d'étudier l'impact de ces pratiques sur les cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote (dynamique des matières organiques du sol, flux de carbone (C) et d'azote (N), émissions de gaz à effet de serre (GES), etc.).

De nombreuses variables sont observées sur les cultures afin de caractériser au mieux les biomasses produites et d'évaluer les exportations et les restitutions de C et N. Ces variables seront détaillées par la suite puisque leur analyse est l'objet principal de ce rapport.

Les parcelles principales sont équipées d'un ensemble permanent de plus de 300 capteurs qui mesurent en continu l'humidité volumique et la température du sol jusqu'à 235 cm. Des échantillons d'eau du sol sont prélevés d'octobre à avril, à 45 et à 200 cm de profondeur, avec des bougies poreuses et des plaques lysimétriques, afin d'analyser leur teneur en éléments minéraux (nitrate, carbone organique dissous, etc.).

La teneur en azote minéral du sol est mesurée deux fois par an, en sortie d'hiver et après chaque récolte, sur une profondeur de 150 cm. Les stocks de carbone et d'azote organiques du sol sont également mesurés tous les 6 ans sur au moins 60 cm (masses volumiques du sol et teneurs).

Les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) sont mesurées de manière quasi-continue par des chambres automatiques effectuant 4 mesures par jour. Sur les deux grandes parcelles en T5 et T6, des tours à flux mesurent les émissions de CO₂ et de H₂O à l'échelle de la parcelle par Eddy covariance. L'une d'entre elles est labellisée station ICOS (Integrated Carbon Observation System) Associated Ecosystem depuis 2018.

Enfin, les échantillons de sol, de plante et d'eau sont stockés dans une échantillothèque qui permet de les conserver durablement.

3.1.2. Modalités expérimentales

La partie principale du dispositif (plus les deux grandes parcelles) compare six traitements expérimentaux (T1 à T6), caractérisés par la mise en œuvre de différentes pratiques culturales : travail du sol, gestion des résidus de culture, intensité de la fertilisation azotée, fréquence des légumineuses, insertion d'une culture pérenne et niveau de protection phytosanitaire (Tableau 1). La troisième partie du dispositif permet le suivi depuis 2016 de 2 traitements supplémentaires (T7 et T8) conduit sans intrants de synthèse (Tableau 1).

Les combinaisons de facteurs définissent huit systèmes de cultures cohérents, qui vont de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture biologique. De plus, le dispositif a été conçu pour que la comparaison deux à deux de certains traitements (T1 vs T2, T2 vs T3, T1 vs T4, T3 vs T6) permette de juger de l'effet d'un seul facteur, c'est-à-dire d'une seule pratique culturale.

La définition du traitement T5 a un peu évolué au cours du temps : la fertilisation azotée n'a été réduite qu'à partir de 2012 et l'Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT) qu'à partir de 2016.

Tableau 1: Traitements expérimentaux du SOERE ACBB

Traitement	Travail du sol	Gestion des résidus	Fertilisation N min	Fréquence des légumineuses	Fréquence des pérennes	Objectif IFT
T1 Productif labour	Labour	Restitution	Dose référence	Faible	Nulle	Référence
T2 Productif non labour	Travail superficiel	Restitution	Dose référence	Faible	Nulle	Référence
T3 Productif paille bioénergie	Travail superficiel	Exportation	Dose référence	Faible	Nulle	Référence
T4 Bas intrants	Labour	Restitution	35% Dose référence	Faible	Nulle	Référence
T5 Bas intrants intensifié	Labour	Restitution	35% Dose référence	Elevée	Nulle	30%
T6 Productif bioénergie	Travail superficiel	Exportation	Dose référence	Faible	Elevée	Référence
T7 Zéro intrants Bio lutte mécanique	Labour occasionnel	Restitution	Zéro azote minéral Substitution légumineuse	Moyenne	Nulle	0%
T8 Zéro intrants Bio couverture du sol	Labour occasionnel	Restitution	Zéro azote minéral Substitution légumineuse	Elevée	Nulle	0%

3.1.3. Successions culturales

Sur le SOERE ACBB Grande Culture, on pratique une rotation céréalière de six ans représentative des cultures de la région (voir annexe 1). Elle est conduite avec du pois de printemps (*Pisum sativum*, L.), du blé d'hiver (*Triticum aestivum*, L.), du colza d'hiver (*Brassica napus*, L.), de l'orge de printemps (*Hordeum vulgare*, L.) et du maïs (*Zea mays*, L.). Pour certains traitements, des cultures pérennes sont également implantées : la luzerne (*Medicago sativa* L.) pour les traitements T5 et T8 (2 ans) et le switchgrass (*Panicum virgatum*), une culture pérenne dédiée à la production de biomasse, pour T6 (6 ans). Concernant le traitement T5, suite à la première rotation qui a révélé un bilan azoté très déficitaire (Coudrain et al, 2016), deux années de luzerne (*Medicago sativa*) (2016 et 2017) ont remplacé les deux premières cultures de la rotation.

Deux années d'homogénéisation complète ont été effectuées avant le démarrage (blé en 2008, puis orge en 2009) pour réduire au maximum les risques d'hétérogénéité sur le dispositif.

Des cultures intermédiaires (CI) sont implantées systématiquement avant les cultures de printemps. Ce sont soit des espèces légumineuses (trèfle violet (*Trifolium pratense*) ou blanc (*Trifolium repens*), vesce (*Vicia sativa*)), soit des espèces non légumineuses (moutarde blanche (*Sinapis alba*), moutarde d'Ethiopie (*Brassica carinata*), avoine (*Avena Sativa* L.), phacélie (*Phacelia tanacetifolia*).

3.1.4. Itinéraires techniques

Le traitement T1 est conduit de manière conventionnelle. La fertilisation azotée est raisonnée selon la méthode du bilan, avec des mesures de reliquats sortie d'hiver et l'utilisation de l'outil Azofert (Machet et al., 2017). La fertilisation PK est raisonnée à partir d'analyses de sol. La protection phytosanitaire est conduite à partir d'observations au champ pour éviter les impacts des bio-agresseurs sur la production.

Pour les autres traitements, l'itinéraire technique est adapté pour respecter les pratiques culturales définies (travail du sol superficiel, exportation des résidus, réduction de la fertilisation azotée, etc.). Néanmoins, des compromis doivent être trouvés pour limiter le nombre d'interventions. Par exemple, le semis et la récolte sont généralement réalisés à la même date pour les différents traitements. Les mêmes variétés sont aussi utilisées pour tous les traitements, sauf certaines années pour les traitements T7 et T8 pour lesquels des variétés plus « rustiques » sont utilisées.

Pour les traitements T3 et T6, l'exportation des pailles est réalisée systématiquement, sauf pour le colza. Dans le cas du maïs, la récolte pour ces deux traitements s'effectue en ensilage afin d'exporter toute la biomasse, alors que les autres traitements sont récoltés en grains.

La fertilisation azotée des traitements T4 et T5 est calculée à partir de la fertilisation des autres traitements pour atteindre une réduction de 60 à 65 %. Le Tableau 2 présente les quantités d'azote apportées chaque année par la fertilisation pour les différents traitements.

Tableau 2: Fertilisation annuelle par traitement (kg N ha⁻¹)

Campagne Culture	Traitement							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Pois - 2010								
Blé - 2011	156	156	156	46	156			
Colza - 2012	220	220	220	80	80	40		
Orge - 2013	100	100	100	40	40	40		
Maïs - 2014	160	160	160	30	30	40		
Blé - 2015	170	170	170	60	60	40		
Pois - 2016								

Colza - 2017	191	191	191	65		191
Blé - 2018	215	215	215	80	80	215
Orge - 2019	160	160	160	55	55	160
Mais - 2020	117	117	117	39	39	117
Blé - 2021	202	202	202	70	70	202

3.2. Mesures réalisées sur les plantes

3.2.1. Prélèvements de plantes

Des prélèvements sont effectués manuellement sur les cultures plusieurs fois par an. Ces prélèvements sont réalisés sur chaque parcelle du dispositif, dans quatre placettes géolocalisées par parcelle. La surface des placettes varie selon la culture, entre 0.25 à 1 m². A chaque nouveau prélèvement (au cours d'une année et d'une année sur l'autre), la placette de prélèvement est décalée afin d'éviter les interactions avec les prélèvements précédents (Annexe 2).

Pendant une campagne, trois prélèvements sont effectués pour évaluer la biomasse des cultures principales au cours de leur développement : un premier prélèvement est effectué à un stade jeune (pour les céréales, au stade épis 1 cm ; pour le colza, à la montaison ; pour le pois de printemps, au stade 8 feuilles), un second prélèvement au stade floraison et un troisième prélèvement à maturité physiologique. Les prélèvements se font en même temps pour tous les traitements ayant la même culture une année donnée.

Pour le premier prélèvement, les prélèvements sont réalisés en plante entière : les plantes sont déterrées à l'aide d'une fourche ou d'une bêche afin de récupérer l'essentiel de la biomasse racinaire. Les deux autres prélèvements concernent uniquement les parties aériennes, qui sont découpées au ras du sol.

Pour les cultures intermédiaires, les prélèvements ont lieu au début de l'hiver, lorsque les conditions climatiques ne sont plus favorables à leur croissance et avant leur destruction par un travail du sol.

Pour chaque prélèvement, les échantillons prélevés au champ sont conditionnés, étiquetés et ramenés au laboratoire.

3.2.2. Traitement au laboratoire des échantillons de plantes

Les échantillons sont ensuite traités au laboratoire, afin de séparer les différents organes (voire espèces) et de mesurer les masses fraîches et sèches.

Au stade précoce, l'échantillon prélevé sur la placette numéro 1 est divisé en 2 sous échantillons : un de 5 à 12 plantes qui sont découpées en tiges (t), feuilles vertes (fv), feuilles sénescents (fs) et parties souterraines (ps) et un autre, constitué du reste, qui est découpée en partie aérienne (pa) et en ps. Les parties ainsi obtenues sont pesées séparément. La surface des feuilles vertes est mesurée avec un planimètre. L'ensemble des échantillons sont placés à l'étude et séchés à 65 °C pendant 96 heures. En sortie d'étuve, les échantillons sont à nouveau pesés. Les échantillons des placettes 2, 3 et 4 sont découpés seulement en partie aérienne (pa) et ps et sont également pesés frais, séchés, puis pesés secs.

Au stade floraison, le prélèvement de la placette 1 est séparé en 2 sous-échantillons : un sous-échantillon de 10 à 15 plantes qui sont découpées en tige incluant l'inflorescence (t+inf), fv et fs, et un autre où l'on conserve les plantes sans les découper. La surface des fv est mesurée avant que celles-ci, comme les autres parties découpées, soient pesées. La suite du protocole est la même que celle appliquée pour le prélèvement au stade jeune.

A maturité physiologique, toutes les placettes suivent le même protocole, afin de séparer les grains du reste de la biomasse aérienne. Pour les céréales, les parties aériennes prélevées sont séparées en épis (épi) et en pailles (p). Les épis sont à leur tour séparés, avec une micro-batteuse de laboratoire, en grains (g) et en protections et supports des grains (psg) qui sont pesés puis placés en étuve à 65°C pendant 96h. En sortie d'étuve, on procède à une nouvelle pesée des échantillons. Un sous-échantillon de grains est compté et pesé afin de déterminer le Poids de Mille Grains (PMG).

Depuis 2016, avec la réduction de la protection phytosanitaire en T5 et le démarrage des traitements T7 et T8, les adventices sont triés et séparées de la culture principale. La biomasse d'adventices suit ensuite le même protocole que les différents organes de la culture principale, afin d'être quantifiée séparément.

Concernant les prélèvements de cultures intermédiaires, les espèces sont séparées en cas de mélange et les parties aériennes sont pesées fraîches, mises à l'étuve à 65°C pendant 96 heures et à nouveau pesées en sortie d'étuve.

Enfin, pour les prélèvements 1 et 2 des cultures principales ainsi que pour les prélèvements des cultures intermédiaires, les quatre placettes par parcelle et les différents organes sont regroupés (en différenciant parties aériennes et souterraines) puis broyés. Pour le prélèvement à maturité des cultures principales, les grains et le reste des parties aériennes sont broyés séparément pour chaque placette, puis un échantillon par parcelle est obtenu par poolage pondéré par rapport au rendement de chaque placette. La poudre ainsi obtenue est conditionnée dans deux piluliers : l'un d'entre eux est destiné à être stocké dans l'échantillothèque tandis que l'autre est utilisé pour les analyses.

La détermination des teneurs en carbone et en azote (méthode de Dumas) est effectuée par un laboratoire extérieur (USRAVE ou LDAR).

3.2. Mesure des reliquats d'azote

Les stocks d'azote minéral du sol (ou reliquats d'azote) sont mesurés deux fois par an : en sortie d'hiver et en post-récolte. Un échantillon par horizon (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 et 120-150 cm) et par parcelle est constitué à partir du regroupement de 5 prélèvements de sol répartis sur une ligne géolocalisée. Les échantillons sont conditionnés en sacs et étiquetés.

