

Modélisation de systèmes agricoles - Analyse prospective de l'évolution face au changement climatique des performances agronomiques, environnementales et alimentaires de systèmes de production agricole contrastés

Auteur : Delandmeter, Mathieu

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin; Bindelle, Jérôme

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en agroécologie, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12200>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

MODELISATION DE SYSTEMES AGRICOLES

-

ANALYSE PROSPECTIVE DE L'EVOLUTION FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DES PERFORMANCES AGRONOMIQUES, ENVIRONNEMENTALES ET ALIMENTAIRES DE SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLE CONTRASTES

MATHIEU DELANDMETER

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN AGROECOLOGIE**

ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021

**(CO)-PROMOTEUR(S) : PR. BENJAMIN DUMONT
PR. JEROME BINDELLE**

LECTEURS : PR. NICOLAS VEREECKEN ET PR. MARC DUFRENE

Le présent document n'engage que son auteur.

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech (représentée par les promoteurs Pr. Benjamin Dumont et Pr. Jérôme Bindelle).

MODELISATION DE SYSTEMES AGRICOLES

-

ANALYSE PROSPECTIVE DE L'EVOLUTION FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DES PERFORMANCES AGRONOMIQUES, ENVIRONNEMENTALES ET ALIMENTAIRES DE SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLE CONTRASTES

MATHIEU DELANDMETER

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN AGROECOLOGIE**

ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021

**(CO)-PROMOTEUR(S) : PR. BENJAMIN DUMONT
PR. JEROME BINDELLE**

LECTEURS : PR. NICOLAS VEREECKEN ET PR. MARC DUFRENE

RESUME

Ce mémoire s'attache à comparer trois systèmes agricoles contrastés, dans un premier temps par rapport à leurs performances agronomiques, environnementales et alimentaires (période 1985-2009), puis dans un second temps par rapport à l'évolution de toutes ces performances face au changement climatique (périodes 2045-2069 et 2075-2099 sous les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5). Cette comparaison s'appuie sur les résultats de simulations effectuées grâce à la modélisation de ces systèmes agricoles avec le modèle de culture STICS, qui prend en entrées des variables pédoclimatiques, des itinéraires techniques et des caractéristiques initiales et pérennes du système et donne en sorties des variables agronomiques et environnementales. Les trois systèmes agricoles comparés sont simulés avec l'enchaînement de trois rotations de 8 ans chacune. Le premier système est le système *Business-as-usual* (BAU), dans lequel on retrouve les cultures majoritaires en zone limoneuse wallonne et où on utilise du fumier ; le deuxième est le système *Vegan* qui simule une agriculture sans élevage et donc sans fumier ; et le troisième est le système *Intégré Cultures-Elevage* (ICLS), utilisant l'élevage de manière fonctionnelle avec notamment des prairies temporaires. Les principaux résultats indiquent que le système BAU est relativement performant en termes de rendement et de nombre de personnes nourries, mais plus fragile face aux stress hydrique et thermique et avec une dépendance plus élevée aux imports de produits externes à la rotation. Le système Vegan obtient des performances médianes, comprises entre celles des deux autres systèmes, mais avec un faible stockage de carbone organique dans le sol dû notamment à l'absence de fumier animal. Le système ICLS fournit un rendement relatif un peu plus faible, mais avec une bien plus grande auto-suffisance, une forte résistance aux stress (surtout hydrique) et un stockage de carbone très élevé. Cette forte résilience du système ICLS est confirmée face au changement climatique : les trois systèmes verraient à l'avenir leurs rendements globaux augmenter mais c'est le système ICLS qui connaîtrait la plus forte augmentation, et ce dernier verrait ses émissions totales de CO₂ diminuer, à l'inverse des deux autres systèmes. Finalement, le contraste entre les différents types de performances évaluées souligne la pertinence d'analyser des systèmes agricoles avec un regard le plus large possible.

ABSTRACT

This master thesis compares three contrasted farming systems, first with regards to agronomic, environmental and dietary performances (period of time 1985-2009) and secondly with regards to the evolution of these performances when facing climate change (periods of time 2045-2069 and 2075-2099 under climate scenarios RCP4.5 and RCP8.5). This comparison is based on simulations performed with the crop model STICS, taking as inputs pedoclimatic variables, technical practices and perennial and initial characteristics of the system, and giving as outputs farming and environmental variables. The three farming systems are simulated by the succession of three 8-year rotations. The first system is called *Business-as-usual* (BAU), which includes the main cultures of the Walloon loamy area and that uses manure; the second system is the *Vegan* system that simulates an agriculture without livestock and therefore without animal manure; and the third system is the *Integrated Crop-Livestock* (ICLS) system, using integrated livestock and temporary grasslands. Main results show that the BAU system is relatively competitive in terms of yield and number of nourished people, but weak as for thermic and water stress and highly dependent on external products imports. The Vegan system shows median performances, comprised between those of the two other systems, but with low organic carbon storage due to the absence of animal manure. The ICLS system provides a slightly weaker relative yield, but with a much higher self-sufficiency, a great stress resistance (especially for water stress) and a very high organic carbon storage. This good resilience of the ICLS system is confirmed when facing climate change: all three systems would increase their relative yield, but it is the ICLS system that would experience the biggest increase, and the latter would also undergo a decrease in total CO₂ emissions, unlike the two other systems. Finally, the contrast between the different evaluated performance types highlights the pertinence of analyzing farming systems with the broadest possible perspective.

Modélisation de systèmes agricoles

Analyse prospective de l'évolution face au changement climatique
des performances agronomiques, environnementales et alimentaires
de systèmes de production agricole contrastés



Travail de fin d'études de
Mathieu DELANDMETER
en vue d'obtenir le diplôme de
Master en Agroécologie

Promoteurs
Pr. Benjamin DUMONT
Pr. Jérôme BINDELLE

Année académique 2020-2021



En premier lieu, je voudrais remercier mes promoteurs Benjamin Dumont et Jérôme Bindelle pour leur disponibilité, leurs conseils et leur bienveillance tout au long de cette année. Je suis spécialement reconnaissant à M. Dumont de m'avoir expliqué l'été dernier qu'il était faisable et d'un grand intérêt de combiner les deux magnifiques disciplines que sont la modélisation et l'agroécologie.

Je voudrais ensuite dire un grand merci à mes proches pour le support qu'ils m'apportent, même lorsque nos contacts ont été moins fréquents en cette année si particulière. Avec une petite dédicace à Maki qui a créé l'image de couverture.

Finalement, je voudrais bien sûr adresser de chauds remerciements à ma famille pour son soutien inconditionnel, et particulièrement à mes parents qui m'ont compris et soutenu dans mes choix de voyager et d'étudier encore un peu plus.

Table des matières

Introduction	1
1 Etat de l’art	6
1.1 Enjeux et objectifs pratiques et politiques	6
1.2 Recherche pratique en agroécologie	9
1.3 Modélisation de systèmes agricoles	12
1.4 L’impact du changement climatique sur les systèmes agricoles	15
2 Matériel et méthodes	21
2.1 Systèmes agricoles étudiés	22
2.2 Site expérimental	25
2.3 Le modèle STICS	26
2.4 Méthodologie de comparaison	38
3 Résultats et discussions	42
3.1 Performances des systèmes agricoles	42
3.2 Evolution future des systèmes agricoles	60
3.3 Synthèse comparative multi-critères	70
Conclusion	73
Bibliographie	76
A Itinéraires techniques	I
B Equations importantes du modèle STICS	V
C Tableaux et figures supplémentaires	X

Table des figures

1	Schéma DPSIR des systèmes alimentaires	3
2	Résumé des différentes étapes du travail de recherche	5
1.1	Impact du changement climatique sur les rendements agricoles (Cline, 2007)	17
1.2	Impact du changement climatique sur les rendements (2) (IPCC, 2014)	18
1.3	Effets d'une augmentation de la concentration en CO ₂ sur la croissance et le développement d'un plant de soja (Gray and Brady, 2016)	20
2.1	Résumé des différentes étapes du travail de recherche	21
2.2	Rotations des systèmes 'Business as usual' (BAU) et 'Vegan'	23
2.3	Rotation du système intégré cultures-élevage (ICLS)	24
2.4	Modules du modèle STICS (Brisson et al., 2009)	26
2.5	Principe de fonctionnement du modèle STICS	27
2.6	Scénarios climatiques du GIEC	33
2.7	Concentrations de gaz à effet de serre (IPCC, 2019)	37
2.8	Hierarchie des sorties et indicateurs utilisés	38
3.1	Evolution des prairies de la rotation ICLS	43
3.2	Rendements des trois systèmes	44
3.3	Evolution de la masse des organes récoltés des trois systèmes	45
3.4	Couverture végétale des 3 systèmes	45
3.5	Stock de carbone pour les trois systèmes	47
3.6	Stock de carbone sur une rotation pour chaque système	48
3.7	Stock d'azote pour les trois systèmes	49
3.8	Stock d'eau pour les trois systèmes	50
3.9	Influence des stress hydrique et thermique pour les trois systèmes	51
3.10	Influence du stress azoté pour les trois systèmes	52
3.11	Rendements des froments d'hiver	53
3.12	Distribution des rendements de froment d'hiver	54
3.13	Comparaison des rendements de froment d'hiver en lien avec les stocks d'eau, carbone et azote dans le sol	55
3.14	Emissions de CO ₂ et N ₂ O pour les trois systèmes	57
3.15	Comparaison des performances alimentaires des systèmes agricoles	58
3.16	Excès et déficits dans les produits d'alimentation humaine et animale	59

3.17	Evolution des productions des 3 systèmes avec le changement climatique .	62
3.18	Evolution de l'influence du stress hydrique avec le changement climatique sur les trois systèmes	64
3.19	Evolution de l'influence du stress thermique avec le changement climatique sur les trois systèmes	64
3.20	Evolution de l'influence du stress azoté avec le changement climatique sur les trois systèmes	65
3.21	Evolution du stock d'eau dans le sol avec le changement climatique sur les trois systèmes	66
3.22	Evolution du stock de carbone dans la matière organique humifiée avec le changement climatique sur les trois systèmes	67
3.23	Evolution des émissions de CO ₂ avec le changement climatique pour les trois systèmes	68
3.24	Evolution des émissions de N ₂ O avec le changement climatique pour les trois systèmes	68
3.25	Evolution avec le changement climatique du nombre de personnes nourries par les trois systèmes	69
3.26	Comparaison multi-critères des performances agronomiques, environnementales et alimentaires des systèmes agricoles	70
3.27	Comparaison multi-critères de l'évolution des performances agronomiques, environnementales et alimentaires des systèmes agricoles	72
A.1	Itinéraires techniques du système <i>Business-as-usual</i> (BAU)	II
A.2	Itinéraires techniques du système Vegan	III
A.3	Itinéraires techniques du système Intégré Cultures-Elevage (ICLS)	IV
B.1	Définition du facteur de stress thermique FTEMP	VII
B.2	Définition du facteur de stress hydrique SWFAC	VIII
B.3	Calcul de l'indice de nutrition azotée INN	IX
B.4	Définition du facteur de stress azoté INNS	IX
C.1	Régime alimentaire de référence de la Commission EAT-Lancet	XI
C.2	Vue aérienne du site d'implantation des parcelles d'essai	XII
C.3	Localisation du site d'implantation des parcelles d'essai	XIII
C.4	Agrandissement pour la 3ème rotation	XVI
C.5	Stock d'eau pour les trois systèmes sur une seule rotation	XVI
C.6	Influence du stress hydrique par culture	XVII
C.7	Influence du stress thermique par culture	XVII
C.8	Influence du stress azoté par culture	XVIII
C.9	Excès et déficits dans les produits d'alimentation humaine et animale pour la période 2075-2099 (RCP8.5)	XX

Liste des tableaux

2.1	Critères et indicateurs de performance et durabilité	39
3.1	Composition du troupeau pour le régime alimentaire optimal des trois systèmes	59
C.1	Stades phénologiques du modèles STICS	XIV
C.2	Facteurs de conversion pour les Unités-Céréales	XIV
C.3	Productivités à l'hectare	XV
C.4	Evolution des productivités à l'hectare	XIX
C.5	Facteur FCO ₂ selon la plante et le scénario climatique	XX
C.6	Composition du troupeau pour le régime alimentaire optimal des trois systèmes pour la période 2075-2099 (RCP8.5)	XXI
C.7	Calculs pour les critères de la comparaison multi-critères	XXII
C.8	Evolution des indicateurs de la comparaison multi-critères	XXIII

Introduction

LES défis auxquels doivent et devront faire face les générations actuelles et futures sont immenses. Au changement climatique s'ajoutent maintenant crises sociales, économiques et sanitaires. La pandémie du Covid-19 à laquelle est maintenant confrontée l'humanité depuis plus de 18 mois a eu le mérite d'encore un peu plus mettre en lumière une évidence : notre monde globalisé et connecté doit être pensé comme un système unique dans lequel la moindre perturbation à un endroit précis donnera lieu à de multiples impacts de part et d'autre. De ce point de vue, les systèmes alimentaires sont au coeur des problématiques énoncées : ce que nous choisissons d'acheter et manger est non seulement à la base de notre santé, mais cela soutient également les manières de produire cette nourriture, de la transporter et de la distribuer. Or ces différentes méthodes de production, transport et distribution de la nourriture peuvent parfois s'avérer la source de très nombreux problèmes : *environnementaux*, comme la dégradation du sol, de la biodiversité, la déforestation ou l'émission de gaz à effet de serre ; *sanitaires*, comme le surpoids et l'obésité, les maladies cardiovasculaires, mais également l'émergence de virus due à cette perte de biodiversité et à l'augmentation des interactions entre les humains et la vie sauvage ; et *socio-économiques*, le nombre d'exploitations agricoles ne faisant que diminuer dans nos contrées et la pauvreté des agriculteurs et du monde rural en général ne faisant qu'augmenter, trois quarts des individus sous-alimentés de par le monde étant des ruraux (World Health Organization et al., 2020; IPES-Food, 2020; Frison et al., 2016).

Néanmoins, si les problèmes dus aux systèmes alimentaires sont très souvent pointés du doigt, et il est utile de le faire pour pousser au changement, il faut aussi ne jamais perdre de vue que les systèmes agricoles peuvent également s'avérer nos meilleurs alliés pour faire face aux défis énoncés. D'une part parce que c'est justement grâce au fait qu'ils sont à la base de nombreux soucis qu'il y a un levier d'action à aller chercher. Mais également parce qu'ils sont la source de nombreux services écosystémiques extrêmement précieux. Le principal et le plus évident est que les systèmes agricoles nourrissent la population, qui ne cesse de s'accroître, mais ils servent également à séquestrer et stocker le carbone, réguler la qualité de l'air et de l'eau, fournir des habitats pour différentes espèces animales et végétales, façonner les paysages, etc. Malheureusement, tous ces services sont mis en péril par le changement climatique qui, comme nous le verrons dans ce travail, menace la disponibilité, l'accès, l'utilisation et la stabilité de la nourriture, en réduisant à certains endroits les rendements et la qualité des aliments, en détériorant l'état des écosystèmes

avec la disparition des pollinisateurs et l'augmentation des maladies et ravageurs, ou en ayant un impact sur les capacités de transport des denrées et sur la volatilité des prix agricoles (IPCC, 2019; World Health Organization et al., 2018).

Objectif du travail

Ce travail s'inscrit dans le projet EcoFoodSystem développé par 8 chercheurs de l'Université de Liège. Ce projet a pour but de tester sur le terrain, sur une zone de 30 hectares et sur une période de 8 ans, trois systèmes agricoles n'utilisant aucun pesticide et conçus avec différentes conditions : un système suivant la tendance agricole actuelle basée sur la spécialisation (*Business-as-usual*), un autre répondant aux attentes véganistes et n'intégrant donc aucun élevage (*Vegan*), et le dernier intégrant l'élevage et les cultures de manières complémentaires (*Intégré Cultures-Elevage*). C'est selon ces différentes spécificités, et en respectant les bonnes pratiques agricoles telles que la maximisation des intercultures ou l'alternance des familles botaniques, que les instigateurs d'EcoFoodSystem ont conçu les rotations de cultures de chaque système, en comparant également l'utilisation alimentaire optimale qu'on pouvait attendre des différentes rotations qui variaient par leurs durées et leurs compositions (De Clerck et al., 2021).

