



Adaptation méthodologique de l'ACV aux associations céréale-légumineuse en relais : exemple de la luzerne semée sous couvert de blé tendre d'hiver en Rhône-Alpes

Clara Khamvongsa

► To cite this version:

Clara Khamvongsa. Adaptation méthodologique de l'ACV aux associations céréale-légumineuse en relais : exemple de la luzerne semée sous couvert de blé tendre d'hiver en Rhône-Alpes. Sciences agricoles. 2014. dumas-01083812

HAL Id: dumas-01083812

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01083812>

Submitted on 18 Nov 2014

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.

**AGROCAMPUS
OUEST**

☒ **CFR Angers**

☐ **CFR Rennes**



Année universitaire : 2013.-2014.

Spécialité : Horticulture.....

Spécialisation (et option éventuelle) :

Sciences et Productions Végétales,
Ingénierie des Agrosystèmes

Mémoire de Fin d'Études

☒ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Adaptation méthodologique de l'ACV aux associations céréale-légumineuse en relais - Exemple de la luzerne semée sous couvert de blé tendre d'hiver en Rhône-Alpes

Par : Clara KHAMVONGSA

Soutenu à Rennes le* 17/09/2014

Devant le jury composé de :

Président :

Maître de stage : Christophe NAUDIN

Enseignant référent : Philippe Leterme

Autres membres du jury (Nom, Qualité) : Matthieu Carof, enseignant-chercheur en agronomie ; Michael Corson, chercheur à l'UMR SAS de l'INRA de Rennes

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité :

☒ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible⁽¹⁾.

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant).

Date et signature du maître de stage⁽²⁾ : le 24/10/2014



Droits d'auteur :

L'auteur⁽³⁾ autorise la diffusion de son travail

☒ Oui ☐ Non

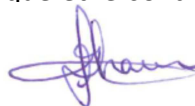
Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☒ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur : le 24/09/2014



Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant :

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Sommaire

Remerciements

Sigles et abréviations

INTRODUCTION	1
I. PRESENTATION DU PROJET ET ETAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES.....	1
A. Présentation du projet.....	1
B. Etat des connaissances sur les associations céréale-légumineuses	2
1) Généralités sur les associations de culture.....	2
2) Les interactions au sein des associations	2
3) Complémentarité pour les ressources en azote	3
4) Cas des associations céréale-légumineuse en relais : exemple de la luzerne semée sous couvert de blé tendre.....	3
5) Performances des associations.....	4
C. Etat des connaissances sur les analyses de cycle de vie	5
1) Définition	5
2) Pourquoi choisir l'ACV ?	5
3) Les 4 étapes de l'ACV	5
4) L'ACV en agriculture	7
D. Problématique et hypothèses.....	7
II. MATERIEL ET METHODES.....	9
A. Méthodes de comparaison des impacts	9
B. Contextualisation de l'étude.....	9
C. Description des 4 étapes de l'ACV	9
1) Définition des objectifs et du système	9
2) Inventaires des émissions et extractions	11
3) Analyse de l'impact environnemental	12
4) Interprétation des résultats	12
III. RESULTATS DES ANALYSES DE CYCLE DE VIE	13
A. Comparaison à l'échelle de la culture	13
1) Impacts exprimés en ha de terres cultivées pendant un an	13
2) Impacts exprimés en kg de matière sèche de produits récoltés.....	15
B. Comparaison à l'échelle de la succession [blé-luzerne]	17
1) Impacts exprimés en ha de terres cultivées pendant un an	17
2) Impacts exprimés en kg de matière sèche de produits récoltés.....	17
IV. Discussion.....	18
A. Impact environnemental et méthodes.....	18
1) Bilan sur les deux échelles de comparaisons	18
2) Unités fonctionnelles et impact.....	18
B. Limites de l'étude.....	19
1) Limites des méthodes d'ACV proposées	19
2) Incertitudes des données	21
C. Perspectives.....	21
CONCLUSION.....	22
Bibliographie.....	23
Annexes	

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Christophe Naudin, mon maître de stage pour son encadrement rigoureux ainsi que son aide. Je le remercie également pour sa disponibilité tout au long du projet.

Je remercie l'ensemble du panel d'experts sollicités au cours de cette étude et sans qui ce projet n'aurait pu se dérouler. Je souhaiterais les remercier pour leur engagement et leur disponibilité.

Plus particulièrement je souhaiterais remercier Florian Celette, enseignant-chercheur de l'ISARA Lyon, pour son aide dans le recrutement du panel d'expert en Rhône-Alpes et son accueil lors de la réunion organisée sur Lyon.

Je voudrais chaleureusement remercier Hayo van der Werf pour ses précieux conseils sur la méthodologie utilisée dans ce projet et sa gentillesse.

Merci également à l'ensemble du laboratoire LEVA et plus généralement à toute l'équipe du groupe ESA pour son accueil durant mon stage.

Enfin j'aimerais remercier ma famille pour son soutien durant toute ma scolarité.

SIGLES ET ABREVIATIONS

AB: Agriculture Biologique

ACR: Agriculture Conventionnelle Raisonnée

ACV: Analyse de Cycle de Vie

AR: Association en Relais

CH₄: méthane

CO: monoxyde de carbone

CO₂: dioxyde de carbone

CP: Culture Pure

CR: Culture en Relais

DiVéRé: Diversité Végétale pour concevoir des systèmes de culture Résilients et Economes

ESA: Ecole Supérieure d'Agriculture

eq : équivalent

Fésia: Fédération des Écoles Supérieures d'Ingénieurs en Agriculture

FSN: Fixation Symbiotique de l'Azote

ha: hectare

INP: Institut National Polytechnique

INRA: Institut National de la Recherche Agronomique

ISA: Institut Supérieur d'Agriculture

ISARA: Institut Supérieur d'Agriculture et d'agroalimentaire en Rhône-Alpes

ISO: *International Organization for Standardization* - Organisme International de Normalisation

LEVA: Légumineuses, Ecophysiologie Végétale, Agroécologie

kg: kilogramme

m²: mètre carré

m²a: mètre carré année

MJ: Méga Joules

MS: Matière Sèche

N₂: diazote

NH₃: Ammonium

NO₂: dioxyde d'azote

NO₃: nitrate

NO_x: oxyde d'azote

N₂O: protoxyde d'azote

PO₄: ion phosphate

UF: Unité Fonctionnelle

UMR SAS: Unité Mixte de Recherche Sol Agro et hydrosystème Spatialisation

INTRODUCTION

La gestion et la protection de l'environnement sont de nos jours des thématiques de plus en plus récurrentes dans le monde politique et dans nos sociétés. Le bilan environnemental actuel est plutôt alarmant : pollution de l'air, de l'eau, des êtres vivants, épuisement des ressources non renouvelables, diminution de la biodiversité et changement climatique.

En 2012, en France, l'agriculture serait responsable de 97% des émissions nationales en ammonium dans l'air (NH_3), 89% de celles en protoxyde d'azote (N_2O), de 67% de celles en méthane (CH_4) et de 10% des émissions en oxydes d'azote (NO_x) (Nicco *et al.*, 2014). Au cours du $\text{XX}^{\text{ème}}$ siècle l'utilisation de produits de synthèse et de machines en agriculture s'est intensifiée partout dans le monde (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009). Cette intensification a conduit, dans certaines zones, à l'apparition de nouveaux problèmes comme l'érosion des sols, la pollution environnementale par des pesticides et des engrais et aussi à la sélection d'adventices, maladies et ravageurs résistants aux traitements chimiques. Aujourd'hui la pression sur le secteur agricole est forte pour réduire la dépendance de ces systèmes aux intrants. Avec une population mondiale en croissance, le monde agricole fait face à la problématique suivante « pouvons-nous produire plus avec moins d'intrants ? ». Pour répondre à cette question, les scientifiques se tournent notamment sur la conception de systèmes de production innovants, notamment basés sur l'utilisation de régulations biologiques en substitution d'une partie des intrants chimiques de synthèse. C'est dans ce contexte que les associations de cultures et plus particulièrement les associations céréale-légumineuse intéressent de près la recherche.

Les performances en terme de rendement des associations céréale-légumineuse ont été prouvées dans un grand nombre d'études (Bedoussac and Justes, 2010 ; Corre-Hellou *et al.*, 2006 ; Jensen, 1996 ; Ofori and Stern, 1987). Ces associations pourraient constituer une solution pour concilier productivité et préservation de l'environnement puisqu'elles permettent l'obtention de rendements égaux à supérieurs à la moyenne des rendements des cultures pures correspondantes avec un niveau d'intrants inférieur ou égal. Si les bénéfices des associations sur l'environnement sont souvent mentionnés, ils n'ont cependant pas souvent été quantifiés à l'échelle du cycle de vie des produits issus de l'association.

Le laboratoire LEVA (Légumineuses, Ecophysiologie Végétale, Agroécologie) du groupe ESA (Ecole Supérieure d'Agriculture) d'Angers s'intéresse à ces systèmes de culture intégrant des légumineuses. Dans l'objectif de pouvoir développer à terme les associations céréale-légumineuse, un des axes actuel de recherche du LEVA vise à évaluer les bénéfices sur l'environnement que peuvent engendrer de type de cultures, axe dans lequel ce stage de fin d'étude s'intègre. La mission du stage consistera alors à évaluer les impacts environnementaux de différentes formes d'insertion de légumineuses dans des systèmes de cultures céréalières.

I. PRESENTATION DU PROJET ET ETAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES

A. PRESENTATION DU PROJET

Ce stage de fin d'étude s'inscrit dans le cadre du programme DiVéRE (Diversité Végétale pour concevoir des systèmes de culture Résilients et Economes) piloté par la Fésia (Fédération des Écoles Supérieures d'Ingénieurs en Agriculture) un réseau rassemblant 4 grandes écoles d'ingénieurs des Sciences du Vivant, Agriculture, Agroalimentaire et Environnement (Groupe ESA à Angers, ISA à Lille: Institut Supérieur d'Agriculture, INP à Purpan : Institut National Polytechnique et ISARA à Lyon : Institut Supérieur d'Agriculture et d'agroalimentaire en Rhône-Alpes). Ce programme résulte d'un besoin de comprendre comment la diversité végétale peut être valorisée pour concevoir des systèmes de culture plus

stables en production, plus économes en intrants et plus résilients face à aux aléas climatiques et économiques.

Le laboratoire LEVA du groupe ESA, en vue de ses compétences et de ses connaissances sur les associations de culture céréale-légumineuse, porte le volet d'évaluation environnementale des systèmes céréaliers diversifiés par insertions de légumineuses.

Cette évaluation est réalisée par un outil appelé Analyse de Cycle de Vie (ACV). Le travail récent de Naudin *et al.*, (2014) concernant le calage méthodologique de l'ACV appliquée aux couverts plurispécifiques a conduit à des résultats encourageants mais à consolider, concernant les impacts sur l'environnement des associations simultanées blé-pois en comparaison aux cultures pures correspondantes. Il s'agit à présent d'évaluer par ACV différents mélanges d'espèces à base de légumineuses avec des conduites contextualisées à différents systèmes de culture et différentes régions françaises.

Ce travail de contextualisation ayant déjà été initié par Le Breton (2011) sur l'objet des associations simultanées, l'objectif de ce stage consistera à (i) consolider ces évaluations en les réalisant dans différents contextes pédoclimatiques, et (ii) d'étendre les évaluations au cas des associations en relais. Les résultats obtenus devront permettre de générer des connaissances scientifiques sur les impacts environnementaux qu'induisent les associations céréale-légumineuses pour les chercheurs, agriculteurs et autres acteurs des filières céréales et légumineuses ainsi que permettre de contribuer au développement de ces systèmes. Seul le travail d'adaptation méthodologique de l'ACV aux cultures en relais sera présenté dans ce mémoire.

B. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES ASSOCIATIONS CEREALE-LEGUMINEUSES

1) Généralités sur les associations de culture

Une association de culture se définit par la culture simultanée d'au moins deux espèces dans un espace donné durant une période significative de leurs cycles de croissance sans nécessairement être semées et récoltées en même temps (Willey, 1979). Il en existe différents types selon les cultures associées (associations de cultures pérennes, associations de culture pérenne avec une culture annuelle ou pluriannuelle, ou encore association de deux cultures annuelles ou bisannuelles) et selon l'organisation des cultures entre elles. Andrew et Kassams (1976) ont défini 4 types d'organisation d'une association :

- **Les associations en mélanges:** Les espèces de l'association sont mélangées de façon aléatoire dans un espace donné.
- **Les associations en rangs:** Les espèces sont séparées en rangs qui s'alternent dans l'espace.
- **Les associations en bandes:** Les espèces sont séparées en bandes (plusieurs rangs pour chaque espèce) qui s'alternent dans l'espace
- **Les associations en relais:** Les espèces ont des cycles de croissance différents, ce qui permet de semer une espèce en cours de la culture d'une autre espèce. Les cultures sont en place sur une période temporelle plus importante et se chevauchent sur une partie de leurs cycles de culture.

Les 50 dernières années l'agriculture tempérée des pays développés s'est intensifiée en termes de mécanisation et d'utilisation d'intrants de synthèse, ce qui a eu pour conséquence de faire disparaître les associations des systèmes de culture (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009) hormis sous formes de prairies dans les systèmes fourragers en polyculture-élevage (Anil *et al.*, 1998) et en agriculture biologique (avec ou sans élevage).

2) Les interactions au sein des associations

La culture de deux espèces pendant une période donnée induit différentes interactions

entre celle-ci. D'après Vandermeer (1989) il en existe deux grands types :

- la **facilitation** : lorsqu'une espèce modifie son environnement de façon favorable pour l'espèce partageant cet environnement. C'est le cas, par exemple d'une espèce qui va jouer un rôle de barrière à la propagation d'une maladie.
- la **compétition** : au contraire, il y aura compétition lorsqu'une espèce va modifier son environnement de façon défavorable à l'autre espèce. C'est le cas, par exemple, lorsqu'une espèce extrait une ressource du sol (l'azote ou eau par exemple) et que par conséquent cette ressource sera moins disponible, voire limitante, pour l'autre espèce.

Une association est intéressante lorsque la compétition interspécifique est plus faible que celle intraspécifique. Cela est possible si les deux espèces utilisent les ressources à différents moments, dans différentes parties du profil du sol ou utilisent des niches différentes des ressources du milieu, il s'agit du phénomène de complémentarité entre espèces (Anil et al., 1998; Jensen, 1996). Par exemple dans une association céréale-légumineuse, la légumineuse peut utiliser de l'azote issu d'une niche écologique différente que celle du blé si la compétition pour l'azote inorganique est trop importante et que les conditions pédoclimatiques le permettent (Corre-Hellou *et al.*, 2006 ; Ghaley *et al.*, 2005 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001; Ofori and Stern, 1987).

3) Complémentarité pour les ressources en azote

Une légumineuse, pour subvenir à ses besoins en azote peut en absorber sous forme inorganique par son système racinaire mais elle peut aussi bénéficier du diazote atmosphérique (N₂) grâce à sa relation mutualiste avec une bactérie du genre *Rhizobium*. Cette bactérie, attirée par une sécrétion plus importante d'acides aminés de la légumineuse, va infecter ses poils absorbants puis s'installer dans les nodosités formées sur les racines (Sprent, 1989). Le *Rhizobium* va alors pouvoir fixer le N₂ pour la légumineuse, mais cette dernière devra lui fournir en échange des photosynthétats. Cette capacité est à l'origine de la complémentarité des ressources en azote dans une association céréale-légumineuse et présente donc un intérêt particulier dans les systèmes où l'azote minéral du sol est une ressource limitée.

La fixation symbiotique de l'azote (FSN) dépend des conditions environnementales et notamment de la concentration en nitrates dans le sol. Dans un environnement riche en nitrates, la légumineuse privilégiera l'absorption racinaire ; au contraire, dans un sol pauvre en azote, la FSN sera favorisée (Jensen, 1996 ; Naudin *et al.*, 2011). La dynamique de disponibilité en nitrates dans le sol, et a fortiori la fertilisation azotée, va donc fortement influencer le comportement des espèces d'une association céréale-légumineuse. En effet, plusieurs études sur une association blé-pois simultanée ont montré qu'un apport d'azote réduisait l'activité de FSN, augmentait la compétitivité du blé en association récupérant plus de 90% de l'azote apporté (Ghaley *et al.*, 2005) avec pour conséquence une diminution de la proportion de pois dans le rendement total (Bedoussac and Justes, 2011; Corre-Hellou *et al.*, 2007; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001; Jensen, 1996; Naudin *et al.*, 2010). De plus, Hauggaard-Nielsen *et al.* (2001), Ghaley *et al.* (2005) et Naudin *et al.* (2010) ont montré que les avantages d'une association céréale-légumineuse en terme de rendement étaient maximaux en l'absence de fertilisation azotée et significativement réduit lors d'utilisation d'engrais azoté.

4) Cas des associations céréale-légumineuse en relais : exemple de la luzerne semée sous couvert de blé tendre

La légumineuse sous-semée dans une céréale croît généralement en 2 phases. La première correspond à la période comprise entre son semis et la floraison du blé et est

caractérisée par une forte compétition pour les ressources et notamment pour la lumière (Amossé *et al.*, 2013b ; Genest and Steppeler, 1973) et un développement lent de la légumineuse. La compétition exercée par la céréale sur la légumineuse à son installation favoriserait l'activité de FSN, cependant si la compétition est trop importante la réussite de l'implantation peut être compromise (Amossé, 2013). La seconde période s'étalant de la floraison du blé à la fin de la saison de croissance est marquée par l'accentuation de la croissance de la légumineuse. Cette accélération est plus importante après la récolte du blé, lorsque les conditions sont favorables (Amossé *et al.*, 2013a).

5) Performances des associations

Une association céréale-légumineuse grâce à une meilleure efficacité d'utilisation des ressources par rapport aux cultures pures permet d'obtenir des rendements supérieurs ou égaux et plus stables dans le temps que ceux obtenus avec les cultures pures correspondantes (Amossé *et al.*, 2013b; Bergkvist *et al.*, 2011; Eaglesham *et al.*, 1981; Ofori and Stern, 1987; Trenbath, 1974). Dans le cas particulier des cultures en relais (CR) où la période d'association est moins importante que pour des associations simultanées, les interactions complémentaires entre les espèces sont légèrement moins valorisées. L'intérêt d'une telle association réside surtout par une installation plus précoce de la légumineuse. La germination de la légumineuse aura lieu plus tôt, elle sera plus rapidement développée et ainsi une récolte sera possible l'année d'installation ce qui n'est pas le cas lorsque la luzerne est pure (Mauriès, 2003). De plus l'implantation d'une luzerne dans un couvert de blé réduit la durée totale de la rotation.

Les associations céréale-légumineuses vont aussi permettre de réduire les pertes dues aux maladies, ravageurs et adventices (Trenbath, 1993). Cet avantage est dû d'une part à une meilleure couverture du sol (Amossé *et al.*, 2013a; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001) et d'autre part à un effet rupture du cycle des adventices, maladies et ravageurs par diversification de la rotation ; notons que cet effet de rupture n'est pas propre à une association céréale-légumineuse mais qu'il est plutôt lié à la diversification de rotations céréalières (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001).

Les performances environnementales des cultures associées n'ont été que peu étudiées, voire pas dans le cas des associations en relais. Néanmoins, les résultats du travail de Le Breton (2011) montrent qu'une association simultanée blé-pois présente des impacts environnementaux potentiels inférieurs à ceux des cultures pures lorsqu'elles sont comparées à surface équivalente ou à production équivalente. Les réductions d'impacts observées sont de l'ordre de -7% à -77% en fonction d'une part du système de culture (biologique ou conventionnel) et de sa contextualisation à une région donnée, et d'autre part du type d'impact sur l'environnement. La conduite d'associations sans fertilisation azotée (ou avec très peu d'apport azoté), permet de réduire les impacts liés à la fabrication des engrais, à leurs transports, à leurs applications ainsi qu'aux émissions azotées qui en découlent (Le Breton, 2011; Pelzer *et al.*, 2012). Hartwig et Ammon (2002) montrent que la présence d'une culture plutôt qu'un sol nu dans une association en relais permet de mieux valoriser le stock d'azote et donc de limiter les pertes d'azote minéral par lixiviation, érosion et lessivage. Cependant à l'échelle de la succession de cultures, Nemecek *et al.* (2008) montrent que l'insertion d'une légumineuse dans un système de culture céréaliier induit un risque d'eutrophisation supérieur à celui d'une succession sans légumineuse.

Malgré les intérêts que semblent présenter les associations de cultures, elles demeurent peu répandues dans nos régions, principalement dû à des blocages aux niveaux de l'organisation de la filière. La production de connaissances précises sur les performances environnementales des associations pourrait être un argument en faveur de leur

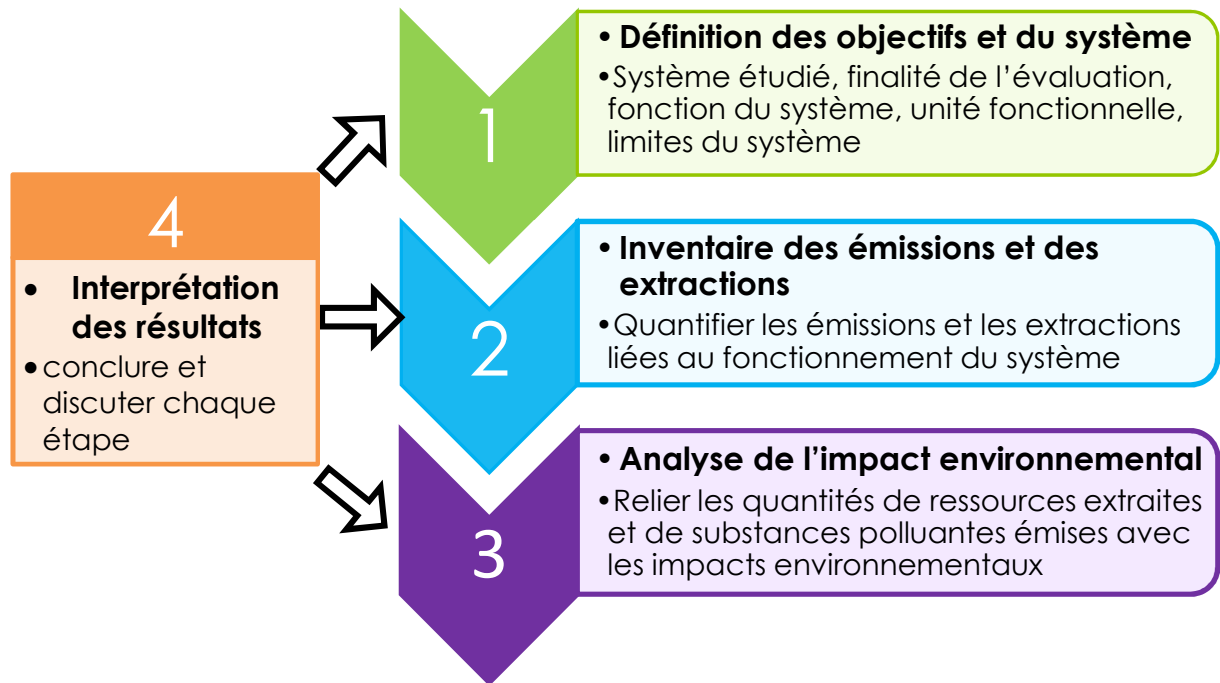


Figure 1: Représentation schématique des 4 étapes de l'Analyse de Cycle de Vie, d'après Jolliet et al., (2010)

développement, surtout dans le contexte politique actuel tourné vers le développement durable et la préservation de l'environnement.

C. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES ANALYSES DE CYCLE DE VIE

1) Définition

L'Analyse de Cycle de Vie (ou ACV) est une méthode d'évaluation globale de l'impact environnemental potentiel d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie (Jolliet *et al.*, 2010). L'ACV débute à l'extraction des ressources du produit, service, ou système considéré, passe par la production des infrastructures et des matières premières, la production en elle-même, le transport, le stockage et se termine avec les dispositifs de gestion des déchets, soit « du berceau à la tombe » (Nemecek *et al.*, 2011). Originellement conçue pour développer l'écoconception dans le milieu de l'industrie, son domaine d'étude s'étend depuis une trentaine d'année à l'agriculture. Depuis 2002, l'organisme international de normalisation (ISO) a mis en place une série de normes (ISO 14 040) afin de donner un cadre à l'ACV

2) Pourquoi choisir l'ACV ?

L'objectif de cette mission de stage consiste à évaluer les impacts environnementaux des associations en relais en comparaison avec les cultures pures. Cependant, il existe un grand nombre d'outils mis au point en agronomie. Ils se distinguent par le type d'indicateurs (basé sur les pratiques ou sur les émissions), par les délimitations du système étudié (l'exploitation, la parcelle, le cycle de production d'un produit, ...) ou par les objectifs environnementaux considérés (érosion du sol, émissions de gaz à effet de serre, conservation de la biodiversité naturelle, ...). Dans une étude comparative de 12 méthodes d'évaluation des impacts environnementaux réalisée par van der Werf et Petit (2002), les auteurs préconisent que pour « évaluer réellement l'impact environnemental », la méthode choisie doit considérer à la fois des effets locaux et des effets globaux, pour éviter tout risque de déplacement de pollution, ce qui est le cas de l'ACV. De plus, l'ACV est un outil normalisé qui va permettre de quantifier et de comparer les charges environnementales de différents systèmes entre eux (Jolliet *et al.*, 2010). Il faut toutefois souligner que l'ACV est une méthode prédictive qui permet donc de calculer des impacts potentiels et non pas réels. La méthode est basée sur des connaissances très fines qui peuvent être actualisées selon les mécanismes en jeu. Si les connaissances disponibles sur l'objet d'étude ne sont pas assez précises il est possible de poser des hypothèses, il faut toutefois être très prudent car tout choix méthodologique réalisé doit être reporté et explicité. Selon les normes ISO, la méthode doit être transparente. L'ACV représente un des outils d'aide dans la prise de décision et dans l'orientation politique de l'agriculture. D'après Pelletier (2008) cet outil pourrait permettre la diffusion de systèmes de culture plus durables et plus respectueux de l'environnement.

3) Les 4 étapes de l'ACV

Selon les normes de l'ISO, l'ACV est subdivisée en 4 grandes étapes, décrites ci-dessous (Figure 1).

Définition des objectifs et des frontières du système

Le but de cette première étape est de définir l'objectif de l'évaluation par ACV, le public visé mais surtout le système qui va être étudié. Plus précisément, dans cette étape doivent être explicités très clairement: l'objet d'étude, le(s) scénario(s) étudié(s), les limites spatio-temporelles ainsi que tous les processus pris en compte et non pris en compte (Jolliet *et al.*, 2010). Il sera nécessaire aussi de décrire la fonction de l'objet d'étude et l'unité fonctionnelle (UF) associée, qui servira à exprimer les impacts potentiels calculés par unité de

référence choisie, en cohérence avec la finalité de l'activité de production. Si l'objet d'étude est une culture de blé, la fonction pourrait être « produire du blé de qualité meunière » et les impacts pourront être exprimé pour « 1kg de grains de blé de qualité meunière », si cela correspond à l'UF.

Inventaires des émissions et des extractions

Cette seconde étape consiste à inventorier l'ensemble des ressources extraites et des substances émises au cours du cycle de vie de l'objet d'étude (Jolliet *et al.*, 2010). Il s'agit de calculer à partir de modèles les émissions et extractions directement liées à l'activité du système, comme par exemple calculer les émissions en NH₃ dues à l'épandage d'engrais azoté minéral mais aussi de calculer celles liées à la production des intrants tel que le processus de fabrication de l'engrais. La phase d'inventaire demande donc de recueillir un ensemble considérable de données. Dans le but de faciliter cette phase des bases de données ont été créées rassemblant des inventaires pour un grand nombre de processus (par exemple les bases Ecoinvent¹ ou AGRIBALYSE² utilisées en agriculture).

Analyse de l'impact environnemental

Une fois l'ensemble des substances émises et extraites quantifiées, il faut les relier avec les conséquences qu'elles ont sur l'environnement. Dans un premier temps ces substances vont être classées dans des catégories d'impact sur l'environnement intermédiaires (méthode de caractérisation dite *mid-point*), en cohérence avec les connaissances établies sur leur implication dans un ou plusieurs impacts environnementaux (comme par exemple le regroupement du CO₂, CO, N₂O et CH₄ dans la catégorie « changement climatique »). Pour chaque catégorie, chacune de ces substances vont être exprimées en kg de substances équivalentes, représentative de la catégorie et vont ensuite être pondérées par un facteur dit de caractérisation pour prendre en compte leur importance relative (Jolliet *et al.*, 2010). Par exemple, selon la méthode *mid-point* « CML IA baseline » conçue par le centre de sciences environnementales de l'université de Leiden, la quantité de N₂O, pour la catégorie « changement climatique », sera multipliée par un facteur de caractérisation égal à 298 signifiant que ce gaz à un potentiel à effet de serre 298 fois plus important que le CO₂, la molécule de référence pour le pouvoir de réchauffement global (PRG). Il est possible de poursuivre la classification des impacts en rassemblant les catégories intermédiaires en catégories de dommages (méthode dite *end-point*). Par exemple, les catégories intermédiaires écotoxicité humaine et formation d'oxydants photochimiques pourraient être regroupées dans la catégorie de dommage « santé humaine ». Les méthodes *end-point* entraînent une visualisation des résultats moins détaillée que les *mid-point*.

Il existe plusieurs méthodes de caractérisation qui se distinguent par les catégories d'impacts et/ou de dommages qu'elles prennent en compte et par les valeurs définies pour les facteurs de caractérisation. Un tableau résumant les caractéristiques des principales méthodes d'analyse de l'impact est disponible dans l'annexe I.

Dans le cas de systèmes où les produits finaux sont multiples (souvent le cas en agriculture), une étape d'allocation des impacts entre les coproduits s'ajoute à cette phase. Cette étape consiste à attribuer aux différents produits les charges environnementales qui les concernent. Il est fortement préconisé d'éviter l'allocation autant que possible puisqu'elle va entraîner des incertitudes sur les résultats finaux.

¹ Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2014). The ecoinvent Database. www.ecoinvent.org/database/ (consulté le 21/04/14)

² Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (2013). Agribalyse. www.ademe.fr/agribalyse (consulté le 21/04/14)

Interprétation des résultats

Cette dernière étape consiste à conclure et discuter sur l'étape d'analyse de l'impact afin de pouvoir identifier au cours de chaque étape du cycle de vie les leviers d'action sur lesquels il est possible d'intervenir pour réduire les impacts environnementaux ou de pouvoir aboutir sur une décision, suivant les objectifs de l'évaluation. Cette phase doit s'accompagner d'une analyse de l'incertitude des résultats et des limites de l'étude.

4) L'ACV en agriculture

La méthode d'ACV appliquée dans le secteur agricole présente des singularités par rapport à la méthode originelle. D'une part, les limites spatiales actuellement retenues, ne vont pas du berceau à la tombe mais du « berceau aux portes de l'exploitation » (Brentrup *et al.*, 2004; Charles *et al.*, 2006; Hayer *et al.*, 2010; Naudin *et al.*, 2014; Nemecek *et al.*, 2011). Si l'ACV ne s'étend pas « jusqu'à la tombe », c'est parce que les leviers possibles de diminution des impacts correspondent aux pratiques culturales.

Il est assez difficile de définir une fonction unique des systèmes agricoles étudiés et donc une unique unité fonctionnelle étant donné le caractère multifonctionnel d'une exploitation agricole. Généralement 4 grandes fonctions de l'agriculture se distinguent : une fonction de production, une fonction écologique, une fonction récréative et une fonction économique et sociale (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Le plus souvent la fonction de productivité (en kg de produits agricoles) et de management des terres (en ha de terre cultivée) sont étudiées (Charles *et al.*, 2006 ; Hayer *et al.*, 2010; Le Breton, 2011).

D'autre part la comparaison des impacts se fait bien souvent à l'échelle de la culture et beaucoup plus rarement à l'échelle du système. Dans l'étude de Nemecek *et al.* (2008) comparant les impacts entre des rotations avec ou sans légumineuses, les auteurs ont d'abord réalisé des ACV à l'échelle de la culture en considérant la période allant de la récolte de la culture précédente jusqu'à la récolte de la culture étudiée et ils ont ensuite additionné les impacts de chacune des cultures de la rotation. De cette façon, ils ont montré que la diversification des systèmes de cultures céréalières par l'introduction de légumineuses était globalement bénéfique pour l'environnement.

Les ACV appliquées à l'agriculture sont aujourd'hui sources de nombreuses recherches d'adaptations et d'améliorations méthodologiques. Les sujets abordés lors du dernier colloque sur les ACV dans le secteur agricole et agroalimentaire concernaient, entre autres, la volonté d'intégrer les deux autres dimensions de la durabilité (économique et sociale) dans la méthodologie de l'ACV (Badey *et al.*, 2013). Les principaux axes de recherche portent sur des corrections des modèles utilisés et des améliorations de la méthodologie, comme par exemple l'intégration des dimensions de temps et l'ouverture à tous types de systèmes de culture (Badey *et al.*, 2013; Naudin *et al.*, 2014).

D. PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES

L'augmentation perpétuelle des besoins en produits issus de l'agriculture a conduit au cours des 60 dernières années à une intensification de l'agriculture en termes de mécanisation et d'utilisation d'intrants chimiques. Cette intensification n'est pas sans conséquence : de fortes dégradations de l'environnement et des écosystèmes sont observées à travers le monde, mettant à terme en péril les capacités de production de nombreux territoires. La société est sensibilisée autour de ces problématiques environnementales et la demande autour de produits plus respectueux de l'environnement est de plus en plus pressante.