Les échantillons prélevés sont ensuite stockés dans une chambre froide ou au congélateur avant d'être envoyés au Laboratoire Départemental Analyses et de Recherches (LDAR) de Laon qui mesure l'humidité et les teneurs en ammonium (NH₄⁺) et en nitrate (NO₃⁻) de chaque échantillon.

3.3. Base de données

Les données du SOERE ACBB sont stockées dans le Système d'Information (SI) de l'UMR BioEcoAgro. Ce SI comprend une base de données sous PostgreSQL et une interface web. La base de données permet de stocker les données brutes relatives à l'ensemble des variables mesurées sur le dispositif. L'import des données dans la base se fait via l'interface web et l'utilisation de trames sous Excel. Les données sont extraites via des requêtes SQL créées par l'informaticien responsable du SI qui permettent également le calcul des variables élaborées.

3.4. Analyse des données

Les calculs, analyses statistiques et représentations graphiques ont été réalisés avec le logiciel R version 4.2.0 (R Core Team, 2022) et son interface RStudio.

3.4.1. Calculs réalisés

Concernant les mesures sur les plantes, la donnée élémentaire concerne un organe, d'une espèce, sur une placette de prélèvement et à une date de prélèvement donnée. La biomasse sèche (exprimée en t MS ha⁻¹) a été calculée pour chaque situation élémentaire via les requêtes SQL (à partir des masses mesurées et de la surface de prélèvement). Les teneurs en C et N de l'échantillon associé ont également été récupérées. Le résultat de ces requêtes SQL, comprenant l'ensemble des données élémentaires, a ensuite été récupéré dans R, via une liaison ODBC (Open Database Connectivity).

Une première étape importante a été de vérifier ces données élémentaires, en utilisant différentes représentations graphiques. Les données ont aussi été moyennées par parcelle (moyenne des quatre placettes), puis les moyennes et écarts types entre parcelles d'un même traitement ont été calculés.

Toutes les données disponibles n'ont pas été utilisées dans ce travail. Nous nous sommes focalisés sur les biomasses sèches et teneurs en azote des parties aériennes et des grains, principalement à maturité et aussi à la floraison (pour les cultures principales et les adventices). Les données de deux grandes parcelles en T5 et T6 n'ont pas été considérées.

L'indice de récolte (*IR*), soit le rapport entre la biomasse de grains (Y_g) et la biomasse aérienne (Y_{pa}) a été calculé à maturité :

$$IR = \frac{Y_g}{Y_{pa}}$$

Concernant les grains, nous disposons aussi du *PMG* à maturité pour certaines années. Le nombre de grains par mètre carré (Nb_g) a alors été calculé comme suit :

$$Nb_g = 100\ 000 \times \frac{Y_g}{PMG}$$

A la floraison, la biomasse sèche aérienne (Y_{pa}) est utilisée pour le calcul de la teneur en azote critique (N_c). Cette teneur en azote critique correspond à la teneur en azote minimale des parties aériennes nécessaire à une croissance maximale de la plante (Lemaire et Nicolardot, 1997). Cette teneur évolue au cours du cycle et la courbe critique de dilution de l'azote met en relation la teneur en azote critique et la biomasse aérienne. Cette courbe dépend de l'espèce et nous avons utilisé les références suivantes pour la déterminer : Colnenne et al. (1998) pour le colza, Justes et al. (1994) pour le blé, Zhao (2014) pour l'orge de printemps, Plénet et Lemaire (1999) pour le maïs et Sieling et al. (2016) pour le triticale. A partir de la teneur en azote mesurée ($N_{\%}$), nous avons ensuite calculé l'indice de nutrition azotée (*INN*) en appliquant le ratio suivant :

$$INN = \frac{N_{\%}}{N_c}$$

Un INN supérieur ou égal à 1 signifie que la croissance en biomasse n'est pas limitée par l'azote (pas de stress azoté) alors qu'un INN inférieur à 1 indique un stress azoté.

Concernant les mesures sur le sol, le stock d'azote minéral du sol en sortie d'hiver (RSH) a été calculé en additionnant l'azote nitrique et l'azote ammoniacal. Pour chaque horizon de chaque prélèvement, la quantité d'azote a été calculée en multipliant la teneur en azote déterminée au laboratoire, par l'épaisseur de l'horizon et sa densité apparente. Les différents horizons ont été sommés pour calculer un stock sur 150 cm (en kg N ha⁻¹). Dans un second temps, nous avons

défini la variable « RSH + Ferti N » qui est la somme des valeurs des stock (RSH) et des apports de fertilisation azotée.

3.4.2. Analyses statistiques

Des analyses de variances (ANOVA) ont été réalisées pour tester l'effet des traitements sur les différentes variables à chaque date de mesure. La partie principale (traitements T1 à T6) et la troisième partie du dispositif (traitements T7 et T8) n'appartenant pas au même plan expérimental, elles ont été traitées séparément.

Un modèle linéaire mixte a été déterminé en utilisant la fonction *lme* du package *nlme* (Pinheiro et al., 2022), avec le traitement en facteur fixe et le bloc en facteur aléatoire. La normalité des résidus et l'homogénéité des variances a été vérifiée via l'analyse graphique des résidus et l'utilisation des tests de Shapiro-Wilk (pour la normalité) et de Levene (pour l'homogénéité). L'ANOVA a ensuite été réalisée en utilisant des sommes de carrés de type 3. En cas d'effet significatif des traitements, un test de Tukey a été utilisé pour comparer deux à deux les traitements, avec le package *emmeans* (Lenth et al., 2022).

Des tests de corrélation (méthode de Spearman), ainsi que des régressions linéaires simples ont été aussi utilisés pour étudier les relations entre les variables calculées pour chaque culture et chaque année.

Le risque de première espèce α a été fixé à 5% pour tous les tests.

IV. Résultats

4.1. Rendement en grain, biomasse à la récolte, indice de récolte et indice de rendement

Au cours de la première rotation allant de 2010 à 2015, les rendements obtenus jusqu'en 2014 varient peu entre T1, T2, T3 et T5 pour une même culture (Tableau 3). Ces traitements sont en général plus productifs que le T4, sauf en 2010 pour le pois et en 2011 pour le blé où l'on n'observe aucune différence significative entre les traitements, à la fois pour la biomasse aérienne et les grains. Pour le blé en 2015, les rendements en T4 et T5 sont significativement inférieurs à ceux obtenus sur les autres traitements, tandis que le T3 affiche un rendement significativement supérieur aux traitements T1 et T2.

Au cours de la seconde rotation allant de 2016 à 2021, les écarts entre traitements varient en fonction des années. Pour le pois en 2016, le traitement T6 produit la plus faible biomasse et le plus faible rendement en grain. En 2017, on n'observe aucune différence entre les six traitements pour le colza. Pour les deux années en blé (2018 et 2021), les traitements T1, T2, T3 et T6 produisent une biomasse et un rendement en grains significativement plus élevés que les traitements T4 et T5. Pour l'orge en 2019, les biomasses (de grains et aériennes) sont proches pour les traitements T1, T5 et T6 et significativement supérieures à celles des traitements T2, T3 et T4. En 2020, les rendements du maïs grain sont proches pour les traitements T1, T2 et T5 et significativement plus élevés que pour T4, alors que ceux des deux traitements en maïs ensilage (T3 et T6) ne sont pas significativement différents. Concernant les deux traitements conduits en agriculture biologique (T7 et T8), ils présentent des rendements proches en 2020 et 2021 alors que pour l'orge en 2019, le rendement en T7 est significativement supérieur au rendement en T8.

Les variations de rendement en grain sont, chaque année, étroitement et significativement corrélées à celles de la biomasse aérienne. Les coefficients de corrélation calculés varient entre 0.76 (colza en 2017) et 1.00 (blé en 2021). En ce qui concerne les indices de récolte, de manière

générale, ils varient de 0.26 à 0.60 et semblent surtout dépendre de l'espèce et/ou de l'année. Au cours de la première rotation, on n'observe aucune différence significative entre les traitements pour les indices de récolte d'une même culture. Au cours de la deuxième rotation, on observe des différences significatives entre traitements en 2017, 2018, 2019 et 2021. En 2017, l'indice de récolte du colza en T6 est significativement supérieur à celui du T2, les autres traitements étant intermédiaires. En 2018, le T5 présente un indice de récolte significativement plus faible pour le blé. Enfin, en 2019 et 2021, l'indice de récolte est plus faible sur le T2.

Si l'on exprime le rendement des différents traitements en proportion de celui du T1 (traitement conventionnel, que l'on peut considérer comme la référence), ils varient entre 30 et 129 % du T1 pour les grains et entre 38 et 109 % pour la biomasse aérienne. En moyenne, les rendements grain des traitement T2, T3 et T6 sont proches de celui du T1, bien que légèrement inférieurs (93, 94 et 91 % respectivement). Les traitements T4 et T5 produisent en moyenne 83 et 86 % du rendement en grain du T1, respectivement.

Tableau 3 : Biomasse de grains, biomasse aérienne à la récolte et indice de récolte des cultures annuelles de 2010 à 2021 pour les différents traitements

Campagne Espèce	Traitement	Biomasse de grains (t MS ha ⁻¹)		Biomasse aérienne (t MS ha ⁻¹)		Indice de récolte	
2010 Pois	T1	5.2 (0.4)	A	10.1 (0.9)	A	0.51 (0.03)	A
	T2	5.1 (0.9)	A	10.5 (1.7)	A	0.49 (0.01)	A
	T3	5.3 (0.7)	A	10.5 (1.2)	A	0.51 (0.04)	A
	T4	5.4 (0.3)	A	10.4 (0.5)	A	0.52 (0.02)	A
	T5	5.1 (0.5)	A	10.3 (0.7)	A	0.50 (0.02)	A
2011 Blé	T1	7.4 (1.0)	A	15.2 (1.6)	A	0.49 (0.03)	A
	T2	8.1 (0.3)	A	16.0 (0.7)	A	0.50 (0.01)	A
	T3	8.1 (0.8)	A	15.9 (1.4)	A	0.51 (0.01)	A
	T4	8.1 (0.9)	A	16.0 (1.3)	A	0.51 (0.03)	A
	T5	7.4 (0.9)	A	15.1 (1.6)	A	0.49 (0.02)	A
2012 Colza	T1	4.3 (0.7)	B	12.4 (2.1)	A	0.35 (0.02)	A
	T2	3.9 (0.7)	B	11.6 (2.9)	A	0.34 (0.04)	A
	T3	4.2 (0.8)	B	11.8 (2.2)	A	0.36 (0.03)	A
	T4	2.9 (0.6)	A	9.8 (3.4)	A	0.31 (0.05)	A
	T5	4.0 (0.5)	B	13.1 (1.1)	A	0.31 (0.02)	A
2013 Orge	T1	7.5 (0.7)	B	14.5 (0.6)	B	0.52 (0.03)	A
	T2	7.5 (0.4)	B	13.8 (1.2)	AB	0.54 (0.02)	A
	T3	6.7 (0.8)	AB	13.7 (0.9)	AB	0.49 (0.03)	A
	T4	6.1 (0.7)	A	11.9 (0.9)	A	0.51 (0.03)	A
	T5	7.1 (0.5)	AB	13.6 (0.9)	AB	0.52 (0.02)	A
2014 Maïs Grain	T1	12.8 (0.9)	B	22.8 (1.3)	B	0.56 (0.01)	A
	T2	12.0 (1.1)	B	22.2 (1.7)	B	0.54 (0.03)	A
	T4	9.4 (1.0)	A	17.3 (1.8)	A	0.54 (0.01)	A
	T5	11.1 (1.1)	AB	19.5 (1.5)	AB	0.57 (0.01)	A
Ensilage	T3			17.6 (1.8)			
2015 Blé	T1	7.9 (0.8)	BC	14.0 (1.4)	CD	0.56 (0.02)	A
	T2	6.6 (1.2)	B	11.3 (2.2)	BC	0.59 (0.01)	A
	T3	8.3 (0.8)	C	14.7 (2.3)	D	0.57 (0.04)	A
	T4	4.6 (0.3)	A	7.9 (0.6)	A	0.58 (0.01)	A
	T5	4.9 (0.4)	A	8.8 (0.8)	AB	0.56 (0.00)	A