L'objectif de ce travail est donc d'étudier les systèmes agricoles du projet EcoFoodSystem en intégrant une approche la plus holistique possible, concept cher à l'agroécologie. C'est pourquoi il s'attache à comparer des systèmes agricoles entiers, chacun étant représenté par une rotation-type, et en faisant cela par l'analyse de leurs performances tant agronomiques qu'environnementales et alimentaires. Le but premier de la recherche est donc de constater s'il est possible de concilier performances agronomiques, environnementales et alimentaires, tout étant aussi indispensables : les premières pour nourrir la population, les secondes pour garantir la durabilité de toutes les autres et les troisièmes pour garantir la bonne santé des consommateurs et donc aussi leur intérêt à ce tourner vers ce genre de systèmes agricoles. Le second objectif du travail est d'étudier quels sont les systèmes les mieux adaptés pour faire face au changement climatique, c'est-à-dire ceux qui à la fois réduisent le mieux leurs impacts sur l'environnement pour contribuer à atténuer ce changement climatique mais également ceux qui s'adaptent le mieux aux conséquences climatiques déjà inexorables. Le troisième but de cette recherche est d'étudier d'où viennent les bonnes ou mauvaises performances de chaque système afin d'en tirer des conclusions généralisables : quelles cultures et rotations sont à recommander pour l'écosystème particulier qu'est la Hesbaye, quelle intégration de l'élevage est à même de garantir la durabilité du système agricole, etc. Finalement, le quatrième objectif de ce travail est d'explorer une méthodologie d'évaluation des systèmes agricoles la plus complète possible, le but étant de combattre l'idée selon laquelle le rendement est le seul indicateur pertinent. En élargissant les méthodes d'évaluation des systèmes agricoles et en mettant en lumière leurs impacts mais également leurs atouts, il est probable que les acteurs au sein des systèmes alimentaires, qu'ils soient agriculteurs mais également décideurs politiques ou simples citoyens, font en sorte que les systèmes agricoles s'adaptent à

ces nouveaux indicateurs et à cette nouvelle vision.

Afin d'établir le cadre d'analyse de ce travail, la Figure 1 illustre à l'aide du modèle DPSIR (*Driving Forces, Pressures, States, Impacts, Responses*) (Maxim et al., 2009) les liens entre les facteurs intervenant dans les systèmes alimentaires impactant ou étant impactés par les principales variables d'état étudiées dans le cadre de ce travail. Les forces motrices (*en rouge sur le schéma*) établissent le contexte en énonçant les principaux facteurs produisant des pressions (*en orange*) sur les variables d'état des systèmes agricoles (*en vert*). Les forces motrices qui ne sont pas en italique sur le schéma sont toutes considérées d'une certaine manière dans le cadre de ce travail, et servent à établir et différencier les différentes simulations qui seront effectuées. Les variables d'état sont les principales variables d'état environnementales considérées dans le cadre de ce travail. Elles ont des impacts (*illustrés en bleu*) tant sociaux qu'environnementaux et économiques, et donc sur les autres performances agronomiques et alimentaires étudiées dans la suite du travail. Finalement, pour remédier à ces impacts, différentes réponses sont possibles (*reprises dans l'ellipse brune*) : la relocalisation de la production agricole et l'agroécologie sont au coeur de chacun des systèmes investigués dans le cadre de cette recherche, tandis que le changement des habitudes alimentaires mène à la discrimination entre ceux-ci, l'un répondant aux attentes véganistes tandis que les deux autres intègrent l'élevage de différentes façons.

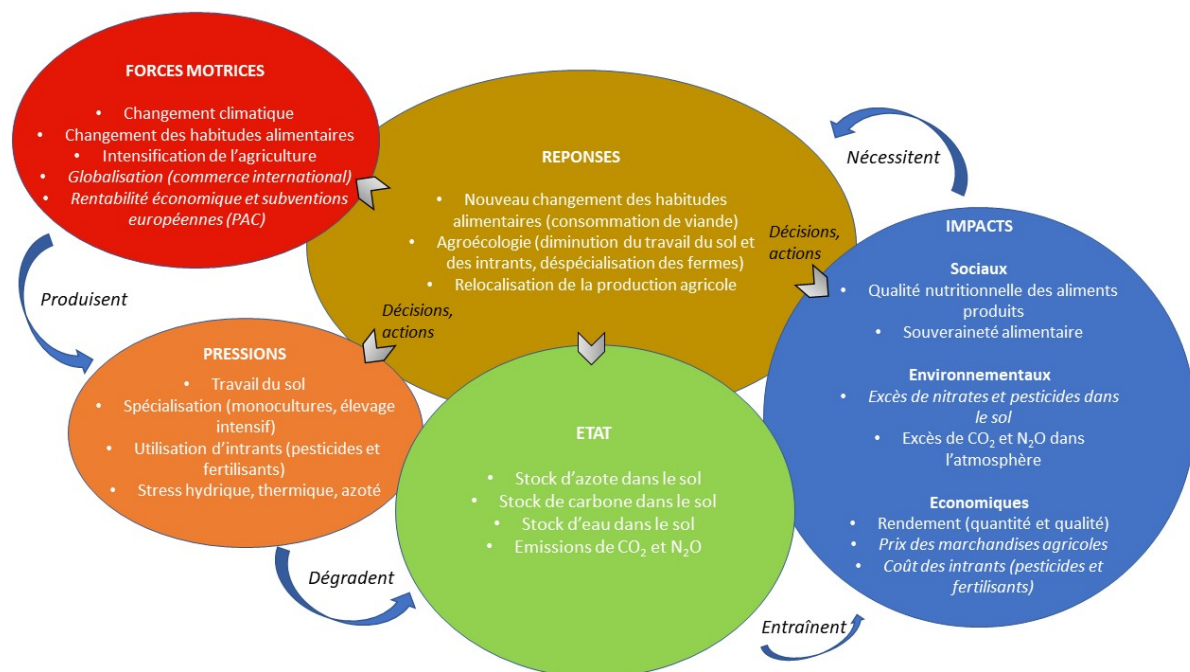


Figure 1 – Schéma DPSIR illustrant les facteurs intervenant dans les systèmes alimentaires impactant ou étant impactés par les principales variables d'état étudiées dans le cadre de ce travail. En italique sont indiqués des facteurs qui ne sont pas pris en compte dans ce travail.

Méthodologie

L'étude et la comparaison des systèmes agricoles effectuées dans ce travail s'appuie sur la modélisation. Les différentes rotations de ces systèmes ayant déjà été définies par les instigateurs du projet EcoFoodSystem, la première étape de la méthodologie a été de définir les itinéraires techniques spécifiant les modes de culture tels que modalités de semis, récolte, fertilisation, travail du sol, etc. Une fois cette première étape effectuée, la seconde a été de modéliser ces systèmes agricoles à l'aide du modèle de culture STICS. Ce modèle prend en entrées des données climatiques, des itinéraires techniques et les caractéristiques initiales et pérennes de l'agroécosystème, et fournit en sorties des variables agronomiques (rendement et couverture végétale par exemple) et environnementales (émissions de CO₂ et N₂O, stocks d'eau, d'azote et de carbone dans le sol, etc.). Ces deux premières étapes du travail se sont avérées assez longues : dans la définition des itinéraires techniques, il a fallu faire énormément de choix qui auraient une influence sur toutes les étapes suivantes ; et dans la modélisation, il a fallu réussir à correctement simuler l'enchaînement de cultures et de prairies (celles-ci s'avérant particulièrement compliquées à enchaîner) et déterminer des moyens d'incorporer l'élevage dans ces simulations. Mais ces deux premières étapes n'ont constitué que les fondations du travail, préliminaires à la dernière et principale étape que constitua la comparaison des systèmes agricoles et l'analyse des résultats. Cette dernière étape a été divisée en trois parties différentes : (i) l'analyse des performances agronomiques, environnementales et alimentaires via différents critères et indicateurs, sous des conditions climatiques actuelles ; (ii) l'analyse de l'évolution de ces performances sous des conditions climatiques futures prédites par les scénarios du GIEC ; (iii) le résumé de ces différentes performances et de leur évolution via une analyse multi-critères. Toute cette méthodologie est résumée dans la Figure 2.

Organisation du rapport

Ce rapport est divisé en trois chapitres. Le premier dresse l'état de l'art en posant le cadre pratique, politique et scientifique dans lequel s'inscrit la recherche. Le deuxième développe le matériel et la méthodologie employés : on y découvre en détails les systèmes agricoles investigués, le modèle de culture utilisé pour les simuler avec les variables d'entrée et de sortie nécessaires et la méthodologie de comparaison implémentée. Le dernier chapitre constitue alors le coeur du travail en présentant et discutant les résultats : il est lui-même divisé en deux parties principales, la première analysant les performances des systèmes agricoles sous des conditions climatiques historiques récentes tandis que la deuxième prédit l'évolution de ces performances sous des conditions climatiques futures, à deux horizons de temps et sous deux scénarios climatiques différents. Ce dernier chapitre se clôture par une comparaison multi-critères des différents systèmes agricoles.

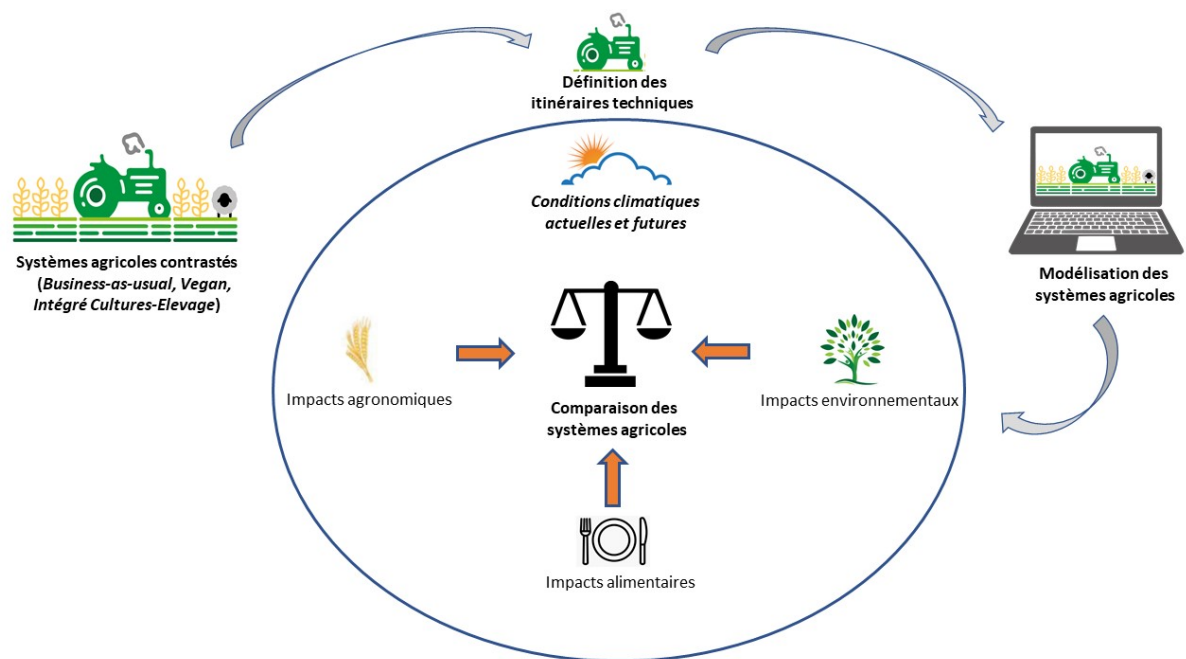


Figure 2 – Résumé des différentes étapes du travail de recherche

Chapitre 1

Etat de l’art

Ce premier chapitre a pour but de poser le cadre pratique, politique et scientifique dans lequel s’inscrit ce travail. Les bases scientifiques et méthodologiques nécessaires à l’élaboration des résultats, en partie également issues de la littérature, sont par contre présentées dans le chapitre suivant.

La première section de ce chapitre identifie les enjeux pratiques et politiques qui entourent cette recherche ainsi que les objectifs précis de celle-ci pour tenter d’y répondre. La seconde section énonce brièvement les recherches pratiques en agroécologie qui ont déjà été effectuées sur la comparaison de différents systèmes agricoles, tandis que la troisième sert d’introduction à la modélisation de systèmes agricoles, en expliquant ce qu’est un modèle de culture et en faisant le tour des différentes sortes qui existent. Finalement, la quatrième section effectue une revue de la littérature scientifique sur ce qui a déjà été fait pour étudier l’impact du changement climatique sur les systèmes agricoles.

1.1 Enjeux et objectifs pratiques et politiques

Un régime sain et durable

Le projet EcoFoodSystem, dans lequel s’inscrit cette recherche, part entre autres d’une étude de la commission EAT-Lancet de 2019 qui définit ce que doit être un régime sain pour l’humain et respectant les limites planétaires à l’horizon 2050 (Willett et al., 2019). Ce régime idéal serait principalement constitué d’aliments d’origine végétale et de peu ou pas du tout d’aliments d’origine animale : légumineuses (protéines), céréales complètes (glucides), noix, fruits et légumes et un peu de produits laitiers en option seraient à la base de ce régime (voir Annexe C pour plus de détails). Celui-ci permettrait de respecter les limites planétaires, définies notamment par les émissions de gaz à effet de serre, l’utilisation d’eau et de terres, la perte de biodiversité, l’application d’azote et de phosphore et la pollution due aux herbicides et pesticides induites par les systèmes agricoles à la base de la production alimentaire.

Impacts des systèmes alimentaires

Cette étude d'EAT-Lancet s'inscrit dans un contexte plus général de redéfinition des systèmes alimentaires. Ceux-ci sont en effet la source de multiples impacts négatifs que nous parcourons ici brièvement, repris d'un rapport d'IPES-Food, le panel international d'experts pour des systèmes alimentaires durables (De Schutter et al., 2019).

Il y a d'abord les impacts environnementaux tout juste mentionnés, qu'on peut par exemple chiffrer avec 970 millions de tonnes de sol, soit ce que perd l'Europe chaque année, 11%, soit le pourcentage du territoire de l'UE touché par une érosion des sols, 3% du PIB mondial, soit ce que coûte chaque année la perte de biodiversité et les services écosystémiques impactés, 30%, soit le pourcentage des émissions de gaz à effet de serre causés par les systèmes agricoles et alimentaires dans le monde, ou encore 22 millions de tonnes, soit la quantité de produits à base de soja importée chaque année par l'UE pour l'alimentation animale, provoquant déboisement et violation des droits humains en Amérique du Sud par exemple (De Schutter et al., 2019).

Il y a ensuite les impacts sanitaires. D'une mauvaise alimentation découle le fait que plus de 50% de la population européenne est en surpoids et plus de 20% obèse. Dans l'Union européenne, l'agriculture est responsable de 90% des émissions d'ammoniac, contribuant à la pollution de l'air et tuant chaque année 400 000 Européens. Les maladies cardiovasculaires sont également la principale cause de mortalité en UE, et 49% d'entre elles sont imputables aux mauvais régimes alimentaires (De Schutter et al., 2019).

Enfin, les impacts socio-économiques du secteur alimentaire sont évidemment immenses. La part de valeur dans la chaîne alimentaire allant à l'agriculture en Union européenne est passée de 31% en 1995 à 21% en 2018, alors que le prix des intrants a augmenté de 40% entre 2000 et 2010. Le nombre d'exploitations agricoles diminue sans cesse (25% en moins entre 2003 et 2013 en UE) tandis que la moyenne d'âge des exploitants ne fait qu'augmenter (De Schutter et al., 2019).