Avec une population mondiale prévue en 2050 autour de 9,8 milliards d'habitants (à plus ou moins 2 milliard selon le scénario) et une faible plausibilité d'augmenter les surfaces de terres cultivables, il faudrait alors multiplier la production agricole pour pouvoir nourrir le monde (Collomb, 1999). Les enjeux de l'agriculture d'aujourd'hui et de demain sont donc de

produire plus tout en minimisant nos impacts sur l'environnement.

La réintégration d'associations de culture céréale-légumineuse dans nos systèmes de culture pourrait être l'une des solutions à ces enjeux. Cependant le manque de connaissances sur les bénéfices environnementaux des associations céréale-légumineuses constitue un frein à leur développement. Le projet lancé par DiVÉRE et piloté par le LEVA a pour objectif de répondre à la problématique suivante :

Comment évaluer par Analyse de Cycle de Vie, les bénéfices environnementaux tirés de la diversification des cultures de blé d'hiver par introduction de légumineuses? Exemple avec la luzerne semée sous couvert de blé d'hiver dans le contexte rhônalpin.

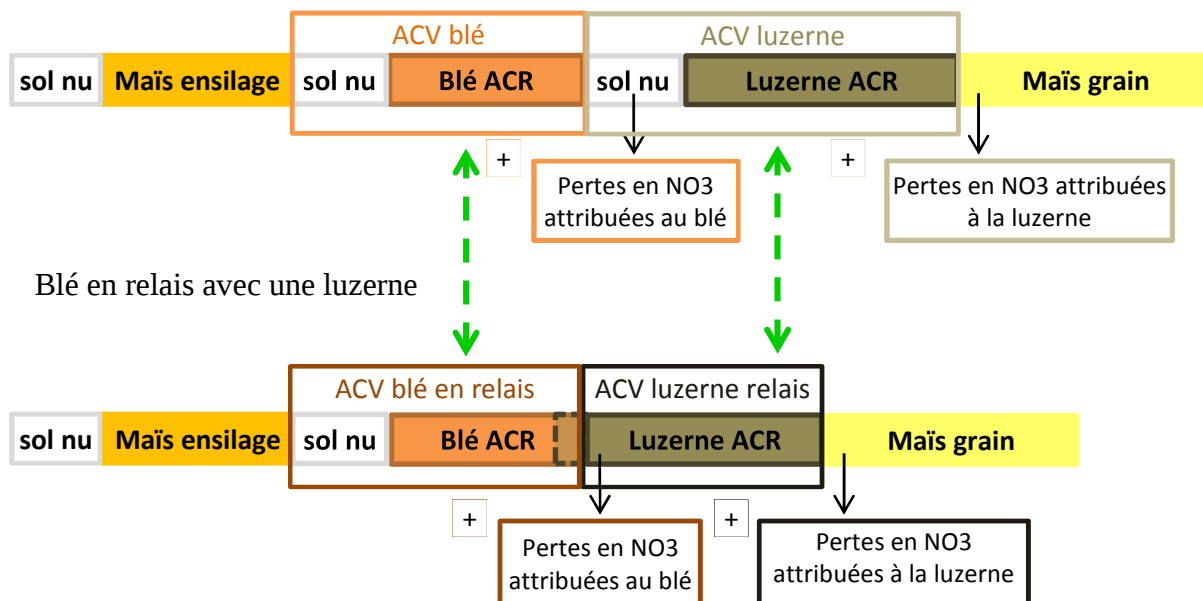
Pour répondre à cette problématique nous nous appuierons d'une part sur les travaux d'évaluations environnementales par ACV des associations simultanées blé-pois de Le Breton (2011) et d'autre part sur un panel d'experts en associations de cultures formé en Rhône-Alpes.

Au regard de l'état des connaissances réalisé, les hypothèses testées seront les suivantes :

- (1) L'impact sur l'environnement des associations en relais doit être inférieur en moyenne à celui des cultures pures qu'elle que soit la méthode de comparaison. Une association céréale-légumineuse en relais devrait permettre de réduire les pertes en azote puisque le risque de lixiviation pendant la période de temps entre la céréale et la légumineuse est réduit par une occupation du sol continue. D'autre part, les charges en mécanisation peuvent être quelque peu réduites lorsqu'une légumineuse est semée sous couvert de céréale car les deux itinéraires techniques vont se chevaucher et se compléter.
- (2) La méthode de comparaison à l'échelle de la succession des cultures en relais avec les cultures pures (de la récolte de la culture précédent la céréale jusqu'à la récolte de la légumineuse), doit être plus favorable aux cultures en relais que la comparaison à l'échelle de la culture, c'est-à-dire une comparaison de la céréale pur avec la céréale en relais et de la luzerne pure avec celle en relais. L'avantage majeur d'une association en relais par rapport à une succession de deux cultures pures repose sur l'optimisation de l'usage du sol (pas de période d'interculture entre la céréale et la légumineuse – gain de temps). Si cet effet « système » est intégré dans l'ACV, les bénéfices environnementaux globaux des cultures en relais sur une succession de deux cultures pures seraient plus importants.
- (3) La production de 1kg de grains et pailles de blé et de foin de luzerne biologique peut entraîner des impacts environnementaux plus importants que la production de blé et luzerne conventionnelle. Cependant, 1ha de culture bio cultivé pendant un an doit avoir un impact sur l'environnement moins important qu'1ha de culture conventionnelle. Bien qu'ils ne consomment pas de produits phytosanitaires et fertilisants minéraux de synthèse, les systèmes biologiques sont des systèmes dans lesquels les passages de machines agricoles sont en général, plus nombreux qu'en agriculture conventionnelle. De plus, bien souvent, les systèmes biologiques ont une productivité plus faible que les cultures conventionnelles ce qui peut donc entraîner un impact environnemental par kg de produits récoltés parfois plus important en bio qu'en conventionnel. Au contraire, les impacts associés à 1ha de culture en AB devraient être inférieurs à ceux obtenus en agriculture conventionnelle grâce à une consommation d'intrants, et notamment de fertilisants de synthèse, réduite.

Comparaison à l'échelle de la culture

Blé pur et luzerne pure se succédant



Comparaison à l'échelle de la succession blé-luzerne

Blé pur et luzerne pure se succédant

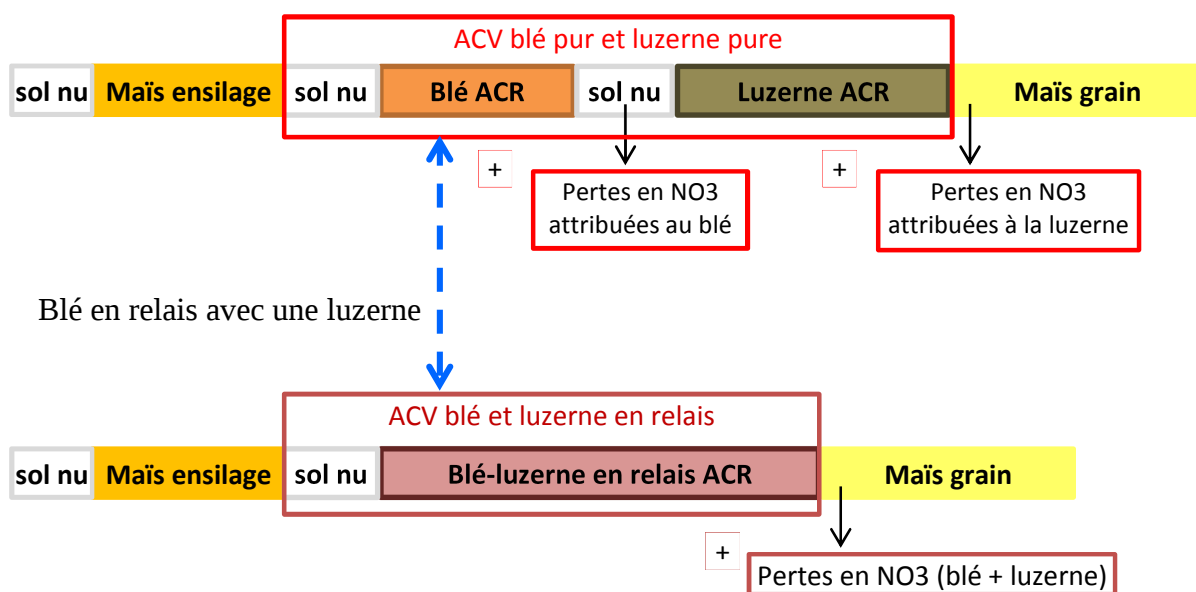


Figure 2: Méthodes de comparaisons des impacts environnementaux potentiels des cultures en relais avec ceux des cultures pures

II. MATERIEL ET METHODES

A. METHODES DE COMPARAISON DES IMPACTS

L'objectif consiste à chercher une méthodologie permettant de prendre en compte le fonctionnement et les interactions spécifiques des systèmes de cultures diversifiés tel que les associations en relais. Le fil conducteur de cette réflexion méthodologique est d'effectuer une comparaison entre l'impact sur l'environnement de cultures en relais et les cultures pures correspondantes. Le cas de la luzerne semée sous couvert de blé en Rhône-Alpes tiendra lieu d'exemple.

Dans un premier temps, nous avons voulu tester simplement la comparaison des impacts sur l'environnement d'une culture en relais avec cette même culture, mais cultivées en pure. Il s'agit d'une méthode de comparaison classique, qui sera nommée « comparaison à l'échelle de la culture » dans le reste de ce mémoire. Il nous a semblé intéressant dans un second temps de comparer l'impact environnemental de la succession [blé-luzerne] en relais avec celui de la succession [blé pur-luzerne pure]. Il s'agit dans cette comparaison, appelée par la suite « comparaison à l'échelle de la succession », de prendre en considération le gain de temps lié au semis plus précoce de la luzerne lorsqu'elle est en relais, mais aussi les synergies permises par cette pratique dans la gestion des pratiques culturales et donc des utilisations de ressources. Les deux types de comparaisons sont représentés schématiquement sur la Figure 2.

B. CONTEXTUALISATION DE L'ETUDE

L'étape 2 de l'ACV consiste à inventorier toutes les substances émises ou extraites lors de la production d'une culture. Les données concernant chacun des processus de production d'une culture doivent donc être les plus précises possibles. Pour s'approcher au plus près de la réalité ou d'un scénario établi dans un contexte pédoclimatique donné, le travail sera régionalisé. Les cultures en relais seront étudiées en Rhône-Alpes. Le choix de cette région réside dans la présence de partenaires du projet DiVÉRÉ.

Un panel d'experts spécialisés en agronomie, en agroécologie et en polyculture-élevage bio a été formé en Rhône-Alpes dans le but de définir les choix méthodologiques de l'évaluation par ACV des associations en relais blé-luzerne de cette région (Tableau 1)

C. DESCRIPTION DES 4 ETAPES DE L'ACV

Puisque dans la littérature aucune donnée concernant les conditions d'applications de la méthode d'ACV aux associations en relais n'est disponible, les choix méthodologiques présentés ci-dessous ont été validés et confirmés par l'expertise d'Hayo van der Werf, spécialiste de la méthodologie de l'ACV appliquée à l'agriculture travaillant à l'UMR SAS de l'INRA de Rennes et AGROCAMPUS OUEST et par Christophe Naudin, enseignant-chercheur en Agronomie au laboratoire LEVA du groupe ESA.

1) Définition des objectifs et du système

Objectifs de l'évaluation

L'objectif est de mettre en place une méthodologie permettant d'évaluer les impacts des associations en relais par rapport aux cultures pures. La luzerne semée sous couvert de blé en Rhône-Alpes servira d'exemple et permettra de valider ou non les méthodologies proposées.

Systèmes étudiés

Les différents systèmes étudiés sont : la luzerne pure, la luzerne en relais, le blé pur, le blé en relais et la succession [blé-luzerne] en relais. Les impacts calculés pour le couple [blé-luzerne] purs correspondront simplement à l'addition des impacts du blé pur et de la luzerne

Prénom Nom	Organisme & Profession	
Benoit Merlo		Les Jardins d'Aestiv Agriculteur céréaliier bio
Christophe Naudin		Groupe ESA d'Angers – laboratoire LEVA Enseignant-chercheur en Agronomie
David Stephany	 Les Agriculteurs BIO de l'Ain, l'Isère, la Savoie et la Haute-Savoie	ADABio (Association pour le Développement de l'Agriculture Biologique) Conseiller en polyculture-élevage bio
Florian Celette		ISARA Lyon – laboratoire SCAB (Systèmes Céréaliers en Agriculture Biologique) Enseignant chercheur en Agroécologie & Environnement
Jean-François Perret		Groupe Dauphinoise (groupe coopératif du Sud Est) Conseiller en grandes cultures bio

Tableau 1: Membres du panel d'experts en association céréale-légumineuse recrutés en Rhône-Alpes, 2014

	Blé et luzerne purs, se succédant	Blé et luzerne en relais
ACR	Luzerne (3,75ans) – maïs grain – maïs ensilage – blé – maïs ensilage – blé	Blé en relais – luzerne (2,75ans) – maïs grain – maïs ensilage – blé – maïs ensilage
AB	Luzerne (3,71ans) – maïs ensilage – blé – maïs grain – méteil – blé	Blé en relais – luzerne (2,71ans) – maïs ensilage – blé – maïs grain – méteil

Tableau 2: Successions de cultures définies en Rhône-Alpes en agriculture conventionnelle raisonnée (ACR) et biologique (AB) intégrant un blé et une luzerne, purs se succédant et en relais (Source : panel d'experts Rhône-Alpes)

	Culture	Durée de la culture (année)
AB	Luzerne pure	3,71
	Luzerne en relais	2,71
	Blés	1
	Couple des cultures pures	4,71
	Couple des cultures en relais	3,71
ACR	Luzerne pure	3,75
	Luzerne en relais	2,75 (21 mois)
	Blés	0,83
	Couple des cultures pures	4,583
	Couple des cultures en relais	3,583

Tableau 3: Durées de culture utilisées dans l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) des différents systèmes étudiés, en agriculture biologique (AB) et conventionnelle raisonnée (ACR)

pure. Pour faciliter l'évaluation et coller à la réalité des systèmes de culture rhônalpin susceptibles d'insérer ce type d'innovations, les cultures étudiées s'intégreront à des systèmes de polyculture-élevage mais correspondront aux cultures non-irriguées destinées à la vente, soit à des parcelles éloignées de la ferme. Le blé sera valorisé dans la filière meunerie (grains) et la filière animale (pailles pour les litières) tandis que la luzerne aura un débouché fourrage (foin). Les cultures seront étudiées en agriculture biologique (AB) et en agriculture conventionnelle raisonnée (ACR).

La comparaison entre l'impact potentiel sur l'environnement des cultures en relais et des cultures pures se fera entre les cultures en relais et les cultures pures correspondantes qui occupent la même place dans la succession de culture. Les différentes successions sont présentées dans le Tableau 2. De cette façon, les cultures comparées auront le même précédent cultural ce qui rendra plus fiable la comparaison de données basées sur des paramètres tels que le reliquat azoté au semis ou la couverture du sol.

Fonction et Unités Fonctionnelles

La fonction du système étudié est de produire du blé de qualité meunière et de la luzerne foin. Pour saisir le caractère multifonctionnel de l'agriculture, deux unités fonctionnelles sont choisies pour exprimer les impacts potentiels. La première unité va prendre en compte la fonction de gestion des sols et va donc refléter la volonté de préserver des surface pour la production agricole, elle correspondra à « 1 ha de terres cultivées ». La luzerne en relais et la luzerne pure qu'elle que soit la conduite, n'ont pas les mêmes durées de cultures. Pour fiabiliser la comparaison des impacts exprimés en ha de terres cultivées, les impacts seront ramenés en impact par ha pour une année moyenne. Le nombre d'année de cultures pour chacun des systèmes étudiés est reporté dans le Tableau 3. La seconde prendra en compte la fonction de production avec l'idée de minimiser les impacts par unité de produit, elle permettra d'exprimer les impacts pour « 1 kg de matière sèche de produits récoltés ». Dans le cas du blé, l'UF correspondra à 1kg de grains et de pailles de blé.

Limites du système

Tous les processus compris « du berceau aux portes de l'exploitation » seront étudiés. Plus précisément, seront pris en compte :

- les opérations culturales : travail du sol, semis, fertilisation minérale et organique, traitements phytosanitaires, désherbage mécanique, récolte, transport des grains et des pailles ;
- les infrastructures : prise en compte de l'utilisation du matériel agricole ;
- les intrants : semences, produits de traitements des semences, herbicides, fongicides, insecticides, régulateurs de croissance, engrais minéraux et organiques, carburant.

Seront exclus de l'analyse :

- les processus liés à la consommation des produits récoltés ;
- les processus liés à la production des engrais azotés organiques (compost de fumiers de bovin lait et farine de plumes hydrolysées) puisqu'il s'agit d'un recyclage de déchets et qu'aucun processus n'est actuellement répertorié ;
- les bâtiments de stockage du matériel agricole ;
- le processus d'inoculation des semences de luzerne puisque nous sommes sur des terrains neutre à basique, l'inoculation peut être évitée et les impacts sur l'environnement liés à ce processus auraient peu d'influence sur l'impact de la culture de luzerne.

Les limites temporelles de l'ACV pour les différentes cultures correspondent à la

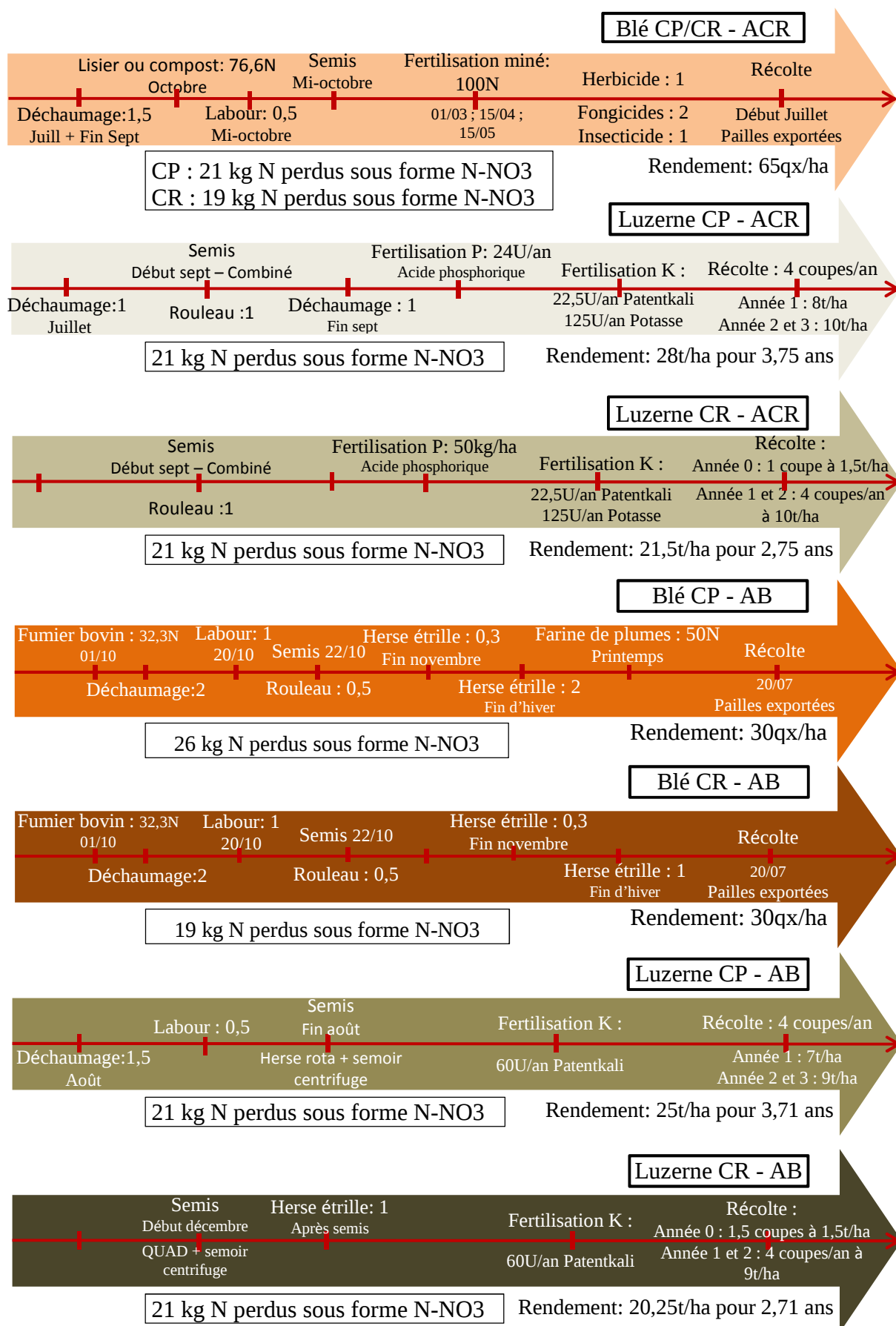


Figure 3: Itinéraires techniques culturels définis en Rhône-Alpes par le panel d'experts pour le système blé-luzerne purs et en relais

période allant de la récolte de la culture précédente jusqu'à la récolte de la culture étudiée. Ainsi tous les impacts sur l'environnement liés à cette période seront attribués à la culture étudiée. Dans le cas des nitrates perdus par lixiviation suite à la culture n, ils seront toujours affectés à la culture n et non pas à la culture n+1 comme ce qui est réalisé dans la méthode INDIGO^{®3} mise au point par l'INRA. Prenons l'exemple d'une culture de blé pur suivi d'une culture de luzerne : les pertes en nitrates estimées pendant la période « récolte du blé-culture de luzerne » résultent des pratiques effectuées sur le blé, il semble donc plus judicieux d'attribuer ces pertes à la culture de blé plutôt qu'à celle de luzerne.

Dans le cas de la luzerne en relais, semée avant la récolte du blé, les mêmes limites temporelles s'appliquent : l'ACV débute après la récolte du blé et se termine à la récolte de la luzerne. De cette façon, aucun impact n'est attribué à la luzerne pendant la période de temps comprise entre le semis de la luzerne et la récolte du blé

2) Inventaires des émissions et extractions

Construction des scénarios

Les itinéraires techniques pour chacune des cultures et des conduites, présentés sur la Figure 3, ainsi que les successions de cultures ont été définis par concertation des membres du panel d'experts formé en Rhône-Alpes. Le détail de ces itinéraires techniques est reporté dans l'annexe II. En AB, l'ensemble des scénarios (association en relais et cultures pures) sont basés sur des itinéraires techniques effectivement rencontrés sur le terrain cependant en ACR, l'association blé-luzerne n'est pas pratiquée. Le blé en relais conventionnel aura alors le même itinéraire que le blé pur et le scénario de la luzerne en relais a été quant à lui construit en cohérence avec les différences réelles d'itinéraires observées entre une luzerne en relais et pure biologique ; à savoir la luzerne en relais est : semée sans labour ni déchaumage préalable (travail léger seulement), semée plus dense, productive dès la première année et cultivée une année de moins que la culture pure.

Calcul des émissions directes et des ressources extraites

L'ensemble des émissions et extractions ont été calculées selon le recueil de méthodes et de calculs utilisé pour l'élaboration des fiches inventaires de cultures en France conçu par Joachim Boissy de l'UMR SAS en juin 2009. La méthode de calcul avec les valeurs retenues et hypothèses est présentée dans l'annexe III. Seules les émissions de nitrates par lixiviation ont été estimées selon une autre méthode : la méthode INDIGO[®] (annexe IV). Cette méthode permettra d'obtenir une estimation plus précise que la méthode de J.Boissy, le modèle de calculs des émissions d'INDIGO[®] étant reconnu et adapté autant que possible au contexte agricole. Il semblait intéressant d'utiliser INDIGO[®] dans ce travail de comparaison entre une luzerne en relais avec un blé et une luzerne pure succédant à un blé pur puisque les évaluations concernant l'eutrophisation sont très sensibles à la présence ou non d'un sol nu entre les deux cultures. L'ensemble des hypothèses ayant permis l'élaboration des inventaires sont présentées en annexe V.

Utilisation de bases de données

Le travail d'inventaires pour chacun des intrants consommés pendant le cycle de culture (tracteur, engrais, électricité, ...) a été simplifié par l'utilisation de bases de données. Lors de ce projet, il a été nécessaire de faire appel à la base de données Ecoinvent version 3 (2014). Cette base de données créée en 2000, rassemble entre autre des inventaires de produits et de processus agricoles de grandes qualités valables en Suisse et dans les pays Européens (Jolliet

³ UMR Nancy-Colmar Equipe Agriculture Durable (2002). Le site des indicateurs agri-environnementaux. <http://www7.inra.fr/indigo/fra/introduction.html> (consulté le 11/06/14)

	Agriculture biologique (AB)				Agriculture conventionnelle (ACR)			
	Luzerne pure	Luzerne en relais	Blé pur	Blé en relais	Luzerne pure	Luzerne en relais	Blé pur	Blé en relais
Rendement :								
en qx MS/ha	250,00	202,50	55,00	50,25	280,00	215,00	110,00	110,00
en qx MS/ha.an	67,38	74,72	55,00	50,25	74,67	78,18	110,00	110,00

Tableau 4: Rendements des différentes cultures étudiées exprimés en qx de MS / ha et en qx de MS / ha.an

et al., 2010). Lorsque des inventaires n'étaient pas répertoriés dans la base Ecoinvent, la base de données AGRIBALYSE[®] a été utilisée. Cette base de données compile des inventaires des principaux produits agricoles français

3) Analyse de l'impact environnemental

Méthode d'analyse des impacts

Le calcul des impacts environnementaux potentiels par catégorie d'impacts a été effectué avec le logiciel SimaPro⁴ version 8.0.3.14. Ce logiciel permet de relier les substances émises et extraites calculées lors de l'étape précédente avec une catégorie d'impact donnée.

Méthode de caractérisation des impacts

La méthode de caractérisation des impacts utilisée, « CML IA baseline 2014 INRA – with total CED », comprend les 12 catégories d'impacts intermédiaires suivantes : épuisement des ressources abiotiques, acidification, eutrophisation, changement climatique, appauvrissement de la couche d'ozone, toxicité humaine, écotoxicité aquatique des eaux douces, écotoxicité aquatique des eaux de mer, écotoxicité terrestre, oxydation photochimique, occupation des terres et demande totale en énergie cumulée. Cette méthode est particulièrement intéressante dans notre cas puisqu'elle contient des catégories qui sont sensibles à ce qui différencie les cultures associées des cultures pures. En effet, la catégorie occupation des terres va permettre de prendre en compte l'optimisation de l'usage des terres dans le cas d'une association de cultures par rapport aux cultures pures. L'autre différence fondamentale réside dans une meilleure gestion de l'azote dans les systèmes diversifiés. La catégorie eutrophisation semble donc intéressante par sa sensibilité au NH₃, au NO₃, au NO₂ et au NO_x et par leur approche locale (impact au niveau du bassin versant). A une portée mondiale, la catégorie changement climatique sensible au N₂O, permettra aussi de valoriser ces différences. Par la forte consommation énergétique des processus de fabrication des fertilisants azotés, la catégorie demande totale en énergie cumulée distinguera de façon indirecte les associations des cultures pures. Pour les raisons cités précédemment, les impacts environnementaux ne seront étudiés qu'au regard des 4 catégories d'impacts suivantes : l'eutrophisation (exprimé en kg de PO₄ équivalent), l'occupation des terres (en m² occupés sur une année ou m²a), la demande totale en énergie cumulée (en MJ équivalent) et le changement climatique (en kg de CO₂ équivalent). Les principales substances de ces catégories ainsi que leurs facteurs de caractérisation sont présentés dans l'annexe VI.

Allocation des impacts

Dans ce système, les pailles de blé sont toujours exportées. Cela signifie que les grains et la paille de blé sont des coproduits. L'unité fonctionnelle choisie que ce soit du blé (1kg de MS de grains et pailles) ou de la succession [blé-luzerne] (1kg de MS de produits récoltés) permet d'éviter l'allocation des impacts.

4) Interprétation des résultats

Tout d'abord les résultats de la comparaison à l'échelle de la culture seront discutés puis ceux de la comparaison à l'échelle de la succession. Les résultats seront interprétés à la lumière des 2 unités fonctionnelles définies plus haut. L'estimation de l'intérêt ou non des cultures en relais se fera en calculant la différence entre leurs impacts et ceux des cultures pures. De cette façon si la différence est négative, cela signifiera que les cultures en relais impactent moins l'environnement que les cultures pures correspondantes et inversement si la différence est positive.

⁴ SimaPro UK Ltd (2014). SimaPro 8. www.simapro.co.uk (consulté le 17/07/2014)

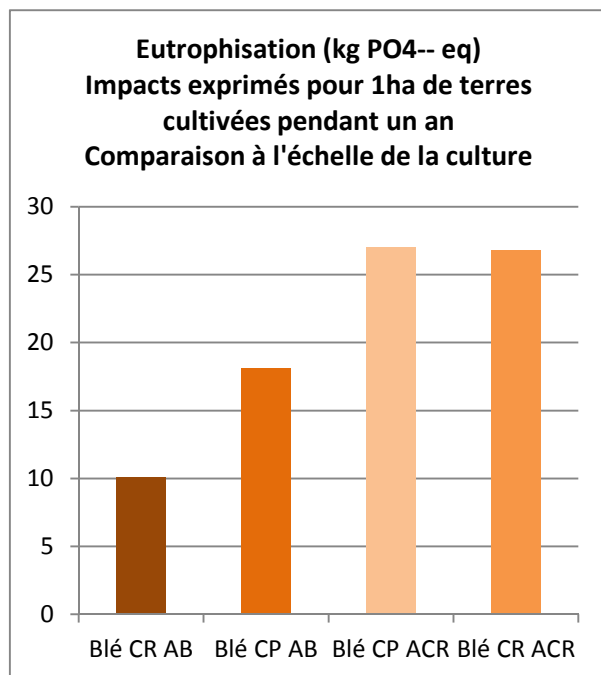


Figure 7: Impacts par ha.an du blé en relais (CR) et du blé pur (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact eutrophisation

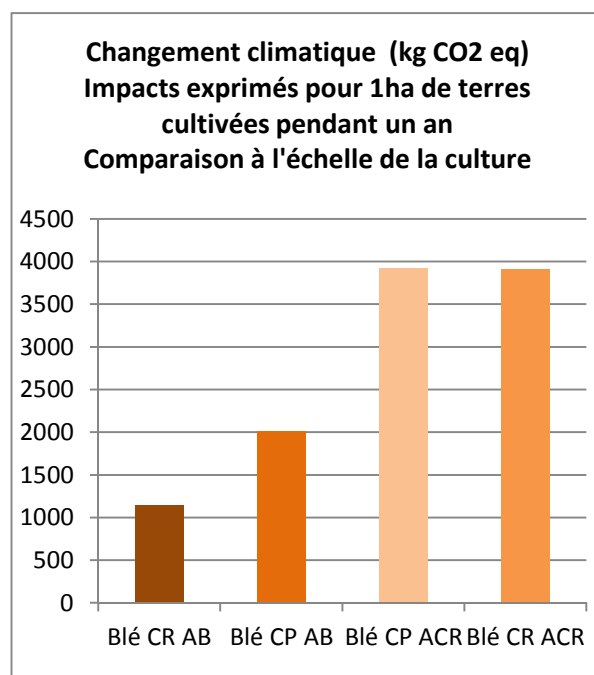


Figure 4: Impacts par ha.an du blé en relais (CR) et du blé pur (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact changement climatique

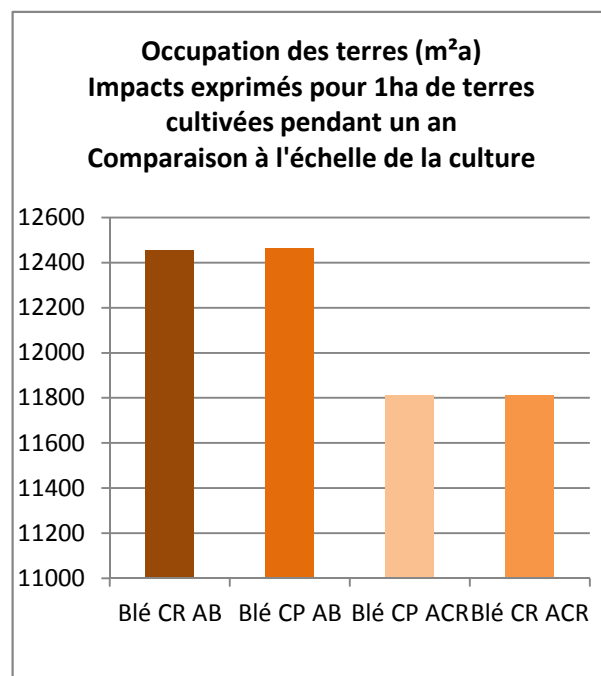


Figure 6: Impacts par ha.an du blé en relais (CR) et du blé pur (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact occupation des terres

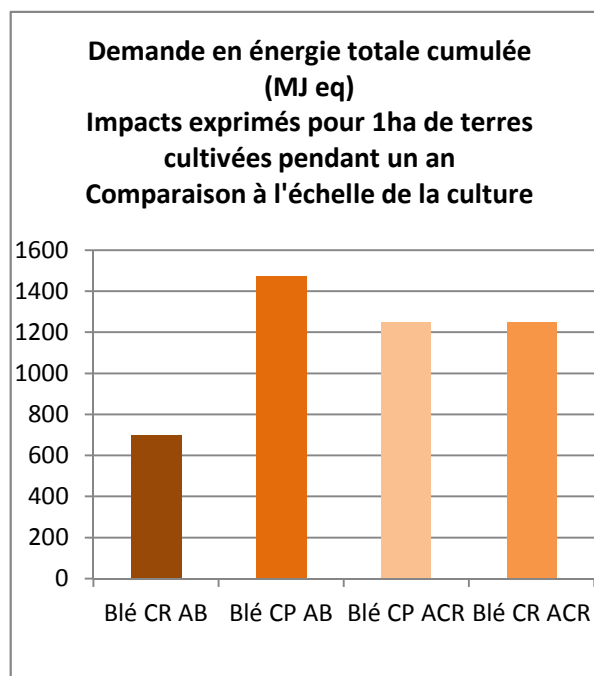


Figure 5: Impacts par ha.an du blé en relais (CR) et du blé pur (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact demande en énergie totale cumulée

III. RESULTATS DES ANALYSES DE CYCLE DE VIE

Le système « blé-luzerne », comme vu précédemment a pour fonction la production de grains de blé de qualité meunière et de luzerne foin. Les unités fonctionnelles choisies seront rappelées en début de paragraphe. Lorsqu'il sera question d'impact sur l'environnement, il s'agira bien évidemment d'impact potentiel.