2016 Pois	T1	2.7 (0.4)	B	5.8 (1.0)	B	0.46 (0.01)	A
	T2	2.4 (0.3)	AB	5.3 (0.7)	B	0.45 (0.02)	A
	T3	2.4 (0.6)	AB	5.1 (1.3)	AB	0.46 (0.02)	A
	T4	2.8 (0.4)	B	6.3 (0.8)	B	0.45 (0.02)	A
	T6	1.5 (0.7)	A	3.3 (1.0)	A	0.45 (0.10)	A
	T7	2.6 (0.5)		5.6 (0.9)		0.45 (0.02)	A
	2017 Colza	T1	2.8 (0.8)	A	9.9 (1.4)	A	0.27 (0.05)
T2		2.7 (0.7)	A	10.5 (0.7)	A	0.26 (0.05)	A
T3		2.6 (0.7)	A	9.5 (1.1)	A	0.27 (0.04)	AB
T4		3.0 (0.2)	A	9.1 (0.2)	A	0.33 (0.02)	AB
T6		3.6 (0.3)	A	10.5 (0.8)	A	0.34 (0.02)	B
T7		2.1 (0.4)		6.9 (1.2)		0.30 (0.01)	
2018 Blé		T1	9.7 (0.4)	B	17.4 (1.0)	B	0.56 (0.01)
	T2	9.7 (0.4)	B	17.5 (0.6)	B	0.56 (0.01)	B
	T3	9.1 (0.5)	B	16.3 (0.9)	B	0.56 (0.00)	B
	T4	6.9 (0.3)	A	12.3 (0.7)	A	0.56 (0.01)	B
	T5	5.8 (0.9)	A	10.8 (1.8)	A	0.53 (0.00)	A
	T6	8.8 (1.5)	B	16.0 (2.6)	B	0.55 (0.01)	AB
	T7	2.9 (0.3)		6.8 (0.7)		0.42 (0.00)	
2019 Orge	T1	6.1 (0.9)	B	10.8 (1.4)	B	0.56 (0.02)	AB
	T2	4.1 (0.8)	A	7.3 (1.3)	A	0.55 (0.02)	A
	T3	4.3 (0.8)	A	7.8 (1.3)	A	0.56 (0.01)	AB
	T4	4.7 (0.9)	A	8.1 (1.3)	A	0.58 (0.02)	AB
	T5	6.0 (0.7)	B	10.2 (1.0)	B	0.58 (0.01)	B
	T6	6.0 (0.4)	B	10.4 (0.7)	B	0.58 (0.01)	AB
	T7	4.8 (0.2)	b	8.0 (0.3)	b	0.60 (0.00)	A
	T8	4.1 (0.3)	a	7.0 (0.6)	a	0.59 (0.00)	A
2020 Maïs grain	T1	7.6 (1.3)	AB	15.5 (1.5)	B	0.49 (0.03)	A
	T2	7.9 (0.7)	B	15.0 (1.2)	B	0.52 (0.01)	A
	T4	6.3 (0.5)	A	12.7 (0.5)	A	0.49 (0.03)	A
	T5	7.2 (0.4)	AB	14.4 (0.6)	AB	0.50 (0.00)	A
	Maïs ensilage	T3	7.2 (0.2)	A	13.9 (1.1)	A	0.52 (0.03)
T6		6.5 (1.0)	A	14.0 (1.4)	A	0.46 (0.05)	A
Maïs grain	T7	7.1 (0.4)	a	13.1 (0.6)	a	0.54 (0.01)	B
	T8	5.9 (0.4)	a	11.5 (0.8)	a	0.51 (0.01)	A
2021 Blé	T1	10.8 (0.9)	B	19.5 (1.4)	B	0.56 (0.01)	A
	T2	9.7 (0.9)	B	17.1 (1.7)	B	0.57 (0.00)	B
	T3	10.2 (0.8)	B	18.1 (1.4)	B	0.56 (0.00)	AB
	T4	7.0 (0.3)	A	12.5 (0.6)	A	0.56 (0.01)	A
	T5	7.5 (0.5)	A	13.4 (0.8)	A	0.56 (0.00)	A
	T6	10.4 (0.8)	B	18.8 (1.3)	B	0.55 (0.01)	A
Triticale	T7	4.0 (0.3)	a	8.9 (0.8)	a	0.45 (0.00)	a
	T8	3.8 (1.0)	a	7.5 (2.1)	a	0.51 (0.02)	b

Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'écart type entre parcelles d'un même traitement. Les lettres indiquent les différences significatives entre traitement ($p < 0.05$, majuscules pour les traitements T1 à T6, minuscules pour les traitements T7 et T8).

4.2. Composantes du rendement

Le poids de mille grains (PMG) et le nombre de grains par m² (Nb_g) ont été mesurés uniquement de 2016 à 2021 (annexe 3).

4.2.1. Le poids de mille grains (PMG)

La composante PMG varie fortement en fonction des espèces (plus élevé pour le pois et le maïs, plus faible pour le colza), mais très peu entre traitements chaque année. On n'observe pas de différence significative entre les traitements en 2016 et 2017. En 2018, le PMG du traitement T5 sur le blé est significativement supérieur aux autres traitements. En 2019, le T3 a un PMG significativement plus faible que les autres traitements. En 2020, le PMG du T5 est équivalent au T4 mais significativement plus faible que les autres traitements. On retrouve la même tendance en 2021 : sans être statistiquement différent des T3, T4, et T6, le T5 affiche un plus faible PMG que les T1 et T2.

Le PMG n'est significativement corrélé au rendement qu'en 2016 ($r = 0.86$) et 2021 ($r = 0.53$).

4.2.2. Nombre de grains par m²

Le nombre de grains par m² est en général plus faible sur le T4, sauf pour le pois en 2016 et le colza en 2017 où l'on n'observe aucune différence significative entre les traitements.

En 2018, les traitements T4 et T5 produisent les plus faibles quantités de grains. Avec le T3, ils figurent également parmi les traitements produisant la plus faible quantité de grain en 2019. On n'observe pas d'écart significatif entre traitements pour le maïs de 2020, sauf entre T4 et T5 (plus de grains en T5 qu'en T4). En 2021, le T4 est significativement inférieur aux T1 et T6 mais on n'observe que des tendances entre les autres traitements.

Le nombre de grains par m² est significativement et fortement corrélé au rendement pour toutes les années (r entre 0.84 et 0.99). Cette composante explique donc beaucoup mieux les variations de rendement entre traitements que le PMG.

4.3. Indicateurs de stress azoté et biotique

Deux indicateurs ont été quantifiés pour d'une part, évaluer le niveau de stress azoté des cultures, et d'autre part, évaluer le niveau de pression lié aux adventices (stress biotique). Pour le stress azoté, c'est l'indice de nutrition azoté (INN) qui a été mesuré à la floraison de 2016 à 2021. Pour la pression des adventices, c'est la biomasse d'adventices à la floraison qui a été mesurée certaines années de 2016 à 2021.

4.3.1. Indice de nutrition azoté (INN)

Les INN calculés varient entre 0.59 et 0.82 pour le pois, 0.65 et 0.90 pour le colza en 2017, 0.64 et 0.93 pour le blé en 2018, 0.45 et 0.74 pour l'orge en 2019, 0.57 et 0.77 pour le maïs en 2020, et enfin 0.53 et 0.93 pour le blé en 2021.

De manière générale, on observe des INN plus élevés pour les traitements T1, T2, T3 et T6, que pour T4, T5, T7 et T8. Le T5 et le T4 affichent souvent un plus faible INN sauf pour le pois en 2016 où ce dernier se situe, avec le T1, parmi les meilleurs en termes d'INN. Par contre, pour l'orge en 2019, seul le T4 est significativement différent des autres traitements. Les INN du T3 et du T6 ne sont pas différents entre eux quelles que soient la culture et l'année considérées (voir annexe 4).

4.3.2. Biomasse d'adventices

Quelles que soient la culture et l'année considérées, la biomasse d'adventice moyenne prélevée sur un traitement au stade floraison est toujours en dessous de 0.3 t MS ha⁻¹ (figure 2). La plus forte biomasse d'adventices a été prélevée sur le T4 en 2020 (0.25 t MS ha⁻¹). Le T8 affiche la valeur la plus faible pour les trois années (valeur maximale = 0.01 t MS ha⁻¹ en 2019).

En 2016, suite à des repousses de switchgrass, nous avons procédé à des mesures de biomasse d’adventice sur le T6. En 2017, une mesure précoce a donné très peu de biomasse d’adventices (voir annexe 9).

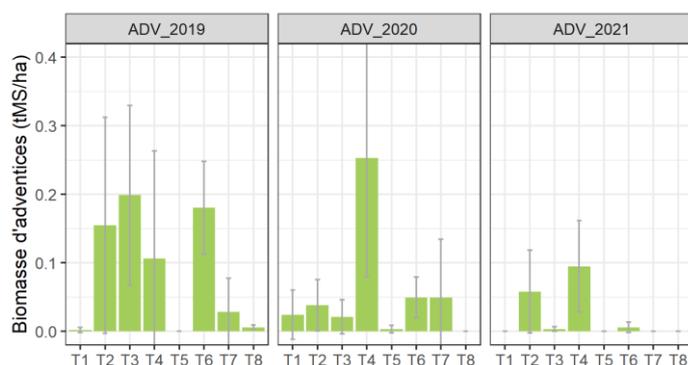


Figure 2 : Biomasse d’adventices à la floraison de 2019 à 2021

L’annexe 5 offre une idée plus exhaustive de la biomasse annuelle d’adventices mesurée sur le dispositif.

Parmi les indicateurs de stress considérés, l’INN est celui qui permet d’expliquer le mieux les différences de rendement observées entre les traitements.

4.4. Indicateur de disponibilité en azote : reliquats azotés

La fertilisation azotée des cultures varie entre les traitements (Tableau 2). D’autre part, la présence de légumineuses (cultures intermédiaires et luzerne) dans les traitements T5, T7 et T8 peut augmenter la disponibilité en azote pour les cultures suivantes (voir partie 4.5.2). Les mesures de reliquats azotés en sortie d’hiver permettent de connaître les quantités d’azote potentiellement disponibles pour les cultures en début de cycle de croissance. Ces reliquats peuvent intégrer en partie les effets des précédents ainsi que les effets à long terme des différences de minéralisation.

On observe de fortes variations interannuelles des reliquats en sortie d’hiver (figure 3). Au cours d’une année, la plus forte valeur est souvent mesurée sur les T1, T2, T3 et T5. Toutefois, le T5 s’écarte significativement des autres traitements en 2014, en 2018 et en 2019, années après culture intermédiaire légumineuses ou après luzerne. Il est au même niveau que le T1 en 2016. En 2017, les reliquats mesurés sur le T2 sont plus élevés que ceux mesurés sur tous les autres traitements. Sur l’ensemble des traitements, les plus fortes valeurs de reliquats ont été enregistrées en 2011 (voir annexe 6).

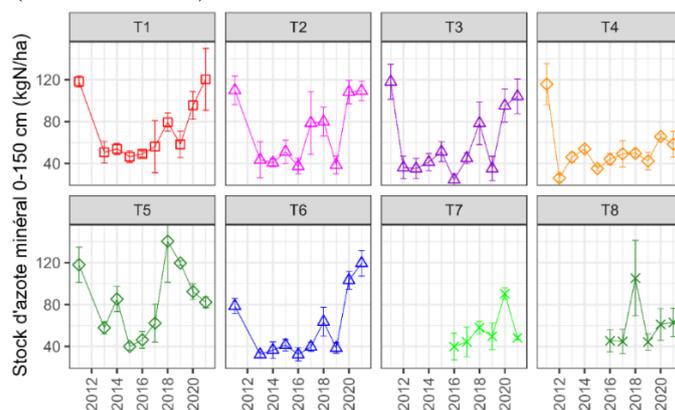


Figure 3 : Stock d’azote minéral par traitement de 2011 à 2021

4.5. Relations entre les indicateurs de stress et le rendement en grain

Les relations entre les différentes variables considérées dans le cadre de cette étude varient selon les cultures et selon les campagnes. Elles sont présentées dans des matrices de corrélation en annexe 7.

4.5.1. Relation entre INN et rendement grain

Sur l'ensemble de la rotation (2016 – 2021), les coefficients de corrélation calculés sont compris entre 0.36 et 0.81 entre l'INN et le rendement grain et entre 0.34 et 0.80 entre l'INN et la biomasse aérienne. Ceci traduirait, dans les cas de faibles corrélations, une mauvaise valorisation de l'azote absorbé en termes de biomasse aérienne et de rendement grain et une bonne valorisation de l'azote dans les cas de fortes corrélations (Aubry et al, 1994).

Une matrice de corrélation a permis de constater une relation positive entre l'INN, le rendement grain et la biomasse aérienne obtenus pour le pois, le blé, et l'orge. Il n'existe cependant aucune relation entre l'INN et le rendement grain pour le colza en 2017 et le maïs en 2020. Par ailleurs, la relation entre la biomasse aérienne et l'INN est faible pour le maïs ($r = 0.34$) et modérée pour le colza ($r=0.65$).

Le rendement grain est, dans tous les cas, toujours fortement corrélé à la biomasse aérienne.