Situation agricole en Wallonie

La situation du secteur agricole dans notre région s'inscrit dans la même vague. Seulement 14% des exploitations wallonnes sont labellisées comme biologiques, soit 11% de la Surface Agricole Utile (SAU) totale (SPW, 2020). Au sein de la SAU wallonne, 55.7% de la surface est dédiée aux fourrages (prairies comprises), 25.3% aux céréales et 9.4% aux cultures industrielles (SPW, 2020). 71% des surface agricoles wallonnes sont ainsi dédiées à l'alimentation humaine d'origine animale (Znaor et al., 2017). On produit en fait en Wallonie beaucoup trop de certaines denrées par rapport à notre consommation (641% en pommes de terre ou 158% en viande bovine par exemple) et trop peu d'autres (seulement 33% des céréales panifiables) (Znaor et al., 2017). Même s'il n'est pas forcément souhaitable de supprimer totalement les importations et exportations de produits

agricoles (cela étant matière à débat et sortant du cadre de cette recherche), il est donc bienvenu d'explorer des systèmes agricoles qui relocaliseraient la production alimentaire.

Objectifs politiques pour l'agriculture

Pour répondre à ces différents enjeux, la Commission européenne a établi des objectifs précis pour les systèmes alimentaires via la stratégie De la Fourche à la Fourchette, dans le cadre de son Pacte Vert dont l'objectif principal est que l'Union européenne ait un bilan carbone neutre d'ici 2050 (European Commission, 2020a). La recherche et la promotion de systèmes agricoles qui diminuent leurs gaz à effet de serre (méthane et oxyde d'azote), stockent du carbone, réduisent l'usage de produits phytosanitaires et la pollution due à l'excès de fertilisants (azote et phosphore principalement) sont au coeur de cette nouvelle politique européenne. La Commission pointe également le besoin de changer les régimes alimentaires, en citant notamment l'étude de Willett et al. (2019).

Le présent travail, en explorant de nouveaux systèmes agricoles qui tentent de répondre à ces objectifs agronomiques, environnementaux et alimentaires, s'inscrit donc directement dans ces objectifs européens ainsi que dans les recommandations particulières tout juste parues de la Commission pour le plan stratégique national de la Belgique pour mettre en œuvre la PAC (European Commission, 2020b). En mettant en évidence les différences d'impacts de différents systèmes agricoles et les potentiels bénéfiques de l'agroécologie, ce travail va même plus loin que ces objectifs politiques européens. Ceux-ci étaient en effet désignés comme insuffisants par nombre de scientifiques car « *ne reconnaissant pas le rôle de l'agroécologie et son potentiel* » ou « *ne reconnaissant pas qu'il y a différents systèmes agricoles et que c'est principalement l'agriculture industrielle qui mène aux impacts négatifs* ». (Alberdi et al., 2020).

Objectifs du présent travail

Quand on énonce ainsi tous les enjeux liés à l'alimentation humaine et aux moyens utilisés pour la produire, ainsi que les objectifs globaux pour y répondre, il est plutôt aisé de se décourager. Le défi est immense, et les solutions pour y faire face doivent être multiples et variées. Amélioration de la productivité, de l'efficience et de la durabilité des systèmes agricoles, réduction du gaspillage alimentaire, changements de régimes alimentaires (Gerten et al., 2020; Sen, 1990), redéfinition politico-sociale de la place des producteurs agricoles dans la société : tous ces points et bien d'autres doivent être abordés en parallèle pour que la transition agroécologique ait lieu.

Ce travail se concentre sur la production alimentaire en Hesbaye. L'objectif est de comparer différents systèmes agricoles pour savoir si, dans la région limoneuse de la Hesbaye, il est possible de produire de l'alimentation qui répond aux enjeux tout juste présentés, notamment à la définition d'un régime sain et durable formulée par EAT-Lancet, et si

oui, quels systèmes agricoles sont les mieux à même de le faire. Ces différents systèmes et les hypothèses plus spécifiques qui sont testées dans le cadre de cette recherche seront présentés au Chapitre 2. Une attention toute particulière est portée sur la stabilité de ces systèmes agricoles face au changement climatique, ce dernier les impactant fortement (voir Section 1.4).

Les informations qui sont tirées de la comparaison de ces systèmes agricoles sont précieuses pour savoir dans quelle direction devrait idéalement se diriger la transition agroécologique ainsi que pour connaître les implications des choix politiques présents et futurs (promotion de l'élevage industriel ou agroécologique, ou alors abolition de l'élevage tout court, promotion des circuits courts ou continuation des longues filières transatlantiques, etc).

1.2 Recherche pratique en agroécologie

L'agroécologie peut désigner à la fois une discipline scientifique, des pratiques agricoles et un mouvement socio-politique. Elle peut également s'intéresser uniquement à l'échelle de la parcelle ou alors aller jusqu'à couvrir l'ensemble du système alimentaire (Wezel et al., 2009). Enfin, quelle que soit l'échelle considérée, l'agroécologie s'intéresse à l'ensemble du système : ainsi, en prenant en compte les spécificités locales de chaque agroécosystème, à l'inverse de l'agriculture conventionnelle qui cherche à gommer celles-ci pour uniformiser les pratiques, la recherche agroécologique revêt un caractère unique, difficilement transposable. Il est néanmoins utile, avant d'aborder les aspects plus spécifiques de ce travail que sont la modélisation et l'impact du changement climatique, de présenter ce qui a déjà été fait comme recherche pratique en agroécologie afin de comparer les conclusions qui en sont tirées ainsi que les méthodologies utilisées.

Ce travail se concentrant sur la production agricole, nous ne nous intéressons ici qu'aux études comparant différents systèmes de production agricole.

Une étude macroéconomique de l'Université Catholique de Louvain a comparé deux scénarios agricoles pour la Wallonie : un scénario 'Business-as-usual' (BAU), continuant dans la tendance actuelle (faible pourcentage agricole dans la population active, faible valeur ajoutée brute, impacts environnementaux importants), et un scénario à faibles intrants (pesticides, engrais minéraux et alimentation animale achetée) (Znaor et al., 2017). Parmi les hypothèses considérées, ce scénario à faibles intrants (AFI) utiliserait d'autres variétés végétales, améliorerait l'efficacité des ressources et n'utiliserait pas de pesticides, d'engrais azotés de synthèse ou d'alimentation animale achetée.

Au niveau de la production, le scénario AFI ne produirait que 70% des Unités de Céréales produites par le scénario BAU, mais les deux scénarios suffiraient amplement à

nourrir la population du territoire wallon. L'étude prédisait également pour le scénario AFI 8% d'emplois créés (contre 0% pour le scénario BAU), une réduction de 44% des pesticides utilisés (via un déploiement de l'agriculture biologique et un maintien des prairies servant à l'élevage extensif), une réduction de 21% des émissions de gaz à effet de serre et de 34% des émissions de polluants atmosphériques acidifiants et finalement un gain de valeur ajoutée brute (Znaor et al., 2017).

Cette étude est donc particulièrement intéressante pour comparer les impacts d'un scénario de transition qui se base sur des hypothèses qui, on le verra, se rapprochent des nôtres (Chapitre 2). Ce présent travail en reste néanmoins complémentaire par le fait qu'il se base sur des systèmes agricoles qui seront réellement testés sur le terrain et par le fait qu'il teste des scénarios plus spécifiques.

Si notre travail se concentre sur la production agricole en Hesbaye, il est néanmoins intéressant de se pencher sur d'autres études comparant différents systèmes agricoles, même ailleurs qu'en Belgique, pour s'inspirer de leur méthodologie.

Par exemple, une méta-analyse de Kulak et al. (2013) reprend toute une série d'Analyses de Cycle de Vie investiguant les effets de la réduction des intrants (via différentes méthodes telles que non-labour, augmentation de la part de légumineuses, intercultures, etc.) sur l'éco-efficacité des systèmes agricoles, définie comme le ratio de la production sur les impacts environnementaux (Kulak et al., 2013). Outre pour ses conclusions agronomiques, la méta-analyse (ainsi que les études desquelles elle est tirée) est intéressante pour sa méthodologie, se basant sur l'Analyse de Cycle de Vie qui "*étudie les impacts environnementaux et ressources utilisées à travers le cycle de vie d'un produit*" (Finnveden et al., 2009), qui peut être un produit agricole.

Muller et al. (2017) étudient quant à eux différents impacts environnementaux et de production d'une conversion totale à l'agriculture biologique, en complétant également ce scénario avec une réduction du gaspillage alimentaire et de la concurrence entre les productions de nourriture humaine et animale. Ils utilisent pour cela un modèle capable de simuler des aspects importants de l'agriculture biologique tels que l'augmentation de la part de légumineuses, l'absence de fertilisants de synthèse, des rendements plus faibles, etc. Ce modèle se base sur des flux massiques (*mass-flow model*) à l'échelle d'un système alimentaire global : chaque culture et élevage se caractérise par un ensemble d'entrées (énergie requise, fertilisation, nourriture animale, etc.) et de sorties (denrées produites, fumier, émissions de gaz à effet de serre, pertes de nutriments, etc.). Ces différents flux d'entrées et de sorties sont estimés à partir de FAOSTAT, une base de données statistiques de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). On étudie alors la balance de tous les flux physiques à l'échelle du système pour analyser les conséquences des différents scénarios envisagés (Muller et al., 2017).

Les études cherchant à qualifier la durabilité des systèmes agricoles sont également très nombreuses. Ceci est devenu crucial tant pour la recherche agronomique que pour la mise en place de politiques publiques (telle que la stratégie De la Fourche à la Fourchette de l'UE évoquée précédemment) et le contrôle de leur application.

Van Cauwenbergh et al. (2007) évoquent différentes méthodes utilisées pour évaluer cette durabilité : outre les Analyses de Cycle de Vie déjà évoquées, des Analyses de Coût-Bénéfice (CBA), des Evaluations de l'Impact Environnemental (EIA) ou des Standards de Durabilité avec Principes, Critères et Indicateurs (PC& I) sont par exemple utilisés (Van Cauwenbergh et al., 2007). Van Cauwenbergh et al. (2007) ont privilégié cette dernière méthode et ont développé le cadre SAFE, acronyme pour *Sustainability Assessment of Farming and the Environment*. Le cadre SAFE est hiérarchique en se composant de principes, critères et indicateurs qui englobent les trois piliers de la durabilité (économique, social et environnemental) et prennent donc en considération de nombreuses fonctions de l'agroécosystème, et non pas seulement sa fonction productive (et donc le seul rendement comme indicateur). Finalement, ce cadre méthodologique est intéressant car il peut s'appliquer à différentes échelles spatiales : tant au niveau de la parcelle qu'à celui de la ferme ou même du paysage (Van Cauwenbergh et al., 2007). Cet outil d'évaluation a été utilisé avec succès, par exemple par Gómez-Limón et Sanchez-Fernandez (2010) ou Darnhofer et al. (2010).

Talukder et al. (2018) présentent quant à eux l'Analyse de Décision Multi-Critères (MCDA), dans laquelle des critères sont définis et des poids associés à chaque critère, avec lesquels l'utilisateur peut accorder une plus grande importance à certains critères (les productivité, stabilité, efficacité et durabilité du système agricole étant par exemple plus importantes que la compatibilité et l'équité dans l'étude de cas investiguée par les auteurs). Ces critères multipliés par les poids correspondants (chaque critère étant évalué par plusieurs indicateurs) sont alors agrégés pour donner des scores globaux de durabilité (Talukder et al., 2018).

Finalement, ces outils méthodologiques d'évaluation de durabilité et de comparaison des systèmes agricoles sont nombreux. Dans ce travail, nous n'en choisirons pas un en particulier mais la méthode de comparaison présentée à la Section 2.4 et utilisée au Chapitre 3 s'en inspire. A la lecture de toutes ces études, il nous paraît surtout très important, plus qu'obtenir des scores finaux associés à chaque système agricole dont on ne sait d'où ils sont tirés, d'expliquer attentivement la méthode et les critères choisis pour que le lecteur du travail sache quelles informations et priorités se cachent derrière chaque critère et indicateur.

1.3 Modélisation de systèmes agricoles

1.3.1 Qu'est-ce qu'un modèle de culture ?

Les modèles sont généralement définis comme une simplification de la réalité (Steduto et al., 2009). En particulier, un modèle de culture fournit une représentation du système sol-plante-climat et de ses processus bio-physiques fondamentaux tels que le développement et la croissance d'une plante ou encore les cycles de l'azote et de l'eau (Kollas et al., 2015).

Les motivations pour simplifier ainsi des processus réels en les traduisant en équations mathématiques sont presque aussi nombreuses qu'il y a de modélisateurs. Ces modèles peuvent par exemple (Whisler et al., 1986; Brisson et al., 1998) :

- aider à l'interprétation de résultats expérimentaux ;
- permettre à des étudiants de comprendre le fonctionnement d'un processus agronomique particulier (flux de l'eau dans le sol, développement de la plante et de la racine, stress en eau et en azote, etc.) ;
- servir d'outil d'aide à la décision pour les agriculteurs (planification d'opérations telles qu'irrigation, fertilisation ou labour, choix des dates de semis et de récolte, etc.) ;
- soutenir la recherche agronomique.

Le dernier cas nous concerne directement. Ainsi les modèles sont particulièrement intéressants pour voir les résultats agronomiques et environnementaux qui peuvent être attendus d'un changement apporté au système agricole, car les tests agronomiques expérimentaux sont très lents et chers à réaliser. Il est également difficile de déduire, à partir de résultats expérimentaux, des conclusions quant à l'impact de changements apportés aux systèmes agricoles, car ceux-ci sont spécifiques (dépendant de la pédologie, du climat, de l'historique des parcelles, des traitements réalisés, des dates d'interventions, etc.) et il est donc particulièrement ardu d'isoler une seule variable. C'est en cela que les modèles peuvent s'avérer utiles : à artificialiser les conditions et à rendre possible la réalisation de centaines de tests en un temps extrêmement court, grâce à la puissance de calcul des processeurs informatiques.

Néanmoins, les modèles de culture présentent des limites car ils restent des *modèles*. Le modélisateur doit donc faire preuve d'une double connaissance : *savoir en agronomie*, pour repérer quand est-ce que le modèle sort des limites bio-physiques, en particulier dans sa paramétrisation, et *savoir en modélisation*, pour détecter dans quels cas est-ce que des résultats sont dus à la forme du modèle (équations mathématiques utilisées, type de représentation des processus agronomiques, etc.) plutôt qu'aux conditions choisies (itinéraires techniques, données pédoclimatiques, etc.). Il est donc bienvenu, le plus souvent possible, de valider ces modèles de culture avec des mesures de terrain.

1.3.2 Les rotations dans les modèles de culture

Les systèmes agricoles étudiés dans le cadre de ce travail (voir Chapitre 2) comportent tous des rotations culturales. Celles-ci, définies comme la pratique de cultiver une séquence d'espèces végétales différentes sur la même parcelle (Dury et al., 2012) et incluant souvent des intercultures, sont extrêmement courantes dans les fermes européennes pour de nombreuses raisons environnementales et économiques. On citera parmi les principales (Kollas et al., 2015) :

- les résidus minéraux laissés par une culture et bénéficiant à la suivante ;
- la minimisation des risques phytosanitaires grâce aux abilités différentes des espèces végétales cultivées à repousser ravageurs et maladies et interrompant donc le cycle de vie de ces agents pathogènes ;
- le contrôle des adventices ;
- l'utilisation de cultures intermédiaires pour l'apport de nutriments, en particulier le captage d'azote enfoui plus profondément dans le sol (et donc la diminution voire suppression de la fertilisation minérale) et la lutte contre l'érosion et la percolation des nutriments dans le sol.

Néanmoins, la plupart des études qui simulent l'impact climatique sur les cultures à partir de modèles se concentrent sur des simulations annuelles et monoculturelles, ignorant la profonde influence qu'a la position d'une culture au sein de la rotation pratiquée par l'agriculteur (Kollas et al., 2015).