A. COMPARAISON A L'ECHELLE DE LA CULTURE

Il s'agit ici de comparer les impacts environnementaux liés à la culture de blé pur avec ceux liés à celle d'un blé en relais et ceux liés à de la luzerne pure avec ceux d'une luzerne en relais.

1) Impacts exprimés en ha de terres cultivées pendant un an

Dans un premier temps, les cultures de blé et de luzerne vont être comparées selon l'unité fonctionnelle « 1ha de terres cultivées » et ce, pour une année de culture. Il est important de garder à l'esprit que les impacts par hectare sont calculés en multipliant les impacts pour 1kg de produits récoltés par le rendement. Il faut aussi noter que 1ha de luzerne pure n'aura pas la même productivité que 1ha de luzerne en relais, il en va de même pour la culture de blé. Dans notre cas, une luzerne en relais produira plus par ha.an⁻¹ que 1ha.an⁻¹ de luzerne pure et au contraire 1ha.an⁻¹ de blé en relais produira moins (AB) ou autant (ACR) que 1ha.an⁻¹ de blé pur (Tableau 4).

Pour toutes catégories d'impacts confondues, lorsqu'un blé pur est remplacé par un blé en relais une réduction de l'impact potentiel sur l'environnement de 15% est observée. Dans le cas de la luzerne, ils sont réduits en moyenne de 4% (annexe VII).

Comparaison des blés purs et en relais

Les conclusions sur les impacts environnementaux des cultures en relais dépendent du type de conduite. En effet, les impacts environnementaux du blé en relais (blé CR AB) sont toujours inférieurs à ceux du blé pur (blé CP AB) en conduite biologique (environ -30%), mais ces derniers sont quasiment égaux à ceux des cultures pures en système conventionnel hormis pour la catégorie eutrophisation (-1,1%) (annexe VII). En ACR, ces résultats peuvent s'expliquer par l'absence de différences entre l'itinéraire technique du blé en relais et du blé pur, seules les pertes en nitrates sont différentes. Le fait de supprimer la période de sol nu entre le blé et la luzerne en les associant permet de réduire la perte en NO₃ par rapport à la culture de blé pur (27kg de N-NO₃/ha pour le blé pur contre 20 pour le blé en relais). Les moindres pertes en nitrates du blé en relais conventionnel expliquent la réduction d'impacts sur l'eutrophisation de 1,1% par rapport au blé pur et les quelques différences d'impacts entre les deux blés.

Pour la catégorie d'eutrophisation, l'impact du blé en relais biologique (Blé CR AB) est de 10,1kg de PO₄eq contre 18,1 pour le blé pur AB soit une réduction des impacts environnementaux de 45%. En ACR, le blé pur a un impact de 27,1kg de PO₄eq tandis que l'impact du blé en relais est de 26,8kg de PO₄eq (soit une réduction de 1,1%) (Figure 7). En AB, l'écart entre les pertes en nitrates du blé pur et en relais est plus important qu'en ACR (79kg de N-NO₃/ha pour le blé pur contre 51 pour le blé en relais) puisque le blé en relais et le blé pur n'ont pas les mêmes niveaux de fertilisation. Le blé pur biologique reçoit 50U d'azote issu de farines de plumes et 32U issues de fumier de bovins tandis que le blé en relais ne reçoit que l'apport de fumier de bovins. Ces différences de fertilisation, en lien avec les pertes en nitrates pourraient expliquer cette diminution du risque d'eutrophisation plus nette en AB qu'en ACR.

Le blé en relais AB a un impact sur le changement climatique de 1148kg de CO₂eq et le blé pur AB de 2012 kg de CO₂eq (-43%), en ACR la réduction est de 0,3% un impact égal à

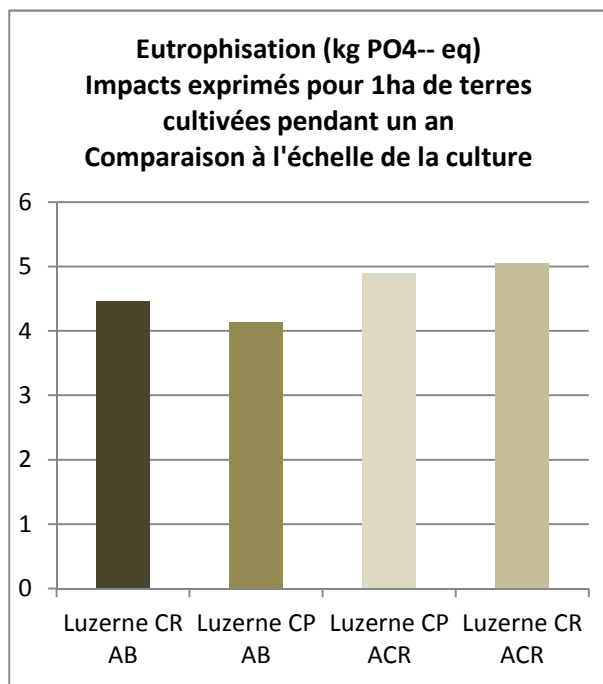


Figure 8: Impacts par ha.an de la luzerne en relais (CR) et de la luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact eutrophisation

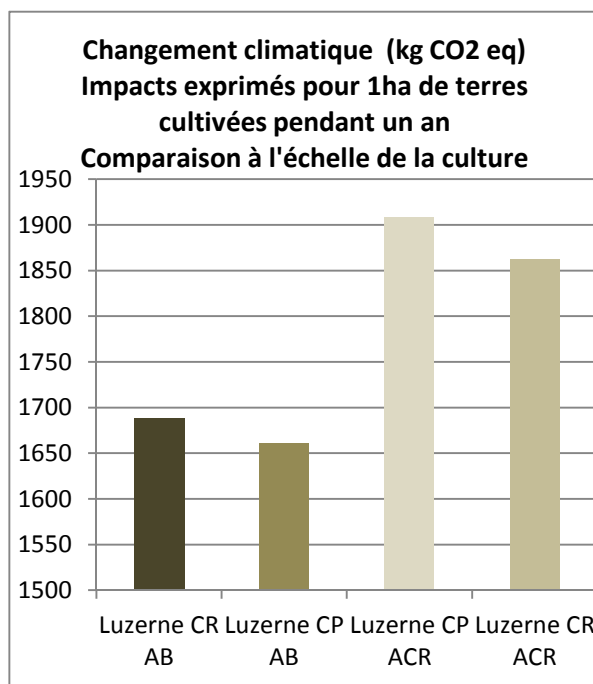


Figure 9: Impacts par ha.an de la luzerne en relais (CR) et de la luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact changement climatique

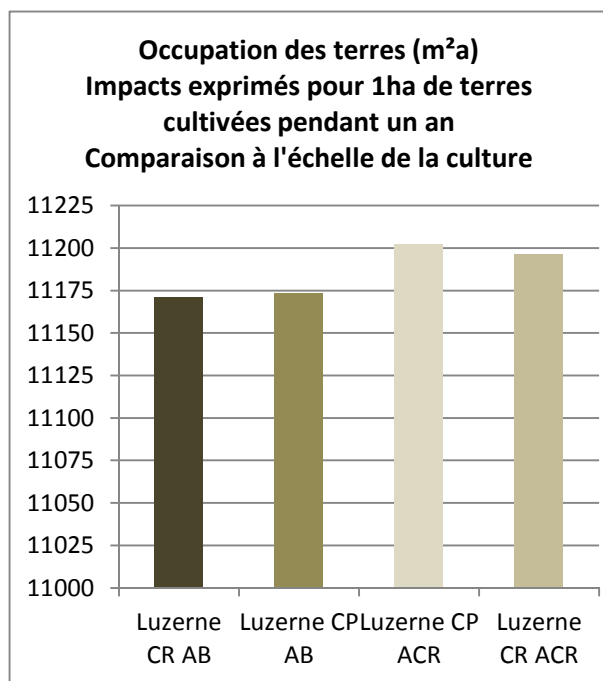


Figure 11: Impacts par ha.an de la luzerne en relais (CR) et de la luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact occupation des terres

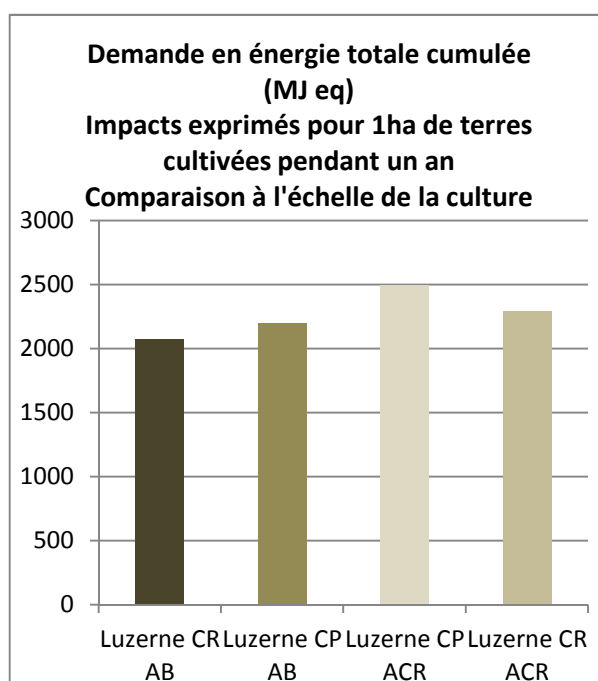


Figure 10: Impacts par ha.an de la luzerne en relais (CR) et de la luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact demande totale en énergie cumulée

3921kg de CO₂eq pour le blé pur contre 3911 pour le blé en relais (Figure 4). La fertilisation et les pertes en nitrates, jouant sur la valeur de N₂O, peuvent là encore, avoir un rôle dans la réduction des impacts potentiels. De plus, une charge en mécanisation plus importante pour un blé biologique pur qu'un blé en relais peut aussi être à l'origine de ces diminutions (en relais : moins de passages pour le désherbage mécanique, pailles non récoltées une fois sur 4, un passage de moins pour la fertilisation). La consommation plus intense de carburant va en effet entraîner une augmentation des émissions des gaz à effets de serre suivants : CO₂, CH₄ et N₂O.

La catégorie occupation des terres reflète la pression qu'exerce une culture sur la ressource « sol », c'est-à-dire l'espace nécessaire à la culture (ici 1ha). Cette pression semble quasiment identique entre un blé pur et un blé en relais lorsqu'ils sont comparés à l'échelle de l'année de culture. En AB pour la catégorie occupation des terres, l'impact du blé en relais est de 12454m²a, tandis que pour le blé pur il est égal à 12462m²a (-0,07%) alors qu'en ACR l'impact du blé qu'il soit en relais ou pur est de 11811m²a (Figure 6). Par définition, l'impact d'un ha de blé pur ou en relais devrait être identique, cependant ce n'est pas le cas en AB. La quantité d'intrants étant plus importante pour la culture pure biologique que celle en relais (hormis pour les semences), l'occupation du sol liée à la production des intrants est plus élevée pour le blé pur.

Enfin, la demande totale en énergie cumulée est très proche pour les cultures conventionnelles (1250,6MJeq pour le blé pur et 1251MJeq pour celui en relais) alors qu'une nette réduction est observée entre le blé en relais (698MJeq) et le blé pur (1473MJeq) en conduite biologique (-53%) (Figure 5). Puisque les scénarios conventionnels sont identiques, il semble évident qu'aucune différence d'impact n'existe entre le blé en relais et le blé pur. Pour ce qui est de la conduite biologique, le fait d'apporter des farines de plumes sur le blé pur mais pas sur le blé en relais pourrait être à l'origine de ces résultats. La production de farine de plumes est effectivement très consommatrice en énergie et notamment en électricité.

Comparaison des luzernes pures et en relais

Que ce soit en agriculture biologique ou conventionnelle, lorsque les impacts sont exprimés par ha.an⁻¹, la luzerne en relais (luzerne CR) présente des impacts inférieurs en moyenne de 3% en AB et de 6% en ACR, à ceux de la luzerne pure (luzerne CP) (annexe VII). La variation des différences d'impacts entre la luzerne en relais et la luzerne pure (AB et ACR) s'étend de +8% à -8%.

En ACR, l'impact sur le climat de la luzerne pure (1908kg de CO₂eq) est légèrement supérieur (2%) à celui de la luzerne en relais (1862kg de CO₂eq) (Figure 9). La plus faible mécanisation de la luzerne en relais pourrait expliquer ces résultats. Dans le cas d'une luzerne en relais, les déchaumages, le labour et le passage de rouleau effectués sur une luzerne pure, sont impossibles à réaliser sans perturber le couvert de blé, le travail du sol consistera donc seulement en un passage de herse étrille. De plus le nombre de fauches, moins important lorsque la luzerne est implantée dans un blé, contribue aussi à réduire les impacts sur le climat inhérents à la consommation de carburant. En AB, l'impact d'un hectare de luzerne pure cultivée pendant un an sur le climat est de 1661kg de CO₂eq contre 1688 en relais (+2%). Malgré une plus faible mécanisation de la luzerne en relais, une augmentation des impacts est observée. La conversion des impacts en ha à des impacts moyens annuels en ha.an⁻¹ peut être à l'origine de ce constat. En effet, pour ramener les impacts à une année de culture seulement, il est nécessaire de les diviser par la durée de culture. Les impacts de la luzerne pure sont donc divisés par un dénominateur plus grand que celui de la luzerne en relais, induisant des impacts par ha par an plus faible pour la culture pure.

La demande en énergie est de 2074MJeq et de 2201MJeq en AB respectivement pour la luzerne en relais et la luzerne pure (-6%). Pour ce qui est de la luzerne conventionnelle une

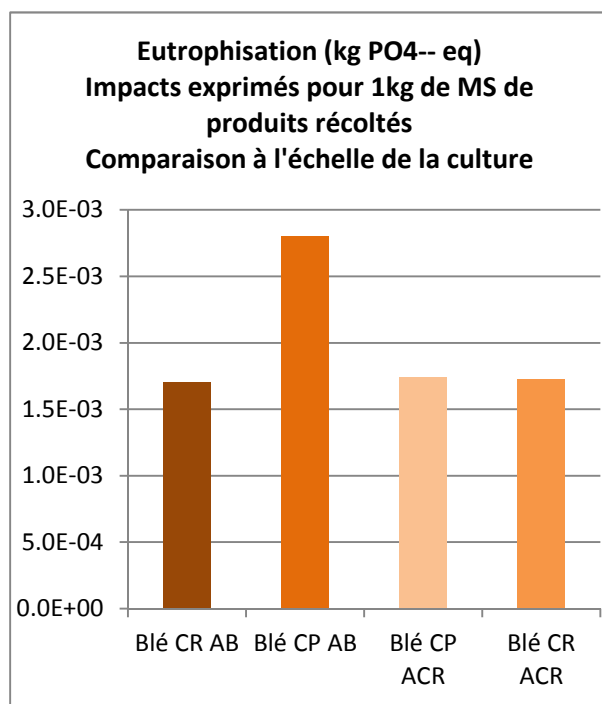


Figure 12: Impacts par kg de MS de produits récoltés du blé en relais (CR) et du blé pur (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact eutrophisation

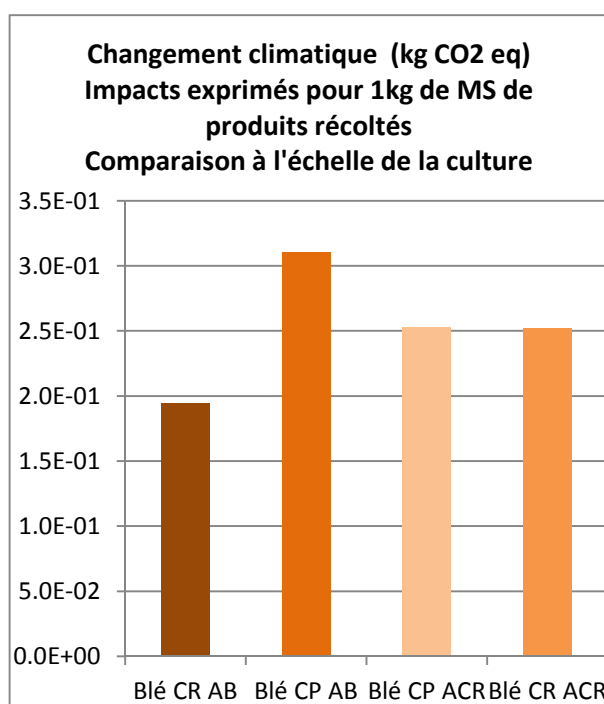


Figure 13: Impacts par kg de MS de produits récoltés du blé en relais (CR) et du blé pur (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact changement climatique

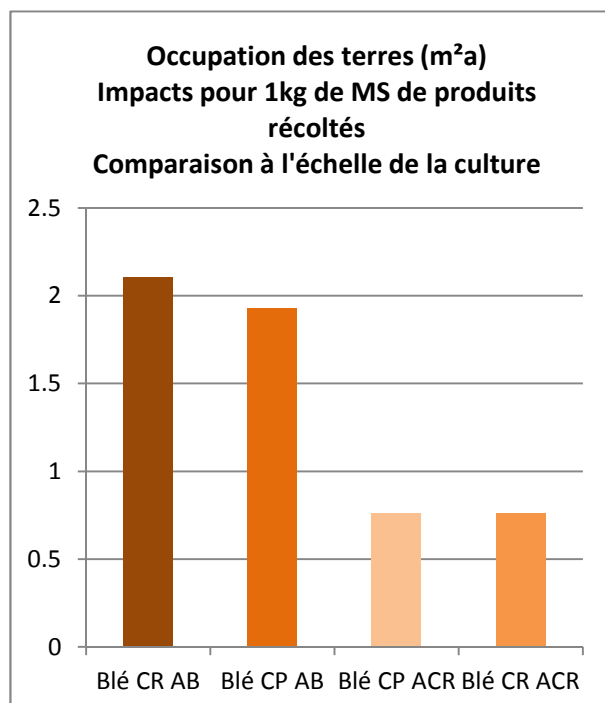


Figure 15: Impacts par kg de MS de produits récoltés du blé en relais (CR) et du blé pur (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact occupation des terres

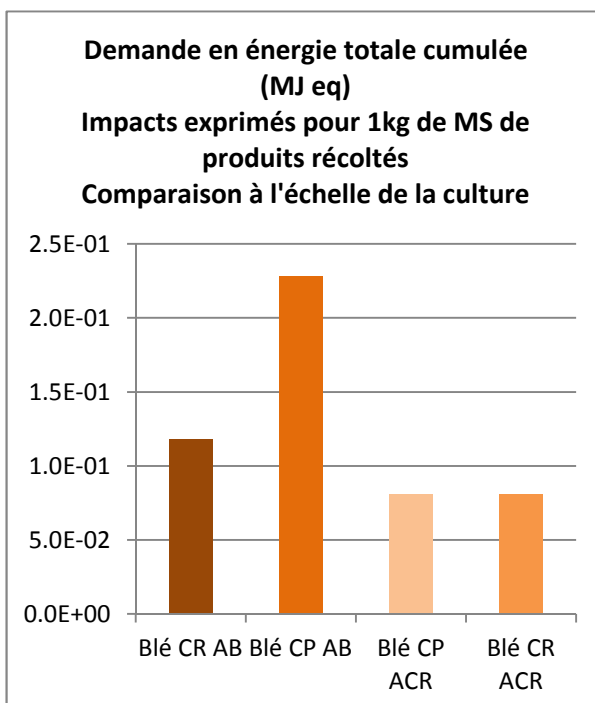


Figure 14: Impacts par kg de MS de produits récoltés du blé en relais (CR) et du blé pur (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact demande totale en énergie cumulée

réduction de 8% est observée avec 2495MJeq pour la luzerne pure et 2290MJ eq pour celle en relais (Figure 10). Une fois encore, les bénéfices sur l'environnement de la luzerne associée trouvent leur origine dans la moindre mécanisation de cette dernière par rapport à la luzerne seule.

L'occupation des sols, calculée pour 1ha.an^{-1} , va être très légèrement diminuée d'en moyenne 0,1% lorsque la luzerne est en relais plutôt que pure (Figure 11). L'occupation des terres est respectivement de $11196\text{m}^2\text{a}$ et $11202\text{m}^2\text{a}$ en ACR et de $11171\text{m}^2\text{a}$ et $11173\text{m}^2\text{a}$ en AB pour la luzerne en relais et pure. Cette différence est due à une utilisation plus importante d'intrants (tracteurs et machines) pour les cultures pures que les cultures en relais.

Le risque d'eutrophisation quant à lui est augmenté si la luzerne est semée dans un couvert de blé de 3% en ACR (4,9kg de PO_4eq pour la luzerne pure et 5,1 pour la CR) et de 8% en AB (4,5kg de PO_4eq pour la CP contre 4,1 en relais) (Figure 8). Exprimés par ha, les impacts des CR sont inférieurs à ceux des CP dus à une plus forte consommation de carburant et utilisation de tracteur en CP par rapport à la luzerne en relais (annexe VIII). Cependant les impacts d'1ha de luzerne pure cultivée pendant un an sont inférieurs à ceux de la luzerne en relais.

Comparaison AB et ACR

Pour les 4 catégories d'impacts considérées, les cultures bio ont toujours un impact par ha.an^{-1} plus faible que les cultures conventionnelles correspondantes, hormis dans le cas de la comparaison du blé AB et ACR pour la catégorie occupation des terres (environ +5%) et dans le cas de la comparaison entre le blé pur AB et ACR pour la catégorie demande totale en énergie (+18%) (annexe IX). Dans ce dernier cas, le blé pur bio a une demande en énergie plus importante car il est plus mécanisé que le blé ACR. L'occupation des sols est quant à elle plus intense pour le blé AB que le blé ACR, la culture bio consommant plus d'intrants par ha que le blé ACR. Dans tous les autres cas les réductions sont majoritairement dues à la moindre fertilisation des cultures bio et à la non utilisation d'engrais minéraux, dont la production est fortement consommatrice en énergie et dégage des gaz à effets de serres.

2) Impacts exprimés en kg de matière sèche de produits récoltés

Les conclusions concernant les différences d'impacts entre une culture associée et la culture en relais correspondante sont plus favorables aux CR que celles obtenues en exprimant les impacts par ha.an^{-1} . Cependant dans le cas du blé, il faut noter que la réduction d'impacts est moins prononcée qu'avec l'UF « 1ha de terres cultivées ». En effet, en moyenne sur l'ensemble des catégories une diminution de 12% est observée pour le blé (contre -15% avec l'autre UF). Pour la luzerne les impacts sont réduits de 11% (contre -4% lorsque les impacts sont exprimés par ha.an^{-1}) (annexe VII).

Comparaison des blés purs et en relais

En AB, dans le cas de la comparaison du blé en relais (blé CR) avec le blé pur (blé CP), une réduction de 39% est constatée pour l'eutrophisation avec un impact de $1,7.10^{-3}\text{kg}$ de PO_4eq pour la CR et de $2,8.10^{-3}$ pour la CP (Figure 12). L'impact sur le changement climatique par kg de MS de grains et pailles de blé est de $1,94.10^{-1}\text{kg}$ de CO_2eq pour le blé CR contre $3,11.10^{-1}$ pour le blé CP en AB, soit une réduction de 38% (Figure 13). La demande totale en énergie cumulée est quant à elle égale à $1,18.10^{-1}\text{MJeq}$ et de $2,28.10^{-1}\text{MJeq}$ respectivement pour la CR et pour la CP en AB (-48%) (Figure 14). Si ces diminutions sont moins importantes qu'avec l'unité fonctionnelle représentative de la gestion des terres c'est parce que le rendement en pailles du blé en relais est plus faible que celui du blé pur (2,025t/ha pour les pailles du blé en relais, contre 2,5t/ha pour le blé pur), les rendements en grains étant égaux (30qx/ha en moyenne). En effet, le rendement du blé en relais n'est pas

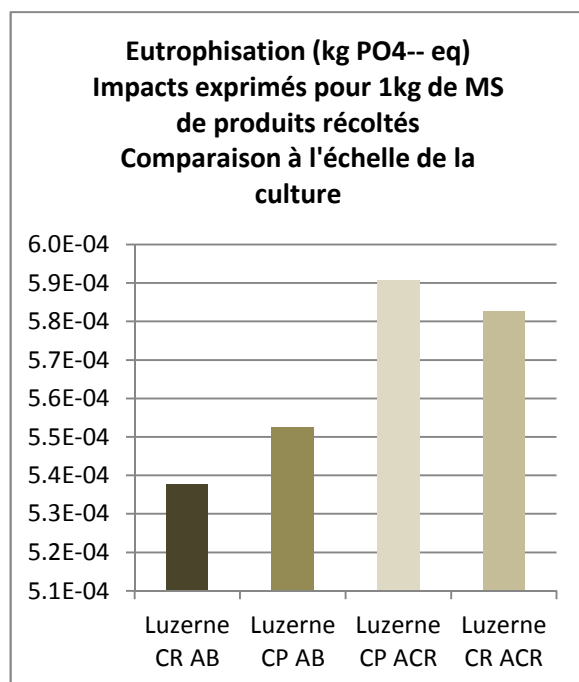


Figure 19: Impacts par kg de MS de produits récoltés de la luzerne en relais (CR) et de la luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact eutrophisation

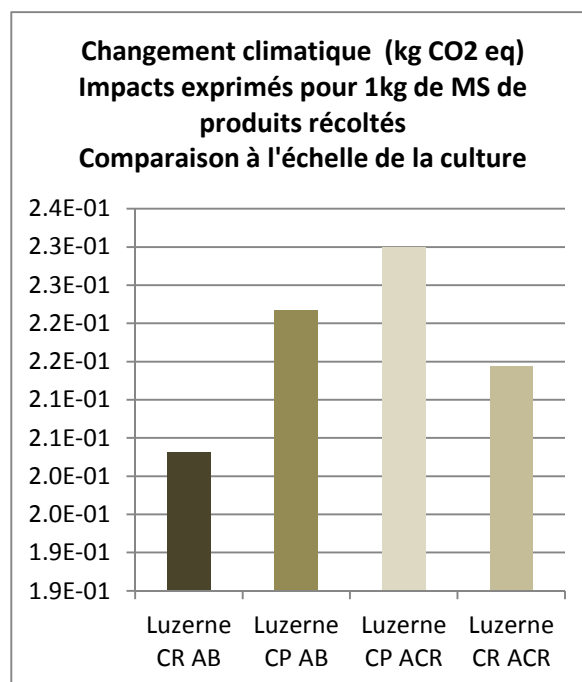


Figure 18: Impacts par kg de MS de produits récoltés de la luzerne en relais (CR) et de la luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact changement climatique

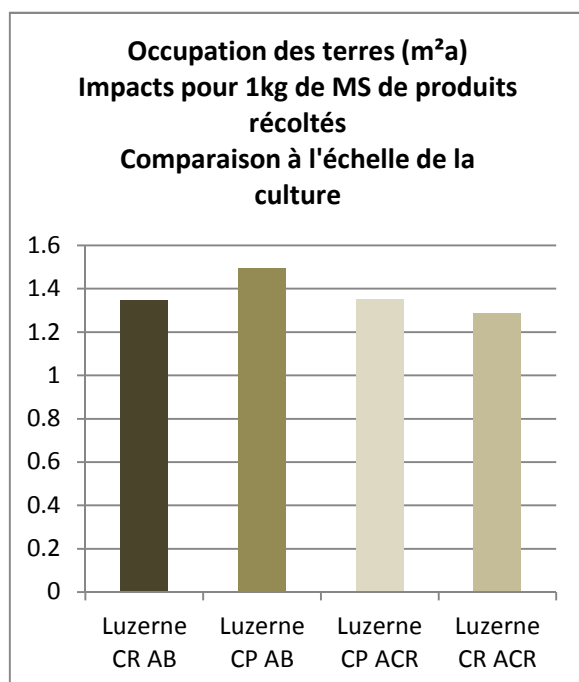


Figure 17: Impacts par kg de MS de produits récoltés de la luzerne en relais (CR) et de la luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact occupation des terres

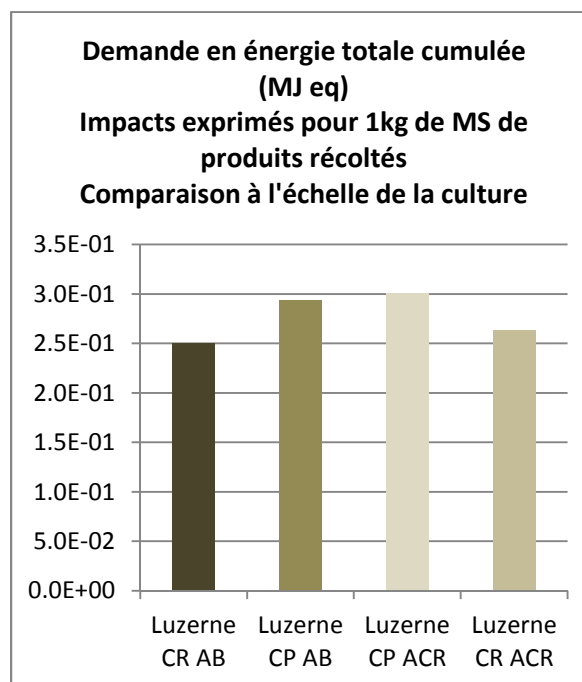


Figure 16: Impacts par kg de MS de produits récoltés de la luzerne en relais (CR) et de la luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact demande totale en énergie cumulée

toujours identique selon les années. Il a été considéré qu'une année sur 4, le rendement du blé est plus faible (15qx/ha contre 35qx/ha les autres années) et que les pailles ne peuvent pas être récoltées, le rendement en pailles les autres années étant de 2,7t/ha. Pour la catégorie occupation des terres les résultats diffèrent de ceux exprimés par hectare, la différence entre les impacts du blé biologique associé et pur est positive, +9%, contre -0,07% avec l'autre UF (Figure 15). Ce résultat peut être éclairé une fois encore par les rendements. Comme le blé en relais est moins productif que le blé pur, l'espace nécessaire pour produire 1kg de {grains et pailles} sera plus grand. En ACR, les réductions d'impact sont identiques que celles trouvées avec l'autre UF pour chacune des catégories d'impacts puisqu'il n'y a aucune différence de rendement entre les deux blés

Comparaison des luzernes pures et en relais

Concernant la comparaison entre la luzerne en relais et pure, les impacts des cultures en relais sont toujours inférieurs à ceux des cultures pures, contrairement à ce qui a été montré avec l'UF « 1ha.an⁻¹ de terres cultivées ». Bien que le rendement des luzernes en relais soit inférieur à celui des luzernes pures, les différences d'itinéraires culturaux permettent de donner l'avantage à la luzerne en relais.

Pour la catégorie eutrophisation les impacts de la luzerne pure et en relais sont respectivement de $5,52.10^{-4}$ kg de PO₄eq et $5,38.10^{-4}$ en AB (-3%) et de $5,91.10^{-4}$ kg de PO₄eq et de $5,82.10^{-4}$ en ACR (-1%) (Figure 19). Ces différences sont probablement dues à la plus forte consommation de carburant et utilisation de tracteur en culture pure par rapport à la luzerne en relais. Si pour la luzerne, contrairement au blé, les tracteurs et le carburant ont une influence importante sur l'eutrophisation, c'est parce que les risques d'eutrophisation sont très faibles. Ces processus contribuent à l'eutrophisation, au travers des émissions de NH₃, NO_x et de phosphore de l'ordre de 1.10^{-4} kg de PO₄eq pour les tracteurs et de $0,6.10^{-4}$ kg de PO₄eq pour le carburant.

La demande totale en énergie cumulée est moins intense pour la luzerne en relais que la luzerne seule. Les impacts calculés sont en AB de $2,5.10^{-1}$ MJeq pour la CR et de $2,94.10^{-1}$ MJeq pour la CP (-15%) et en ACR respectivement de $2,63.10^{-1}$ MJeq et de $3,01.10^{-1}$ MJeq pour la CR et la CP (-12%) (Figure 16)

Une réduction de l'impact sur le climat de -8% en AB ($2,03.10^{-1}$ kg de CO₂eq pour la luzerne CR et $2,22.10^{-1}$ pour la CP) et de -7% en agriculture raisonnée ($2,14.10^{-1}$ kg de CO₂eq pour la CR et $2,3.10^{-1}$ pour la CP) est observée lorsque la luzerne est cultivée en relais plutôt que seule (Figure 18).