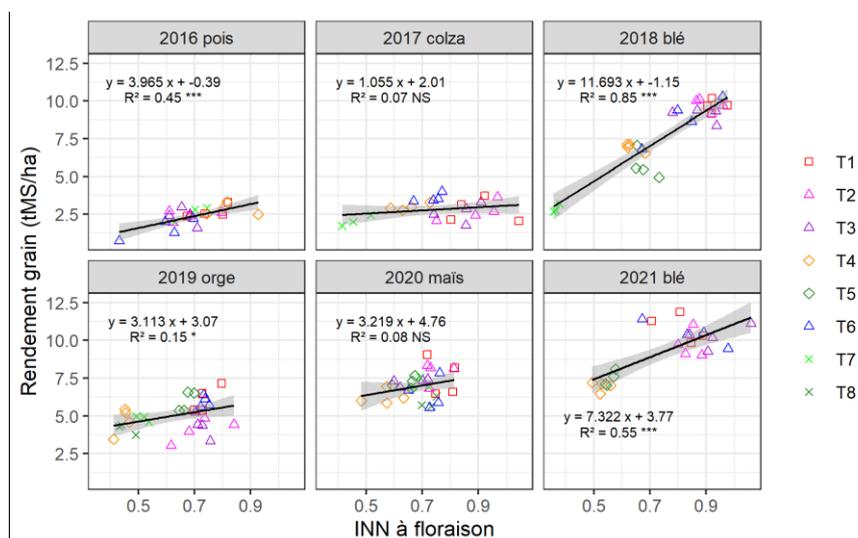


Figure 4 : Relation entre INN à la floraison et rendement grain

4.5.2. Relation entre biomasse d'adventices et rendements

La biomasse d'adventices impacte très peu les rendements au cours des années considérées. Les coefficients de corrélation calculés entre biomasse d'adventices à la floraison et le rendement grain sont en effet non significatif, sauf en 2021 où l'on a pu établir une faible relation négative entre la biomasse d'adventices, le rendement grain du blé ($r = -0.24$) et la biomasse aérienne ($r = -0.28$).

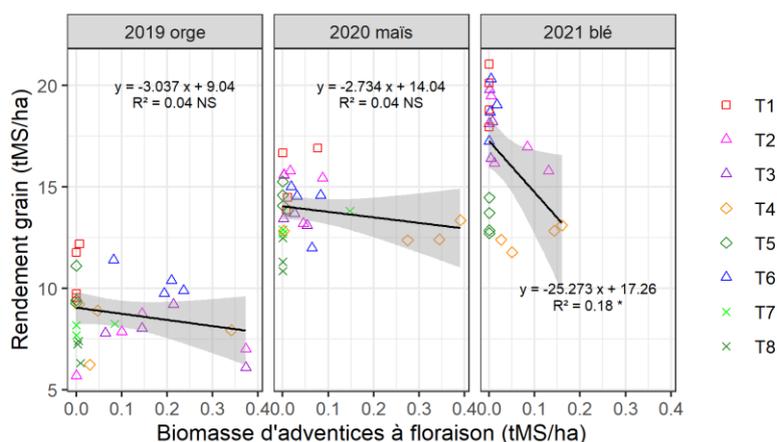


Figure 5 : Relation entre biomasse d'adventices et les rendements grains

4.5.3. Relation entre « RSH + Ferti N » et rendements

La relation entre « RSH + Ferti N » (RSH + fertilisation) et les rendements varie beaucoup d'une année à l'autre. En 2011, il n'existe aucun lien significatif entre « RSH + Ferti N » et les rendements. En 2020, « RSH + Ferti N » est faiblement corrélé au rendement grain ($r = 0.27$) et modérément corrélé à la biomasse aérienne ($r = 0.56$). Pour des années comme 2013 et 2016, les apports d'azote sont modérément corrélés au rendement grain ($r = 0.43$ et 0.54) et à la biomasse aérienne ($r = 0.42$ et 0.68). Tandis qu'il existe une forte corrélation entre « RSH + Ferti N », la biomasse aérienne et le rendement en grain en 2015 ($r = 0.81$ dans les deux cas), 2018 ($r = 0.85$ et $r = 0.84$) et 2021 ($r = 0.82$ dans les deux cas).

Pour des années comme 2017 et 2019, « RSH + Ferti N » n'est pas corrélé au rendement grain tandis qu'il est modérément corrélé à la biomasse aérienne.

La figure 6 montre les corrélations entre le rendement grain et la variable « RSH + Ferti N ».

Les corrélations entre « RSH + Ferti N » et la biomasse aérienne sont présentées en annexe 8.

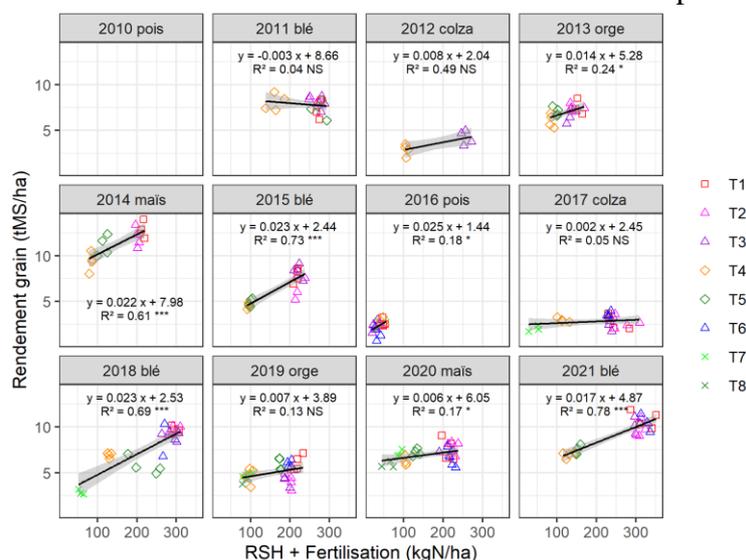


Figure 6 : Relation entre « RSH + Ferti N » et les rendements grains

4.5.4. Relation entre les reliquats et les rendements

Il existe une corrélation modérée entre les reliquats, le rendement en grain ($r = 0.43$) et la biomasse aérienne ($r = 0.48$) obtenus sur le pois en 2016. Les rendements de l'orge de 2019 ($r = 0.4$ pour le rendement en grain et 0.36 pour la biomasse aérienne), du maïs de 2020 et du blé

de 2021 sont corrélés de manière modérée aux valeurs de reliquats mesurées en sortie d'hiver. On observe une forte corrélation entre les rendements du blé de 2015 et les reliquats. (Voir annexe 7)

4.5.2. Effet d'un précédent légumineuse sur le rendement et les reliquats

2011 et 2017 correspondent à deux campagnes où les cultures en place ont été précédées d'une culture principale légumineuse, le pois. En observant les rendements obtenus en 2011 et ceux obtenus en 2017, nous avons pu comparer le T1 (conventionnel) au T4 (bas intrant) pour les années avec précédents légumineuses et pour les années sans précédents légumineuses. Le constat a été que, suite à un précédent pois, les rendements entre T1 et T4 ne sont pas significativement différents. De même, les valeurs des reliquats ne sont pas significativement différentes entre le T1 et le T4. A l'inverse, avec des précédents non-légumineuses, le T1 est significativement supérieur au T4, pour les RSH et le rendement grain.

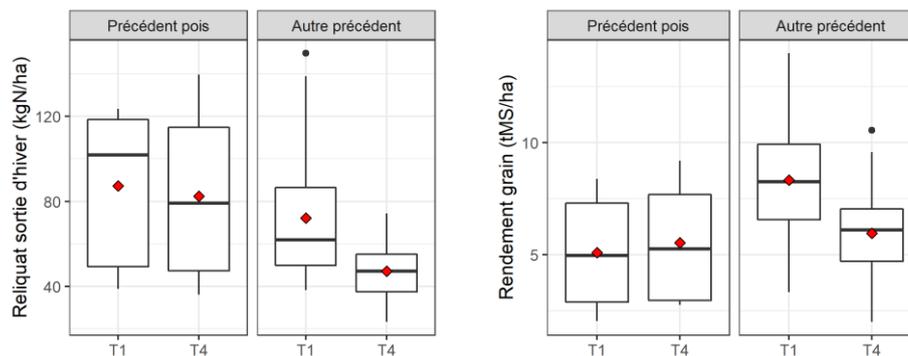


Figure 7 : Effet d'un précédent légumineuse sur le rendement et les reliquats

V. Discussion

5.1. Rappel des hypothèses

Deux hypothèses ont été émises dans le cadre de ce travail :

- Les écarts entre les rendements en AB, bas intrants et conventionnels sont majoritairement dus aux facteurs azote (H1) et bio-agresseurs (Principalement les adventices) (H1')
- De tous les traitements, ceux en AB présentent les plus faibles rendements (H2)
 $T1=T2=T3=T6>T5=T4>T8>T7$

5.2. Des effets importants de la fertilisation et des reliquats azotés sur les rendements des cultures

Les écarts de rendement observés entre les traitements sont très variables d'une année à l'autre.

Trois situations se sont présentées au cours des années : dans les cas de fortes corrélations entre le rendement en grain et la variable « RSH + Ferti N » (somme des reliquats sortie d'hiver et de la fertilisation azotée), les différences de rendement observées entre les traitements sont bien marquées et suivent scrupuleusement la même tendance que celles observées entre les valeurs de « RSH + Ferti N ». Dans les cas de faible corrélation, on assiste à des situations où l'on n'observe que des tendances entre les traitements, les uns étant très proches des autres en termes de rendement (cas du maïs en 2020). De plus, dans les cas où le rendement en grain n'est pas significativement corrélé à la variable « RSH + Ferti N », on n'observe aucune différence significative entre les traitements.

Par ailleurs, lorsque l'INN à floraison a été mesuré, pour les années où le rendement est fortement corrélé à la variable « RSH + Ferti N », les traitements avec un faible INN affichent des valeurs de rendements grain plus faibles et *vice versa*. L'existence d'une corrélation

significative et forte entre le rendement grain et l'INN nous renseigne sur le lien entre le niveau de stress azoté subi par un traitement au cours d'une campagne et sa production de biomasse. Cela pourrait expliquer les faibles rendements grain obtenus sur certains traitements. Ceux-ci auraient une faible capacité à mobiliser l'azote absorbé pour la production de grains. En effet, l'INN permet de décrire les carences et de caractériser leur effet sur la formation des grains. Il est pertinent pour identifier les situations dans lesquelles une carence en azote induit une réduction de production par rapport à un potentiel. A la floraison, il est un indicateur du nombre de grains, très corrélé au rendement (Ravier, 2017). De plus, l'INN est généralement fortement et positivement corrélé à la variable « RSH + Ferti N ».

Ces constats permettent non seulement d'admettre que l'azote disponible affecte l'INN qui, à son tour, affecte le rendement grain, mais aussi de valider, pour les années où le rendement grain est fortement corrélé à « RSH + Ferti N » et à l'INN, nos hypothèses H1 et H2. En effet, au cours de ces années, les rendements obtenus sont intimement liés à l'azote disponible pour la culture. Il est donc logique que les traitements limités en azote affichent les plus faibles rendements. C'est le cas des systèmes de cultures bas intrants (T4 et T5) et des systèmes conduits en agriculture biologique (T7 et T8). La moindre disponibilité en azote pour les cultures peut être en effet le principal facteur limitant la production dans ces systèmes de cultures et non les pertes liées à la compétition des adventices (Rakotovololona, 2018).

5.3. Des effets des légumineuses (cultures principales et cultures intermédiaires) sur les rendements des cultures

Pour les années cultivées en pois, on observe peu ou aucune différence significative entre les traitements. Les légumineuses sont en effet connues pour leur capacité à fixer l'azote atmosphérique grâce à une symbiose avec des bactéries du sol du genre *Rhizobium* (Guinet et al., 2019). Toutefois, cette association symbiotique est coûteuse en énergie et ne se met en place qu'en situation de sol pauvre en azote minéral. Ainsi, la nutrition azotée des légumineuses dépend à la fois de la fixation symbiotique et du prélèvement d'azote minéral par leurs racines quand celui-ci est disponible (ibid). Cela peut expliquer la corrélation modérée observée entre « RSH + Ferti N » et le rendement grain en 2016, et l'absence de différence significative entre la plupart des traitements.

Dans nos conditions expérimentales, on n'observe aucune différence significative de rendement et de reliquats entre les traitements en conventionnel et les traitements bas intrants pour la culture qui suit le pois. Plaza-Bonilla et al. (2017) ont montré que des précédents légumineuses ont réduit les besoins en engrais azotés sans compromettre le rendement ultérieur des cultures céréalières et la qualité des céréales. Les légumineuses sont en effet connues pour fournir de l'azote au sol grâce à leurs résidus de culture riches en azote (Guinet et al., 2019). Les légumineuses ont donc pu restituer assez d'azote à la culture suivante, ce qui a engendré des conditions non limitantes en azote pour ces rendements.

De plus, il semblerait que les effets précédents des légumineuses ne s'étendent pas que sur une seule année. Nous avons relevé au cours de l'année suivant la destruction de la luzerne en T5 le plus grand stock d'azote minéral en sortie d'hiver (140 kg N ha^{-1}) enregistré depuis la création du dispositif. Cette tendance s'est même poursuivie sur l'année suivante, ce qui, en toute vraisemblance a contribué au bon résultat observé sur le T5 de l'orge en 2019. Des effets similaires ont été démontrés par Justes et al (2001) suite à la destruction d'une luzernière. Une telle culture a la capacité de libérer une grande quantité d'azote minérale et cela, sur plusieurs campagnes. Une étude de longue durée réalisée par l'INRA de Clermont-Ferrand a d'ailleurs prouvé que la luzerne, maintenue deux ans, était capable de fixer en moyenne 689 kg N ha^{-1}

dans sa biomasse aérienne et pouvait restituer après sa destruction environ 202 kg N ha⁻¹ en moyenne réparties sur 4 années dont 40 % la première année, 24 % les deux suivantes et le solde la quatrième année (Triboï et Triboï-Blondel, 2008). Les résultats obtenus sur le T5 après destruction de la luzerne en 2017 vont dans le même sens que cette étude.