Heureusement, des modèles de culture permettant la pratique de simulations pluri-annuelles et polyculturelles existent dorénavant. De tels modèles sont par exemple utilisés en outils d'aide à la décision pour les agriculteurs, afin de notamment les aider dans leur choix des cultures pratiquées, de la distribution spatiale de celles-ci et de leur succession temporelle (Dury et al., 2012). Kollas et al. (2015) ont également montré que de telles simulations sont plus précises que des simulations annuelles et monoculturelles pour prédire le rendement cultural et l'impact de traitements tels qu'irrigation, fertilisation, concentration de CO_2 , etc. (particulièrement pertinents dans notre cas pour prédire l'impact du changement climatique). Leur étude concluait aussi que la simulation des cultures intermédiaires était moins précise que celle des cultures principales et que les simulations multi-modèles (combinant plusieurs modèles à la fois) étaient un peu plus précises que celles obtenues à l'aide d'un modèle unique (Kollas et al., 2015).

Nous verrons dans la Section 2.3 du Chapitre 2 que le modèle STICS, utilisé dans le cadre de ce travail, est capable de simuler rotations et intercultures.

1.3.3 L'élevage dans les modèles de culture

Comme nous le verrons dans la Section 2.1 du Chapitre 2, un seul des systèmes agricoles comporte de l'élevage fonctionnellement intégré au système de culture, c'est-à-dire

avec des animaux qui font partie intégrante de l'agroécosystème et qui sont par exemple utilisés pour gérer ravageurs et adventices via le pâturage d'intercultures et de prairies temporaires.

Il est donc nécessaire, pour modéliser un tel système agricole, d'intégrer d'une manière ou d'une autre l'élevage dans le modèle de culture utilisé. Malheureusement, si les modèles intégrant séparément les cultures et l'élevage sont légion, la nature et la complexité des interactions entre les cultures et les animaux font que les modèles intégrant les deux sont encore assez rares. Thornton et Herrero (2001), à partir de ce constat, établissaient une liste des caractéristiques que devraient rencontrer un tel modèle : on y retrouve notamment le besoin de décrire et quantifier les interactions entre toutes les composantes, végétales et animales, quantifier les cycles des nutriments à l'échelle de toute la ferme ou encore la variabilité des performances du système due aux conditions climatiques changeantes, etc. (Thornton and Herrero, 2001). Ils concluaient finalement en qualifiant comme considérable le besoin de tels modèles.

Enfin, il est intéressant d'évoquer les modèles agricoles bio-économiques (*bio-economic farm models* (BEFMs) en anglais). Il s'agit de modèles qui lient les décisions de gestion des agriculteurs à des possibilités de production présentes et futures, de telles possibilités étant décrites en termes d'intrants nécessaires et des potentielles performances agronomiques et environnementales (Janssen and Van Ittersum, 2007). Ces modèles sont mécanistiques, c'est-à-dire que des processus agronomiques sont inclus dans leur architecture. L'utilisateur d'un tel modèle vise à maximiser une fonction objectif. Une telle fonction peut par exemple donner priorité au revenu de l'exploitation, aux externalités environnementales (qui seront donc définies dans la fonction objectif de manière à ce qu'elles doivent être elles minimisées), à la production, etc. Les utilisateurs de ces modèles peuvent donc par exemple être des agriculteurs cherchant à optimiser leurs pratiques ou à s'adapter à de nouvelles conditions pédoclimatiques, ou des décideurs cherchant à tester l'impact de changements dans les politiques agricoles (Janssen and Van Ittersum, 2007).

Mosnier et al. (2017) ont par exemple développé le modèle agricole bio-économique Orfee, qui a pour but de simuler et optimiser la production animale (viande et produits laitiers) en interaction avec la production de cultures et fourrage, ainsi que les revenus économiques et les impacts environnementaux qui vont avec (Mosnier et al., 2017). Ces modèles agricoles bio-économiques sont néanmoins limités dans leur modularité, leur variété de systèmes et espèces considérés et dans la précision des processus agronomiques modélisés (Janssen and Van Ittersum, 2007; Mosnier et al., 2017).

Dans le cadre de ce travail, deux des trois systèmes agricoles étudiés ne comportent pas d'élevage intégré fonctionnellement sur le champ. Il est donc préférable pour ces systèmes-là d'utiliser un modèle plus spécifique aux cultures, allant plus loin dans les processus agronomiques décrits et permettant de meilleures interprétations des résultats. Il serait

également compliqué d'utiliser un autre modèle pour le troisième système agricole étudié qui lui intègre fonctionnellement de l'élevage, car la comparaison des différents résultats devrait alors prendre en compte le biais introduit par l'utilisation de modèles différents. Nous verrons donc dans le Chapitre 2 comment est-ce qu'il est possible d'utiliser un artifice de modélisation pour intégrer l'élevage dans le modèle de culture STICS.

1.4 L'impact du changement climatique sur les systèmes agricoles

Il est dorénavant très rare qu'un jour ne passe sans que l'on entende parler du changement climatique autour de nous. Celui-ci a déjà un impact sur quasiment tous les aspects de notre vie, que ce soit dans nos choix de consommation (nourriture, moyens de transport, habitat, etc.), dans les prises de décisions politiques ou simplement dans la météo de tous les jours. Le sujet est absolument sans fin, mais ce travail se concentrant sur l'évolution de la capacité de production alimentaire en Hesbaye, il nous suffit de retenir les quelques points suivants, tous basés sur le territoire belge et tirés d'une étude de juillet 2020 demandée par la Commission nationale pour le climat (De Ridder et al., 2020), pour savoir que le problème est très sérieux :

- aujourd'hui, la température moyenne à Uccle a déjà augmenté de 2°C par rapport à la période 1850-1899, et selon le scénario RCP8.5 du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat)¹, elle augmenterait encore d'ici la fin du siècle de 3°C en hiver et 3.6°C en été ;
- les températures estivales maximales augmenteraient encore plus que la température moyenne : +4.1°C pour la température journalière la plus élevée durant une année d'ici à la fin du siècle par rapport à la période 1976-2005 ;
- le nombre de vagues de chaleur exploserait également : 27 pour la période 2041-2074 contre 1 pour la période 1981-2014 ;
- les précipitations augmenteraient globalement légèrement mais avec une nette différence saisonnière : +18% en hiver et -10% en été à la fin du siècle par rapport à aujourd'hui. Le nombre de très grosses pluies augmenterait également ;
- les sécheresses deviendraient de plus en plus fréquentes. Le nombre de jours d'été humides diminuerait de 16% à la fin du siècle par rapport à aujourd'hui. L'augmentation de l'évaporation potentielle (+ 261 mm/an d'ici à la fin du siècle), les précipitations rares mais intenses, l'augmentation des températures contribueraient toutes à la diminution des réserves d'eau disponibles.

Tous ces chiffres, qui pourront toujours être discutés quant à leur valeur exacte mais dont il devient malhonnête de contredire la tendance générale, nous montrent que le chan-

1. Plus de détails sur les scénarios climatiques du GIEC et en particulier sur les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 seront fournis à la Section 2.3.3.

gement climatique est une réalité avec laquelle il faudra apprendre à composer. L'agriculture est bien sûr au coeur de ces préoccupations : elle occupe une part non négligeable dans la responsabilité du changement climatique (30% des émissions globales de gaz à effet de serre dues à l'humain² et 70% de l'utilisation d'eau fraîche selon une étude d'EAT-Lancet (Willett et al., 2019)) mais elle en est également très impactée : assèchement des sols, disparition des pollinisateurs, augmentation des températures et de la fréquence des événements extrêmes, épuisement des ressources énergétiques et minières... Tout ceci affecte directement la production agricole. C'est à cet impact que s'intéresse la présente section.

1.4.1 Impact général

Selon l'étude de de Ridder et al. (2020), les sécheresses et vagues de chaleur de 2018 ont provoqué dans la Région flamande une diminution du volume de production de 31% pour les pommes de terre, 13% pour les betteraves sucrières et 10% pour les céréales (De Ridder et al., 2020). Cela a provoqué des demandes d'indemnités auprès du Fonds flamand des calamités naturelles de 150 millions d'euros.

Par contre, à l'avenir, en suivant le scénario RCP8.5 du GIEC, la productivité moyenne des cultures en Belgique pourrait augmenter de 10 à 20% en 2050 par rapport à la période 1981-2010 (De Ridder et al., 2020). Mais cette augmentation moyenne pourrait s'accompagner de bien plus gros écarts selon les années : le rendement pourrait diminuer jusqu'à 35% certaines années au climat défavorable, en particulier pour la pomme de terre et le maïs. Le secteur de l'élevage serait également impacté, avec une perte de production de 2 à 5% pour la volaille, le bétail et les porcs (De Ridder et al., 2020).

L'étude conclut que, d'ici 2050, selon le scénario RCP8.5, la production agricole totale (regroupant cultures et élevage) pourrait, selon les facteurs pris en compte et par rapport à 2019, évoluer via :

- Une augmentation de 45 M€/an, surtout due à l'effet fertilisant³ du CO₂

2. Ce chiffre de la part de l'agriculture dans les émissions totales de gaz à effet de serre est souvent discuté, non pas à cause de calculs erronés mais parce qu'il faut s'accorder sur ce qui rentre en compte dans *l'agriculture*. Si on tient compte uniquement des émissions de gaz à effet de serre (GES) liées au travail sur les champs, l'agriculture serait responsable de 14% des émissions de GES humaines. Si on y rajoute les changements d'affectation du sol dus à l'agriculture (en ce compris la déforestation causée par l'extension des pâturages et cultures), l'agriculture serait responsable de 33% des émissions de GES humaines (De Schutter, 2010a). Le rapport spécial du GIEC sur le changement climatique et les terres émergées cite lui le chiffre de 23% des émissions humaines de GES (13% du CO₂, 44% du méthane (CH₄) et 82% du dioxyde d'azote (N₂O)) (IPCC, 2019).

3. Des concentrations atmosphériques élevées de CO₂ augmentent la photosynthèse et l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante et stimulent donc la croissance (Kirschbaum, 2011). Plus de détails à la Section 3.2.

- Une diminution de 606 M€/an, en tenant compte de la perte de sol (salinisation, érosion, inondations) et des réductions de certains prix internationaux dues au changement climatique.

1.4.2 Impact sur le rendement

En 2007, William Cline estimait qu'à l'échelle mondiale, la capacité de production agricole chutera de 10 à 25% d'ici 2080, les pertes les plus importantes ayant lieu en Afrique et en Amérique latine (De Schutter, 2010b). La Figure 1.1 situe ces impacts sur la carte mondiale (Cline, 2007).

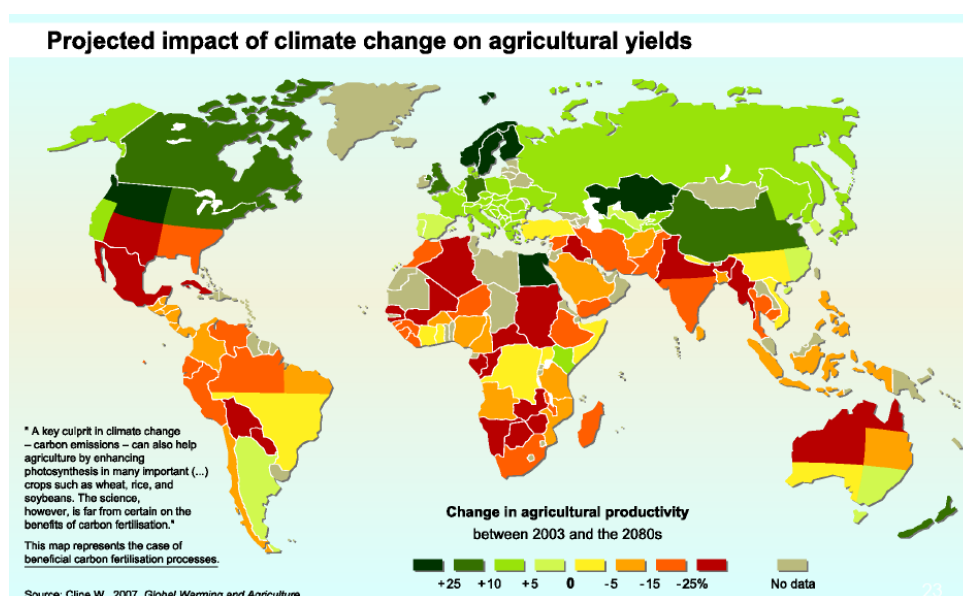


Figure 1.1 – Impact du changement climatique sur les rendements agricoles. Figure tirée de Cline (2007).

Le rapport du GIEC de 2019 sur le changement climatique et les terres émergées (IPCC, 2019) prédit que le changement climatique menacera fortement la sécurité alimentaire. En particulier, pour la disponibilité en nourriture, il prédit une diminution des rendements de cultures (et de systèmes d'élevage) et de leur qualité, à cause des effets du changement climatique déjà cités auparavant mais également à cause du manque de pollinisateurs et de la multiplication des maladies et ravageurs (cette disponibilité en nourriture étant également menacée par de potentielles perturbations dans les réseaux de stockage et transports provoquées par le changement climatique, mais cela sort du sujet principal de ce travail). Le rapport de la FAO de 2018 sur l'état de la sécurité alimentaire dans le monde indique les mêmes tendances (World Health Organization et al., 2018).

La Figure 1.2 du rapport du GIEC de 2014 résume les changements prédits sur les rendements dus au changement climatique (IPCC, 2014). On peut s'apercevoir que pour la période 2010-2029, il y a environ autant d'augmentations que de diminutions de rendements qui sont prédites, d'à peu près la même intensité. Par contre, pour la période 2090-2109, il y a beaucoup plus de diminutions de rendements que d'augmentations, les changements de grande intensité (+25% ou -25%) ayant également augmenté en proportion.

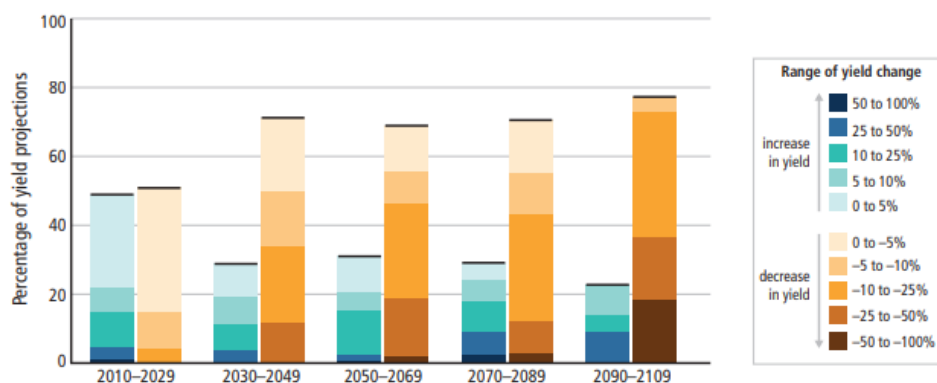


Figure 1.2 – Résumé des changements prédits sur les rendements dus au changement climatique (principalement par rapport au blé, maïs, riz et soja). Pour chaque période de temps, la somme des données fait 100%, ce qui montre quel pourcentage des changements attendus occupe chaque augmentation/diminution des rendements. Figure tirée de IPCC (2014).

Toujours à l'échelle mondiale, Iizumi et al. (2018) concluent que le changement climatique a provoqué une chute des rendements globaux de maïs, blé et soja de respectivement 4.1%, 1.8% et 4.5% durant la période 1981-2010, en comparant cette période avec un climat pré-industriel (Iizumi et al., 2018). La méta-analyse de Zhao et al. (2017) prédit elle que, sans considérer l'effet fertilisant du CO₂ et d'éventuelle amélioration génétique, chaque degré-celsius de plus dans la température moyenne globale réduirait les rendements moyens de blé de 6%, de riz de 3.2%, de maïs de 7.4% et de soja de 3.1% (Zhao et al., 2017).

En Europe, le rapport du GIEC cite une diminution moyenne du rendement du blé et de l'orge de respectivement 2.5% et 3.8% depuis 1989, due aux tendances à long terme des températures et précipitations. Mais ces mêmes tendances auraient provoqué une légère augmentation des rendements de maïs et de betterave sucrière (IPCC, 2019).