Quant à l'occupation des sols, les impacts de la culture de la luzerne en relais et pure sont respectivement de 1,34m²a et 1,49m²a en AB (-10%) et de 1,29m²a et 1,35 en ACR (-5%) (Figure 17). Ceci s'explique simplement par le fait que la luzerne en relais est cultivée moins longtemps qu'une luzerne pure.

Comparaison AB et ACR

Exprimés par kg, les impacts des cultures biologiques sur l'occupation des terres sont toujours supérieurs à ceux des cultures conventionnelles, le rendement des cultures en AB étant plus faibles que ceux en ACR. Pour les autres catégories, la luzerne bio impacte moins l'environnement que la culture conventionnelle. Le blé pur AB quant à lui a un impact toujours supérieur au blé pur ACR pour les catégories eutrophisation, changement climatique et demande en énergie. Le blé en relais AB, moins mécanisé et fertilisé que le blé pur AB, montre des impacts environnementaux inférieurs à ceux du blé en relais ACR pour les catégories eutrophisation et changement climatique mais supérieurs pour la catégorie demande en énergie. Les résultats des comparaisons sont détaillés dans l'annexe IX.

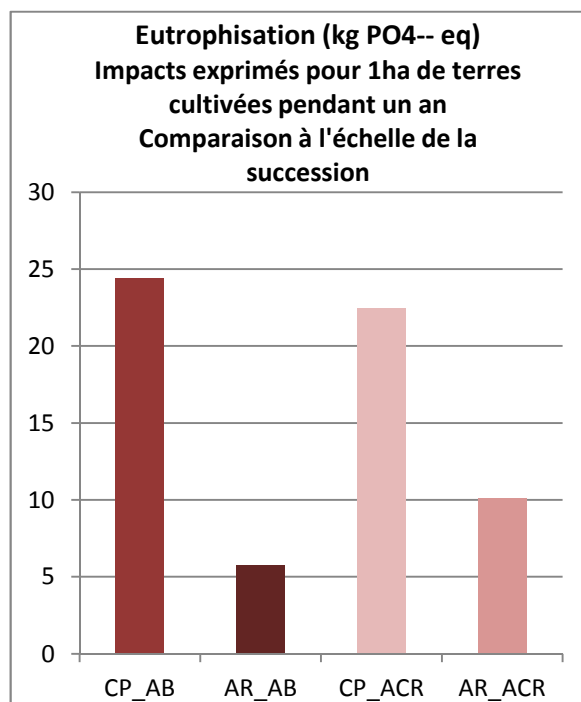


Figure 22: Impacts par ha.an de l'association blé-luzerne en relais (AR) et de la succession de blé pur et luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact eutrophisation

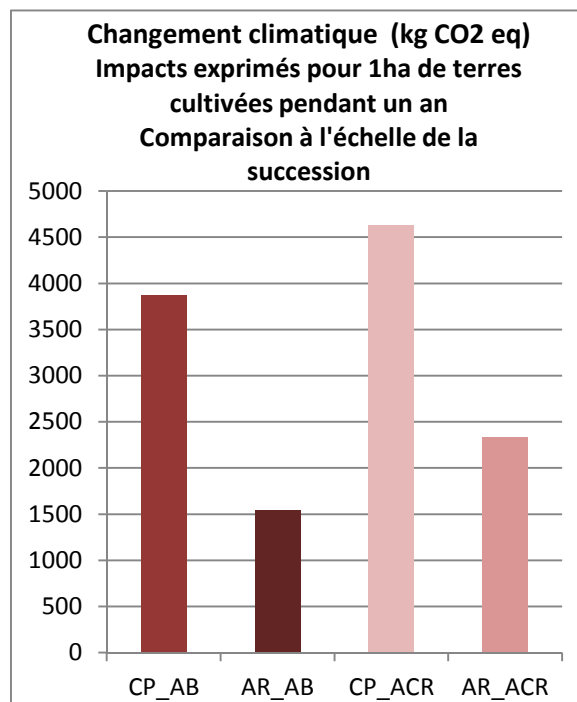


Figure 23: Impacts par ha.an de l'association blé-luzerne en relais (AR) et de la succession de blé pur et luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact changement climatique

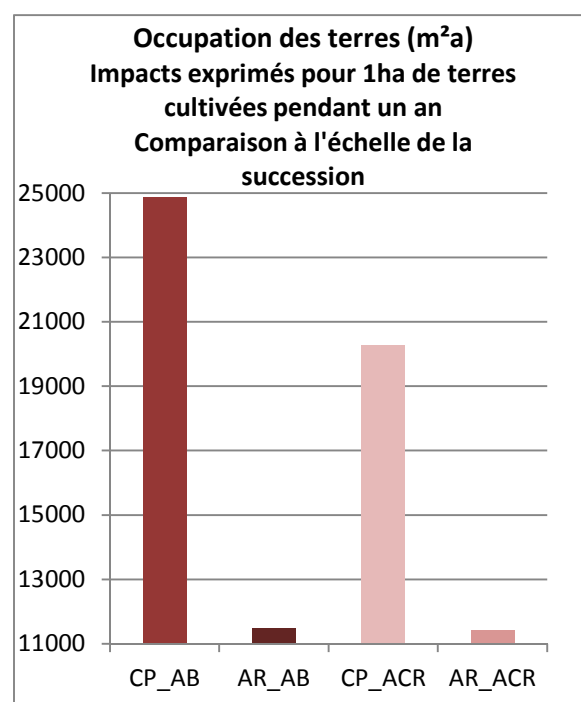


Figure 20: Impacts par ha.an de l'association blé-luzerne en relais (AR) et de la succession de blé pur et luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact occupation des terres

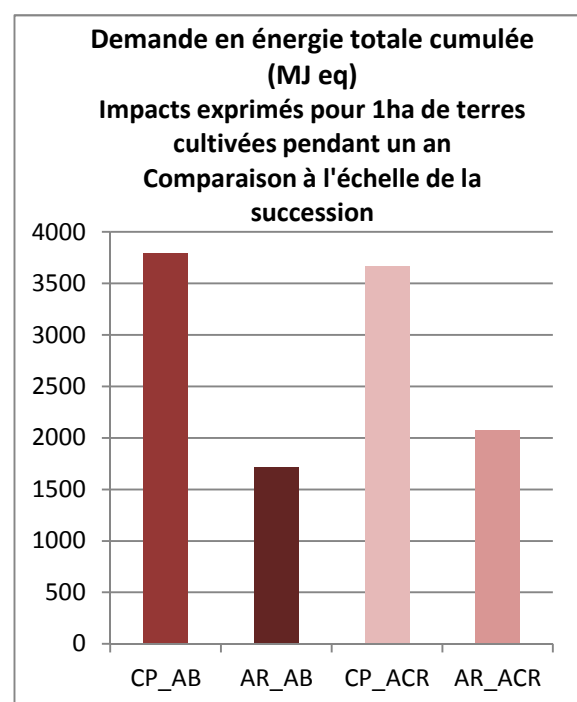


Figure 21: Impacts par ha.an de l'association blé-luzerne en relais (AR) et de la succession de blé pur et luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact demande totale en énergie cumulée

B. COMPARAISON A L'ECHELLE DE LA SUCCESSION [BLE-LUZERNE]

Dans ce paragraphe, la méthode utilisée consiste à comparer les impacts liés à 1ha de blé pur additionnés aux impacts liés à 1ha de luzerne pure avec les impacts correspondants pour l'association blé-luzerne en relais. Cette comparaison permet de prendre en compte le gain de temps observé lorsqu'une luzerne est implantée dans le couvert de blé plutôt que semée seule, succédant une culture de blé.

1) Impacts exprimés en ha de terres cultivées pendant un an

Pour toutes les catégories d'impacts, remplacer une succession de blé pur et luzerne pure (CP) par leur association en relais (AR) permet une réduction des impacts sur l'environnement d'en moyenne 51% (contre 10% en moyenne en comparant les CP et les CR à l'échelle d'une culture). De plus, contrairement à ce qui a été montré lors de la comparaison à l'échelle de la culture, les impacts sur l'environnement des cultures en relais sont toujours plus faibles que ceux liés aux cultures pures (annexe X).

Pour la catégorie eutrophisation, le fait de remplacer une succession de blé et luzerne purs par une association en relais permet de faire diminuer l'impact de 76% en AB (5,7kg de PO₄eq pour l'AR contre 24,4 pour les CP) et de 55% en ACR (10,1kg de PO₄eq pour l'AR contre 22,4 pour les CP) (Figure 22).

Les impacts de la succession blé-luzerne pur et en relais sur le changement climatique sont respectivement de 3874kg de CO₂eq et 1543kg de CO₂eq en AB (-60%), et de 4637kg de CO₂eq et 2334kg de CO₂eq en ACR (-50%) (Figure 23).

La demande totale en énergie cumulée est en AB de 3793MJe pour la succession de CP contre seulement 1713 pour l'AR (-55%). En ACR, la réduction de la demande en énergie est moins forte : -43% avec 2075MJe pour l'AR et 3664MJe pour les CP (Figure 21).

Lorsqu'une succession de CP est substituée par une AR l'occupation des terres est réduite de 54% en AB (24860m²a pour les CP et 11463m²a pour l'AR) et de 44% en ACR (20288m²a pour les CP contre 11409 pour l'AR) (Figure 20).

2) Impacts exprimés en kg de matière sèche de produits récoltés

Encore une fois pour toutes les catégories, les impacts de l'association en relais sont moins importants que ceux de la succession de cultures pures d'en moyenne -54%, contre -51% avec l'autre unité fonctionnelle (annexe X). Les conclusions évoquées dans le paragraphe précédent s'appliquent aussi ici, si ce n'est que les réductions d'impacts sont plus importantes.

La différence d'impacts entre l'association en relais (AR) et la succession de cultures pures (CP) pour l'eutrophisation est de l'ordre de -78% en AB avec un impact de 3,36.10⁻³kg de PO₄eq pour les CP et de 7,5.10⁻⁴kg de PO₄eq pour l'AR, en ACR la réduction est de -58% avec un impact de 2,33.10⁻³kg de PO₄eq pour les CP et de 9,85.10⁻⁴kg de PO₄eq pour l'AR (Figure 24).

L'impact sur le climat d'une AR est plus faible que celui d'une succession de CP de 62% en AB (5,33.10⁻¹kg de CO₂eq pour les CP et 2,01.10⁻¹kg de CO₂eq pour l'AR) et de 53% en ACR (4,82.10⁻¹kg de CO₂eq pour les CP et 2,27.10⁻¹kg de CO₂eq pour l'AR) (Figure 25).

Les demandes en énergie d'une AR et d'une succession de CP sont respectivement de 2,24.10⁻¹MJe et 5,22.10⁻¹MJe en AB (-57%) et de 2,02.10⁻¹MJe et 3,81.10⁻¹MJe en ACR (-47%) (Figure 27).

Enfin la pression sur le sol est en AB de 3,42m²a pour les CP et 1,50m²a pour l'AR soit une réduction de la pression de 56%, en ACR l'occupation est de 2,11m²a pour les CP et de 1,11m²a pour l'AR (-47%) (Figure 26).

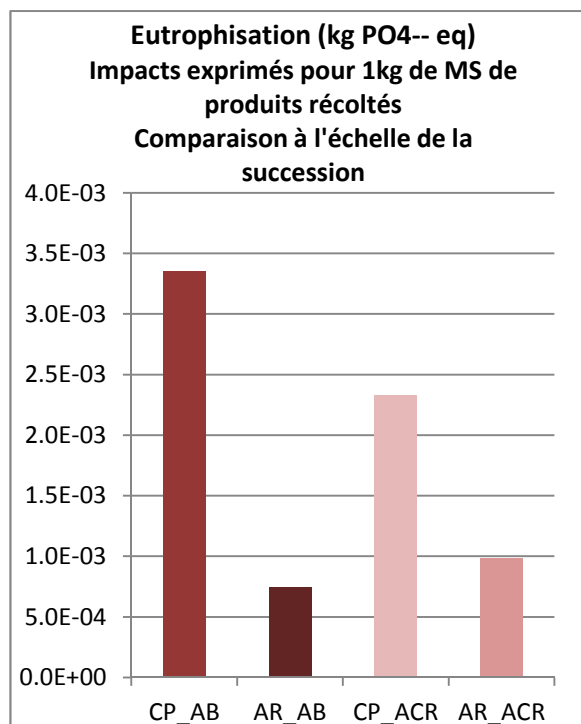


Figure 24: Impacts par kg de MS de produits récoltés de l'association blé-luzerne en relais (AR) et de la succession de blé pur et luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact eutrophisation

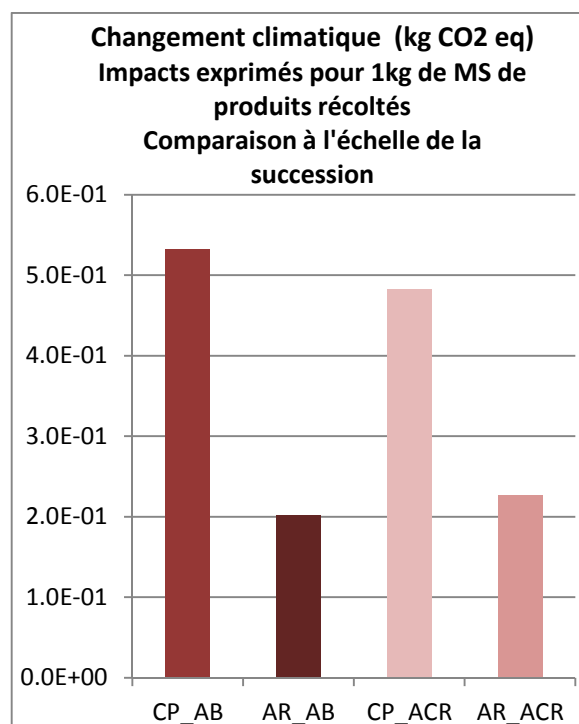


Figure 25: Impacts par kg de MS de produits récoltés de l'association blé-luzerne en relais (AR) et de la succession de blé pur et luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact changement climatique

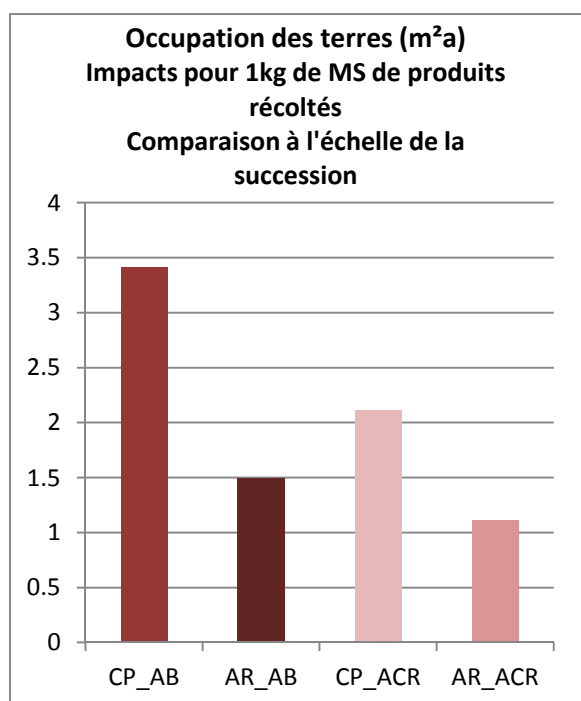


Figure 26: Impacts par kg de MS de produits récoltés de l'association blé-luzerne en relais (AR) et de la succession de blé pur et luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact occupation des terres

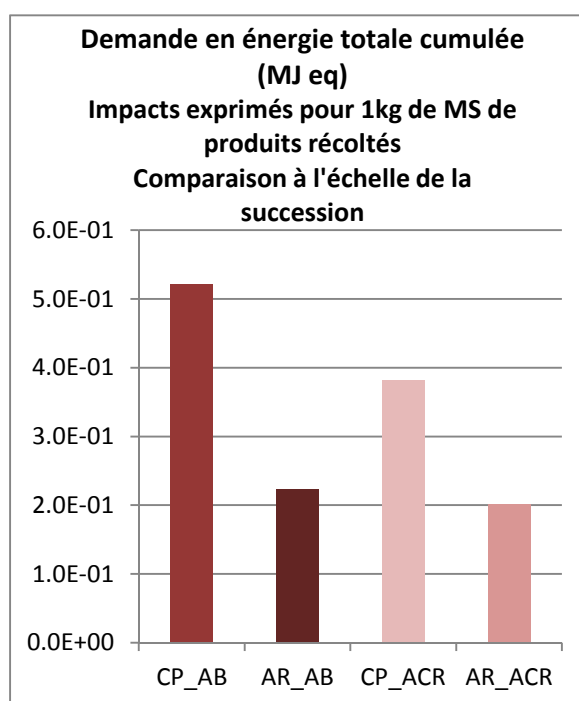


Figure 27: Impacts par kg de MS de produits récoltés de l'association blé-luzerne en relais (AR) et de la succession de blé pur et luzerne pure (CP) en conduite biologique (AB) et raisonnée (ACR) pour la catégorie d'impact demande totale en énergie cumulée

IV. DISCUSSION

A. IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET METHODES

L'impact sur l'environnement de l'association en relais blé-luzerne étudiée ici est toujours globalement inférieur que celui des cultures pures correspondantes qu'elles que soient la méthode de comparaison et l'unité fonctionnelle utilisées. Pour tous systèmes, une réduction moyenne des impacts sur toutes les catégories au minimum de -11% est observée et au maximum de -54% selon la méthode et l'UF choisies. Ces bénéfices sur l'environnement sont principalement dus à l'ininteruption des deux cultures et aux synergies des pratiques culturales qui bénéficient aux 2 cultures. En effet, le fait de semer la luzerne dans le blé supprime la période de sol nu rencontrée entre les deux cultures pures et ainsi réduit les risques de lixiviation. De plus, la luzerne sous-semée bénéficie du sol déjà travaillé de la culture de blé et par conséquent le travail du sol y est réduit.

La première hypothèse de travail : «L'impact sur l'environnement des associations en relais doit être inférieur en moyenne à celui des cultures pures qu'elle que soit la méthode de comparaison» peut donc être validée.

1) Bilan sur les deux échelles de comparaisons

La méthode de comparaison dite à l'échelle de la culture consiste à comparer d'un côté le blé pur avec celui en relais et de l'autre la luzerne pure et en relais. De cette façon, les impacts liés au blé en relais et à la luzerne implantée dedans sont bien séparés entre les deux cultures. En comparant à l'échelle de la culture, les impacts des CR sont en moyenne sur toutes les catégories d'impacts toujours inférieurs à ceux des cultures pures correspondantes. Cependant, l'impact d'une culture en relais pour une catégorie donnée n'est pas toujours inférieur à celui de la CP.

La méthode de comparaison à l'échelle de la succession va elle, considérer le blé en relais avec une luzerne comme un seul et unique système. Les interactions biotiques et les synergies dans la gestion des pratiques culturales entre les cultures associées sont donc mieux saisies qu'avec l'autre méthode. Peu importe l'UF choisie, la comparaison à l'échelle de la succession [blé-luzerne] donne toujours des résultats plus avantageux pour les cultures en relais que la comparaison à l'échelle de la culture. Par exemple avec l'UF en ha.an^{-1} , lorsque des cultures pures sont remplacées par ces mêmes cultures mais en relais les impacts sur l'environnement sont réduits de 10% à l'échelle de la culture, contre 51% pour l'autre échelle de comparaison. De plus à l'échelle de la succession, les impacts de l'association en relais sont toujours inférieurs à ceux de la succession de cultures pures avec une variation de ces différences comprises entre -42% au minimum et -78% au maximum tandis qu'à l'échelle de la culture les impacts des cultures associées peuvent être supérieurs à ceux des cultures pures jusqu'à +8%.

La deuxième hypothèse de ce mémoire : «La méthode de comparaison à l'échelle de la succession des cultures en relais avec les cultures pures (de la récolte de la culture précédent la céréale jusqu'à la récolte de la légumineuse), doit être plus favorable aux cultures en relais que la comparaison à l'échelle de la culture, c'est-à-dire une comparaison de la céréale pur avec la céréale en relais et de la luzerne pure avec celle en relais» peut elle aussi être validée.

2) Unités fonctionnelles et impact

L'interprétation des résultats de l'Analyse de Cycle de Vie en fonction deux unités fonctionnelles étudiées (1kg de MS de produits récoltés et 1ha de terres cultivées pendant 1 an), nous amènent à des conclusions assez similaires : les cultures en relais impactent globalement moins l'environnement que les cultures pures correspondantes.

En comparant les cultures AB avec ACR, les résultats diffèrent selon l'UF. L'unité

fonctionnelle « 1kg de MS de produits récoltés » apporte des résultats moins favorables aux cultures biologiques car cette unité va prendre en compte le rendement des cultures et donc défavoriser les cultures en AB. La fertilisation minérale joue en défaveur des cultures conventionnelles, les rendant plus néfaste pour l'environnement que les cultures pures. Avec l'UF « 1 ha de terres cultivées pendant un an », les impacts des cultures AB sont toujours inférieurs à ceux des cultures ACR hormis dans le cas du blé pour la catégorie occupation des terres et dans le cas du blé pur AB et ACR pour la catégorie demande totale en énergie. Ces 2 derniers cas montrent que même si les cultures bio sont moins fertilisées et ne consomment pas de produits phytosanitaires, si elles sont trop mécanisées, l'impact sur l'environnement d'un hectare de culture bio peut être plus lourd que celui d'un hectare de culture conventionnelle.

La troisième hypothèse était : « La production de 1kg de grains et pailles de blé et de foin de luzerne biologique peut entraîner des impacts environnementaux plus importants que la production de blé et luzerne conventionnelle. Cependant, 1ha de culture bio cultivé pendant un an doit avoir un impact sur l'environnement moins important qu'1ha de culture conventionnelle ». Même s'il est vrai qu'avec l'UF « 1kg de produits récoltés » les impacts des cultures AB sont parfois supérieurs à ceux des cultures conventionnelles, l'UF par ha ne donne pas toujours des impacts inférieurs en AB qu'en ACR. L'hypothèse 3 est donc rejetée

B. LIMITES DE L'ETUDE

Cette étude a nécessité un nombre important de choix et hypothèses méthodologiques. L'ACV est une méthode dite « *goal dependant* » (Brentrup *et al.*, 2004) c'est-à-dire que les résultats obtenus dépendent fortement des objectifs qui ont été définis, il semble alors important de revenir sur certains de ces choix.

1) Limites des méthodes d'ACV proposées

Importance de la fertilisation

La réalisation des inventaires de chacune des cultures soulève un nombre important d'hypothèses sur lesquelles il est nécessaire de revenir. Cette étape de l'ACV vise à calculer l'ensemble des émissions de polluants et des consommations de ressources induites par le système. Les bases de données existantes sur les différents intrants utilisés dans les cultures de blé tendre d'hiver et de luzerne ne sont pas complètes actuellement. Bien que mises à jour et alimentées en continu, certains processus et données notamment concernant les engrais n'étaient pas répertoriées comme par exemple le processus sur le compost de fumier de bovins et de farine de plumes hydrolysée. La fabrication de ces engrais et les émissions qui leurs sont associées ainsi que les émissions de substances suite à leurs épandages sont fortement variables selon leurs compositions et leurs modalités de production. Pour la farine de plumes, dû à un manque de données disponibles ces variabilités locales ne seront pas prises en compte. Pour ce qui est du compost de fumier de bovins, nous avons considéré un compost mûr retourné une seule fois à l'aide d'un chargeur et d'un épandeur comme préconisé par l'un de nos experts de la région Rhône-Alpes (Benoît Merlo).

De plus, ces deux engrais pourraient être considérés comme des intrants au même titre que de l'ammonitrate, pourtant compost et farine sont ici perçus comme du recyclage de déchets issus pour l'un de système de production laitier et pour l'autre d'abattoirs de volailles. Généralement en ACV, un déchet est considéré comme un « reste » et ne présente aucune valeur ou bien une valeur négative dans les inventaires (Jolliet *et al.*, 2010). Dans ce cas, il semble plus pertinent d'attribuer un impact uniquement à leur transport et aux processus de production. Néanmoins, aucune base de données ne répertorie actuellement les processus de

production de ces engrais, ces processus de recyclage de déchets font donc partie de nos limites du système dans nos ACV. Ainsi seules les émissions induites par l'épandage et le transport sont considérées. L'étape de définition des limites du système constitue donc une étape clé dans l'ACV puisqu'elle va fortement conditionner les résultats. Charles *et al.* (2006) montrent en effet dans leur étude sur le blé tendre destiné à la meunerie que le choix de l'engrais azoté et phosphorique joue un rôle fort dans le résultat de leurs ACV, notamment dû aux émissions de métaux lourds qui leur sont associées. Ce constat illustre le besoin de connaissance sur la composition précise des différents engrais.

Concernant la fertilisation potassique, de la même façon que pour les engrais organiques cités précédemment, aucune base de données ne recense le Patentkali[®], engrais autorisé en AB et élaboré à partir d'extraction minière de sels potassiques. Ce produit correspond à un sulfate de potassium (30% K₂O) contenant du sel de magnésium. Nous avons fait le choix, plutôt que d'éliminer ce processus de notre étude d'utiliser un processus pour un engrais potassique générique répertorié dans la base de données AGRIBALYSE. Ce processus fait référence à différents engrais potassiques : le chlorure de potassium (60% K₂O) et le sulfate de potassium (50% de K₂O). Si à la place le processus « sulfate de potassium » avait été utilisé, processus ayant un impact sur l'environnement en moyenne plus élevé de 184% que le processus d'un engrais moyen, l'impact sur l'environnement de la luzerne pure biologique (60U de Patentkali apporté) serait quant à lui plus élevé d'en moyenne 5,8% (annexe XI). En utilisant le processus « chlorure de potassium » plutôt que celui de l'engrais générique, les impacts de la luzerne pure biologique seraient cette fois-ci très légèrement inférieurs (-0,8% en moyenne). Le choix des processus concernant la fertilisation peuvent donc jouer un rôle assez important dans la détermination des impacts d'une culture

La luzerne foin, une culture peu étudiée en ACV

Contrairement au blé, la luzerne foin est une culture qui reste assez peu renseignée dans les bases de données actuelles et encore moins en AB. Son inventaire a donc été sujet à de nombreuses hypothèses notamment sur la fertilisation potassique comme il a été question plus haut mais pas seulement. Une des premières hypothèses posée concerne l'inventaire de production de semences de luzerne puisqu'il n'existe pas dans Ecoinvent ou AGRIBALYSE. Cependant dans ces deux bases de données, le processus de production de semences de trèfle est utilisé dans les inventaires de culture de luzerne conventionnelle, hypothèse reprise ici. Pour les cultures biologiques, le processus a simplement été modifié en supprimant les entrées en pesticides et en engrais phosphatés. Il s'agit là d'un raisonnement très simplifié puisque les émissions en métaux lourds, phosphore et autres substances émises lors de l'épandage (consommation de carburant, utilisation de machines, ...) n'ont pas été corrigées, à la baisse pour ce processus. Ces remarques montrent donc que les impacts liés à la luzerne biologique pourraient être revus légèrement à la baisse dans notre étude, mais le processus semence ne semble pas avoir une grande influence sur l'impact total.

Le phosphore émis vers les rivières dû à l'érosion se calcule en multipliant la quantité de phosphore contenu dans les sols par la fraction de sol érodé parvenant jusqu'à une rivière (annexe III). Le calcul de la quantité de sol total érodé nécessite de définir un facteur-C, représentatif de la couverture végétale en utilisant l'une ou l'autre des 2 tables suivantes : la table de Nemecek, 2003 ou la table de l'USLE. La luzerne ne figurant dans aucune des tables, nous avons pris le parti d'utiliser le facteur du trèfle semence de la table de Nemecek puisque c'est avec celle-ci que les autres calculs ont été réalisés. Cependant, la table de l'USLE est celle utilisée dans les inventaires de luzernes répertoriés dans AGRIBALYSE. Les résultats d'impact issus de scénarios utilisant le facteur-C issus de la table de l'USLE ne présentent de différences avec ceux utilisant le facteur-C issus de la table de Nemecek que sur l'eutrophisation. Ces différences restent très faibles : pour toutes méthodes de comparaison et

toutes UF, l'eutrophisation varie d'un scénario à un autre au maximum de 0,2% (annexe XII).

La comparaison à l'échelle de la succession

Dans notre méthode de comparaison à l'échelle de la succession, la culture de blé en relais avec une luzerne est considérée comme une seule et même culture avec un unique rendement. Autrement dit, cela ne correspond pas à ajouter les impacts du blé en relais avec ceux de la luzerne en relais, mais à calculer l'impact du système blé-luzerne. Pour illustrer cette remarque prenons l'exemple de la fertilisation azotée en système conventionnel : l'impact environnemental dû à l'utilisation d'ammonitrate est rapporté dans un cas à 110qx/ha de blé et dans l'autre à 325qx/ha de [blé-luzerne]. Les impacts par kg de MS de produits récoltés du système en relais sont donc plus faibles que l'addition des impacts du blé en relais et luzerne en relais. Ce choix méthodologique peut être remis en question puisque il ne renvoie pas à une réalité : l'association blé-luzerne ne correspond pas à une unique fonction puisqu'elle produit de la luzerne foin, du blé panifiable et de la paille pour les litières animales. L'expression des impacts avec l'UF représentative de la productivité (kg) de ce système est donc un peu difficile, au contraire l'UF représentant la fonction de gestion des terres est tout à fait pertinente.

2) Incertitudes des données

Pour obtenir des données les plus précises possibles pour réaliser les inventaires, l'étude a été contextualisée. Cependant les cultures de blé et luzerne en relais en agriculture conventionnelle raisonnée ne sont pas pratiquées en région Rhône-Alpes. Les experts ont donc supposé que le blé en relais en ACR se conduisait exactement comme le blé pur, ce qui explique l'absence de différence d'impacts (hormis les variations dues aux pertes en NO₃) entre le blé en relais et pur en ACR. L'itinéraire de la luzerne en relais a quant à lui été inspiré de la conduite biologique de la luzerne en relais et de la luzerne pure conventionnelle. De plus, le panel était plus compétent en AB qu'en ACR, il existe donc peut-être un biais dans cette étude.

Nous avons choisi de calculer les émissions directes selon la méthode de calcul utilisée dans la base de données Ecoinvent et selon le guide de l'IPCC 2006. La valeur de ces émissions peut varier fortement selon la méthode utilisée, il s'agit ici d'une méthode parmi d'autres.

Malgré un certain nombre d'hypothèses et d'incertitudes dans cette étude, les résultats obtenus semblent du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec les cultures référencées dans Ecoinvent et AGRIBALYSE. Ces comparaisons sont détaillées en annexe XIII.

C. PERSPECTIVES

Ce mémoire de fin d'étude constitue une première étape dans l'évaluation des associations de cultures céréales-légumineuses en relais. Pour consolider ces évaluations et la méthode il sera nécessaire dans un premier temps de creuser les inventaires de luzerne foin notamment en créant les processus de production de semences de luzerne, d'inoculation des semences et de l'engrais potassique Patentkali®. La méthode devra être appliquée à différents contextes pédoclimatiques afin de s'assurer de sa pertinence en dehors de notre cas d'étude. L'exemple traité ici ne présentait que le cas où le rendement des cultures en relais est plus faible en qx/ha que celui des cultures pures. Dans le cas où les cultures en relais sont plus productives que les cultures pures, nous pourrions nous demander si cela peut modifier les conclusions tirées dans ce mémoire. Il semblerait donc intéressant de l'appliquer à des scénarios de variations de rendement des associations par rapport aux cultures pures.

D'autre part puisque la base de données AGRIBALYSE est adaptée au contexte français une mise à jour entière des inventaires pourrait-être faite avec cette base de données de façon

à être plus précis qu'avec les inventaires suisses d'Ecoinvent.

Enfin les impacts environnementaux devraient être évalués à l'aide de différentes méthodes de caractérisation des impacts. Si les tendances observées à l'aide de la méthode CML IA baseline 2014 INRA sont les mêmes que celles observées avec d'autres méthodes, les résultats seraient plus fiables.

CONCLUSION

L'intérêt porté aux associations céréale-légumineuses depuis plus de 30 ans reposait surtout sur des questions de performances agronomique et économique. Malgré les enjeux de préservation de l'environnement auxquels nous sommes confrontés, peu de données sont disponibles concernant les performances environnementales de ces cultures ; les quelques données existantes traitant des associations simultanées. La mission de stage consistait donc à proposer une démarche méthodologique permettant d'évaluer les impacts environnementaux des associations en relais céréale-légumineuse en prenant en compte les interactions spécifiques à ce type de culture.

Nous avons montré ici que la délimitation du système (limites spatio-temporelles, échelles d'étude) est cruciale dans ce type d'évaluation car les cultures en relais se superposent sur une partie seulement de leur cycle. Nous proposons ici une méthode permettant d'évaluer les impacts des cultures en relais en confrontation avec ceux des cultures pures basée sur le gain de temps et d'espace que permettent ces cultures : les impacts de la légumineuse semée sous couvert ne sont pas comptabilisés pendant la période entre son semis et la récolte de la céréale.