D'autre part, le rôle des légumineuses en cultures intermédiaires n'est pas non plus négligeable. En effet, après une culture intermédiaire légumineuse (pure ou en mélange) en 2014, 2019 et 2020, les rendements obtenus sur les traitements concernés (T5, T7, T8) sont proches des rendements les plus élevés (voir tableau 3), malgré une fertilisation plus faible qu'en conventionnel. Les cultures intermédiaires non-légumineuses sont en effet connues pour leur capacité à piéger les nitrates avec efficacité. Cependant, elles peuvent avoir un effet négatif sur la disponibilité en azote pour la culture suivante (organisation nette d'azote) si leur rapport C/N est élevé (en cas de destruction tardive et/ou de faible disponibilité en azote) (Constantin et al., 2015). Les cultures intermédiaires légumineuses, grâce à leur capacité fixatrice, permettent de réduire le C/N du couvert et d'augmenter la fourniture d'azote pour la culture suivante après sa destruction (Tribouillois et al., 2016).

5.4. Un faible effet des adventices sur les rendements des cultures

Les adventices entrent en compétition avec l'espèce cultivée pour les ressources minérales et hydriques (Amossé, 2013). Cependant, nos résultats montrent que les adventices n'ont pas d'effet compétitif sur les cultures en place pour les années étudiées. En effet la corrélation entre rendement et biomasse d'adventices est faible pour une année et n'est pas significative pour d'autres. De plus, les biomasses d'adventices mesurées sont faibles (valeur maximale = 0.25 t MS ha⁻¹ sur le T4 en 2020). Or, Rakotovololona (2018) a montré que la relation entre rendement et biomasse d'adventices n'apparaissait qu'au-delà de 1.2 t MS ha⁻¹ d'adventices dans des systèmes en AB des Hauts-de-France. En outre, Cordeau et al. (2020) estiment que les pertes de rendement causées par les adventices ne sont pas significatives quand la parcelle est désherbée, que ce soit mécaniquement ou chimiquement. On doit souligner que pour les trois années de mesure de biomasse d'adventices, celles-ci semblent être mieux gérées sur le T8 que sur n'importe quel autre traitement (valeur moyenne), alors que le T8 est en AB. Grâce au désherbage mécanique, les adventices semblent donc bien « gérées » dans nos systèmes bas intrants, même en AB, et elles n'ont donc probablement que très peu d'impact sur les rendements.

Toutefois, les relations entre rendements et biomasse d'adventices semblent ne pas être univoques. Le cas de l'orge en 2019 est particulièrement difficile à expliquer, avec notamment des rendements faibles en T2 et T3. Les rendements obtenus sur l'orge en 2019 ne sont ni corrélés aux adventices ni corrélés aux apports d'azote. Cependant, nous avons quand même pu constater que parmi les traitements affichant les plus forts rendements pour cette année, se trouvent ceux dont la biomasse d'adventices à la floraison a été nulle (T1 et T5). Sachant que l'étude qui a été conduite par Rakotovololona (2018) a pris en compte le blé et le triticale seulement, on ne peut donc pas généraliser ses résultats à l'ensemble des céréales. Pourtant, la biomasse d'adventices présente sur le T6 semble n'avoir pas affecté le rendement cette année. Cela nous laisse supposer l'intervention d'autres facteurs dans l'élaboration des rendements.

5.5. Des effets d'autres facteurs

Si un précédent légumineuse affecte à la hausse le rendement sur certains traitements, ce n'est certainement pas le cas pour une culture pérenne de switchgrass. Nous avons en effet observé après la destruction du switchgrass en 2015, un faible rendement sur le T6 du pois en 2016 (le plus faible rendement observé au cours des deux campagnes), alors que le rendement obtenu

sur ce traitement au cours des autres campagnes se situe généralement parmi les meilleurs. Le switchgrass est certes une culture peu exigeante en fertilisation azotée (RMT biomasse et France Miscanthus, 2012), mais ses effets sur les reliquats azotés semblent pénaliser la culture suivante. Bonis et al. (2016) ont montré une diminution importante de la minéralisation nette d'azote sur le SOERE ACBB l'année suivant la destruction du switchgrass en 2015. Cette moindre disponibilité en azote minéral a pu pénaliser le rendement même si la culture en place était une légumineuse. De plus, les repousses de switchgrass en 2016 ont pu aussi pénaliser la culture de pois.

Pour certaines campagnes, il n'existe aucune corrélation significative entre le rendement grain et les sources d'azote considérées. Cela nous laisse penser que d'autres facteurs ont empêché à l'azote disponible de jouer efficacement son rôle dans la formation des grains.

VI. Conclusion et perspectives

La réduction des intrants chimiques (pesticides et engrais) en agriculture s'inscrit aujourd'hui à l'ordre des priorités à cause de leurs impacts sur la santé et sur l'environnement. Les systèmes de culture innovants sont vus de nos jours comme une alternative permettant de répondre à ce double objectif pour passer d'une agriculture conventionnelle à une agriculture durable. Aussi, l'étude qui a été menée durant ce stage devait analyser la performance agronomique de huit systèmes de culture mis en place sur le dispositif expérimental du SOERE ACBB d'Estrées-Mons dans les Hauts-de-France, tout en cherchant à comprendre les facteurs limitant leur rendement.

Il ressort de nos analyses que, dans les conditions expérimentales appliquées sur ce dispositif, le facteur limitant principal des rendements est la disponibilité en azote. Les adventices, qui sont bien gérées dans l'ensemble, que l'on soit en bas intrants ou en AB, ne semblent pas avoir d'effet significatif. Ce résultat nous amène à nous interroger sur la faisabilité de l'application de tels modes de gestion des adventices à large échelle afin de réduire au mieux l'utilisation des produits phytosanitaires.

Par ailleurs, nos résultats ont également montré qu'il existe des pistes pour pallier à la problématique liée aux déficits en azote auxquels sont confrontés les systèmes de cultures à bas intrants. Les précédents légumineuses (luzerne, pois et vesce), en culture principale et/ou en interculture, ont en effet des incidences positives sur les rendements de la culture suivante tandis que les effets des cultures intermédiaires de crucifères et de graminées mis en place seuls sont moins bien marqués. On pourrait donc envisager de mettre en interculture une association avec une légumineuse ou une légumineuse seule pour faire face au problème en azote affronté par ces systèmes de culture.

Cependant, les systèmes de culture en place étant la résultante de la combinaison de plusieurs stratégies, il y a apparemment d'autres facteurs qui rentrent en compte dans l'élaboration des rendements et que nous n'avons pas traités. Les effets T2 et T3 moins bons sur les cultures de d'orge de printemps et l'effet T6 moins bon après destruction du switchgrass sont des questions auxquelles il faudra répondre dans les prochaines années. En outre, nous n'avons pas pu non plus exploiter l'ensemble des données entre 2010 et 2015. C'est pourquoi il serait intéressant de répliquer une telle étude sur la prochaine rotation afin de comparer les résultats.

Bibliographie

AGRO-TRANSFERT, 2017. *Gestion-de-lazote-en-Agriculture-Biologique-1.pdf* [en ligne]. 2017. [Consulté le 9 août 2022]. Disponible à l'adresse : <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2017/01/gestion-de-lazote.pdf>

AMOSSÉ, Camille, 2013. *Analyse expérimentale de l'effet de couverts de légumineuses associés en relais à un blé d'hiver, conduit en agriculture biologique, sur les performances des cultures, la maîtrise des adventices et la dynamique de l'azote* [en ligne]. phdthesis. AgroParisTech. [Consulté le 8 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01179727>

ANGEVIN, Frédérique, BASILICO, Laurent, DENIEUL, Céline, GABA, Sabrina, MESSEAN, Antoine, PILORGÉ, Etienne, POTOK, Stéphanie, RODRIGUEZ, Alain et VUILLEMIN, Fanny, 2016. Maîtriser les adventices dans de nouveaux contextes de production. Leviers techniques & retours d'expériences pour une gestion durable. . 2016. pp. 27.

ANGLADE, Juliette, [sans date]. Agriculture biologique et qualité des ressources en eau dans le bassin de la Seine: caractérisation des pratiques et applications territorialisées. . pp. 303.

AUBRY, C., SOUKI, K. Latiri, DORÉ, Thierry et GRINER, C., 1994. Diagnostic des facteurs limitants du rendement du blé dur en parcelles d'agriculteurs dans une petite region semi-aride en Tunisie. *Agronomie* [en ligne]. 1994. Vol. 14, n° 4, pp. 213. [Consulté le 3 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02710664>

BONIS, Marie-Laure, FERCHAUD, Fabien, FRIDA, Keuper, CHLÉBOWSKI, Florent et BRUNO, Mary, 2016. Carbon and nitrogen dynamics after destruction of a 6-year-old perennial bioenergy crop. . 30 août 2016.

BUTAULT, Jean-Pierre, DEDRYVER, Charles-Antoine, GARY, Christian, GUICHARD, Laurence, JACQUET, Florence, MEYNARD, Jean Marc, NICOT, Philippe C, PITRAT, Michel, REAU, Raymond, SAUPHANOR, Benoit, SAVINI, Isabelle et VOLAY, Therese, 2010. *Écophyto R&D: quelles voies pour réduire l'usage des pesticides? Synthèse du rapport de l'étude* [en ligne]. rapport d'étude. France : INRA. [Consulté le 9 juin 2022]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01172967/document>
hal: 01172967

COLNENNE, Caroline, MYNARD, J. M., REAU, R., JUSTES, E. et MERRIEN, A., 1998. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape. *Annals of Botany* [en ligne]. 1 février 1998. Vol. 81, n° 2, pp. 311-317. [Consulté le 11 juillet 2022]. DOI [10.1006/anbo.1997.0557](https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0557). Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0557>

COMIFER et ASSOCIATION DE COORDINATION TECHNIQUE AGRICOLE (FRANCE), 2013. *Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies.* [en ligne]. COMIFER. Paris : Comifer : Acta. ISBN 978-2-910393-09-0. Disponible à l'adresse : https://comifer.asso.fr/images/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf

CONSTANTIN, Julie, LE BAS, Christine et JUSTES, Eric, 2015. Large-scale assessment of optimal emergence and destruction dates for cover crops to reduce nitrate leaching in temperate conditions using the STICS soil-crop model. *European Journal of Agronomy* [en ligne]. 1 septembre 2015. Vol. 69, pp. 75-87. [Consulté le 18 août 2022]. DOI [10.1016/j.eja.2015.06.002](https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.06.002). Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030115000726>

CORDEAU, Stéphane, BAUDRON, Auxence et ADEUX, Guillaume, 2020. Is Tillage a Suitable Option for Weed Management in Conservation Agriculture? *Agronomy* [en ligne]. novembre 2020.

Vol. 10, n° 11, pp. 1746. [Consulté le 19 août 2022]. DOI [10.3390/agronomy10111746](https://doi.org/10.3390/agronomy10111746). Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/11/1746>

CORDEAU, Stéphane, DESSAINT, Fabrice, DENEUIL, C., BONIN, Ludovic, VUILLEMIN, F., DELATTRE, Marc, ALAIN, Rodriguez, GUILLEMIN, Jean-Philippe et CHAUVEL, Bruno, 2016. *La nuisibilité directe des adventices en grandes cultures : quelles réponses nous apportent les essais désherbages ?* [en ligne]. décembre 2016. AFPP - Association Française de Protection des Plantes. [Consulté le 9 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01604468>

COUDRAIN, Valérie, HEDDE, Mickaël, CHAUVAT, Matthieu, MARON, Pierre-Alain, BOURGEOIS, Emilie, MARY, Bruno, LÉONARD, Joël, EKELUND, Flemming, VILLENAVE, Cécile et RECOUS, Sylvie, 2016. Temporal differentiation of soil communities in response to arable crop management strategies. *Agriculture, Ecosystems & Environment* [en ligne]. 1 juin 2016. Vol. 225, pp. 12-21. [Consulté le 1 août 2022]. DOI [10.1016/j.agee.2016.03.029](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.03.029). Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880916301645>

GHALI, Mohamed, DANIEL, Karine, COLSON, François et SORIN, Stéphane, 2014. L'agriculture écologiquement intensive. Une approche économique. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* [en ligne]. 15 mai 2014. N° 341, pp. 83-99. [Consulté le 3 juin 2022]. DOI [10.4000/economierurale.4338](https://doi.org/10.4000/economierurale.4338). Disponible à l'adresse : <https://journals.openedition.org/economierurale/4338>

GUINET, Maé, NICOLARDOT, Bernard, DUREY, Vincent, REVELLIN, Cecile, LOMBARD, Frédéric, PINET, Eric, BIZOUARD, Florian et VOISIN, Anne-Sophie, 2019. Fixation symbiotique de l'azote et effet précédent : toutes les légumineuses à graines se valent-elles ? . 15 mai 2019. Vol. 74, pp. 55-68.