Finalement, Kang et al. (2009) indiquent que le rendement des cultures peut être augmenté si une bonne irrigation et une augmentation des précipitations ont lieu lors de la croissance des plantes, en insistant sur le fait qu'un sol avec une bonne capacité de

rétenction sera primordial pour faire face aux futures sécheresses, en accord par exemple avec Iglesias et al. (2012) qui disent que les rendements des cultures et de l'élevage pourraient augmenter dans la région européenne nord-continentale, grâce à l'augmentation de la panoplie de cultures possibles et l'allongement de la saison de croissance (Iglesias et al., 2012). L'augmentation de la teneur en CO_2 et une augmentation des périodes de croissance dans les hautes latitudes et en montagne seraient également positives pour le rendement, tandis qu'une augmentation des ravageurs et maladies et la dégradation du sol due à l'augmentation de température seraient elles négatives (Kang et al., 2009).

1.4.3 Autres impacts

Nous avons vu que le dérèglement du climat va influencer les températures et les précipitations, et par conséquent l'évaporation du sol et la transpiration des plantes. Kang et al. (2009) préviennent ainsi qu'il faudra être particulièrement attentifs à la balance hydrique dans le sol, c'est-à-dire au stockage d'eau souterraine, au niveau d'humidité et donc aux besoins en irrigation (Kang et al., 2009). Ils citent par exemple une étude qui prédit une augmentation des besoins en irrigation pour la culture du riz au Sri Lanka de 13 à 23%, essentiellement due à une diminution des précipitations moyennes et à une augmentation de l'évaporation (De Silva et al., 2007).

Gray et Brady (2016) s'intéressent eux à l'échelle de la plante et étudient les effets du CO_2 , de la température et des sécheresses (Gray and Brady, 2016). Les effets de l'augmentation de la teneur en CO_2 sont repris sur la Figure 1.3 qui représente un plant de soja. Une augmentation de la température donnerait lieu entre autres à une diminution de la masse de la racine et de son nombre de nodules et à une diminution du rendement en grains, tandis qu'une augmentation de la fréquence de sécheresses diminuerait le taux d'émergence des feuilles, le nombre de nodules racinaires et leur activité ou le rendement et la taille des grains (Gray and Brady, 2016).

Seguin (2010) pointe une différence intéressante entre les plantes selon leur voie de photosynthèse qui permet de fixer le CO_2 de l'atmosphère, soit en C_3 ou en C_4 . Celles-ci réagiront différemment à une augmentation de la concentration en CO_2 . Si cette concentration double d'ici à la fin du siècle, la photosynthèse brute augmenterait de 30% pour les plantes en C_3 et de 15% pour celles en C_4 (Seguin, 2010).

1.4.4 Hétérogénéité des résultats

Pour finir cette section, il est important de constater que ces prédictions se basent toutes sur certains scénarios climatiques, pour certaines cultures dans certaines régions du monde, en considérant certains paramètres (températures, précipitations, effet fertilisant du CO_2 , événements extrêmes, etc.). Tous ces paramètres rendent ces études éminemment singulières, et donc extrêmement difficiles à comparer.

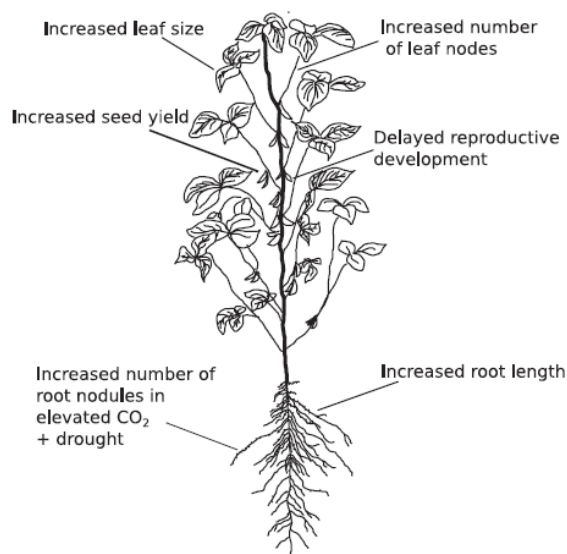


Figure 1.3 – Effets d’une augmentation de la concentration en CO₂ sur la croissance et le développement d’un plant de soja. Figure tirée de Gray et Brady (2016).

Par exemple, contrairement aux résultats précédemment évoqués, Seguin (2010) prédit lui des augmentations de rendement en France de 2.5 à 5.7% pour le blé et le maïs, "*en bon accord avec les études comparables d’autres pays pour les conséquences sur les céréales en milieu tempéré*" (Seguin, 2010). Egalement, la culture du maïs, de par son importance, est très étudiée. Une étude indique qu’une date de semis plus tardive résulterait au Brésil en une perte de rendement de 55% en moyenne dans des conditions pluvieuses et de 21% en moyenne en cas de bonne irrigation (Kang et al., 2009). Une seconde étude prédit une perte de productivité de 60% en Bulgarie, tandis qu’une troisième indique que l’augmentation de température et de précipitations en Afrique du Sud serait bénéfique pour la culture du maïs, les précipitations constituant un facteur plus important que la température (Kang et al., 2009).

On peut donc conclure qu’il sera délicat de comparer les résultats de ce travail avec d’autres déjà réalisés, et que cela devra être fait avec d’infimes précautions. Néanmoins, la modélisation revêt donc un intérêt particulier pour pallier partiellement à ce problème du fait qu’elle permet d’isoler certaines variables et qu’il est possible de connaître précisément les hypothèses et conditions (climatiques, pédologiques, techniques, etc.) sous-jacentes aux résultats.

Chapitre 2

Matériel et méthodes

Ce deuxième chapitre a pour but de poser les bases scientifiques et méthodologiques nécessaires à la compréhension de la recherche effectuée dans le chapitre suivant.

Comme cela a été présenté dans l'introduction, cette recherche vise à comparer différents systèmes agricoles à l'aide de la modélisation. La première étape du travail a donc été de définir les itinéraires techniques de chacun des systèmes et la deuxième a ensuite consisté à les modéliser à l'aide du modèle de culture STICS (Brisson et al., 2003). La troisième et principale étape a finalement été de comparer ces systèmes agricoles à travers les sorties agronomiques et environnementales du modèle, et également à travers différents indicateurs alimentaires tirés à partir de celles-ci. Cette méthodologie est rappelée dans la Figure 2.1, déjà plus longuement présentée dans l'introduction de ce travail.

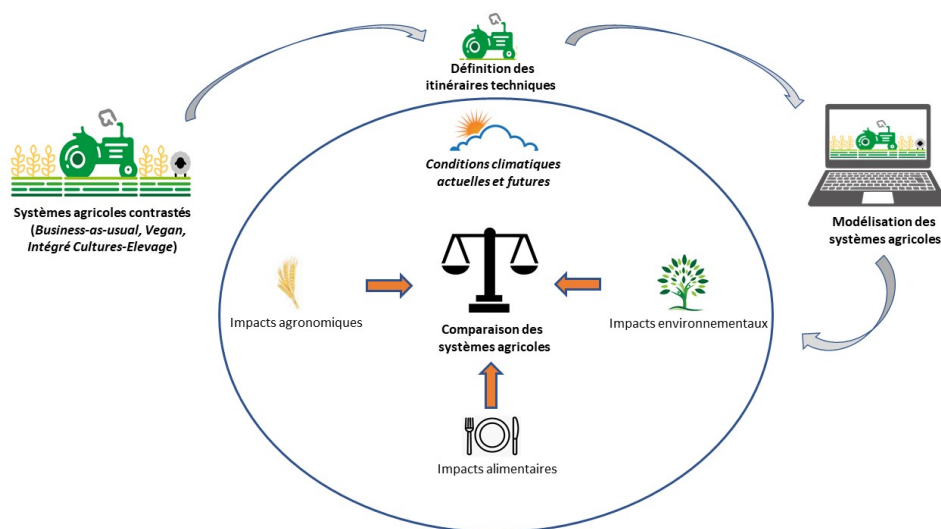


Figure 2.1 – Résumé des différentes étapes du travail de recherche

La première section de ce chapitre détaille brièvement les quatre systèmes agricoles étudiés dans le cadre du projet EcoFoodSystem, tandis que la deuxième présente le site expérimental. La troisième section introduit le fonctionnement du modèle de culture STICS. Les principaux processus agronomiques simulés sont présentés pour que le lecteur sache par la suite quels sont les concepts agronomiques à la base du modèle et donc quels niveaux d'interprétation ce dernier permet. Cette section présente également les variables d'entrée et de sortie utilisées. La dernière section détaille la méthodologie utilisée pour étudier et comparer les systèmes agricoles.

2.1 Systèmes agricoles étudiés

Dans le cadre du projet EcoFoodSystem développé par l'Université de Liège, trois systèmes agricoles contrastés sont testés sur la période 2020-2027.

Les trois systèmes étudiés sont présentés dans les sections suivantes. Les itinéraires techniques (modalités de semis, de récolte, de travail du sol et de fertilisation) sont présents dans l'Annexe A. Il n'est pas assuré que ces itinéraires techniques soient exactement ceux qui seront suivis lors de l'expérience de terrain d'EcoFoodSystem, mais ceux-ci ont été élaborés soigneusement avec le Prof. Dumont et d'autres membres de son laboratoire ainsi qu'avec l'aide de la littérature spécialisée afin d'optimiser chaque rotation, en suivant les bonnes pratiques agricoles (travail du sol réduit mais avec labours lorsque c'est nécessaire, maximisation de la couverture du sol, etc.). Comme expliqué auparavant, ces systèmes ont pour objectif de produire un régime sain et durable. Ils ne se concentrent néanmoins uniquement que sur les grandes cultures, et les autres denrées telles que fruits, légumes et noix composant le régime devraient être fournies auprès de maraîchers locaux.

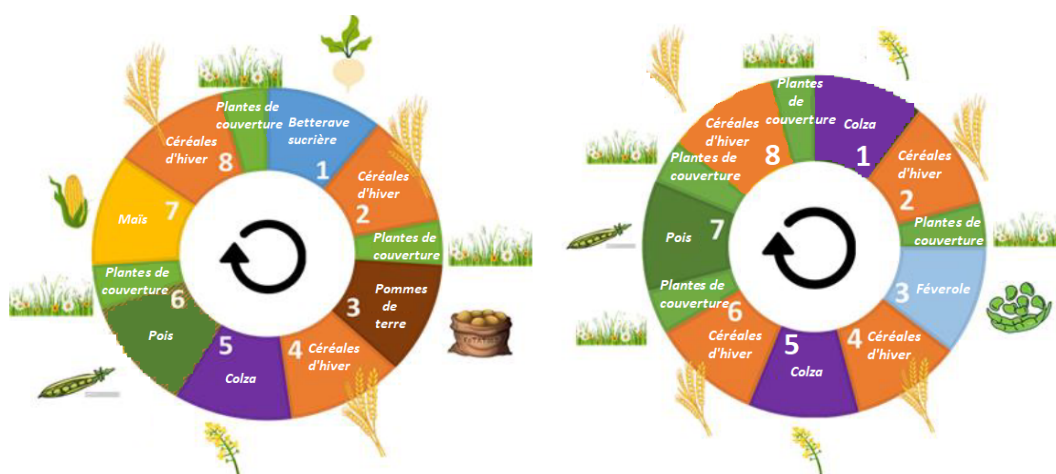
2.1.1 Système 'Business-as-usual'

Le système agricole 'Business-as-usual' (BAU) suit la tendance agricole actuelle, avec des importations et exportations de produits et l'incorporation d'animaux à travers le flux de coproduits de cultures et de fumier.

Les différentes cultures de la rotation du système BAU sont reprises dans la Figure 2.2a. On y retrouve les cultures majoritaires en région limoneuse wallonne : en termes de superficie, les céréales pour le grain (comprenant par exemple le froment d'hiver, l'orge d'hiver ou le maïs à grain) occupent 36% de la SAU en région limoneuse, les betteraves sucrières 10%, les pommes de terre 11% et le maïs fourrager 8% (Statbel, 2019) .

2.1.2 Système 'Vegan'

Le système agricole 'Vegan' simule l'agriculture au sein d'une société où l'élevage serait entièrement banni. Ce système suit donc les hypothèses diététiques végétariennes du



(a) Système 'Business as usual' (BAU)

(b) Système 'Vegan'

Figure 2.2 – Rotations des systèmes 'Business as usual' (BAU) et 'Vegan'

EAT-Lancet, selon lesquelles les protéines animales sont remplacées par un mélange entre protéines végétales et fruits et légumes (les produits laitiers et les oeufs sont donc également bannis) (Willett et al., 2019). Dans ce système, tous les produits agricoles sont produits au sein du territoire où ils sont consommés. Les différentes cultures de la rotation du système Vegan sont reprises dans la Figure 2.2b.

2.1.3 Système intégré cultures-élevage

Le système intégré cultures-élevage (ICLS) suit également l'hypothèse du EAT-Lancet selon laquelle les produits agricoles sont produits au sein du territoire où ils sont consommés. La particularité de ce système-ci est que les animaux y sont réellement présents : ils sont donc non seulement utiles pour les flux de coproduits de cultures et de fumier (comme dans le système BAU) mais ils sont également utilisés pour gérer les adventices et ravageurs à travers le pâturage de prairies temporaires et d'intercultures. Les différentes cultures de la rotation du système ICLS sont reprises dans la Figure 2.3.

2.1.4 Intérêts de chaque système agricole étudié

Les trois systèmes agricoles étudiés comprennent donc des similitudes mais également des différences fondamentales. Pour tous les systèmes, le labour et l'emploi de fertilisants minéraux restent autorisés. Par contre, aucun système n'utilise de pesticides à l'exception d'une variante du système BAU pour laquelle les herbicides sont autorisés. Néanmoins, dans le cadre de ce travail, nous ne nous intéressons pas aux pesticides et herbicides, le modèle STICS ne simulant pas leur emploi. Tous les systèmes ont également en commun d'utiliser les pratiques agroécologiques les plus innovantes, entre autres la maximisation des intercultures (stockant du carbone et augmentant la production de biomasse et donc,

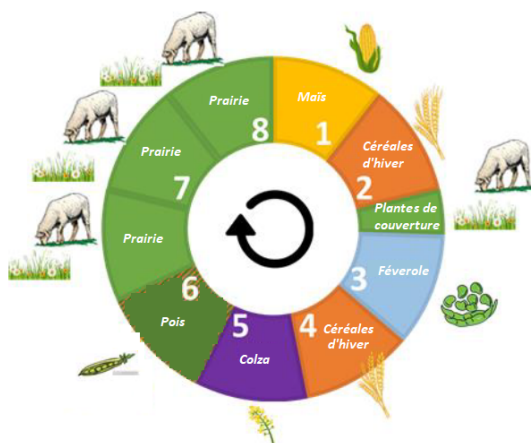


Figure 2.3 – Rotation du système intégré cultures-élevage (ICLS)

si incorporée dans le sol, le taux de matière organique (Tribouillois et al., 2018)), l'implantation d'un réseau écologique autour des parcelles d'essai, l'alternance des familles botaniques et l'utilisation de variétés résistantes ou tolérantes.

Les systèmes Vegan et ICLS ont également comme objectif commun de relocaliser l'agriculture : leurs cultures ont donc été choisies afin d'aider à constituer des régimes répondant aux critères définis par la commission EAT-Lancet (Willett et al., 2019). Les rotations de chacun des trois systèmes agricoles étudiés ont été déterminées par les chercheurs du projet EcoFoodSystem qui ont conçu et appliqué pour cela un outil d'optimisation innovant (De Clerck et al., 2021). Cet outil permet de comparer de nombreuses rotations prometteuses, dont les productions sont estimées via les niveaux de production moyens extraits des statistiques officielles. L'optimisation consiste alors à atteindre un montant minimal d'apport énergétique (exprimé en kilocalories) pour satisfaire les besoins humains, tout en minimisant les excès et déficits dans les différentes commodités de nourriture et de fourrage. Ce processus appliqué aux systèmes agricoles étudiés dans le cadre d'EcoFoodSystem a permis de conclure qu'il fallait des rotations longues et diversifiées, contenant par exemple une culture de colza pour la production d'huile pour les humains et de rations oléagineuses pour les animaux, une culture de légumineuses et plusieurs céréales (De Clerck et al., 2021).