Les résultats obtenus en appliquant cette méthode au cas de la luzerne semée sous couvert de blé en Rhône-Alpes sont très positifs vis-à-vis des associations. L'association en relais semble permettre de concilier une production importante et un moindre impact environnemental puisque dans notre exemple, elle permet d'une part d'obtenir un rendement supérieur en qx/ha.an^{-1} que les cultures pures mais aussi de réduire l'impact sur l'environnement, pour toutes les catégories d'impacts considérées, de 10% à 54% en moyenne selon la méthode utilisée.

Cependant, ces résultats sont à confirmer par une analyse sur un plus grand nombre de données issues de différents scénarios et dans différents contextes pédoclimatiques. Il reste encore aujourd'hui à affiner les inventaires de cycle de vie des cultures et notamment de la luzerne.

BIBLIOGRAPHIE

- Amossé C., 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. Doctorat en Agronomie, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement de Paris, 136p.
- Amossé C., Jeuffroy M.-H., Celette F., David C., 2013a. Relay-intercropped forage legumes help to control weeds in organic grain production. *European Journal of Agronomy* 49, pp.158-167.
- Amossé C., Jeuffroy M.-H., David C., 2013b. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: effects on performance and resource availability. *Field Crops Research* 145, pp.78-87.
- Anil L., Park J., Phipps R.H., Miller F.A., 1998. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass and Forage Science* 53, pp.301-317.
- Badey L., Dauguet S., Aoun W.B., Bosque F., 2013. Compte rendu de la 8e conférence internationale relative aux Analyses de Cycle de Vie dans le secteur agro-alimentaire : LCA Food 2012. *Oléagineux Corps Gras et Lipides* 20: 171-175.
- Bedoussac L., Justes E., 2010. The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil* 330, pp.19-35.
- Bedoussac L., Justes E., 2011. A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: Application to durum wheat–winter pea intercrops. *Field Crops Research* 124, pp.25-36.
- Bergkvist G., Stenberg M., Wetterlind J., Båth B., Elfstrand S., 2011. Clover cover crops under-sown in winter wheat increase yield of subsequent spring barley—Effect of N dose and companion grass. *Field Crops Research* 120, pp.292-298.
- Brentrup F., Küsters J., Kuhlmann H., Lammel J., 2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology. I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *European Journal of Agronomy* 20, pp.247-264.
- Charles R., Jolliet O., Gaillard G., Pellet D., 2006. Environmental analysis of intensity level in wheat crop production using life cycle assessment. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 113, pp.216-225.
- Collomb P., 1999. Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, FAO. *Economica*, 197p.
- Corre-Hellou G., Brisson N., Launay M., Fustec J., Crozat Y., 2007. Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea–barley intercrops given different soil nitrogen supplies. *Field Crops Research* 103, pp.76-85.
- Corre-Hellou G., Fustec J., Crozat Y., 2006. Interspecific competition for soil N and its interaction with N₂ fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. *Plant and Soil* 282, pp.195-208.
- Eaglesham A., Ayanaba A., Rao V.R., Eskew D., 1981. Improving the nitrogen nutrition of maize by intercropping with cowpea. *Soil Biology and Biochemistry* 13, pp.169-171.

- Genest J., Steppeler H., 1973. Effects of companion crops and their management on the undersown forage seedling environment. *Canadian Journal of Plant Science* 53, pp.285-290.
- Ghaley B.B., Hauggaard-Nielsen H., Høgh-Jensen H., Jensen E.S., 2005. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 73, pp.201-212.
- Hartwig N.L., Ammon H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed science* 50, pp.688-699.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2001. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Research* 70, pp.101-109.
- Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., Von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S., 2009. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research* 113, pp.64-71.
- Hayer F., Bonnin E., Carrouée B., Gaillard G., Nemecek T., Schneider A., Vivier C., 2010. Designing sustainable crop rotations using life cycle assessment of crop combinations. 9th European IFSA Symposium, 4-7 Juillet 2010, Viennes (Autriche), pp.903-911.
- Jensen E.S., 1996. Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil* 182, pp.25-38.
- Jolliet O., Saadé M., Crettaz P., Shaked P., 2010. Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan. Collection Science et ingénierie de l'environnement. 2ème édition mise à jour et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 302p.
- Le Breton M., 2011. Évaluation multicritères d'itinéraires techniques d'associations culturales céréale-légumineuse. Mémoire de Fin d'Etudes, Sciences Agronomiques, Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers, 74p.
- Mauriès M., 2003. Luzerne: culture, récolte, conservation, utilisation. France Agricole Editions. Imprimerie MAME, Tours, 240p.
- Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Crozat Y., Jeuffroy M.H., 2010. The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research* 119, pp.2-11.
- Naudin C., Corre-Hellou G., Voisin A.-S., Oury V., Salon C., Crozat Y., Jeuffroy M.-H., 2011. Inhibition and recovery of symbiotic N₂ fixation by peas (*Pisum sativum* L.) in response to short-term nitrate exposure. *Plant and soil* 346, pp.275-287.
- Naudin C., van der Werf H.M., Jeuffroy M.-H., Corre-Hellou G., 2014. Life cycle assessment applied to pea-wheat intercrops: A new method for handling the impacts of co-products. *Journal of Cleaner Production* 73, pp.80-87.
- Nemecek T., Dubois D., Huguenin-Elie O., Gaillard G., 2011. Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems* 104, pp.217-232.
- Nemecek T., von Richthofen J.-S., Dubois G., Casta P., Charles R., Pahl H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy* 28, pp.380-393.
- Nicco L., Serveau L., Chang J.-P., Vincent J., Allemand N., Boutang J., Andre J.-M., Bailly-Vaulont A., Bort R., Deflorenne E., Druart A., Dulhoste S., Fontelle J.-P., Gavel A., Gueguen

C., Jabot J., Jacquier G., Jeannot C., Martin E., Mathias E., Ringuet J., Taïeb N., Vilmain J.-B. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France : Séries sectorielles et analyses étendues. CITEPA, 2014, 333p. Rapport n°1148sec.

Ofori F., Stern W.R., 1987. Cereal-legume intercropping systems. *Advances in Agronomy* 41, pp.41-90.

Pelletier F.P., 2008. L'analyse du cycle de vie en agriculture: concepts et opportunités. Colloque en agroenvironnement, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement du Québec, Drummondville, 12p.

Pelzer E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifaï M., Baranger E., Bedoussac L., Biarnès V., Boucheny P., Carrouée B., Dorvillez D., Foissy D., Gaillard B., Guichard L., Mansard M.-C., Omon B., Prieur L., Yvergniaux M., Justes E., Jeuffroy M.-H., 2012. Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy* 40, pp.39-53.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being (Synthesis)*. Washington DC, 155p.

Sprent J.I., 1989. Which steps are essential for the formation of functional legume nodules? *New Phytologist* 111, pp.129-153.

Trenbath B.R., 1974. Biomass productivity of mixtures. *Journal of Ecology* 91, pp.177-209.

Trenbath B.R., 1993. Intercropping for the management of pests and diseases. *Field Crops Research* 34, pp.381-405.

van der Werf H., petit J., 2002. Evaluation de l'impact environnemental de l'agriculture au niveau de la ferme : comparaison et analyse de 12 méthodes basées sur des indicateurs. *Courrier de l'environnement de l'INRA* 46, pp.121-133.

Vandermeer J.H., 1989. *The ecology of intercropping*. 1ère édition. Cambridge University Press, 241p.

Willey R.W., 1979. Intercropping-Its Importance and Research Needs. Part I. Competition and Yield Advantages. *Field Crop Abstracts* 32, pp.1-10.

ANNEXES

<i>ANNEXE I: Caractéristiques des principales méthodes d'analyse de l'impact actuelles..</i>	<i>- 1 -</i>
<i>ANNEXE II: Itinéraires cultureux techniques des cultures de blé tendre d'hiver et de luzerne foin, purs et en relais, en agriculture biologique et conventionnelle raisonnée.....</i>	<i>- 2 -</i>
<i>ANNEXE III: Méthode et valeurs retenues pour le calcul des émissions directes et des ressources extraites</i>	<i>- 29 -</i>
<i>ANNEXE IV: Extrait du Manuel de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO® (C. Bockstaller et P. Girardin, juillet 2008).....</i>	<i>- 36 -</i>
<i>ANNEXE V: Autres hypothèses posées pour réaliser les Analyses de Cycle de Vie du blé et de la luzerne</i>	<i>- 42 -</i>
<i>ANNEXE VI: Facteur de caractérisation des principales substances prises en compte dans les catégories d'impact eutrophisation, changement climatique, occupation des terres et demande totale en énergie cumulée; selon la méthode CML IA baseline 2014 INRA - with total CED.....</i>	<i>- 43 -</i>
<i>ANNEXE VII : Comparaison des impacts potentiels des cultures en relais par rapport aux cultures pures correspondantes à l'échelle de la culture</i>	<i>- 45 -</i>
<i>ANNEXE VIII: Comparaison à l'échelle de la culture des impacts potentiels de la luzerne en relais et pure selon l'UF « 1ha de terres cultivées » (ha) et « 1ha de terres cultivées pendant 1 an » (ha.an)</i>	<i>- 46 -</i>
<i>ANNEXE IX: Comparaison des impacts entre une culture conduite en agriculture biologique (AB) et la culture en agriculture conventionnelle (ACR) correspondante.....</i>	<i>- 46 -</i>
<i>ANNEXE X: Comparaison des impacts potentiels des cultures en relais par rapport aux cultures pures correspondantes à l'échelle de la succession [blé-luzerne].....</i>	<i>- 46 -</i>
<i>ANNEXE XI: Influence du choix du processus représentatif de la production du Patentkali® sur le résultat final de l'ACV.....</i>	<i>- 46 -</i>
<i>ANNEXE XII: Influence du choix du facteur-C dans le résultat final des ACV de luzerne-</i>	<i>46 -</i>
<i>ANNEXE XIII: Comparaison de nos résultats avec les références des bases de données Ecoinvent et AGRIBALYSE</i>	<i>- 46 -</i>

ANNEXE I: Caractéristiques des principales méthodes d'analyse de l'impact actuelles

Nom de la méthode		Agri-BALYSE	CML	Impact 2002+	ReCipe	EU-LCA
Type de méthodes		Mid-point	Mid-point	Mid-point et end-point	Mid-point et end-point	Mid-point et end-point
Catégorie intermédiaires couverte	Acidification	x	x	x	x	x
	Eutrophisation	x	x	x		x
	Changement climatique	x	x	x	x	x
	Destruction de l'ozone		x	x	x	x
	Epuisement des ressources non renouvelables	x	x	x	x	x
	Santé humaine	x	x	x	x	x
	Ecotoxicité	x	x	x	x	x
	Formation d'oxydant photochimique		x	x	x	x
	Utilisation des sols	x	x	x	x	x
	Extraction d'énergie		x	x	x	x
	Radiation ionisante			x	x	x
	Epuisement des ressources en eau			x		x
	Accidents			x		
Catégories de dommages couvertes	Santé humaine			x	x	x
	Environnement naturel biotique			x	x	x
	Environnement naturel abiotique			x		
	Ressources naturelles abiotiques			x	x	x
	Ressources naturelles biotiques					

Source : Bases de données chargées dans le logiciel SimaPro 8

ANNEXE II: Itinéraires culturaux techniques des cultures de blé tendre d'hiver et de luzerne foin, purs et en relais, en agriculture biologique et conventionnelle raisonnée

CULTURE & TYPE DE CONDUITE : Blé pur en Agriculture Biologique		
zone polyculture élevage (culture de vente) - sec		
OBJECTIF DE RENDEMENT	30qx/ha grains	2,5t de pailles
ROTATION DANS LAQUELLE LA CULTURE S'INSERE	Luzerne (3,7ans) – Maïs ensilage – Blé – Maïs grain (précoce) – Méteil– Blé <i>Rotation courante dans l'Ain moins en Isère</i>	
TYPE DE SOL	Limon argileux (Nord – Isère, Ain, entre Ain-Rhône) 60% limon, 25% argile, 15% sables, 3% de matières organiques, CaCO ₃ entre 0 et 5% (sol faiblement calcaire), charge en cailloux < ou = 5%, pente entre 2% et 5%; profondeur=1m; pH=7-7,5 sol peu drainant (et drainé); sol un peu battant; un peu d'hydromorphie (<i>mais ne pose pas de problèmes pour l'insertion de légumineuses</i>)	
TRANSPORTS DES INTRANTS <i>Distance moyenne considérée (entre les exploitations et les fournisseurs)</i>	10km-15km pour les intrants des coopératives et la collecte Entre 0 et 5km pour les intrants de ferme	
RELIQUATS AZOTES AU SEMIS ET SORTIE HIVER	RSH= entre 20 et 40	
Pertes en NO ₃	D'après INDIGO : pertes de 26 kg d'N sous forme N-NO ₃	
IRRIGATION	Non mais disponible, aspersion (enrouleur)	
GESTION DES RESIDUS DU PRECEDENT	Méteil : résidus exportés	
TRAVAIL DU SOL	DECHAUMAGE	Passage : 2 Date : avant labour Tracteur 4RM, 150cv : 6000kg ; durée de vie 12 ans, 250ha/an Déchaumeur à DENTS : 4m, 3200kg ; débit 2.5ha/h ; 250ha/an; durée de vie 10 ans
	LABOUR	Passage : 1 Date : 20 octobre

		Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Charrue 5corps avec ravette : portée, 1600kg; débit 0.9ha/an, 160ha/an, durée de vie 10 ans
	TRAVAIL LEGER	/
SEMIS		Date : 22 ou 23 octobre Variété : Arezzo Densité de semis : 180kg/ha, Semis à 17,5 cm d'écart Type de semences : AB certifiées Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Combiné herse rotative semoir : (SYSTERRE) 4m, 500kg, débit : 2ha/h, 31 ha/an, durée de vie : 10 ans Passage ROULEAU = 0,5 Tracteur + rouleau : 4m ; 22 ha/an, 9h/an, 1,7 ha/h, 1500kg, durée de vie : 10 ans
FERTILISATION	MINERALE	/
	ORGANIQUE	Passage : 1 Date : 01 octobre Produit/dose : fumier de bovin 10t/ha (32.3U) Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Epandeur à fumier ou compost, classique : 10t, 5000kg (SYSTERRE), débit 3ha/an, utilisation an : 500ha/an, durée de vie 7 ans Passage : 1 Date : printemps Produit/dose : farine de plume 50U (10%N organique) > 500kg/ha Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Semoir à engrais centrifuge : (SYSTERRE) 12m, 380kg; 8,1ha/h, 90ha/an, durée de vie 12 ans
CHAULAGE		/

TRAITEMENT PHYTOSANITAIRES	HERBICIDES	/	
	FONGICIDES	/	
	INSECTICIDES	/	
	REGULATEUR	/	
GESTION DES MALADIES, ADVENTICES ET RAVAGEURS <u>AB</u>		Passages : 2.3 une fois tous les 3 ans = 0,3 + 2 passages en fin d'hiver début printemps Date : fin novembre à début décembre et fin d'hiver à début printemps Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Herse étrille 6m : 480kg (EDEN) ; 3ha/h ; 125ha/an, durée de vie: 10ans	
RECOLTE		Date : 20 juillet Moissonneuse-batteuse: 5 secoueurs, 6500kg (<i>SYSTERRE</i>), 1.25h/ha, 150ha/an TRANSPORTS Tracteur 4RM, 150cv : 6000kg ; durée de vie 12 ans, 250ha/an Benne 10t-12t : 3755kg (<i>SYSTERRE</i>), débit 0.4ha/h, utilisation annuelle : 117ha/an, durée de vie : 15 ans	
GESTION DES RESIDUS		Pailles exportées Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Presses balle ronde : 1570kg ; 25balles/h ; 1000balles/an TRANSPORT PAILLE (5km) : Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Remorque agricole : plateau 8t, 8m, 2225kg, 125ha/an, 4ha/h, durée de vie 15 ans	
CULTURE INTERMEDIAIRE		/	
RENDEMENTS		30qx/ha grains à 15% d'humidité et 11% de protéines	2,5t pailles

CULTURE & TYPE DE CONDUITE : Blé en relais en Agriculture Biologique

zone polyculture élevage (culture de vente) – sec		
OBJECTIF DE RENDEMENT	Blé 3 ans sur 4: Grains: 35qx; Pailles: 2,7t	Blé année difficile (1 an sur 4): Grains=15qx; Pailles=1,5t (mais non récoltées)
ROTATION DANS LAQUELLE LA CULTURE S'INSERE	Luzerne (<u>2,7ans</u>) – Maïs ensilage – Blé– Maïs grain (précoce) - Méteil– Blé	
TYPE DE SOL	Limon argileux (Nord – Isère, Ain, entre Ain-Rhône) 60% limon, 25% argile, 15% sables, 3% de matières organiques, CaCO3 entre 0 et 5% (sol faiblement calcaire), charge en cailloux < ou = 5%, pente entre 2% et 5%; profondeur=1m; pH=7-7,5 sol peu drainant (et drainé); sol un peu battant; un peu d'hydromorphie (<i>mais ne pose pas de problèmes pour l'insertion de légumineuses</i>)	
TRANSPORTS DES INTRANTS <i>Distance moyenne considérée (entre les exploitations et les fournisseurs)</i>	10km-15km pour les intrants des coopératives et la collecte Entre 0 et 5km pour les intrants de ferme	
RELIQUATS AZOTES AU SEMIS ET SORTIE HIVER	RSH= entre 20 et 40	
Pertes en NO3	D'après INDIGO : pertes de 19kg d'N sous forme N-NO3	
IRRIGATION	Non mais disponible, aspersion (enrouleur)	
GESTION DES RESIDUS DU PRECEDENT	Méteil : résidus exportés	
TRAVAIL DU SOL	DECHAUMAGE	Passage : 2 Date : avant labour Tracteur 4RM, 150cv : 6000kg ; durée de vie 12 ans, 250ha/an Déchaumeur à DENTS : 4m, 3200kg ; débit 2.5ha/h ; 250ha/an; durée de vie 10 ans
	LABOUR	Passage : 1 Date : 20 octobre Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Charrue 5corps avec ravette : portée, 1600kg; débit 0.9ha/an, 160ha/an, durée de vie 10 ans

	TRAVAIL LEGER	PREPARATION DU SEMIS DE LA LUZERNE 1 passage 10 jours avant le semis de luzerne <i>1 passage après le semis de luzerne, le même jour (compté dans l'ACV de la luzerne)</i> Date : fin novembre/début décembre + <i>début décembre</i> Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Herse étrille 6m : 480kg (EDEN) ; 3ha/h ; 125ha/an, durée de vie: 10ans
SEMIS		Date : 22 ou 23 octobre Variété : Arezzo Densité de semis : 180kg/ha, Semis à 17,5 cm d'écart Type de semences : AB certifiées Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Combiné herse rotative semoir : (SYSTERRE) 4m, 500kg, débit : 2ha/h, 31 ha/an, durée de vie : 10 ans Passage ROULEAU = 0,5 Tracteur + rouleau : 4m ; 22 ha/an, 9h/an, 1,7 ha/h, 1500kg, durée de vie : 10 ans
FERTILISATION	MINERALE	/
	ORGANIQUE	Passage : 1 Date : 01 octobre Produit/dose : fumier de bovin 10t/ha (32.3U) Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Epandeur à fumier ou compost, classique : 10t, 5000kg (SYSTERRE), débit 3ha/an, utilisation an : 500ha/an, durée de vie 7 ans
CHAULAGE		/
TRAITEMENT PHYTOSANITAIRES	HERBICIDES	/
	FONGICIDES	/
	INSECTICIDES	/
	REGULATEUR	/

GESTION DES MALADIES, ADVENTICES ET RAVAGEURS <u>AB</u>	Passage : une fois tous les 3 ans=0,3 Date : fin novembre à début décembre Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Herse étrille 6m : 480kg (EDEN) ; 3ha/h ; 125ha/an, durée de vie: 10ans	
RECOLTE	Date : 20 juillet Moissonneuse-batteuse : 5 secoueurs, 6500kg (SYSTERRE), 1.25h/ha, 150ha/an TRANSPORTS Tracteur 4RM, 150cv : 6000kg ; durée de vie 12 ans, 250ha/an Benne 10t-12t : 3755kg (SYSTERRE), débit 0.4ha/h, utilisation annuelle : 117ha/an, durée de vie : 15 ans	
GESTION DES RESIDUS	Pailles exportées Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Presses balle ronde : 1570kg ; 25balles/h ; 1000balles/an TRANSPORT PAILLE (5km) : Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Remorque agricole : plateau 8t, 8m, 2225kg, 125ha/an, 4ha/h, durée de vie 15 ans	
CULTURE INTERMEDIAIRE	/	
RENDEMENTS	Blé 3ans sur 4: Grains: 35qx; Pailles: 2,7t	Blé année difficile (1/4): Grains=15qx; Pailles=1,5t (pas récoltées)
	➤ En moyenne : grains=30qx et pailles=2,025t/ha	

CULTURE & TYPE DE CONDUITE : Luzerne pure en Agriculture Biologique

zone polyculture élevage (culture de vente) – sec		
OBJECTIF DE RENDEMENT	1 ^{ère} année: 2-2-1,5 – 1,5= 7t	2 et 3 ^{ème} année: 3,5-2-2-1,5= 9t MS
ROTATION DANS LAQUELLE LA CULTURE S'INSERE	Luzerne (3,71ans) – Maïs ensilage – Blé – Maïs grain (précoce) - Méteil– Blé	
TYPE DE SOL	Limon argileux (Nord – Isère, Ain, entre Ain-Rhône) 60% limon, 25% argile, 15% sables, 3% de matières organiques, CaCO3 entre 0 et 5% (sol faiblement calcaire), charge en cailloux < ou = 5%, pente entre 2% et 5%; profondeur=1m; pH=7-7,5 sol peu drainant (et drainé); sol un peu battant; un peu d'hydromorphie (<i>mais ne pose pas de problèmes pour l'insertion de légumineuses</i>)	
TRANSPORTS DES INTRANTS <i>Distance moyenne considérée (entre les exploitations et les fournisseurs)</i>	10km-15km pour les intrants des coopératives et la collecte Entre 0 et 5km pour les intrants de ferme	
RELIQUATS AZOTES AU SEMIS ET SORTIE HIVER	RSH= entre 20 et 40	
Pertes en NO3	D'après INDIGO : pertes de 21kg d'N sous forme N-NO3	
IRRIGATION	Non mais disponible, aspersion (enrouleur)	
GESTION DES RESIDUS DU PRECEDENT	Blé : résidus exportés	
TRAVAIL DU SOL	DECHAUMAGE	Passage : 1 + 0,5 (50% des agriculteurs déchaument, les autres labourent) Date : août Tracteur 4RM, 150cv : 6000kg ; durée de vie 12 ans, 250ha/an Déchaumeur à DENTS : 4m, 3200kg ; débit 2.5ha/h ; 250ha/an
	LABOUR	Passage : 0,5 (50% des agriculteurs déchaument, les autres labourent) Date : août Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Charrue 5corps avec ravette : portée, 1600kg; débit 0.9ha/an, 160ha/an, durée de vie 10 ans
	TRAVAIL LEGER	/

SEMIS		Date : FIN AOUT Variété : type flamande Giulia Densité de semis : 25kg/ha Type de semences : AB certifiées Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Combiné herse rotative semoir : (SYSTERRE) 4m, 500kg, débit : 2ha/h, 31 ha/an, durée de vie : 10 ans
FERTILISATION	MINERALE	Passage : 1 PAR AN Date : Fin mars Produits/doses : Patentkali : (extrait de carrière) : 30% de potasse : 200kg/ha > 60U de potasse Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Semoir à engrais centrifuge : (SYSTERRE) 12m, 380kg; 8,1ha/h, 90ha/an, durée de vie 12 ans
	ORGANIQUE	/
CHAULAGE		/
TRAITEMENT PHYTOSANITAIRES	HERBICIDES	/
	FONGICIDES	/
	INSECTICIDES	/
	REGULATEUR	/
GESTION DES MALADIES, ADVENTICES ET RAVAGEURS <u>AB</u>		/
RECOLTE		Passage : 0.5 (1seule fois) <i>Un broyage un an sur 2 à l'automne de l'année d'installation</i> Date : 20/10 année 0 Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans BROYEUR 3m : 1100kg (SYSTERRE), débit 1,5ha/h, 110ha/an, durée de vie : 7 ans <i>Pour chaque coupe (4 par an) de fin avril –juin – septembre – à fin septembre</i> Passage : 1 Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Faucheuse 6 ou 7 assiettes : 850kg (SYSTERRE), débit 1.8ha/h, 90ha/an, durée de vie 7 ans

	Passage : 0.75 =3 coupes sur 4 (si ensilée ou enrubannée : pas de faneur) Tracteur 4RM, 100cv : 4930kg, 231ha/an, durée de vie : 12 ans Pirouette 6 toupies : 725kg, 3.5ha/h, 140ha/an, durée de vie : 10 ans Passage : 1 Tracteur 4RM, 100cv : 4930kg, 231ha/an, durée de vie : 12 ans Andaineur : 4m, 500kg, 110ha/an, 2.5ha/h, durée de vie 10 ans	
	->Si ensilée: Passage : 1 fois 2, 1 coupe sur 4 Tracteur 4RM, 120-130cv ENSILEUSE 4m : (SYSTERRE) 9000kg, 1.3ha/h ; 15ha/an Passage : 3 Tracteur 4RM, 120-130cv Benne 12t : (SYSTERRE) 3755kg, débit 0.4ha/h, utilisation annuelle : 175ha/an, durée de vie : 15ans	-> Si enrubannée : Passage : 1 fois 2, 1 coupe sur 4 Tracteur 4RM, 120-130cv BOTTELEUSE : 8600kg, 6000 balles/an ; 30 balles/h, durée de vie 7 ans Tracteur 4RM, 120-130cv ENRUBANEUSE : 1185kg, 1300balles/an, 30 balles/h, durée de vie 7 ans
	TRANSPORTS par coupe Passage : 1 Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Char à foin (plateau 8m) : 30 bottes sur le char, 2225kg, 125ha/an, 4ha/h, durée de vie 15ans	
	GESTION DES RESIDUS Pailles exportées	
CULTURE INTERMEDIAIRE RENDEMENTS	/ Destruction de la culture en Avril juste avant le semis de maïs 1 ^{ère} année: 2-2-1,5 – 1,5= 7t	
	2 et 3 ^{ème} année: 3,5-2-2-1,5= 9t MS	

CULTURE & TYPE DE CONDUITE : Luzerne en relais en Agriculture Biologique

zone polyculture élevage (culture de vente) - sec		
OBJECTIF DE RENDEMENT	Année 0: 1,5coupes à 1,5t par coupe	Année 1 et 2: 3,5-2-2-1,5= 9t MS
ROTATION DANS LAQUELLE LA CULTURE S'INSERE	Luzerne (2,71ans) – Maïs ensilage – Blé – Maïs grain (précoce) - Méteil– Blé	
TYPE DE SOL	Limon argileux (Nord – Isère, Ain, entre Ain-Rhône) 60% limon, 25% argile, 15% sables, 3% de matières organiques, CaCO ₃ entre 0 et 5% (sol faiblement calcaire), charge en cailloux < ou = 5%, pente entre 2% et 5%; profondeur=1m; pH=7-7,5 sol peu drainant (et drainé); sol un peu battant; un peu d'hydromorphie (<i>mais ne pose pas de problèmes pour l'insertion de légumineuses</i>)	
TRANSPORTS DES INTRANTS <i>Distance moyenne considérée (entre les exploitations et les fournisseurs)</i>	10km-15km pour les intrants des coopératives et la collecte Entre 0 et 5km pour les intrants de ferme	
RELIQUATS AZOTES AU SEMIS ET SORTIE HIVER	RSH= entre 20 et 40	
Pertes en NO ₃	D'après INDIGO : pertes de 21kg d'N sous forme N-NO ₃	
IRRIGATION	Non mais disponible, aspersion (enrouleur)	
GESTION DES RESIDUS DU PRECEDENT	Blé : résidus exportés	
TRAVAIL DU SOL	DECHAUMAGE	/
	LABOUR	/
	TRAVAIL LEGER	PREPARATION DU SEMIS DE LA LUZERNE <i>1 passage 10 jours avant le semis de luzerne (compté dans l'ACV du blé)</i> 1 passage après le semis de luzerne, le même jour Date : fin novembre à début décembre + début décembre Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Herse étrille 6m : 480kg (EDEN) ; 3ha/h ; 125ha/an, durée de vie: 10ans
SEMIS	Date : début décembre	

		Variété : type flamande Giulia Densité de semis : 30kg/ha Type de semences : AB certifiées Quad : 300cm ³ , 330kg, 100h/an, débit : 3 ha/h, durée de vie 10 ans Semoir centrifuge : 4m, 800kg, 140ha/an, 1.7ha/h, durée de vie 10 ans
FERTILISATION	MINERALE	Passage : 1 PAR AN Date : Fin mars Produits/doses : Patentkali : (extrait de carrière) : 30% de potasse : 200kg/ha > 60U de potasse Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Semoir à engrais centrifuge : (SYSTERRE) 12m, 380kg; 8,1ha/h, 90ha/an, durée de vie 12 ans
	ORGANIQUE	/
CHALAGE		/
TRAITEMENT PHYTOSANITAIRES	HERBICIDES	/
	FONGICIDES	/
	INSECTICIDES	/
	REGULATEUR	/
GESTION DES MALADIES, ADVENTICES ET RAVAGEURS <u>AB</u>		/
RECOLTE		Passage : 0.5 (1seule fois) <i>Un broyage un an sur 2 à l'automne de l'année d'installation</i> Date : 20/10 année 0 Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans BROYEUR 3m : 1100kg (SYSTERRE), débit 1,5ha/h, 110ha/an, durée de vie : 7 ans <i>Pour chaque coupe (4 par an) de fin avril –juin – septembre – à fin septembre</i> Passage : 1 Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Faucheuse 6 ou 7 assiettes : 850kg (SYSTERRE), débit 1.8ha/h, 90ha/an, durée de vie 7 ans Passage : 0.75 =3 coupes sur 4 (si ensilée ou enrubannée : pas de faneur) Tracteur 4RM, 100cv : 4930kg, 231ha/an, durée de vie : 12 ans

	Pirouette 6 toupies: 725kg, 3.5ha/h, 140ha/an, durée de vie : 10 ans Passage : 1 Tracteur 4RM, 100cv : 4930kg, 231ha/an, durée de vie : 12 ans Andaineur : 4m, 500kg, 110ha/an, 2.5ha/h, durée de vie 10 ans	
	->Si ensilée: Passage : 1 fois 2, 1 coupe sur 4 Tracteur 4RM, 120-130cv ENSILEUSE 4m : (SYSTERRE) 9000kg, 1.3ha/h ; 15ha/an Passage : 3 Tracteur 4RM, 120-130cv Benne 12t : (SYSTERRE) 3755kg, débit 0.4ha/h, utilisation annuelle : 175ha/an, durée de vie : 15ans	-> Si enrubannée : Passage : 1 fois 2, 1 coupe sur 4 Tracteur 4RM, 120-130cv BOTTELEUSE : 8600kg, 6000 balles/an ; 30 balles/h, durée de vie 7 ans Tracteur 4RM, 120-130cv ENRUBANEUSE : 1185kg, 1300balles/an, 30 balles/h, durée de vie 7 ans
	TRANSPORTS par coupe Passage : 1 Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Char à foin (plateau 8m) : 30 bottes sur le char, 2225kg, 125ha/an, 4ha/h, durée de vie 15ans	
	/	
GESTION DES RESIDUS	/	
CULTURE INTERMEDIAIRE	/ car Destruction de la culture en Avril avant l'implantation du maïs	
RENDEMENTS	Année 0: 1,5coupes à 1,5t par coupe	Année 1 et 2: 3,5-2-2-1,5= 9t MS

CULTURE & TYPE DE CONDUITE : Blé pur en Agriculture Conventionnelle Raisonnée

zone polyculture élevage (culture de vente) – sec		
OBJECTIF DE RENDEMENT	Grains: 65qx/ha	4,5t pailles
ROTATION DANS LAQUELLE LA CULTURE S'INSERE	Luzerne (3,75ans) - Maïs grain –Maïs ensilage – Blé – Maïs ensilage - Blé	
TYPE DE SOL	Limon argileux (Nord – Isère, Ain, entre Ain-Rhône) 60% limon, 25% argile, 15% sables, 3% de matières organiques, CaCO₃ entre 0 et 5% (sol faiblement calcaire), charge en cailloux < ou = 5%, pente entre 2% et 5%; profondeur=1m; pH=7-7,5 sol peu drainant (et drainé); sol un peu battant; un peu d'hydromorphie (<i>mais ne pose pas de problèmes pour l'insertion de légumineuses</i>)	
TRANSPORTS DES INTRANTS <i>Distance moyenne considérée (entre les exploitations et les fournisseurs)</i>	10km-15km pour les intrants des coopératives et la collecte Entre 0 et 5km pour les intrants de ferme	
RELIQUATS AZOTES AU SEMIS ET SORTIE HIVER	RSH= entre 20 et 40	
Pertes en NO ₃	D'après INDIGO : pertes de 21 kg N sous forme N-NO ₃	
IRRIGATION	Non mais disponible, aspersion (enrouleur))	
GESTION DES RESIDUS DU PRECEDENT	Maïs ensilage : résidus exportés	
TRAVAIL DU SOL	DECHAUMAGE	Passage : 1 Date : juillet Tracteur 4RM, 150cv : 6000kg ; durée de vie 12 ans, 250ha/an Covercrop 28-32disques 3,5m : (SYSTERRE) 3200kg; 153ha/an, débit: 2ha/h, durée de vie: 10 ans, Passage : 0.5 (labour une année sur 2 sinon, déchaumage) Date : fin septembre à début octobre Tracteur 4RM, 150cv : 6000kg ; durée de vie 12 ans, 250ha/an Déchaumeur à DENTS : 4m, 3200kg ; débit 2.5ha/h ; 250ha/an; durée de vie 10 ans