INRAE, 2021. AgroImpact - SOERE ACBB. *SOERE ACBB Grandes Cultures d'Estrées-Mons, Un observatoire de long terme sur les cycles biogéochimiques* [en ligne]. décembre 2021. [Consulté le 3 juin 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www6.hautsdefrance.inrae.fr/agroimpact/Nos-dispositifs-outils/Dispositifs-experimentaux-et-infrastructures/Echelle-du-systeme-de-culture/SOERE-ACBB>

INRAE, 2022. CLIMATIK - Portail de téléchargement des données agroclimatiques - Unité Agroclim - INRAE. [en ligne]. 2022. [Consulté le 1 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://agroclim.inrae.fr/climatik/ClimatikGwt.html>

JUSTES, Eric, MARY, Bruno, JEAN-MARC, Meynard, MACHET, J. et HUCHÉ-THÉLIER, Lydie, 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany - ANN BOT*. 1 octobre 1994. Vol. 74, pp. 397-407. DOI [10.1006/anbo.1994.1133](https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1133).

JUSTES, Eric, THIÉBEAU, Pascal, CATTIN, Gérard, LARBRE, Damien et NICOLARDOT, Bernard, 2001. Libération d'azote après le retournement de luzerne. Un effet sur deux campagnes. . 1 janvier 2001.

LEMAIRE, Gilles et NICOLARDOT, B., 1997. *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes: Reims (France)* [en ligne]. Editions Quae. ISBN 978-2-7380-0764-3. Disponible à l'adresse : https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=j-3mhK_T8gkC&oi=fnd&pg=PA121&dq=Lemaire+et+al.,+azote+critique+1997&ots=RGDrMnNyJA&sig=cPyvRw_LeDBZuyJBQIU2G-tDhWA#v=onepage&q=Lemaire%20et%20al.%2C%20azote%20critique%201997&f=false

LENTH, Russell V., BUERKNER, Paul, HERVE, Maxime, JUNG, Maarten, LOVE, Jonathon, MIGUEZ, Fernando, RIEBL, Hannes et SINGMANN, Henrik, 2022. *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means* [en ligne]. [Consulté le 16 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>

LOBELL, David B., CASSMAN, Kenneth G. et FIELD, Christopher B., 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources* [en ligne]. 1 novembre 2009. Vol. 34, n° 1, pp. 179-204. [Consulté le 8 août 2022]. DOI [10.1146/annurev.environ.041008.093740](https://doi.org/10.1146/annurev.environ.041008.093740). Disponible à l'adresse : <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.environ.041008.093740>

MACHET, Jean-Marie, DUBRULLE, Pascal, DAMAY, Nathalie, DUVAL, Rémy, JULIEN, Jean-Luc et RECOUS, Sylvie, 2017. A dynamic decision-making tool for calculating the optimal rates of N application for 40 annual crops while minimising the residual level of mineral N at harvest. *Agronomy* [en ligne]. 2017. Vol. 7 (4), n° 73, pp. 22 p. [Consulté le 16 août 2022]. DOI [10.3390/agronomy7040073](https://doi.org/10.3390/agronomy7040073). Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01658872>

MEYNARD, Jean Marc, 2012. La reconception est en marche! Conclusion au Colloque `` Vers des systèmes de culture innovants et performants: De la théorie à la pratique pour concevoir, piloter, évaluer, conseiller et former ’ ’. *Innovations Agronomiques* [en ligne]. 2012. Vol. 20, n° 2012, pp. 143-153. [Consulté le 20 mai 2022]. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02650611/document>
hal: 02650611

MIDLER, Estelle et HÉBRAIL-MUET, Vincent, 2021. Performance économique et environnementale des exploitations de grandes cultures. *Service de la statistique et de la prospective – centre d'études et de prospective* [en ligne]. 2021. N° 170, pp. 4. [Consulté le 3 juin 2022]. Disponible à l'adresse : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Ana170/Analyse_1702112.pdf

MORISON, Muriel, GUICHARD, Laurence et JEUFFROY, Marie-Helene, 2008. Comment maîtriser la flore adventice des grandes cultures à travers les éléments de l'itinéraire technique? *hal*. 2008. N° 3, pp. 27-41.

OECD, 2019. *Trends and Drivers of Agri-environmental Performance in OECD Countries* [en ligne]. Paris : Organisation for Economic Co-operation and Development. [Consulté le 3 juin 2022]. ISBN 978-92-64-38291-6. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/trends-and-drivers-of-agri-environmental-performance-in-oecd-countries_b59b1142-en

OERKE, E.-C, 2006. Crop Losses to Pests. *The Journal of Agricultural Science*. 1 février 2006. Vol. 144, n° 1, pp. 31-43. DOI [10.1017/S0021859605005708](https://doi.org/10.1017/S0021859605005708).

PINHEIRO, José, BATES, Douglas, DEBROY, Saikat, SARKAR, Deepayan, EISPACK, HEISTERKAMP, Siem, VAN WILLIGEN, Bert, JOHANNES, et R CORE TEAM, 2022. *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models* [en ligne]. [Consulté le 16 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>

PLAZA-BONILLA, Daniel, NOLOT, Jean-Marie, RAFFAILLAC, Didier et JUSTES, Eric, 2017. Innovative cropping systems to reduce N inputs and maintain wheat yields by inserting grain legumes and cover crops in southwestern France. *European Journal of Agronomy* [en ligne]. janvier 2017. Vol. 82, pp. 331-341. [Consulté le 19 août 2022]. DOI [10.1016/j.eja.2016.05.010](https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.05.010). Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1161030116300995>

PLÉNET, Daniel et LEMAIRE, Gilles, 1999. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil* [en ligne]. 1 novembre 1999. Vol. 216, n° 1, pp. 65-82. [Consulté le 27 juin 2022]. DOI [10.1023/A:1004783431055](https://doi.org/10.1023/A:1004783431055). Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1023/A:1004783431055>

- PUECH, Camille, BRULAIRE, Arnaud, DE KEYSER, Eva, LE RALEC, Anne, PARAISSO, Jérôme, VENARD, Julie et FALOYA, Vincent, 2017. Conception de systèmes de culture innovants pour la filière des légumes industrie de plein champ en Bretagne. *Innovations Agronomiques* [en ligne]. 2017. Vol. 61, n° 2017, pp. 77-89. [Consulté le 9 juin 2022]. DOI [10.15454/1.517400969405515E12](https://doi.org/10.15454/1.517400969405515E12). Disponible à l'adresse : <http://www6.inra.fr/ciag/content/download/6295/46271/file/Vol61-7-Puech.pdf>
- R CORE TEAM, 2022. R: The R Project for Statistical Computing. [en ligne]. 2022. [Consulté le 16 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.r-project.org/>
- RAKOTOVOLOLONA, Lucia, 2018. *Quantification expérimentale et modélisation de la production, des flux d'eau et d'azote en systèmes de culture biologiques* [en ligne]. phdthesis. Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France. [Consulté le 21 juillet 2022]. Disponible à l'adresse : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02941743>
- RAVIER, Clemence, 2017. *Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation* [en ligne]. Theses. Université Paris Saclay (COMUE). [Consulté le 9 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02059334>
- RMT BIOMASSE et FRANCE MISCANTHUS, 2012. *Miscanthus et switchgrass Quelles opportunités pour ces cultures pérennes ?* Synthèse des présentations. In : . 2012. pp. 32.
- SDES (SERVICE DE LA DONNÉE ET DES ÉTUDES STATISTIQUES) (éd.), 2018. *Environnement & agriculture - Les chiffres clés – Édition 2018* [en ligne]. juin 2018. [Consulté le 9 juin 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-06/datalab-36-environnement-agriculture-les-cc-edition-2018-juin2018.pdf>
- SIELING, K, BÖTTCHER, U et KAGE, H, 2016. *Canopy traits in rye, triticale and wheat under varying N supply*. 2016. Vol. 14, n° 4, pp. 1467-1485.
- TILMAN, David, CASSMAN, Kenneth G., MATSON, Pamela A., NAYLOR, Rosamond et POLASKY, Stephen, 2002. *Agricultural sustainability and intensive production practices*. *Nature* [en ligne]. août 2002. Vol. 418, n° 6898, pp. 671-677. [Consulté le 17 août 2022]. DOI [10.1038/nature01014](https://doi.org/10.1038/nature01014). Disponible à l'adresse : <https://www.nature.com/articles/nature01014>
- TRIBOI, Eugène et TRIBOI-BLONDEL, Anne-Marie, [sans date]. *Systèmes de culture autonomes en azote et en énergie, réalité ou utopie?* . pp. 6.
- TRIBOUILLOIS, Hélène, COHAN, Jean-Pierre et JUSTES, Eric, 2016. *Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling*. *Plant and Soil* [en ligne]. 1 avril 2016. Vol. 401, n° 1, pp. 347-364. [Consulté le 18 août 2022]. DOI [10.1007/s11104-015-2734-8](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2734-8). Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2734-8>
- VAN ITTERSUM, M. K. et RABBINGE, R., 1997. *Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations*. *Field Crops Research* [en ligne]. 1 juin 1997. Vol. 52, n° 3, pp. 197-208. [Consulté le 8 août 2022]. DOI [10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3). Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429097000373>
- ZHAO, Ben, 2014. *Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley*. *Field Crops Research* [en ligne]. 1 avril 2014. Vol. 160, pp. 64-72. [Consulté le 11 juillet 2022]. DOI [10.1016/j.fcr.2014.02.016](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.02.016). Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429014000549>

Résumé

Le projet System-Eco+ a proposé d'étudier, sur le dispositif SOERE ACBB de INRAE des Hauts-de-France, 4 systèmes de culture, deux en agriculture biologique (AB) (T7 et T8) et deux en systèmes intermédiaires dit à bas intrants (T4 et T5). Ils ont été comparés à quatre autres systèmes (T1, T2, T3 et T6) gérés de manière conventionnelle. Après analyses bibliographiques, nous avons émis les hypothèses selon lesquels les différences de rendement observées entre les différents systèmes sont expliquées par la fertilisation azotée (H1) et par la compétition des adventices (H1'). Aussi, le calcul de l'indice de nutrition azotée (INN) nous a permis d'évaluer l'état de nutrition azotée de chaque traitement pour chaque campagne. Tandis que la biomasse d'adventices mesurée nous a renseignés sur le niveau de la compétition pour les ressources nutritives. Les résultats ont montré qu'effectivement la fertilisation azotée est le facteur qui explique le mieux les différences de rendement observées entre les traitements. Toutefois, grâce à une bonne gestion des adventices, la compétition de celles-ci n'influence pas les rendements de manière significative, que l'on soit en agriculture conventionnelle, en AB ou en systèmes à bas intrants. Par ailleurs, les précédents légumineuses offrent des alternatives pour pallier au problème de déficit azoté affrontés par les deux derniers systèmes sus-mentionnés.

Mots-clés : systèmes de culture, agriculture biologique, System-Eco+, INN, précédents légumineuses

Abstract

The System-Eco+ project proposed to study, on the SOERE ACBB device of INRAE in Hauts-de-France, four cropping systems, two in organic agriculture (T7 and T8) and two in intermediate systems known as low-input (T4 and T5). They were compared to four other systems (T1, T2, T3 and T6) managed conventionally. After literature reviews, we hypothesized that the yield differences observed between the different systems are explained by nitrogen fertilization (H1) and by weed competition (H1'). Also, the calculation of the nitrogen nutrition index (NNI) allowed us to evaluate the nitrogen nutrition status of each treatment for each season. While the weed biomass measured gave us information on the level of competition for nutrient resources. The results showed that nitrogen fertilization is indeed the factor that best explains the yield differences observed between treatments. However, due to good weed management, weed competition did not significantly influence yields under either conventional, organic or low-input systems. Moreover, the legume precedents offer alternatives to overcome the problem of nitrogen deficit faced by the last two systems mentioned above.