La plus grosse différence entre les systèmes étudiés réside dans leur intégration plus ou moins forte des animaux au sein du système de cultures : le système Vegan bannit complètement l'élevage, le système BAU utilise les flux de produits et co-produits d'origine animale mais sans incorporer physiquement les animaux au sein de l'agroécosystème, et le système ICLS utilise également ces flux mais en y intégrant physiquement les animaux et donc en bénéficiant des avantages associés.

En effet, les systèmes ICLS sont de plus en plus plébiscités pour réussir à maintenir une haute production alimentaire tout en diminuant les impacts de l'agriculture sur l'environnement. Avant 1950, ils constituaient la norme en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord, mais suite à la révolution verte des années 1960, ils ont souvent laissé place à des systèmes agricoles spécialisés, basés sur les économies d'échelle (Mazoyer and Roudart, 2002). Pourtant, ces systèmes ICLS, en reposant sur les complémentarités entre cultures et élevage, ont de nombreux avantages : les animaux mangent et convertissent produits, co-produits et résidus de culture non comestibles par l'humain et contribuent ainsi au maintien de la fertilité (Lemaire et al., 2016; de Albuquerque Nunes et al., 2021; Bonaudo et al., 2014; Peterson et al., 2020). Ils aident également au contrôle des maladies et ravageurs (Lemaire et al., 2016; de Albuquerque Nunes et al., 2021; Bonaudo et al., 2014). Les prairies, plus nombreuses au sein de ces systèmes, permettent également d'accumuler de la matière organique et de séquestrer du carbone de l'atmosphère et aident à réduire le ruissellement et la perte de sol en augmentant la capacité d'infiltration de l'eau. Finalement, parmi les avantages socio-économiques des systèmes ICLS, certaines études pointent également une meilleure productivité, une diversification des revenus et une moindre dépendance aux intrants externes (de Albuquerque Nunes et al., 2021; Bonaudo et al., 2014; Bell et al., 2014).

Le système Vegan, par contre, a pour but d'essayer de répondre à certaines attentes véganistes : suppression de la consommation de produits d'origine animale, suppression des émissions de gaz à effet de serre liées à l'élevage et suppression de toute souffrance animale (en supprimant tout court les animaux).

Finalement, le système BAU sert quant à lui de système agricole témoin de l'agriculture majoritaire actuelle basée sur la spécialisation évoquée auparavant.

2.2 Site expérimental

Bien que ce travail soit finalement déconnecté de l'expérience de terrain d'EcoFoodSystem, puisqu'aucune donnée mesurée n'en provient directement, nous en présentons brièvement ici le site expérimental, notamment car les données pédoclimatiques utilisées dans le cadre de ce travail sont liées à ce site expérimental, même si elles ont été mesurées avant la mise en place du projet EcoFoodSystem.

Le site d'implantation des parcelles d'essai du projet EcoFoodSystem se trouve au nord-est de Gembloux (50.7°N 4.7°E), dans la région limoneuse belge de la Hesbaye. Le site appartient à Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège). Des cartes montrant la localisation du site ont été générées avec le logiciel QGISv3.12 et sont disponibles en Annexe C.

Le sol est un luvisol limoneux contenant 70-80% de limon, 18-22% d'argile et 5-10% de sable (Hiel et al., 2018; WalOnMap, 2021). Le climat est tempéré avec des précipitations moyennes annuelles de 819mm et une température moyenne de 9.8°C (Hiel et al., 2018).

Plus de précisions sur les données pédoclimatiques utilisées en entrées du modèle STICS sont apportées à la Section 2.3.3.

2.3 Le modèle STICS

Nous utilisons dans le cadre de ce travail le modèle STICS, acronyme pour *Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard*. Celui-ci a été créé en 1996 par l'INRAE (Institut national (français) de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) en collaboration avec d'autres instituts de recherche ou professionnels, et est toujours en constant développement (Brisson et al., 2003).

2.3.1 Fonctionnement général

STICS est un modèle dynamique déterministe non spatialisé à pas de temps journalier qui simule le système sol-plante sur un ou plusieurs cycle culturaux, avec la capacité de prendre en compte des rotations, des intercultures, des itinéraires techniques détaillés (travail du sol, irrigation, fertilisation, mulching, etc.), la circulation de l'eau dans les macropores du sol, etc. La limite supérieure de ce système est l'atmosphère, caractérisée par des variables climatiques standards (radiation, précipitations, températures, évapotranspiration, etc.), et la limite inférieure est l'interface sol/sous-sol (Brisson et al., 2003).

Le modèle STICS est organisé par modules, chacun étant lui-même composé de sous-modules qui s'occupent de mécanismes bien spécifiques. Les différents modules sont représentés dans la Figure 2.4.

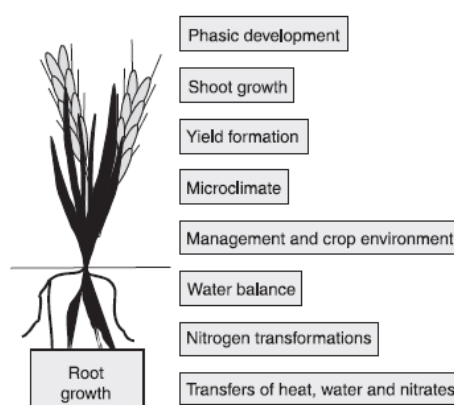


Figure 2.4 – Modules du modèle STICS. Figure tirée de Brisson et al. (2009).

Les variables d'entrée du modèle sont relatives au climat, au sol, aux espèces et variétés cultivées (paramètres génétiques) et à la gestion du système de culture (paramètres du semis ou de la plantation, fertilisation, travail du sol, récolte, etc.). Les variables de sortie sont d'ordre agronomique (rendement, couverture végétale, etc.) et environnemental (cycles de l'azote et du carbone, stock d'eau dans le sol, etc.).

Dans cette section, nous décrivons brièvement le fonctionnement général du modèle STICS en parcourant les principaux processus simulés. Le but ici n'est pas de fournir un rapport exhaustif contenant toutes les équations utilisées par STICS, ceci étant bien trop long à détailler, mais bien de dresser un aperçu des grands principes sur lesquels se base le modèle, avec une attention particulière pour les variables étudiées dans le Chapitre 3. Cette section est donc directement inspirée des travaux de Brisson et al. (Brisson et al., 1998; Brisson et al., 2003; Brisson et al., 2009) auxquels le lecteur intéressé pourra se référer. L'Annexe B fournit néanmoins déjà des détails supplémentaires quant à certaines équations importantes impliquant des variables dont l'évolution est directement étudiée dans le cadre de ce travail. Le principe de fonctionnement du modèle STICS est résumé dans la Figure 2.5. Cette section se clôture par la présentation des variables d'entrée et de sortie utilisées.

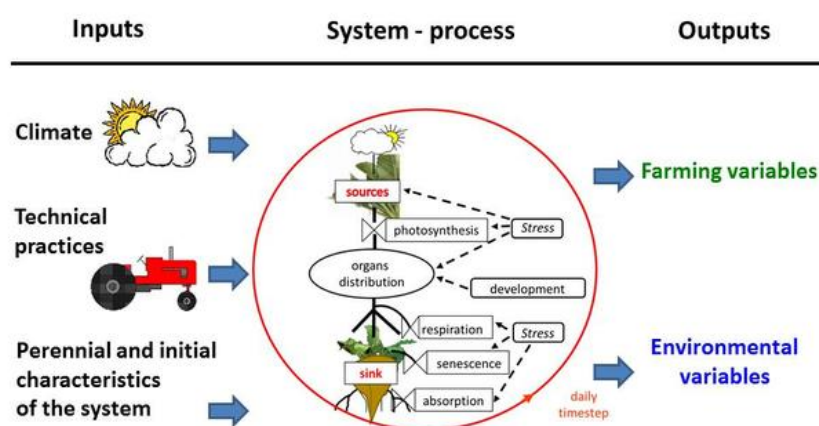


Figure 2.5 – Principe de fonctionnement du modèle STICS. Figure tirée de <https://www6.paca.inrae.fr>.

2.3.2 Processus simulés

Phénologie

Différents stades phénologiques sont définis pour caractériser les croissances végétative et reproductive. Ces deux sortes de croissances sont indépendantes, c'est-à-dire que la plante évolue dans les stades en phase végétative indépendamment des stades en phase reproductive, et inversement.

L'unité utilisée pour déterminer à quels stades se trouve la plante s'appelle *l'Unité de Développement (UPVT)*, reproduisant le temps phénologique de la plante avec une somme de degrés-jours potentiellement corrigée par des facteurs limitants de photopériode et de vernalisation.

Les différents stades sont repris dans le Tableau C.1 de l'Annexe C, adapté de Brisson et al. (2003).

Dans le cadre de ce travail, la connaissance de ces stades phénologiques fut primordiale notamment lors de la simulation des prairies de la rotation ICLS. En effet, lors de l'enchaînement de cultures, le modèle STICS doit entre autres transmettre entre les Unités de Simulation les variables d'état du sol (stocks de carbone et d'eau par exemple). Mais lors de l'enchaînement de prairies, le modèle doit également transmettre entre les Unités de Simulation des variables agronomiques, puisque c'est la même plante qui subsiste d'une Unité à l'autre. Il a donc fallu veiller à ce que les stades phénologiques de la prairie, qui sont également des variables transmises entre les Unités de Simulation pour les prairies, soient cohérents lors de cette transmission.

Leaf Area Index

La première variable déterminant la croissance est le LAI (*Leaf Area Index*, c'est-à-dire la surface foliaire). L'évolution du LAI se caractérise premièrement par de la croissance, ensuite par une éventuelle phase de stabilité (surtout pour les espèces déterminées¹) puis par de la senescence. Dans un premier temps, cette évolution est calculée selon les stades phénologiques du Tableau C.1 de l'Annexe C (en m^2 plante⁻¹ degré-jour⁻¹) : elle suit une courbe logistique qui, selon les unités de développement, augmente d'abord légèrement, puis croît rapidement avec un point d'inflexion correspondant à la fin de la phase juvénile (*IAMF*), et rejoint finalement une asymptote horizontale. Dans un second temps, l'incrément de LAI est multiplié par la température effective de la culture, par un facteur de densité combiné avec un facteur de compétition inter-plantes et par des indices de stress hydrique et azoté. Dans STICS, tous ces facteurs freinant les processus de la plante sont des fonctions variant entre 0 et 1. Une attention particulière sera portée à l'influence des différents stress lors de la comparaison des systèmes agricoles au Chapitre 3, et certains détails quant à la définition et l'utilisation de ces stress sont donnés dans l'Annexe B.

Interception de la radiation

L'interception de la radiation est nécessaire pour calculer le taux d'assimilation de carbone de la plante et donc son taux de croissance. Pour les cultures homogènes, celle-ci

1. Dans le modèle STICS, une espèce est dite "indéterminée" s'il existe une compétition trophique significative entre les organes végétatifs et les organes de reproduction (Brisson et al., 2009).

peut être calculée à l'aide de la loi de Beer comme fonction du LAI. Celle-ci ne requiert qu'un seul paramètre, le coefficient d'extinction de la radiation (Sinclair, 2006). Pour les cultures en rang, une autre méthode est utilisée prenant en compte la géométrie de la culture.

Efficacité d'utilisation des radiations

Il existe une relation linéaire entre l'accumulation de biomasse dans la plante et l'interception de radiation effectuée par son feuillage : la pente de cette relation est définie comme l'efficacité d'utilisation des radiations (RUE)². Ce concept synthétise les processus de photosynthèse et de respiration. De plus, comme le RUE est calculé comme le ratio entre la biomasse aérienne et la radiation absorbée, il est nécessaire de prendre en compte la répartition du carbone entre les parties aérienne et souterraine de la plante.

Il est intéressant, dans le cadre de ce travail, de noter que la croissance en biomasse de la plante peut, si l'utilisateur du modèle le désire, être influencée par un effet fertilisant du CO₂, qu'on note FCO₂. Ce facteur FCO₂ permet de simuler une concentration atmosphérique en CO₂ plus élevée que ce qu'elle n'est maintenant (350 ppm). Ceci sera donc bien utile lorsque l'impact du changement climatique sur les systèmes agricoles étudiés sera analysé (Section 3.2).

Formation du rendement

Le rendement désigne la masse et la qualité des organes récoltés, c'est-à-dire les organes reproductifs (grains ou fruits) ou végétatifs de stockage (tiges ou racines (pour les tubercules)).

Pour les plantes déterminées, le nombre et le remplissage des organes qui seront récoltés ne dépendent pas de la croissance des autres organes.

Le nombre de grains³ est fixé durant les stades phénologiques ILAT et IFLO (voir Tableau C.1 de l'Annexe C). Il dépend du taux de croissance moyen de la culture pendant cette phase ILAT-IFLO ainsi que de paramètres génétiques définissant les nombres de grains minimal et maximal.

2. On définit parfois la RUE légèrement différemment, comme la pente de la relation linéaire entre le gain de carbone par la plante et l'accumulation de radiation solaire interceptée (Steduto and Albrizio, 2005).

3. Par convention, on appellera "grains" les organes récoltés des plantes déterminées et "fruits" ceux des plantes indéterminées, comme dans Brisson et al. (2009).

C'est à partir du stade phénologique IDRP jusqu'au stade IMAT que se remplissent les grains. La quantité de matière sèche et l'azote accumulés sont calculés à partir des taux de matière sèche et d'azote de la partie aérienne via des "indices de récolte" qui augmentent linéairement.

Croissance racinaire

Le modèle STICS sépare la croissance de la partie aérienne de celle de la racine⁴. La fonction principale de cette dernière est d'absorber l'eau et les éléments minéraux (N,P,K) du sol⁵.

La vitesse de croissance du front racinaire est proportionnelle à la température avec un coefficient génétique et un facteur de stress dû à la disponibilité en eau et à la masse volumique du sol.

Un profil de densité racinaire est également calculé. L'option standard le calcule selon l'absorption, en considérant que les racines ont toujours le même profil sigmoïdal basé sur des paramètres de la plante et sur la profondeur actuelle du front racinaire. L'option "avancée" permet de calculer cette densité racinaire plus précisément, ce qui est intéressant pour des cultures à faible densité ou lorsque le sol présente des contraintes plus spécifiques. Cette seconde option prend en compte les différentes couches du sol.

Balance hydrique

La balance hydrique sert à estimer le contenu en eau du sol et les indices de stress hydrique qui réduisent la croissance foliaire et la photosynthèse. On la calcule en estimant d'une part la demande potentielle en eau du système sol-plante (transpiration de la plante et évaporation du sol) et d'autre part l'approvisionnement du système sol-racines.

a. Évaporation du sol

L'évaporation provenant du sol est calculée en deux étapes : on estime d'abord l'évaporation potentielle (via par exemple le LAI et la présence ou non d'une couverture végétale) puis ensuite l'évaporation réelle liée à la disponibilité en eau. Cette évaporation du sol est ensuite distribuée sur tout le profil du sol.

4. La croissance racinaire peut cependant également reposer (quand une certaine option est choisie) sur la production journalière de biomasse aérienne et sur un coefficient dynamique de séparation des biomasses souterraine et totale, créant un lien trophique entre croissances aérienne et racinaire.

5. La racine sert par exemple aussi à ancrer la plante dans le sol, à fixer par symbiose l'azote atmosphérique pour les légumineuses, à la rhizodéposition et comme organe de réserve. Mais ces dernières fonctions sont d'une manière ou d'une autre prises en compte dans d'autres modules de STICS (Brisson et al., 2009).

b. Transpiration de la plante

On calcule la transpiration réelle de la plante via une relation linéaire qui lie transpiration relative et contenu en eau du sol. Si on regarde à l'échelle de toute une journée, on peut également considérer que l'assimilation racinaire d'eau est égale à la transpiration foliaire, ce qui permet d'ensuite distribuer cette absorption racinaire à travers les différentes couches du sol.