	LABOUR	Passage : 0.5 (<i>labour une année sur 2 sinon, déchaumage</i>) Date : quelques jours avant semis Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Charrue 5corps avec ravette : 1600kg; debit 1,3ha/an, 12ha/an,
	TRAVAIL LEGER	/
SEMIS		Date : mi-octobre Variété : APACHE ou Arezzo Densité de semis : 280-320gr/m ² ; 150-180kg/ha Type de semences : semences certifiées traitement standard Traitements des semences : GAUCHO 350 0,2L/qx (si précoce) + CELEST 0,2L/qx 12g substance/ha Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Combiné herse rotative semoir : (SYSTERRE) 4m, 500kg, débit : 2ha/h, 31 ha/an, durée de vie : 10 ans
FERTILISATION	MINERALE	Passages : 3 Produit : Ammonitrate Unités : 100 U Date : début Mars, mi-avril, mi-mai (30-40-30) Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Semoir à engrais centrifuge : (SYSTERRE) 12m, 380kg; 8,1ha/h, 90ha/an, durée de vie 12 ans
	ORGANIQUE	Passages : 1 : <i>1 fois sur 2 du lisier, une fois sur 2 compost</i> Produit : Lisier laitière 50m ³ (39,2U) OU compost de bovins viande ou lait 15t/ha (87U) Date : octobre Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Epandeur à fumier ou compost, classique : 10t, 5000kg (SYSTERRE), 3ha/an, 500ha/an, durée de vie 7 ans Tonne à lisier de 18000L : 7500kg (SYSTERRE), 2ha/h, utilisation annuelle : 750ha/an, durée de vie

		7 ans <u>Pour le compost :</u> 1 retournement Tracteur 4RM, 130cv 6030kg, 500ha/an Epandeur 15t : 5450kg ; 3 voyage/h ; 500ha/an ; durée de vie 7 ans Tracteur 100 cv : 5300kg ; 950ha/an ; 3ha/h ; durée de vie : 12 ans Chargeur frontal : 400kg ; 300ha/an ; 0,5h/ha, durée de vie 12 ans
CHAULAGE		Produit : chaux vive Fréquence / quantité : 500kg/ha tous les 4 à 5ans Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Epandeur à amendement calcique : 10t avec table d'épandage, 167ha/an ; 2ha/h, durée de vie 10 ans
TRAITEMENT PHYTOSANITAIRES	HERBICIDES	Passages : 1 Date / Produits / Doses : avril Allié SX 0,030kg/ha Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Pulvérisateur 24m trainé : 3500kg(SYSTERRE); 6ha/h, 600ha/an, durée de vie : 12 ans
	FONGICIDES	Passages : 2 Date / Produits / Doses : début avril Fandango S 1L/ha + mi-mai Prosaro à 1L/ha contre fusariose Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Pulvérisateur 24m trainé : 3500kg(SYSTERRE); 6ha/h, 600ha/an, durée de vie : 12 ans
	INSECTICIDES	/
	REGULATEUR DE CROISSANCE	Passages : 1 Date / Produits / Doses : fin avril Moddus 0,5L/ha Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Pulvérisateur 24m trainé : 3500kg(SYSTERRE); 6ha/h, 600ha/an, durée de vie : 12 ans

GESTION DES MALADIES, ADVENTICES ET RAVAGEURS en AB	/	
RECOLTE	Date : début juillet Moissonneuse-batteuse : 5 secoueurs, 6500kg(SYSTERRE), 1.25h/ha, 150ha/an TRANSPORTS Tracteur 4RM, 150cv : 6000kg ; durée de vie 12 ans, 250ha/an Benne 10t-12t : 3755kg(SYSTERRE), débit 0.4ha/h, utilisation annuelle : 117ha/an, durée de vie : 15 ans	
GESTION DES RESIDUS	Pailles exportées Pressage : roundballer 1 fois sur 2 sinon presse haute densité ; durée de vie : 10 ans Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Presses balle ronde : 1570kg ; 25balles/h ; 1000balles/an Presses Big Baller : 8600kg, 30balles/h ; 6000balles/an; durée de vie : 7 ans Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Remorque agricole : plateau 8t, 8m, 2225kg, 125ha/an, 4ha/h, durée de vie 15 ans	
CULTURE INTERMEDIAIRE	/	
RENDEMENTS	Grains: 65qx/ha	4,5t pailles

CULTURE & TYPE DE CONDUITE : Blé en relais en Agriculture Conventiennelle Raisonnée - (Pas pratiqué en Rhône-Alpes)

zone polyculture élevage (culture de vente) – sec		
OBJECTIF DE RENDEMENT	65qx/ha	4,5t pailles
ROTATION DANS LAQUELLE LA CULTURE S'INSERE	Luzerne (2,75ans) –Maïs grain –Maïs ensilage – Blé –Maïs ensilage – Blé	
TYPE DE SOL	Limon argileux (Nord – Isère, Ain, entre Ain-Rhône) 60% limon, 25% argile, 15% sables, 3% de matières organiques, CaCO3 entre 0 et 5% (sol faiblement calcaire), charge en cailloux < ou = 5%, pente entre 2% et 5%; profondeur=1m; pH=7-7,5 sol peu drainant (et drainé); sol un peu battant; un peu d'hydromorphie (<i>mais ne pose pas de problèmes pour l'insertion de légumineuses</i>)	
TRANSPORTS DES INTRANTS	10km-15km pour les intrants des coopératives et la collecte Entre 0 et 5km pour les intrants de ferme	
RELIQUATS AZOTES AU SEMIS ET SORTIE HIVER	RSH= entre 20 et 40	
Pertes en NO3	D'après INDIGO : pertes de 19 kg N sous forme N-NO3	
IRRIGATION	Non mais disponible, aspersion (enrouleur)	
GESTION DES RESIDUS DU PRECEDENT	Maïs ensilage : résidus exportés	
TRAVAIL DU SOL	DECHAUMAGE	Passage : 1 Date : juillet Tracteur 4RM, 120-130cv car en polyculture élevage besoin d'un tracteur plus puissant que 110cv car matériel plus lourds en culture de vente: 6030kg, 500ha/an Covercrop 28-32disques 3,5m : (SYSTERRE) 3200kg; 30ha/an, debit: 2ha/h, Passage : 0.5 (labour une année sur 2 sinon, déchaumage) Date : fin septembre - début octobre Tracteur 4RM, 120-130cv

		Déchaumeur à DENTS : (SYSTERRE cultivateur 3.5-4m) 737kg ; débit 2.3ha/h ; 16ha/an
	LABOUR	Passage : 0.5 (labour une année sur 2 sinon, déchaumage) Date : quelques jours avant semis Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Charrue 5corps avec ravette : 1600kg; débit 1,3ha/an, 12ha/an,
	TRAVAIL LEGER	/
SEMIS		Date : mi-octobre Variété : APACHE OU Arezzo Densité de semis : 280-320gr/m ² ; 150-180kg/ha Type de semences : semences certifiées traitements standard Traitements des semences : GAUCHO 350 0,2L/qx (si précoce) + CELEST 0,2L/qx 12g substance/ha Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Combiné herse rotative semoir : (SYSTERRE) 4m, 500kg, débit : 2ha/h, 31 ha/an
FERTILISATION	MINERALE	Passages : 3 Produit : Ammonitrate Unités : 100 U Date : début Mars, mi-avril, mi-mai Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Semoir à engrais centrifuge : (SYSTERRE) 12m, 380kg; 8,1ha/h; 90ha/an,
	ORGANIQUE	Passages : 1 : 1 fois sur 2 du lisier, une fois sur 2 compost Produit : Lisier laitière 50m ³ (39,2U) OU compost de bovins viande ou lait 15t/ha (87U) Date : octobre Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Epandeur à fumier ou compost, classique : (SYSTERRE) 5000kg, débit 0,8ha/an, utilisation an : 11ha/an

		Tonne à lisier de 18000L : (SYSTERRE) 7500kg, débit 1.9ha/h, utilisation annuelle : 77ha/an <u>Pour le compost</u> : 1 retournement Tracteur 4RM, 130cv 6030kg, 500ha/an Epandeur 15t : 5450kg ; 3 voyage/h ; 500ha/an ; durée de vie 7 ans Tracteur 100 cv : 5300kg ; 950ha/an ; 3ha/h ; durée de vie : 12 ans Chargeur frontal : 400kg ; 300ha/an ; 0,5h/ha, durée de vie 12 ans
CHAULAGE		Produit : chaux vive Fréquence / quantité : 500kg/ha tous les 4 à 5ans Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Epandeur à amendement calcique : (Normandie) 10t avec table d'épandage, 300h/an, 350ha/an ; 2ha/h
TRAITEMENT PHYTOSANITAIRES	HERBICIDES	Passages : 1 Date / Produits / Doses : avril Allié 0,0 30kg/ha (pleine dose autorisé) Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Pulvérisateur 24m trainé : (SYSTERRE) 3200L ; 3500kg; 15.6ha/h, 321ha/an
	FONGICIDES	Passages : 2 Date / Produits / Doses : début avril Fandango 1L/ha + mi-mai Prosaro à 1L/ha contre fusariose Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Pulvérisateur 24m trainé : (SYSTERRE) 3200L ; 3500kg; 15.6ha/h, 321ha/an
	INSECTICIDES	/
	REGULATEUR DE CROISSANCE	Passages : 1 Date / Produits / Doses : fin avril MODDUS 0,5L/ha Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Pulvérisateur 24m trainé : (SYSTERRE) 3200L ; 3500kg; 15.6ha/h, 321ha/an h
GESTION DES MALADIES, ADVENTICES ET		/

RAVAGEURS <u>AB</u>		
RECOLTE	Date : début juillet Moissonneuse-batteuse : 5secoueurs, 6500kg, 0.8h/ha, 150ha/an TRANSPORTS Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Benne 12t : (SYSTERRE) 3755kg, débit 0.4ha/h, utilisation annuelle : 180ha/an	
GESTION DES RESIDUS	Pailles exportées Pressage : roundballer 1 fois sur 2 sinon presse haute densité ; durée de vie : 10 ans Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Presses balle ronde : 1570kg ; 25balles/h ; 1000balles/an Presses Big Baller : 8600kg, 30balles/h ; 6000balles/an; durée de vie : 7 ans Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Remorque agricole : plateau 8t, 8m, 2225kg, 125ha/an, 4ha/h, durée de vie 15 ans	
CULTURE INTERMEDIAIRE	/	
RENDEMENTS	65qx/ha	4,5t de pailles

CULTURE & TYPE DE CONDUITE : Luzerne pure en Agriculture Conventiennelle Raisonnée

zone polyculture élevage (culture de vente) – sec		
OBJECTIF DE RENDEMENT	1 ^{ère} année: 2,5-2-2– 1,5= 8t	2 et 3 ^{ème} année: 3,5-2,5-2,5-1,5= 10t MS
ROTATION DANS LAQUELLE LA CULTURE S'INSERE	Luzerne (3,75ans) - Maïs grain – Maïs ensilage – Blé –Maïs ensilage – Blé	
TYPE DE SOL	Limon argileux (Nord – Isère, Ain, entre Ain-Rhône) 60% limon, 25% argile, 15% sables, 3% de matières organiques, CaCO3 entre 0 et 5% (sol faiblement calcaire), charge en cailloux < ou = 5%, pente entre 2% et 5%; profondeur=1m; pH=7-7,5 sol peu drainant (et drainé); sol un peu battant; un peu d'hydromorphie (<i>mais ne pose pas de problèmes pour l'insertion de légumineuses</i>)	
TRANSPORTS DES INTRANTS <i>Distance moyenne considérée (entre les exploitations et les fournisseurs)</i>	10km-15km pour les intrants des coopératives et la collecte Entre 0 et 5km pour les intrants de ferme	
RELIQUATS AZOTES AU SEMIS ET SORTIE HIVER	RSH= entre 20 et 40	
Pertes en NO3	D'après INDIGO : pertes de 21 kg N sous forme N-NO3	
IRRIGATION	Non mais disponible, aspersion (enrouleur)	
GESTION DES RESIDUS DU PRECEDENT	Blé : résidus exportés	
TRAVAIL DU SOL	DECHAUMAGE	Passage : 1 Date : juillet Tracteur 4RM, 120-130cv car en polyculture élevage besoin d'un tracteur plus puissant que 110cv car matériel plus lourds en culture de vente: 6030kg, 500ha/an Covercrop 28-32disques 3,5m : (SYSTERRE) 3200kg; 30ha/an, debit: 2ha/h, Passage : 1 Date : fin septembre - début octobre Tracteur 4RM, 120-130cv

		Déchaumeur à DENTS : (SYSTERRE cultivateur 3.5-4m) 737kg ; débit 2.3ha/h ; 16ha/an
	LABOUR	/
	TRAVAIL LEGER	/
SEMIS		Date : début septembre Variété : Densité de semis : 25 kg/ha Type de semences : semences certifiées traitements standard Traitements des semences : non MAIS INOCULUM Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Combiné herse rotative semoir : (SYSTERRE) 4m, 500kg, débit : 2ha/h, 31 ha/an Passage rouleau : 1 Tracteur 4RM, 120-130cv Rouleau Cambridge, 8m large : (SYSTERRE) semi-porté 4100kg ; 4.3 ha/h, 63ha/an
FERTILISATION	MINERALE	Passages : 2 Produit : acide phosphorique 1 fois sur 2 et l'autre fois : Patentkali Potasse 250kg/ha Unités : 100kg/ha acide phosphorique ; 150kg/ha Patentkali Date : après la deuxième coupe Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Semoir à engrais centrifuge : (SYSTERRE) 12m, 380kg; 8,1ha/h, ; 90ha/an,
	ORGANIQUE	/
CHAULAGE		Produit : chaux vive Fréquence / quantité : 500kg/ha tous les 4 à 5ans Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Epandeur à amendement calcique : (Normandie) 10t avec table d'épandage, 300h/an, 350ha/an ; 2ha/h

TRAITEMENT PHYTOSANITAIRES	HERBICIDES	/
	FONGICIDES	/
	INSECTICIDES	/
	REGULATEUR	/
GESTION DES MALADIES, ADVENTICES ET RAVAGEURS <u>AB</u>		/
RECOLTE	Passage : 0.5 (1seule fois) <i>Un broyage un an sur 2 à l'automne de l'année d'installation</i> Date : 20/10 année 0 Tracteur 4RM, 120-130cv BROYEUR 3m : (SYSTERRE) 1100kg, débit 1,1ha/h, utilisation annuelle : 40ha/an <i>Pour chaque coupe (4/an) de fin avril –juin – septembre – à fin septembre</i> Passage : 1 (année 1) Tracteur 4RM, 120-130cv Faucheuse 6 ou 7 assiettes : (SYSTERRE porté simple 3-3.5m) 850kg, débit 2ha/h Passage : 0.75 =3 coupe sur 4 (si ensilé ou enrubanné : pas de faneur) Tracteur 4RM, 120-130cv Pirouette 6 toupies: Passage : 1 Tracteur 4RM, 120-130cv Andaineur : 4m	

	->Si ensilée: Passage : 1 fois 2, 1 coupe sur 4 Tracteur 4RM, 120-130cv ENSILEUSE 4m : (SYSTERRE) 9000kg, 1.3ha/h ; 15ha/an Passage : 3 Tracteur 4RM, 120-130cv Benne 12t : (SYSTERRE) 3755kg, débit 0.4ha/h, utilisation annuelle : 175ha/an, durée de vie : 15ans	-> Si enrubannée : Passage : 1 fois 2, 1 coupe sur 4 Tracteur 4RM, 120-130cv BOTTELEUSE : 8600kg, 6000 balles/an ; 30 balles/h, durée de vie 7 ans Tracteur 4RM, 120-130cv ENRUBANEUSE : 1185kg, 1300balles/an, 30 balles/h, durée de vie 7 ans
	TRANSPORTS par coupe Passage : 1 Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Char à foin (plateau 8m) : 30 bottes sur le char, 2225kg, 125ha/an, 4ha/h, durée de vie 15ans	
GESTION DES RESIDUS	/	
CULTURE INTERMEDIAIRE	/ car destruction au mois d'avril juste avant l'implantation du maïs	
RENDEMENTS	1 ^{ère} année: 2,5-2-2- 1,5= 8t	2 et 3 ^{ème} année: 3,5-2,5-2,5-1,5= 10t MS

CULTURE & TYPE DE CONDUITE : Luzerne <u>en relais</u> en Agriculture Conventionnelle Raisonnée		
zone polyculture élevage (culture de vente) - sec		
OBJECTIF DE RENDEMENT	Année1: 1coupe à 1,5t	Année 2 et 3: 3,5-2,5-2,5-1,5= 10t MS
ROTATION DANS LAQUELLE LA CULTURE S'INSERE	Luzerne (2,75ans) - Maïs grain –Maïs ensilage1 – Blé1 – Maïs ensilage2 – Blé(CR)	
TYPE DE SOL	Limon argileux (Nord – Isère, Ain, entre Ain-Rhône) 60% limon, 25% argile, 15% sables, 3% de matières organiques, CaCO3 entre 0 et 5% (sol faiblement calcaire), charge en cailloux < ou = 5%, pente entre 2% et 5%; profondeur=1m; pH=7-7,5 sol peu drainant (et drainé); sol un peu battant; un peu d'hydromorphie (<i>mais ne pose pas de problèmes pour l'insertion de légumineuses</i>)	
TRANSPORTS DES INTRANTS <i>Distance moyenne considérée (entre les exploitations et les fournisseurs)</i>	10km-15km pour les intrants des coopératives et la collecte Entre 0 et 5km pour les intrants de ferme	
RELIQUATS AZOTES AU SEMIS ET SORTIE HIVER	RSH= entre 20 et 40	
Pertes en NO3	D'après INDIGO : pertes de 21 kg N sous forme N-NO3	
IRRIGATION	Non mais disponible, aspersion (enrouleur)	
GESTION DES RESIDUS DU PRECEDENT	Blé : résidus exportés,	
TRAVAIL DU SOL	DECHAUMAGE	/
	LABOUR	/
	TRAVAIL LEGER	/
SEMIS	Date : 15 mars Densité de semis : 30kg/ha Type de semences : non traitées Semis : herse etrille 9m + semoir 4m	
FERTILISATION	MINERALE	Passages : 2 par an Produit : acide phosphorique 1 fois sur 2 et l'autre fois : Patentkali

		+ Potasse Unités : 100kg/ha acide phosphorique ; 150kg/ha patentkali ; 250kg/ha de sulfate de potassium Date : après la deuxième coupe Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Semoir à engrais centrifuge: (SYSTERRE) 12m, 380kg; 8,1ha/h, ; 90ha/an,
	ORGANIQUE	/
CHAULAGE		Produit : chaux vive Fréquence / quantité : 500kg/ha tous les 4 à 5ans Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 500ha/an Epandeur à amendement calcique : (Normandie) 10t avec table d'épandage, 300h/an, 350ha/an ; 2ha/h
TRAITEMENT PHYTOSANITAIRES	HERBICIDES	/
	FONGICIDES	/
	INSECTICIDES	/
	REGULATEUR	/
GESTION DES MALADIES, ADVENTICES ET RAVAGEURS <u>AB</u>		/
RECOLTE		Passage : 0.5 (1seule fois) <i>Un broyage un an sur 2 à l'automne de l'année d'installation</i> Date : 20/10 année 0 Tracteur 4RM, 120-130cv BROYEUR 3m : (SYSTERRE) 1100kg, débit 1,1ha/h, utilisation annuelle : 40ha/an <i>Pour chaque coupe (4/an) de fin avril –juin – septembre – à fin septembre</i> Passage : 1 (année 1) Tracteur 4RM, 120-130cv Faucheuse 6 ou 7 assiettes : (SYSTERRE porté simple 3-3.5m) 850kg, débit 2ha/h Passage : 0.75 =3 coupe sur 4 (si ensilé ou enrubanné : pas de faneur) Tracteur 4RM, 120-130cv

	Pirouette 6 toupies Passage : 1 Tracteur 4RM, 120-130cv Andaineur : 4m	
	->Si ensilée: Passage : 1 fois 2, 1 coupe sur 4 Tracteur 4RM, 120-130cv ENSILEUSE 4m : (SYSTERRE) 9000kg, 1.3ha/h ; 15ha/an Passage : 3 Tracteur 4RM, 120-130cv Benne 12t : (SYSTERRE) 3755kg, débit 0.4ha/h, utilisation annuelle : 175ha/an, durée de vie : 15ans	-> Si enrubannée : Passage : 1 fois 2, 1 coupe sur 4 Tracteur 4RM, 120-130cv BOTTELEUSE : 8600kg, 6000 balles/an ; 30 balles/h, durée de vie 7 ans Tracteur 4RM, 120-130cv ENRUBANEUSE : 1185kg, 1300balles/an, 30 balles/h, durée de vie 7 ans
	TRANSPORTS par coupe Passage : 1 Tracteur 4RM, 120-130cv 6030kg, 231ha/an, durée de vie 12 ans Char à foin (plateau 8m) : 30 bottes sur le char, 2225kg, 125ha/an, 4ha/h, durée de vie 15ans	
GESTION DES RESIDUS	/	
CULTURE INTERMEDIAIRE	/ car destruction au mois d'avril juste avant l'implantation du maïs	
RENDEMENTS	Année1: 1coupe à 1,5-2t	Année 2 et 3: 3,5-2,5-2,5-1,5= 10t MS

ANNEXE III: Méthode et valeurs retenues pour le calcul des émissions directes et des ressources extraites

Calcul des émissions de NO₂

Les émissions de protoxyde d'azote dans l'atmosphère sont calculées sur la base d'une formule provenant du guide de l'IPCC datant de 2006⁵ (Vol 4, Ch11).

$$N-N_2O = (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR}) \times EF_1 + [(F_{SN} \times \text{Frac}_{GASF}) + (F_{ON} \times \text{Frac}_{GASM})] \times EF_4 + (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR}) \times \text{Frac}_{LEACH} \times EF_5$$

Avec :

N-N₂O : Quantité de N-N₂O émis (kg/ha)

F_{SN} : Quantité d'azote minéral appliqué (kg/ha)

F_{ON} : Quantité d'azote organique appliqué (kg/ha)

F_{CR} : Quantité d'azote contenu dans les résidus (kg/ha)

EF₁ : Facteur d'émission de N₂O venant des intrants (valeur par défaut 0.01 IPCC 2006)

Frac_{GASF} : Fraction d'azote minéral volatilisé en NH₃ et NO_x (valeur par défaut 0.1 IPCC 2006)

Frac_{GASM} : Fraction d'azote organique volatilisé en NH₃ et NO_x (valeur par défaut 0.20 Basso et la 2004 pour 40m³/ha)

EF₄ : Facteur d'émission de N₂O venant du dépôt atmosphérique de N sur le sol et les eaux de surfaces (valeur par défaut 0.01 IPCC 2006)

Frac_{LEACH} : Fraction d'azote lessivé (plus ruissellement) = NO₃-N = quantité de N-NO₃ lessivé

EF₅ : Facteur d'émission de N₂O venant de l'azote lessivé (et ruissellement) (valeur par défaut 0.0075 IPCC 2006)

Ensuite la quantité de N-N₂O est multipliée par 44/28 pour la convertir en N₂O.

Quantité d'azote contenu dans les résidus (kg/ha)

$$F_{CR} = \text{Crop}(T) \times (R_{AG} \times N_{AG} \times (1 - \text{Frac}_{\text{removed}(T)}) + R_{BG} \times N_{BG})$$

$$\text{Où } R_{AG} = AG_{DM}(T) \times 1000 \div \text{Crop}(T)$$

$$R_{BG} = ((AG_{DM}(T) \times 1000 + \text{Crop}(T)) \div \text{Crop}(T)) \div R_{BG-BIO}$$

$$AG_{DM}(T) = \text{Crop}(T) \div 1000 \times \text{Slope}(T) + \text{Intercept}(T)$$

Avec :

N-F_{CR} = Azote (kg/ha) contenu dans les résidus

Crop_(T) = Quantité de matière sèche récoltée (kg/ha)

R_{AG} = Ratio quantité de matière sèche de résidus aérien sur Crop_(T) (voir rapport IPCC spécifique à la culture)

AG_{DM}(T) = Matière sèche des résidus aériens (voir rapport IPCC spécifique à la culture)

N_{AG} = Azote (kg/kg) contenu dans les résidus aériens (voir rapport IPCC spécifique à la culture)

Frac_{removed(T)} = Fraction de résidus aériens de la culture enlevé (voir EDEN)

⁵ 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

si paille enfouie =0

R_{BG} = Ratio des résidus souterrains sur $Crop_{(T)}$ (voir rapport IPCC spécifique à la culture)

R_{BG-BIO} = Rapport résidus souterrains/biomasse aérienne (voir rapport IPCC spécifique à la culture)

N_{BG} = Azote (kg/kg) contenu dans les résidus souterrains (voir rapport IPCC spécifique à la culture)

Données considérées dans le calcul de la quantité d'azote contenu dans les résidus :

	$N-F_{CR}$	Slope	Intercept	N_{AG}	$Frac_{removed(T)}$	R_{BG-BIO}	N_{BG}
Blé tendre d'hiver	0,89	1,61	0,4	0,006	0,6	0,23	0,009
Luzerne	0,89	0,29	0	0,027	0	0,4	0,019

Calcul des émissions de NH_3

Le calcul des émissions de $N-NH_3$ se fait en multipliant la quantité d'azote minéral par un facteur d'émission spécifique à l'intrant.

Pour convertir le $N-NH_3$ en NH_3 la quantité de $N-NH_3$ a été multipliée par 17/14.

Données utilisées pour le calcul de l'émission d'ammonium :

Type d'engrais	Facteur d'émissions pour le $N-NH_3$	Source
Ammonitrate	2%	Ecoinvent 2007
Engrais organique	0,76	Payraudeau <i>et al.</i> , 2007

Calcul des émissions de NO_x

Les émissions de NO_x sont estimés à : $0.21 \cdot N_2O$ (Nemecek (2007))

Calcul des émissions de métaux lourds

Les données concernant la composition en métaux lourds (mg/kg nutriment) des engrais minéraux viennent du rapport Nemecek (2007) p 165 ou d'EDEN.

Les données de la composition des cultures en métaux lourds proviennent aussi du rapport Nemecek (2007) p 164 ou d'EDEN. Les valeurs sont en mg/kg de matière sèche. Attention en cas de récolte de la paille, il est nécessaire de prendre en compte la composition en métaux lourds de la paille qui est exportée.

Valeurs retenues pour la composition en métaux lourds des organes récoltés :

Composition en métaux lourds (mg/kg de MS)	Grains blé	Paille blé	Luzerne
Cd	0,04	0,2	0,13
Cr	0,2	0,7	0,2
Cu	3,3	2,5	8,6
Ni	0,2	0,6	0,2
Pb	0,2	0,6	3,3
Zn	34	9,6	40
Source	<i>Nemecek 2007</i>	<i>Nemecek 2007</i>	<i>EDEN</i>

Valeurs retenues pour la composition en métaux lourds (mg/kg nutriment) des engrais minéraux et organiques :

Composition en métaux lourds (mg/kg nutriment)	Compost fumier bovins (Données pour un compost à 37% de MS)	Patentkali (Données pour un engrais K générique)	Acide phosphorique (Données pour un engrais triple superphosphore)	Sulfate de potassium
Cd	0,1	0,11	113,04	0,1
Cr	5,9	88,54	567,39	4
Cu	14,9	6,17	97,83	4
Ni	4,6	7,52	95,65	1,6
Pb	1,4	7,88	7,61	6,6
Zn	61,1	70,33	650	64
Source	<i>EDEN</i>	<i>Nemecek 2007</i>	<i>Nemecek, 2007</i>	<i>Nemecek, 2007</i>

Composition en métaux lourds (mg/kg nutriment)	Ammonitrate	Farine de plume	Chaux	Lisier de bovin
Cd	0,18	0,3	0,12	0,16
Cr	14,55	3	314	2,1
Cu	25,45	15	4	19,1
Ni	47,27	3	12,2	3,1
Pb	6,91	3	3,6	2,92
Zn	181,82	0	8	123,3
Source	<i>Nemecek 2007</i>	<i>http://www.edfa.eu/f/ranz/fumwelt.htm</i>	<i>Nemecek, 2007</i>	<i>Nemecek, 2007</i>

Calcul des émissions de phosphore lixivié et ruisselé

Le calcul du phosphore lixivié et perdu par ruissèlement est réalisé en fonction de la durée d'occupation des terres de la culture en année. Il est donc nécessaire de rapporter les valeurs trouvées au nombre d'année d'occupation de la culture considérée (ou Période), si celle-ci n'est pas un an.

Périodes retenues pour le système blé-luzerne:

		Période (année)
AB	Blé pur AB	1
	Luzerne pure AB	3,7083
	Blé en relais AB	1
	Luzerne en relais AB	2,7083
	Couple blé-luzerne purs	4,7083
	Couple blé-luzerne en relais	3,7083
ACR	Blé pur ACR	0,8333
	Luzerne pure ACR	2,75
	Blé en relais ACR	0,8333
	Luzerne en relais ACR	1,75
	Couple blé-luzerne purs	4,5833
	Couple blé-luzerne en relais	3,5833

➤ Calcul du phosphore lixivié

Calcul fait à partir de la formule du rapport Nemecek (2007).

$$P_{gw} = P_{gw1} * F_{gw} * \text{Période}$$

Avec :

P_{gw} = quantité de phosphore lixivé (kg/ha*a)

P_{gwl} = quantité moyenne de phosphore lixivé selon la catégorie d'occupation des sols.

0,07 kg/ha*a pour terre arable

0,06 kg/ha*a pour prairie

$F_{gw} = 1 + 0.2/80 \times P_{2O5_{sl}}$ ($P_{2O5_{sl}}$ est la quantité de P_{2O5} contenu dans le lisier ou eaux usées)

Période = durée d'occupation du sol par la culture considérée en année

➤ Calcul du phosphore perdu par le ruissellement

Calcul par la formule de Nemecek (2007).

$$P_{ro} = P_{rol} * F_{ro} * \text{Période}$$

Avec :

P_{ro} = quantité de phosphore perdu par le ruissellement vers les rivières (kg/ha)

P_{rol} = quantité moyenne de phosphore perdu par le ruissellement selon la catégorie d'occupation des sols.

0,175 kg/ha pour terre arable ouverte

0,25 kg/ha pour pâturage intensif

0,15 kg/ha pour pâturage extensif

F_{ro} = Facteur de correction = $1 + 0.2/80 * P_{2O5_{min}} + 0.7/80 * P_{2O5_{sl}} + 0.4/80 * P_{2O5_{man}}$

$P_{2O5_{min}}$ = quantité (kg/ha) de P_{2O5} contenu dans les engrais minéraux

$P_{2O5_{sl}}$ = quantité (kg/ha) de P_{2O5} contenu dans le lisier et eaux usées

$P_{2O5_{man}}$ = quantité (kg/ha) de P_{2O5} contenu dans le fumier

Le P_{2O5} contenu dans les engrais organiques suivants : farine de plume, compost de déchets verts et compost de fumier de bovins est considéré comme du P_{2O5} provenant de fumier ($P_{2O5_{man}}$) dans le calcul de phosphore ruisselé.

Calcul des émissions de phosphore perdu par l'érosion

Calcul par la formule de Nemecek (2007)

$$P_{er} = S_{er} * P_{cs} * F_r * F_{erw}$$

Avec:

P_{er} = quantité de phosphore émis par l'érosion vers les rivières (kg/ha)

S_{er} = quantité de sol érodé (kg/ha)

P_{cs} = P contenu dans la partie supérieure du sol. Valeur moyenne utilisée = 0.00095kg/kg

F_r = facteur d'enrichissement. La valeur moyenne utilisée est de 1,86. Ce facteur prend en compte le fait que les particules de sol érodé contiennent plus de phosphore qu'un sol moyen.

F_{erw} = fraction du sol érodé qui parvient à la rivière. La valeur moyenne est de 0,2.

➤ Calcul de S_{er}

Le calcul de S_{er} se fait selon la formule :

$$S_{er} = 10000 * R * K * LS * Corr * C$$

Avec:

R = Indice d'érosivité des pluies. Valeur par défaut 80h*an qui vient du rapport Nemecek (2003) ou interprétation de la carte de Néboit-Guilhot (L'homme et l'érosion, 1991)

K = Facteur d'érosion du sol. Valeur moyenne utilisée 0,033kg*h/(Nm²) pour un sol moyennement érodable)

LS=Facteur pente. Valeur par défaut 0,38 (Lehuger 2005, 2008, d'après Schwertmann et al, 1987 pour une pente 3% et longue de 75m, voir aussi Nemecek (2003)). On peut aussi interpréter la carte des pentes (IGN) et le tableau USLE avec une pente d'une longueur moyenne 120m (n'ayant pas de données sur les longueurs de pente, une longueur moyenne a été prise en compte).