Keywords: cropping systems, organic agriculture, System-Eco+, NRI, legume precedents

Annexes

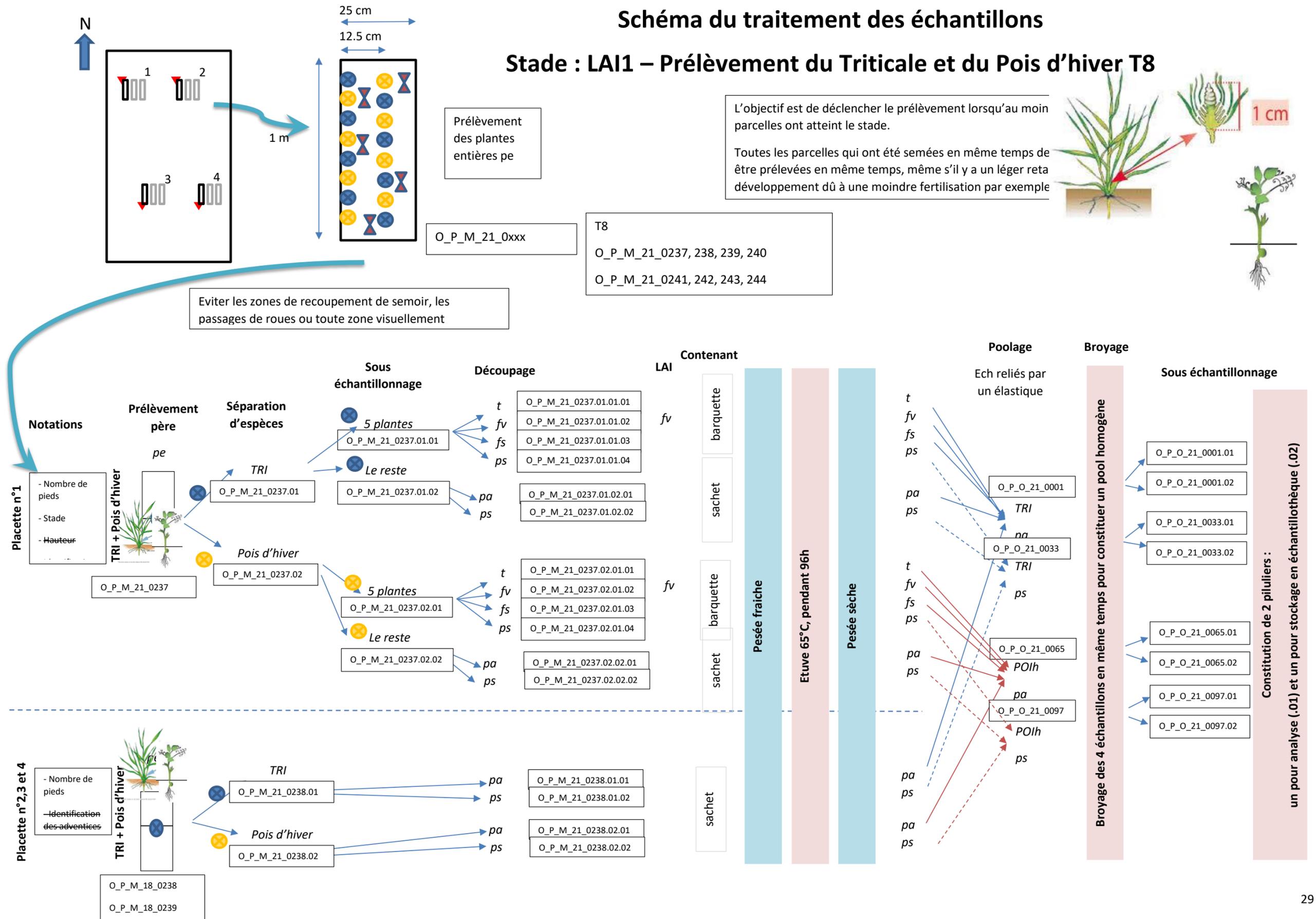
Annexe 1 : Succession culturale sur le SOERE ACBB de 2010 à 2021

	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
	CI	CP	CI	CP	CI	CP	CI	CP	CI	CP	CI	CP
T1	<i>Mout</i>	Pois		Blé	Colza		<i>Mout</i> + <i>Trèfle</i>	Orge	<i>Avoine</i>	Maïs grain		Blé
T2	<i>Mout</i>	Pois		Blé	Colza		<i>Mout</i> + <i>Trèfle</i>	Orge	<i>Avoine</i>	Maïs grain		Blé
T3	<i>Mout</i>	Pois		Blé	Colza		<i>Mout</i> + <i>Trèfle</i>	Orge	<i>Avoine</i>	Maïs ensilage		Blé
T4	<i>Mout</i>	Pois		Blé	Colza		<i>Mout</i> + <i>Trèfle</i>	Orge	<i>Avoine</i>	Maïs grain		Blé
T5	<i>Mout</i>	Pois		Blé	Colza		<i>Trèfle</i>	Orge	<i>Vesce</i>	Maïs grain		Blé
T6	<i>Mout</i>	Swi	Swi	Swi	Swi	Swi	Swi	Swi	Swi	Swi	Swi	Swi

	2016		2017		2018		2019		2020		2021	
	CI	CP	CI	CP	CI	CP	CI	CP	CI	CP	CI	CP
T1	<i>Mout</i>	Pois		Colza		Blé	<i>Sarrasin</i>	Orge	<i>Mout</i>	Maïs grain		Blé
T2	<i>Mout</i>	Pois		Colza		Blé	<i>Sarrasin</i>	Orge	<i>Mout</i>	Maïs grain		Blé
T3	<i>Mout</i>	Pois		Colza		Blé	<i>Sarrasin</i>	Orge	<i>Mout</i>	Maïs ensilage		Blé
T4	<i>Mout</i>	Pois		Colza		Blé	<i>Sarrasin</i>	Orge	<i>Mout</i>	Maïs grain		Blé
T5	<i>Mout</i>	Luzerne	Luzerne	Luzerne		Blé	<i>Avoine</i> + <i>Vesce</i>	Orge	<i>Phacélie</i> + <i>Vesce</i>	Maïs grain		Blé
T6		Pois		Colza		Blé	<i>Sarrasin</i>	Orge	<i>Mout</i>	Maïs ensilage		Blé
T7	<i>Mout</i>	Pois		Colza + lég comp		Blé	<i>Trèfle</i> + <i>Vesce</i>	Orge	<i>Phacélie</i> + <i>Vesce</i>	Maïs grain		Triticale
T8	<i>Mout</i>	Luzerne	Luzerne	Luzerne	<i>Colza</i>	Maïs grain		Orge	<i>Trèfle</i>	Maïs grain		Triticale + Pois h

Schéma du traitement des échantillons

Stade : LAI1 – Prélèvement du Triticale et du Pois d'hiver T8



Annexe 3: PMG et nombre de grains par m² par campagne et par traitement

Culture	Traitement	Poids de 1000 grains (kg)			Nb _g		
2016 Pois	T1	220.6	NA	A	1074	NA	A
	T2	227.3	(19.97)	A	1014	(143)	A
	T3	225.9	(4.37)	A	1041	(242)	A
	T4	221.6	(3.43)	A	1187	(91)	A
	T6	202.6	(21.85)	A	742	(269)	A
2017 Colza	T1	4.6	(0.41)	A	61239	(21260)	A
	T2	4.6	(0.59)	A	59279	(14954)	A
	T3	5.0	(1.01)	A	51613	(5734)	A
	T4	5.1	(0.74)	A	59053	(9966)	A
	T6	5.2	(0.65)	A	68826	(5595)	A
2018 Blé	T1	43.3	(0.86)	A	22355	(1103)	B
	T2	43.1	(1.15)	A	22584	(537)	B
	T3	42.4	(0.81)	A	21413	(1458)	B
	T4	43.7	(1.02)	A	15839	(288)	A
	T5	48.1	(0.78)	B	11952	(1807)	A
	T6	43.2	(1.28)	A	20415	(3934)	B
	T7	41.7	(0.56)		6868	(565)	
2019 Orge	T1	43.5	(1.05)	B	14079	(2335)	B
	T2	39.6	(0.86)	A	10251	(1862)	A
	T3	42.1	(2.13)	AB	10285	(1680)	A
	T4	43.0	(0.62)	B	10852	(2009)	A
	T5	42.4	(0.38)	B	14049	(1499)	B
	T6	43.5	(1.27)	B	13700	(858)	B
	T7	43.6	(0.40)	a	11108	(596)	B
	T8	45.5	(1.39)	a	9130	(1019)	A
2020 Maïs	T1	257.0	(3.81)	B	2946	(470)	AB
	T2	259.1	(6.59)	B	3035	(238)	AB
	T4	247.3	(12.01)	AB	2537	(281)	A
	T5	233.9	(4.90)	A	3085	(198)	B
	T7	306.6	(10.77)	b	2322	(46)	A
T8	286.9	(11.95)	a	2054	(141)	A	
2021 Blé	T1	40.2	(0.76)	B	26954	(2096)	C
	T2	40.0	(0.60)	B	24293	(2456)	BC
	T3	38.9	(0.95)	AB	26307	(2492)	BC
	T4	37.6	(1.11)	AB	18489	(1132)	A
	T5	35.2	(3.85)	A	21445	(3122)	AB
	T6	38.7	(0.33)	AB	26966	(1910)	C
2021 Triticale	T7	41.3	(0.60)	a	9597	(927)	A
	T8	49.2	(0.72)	b	7745	(1998)	A

Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'écart type entre parcelles d'un même traitement. Les lettres indiquent les différences significatives entre traitement ($p < 0.05$, majuscules pour les traitements T1 à T6, minuscules pour les traitements T7 et T8).

Annexe 4: Indice de Nutrition Azotée par traitement et par campagne

Campagne Espèce	Traitement	INN		
2016 Pois	T1	0.76	(0.07)	BC
	T2	0.68	(0.08)	AB
	T3	0.66	(0.04)	AB
	T4	0.82	(0.08)	C
	T6	0.59	(0.11)	A
	T7	0.69	(0.06)	
	2017 Colza	T1	0.90	(0.11)
T2		0.89	(0.10)	C
T3		0.84	(0.07)	BC
T4		0.65	(0.06)	A
T6		0.73	(0.05)	AB
T7		0.46	(0.05)	
2018 Blé	T1	0.93	(0.03)	C
	T2	0.90	(0.04)	C
	T3	0.88	(0.07)	C
	T4	0.64	(0.03)	A
	T5	0.68	(0.04)	AB
	T6	0.82	(0.12)	BC
	T7	0.37	(0.01)	
2019 Orge	T1	0.74	(0.04)	B
	T2	0.72	(0.09)	B
	T3	0.72	(0.02)	B
	T4	0.45	(0.02)	A
	T5	0.67	(0.02)	B
	T6	0.74	(0.01)	B
	T7	0.52	(0.02)	B
	T8	0.45	(0.03)	A
2020 Maïs Grain	T1	0.77	(0.05)	C
	T2	0.75	(0.04)	BC
	T4	0.57	(0.06)	A
	T5	0.65	(0.04)	AB
	T7	0.69	(0.03)	A
Maïs Ensilage	T8	0.73	(0.03)	B
	T3	0.66	(0.06)	A
2021 Blé	T6	0.72	(0.05)	B
	T1	0.81	(0.08)	B
	T2	0.84	(0.04)	B
	T3	0.93	(0.09)	B
	T4	0.53	(0.03)	A
	T5	0.56	(0.02)	A
Triticale 2021	T6	0.84	(0.13)	B
	T7	0.29	(0.02)	A
	T8	0.29	(0.02)	A

Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'écart type entre parcelles d'un même traitement. Les lettres indiquent les différences significatives entre traitement ($p < 0.05$, majuscules pour les traitements T1 à T6, minuscules pour les traitements T7 et T8).

Annexe 5: Biomasse d'adventices par campagne et par traitement

Campagne	Traitement	Biomasse (t MS ha ⁻¹)		
2019	T1	0.00	(0.00)	A
	T2	0.15	(0.16)	A
	T3	0.20	(0.13)	A
	T4	0.11	(0.16)	A
	T5	0.00	(0.00)	A
	T6	0.18	(0.07)	A
	T7	0.03	(0.05)	A
	T8	0.01	(0.00)	A
2020	T1	0.02	(0.04)	A
	T2	0.04	(0.04)	A
	T3	0.02	(0.02)	A
	T4	0.25	(0.17)	B
	T5	0.00	(0.01)	A
	T6	0.05	(0.03)	A
	T7	0.05	(0.09)	A
	T8	0.00	(0.00)	A
2021	T1	0.00	(0.00)	A
	T2	0.06	(0.06)	AB
	T3	0.00	(0.00)	A
	T4	0.09	(0.07)	B
	T5	0.00	(0.00)	A
	T6	0.01	(0.01)	A
	T7	0.00	(0.00)	A
	T8	0.00	(0.00)	A

Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'écart type entre parcelles d'un même traitement. Les lettres indiquent les différences significatives entre traitement ($p < 0.05$, majuscules pour les traitements T1 à T6, minuscules pour les traitements T7 et T8).