On calcule deux indices de stress liés à l'eau : un indice de stress stomatal qui affecte l'efficacité d'utilisation des radiations (RUE) et donc la photosynthèse, et un indice de stress lié à la croissance foliaire.

Balance azotée

La balance azotée du système sol-plante dépend de nombreux processus. Tout d'abord ceux qui impactent le contenu en azote minéral du sol : minéralisation, immobilisation, nitrification, volatilisation, dénitrification et lessivage/lixiviation. Ensuite ceux qui sont en lien avec la culture : fixation symbiotique (source d'azote) et absorption minérale (puits d'azote). Nous en présentons ici brièvement les principaux.

a. Minéralisation

La minéralisation d'azote, c'est-à-dire la production d'azote minéral par le sol, est la somme de deux composantes : la minéralisation d'humus (toujours positive dans le sens où elle libère de l'azote minéral) et la minéralisation de résidus organiques (soit positive soit négative (immobilisation)).

La minéralisation d'humus est considérée comme négligeable en-dessous d'une certaine profondeur dans le sol par le modèle STICS, et son taux de minéralisation dépend du contenu du sol en azote organique actif et en eau, du type de sol et de la température dans chaque couche de sol.

La minéralisation de résidus organiques dépend du taux de décomposition de ceux-ci, donc de leur rapport C/N, de la profondeur à laquelle ils sont enfouis, la température et l'humidité du sol, etc.

b. Absorption minérale

L'absorption quotidienne d'azote par la plante est égale au minimum entre la demande de la plante et la disponibilité du sol. La demande de la plante diminue quand augmente son âge et sa biomasse, dépendant de son métabolisme, de son abilité à stocker de l'azote et des processus de compétition inter-plantes. La disponibilité en azote du sol est calculée pour chaque couche de 1 centimètre via le transport d'azote minéral d'un certain point du sol à la racine la plus proche par convection ou diffusion.

c. Fixation symbiotique

La fixation symbiotique de N_2 est d'abord calculée potentiellement, via l'activité des nodules, puis réellement en multipliant cette fixation symbiotique potentielle par des facteurs limitants comme l'anoxie, la température, le stress hydrique ou la présence de nitrates (quand le taux moyen d'azote minéral dans la rhizosphère dépasse un certain seuil).

2.3.3 Variables d'entrée

Dans cette section, nous introduisons brièvement les variables d'entrées du modèle STICS utilisées, introduites dans la Section 2.3. Celles-ci sont des paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle, sauf les entrées pédologiques qui sont elles des conditions initiales.

Entrées pédoclimatiques

Les variables pédologiques servent à caractériser l'état initial du sol, notamment les différents horizons du sol, leur contenu en argile, leur quantité d'azote organique, leur pH, etc. Ces entrées ont été fournies par le Prof. Dumont. Certains ajustements mineurs ont dû être effectués (activation ou non d'options pour corriger des discontinuités entre Unités de Simulation) mais nous n'entrons pas dans les détails dans ce rapport.

Les variables climato-environnementales sont journalières et indiquent la radiation, les températures minimale et maximale, les précipitations, l'évapotranspiration de référence (optionnelle), la vitesse du vent et l'humidité (optionnelle) (Brisson et al., 2009).

Pour la partie 1 du Chapitre de Résultats et Discussion, nous utilisons les données climatiques historiques de la période 1985-2009 de la station d'Ernage, fournies par l'Institut Royal Météorologique.

Pour la partie 2 du Chapitre de Résultats et Discussion, qui s'intéresse à l'influence du changement climatique, nous nous basons sur deux scénarios climatiques différents du GIEC (Groupement International d'Experts sur le Climat).

Les scénarios climatiques du GIEC décrivent des trajectoires jusqu'à la fin du 21ème siècle concernant les émissions de gaz à effet de serre et leurs concentrations atmosphériques, les émissions de polluants de l'air et l'utilisation de la terre (IPCC, 2014). Ces scénarios sont appelés *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Ils concernent donc principalement les concentrations de gaz à effet de serre, mais ces derniers ont une influence sur une multitude d'autres variables : il existe ainsi une relation presque linéaire entre les émissions cumulées de CO_2 et la température moyenne globale (IPCC, 2014).

Dans le cadre de ce travail, nous nous basons sur le scénario RCP4.5, qui est un scénario intermédiaire, et sur le scénario RCP8.5, qui est un scénario menant à de très hautes émissions de gaz à effet de serre représentant la trajectoire probable si aucun effort additionnel pour limiter les émissions n'est effectué (IPCC, 2014). La Figure 2.6 représente les scénarios climatiques du GIEC.

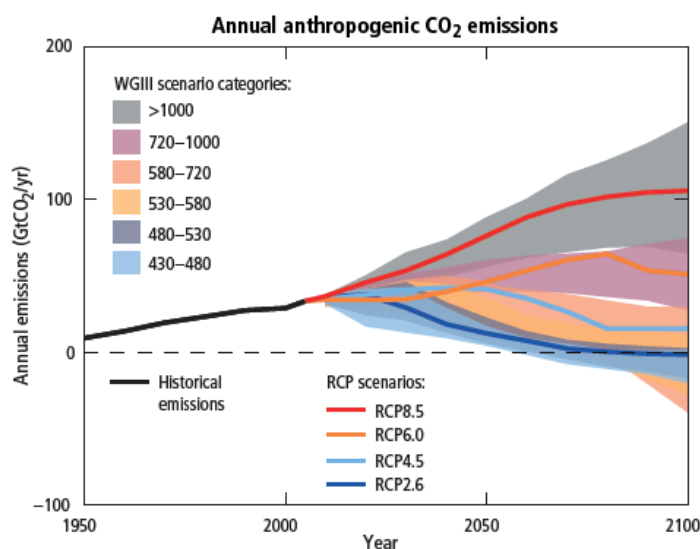


Figure 2.6 – Emissions anthropiques annuelles de CO₂ d’ici à la fin du siècle selon les différents scénarios climatiques du GIEC. Figurée tirée de IPCC (2014).

Le changement de température moyenne à la surface du globe pour la période 2081-2100 va *probablement* excéder 1.5°C pour RCP4.5 et 2°C pour RCP8.5, par rapport à la période 1850-1900. Comme déjà abordé à la Section 1.4, il est également *virtuellement certain* qu’il y aura plus d’évènements de températures extrêmes chaudes et moins d’évènements de températures extrêmes froides, et il est *très probable* que les vagues de chaleur apparaîtront plus souvent et sur une plus longue durée (IPCC, 2014).

Dans le cadre de ce travail, pour la partie 2 du Chapitre de Résultats et Discussion, nous utilisons des fichiers climatiques de deux périodes différentes : 2045-2069 et 2075-2099, chaque période de temps donnant deux ensembles de fichiers climatiques, l’un selon le scénario RCP4.5 et l’autre selon le scénario RCP8.5. Ces fichiers climatiques ont été générés à l’aide d’un Modèle Climatique Global (*Global Climate Model*, GCM) et raffinés à l’aide d’un Modèle Climatique Régional (*Regional Climate Model*, RCM) (Giot et al., 2015). Le modèle utilisé par l’Institut Royal Météorologique (IRM) est Alaro-O/Aladin (Leemans et al., 2017; Giot et al., 2015). Dans les comparaisons du Chapitre 3, nous veillerons à ne pas comparer une année particulière avec l’autre mais plutôt entre des rotations entières, voire entre les moyennes entre trois rotations successives.

Les variables qui ont été modifiées dans les fichiers climatiques prédits sont, outre la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, la température, l'humidité relative, la couverture nuageuse ou encore les précipitations.

Fichiers plantes

Des fichiers contenant des centaines de paramètres sur chacune des plantes cultivées, en rapport avec la photopériode, la sénescence, le nombre de feuilles, le système racinaire, etc. sont nécessaires. Certains d'entre eux sont fournis avec le modèle STICS et d'autres ont été fournis par le Prof. Dumont. Il a fallu faire quelques ajustements pour certains fichiers mais nous n'entrons pas plus dans les détails dans ce rapport.

Les différentes plantes modélisées sont reprises dans les itinéraires techniques (Annexe A). Il a été décidé de simuler des plantes de couverture et des prairies mono-espèces, l'association de différentes plantes étant quelque peu plus compliquée avec le modèle STICS et n'étant pas primordiale pour les analyses désirées dans le cadre de ce travail. À défaut de disposer de données pour valider le modèle avec nos conditions, il a été décidé que les plantes de couverture seraient constituées de moutarde et les prairies de fétuque, le choix de cette dernière étant motivé par sa haute productivité et son stockage de carbone élevé par rapport aux autres espèces de prairie disponibles⁶.

Itinéraires techniques

Tandis qu'un chercheur pourrait étudier l'influence du sol, et donc faire varier les entrées pédologiques, ou qu'un autre pourrait étudier l'influence de la génétique des plantes, et donc faire varier les fichiers plantes, la principale variable discriminante dans le cadre de ce travail, outre les conditions climatiques, est l'itinéraire technique. C'est avec cette variable qu'on introduit dans le modèle STICS une rotation BAU, Vegan ou ICLS.

Les trois rotations BAU, Vegan et ICLS sont définies en suivant les principes présentés à la Section 2.1, déterminant le choix et l'ordre des cultures ainsi que l'intégration de l'élevage. Il a fallu néanmoins faire de nombreux choix concernant les conditions de semis (date, quantité, profondeur d'enfouissement), de récolte, de travail du sol, de fertilisation, etc. Les trois itinéraires techniques considérés dans le cadre de ce travail sont disponibles en détail à l'Annexe A.

On peut voir sur la Figure A.1 de l'Annexe A qu'un apport de fumier est présent au tout début de la rotation BAU, à raison de 40 tonnes par hectare 1 mois avant le semis des

6. Une contrainte importante dans le choix des espèces de prairies est qu'il faut disposer de paramètres bien particuliers pour simuler le stockage de carbone, qui ne sont disponibles que pour très peu d'espèces. Il a d'ailleurs fallu faire quelques ajustements entre plusieurs fichiers de plantes pour obtenir le fichier qui a finalement été utilisé pour la fétuque.

betteraves. Du fumier bovin est utilisé, le système BAU se basant sur l'import d'intrants externes. Les caractéristiques de ce fumier sont tirées d'une notice d'utilisation du modèle STICS : le carbone constitue 32% de la matière sèche tandis qu'on considère que le fumier ne contient pas d'azote minéral, le ratio C/N est de 20 et la matière fraîche est constituée de 75% d'eau (Ripoche-Wachter and Lecharpentier, 2017).

Considération du système ICLS

Le système ICLS est particulier par le fait qu'il comporte des animaux incorporés au sein du système. Le modèle STICS ne permet pas de tenir compte de nombreux avantages que cela comporte, comme le contrôle des maladies et ravageurs (voir Section 2.1). Néanmoins, il est possible de simuler la fertilisation par les déjections ovines.

Pour calculer la charge d'ovins à l'hectare, on part de la biomasse de fourrage produite par les prairies. On estime celle-ci à 10 tonnes de matière sèche par hectare et par an, qui est le chiffre utilisé par De Clerck et al. (2021) tiré de Statbel (2020a)⁷. On estime également le taux de rejet des ovins à 0.2. A partir de l'itinéraire technique de la Figure A.3 de l'Annexe A, on estime que les prairies durent 2.66 années par rotation et on pose que le pâturage doit pouvoir alimenter les ovins du 1er mai au 30 septembre des Années 7 et 8. Finalement, la consommation journalière de matière sèche par un ovin moyen (de poids vif de 60kg) est de 1.5 kg (Jousseins and Tchakerian, 2014). On obtient donc le nombre d'ovins pouvant pâturer à l'hectare sur la rotation ICLS suivant :

$$n = \frac{10 * 1000 * 2.66 * 0.8}{1.5 * (2 * 3 * 31 + 2 * 2 * 30)} = 46.36 \cong 46 \quad \text{ovins par hectare} \quad (2.1)$$

Un ovin fait entre 7 et 26 déjections par jour qui pèsent entre 0.03 et 0.17 kg chacune (Bloor et al., 2012). On estime également à 963 le nombre de jours total durant la rotation ICLS pendant lesquels les moutons pâturent, ces derniers pâturant une majeure partie du temps la moutarde de l'Année 2 et les prairies (voir Figure A.3 dans l'Annexe A). A partir du nombre d'ovins pâturant à l'hectare estimé par l'équation 2.1, l'équation 2.2 nous donne donc la quantité totale de déjection ovine produite par rotation :

$$Q = 46 \times \frac{7 + 26}{2} \times \frac{0.03 + 0.17}{2} \times 963 = 73091.7 \quad \text{kg ha}^{-1} \text{ rotation}^{-1} \\ \cong 73 \quad \text{T ha}^{-1} \text{ rotation}^{-1} \quad (2.2)$$

7. On verra par la suite que les productivités simulées sont cohérentes avec ce chiffre. Il aurait été possible de faire des boucles d'ajustement des productivités/charges d'ovins, où l'on aurait fait une première simulation de la productivité des prairies (dépendant d'une première estimation de la charge d'ovins qui dépend donc elle-même du premier chiffre de productivité des prairies utilisé), puis ajusté cette charge. Mais la différence aurait été minime et la méthodologie plus simple expliquée ci-dessus a donc été choisie.

Il est finalement nécessaire de renseigner dans le modèle STICS certaines caractéristiques de déjections ovines. L'eau est la principale composante des déjections solides, représentant environ 70% du poids frais chez les ovins (Bloor et al., 2012; Delaby, 2018). La teneur en azote moyenne est elle de 2 à 2.8% de la matière sèche, et donc de 0.6 à 0.84% du poids frais⁸ (Bloor et al., 2012; Delaby, 2018). Il a été décidé d'effectuer cet apport simulant les déjections ovines en une fois, au milieu de la rotation en Année 4 (voir Annexe A), par souci de simplicité.

Les prairies du système ICLS constituent également un cas particulier. Il a été nécessaire durant la phase de modélisation d'imposer différents stades phénologiques (voir Tableau C.1 de l'Annexe C) à la fétuque composant les prairies pour que les différentes Unités de Simulation s'enchaînent adéquatement, c'est-à-dire que les différentes variables agronomiques soient transmises d'une unité à l'autre.

2.3.4 Variables de sortie

Avant de lancer les différentes simulations associées à chacune des rotations considérées et à différentes conditions pédoclimatiques, il faut choisir les différentes variables de sortie désirées.

Celles-ci sont soit d'ordre agronomique (matière sèche, organes récoltés, couverture végétale, etc.), soit d'ordre environnemental (émissions de CO₂ ou N₂O, stock d'azote ou d'eau dans le sol, évapotranspiration, etc.).

Variables agronomiques de sortie

Les principales variables agronomiques qui ont été utilisées sont la matière sèche [t/ha], la masse des organes récoltés [t/ha] et le *Leaf Area Index* [m²/m²]. D'autres variables agronomiques caractérisent par exemple les différents stress de la plante.

Variables environnementales de sortie

Les premières variables environnementales mesurées sont les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et d'oxyde nitreux (N₂O), qui sont les principaux gaz à effet de serre émis

8. Pour les rotations BAU et Vegan, seule une fertilisation azotée est apportée. Il est donc intéressant de voir ce que ces déjections ovines représentent comme apport azoté pour la rotation ICLS : $73 \text{ T ha}^{-1} \times 0.84\% = 613.2 \text{ kg N ha}^{-1}$. Pour vérifier ce chiffre, on sait qu'il est considéré que 100 UGB ha⁻¹ jour⁻¹ restituent au pâturage l'équivalent de 9 kg d'N/ha (Knoden et al., 2007). Les 46 ovins par hectare calculés par l'équation 2.1, chacun étant équivalent à 0.15 UGB, restituent donc 598.02 kg N/ha sur les 963 jours de pâturage de la rotation ICLS. On s'aperçoit donc que les deux méthodes de calcul, l'une se basant sur le nombre moyen de déjections et leurs compositions et l'autre se basant sur une approximation, donnent une fertilisation azotée quasiment équivalente.

par les systèmes de culture⁹. Ces émissions sont la cause principale du réchauffement climatique (IPCC, 2014). La Figure 2.7 montre que les concentrations atmosphériques des trois principaux gaz à effet de serre ont considérablement augmenté depuis la deuxième révolution industrielle, tout comme les émissions dues à l'agriculture, à la foresterie et aux autres utilisations du sol.