Corr=facteur de correction empirique 0.65 (Nemecek, 2003)

C= facteur C, représente l'effet de la couverture végétale (voir tableaux ci-dessous) avec deux possibilités prendre d'après Nemecek (2003) ou celles issues de l'USLE qui sont des valeurs internationales.

Données facteur C de Nemecek (2003)

Culture	Facteur-C
Blé d'hiver	0,112
Seigle d'hiver	0,044
Orge d'hiver	0,053
Colza	0,08
Pomme de terre	0,125
Maïs grain	0,308
Maïs ensilage	0,268
Betterave sucrière	0,244
Betterave fourragère	0,244
Fèves	0,222
Soja	0,266
Pois protéagineux	0,077
Pomme de terre - semence	0,084
Engrais vert, jusqu'à janvier	0,0117
Engrais vert, jusqu'à février	0,012
Engrais vert, jusqu'à mars	0,0122
Engrais vert, jusqu'à avril	0,0124
Prairie permanente	0,002
Graminée - semence	0,134
Trèfle - semence	0,013
Maïs - semence	0,308

➤ Pour la luzerne, le facteur-C choisi dans nos calculs correspond au facteur-C défini pour la culture de trèfle semence.

➤ Le facteur-C de l'association en relais blé-luzerne correspond à la moyenne pondérée par la durée de leur culture des facteur-C du blé et de la luzerne.

Données pour le calcul du facteur-C selon l'USLE (internationales)

Type de culture	Facteur 1
Maïs-grain	0,4
Haricots, canola, maïs d'ensilage	0,5
Céréales (de printemps et d'automne)	0,35
Cultures horticoles saisonnières	0,5
Arbres fruitiers	0,1
Foin et pâturage	0,02

Méthode de travail du sol	Facteur 2
Labour d'automne	1
Labour de printemps	0,9
Déchaumage	0,6
Travail du sol sur billon	0,35
Travail du sol en bandes	0,25
Semis direct	0,25

Selon la méthode de l'USLE, le facteur C se calcule selon :

Facteur-C= facteur 1 * facteur 2

Calcul de l'utilisation des machines agricoles utilisées

La formule pour ce calcul vient du rapport Nemecek (2007)

Quantité de machine (kg/ha) = poids (kg)*(durée totale de l'opération (h/ha)/durée de vie (h))

Les données utilisées proviennent des logiciels SYSTERRE et EDEN, du rapport Nemecek (2007) mais aussi du barème d'Entraide.

Calcul de la consommation de carburant

Le calcul de la consommation carburant au champ pour chaque étape vient de la méthode utilisée dans le rapport « guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre » (Institut de l'Elevage, ARVALIS, Institut du Végétal, CETIOM, ITAVI, ITB, IFI, 2009).

La formule utilisée est :

Consommation de gasoil au champ (l/ha)=Consommation spécifique moyenne (0.22 l/cv/h)*Puissance du tracteur (CV)* taux de charge * débit de chantier (h/ha)

Avec :

Travail	Taux de charge
Travail du sol profond	0,7
Travail du sol <10cm	0,6
Outils autres que travail du sol	0,5

A noter que pour la moissonneuse batteuse la consommation est issue du rapport Nemecek (2007) ; le guide méthodologique GES n'indiquant pas de formule.

Autres données utilisées

Teneur en éléments nutritifs des engrais organiques :

	N total	P2O5 (kg/t)	K2O (kg/t)	Source
Farine de plumes	10% par défaut 12% en Pays de la Loire	11	4.4	La dauphinoise, Arvalis www.mp.chambagri.fr/IMG/pdf/essai_fertilisant_organique_2009.pdf
Fumier de bovins	5.8 kg/t par défaut Pays de la Loire : 15kgN/t	3.05	9.72	DRAAF Bretagne, 2006 draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_caracterisation-1_cle0e3724.pdf Chambre d'agriculture du Maine-et-Loire
Lisier de bovins laitiers	3,1 kg/t	1.5	3.4	Equiterre, 2009 www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/MARAI_Chapitre_12Amendements.pdf
Compost de fumier de bovins mûr	5.8kg/t	10.1	4.1	Equiterre, 2009 www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/MARAI_Chapitre_12Amendements.pdf

Calcul des teneurs en N des produits récoltés (azote exporté du système):

Source : EDEN	Blé - grains	Blé - pailles	Luzerne foin
Teneur en N (kgN/t de MS)	20	5,6	26,6

Occupation des sols :

L'occupation des sols est calculée en m²année. Selon :

$$\text{Occupation des sols} = \text{durée de la culture (année)} \times 10000\text{m}^2$$

Les valeurs retenues dans les inventaires des associations en relais en Rhône-Alpes sont :

		Rhône-Alpes
AB	Blé pur AB	10000
	Luzerne pure AB	27083
	Blé en relais AB	10000
	Luzerne en relais AB	17083
ACR	Blé pur ACR	8333,33
	Luzerne pure ACR	27500
	Blé en relais ACR	8333,33
	Luzerne en relais ACR	17500

Pour l'inventaire du couple blé-luzerne en relais, l'occupation du sol a été calculée en additionnant les valeurs des cultures de blé en relais et de la luzerne en relais.

ANNEXE IV: Extrait du Manuel de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO® (C. Bockstaller et P. Girardin, juillet 2008)

INDICATEUR AZOTE (I_N)

1.1 ESTIMATION DU RISQUE DE LESSIVAGE SUITE AUX APPORTS D'AZOTE (LP)

Les risques de lessivage des nitrates se situent après les apports d'azote (LP), à la sortie de l'hiver et au printemps principalement, et, durant la période hivernale après la culture (LH, cf. §4.3.).

Le module I_{NO_3} résultera de la somme de l'ensemble des quantités d'azote lessivées :

$$I_{NO_3} = LP + LH$$

1.1.1. Hypothèses à la base du calcul de LP

Ce poste est assez difficile à estimer et devrait faire l'objet d'une estimation de l'état hydrique du sol au moment de l'apport et d'une étude fréquentielle des précipitations après chaque apport à quoi doivent être enlevé l'absorption par le couvert et la réorganisation de l'engrais (Recous et al., 1997). Ceci nous amènerait trop loin et nous oblige à émettre un certain nombre d'hypothèses simplificatrices :

- On suppose qu'au stade où la plante a absorbé 50 % de l'azote total le risque devient quasi nul. En effet à ce stade, l'azote apporté est rapidement absorbé par la plante ou réorganisé (Recous et al., 1997). Par ailleurs l'évapotranspiration de la culture n'est pas loin de son pic, ce qui limite le drainage en cas de précipitation et donc le lessivage.
- Plus l'apport est éloigné de cette période d'absorption intense, plus le risque augmente car l'azote restera plus longtemps dans le sol et pourra donc être lessivé en cas d'un épisode pluvieux assez intense. En supposant que le sol soit saturé au moment de l'apport, que les précipitations et l'ETP soient également réparties après l'apport, l'excédent hydrique sera proportionnel à l'éloignement par rapport au moment où le risque devient nul. De même avec ces hypothèses, on pourra sommer les risques liés à chaque apport en cas de fractionnement des apports.
- Pour les cultures d'hiver, les apports peuvent se faire dès début janvier, période de drainage hivernal. Pour les cultures de printemps, les apports sont effectués plus tardivement (mars à juin). Dans certaines régions, l'étude des bilans hydriques montre en moyenne un risque faible de drainage voire nul en moyenne. Dans ce cas, on peut prendre des données d'année humide (Ex : 1 année sur 5) et on introduit un facteur fréquence (Ex : 0,2) dans le calcul pour approcher une valeur moyenne.

1.1.2. Calcul du lessivage suite aux apports d'azote LP cf. encadré page suivante

Calcul du lessivage de l'azote suite aux apports d'azote (LP)

Calcul de L_i , lessivage de l'azote de l'engrais suivant chaque apport i

A partir des hypothèses émises on peut poser : $L_i = X_i' * \text{Coefficient lessivage}(\text{BH} * t_i) * f$ avec :

- X_i' : la dose d'azote de l'apport (X_i) à laquelle on a déduit les pertes par volatilisation (V_i)
: $X_i' = X_i - V_i$
- **Le Coefficient lessivage:** Coefficient de lessivage de l'engrais obtenu avec le modèle de BURNS (Annexe 3) pour un drainage (**BH**) pondéré par le facteur t_i
- t_i : facteur de pondération du bilan hydrique qui marque l'éloignement de l'apport i à la phase d'absorption intense où le risque est supposé être nul

$$t_i = \text{Ecart}[\text{date apport} - \text{date 50 \% N}] / \text{écart}[\text{to} - \text{date 50 \% N}] \quad (t_i \leq 1)$$

avec :

date 50 % N est le nombre de jours moyen d'atteinte de 50 % d'azote absorbé, moment d'absorption intense où le risque de perte est très limité. Ce nombre de jour est fixé à partir de courbes d'absorption données par Carlotti, 1992) pour un certain nombre de cultures (Annexe 2, Tab.1). Pour les cultures d'hiver on se limite au 31/3.

to est le début de la période de risque pour le calcul du lessivage après apport :

Pour cultures d'hiver : to = 1 janvier

Pour cultures de printemps : to = date de semis (en cas d'apport avant semis, $t_i = 1$)

- **f** : fréquence d'une période humide après l'apport (Pour les apports hivernaux, on peut prendre des données moyennes, et dans ce cas $f=1$. Par contre, pour les apports plus tardifs en période en moyenne plus sèche, on prendra des données d'année humide (Ex : 1 année sur 5) et dans ce cas, f sera calé sur ce choix (Ex : $f = 0,2$).

Calcul du lessivage total suite aux apports d'azote (LP)

Une fois les pertes calculées après chaque apport, le lessivage lié aux modalités d'apport résulte de la somme des pertes pour chaque apport i :

$$LP = \sum L_i$$

1.1.3. Attribution des pertes de lessivage à une des modalités des apports

Pour apporter des éléments de diagnostic supplémentaires et identifier les modalités d'apports qui sont à l'origine du lessivage, on se propose de relier le lessivage après apport aux modalités suivantes qui sont susceptibles de causer problèmes, date d'apport (Lda), dose du premier apport (Ld1) et fractionnement(Lfr) en appliquant les règles de décisions suivantes :

On a : $LP = \sum Li$

1) Si le lessivage est nul:

$LP = 0 \Rightarrow Lda = Ld1 = Lfr = 0$

2) S'il y a risque de lessivage :

Pour chaque apport i :

- *Si la date d'apport n'est pas respectée (Annexe 2, Tab.2) :*

$Ldai = Li$

Pour l'ensemble des apports trop précoces, on fait la somme des pertes : **$Lda = \sum Ldai$**

- *Pour les apports dont la date d'apport est respectée (Annexe 2, Tab.2):*

Si c'est le premier apport :

$Ld1 = L1$

pour les apports suivants :

$Lfr = \sum Li \ (i > 1)$

On aura donc : **$LP = Lda + Ld1 + Lfr$**

Remarque sur les fertilisants organiques

Si ce type de fertilisant est amené avant l'hiver, ce qui est fréquemment le cas, le risque de perte par lessivage est pris en compte au niveau du bilan interculture (cf. §5.3.5.). Si l'apport est effectué durant l'hiver, on ne prendra en compte dans la dose X que la fraction minérale de l'apport qui varie entre 0 % (compost de fumier de bovin) à 70 % (fientes et fumiers de volailles) d'après Bodet et al., 2001, p.37). La prise en compte de la part d'azote disponible est traitée en Annexe E6 ,

1.2 RISQUE DE LESSIVAGE HIVERNAL (LH)

1.2.1. Hypothèses à la base du calcul

Le risque de lessivage hivernal est estimé pour la période de drainage suivant la culture de l'année étudiée. Cette phase de drainage peut correspondre à l'interculture quand celle-ci est longue (culture suivante semée au printemps) mais peut aussi s'étaler sur la phase de démarrage de la culture d'hiver suivante. Une autre solution aurait été de travailler de récolte à récolte. Mais la solution retenue permet de prendre en compte l'effet de la culture sur l'interculture et la période de drainage au travers de la minéralisation des résidus de récolte, des reliquats éventuels liés à une surfertilisation de la culture. Les éventuels apports d'azote effectués avant l'hiver seront inclus. La démarche que nous avons adoptée rejoint celle du groupe azote du COMIFER (Azote, 2002), tout en reposant sur certaines simplifications :

- On calcule un bilan récolte-fin drainage d'azote minéral. Un éventuel excédent constituera la part susceptible d'être lessivée. Si on fait coïncider la période de drainage avec le début de l'hiver et sous climat à hiver froid où tous les processus de transformation de l'azote dans le sol et d'absorption des plantes sont au ralenti, le calcul du bilan revient donc à estimer le reliquat entrée hiver-début drainage, qui donne une bonne estimation du risque de lessivage hivernal (Machet et al., 1997). Cette coïncidence n'est pas totalement exact, le drainage commençant souvent un peu plus tôt (Bouthier et al., 2000) mais peut aussi se produire un peu plus tard. Mais les effets sur le calcul sont supposés être négligeables.
- Par ailleurs sous climats plus doux, la croissance ainsi que les processus de transformation de l'azote continuent durant l'hiver. Les différents termes du bilan seront dans ce cas majorés et en cas de culture d'hiver, l'évapotranspiration ne pourra être assimilée à celle d'un sol nu et devra aussi être majorée. Par ailleurs, la minéralisation ne s'arrête pas. Dans ce cas il faut renseigner un paramètre, le % de minéralisation annuelle durant la phase de drainage (janvier-mars) et on considérera que la moitié de cette quantité est susceptible d'être lessivée (voir encadré page suivante).

1.2.2. Calcul du lessivage hivernal (LH) cf. encadré

LH = Bilan N postrécolte * Coefficient de lessivage (BHh-Cons) + Bilan N drainage * Coefficient de lessivage (BHh/2)+

avec **Bilan N postrécolte** : bilan entrée-sortie de l'azote minéral
sur la période récolte-début de période de
drainage
(de l'hiver en région à climat froid)

Coefficient lessivage: Coefficient de lessivage de l'azote dans le profil obtenu avec le modèle de BURNS (Annexe 3) pour la période de drainage au bilan hydrique hivernal moyen (BHh) pour sol nu et la consommation en eau d'une culture d'hiver ou intermédiaire (Cons) (Tab. 7).

**Définitions des différents termes du bilan d'azote minéral postrécolte
(Tableaux en Annexe 2)**

Les entrées sont :

N_{rr} : Reliquats incompressibles en cas de dose ajustée (Tab. 3)

N_{re} : Reliquat dû à une surfertilisation (cf. §4.3.3.)

N_{mr} : l'azote venant de la minéralisation nette des résidus de récolte avant hiver. (Tab. 4)

(En cas de réorganisation nette, **N_{mr}** < 0. Dans ce cas ce terme constitue une sortie).

N_{mh} : L'azote venant de la minéralisation de l'humus durant l'interculture

$N_{mh} = N_{hh} \cdot Ic$ avec **N_{hh}** : Minéralisation annuelle en fonction de la nature du sol (Tab. 5)

Ic : Fraction de la minéralisation annuelle durant l'interculture (Tab. 6)

Sous climat à hiver doux : $N_{mh} = (N_{hh} \cdot Ic) + N_{hh} \cdot Fmh/2$

avec **Fmh** : % de minéralisation annuelle durant la phase de drainage (janvier-mars)

N_{Xm} : L'azote venant d'un apport d'engrais minéral entre la date de récolte et le 31 décembre (la volatilisation étant soustraite)

N_{Xo} : L'azote venant d'un apport d'engrais organique entre la date de récolte et le 31 décembre (la volatilisation étant soustraite).

*Les termes **N_{rr}**, **N_{hh}**, **Ic** peuvent être rapprochés respectivement des termes **R_f**, **M_{hb}**, et du coefficient « temps » dans le modèle AZOBIL (Taureau et al., 1996).*

Les sorties sont :

N_{abs} : L'azote absorbé par un couvert durant l'interculture (culture intermédiaire) en l'absence de limitation d'azote. **N_{abs}** varie en fonction de la culture et de la date de semis (Tab. 7).

Le bilan est donc : **BI = N_{rr} + N_{re} + N_{mr} + N_{mh} + N_{Xm} + N_{Xo} - N_{abs}**

Remarque :

Le cas où **BI** est négatif signifierait qu'**N_{abs}** > azote présent dans le sol, ce qui est impossible. L'azote est limitant et **N_{abs}** est alors plus faible, d'où **BI = 0**

Cependant, ce bilan est calculé sur une absorption potentielle du couvert qui ne se réalise pas forcément en raison d'accidents climatiques et autres facteurs. Pour éviter de donner une image trop positive, nous proposons de fixer pour le bilan dans le cas des cultures annuelles **une valeur minimale : **Bi** > Reliquat récolte incompressible**

On considère que le profil ne peut pas être entièrement épuisé

1.2.3. Risque dû à une surfertilisation et de sous-fertilisation (calcul d'une augmentation des reliquats N_{re})

De nombreux travaux (Chaney, 1990 ; Richards et al., 1996 ; Machet et al., 1997) ont montré qu'une situation de surfertilisation, (i.e. la dose apportée dépasse la dose optimale nécessaire pour obtenir le rendement optimum) entraîne une augmentation des reliquats à la récolte et donc le risque de lessivage hivernal.

Cette augmentation des reliquats (N_{re}) sera proportionnelle à l'écart de la dose totale (dont on a retiré les pertes de volatilisation et de lessivage faisant suite aux apports) à la dose optimale, affectée d'un facteur qui traduit entre autres des « consommations de luxe » de la culture, et une réorganisation de l'azote de l'engrais. Nous proposons de prendre pour ce facteur une valeur de 0,50, inspirée de Machet et al., 1997) .

En revanche dans le cas d'une sous-fertilisation, les reliquats sont faibles et ne diminuent normalement pas en fonction de l'écart à la dose recommandée (Chaney, 1990 ; Richards et al., 1996 ; Machet et al., 1997). On prendra des valeurs de reliquats « incompressibles » N_{rr}

On a donc

<i>Calcul de l'augmentation du reliquat (N_{re})</i>	
$N_{re} = 0$	en cas de sous-fertilisation
$N_{re} = 0,50 \cdot (X'' - X_R)$ avec	en cas de surfertilisation
X_R : la dose recommandée calculée pour la culture sur la base d'un objectif de rendement réaliste (1 année sur 2) avec les méthodes disponibles et validées (méthode des bilans, bilan simplifié (Meynard et al., 1997), et ajustée éventuellement par une méthode de pilotage (JUBIL ...). Si l'agriculteur n'a pas calculé cette donnée, le calcul doit être effectué a posteriori avec l'aide du conseiller ou de celui qui met en œuvre le calcul de l'indicateur.	
X'' : Dose totale d'azote minéral et organique (cf. Annexe 6) disponible pour la culture (X) à laquelle on a déduit les pertes pour l'ensemble des apports i : - par volatilisation $V = \sum V_i$ - par lessivage $L = \sum L_i$ $X'' = X - V - L$	

Remarque sur le calcul de N_{re} :

Le calcul de N_{re} est basé sur l'écart de la dose totale d'azote à une dose recommandée qui doit être calculée sur une méthode validée approchant les besoins de la culture. Le calcul de cette dose repose sur l'estimation d'un rendement objectif ou moyen. Une autre possibilité très judicieuse, si on veut approcher les risques de pertes réelles, aurait été d'utiliser le rendement de l'année et de calcul a posteriori les besoins de la culture, démarche adoptée par Aimon-Marié et al., 2001) dans l'indicateur EQUIF. Mais vu notre objectif de mettre en évidence les pertes potentielles liées au système de culture, nous avons préféré travailler avec un rendement moyen plutôt qu'un rendement réel fluctuant d'année en année et pouvant masquer les écarts liés aux pratiques.

ANNEXE V: Autres hypothèses posées pour réaliser les Analyses de Cycle de Vie du blé et de la luzerne

Hypothèses liées à la fertilisation:

- Le processus Patentkali, engrais potassique utilisé sur la luzerne, n'a pas actuellement d'inventaire connu. Le processus de production de cet engrais sera donc supposé être celui d'un engrais potassique moyen. Plus précisément, le processus choisi correspond à un processus issu de la base de données AGRIBALYSE (*Average mineral fertilizer, as K₂O, at regional storehouse/kg/FR*), mis à jour avec les processus d'Ecoinvent v3.
- Le compost de fumier de bovins mûr est réalisé en ferme, il y'a donc des processus de retournement qu'il faut prendre en compte. En général, un seul processus de retournement est effectué (Benoît Merlo, Les jardins d'Aestiv). Pour ce processus, seuls les passages de machines seront comptés comme impactant l'environnement, soit 1 passage de chargeur frontal et 1 passage d'épandeur 15t. Cela signifie que les émissions survenant pendant le processus de retournement ne sont pas prises en compte.

Autres hypothèses concernant l'inventaire de la

- Selon le panel d'experts en Rhône-Alpes, la luzerne a généralement différents débouchés pour un même cycle de production. Par exemple dans notre cas, la luzerne pure est fauchée 4 fois par an et seulement 3 coupes sur 4 sont destinées à la production de foin, la dernière étant soit ensilée soit enrubannée. Pour ne pas complexifier notre étude, même si l'inventaire tient compte des différents débouchés (utilisation d'ensileuse, enrubanneuse, faneuse), la fonction de cette culture sera seulement de « produire de la luzerne foin » et l'unité fonctionnelle sera 1kg de MS de luzerne foin.
- Aucun inventaire de la production de luzerne-semence n'existe dans les bases de données utilisées (Ecoinvent et AGRIBALYSE). Cependant des inventaires de production de luzerne foin en conventionnel (AGRIBALYSE) ou de l'association luzerne-graminée conventionnelle (Ecoinvent) existent dans ces bases et l'inventaire pour la production de semences qu'ils utilisent correspond à un inventaire de production de semence de trèfle. Dans ce travail, cette même hypothèse sera reprise. Pour pouvoir utiliser le processus semence en agriculture biologique, les pesticides (matières actives et action de traiter) et l'apport en engrais phosphatés ont été supprimés de l'inventaire.
- Pour la fertilisation minérale (Patentkali, sulfate de potassium et acide phosphorique), lorsque la luzerne est pure, 3 applications seront comptabilisées même si elle est cultivée 3,7ans. De la même façon, lorsque la luzerne est en relais 2 applications d'engrais seront enregistrées même si la luzerne n'est cultivée que 2,7ans. Il serait en effet incohérent vis-à-vis de la réalité de terrain de ne compter que 3,7 applications ou 2,7.
- En agriculture biologique, pour la préparation du semis de la luzerne en relais, 2 passages de herse étrille sont effectuées. Dans l'inventaire de la luzerne AB, seul un passage sera compté, l'autre étant compté dans l'inventaire du blé en relais biologique. Ceci s'explique par le fait que la culture de blé, nécessite le passage de herse étrille pour être désherbée.

ANNEXE VI: Facteur de caractérisation des principales substances prises en compte dans les catégories d'impact eutrophisation, changement climatique, occupation des terres et demande totale en énergie cumulée; selon la méthode CML IA baseline 2014 INRA - with total CED

Eutrophisation (en kg de PO4 eq

Compartiment			Substance	Facteur
Air	Water	Soil	Phosphorus	3,06
Air	Water	Soil	Phosphorus, total	3,06
Air	Water	Soil	Phosphorus pentoxide	1,34
Air	Water	Soil	Phosphate	1
Air	Water	Soil	Phosphoric acid	0,97
Air	Water	Soil	Nitrogen	0,42
Air	Water	Soil	Nitrogen, total	0,42
Air	Water	Soil	Ammonia	0,35
Air	Water	Soil	Ammonium, ion	0,33
Air			Dinitrogen monoxide	0,27
Air			Nitric oxide	0,2
Air			Nitrogen dioxide	0,13
Air	Water	Soil	Nitrogen oxides	0,13
Air	Water	Soil	Nitrate	0,1
Air	Water	Soil	Nitric acid	0,1
Water			Nitrite	0,1
Water			COD, Chemical Oxygen Demand	0,022

Changement climatique (en kg de CO2

Compartiment	Substance	Facteur
Air	Sulfur hexafluoride	22800
Air	Trifluoromethylsulfur pentafluoride	17700
Air	Nitrogen fluoride	17200
Air	Ether, pentafluoromethyl-, HFE-125	14900
Air	Methane, trifluoro-, HFC-23	14800
Air	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	12200
Air	Butane, perfluorocyclo-, PFC-318	10300
Air	PFPME	10300
Air	Propane, 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-, HCFC-236fa	9810
Air	Hexane, perfluoro-	9300
Air	Pentane, dodecafluoro-, PFC-4-1-12	9160
Air	HFE-236ca12 (HG-10)	2800
Air	Propane, 1,1,1,3,3-pentafluoro-, HFC-245fa	1030
Air	Ether, 1,1,1-trifluoromethyl methyl-, HFE-143a	756
Air	Methane, difluoro-, HFC-32	675
Air	Dinitrogen monoxide	298
Air	1-Propanol, 3,3,3-trifluoro-2,2-bis(trifluoromethyl)-, HFE-7100	297
Air	Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	124
Air	Ether, 1,1,2,3,3,3-Hexafluoropropyl methyl-, HFE-356pcc3	110
Air	Methane	25
Air	Carbon dioxide	1

Occupations des terres (en m²a/m²a)

Compartiment	Substance	Facteur
Raw	Occupation, arable	1
Raw	Occupation, arable, non-irrigated	1
Raw	Occupation, construction site	1
Raw	Occupation, dump site	1
Raw	Occupation, forest	1
Raw	Occupation, forest, extensive	1
Raw	Occupation, forest, intensive	1
Raw	Occupation, heterogeneous, agricultural	1
Raw	Occupation, industrial area, built up	1
Raw	Occupation, industrial area, vegetation	1
Raw	Occupation, mineral extraction site	1
Raw	Occupation, pasture and meadow, extensive	1
Raw	Occupation, pasture and meadow, intensive	1
Raw	Occupation, permanent crop, fruit	1
Raw	Occupation, permanent crop, vine	1
Raw	Occupation, shrub land, sclerophyllous	1
Raw	Occupation, traffic area, rail/road embankment	1
Raw	Occupation, traffic area, road network	1
Raw	Occupation, tropical rain forest	1
Raw	Occupation, unknown	1
Raw	Occupation, urban, continuously built	1
Raw	Occupation, urban, discontinuously built	1

Demande totale en énergie cumulée (en MJ eq /kg)

Compartiment	Substance	Facteur
Raw	Uranium, 2291 GJ per kg	2291000
Raw	Uranium, 560 GJ per kg	560000
Raw	Uranium, 451 GJ per kg	451000
Raw	Oil, crude, 38400 MJ per m3	38400
Raw	Uranium ore, 1.11 GJ per kg	1110
Raw	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/kg	49,8
Raw	Gas, natural, 46.8 MJ per kg	46,8
Raw	Oil, crude	45,8
Raw	Oil, crude, 42.7 MJ per kg	42,7
Raw	Oil, crude, feedstock, 42 MJ per kg	42
Raw	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	39,8
Raw	Gas, off-gas, oil production	39,8
Raw	Gas, natural/m3	38,3
Raw	Methane	35,9
Raw	Gas, natural, feedstock, 35 MJ per m3	35
Raw	Gas, petroleum, 35 MJ per m3	35
Raw	Coal, 29.3 MJ per kg	29,3
Raw	Coal, feedstock, 26.4 MJ per kg	26,4
Raw	Coal, hard	19,1
Raw	Peat	13
Raw	Coal, brown, 10 MJ per kg	10
Raw	Biomass, feedstock	1
Raw	Energy, from biomass	1
Raw	Energy, from coal	1
Raw	Energy, from gas, natural	1
Raw	Energy, kinetic (in wind), converted	1
Raw	Water, barrage	0,01

ANNEXE VII : Comparaison des impacts potentiels des cultures en relais par rapport aux cultures pures correspondantes à l'échelle de la culture

Une valeur < à 0 signifie que les impacts potentiels des cultures en relais sont inférieurs à ceux des cultures pures. Au contraire une valeur > à 0 signifie que la culture en relais impacte plus l'environnement pour la catégorie donnée que la culture pure correspondante.

Impacts exprimés par ha.an :

c	Luzerne CR/CP		Blé CR/blé CP	
	AB	ACR	AB	ACR
Epuisement des ressources non renouvelables	-5,89%	-8,00%	-17,96%	0,00%
Acidification	-3,28%	-6,40%	-7,99%	0,00%
Eutrophisation	7,95%	3,27%	-44,53%	-1,08%
Changement climatique	1,63%	-2,40%	-42,93%	-0,25%
Destruction de l'ozone	-4,55%	-7,05%	-41,59%	0,02%
Toxicité humaine	-5,77%	-8,35%	-21,03%	0,00%
Ecotoxicité des eaux douces	-5,68%	-8,07%	-24,92%	0,01%
Ecotoxicité marine	-5,49%	-7,81%	-23,82%	0,01%
Ecotoxicité terrestre	-5,17%	-7,15%	-58,62%	0,02%
Formation d'oxydant photochimique	-4,81%	-7,54%	-23,00%	0,01%
Occupation des terres	-0,02%	-0,06%	-0,07%	0,00%
Demande en énergie totale cumulée	-5,74%	-8,21%	-52,64%	0,03%

Impacts exprimés par kg de MS de produits récoltés :

	Luzerne CR/CP		Blé CR/blé CP	
	AB	ACR	AB	ACR
Epuisement des ressources non renouvelables	-15,14%	-12,13%	-10,20%	0,00%
Acidification	-12,79%	-10,61%	0,71%	0,00%
Eutrophisation	-2,67%	-1,37%	-39,28%	-1,08%
Changement climatique	-8,37%	-6,79%	-37,54%	-0,25%
Destruction de l'ozone	-13,94%	-11,23%	-36,07%	0,02%
Toxicité humaine	-15,04%	-12,47%	-13,57%	0,00%
Ecotoxicité des eaux douces	-14,96%	-12,20%	-17,82%	0,01%
Ecotoxicité marine	-14,79%	-11,95%	-16,62%	0,01%
Ecotoxicité terrestre	-14,49%	-11,32%	-54,71%	0,02%
Formation d'oxydant photochimique	-14,17%	-11,69%	-15,72%	0,01%
Occupation des terres	-9,85%	-4,55%	9,38%	0,00%
Demande en énergie totale cumulée	-15,01%	-12,34%	-48,16%	0,03%

ANNEXE VIII: Comparaison à l'échelle de la culture des impacts potentiels de la luzerne en relais et pure selon l'UF « 1ha de terres cultivées » (ha) et « 1ha de terres cultivées pendant 1 an » (ha.an)

Une différence < à 0 signifie que les impacts potentiels de la luzerne en relais (CR) sont inférieurs à ceux de la luzerne pure (CP). Au contraire une valeur > à 0 signifie que luzerne en relais impacte plus l'environnement pour la catégorie donnée que la luzerne pure.

		Eutrophisation (kg PO ₄ ⁻ eq)		Changement climatique (kg CO ₂ eq)		Occupation des terres (m ² a)		Demande en énergie totale cumulée (MJ eq)	
		ha	ha.an	ha	ha.an	ha	ha.an	ha	ha.an
AB	Luzerne CR	12,10	4,47	4570,44	1687,55	30254,67	11170,96	1563,48	2074,37
	Luzerne CP	15,35	4,14	6157,74	1660,51	41434,44	11173,33	2271,96	2200,64
	Différence CR/CP	-21,2%	8,0%	-25,8%	1,6%	-27,0%	0,0%	-31,2%	-5,7%
ACR	Luzerne CR	13,92	5,06	5120,21	1861,89	30789,23	11196,08	1924,03	2289,94
	Luzerne CP	18,38	4,90	7154,04	1907,74	42008,49	11202,27	2862,67	2494,80
	Différence CR/CP	-24,3%	3,3%	-28,4%	-2,4%	-26,7%	-0,1%	-32,8%	-8,2%

La différence d'impacts entre la culture en relais et pure, lorsqu'ils sont exprimés en ha.an est toujours plus faible que lorsqu'ils sont exprimés par ha. Le fait de diviser les impacts par ha, par la durée de culture favorise en effet les cultures plus longues (ici la luzerne pure).

ANNEXE IX: Comparaison des impacts entre une culture conduite en agriculture biologique (AB) et la culture en agriculture conventionnelle (ACR) correspondante

Une valeur < à 0 signifie que les impacts potentiels de la culture biologique sont inférieurs à ceux de la culture conventionnelle correspondante. Au contraire une valeur > à 0 signifie que la culture bio impacte plus l'environnement pour la catégorie donnée que la culture conventionnelle.