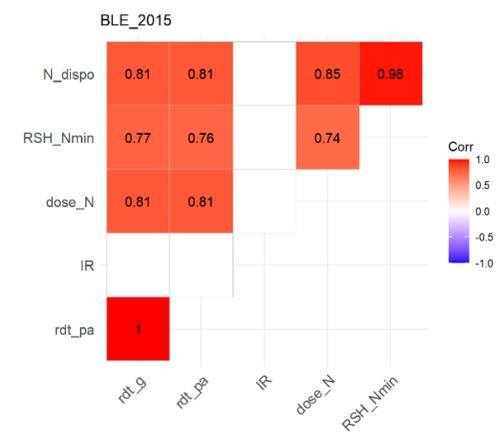
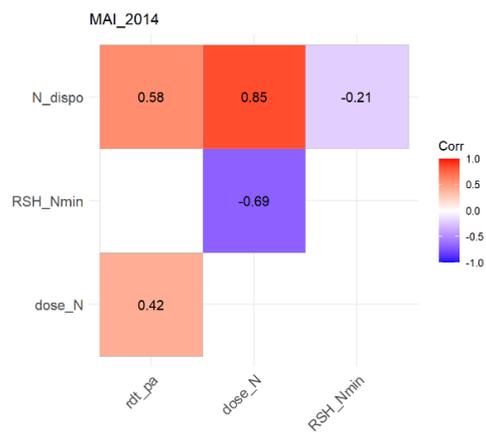
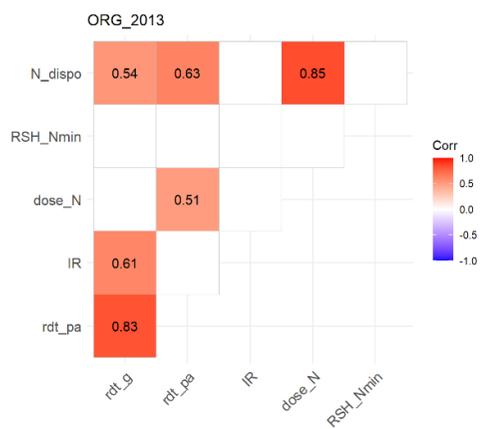
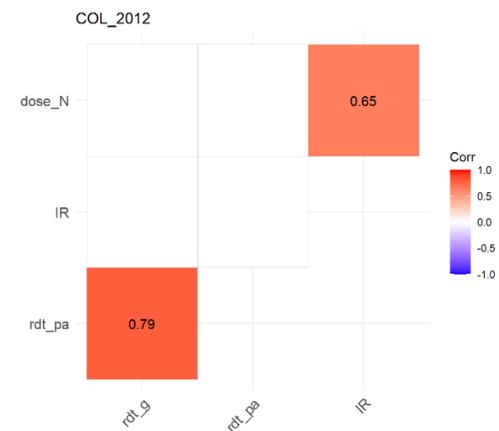
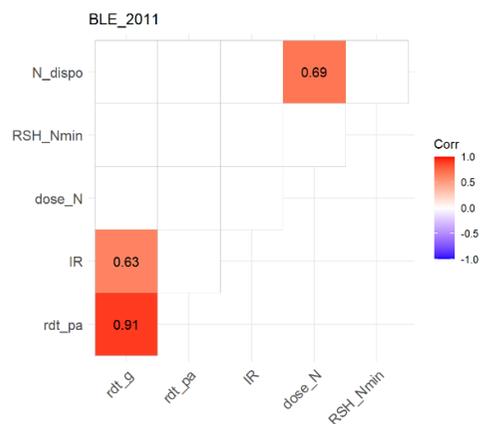
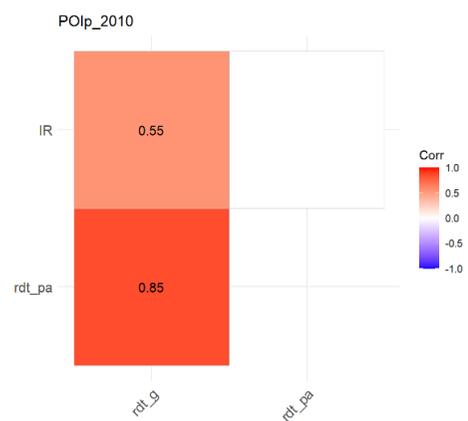
Annexe 6: Reliquats sortie d'hiver mesurés par année

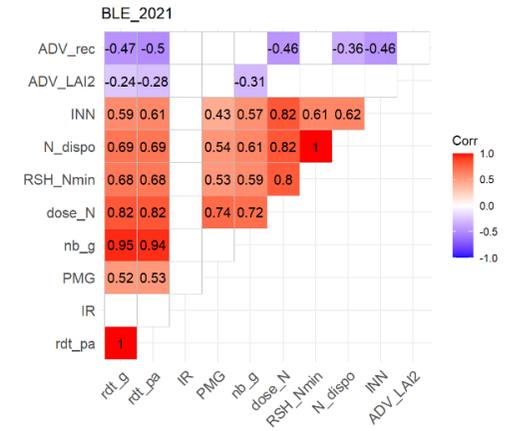
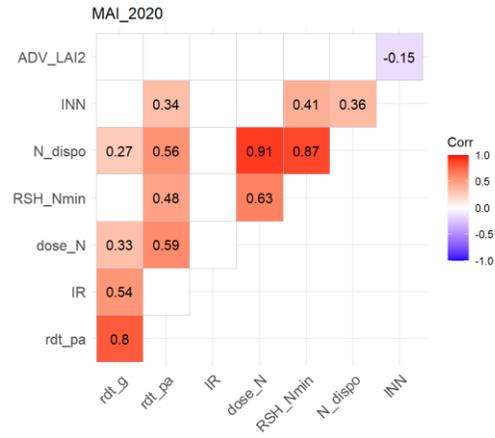
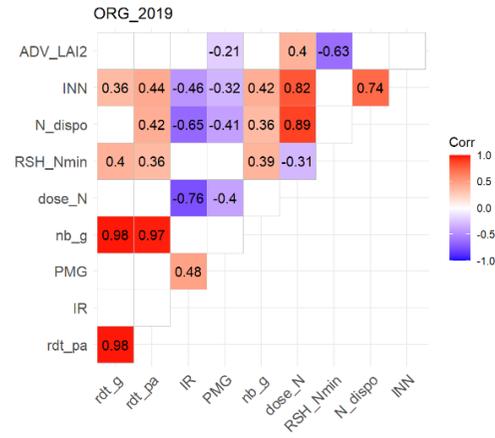
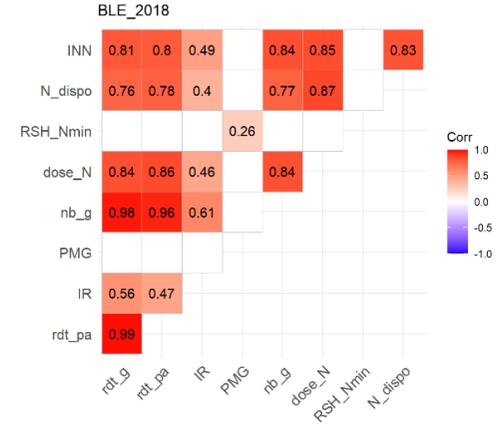
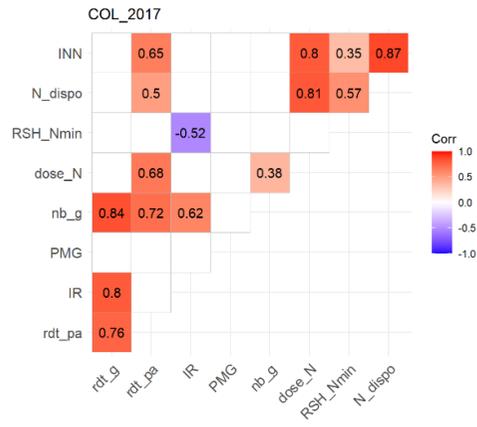
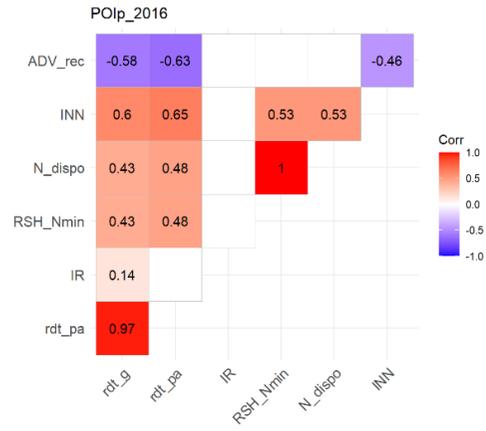
Campagne	Traitement	Stock d'azote minérale (kg ha ⁻¹)		
2011	T1	118.29	(5.31)	B
	T2	109.81	13.52	B
	T3	117.95	16.69	B
	T4	115.70	19.57	B
	T5	117.95	16.74	B
	T6	78.63	7.25	A
2012	T3	36.22	10.80	A
	T4	26.12	3.48	A
2013	T1	50.82	10.30	AB
	T2	43.54	17.19	AB
	T3	35.18	9.68	A
	T4	46.06	4.61	AB
	T5	57.89	6.00	B
	T6	32.35	2.74	A
2014	T1	53.90	5.41	B
	T2	40.70	3.93	AB
	T3	41.34	8.16	AB
	T4	53.88	3.48	B
	T5	85.26	12.00	C
	T6	36.60	7.71	A

2015	T1	46.51	5.59	AB
	T2	51.19	11.13	AB
	T3	51.28	9.41	B
	T4	35.18	2.61	A
	T5	40.06	3.44	AB
	T6	41.34	5.59	AB
2016	T1	49.07	2.69	C
	T2	37.35	7.51	ABC
	T3	24.51	5.92	A
	T4	44.12	5.36	BC
	T5	46.32	8.03	C
	T6	32.44	6.17	AB
	T7	39.94	12.83	A
	T8	45.35	10.40	A
2017	T1	56.16	24.93	AB
	T2	78.69	29.84	B
	T3	45.04	4.97	AB
	T4	49.23	12.57	AB
	T5	62.25	18.14	AB
	T6	39.72	4.13	A
	T7	44.49	14.14	A
	T8	44.83	11.59	A
2018	T1	79.47	8.73	A
	T2	79.92	13.63	A
	T3	78.44	20.36	A
	T4	49.72	3.78	A
	T5	140.45	39.20	B
	T6	63.63	13.74	A
	T7	58.00	6.11	A
	T8	105.23	35.96	A
2019	T1	58.19	12.54	B
	T2	38.64	8.46	A
	T3	35.21	11.65	A
	T4	42.36	8.37	AB
	T5	119.61	2.34	C
	T6	38.60	5.10	A
	T7	49.62	12.54	A
	T8	44.27	7.81	A
2020	T1	95.43	13.29	B
	T2	108.21	11.16	B
	T3	95.23	15.67	B
	T4	65.67	2.30	A
	T5	92.35	7.48	B
	T6	103.20	8.56	B
	T7	90.37	5.55	A
	T8	61.11	15.19	A
2021	T1	120.32	29.39	C
	T2	109.22	9.42	BC
	T3	104.15	16.61	BC
	T4	58.44	12.18	A
	T5	82.30	5.28	AB
	T6	119.44	12.19	C
	T7	48.48	26.15	A
	T8	46.70	32.20	A

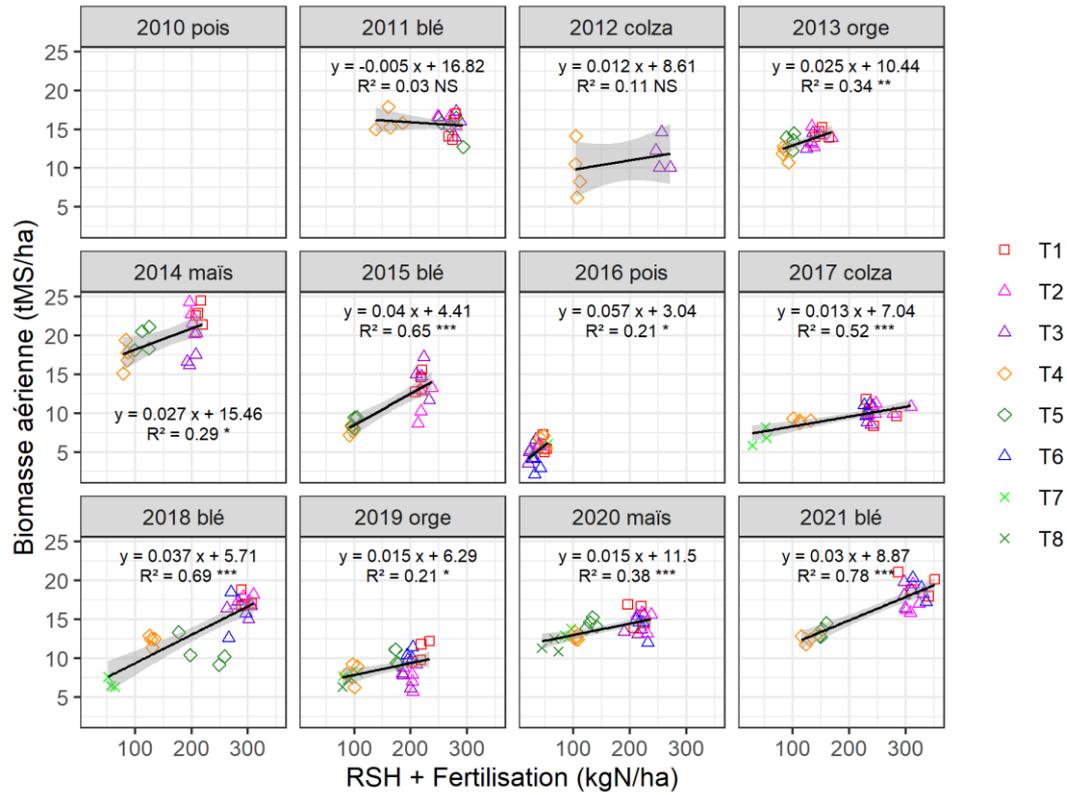
Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'écart type entre parcelles d'un même traitement. Les lettres indiquent les différences significatives entre traitement ($p < 0.05$, majuscules pour les traitements T1 à T6, minuscules pour les traitements T7 et T8).

Annexe 7: Matrice de corrélation par campagne





Annexe 8 : Relation entre « RSH + Ferti » et biomasse aérienne



Annexe 9 : Biomasse d'adventices mesurée avant semis en 2017