Impact exprimés par ha de terres cultivées pendant 1 an

	Luzerne AB / ACR		Blé AB / ACR	
	Pures	En relais	Purs	En relais
Epuisement des ressources non renouvelables	-22,1%	-20,4%	-59,6%	-66,8%
Acidification	-28,5%	-26,1%	-71,8%	-74,1%
Eutrophisation	-15,5%	-11,7%	-32,9%	-62,4%
Changement climatique	-13,0%	-9,4%	-48,7%	-70,6%
Destruction de l'ozone	-13,0%	-10,7%	-25,4%	-56,4%
Toxicité humaine	-19,7%	-17,5%	-53,2%	-63,1%
Ecotoxicité des eaux douces	-22,8%	-20,8%	-52,6%	-64,4%
Ecotoxicité marine	-31,3%	-29,6%	-54,2%	-65,1%
Ecotoxicité terrestre	-32,1%	-30,6%	-26,3%	-69,5%
Formation d'oxydant photochimique	-24,1%	-21,8%	-53,5%	-64,2%
Occupation des terres	-0,3%	-0,2%	5,5%	5,4%
Demande en énergie totale cumulée	-11,8%	-9,4%	17,8%	-44,2%

Impact exprimés par kg de produits récoltés

	Luzerne AB / ACR		Blé AB / ACR	
	Pures	En relais	Purs	En relais
Epuisement des ressources non renouvelables	-13,8%	-16,7%	-3,0%	-12,9%
Acidification	-20,8%	-22,8%	-32,3%	-31,9%
Eutrophisation	-6,4%	-7,7%	61,0%	-1,2%
Changement climatique	-3,6%	-5,2%	23,1%	-22,9%
Destruction de l'ozone	-3,7%	-6,6%	79,0%	14,4%
Toxicité humaine	-11,1%	-13,7%	12,2%	-3,0%
Ecotoxicité des eaux douces	-14,5%	-17,1%	13,7%	-6,5%
Ecotoxicité marine	-23,9%	-26,4%	10,0%	-8,3%
Ecotoxicité terrestre	-24,8%	-27,5%	76,8%	-19,9%
Formation d'oxydant photochimique	-15,9%	-18,3%	11,5%	-6,0%
Occupation des terres	10,5%	4,3%	153,2%	177,0%
Demande en énergie totale cumulée	-2,3%	-5,3%	182,7%	46,5%

ANNEXE X: Comparaison des impacts potentiels des cultures en relais par rapport aux cultures pures correspondantes à l'échelle de la succession [blé-luzerne]

Une valeur < à 0 signifie que les impacts potentiels de l'association blé-luzerne en relais sont inférieurs à ceux de la succession de cultures pures. Au contraire une valeur > à 0 signifie que l'association en relais impacte plus l'environnement pour la catégorie donnée que les cultures pures correspondantes.

Impacts exprimés par ha.an :

	Association en relais / succession de cultures pures	
	AB	ACR
Epuisement des ressources non renouvelables	-42,13%	-44,02%
Acidification	-69,55%	-59,58%
Eutrophisation	-76,46%	-54,86%
Changement climatique	-60,18%	-49,67%
Destruction de l'ozone	-57,81%	-46,81%
Toxicité humaine	-44,94%	-44,84%
Ecotoxicité des eaux douces	-44,85%	-44,31%
Ecotoxicité marine	-45,26%	-44,01%
Ecotoxicité terrestre	-59,08%	-45,12%
Formation d'oxydant photochimique	-48,62%	-45,93%
Occupation des terres	-53,89%	-43,76%
Demande en énergie totale cumulée	-54,85%	-43,38%

Impacts exprimés par kg de MS de produits récoltés :

	Association en relais / succession de cultures pures	
	AB	ACR
Epuisement des ressources non renouvelables	-45,06%	-47,65%
Acidification	-71,09%	-62,20%
Eutrophisation	-77,65%	-57,79%
Changement climatique	-62,19%	-52,94%
Destruction de l'ozone	-59,94%	-50,26%
Toxicité humaine	-47,72%	-48,42%
Ecotoxicité des eaux douces	-47,64%	-47,92%
Ecotoxicité marine	-48,03%	-47,64%
Ecotoxicité terrestre	-61,15%	-48,68%
Formation d'oxydant photochimique	-51,22%	-49,43%
Occupation des terres	-56,22%	-47,41%
Demande en énergie totale cumulée	-57,13%	-47,06%

ANNEXE XI: Influence du choix du processus représentatif de la production du Patentkali® sur le résultat final de l'ACV

Aucun processus n'est actuellement répertorié dans les bases de données pour la production du Patentkali®, engrais potassique utilisé ici sur luzerne. Dans nos inventaires, nous avons alors considéré le processus de production d'un « engrais potassique générique ».

Pour observer l'impact du choix du processus de fertilisation potassique sur le résultat final de l'ACV, nous avons testé 2 autres processus différents le chlorure de potassium (KCl), le sulfate de potassium (K_2SO_3).

Comparaison des impacts sur l'environnement de la production de différents engrais potassiques

Tableau 5: Résultats de la comparaison des impacts (par kg d'engrais produits) liés à la production de différents engrais potassiques

	Processus KCl // K_2SO_3	Processus KCl // « engrais K générique »	Processus K_2SO_3 // « engrais K générique»
Epuisement des ressources non renouvelables	-76%	-27%	206%
Acidification	-83%	-36%	271%
Eutrophisation	-70%	-21%	161%
Changement climatique	-62%	-16%	121%
Destruction de l'ozone	-73%	-24%	181%
Toxicité humaine	-70%	-22%	163%
Ecotoxicité des eaux douces	-70%	-21%	160%
Ecotoxicité marine	-71%	-23%	170%
Ecotoxicité terrestre	-74%	-25%	191%
Formation d'oxydant photochimique	-82%	-35%	266%
Occupation des terres	-57%	-13%	100%
Demande en énergie totale cumulée	-77%	-29%	215%

Comparaison entre le processus *engrais 1* // *engrais 2* :
 Une valeur < à 0 signifie que les impacts potentiels de l'*engrais 1* sont inférieurs à ceux de l'*engrais 2*. Au contraire une valeur > à 0 signifie que l'*engrais 1* impacte plus l'environnement pour la catégorie donnée que l'*engrais 2*.

La production de sulfate de potassium est celle impactant le plus l'environnement. En produisant du KCl plutôt que du K_2SO_3 , les impacts globaux seraient réduits de 72%. Si à la place de produire un engrais K moyen (une combinaison de K_2SO_3 et de KCl), du sulfate de potassium était produit, l'impact sur l'environnement serait augmenté de 184% en moyenne sur toutes les catégories d'impacts.

Au contraire en produisant du chlorure de potassium plutôt que l'engrais moyen, les impacts seraient réduits de 24% en moyenne.

Comparaison des impacts sur l'environnement de la luzerne biologique pure fertilisée avec 60U de Patentkali[®] calculés en utilisant le processus de production d'un engrais K générique, du **chlorure de potassium** (KCl) ou du **sulfate de potassium** (K₂SO₃)

L'influence des différents processus est testée sur l'impact de la luzerne pure biologique. Cette culture est choisie car elle est celle recevant le plus grand nombre d'unité de potassium (60U/an contre 24U/an en agriculture conventionnelle raisonnée).

Figure 28: Impacts par kg de MS de produits récoltés de la luzerne pure biologique (foin) sur l'eutrophisation, le changement climatique, l'occupation des terres et la demande totale en énergie cumulée en fonction du processus choisi pour la production de Patentkali[®]

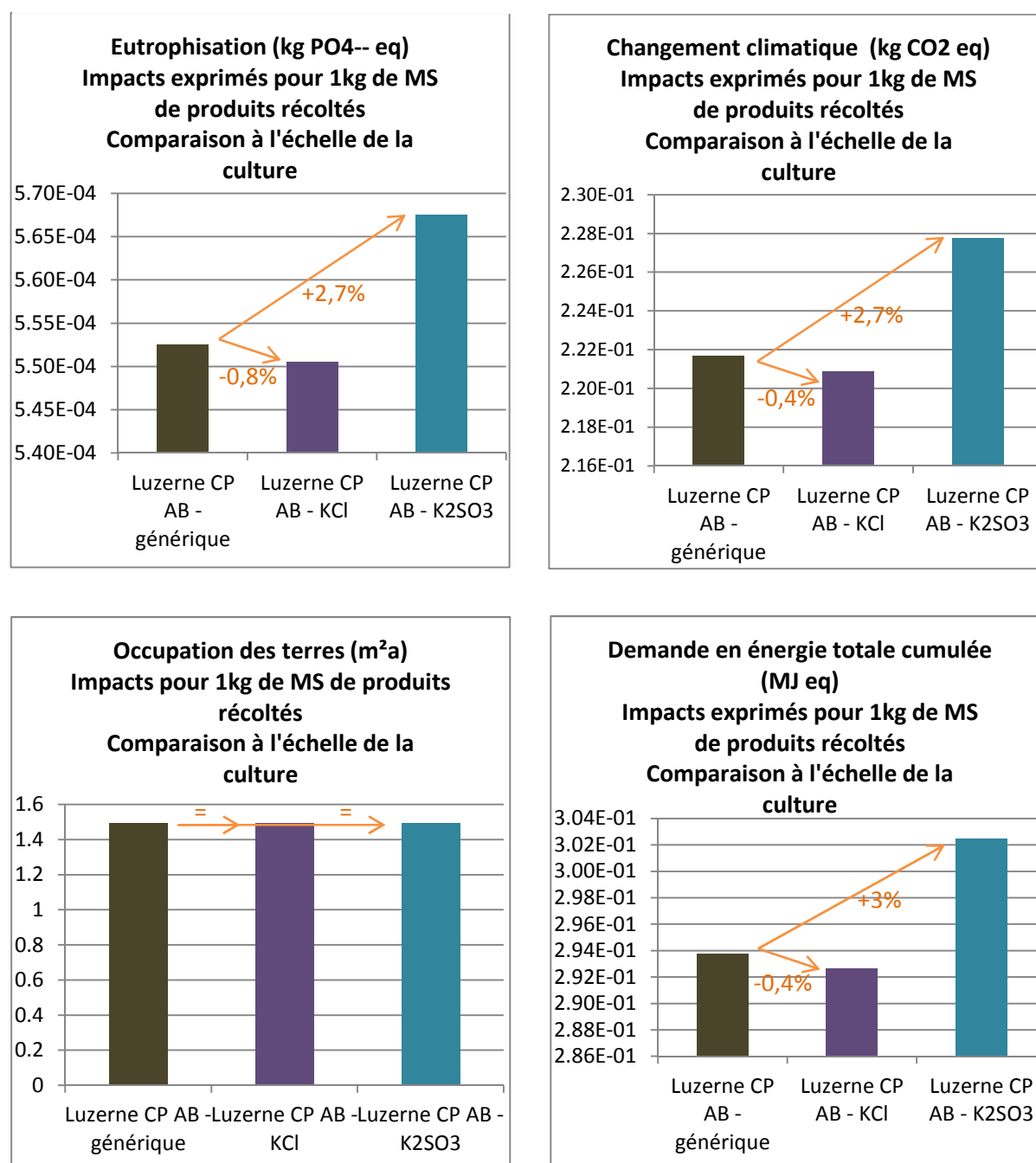


Tableau 6: Résultats de la comparaison des impacts (par kg de MS de foin récoltés) de la production de luzerne foin biologique en fonction du processus choisi pour la production de Patentkali®

	Luzerne - KCl // engrais K générique	Luzerne - K ₂ SO ₃ // engrais K générique	Luzerne - KCl // K ₂ SO ₃
Epuisement des ressources non renouvelables	-1,1%	8,0%	-8,4%
Acidification	-1,6%	11,8%	-11,9%
Eutrophisation	-0,4%	2,7%	-3,0%
Changement climatique	-0,4%	2,7%	-3,0%
Destruction de l'ozone	-0,6%	4,2%	-4,5%
Toxicité humaine	-0,8%	6,1%	-6,5%
Ecotoxicité des eaux douces	-1,0%	7,6%	-8,0%
Ecotoxicité marine	-1,1%	8,6%	-9,0%
Ecotoxicité terrestre	-0,7%	5,3%	-5,7%
Formation d'oxydant photochimique	-1,2%	9,3%	-9,7%
Occupation des terres	0,0%	0,0%	0,0%
Demande en énergie totale cumulée	-0,4%	3,0%	-3,3%

Comparaison entre les impacts de la luzerne pure biologique calculés en utilisant le processus de production de l'*engrais 1* // *engrais 2* :

Une valeur < à 0 signifie que les impacts potentiels de la luzerne – processus *engrais 1* sont inférieurs à ceux de la luzerne-processus *engrais 2*. Au contraire une valeur > à 0 signifie que la luzerne – processus *engrais 1* impacte plus l'environnement pour la catégorie donnée que luzerne-processus *engrais 2*.

L'impact lié à la production des engrais potassiques varie fortement selon l'engrais, puisqu'il s'agit d'un processus parmi d'autre dans l'inventaire de la luzerne, l'amplitude de variation des impacts selon le processus de production d'engrais choisi est moindre.

En moyenne, si nous considérons le Patentkali® comme un sulfate de potassium plutôt que comme un engrais potassique générique les impacts seraient augmentés en moyenne de 5,8%. A l'inverse les impacts seraient réduits de 0,8% si à la place de choisir le processus « engrais K générique » nous avions choisis celui du chlorure de potassium.

Le choix méthodologique concernant la prise en compte de la production de Patentkali® dans nos ACV joue donc un rôle assez important dans le calcul des impacts liés à la luzerne. Il serait donc intéressant de creuser et de mettre au point un inventaire spécifique de la production de Patentkali®.

ANNEXE XII: Influence du choix du facteur – C dans le résultat final des ACV de luzerne

Ici, nous cherchons à connaître si le choix du facteur-C dans le calcul des émissions de phosphore perdu par érosion influence beaucoup ou non le résultat final de l'ACV.

D'après la méthode de calcul des émissions directes et consommations de ressources définie par J.Boissy (voir annexe III) le facteur-C représentant l'effet de la couverture végétale peut être défini selon deux méthodes : d'après Nemecek (2003) ou l'USLE (valeurs internationales).

Dans nos inventaires nous avons choisis les valeurs issues de Nemecek (2003), même si pour la luzerne aucune valeur n'était définie, nous avons donc supposé que le facteur-C de la luzerne serait égal à celui défini pour le trèfle semence. Cependant, la méthode utilisée dans les inventaires de luzerne répertoriés dans AGRIBALYSE est celle de l'USLE. Nous avons donc voulu tester si ces 2 méthodes aboutissaient à des impacts différents.

Seule la catégorie « eutrophisation » est sensible aux variations de phosphore émis dans l'eau, nous présenterons donc les résultats de notre comparaison pour cette catégorie uniquement.

Tableau 7: Impacts par kg de MS de produits récoltés des associations en relais blé-luzerne (AR) et des successions blé pur – luzerne pure (CP) en agriculture biologique (AB) ou conventionnelle raisonnée (ACR) en fonction de la méthode de définition du facteur C : Nemecek ou USLE

		Eutrophisation (kg PO4-- eq)
CP AB	Nemecek	0,003357345
	USLE	0,003358191
	Différence en %	-0,025%
AR AB	Nemecek	0,000750287
	USLE	0,000748657
	Différence en %	0,218%
CP ACR	Nemecek	0,00233323
	USLE	0,002332978
	Différence en %	0,011%
AR ACR	Nemecek	0,0009849
	USLE	0,000983566
	Différence en %	0,136%

La différence entre les impacts des couples calculés avec un facteur-C issu des données de Nemecek ou avec un facteur-C issu des données USLE est très faible : entre -0,02% et +0,2%. L'hypothèse choisie pour le facteur-C dans notre méthode a peu d'influence sur le résultat final de l'ACV des luzernes et des couples.

ANNEXE XIII: Comparaison de nos résultats avec les références des bases de données Ecoinvent et AGRIBALYSE

Ici, nous cherchons à connaître si la méthodologie proposée dans ce mémoire donne des résultats cohérents avec ce des bases de données référentes. La comparaison sera faite pour les 4 catégories étudiées dans ce mémoire : eutrophisation, changement climatique, occupation des terres, demande totale en énergie cumulée.

La culture de blé tendre d'hiver est une culture assez documentée dans les bases de données. Nous avons donc pu comparer les impacts du blé calculés d'après notre méthode avec ceux calculés à partir :

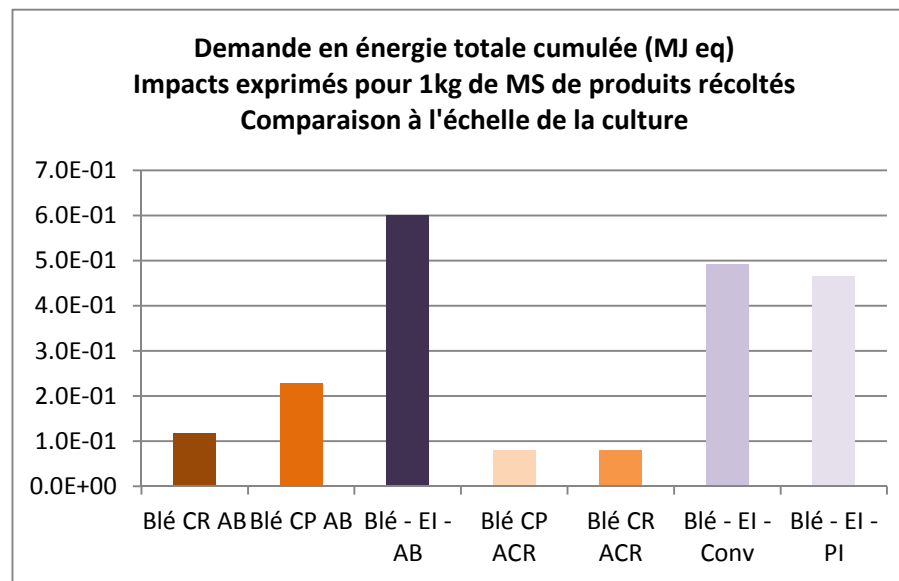
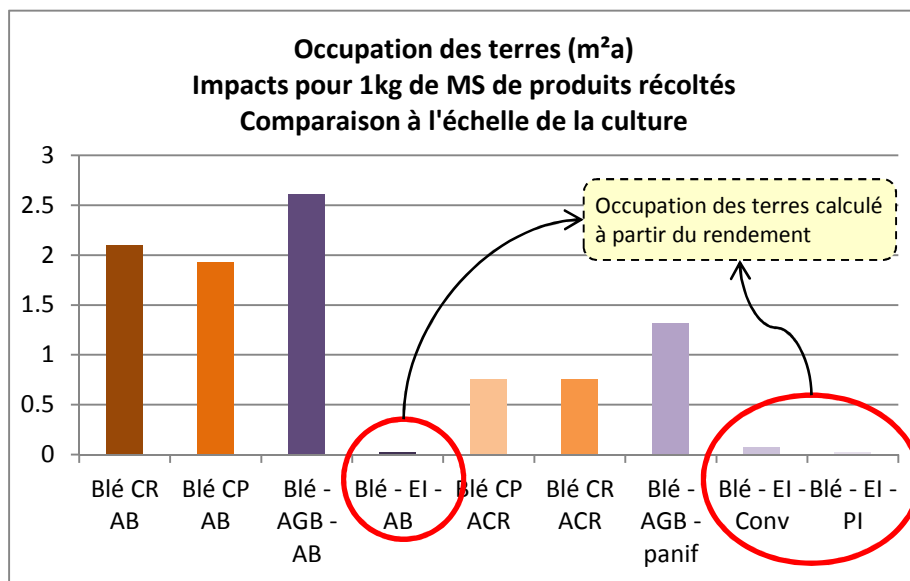
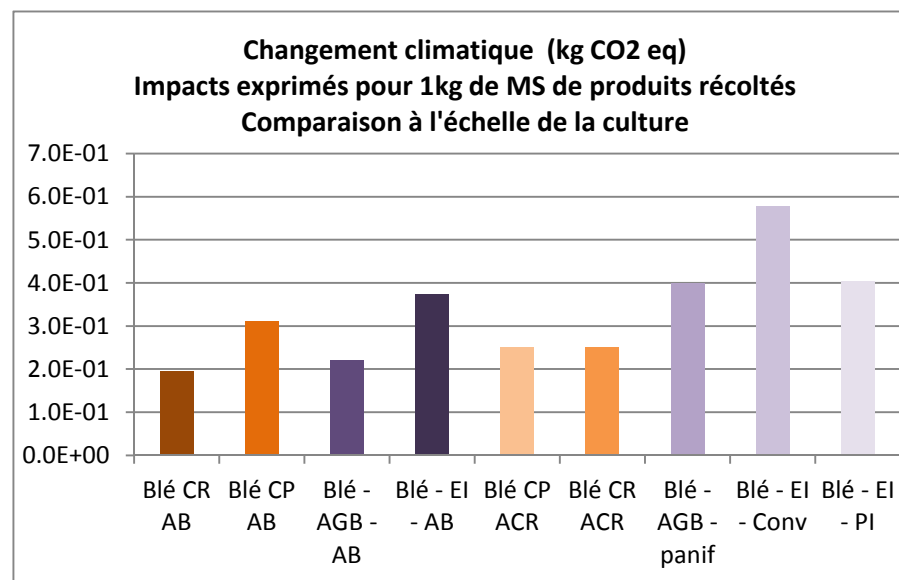
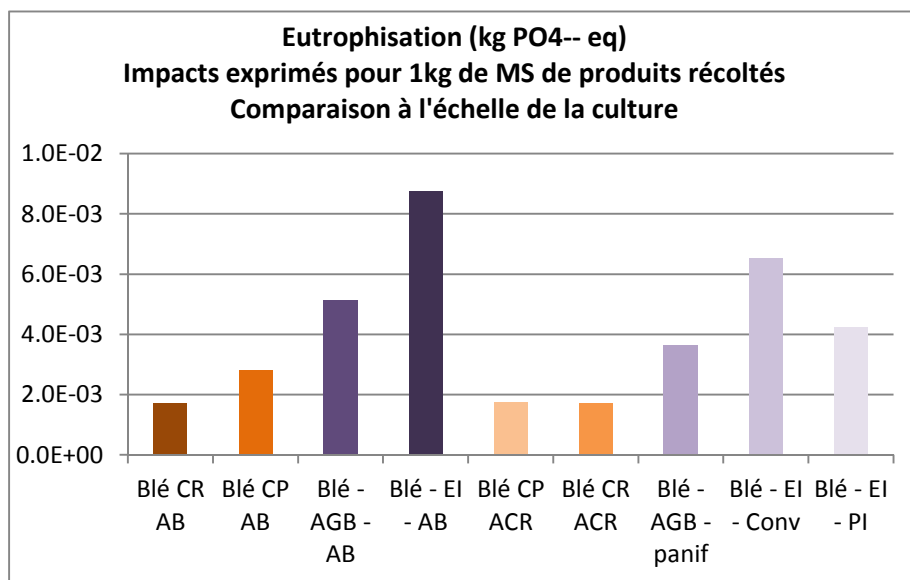
- de l'inventaire du blé biologique d'AGRIBALYSE (Blé – AGB – AB)
- de l'inventaire du blé biologique d'Ecoinvent (Blé – EI – AB)
- de l'inventaire du blé conventionnel panifiable d'AGRIBALYSE (Blé – AGB – panif)
- de l'inventaire du blé conventionnel d'Ecoinvent (Blé – EI – conv)
- de l'inventaire du blé en production intégrée d'Ecoinvent (Blé – EI – PI)

La culture de luzerne pure, elle, reste assez peu renseignée dans les bases de données, voire pas dans la base Ecoinvent. Il en existe des inventaires de production que dans le cas d'une conduite conventionnelle. En agriculture biologique, nous avons fait le choix de comparer les impacts de nos ACV avec ceux calculés à partir de l'inventaire de production de foin de prairie permanente de 50 ans, déjà installé (les impacts liés au semis et au travail du sol ne sont donc pas pris en compte). Les impacts de la luzerne selon nos inventaires seront donc comparées à :

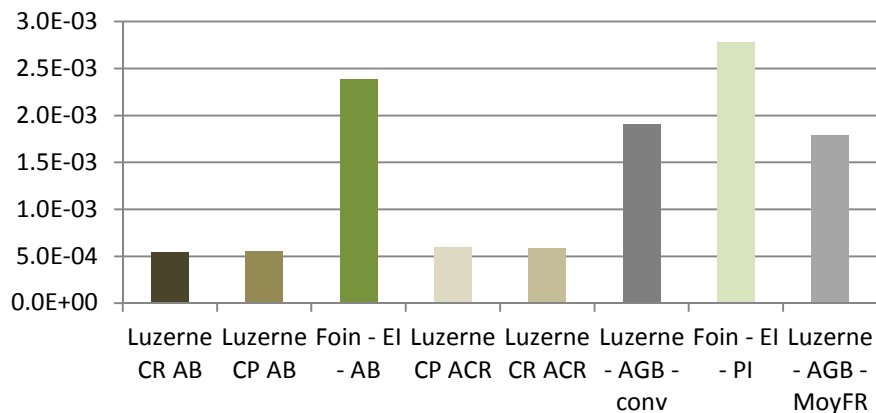
- l'inventaire de foin biologique d'Ecoinvent (Foin – EI – AB)
- l'inventaire de luzerne conventionnelle pour l'alimentation animale, dans le cadre d'exploitation avec élevage d'AGRIBALYSE (luzerne – AGB – conv)
- l'inventaire de foin en production intégrée d'Ecoinvent (Foin – EI – PI)
- l'inventaire de luzerne conventionnelle, moyenne française, d'AGRIBALYSE (luzerne – AGB – MoyFR)

Les valeurs obtenues pour la catégorie « demande totale en énergie cumulée » des inventaires provenant d'AGRIBALYSE ont été exclues des graphiques car elles étaient supérieures aux autres d'un facteur 100. Ces fortes valeurs d'impacts pour la demande en énergie sont expliquées par la prise en compte dans AGRIBALYSE de l'énergie stockée par les plantes (modèle du Pouvoir Calorifique Supérieur - PCS - du produit). Le PCS a un poids très important par rapport aux autres formes d'énergie consommée par la culture, ce qui explique la forte demande en énergie de ces inventaires par rapport à nos inventaires ou ceux d'Ecoinvent.

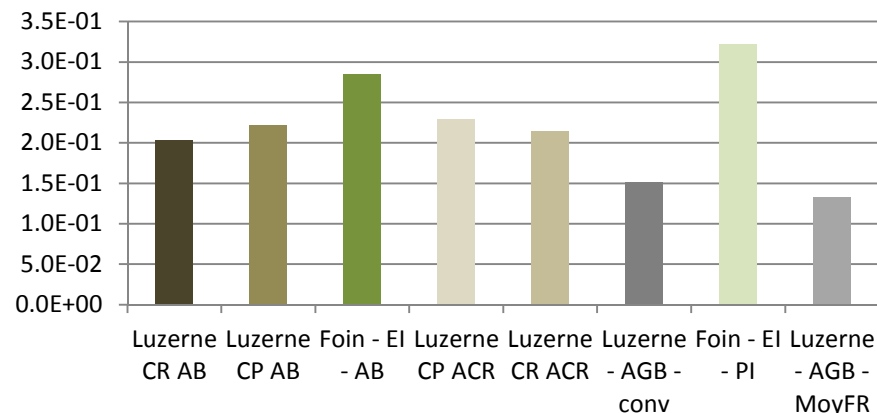
Concernant la catégorie « occupation des terres », la méthode de calcul d'Ecoinvent diffère de celle utilisée dans AGRIBALYSE ou dans ce mémoire. Dans Ecoinvent le calcul de l'occupation des terres se fait bien en calculant la durée d'utilisation du sol (depuis le travail du sol jusqu'à la récolte), mais aussi en fonction du rendement si l'unité fonctionnelle est 1kg de produits récoltés.



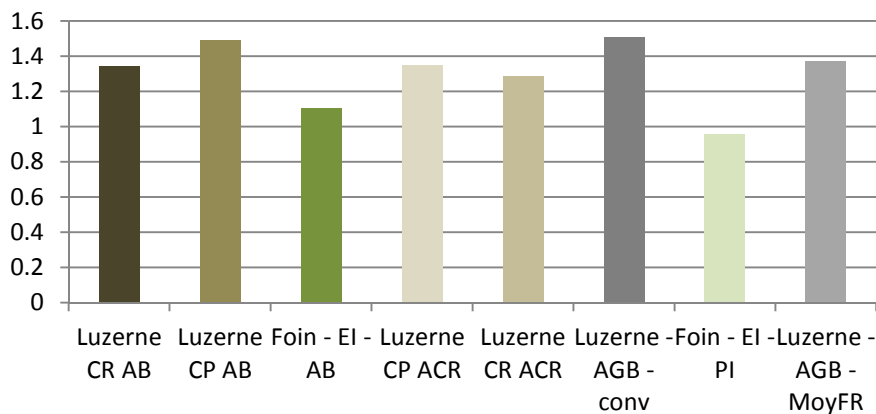
Eutrophisation (kg PO4-- eq)
Impacts exprimés pour 1kg de MS de produits récoltés
Comparaison à l'échelle de la culture



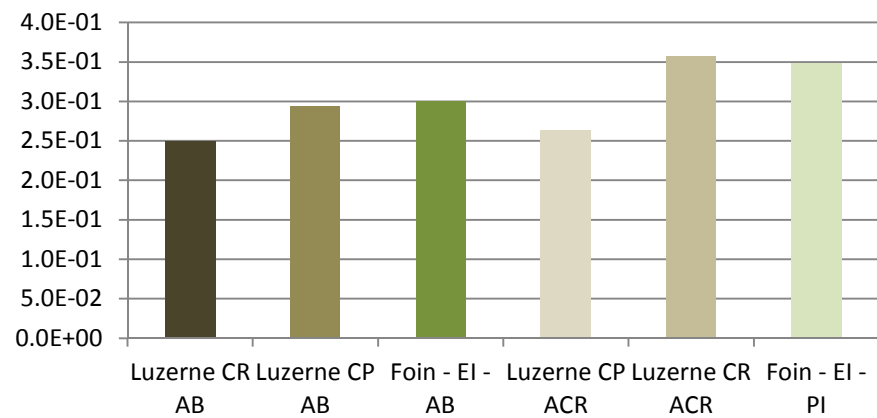
Changement climatique (kg CO2 eq)
Impacts exprimés pour 1kg de MS de produits récoltés
Comparaison à l'échelle de la culture



Occupation des terres (m²a)
Impacts pour 1kg de MS de produits récoltés
Comparaison à l'échelle de la culture



Demande en énergie totale cumulée (MJ eq)
Impacts exprimés pour 1kg de MS de produits récoltés
Comparaison à l'échelle de la culture



	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, horticoles et du Paysage Spécialité : Horticulture Spécialisation : Sciences des Productions Végétales Option : Ingénierie des Agrosystèmes Responsable d'option : Philippe LETERME	
Auteur(s) : Clara KHAMVONGSA Date de naissance : 13/11/1991	Organisme d'accueil : Groupe ESA, UR LEVA Adresse : 55 rue Rabelais, 49007 ANGERS	
Nb pages : 25 Annexe(s) : 55	Maître de stage : Christophe NAUDIN	
Année de soutenance : 2014		
Titre français : Adaptation méthodologique de l'Analyse de Cycle de Vie aux associations céréale-légumineuse en relais – Exemple de la luzerne semée sous couvert de blé tendre d'hiver en Rhône-Alpes. Titre anglais: Methodological adaptation of Life Cycle Analysis to cereal-legume's relay intercrops – Example with alfalfa undersown in soft winter wheat in Rhône-Alpes.		
Résumé: La réintégration des associations céréale-légumineuse dans les systèmes de culture céréaliers des régions tempérées pourrait apparaître comme l'une des solutions permettant de combiner productivité et moindre impact sur l'environnement. Le manque d'organisation de la filière et de connaissances sur leur bénéfice sur l'environnement constitue des freins à leur développement. L'objectif de cette étude est d'adapter l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) aux interactions spécifiques des associations céréale-légumineuse en relais (AR) pour pouvoir évaluer les impacts environnementaux des cultures en relais (CR) en comparaison à ceux des cultures pures (CP) correspondantes. La méthode proposée saisit les avantages et les interactions des AR, ce qui permettrait de réduire l'impact des AR par rapport à celui des CP. Deux méthodes de comparaison sont testées : une première à l'échelle de la culture et la seconde à l'échelle de la succession céréale-légumineuse (purs ou en relais). Quelle que soit l'échelle de comparaison, les AR ont toujours un impact moyen sur l'environnement inférieur à ceux des CP. A l'échelle de la culture la réduction des impacts est de l'ordre de -10% en variant de +9% à -58% selon la catégorie d'impact, la culture et l'unité fonctionnelle. Ces réductions sont plus conséquentes à l'échelle de la succession, de l'ordre de -50% et l'impact des CR est toujours inférieur à celui des CP (variations comprises entre -42% et -78%). Ces résultats semblent très encourageants vis-à-vis des AR, ils seront néanmoins à consolider par une étude dans différents contextes pédoclimatiques et à partir de différents scénarios.		
Abstract : The reintegration of cereal-legume intercrops into the cereal cropping system of temperate areas may appear as one solution allowing to combine high productivity and ecological benefits. The lack of organisation of the all chain and of the environmental benefits knowledge is a brake on their development. The aim of the study is to adapt the Life Cycle Analysis (LCA) to cereal-legume relay intercrops (IR) properties into assessing the environmental impacts of relay crops (RC) in comparison to those of the corresponding sole crops (SC). The proposed methodology seizes the IR's advantages and interactions which could allow to reduce the IR environmental impact compared to the SC. Two comparison methods were tested: the first one at crop scale and the second at cereal-legume's succession scale (as SC or RC). Whatever the comparison scale, IRs always showed a lower environmental impact than SCs on average. At crop scale the impact's reduction was about -10% varying between +9% and -58% depending on the impact category, the crop and the functional unit. Those reductions are more substantial with the succession scale, around -50%. Moreover RCs always exhibited lower impacts than SCs with the lowest reduction equals to -42% and the highest to -78%. Those results are promising regarding IRs however they need to be strengthened by studies with others climate and soil situations and with different crop scenarios.		
Mots-clés : association céréale-légumineuse en relais, Analyse de Cycle de Vie, impact environnemental, interactions, échelle de comparaison Key Words: cereal-legume relay intercrop, Life Cycle Analysis, environmental impact, interactions, comparison scales		