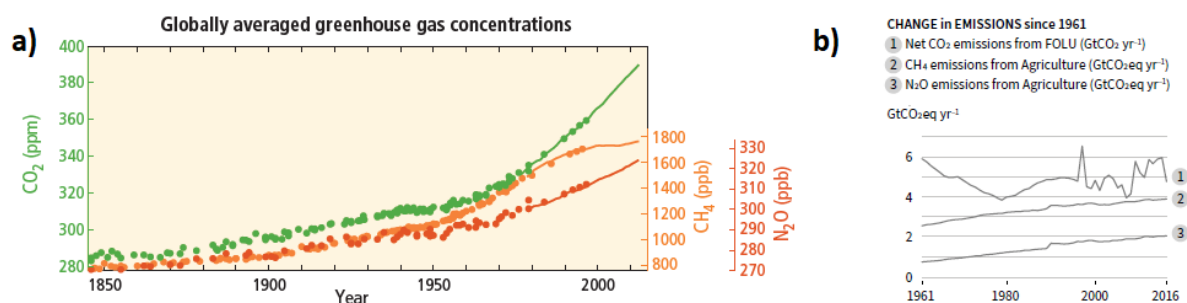


Figure 2.7 – a). Concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone CO₂ en vert, méthane CH₄ en orange et oxyde nitreux N₂O en rouge) déterminées à partir de carottes de glace (points) et de mesures atmosphériques directes (lignes). Figure tirée de IPCC (2014). **b).** Estimation des émissions de gaz à effet de serre anthropiques dues à l'agriculture, à la foresterie et à d'autres utilisations du sol (AFOLU pour *Agriculture, Forestry and Other Land Use*). Figure tirée de IPCC (2019).

En premier lieu, le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO₂) est le principal gaz à effet de serre (d'origine anthropique), avec un forçage radiatif¹⁰ de 1.82 Wm⁻² entre 1750 et 2011 (IPCC, 2013). Les augmentations des concentrations atmosphériques de CO₂ rapportées à la Figure 2.7 sont principalement dues à la combustion de combustibles fossiles et au changement d'affectation des terres, en particulier la déforestation (IPCC, 2013). En effet, le CO₂ est prélevé de l'atmosphère par la photosynthèse des végétaux, le carbone fixé dans les plantes allant ensuite dans leurs tissus, puis dans la litière et finalement dans le sol, en étant relâché dans l'atmosphère par la respiration autotrophe (plantes) et

9. Le méthane, CH₄, est le deuxième principal gaz à effet de serre avec un forçage radiatif (voir plus loin) de 0.48 Wm⁻² (IPCC, 2013). Néanmoins, c'est principalement l'augmentation du nombre de ruminants élevés pour la consommation de viande qui est à l'origine de l'augmentation des concentrations atmosphériques de CH₄ (IPCC, 2013) : cela sort donc du cadre de ce travail.

10. Le forçage radiatif (RF) est "le changement net dans la balance énergétique du système Terre/atmosphère dû à une certaine perturbation". Il est exprimé en watts par mètre carré moyennés sur une période de temps. Le RF est donc positif s'il provoque une augmentation de l'énergie du système Terre/atmosphère sur une certaine surface et dans une certaine période de temps, augmentation d'énergie qui provoquera le réchauffement du système en entier. On utilise le terme *forçage* pour indiquer que l'équilibre est déstabilisé et le terme *radiatif* pour indiquer que c'est l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnement infrarouge sortant de l'atmosphère qui est déstabilisé (IPCC, 2013).

hétérotrophe (microbes du sol et animaux) (IPCC, 2013). L'agriculture, la foresterie et les autres utilisations de la terre sont responsables d'environ 13% des émissions anthropiques de CO_2 pour la période 2007-2016 (IPCC, 2019) : si cela est principalement dû à la déforestation, qui ne nous concerne pas dans le cadre de ce travail puisque les rotations étudiées sont conçues de sorte à relocaliser l'agriculture, il est néanmoins pertinent d'étudier les émissions de CO_2 dégagées par chacune de ces rotations de sorte à comparer leur impact sur l'environnement ainsi que l'évolution de cet impact.

En second lieu, le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O) est le troisième principal gaz à effet de serre avec un forçage radiatif de 0.17 Wm^{-2} entre 1750 et 2011 (IPCC, 2013). Avant l'ère industrielle, la création d'azote réactif Nr à partir d'azote non réactif N_2 intervenait via deux processus naturels principaux : la foudre et la fixation biologique d'azote (BNF). Mais il y a maintenant trois sources anthropiques principales de Nr : 1) le procédé industriel Haber-Bosch qui fabrique du NH_3 à partir de N_2 pour des fertilisants azotés de synthèse ; 2) la culture de légumineuses qui augmentent la BNF ; et 3) la combustion de combustibles fossiles qui convertissent le N_2 atmosphérique et l'azote du combustible en oxydes nitreux (NO_x) émis dans l'atmosphère (IPCC, 2013). L'agriculture, la foresterie et les autres utilisations de la terre sont responsables d'environ 81% des émissions anthropiques de N_2O pour la période 2007-2016 (IPCC, 2019), c'est pourquoi l'émission de N_2O est la deuxième variable de sortie environnementale considérée.

D'autres variables environnementales caractérisent par exemple l'état du sol (stocks d'eau, de carbone et d'azote).

2.4 Méthodologie de comparaison

La comparaison des systèmes agricoles, effectuée au Chapitre 3, se fait selon différents critères, eux-mêmes divisés en indicateurs selon la hiérarchie illustrée à la Figure 2.8.



Figure 2.8 – Hiérarchie des sorties et indicateurs utilisés pour l'analyse et la comparaison des systèmes agricoles du Chapitre 3

Pour chaque comparaison, des tests statistiques tels qu'analyses de variances (ANOVA) et Tukey HSD sont effectués pour vérifier et quantifier si des différences sont significatives. Les résultats sont toujours indiqués en indiquant l'ordre de grandeur de la valeur p entre parenthèses. Ces tests sont accompagnés d'autres statistiques telles que moyennes, variances, boîtes à moustaches, graphiques en tous genre, etc. qui, tous, sont produits avec les logiciels Matlab v2019a et RStudio v1.2.5033.

Le Tableau 2.1 regroupe tous les critères et indicateurs utilisés pour l'analyse et la comparaison des systèmes agricoles du Chapitre 3. Ceux-ci sont inspirés de la Section 1.2, et en particulier de Talukder et al. (2018) et Van Cauwenbergh et al. (2007). Nous en passons ensuite en revue certains qui nécessitent plus d'explications.

Critères	Indicateurs composites	Indicateurs	Unités des indicateurs
Productivité	Rendement	Rendements totaux	$T\ ha^{-1}$ et UC ha^{-1}
	Couverture végétale	Leaf Area Index (LAI)	m^2/m^2
Stabilité	Sol	Réserve d'azote dans le sol	$kg\ ha^{-1}$
		Réserve de carbone organique dans le sol	$kg\ ha^{-1}$
		Réserve d'eau dans le sol	mm
	Stress	Stress hydrique	$0 \rightarrow 1$
		Stress thermique	$0 \rightarrow 1$
		Stress azoté	$0 \rightarrow 1$
	Interactions sol-plante	Rendements de froment d'hiver	$T\ ha^{-1}$
Environnement	Emissions de gaz à effet de serre	CO ₂	$kg\ ha^{-1}$
		N ₂ O	$kg\ ha^{-1}$
Alimentation	Quantité	Nombre de personnes nourries par la rotation	$adultes\ ha^{-1}$
	Qualité	Composition du repas optimisé par l'algorithme DREAM	/
	Auto-suffisance	Excès et déficits dans les produits alimentaires	$kg\ an^{-1}$
	Animaux	Composition du troupeau nécessaire au régime optimal	/

Table 2.1 – Critères et indicateurs de performance et durabilité

Rendements totaux

Le premier indicateur composite de productivité est le rendement. Il est composé premièrement d'un indicateur qui consiste à calculer la somme des rendements de toutes les cultures d'une rotation. Etant donné que les simulations sont toujours effectuées sur plusieurs rotations successives, cette somme des rendements est moyennée pour les trois cycles simulés. Ensuite, afin de pouvoir comparer les différents produits agricoles (par exemple des pommes et des poires), on utilise le concept d'unité-céréales (UC) développé par Brankatschk et Finkbeiner (2014). Ce concept consiste à pondérer la production de

chaque culture en fonction de l'énergie métabolisable par les animaux agrégée par ce produit. L'unité de référence est l'énergie métabolisable agrégée de l'orge, correspondant à 1 UC (Brankatschk and Finkbeiner, 2014). Le Tableau C.2 de l'Annexe C reprend les facteurs de conversion entre les quantités de production (en kilogrammes) et leur équivalent en UC, ces facteurs étant directement fournis dans Brankatschk et Finkbeiner (2014).

Rendements de froment d'hiver

Un autre indicateur de rendement est la somme des rendements de froment d'hiver. Dans les régions de grandes cultures wallonnes, le froment représente environ 45% de la SAU (Statbel, 2019). Par ailleurs, les trois rotations considérées ont été conçues de manière à ce que les cultures de froment d'hiver coïncident en Années 2 et 4. Il est donc intéressant de pouvoir comparer ces rendements puisque le froment d'hiver est à chaque fois soumis aux mêmes conditions pédoclimatiques pour chacun des systèmes.

Stress

Les stress sont exprimés comme des variables continues entre 0 et 1, 0 correspondant à un stress nul et 1 à un stress maximal. Néanmoins, la variable investiguée dans les résultats sera le nombre de jours où le stress dépasse un certain seuil propre à chaque type de stress (le stress devient donc une variable booléenne puisqu'un jour est considéré comme "stressé" ou non). Ce seuil est estimé arbitrairement de manière à discriminer au maximum les systèmes agricoles considérés (si le seuil est trop bas, les nombres de jours considérés comme "stressés" seront très élevés et forts semblables, tandis que si le seuil est trop haut, ces nombres seront très bas et également fort semblables). Les valeurs des différents seuils sont précisées par après.

Plus de détails par rapport à chaque stress étudié (hydrique, thermique et azoté) sont disponibles dans l'Annexe B¹¹.

Alimentation

Le dernier critère de comparaison est l'alimentation. Il consiste à étudier les performances alimentaires de la rotation, c'est-à-dire sa capacité à nourrir la population de manière saine et auto-suffisante. Toute la méthodologie de ce critère est inspirée de De Clerck et al. (2021), auquel le lecteur intéressé pourra se référer pour plus de détails. Nous utilisons ici le procédé d'optimisation développé par le Prof. Dumont pour cette

11. Il existe dans le modèle STICS d'autres facteurs de stress hydrique, retardant l'émergence et le développement, freinant la croissance racinaire ou foliaire ou encore accélérant la sénescence foliaire. Néanmoins, par simplicité, nous ne développons pas ici ces autres facteurs de stress car leur importance est moindre.

étude (codé en Matlab), qui se base sur l'algorithme d'optimisation Differential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM) (Vrugt et al., 2009). La démarche a été adaptée pour prendre en entrées non plus les moyennes régionales mais les sorties du modèle. Ce procédé consiste à optimiser l'utilisation alimentaire de la rotation selon les critères de l'étude d'EAT-Lancet (Willett et al., 2019) : il prend en entrées les productions de chaque rotation, qu'on a calculées dans ce travail avec le modèle STICS, et donne en sorties les composantes d'un régime optimal, c'est-à-dire qui nourrit le plus de personnes possibles tout en respectant les bornes définies par EAT-Lancet pour chaque catégorie d'aliments. Le processus d'optimisation a la liberté "d'importer" des produits agricoles, qui ne sont pas produits par la rotation mais qu'il estime bénéfique d'incorporer au régime (c'est-à-dire qu'il peut par exemple juger optimal d'incorporer des pommes de terre pour rajouter des calories au régime, même si la rotation n'en produit pas). Il est finalement également possible de définir des contraintes alimentaires supplémentaires dans le procédé d'optimisation, en l'obligeant à atteindre un nombre journalier de calories. Par souci de concision, nous ne considérons ici qu'un régime omnivore : ainsi, même pour la rotation Vegan, le processus d'optimisation peut estimer bénéfique d'utiliser des produits animaux ou d'origine animale.

Le premier indicateur d'alimentation est le nombre de personnes nourries par la rotation. C'est donc une autre manière de juger la productivité de la rotation, via le nombre de calories produites. Le besoin d'une personne est fixé à 2505 kcal par jour, comme établi dans Willett et al. (2019).

Ensuite, le deuxième indicateur d'alimentation est la composition du régime optimal. Celui-ci est séparé en 8 parties : les céréales, les tubercules, le lait, les viandes rouge et blanche, les légumineuses, les huiles insaturées et les sucres raffinés. Il n'y aura pas lieu de juger un régime meilleur qu'un autre, puisque tous satisfont les contraintes de Willett et al. (2019), mais il est intéressant de constater les différences entre ces régimes qu'impliquent les différentes rotations.

Le troisième indicateur d'alimentation est l'auto-suffisance, jugée par les excès et déficits dans les produits alimentaires. En effet, puisque le processus d'optimisation d'utilisation des rotations s'autorise "l'import-export" de produits, il est utile de constater quel est le niveau d'auto-suffisance de la rotation pour produire l'alimentation. Bien entendu, les commodités que sont fruits, légumes et noix sont nécessairement considérées comme devant être importées.

Le dernier indicateur d'alimentation est la composition du troupeau nécessaire au régime optimal : on y compare quelle rotation soutient plutôt l'élevage de bovins, laitiers ou allaitants, là où une autre favorisera par exemple les porcs, poulets et poules.

Chapitre 3

Résultats et discussions

Dans ce troisième chapitre, nous présentons les résultats obtenus et les discutons en les mettant en perspective avec la littérature scientifique. Ce chapitre est séparé en deux parties principales : la première présente les performances des systèmes agricoles sous des conditions climatiques actuelles, c'est-à-dire avec des conditions climatiques historiques mesurées entre 1985 et 2009 ; la deuxième partie étudie l'évolution de ces performances sous des conditions climatiques futures, prédites selon différents scénarios climatiques reconnus pour les périodes 2045-2069 et 2075-2099.

3.1 Performances des systèmes agricoles

Dans la première partie de ce chapitre, nous étudions les performances des systèmes agricoles à travers quatre indicateurs : la productivité, la stabilité, l'environnement et la diététique.

3.1.1 Productivité

Le premier critère de performance est la productivité. Un des objectifs de ce travail est d'élargir le champ de comparaisons des systèmes agricoles pour prendre en compte leurs externalités environnementales, leur adaptabilité au changement climatique et leurs impacts alimentaires, mais il est naturel de commencer cette comparaison par la productivité puisque le principal objectif d'un système agricole est de nourrir la population, directement via la production de nourriture humaine ou indirectement via la production de coproduits et fourrages.

Le cas particulier des intercultures et des prairies

Avant de parcourir les différents indicateurs de productivité, il est nécessaire de préciser comment sont pris en compte les intercultures et les prairies. Les intercultures, dans notre cas des cultures de moutarde, ne sont pas prises en compte pour le calcul de la productivité car elles ne sont pas récoltées : toute la biomasse produite est restituée au sol.

La Figure 3.1 illustre l'évolution des prairies d'une seule rotation. Conformément à l'itinéraire technique (voir Figure A.3 de l'Annexe A), 5 fauches sont effectuées, fin mai et début septembre des deux années complètes ainsi qu'au début avril de l'Année 1, juste avant le semis du maïs. 3 principales fractions de biomasse sont disponibles : (i) la biomasse présente sur la plante à un instant donné, c'est-à-dire la biomasse aérienne totale, également nommée matière sèche ; (ii) la biomasse considérée comme utile, c'est-à-dire la fraction de la biomasse aérienne qui est non sénescente ; et (iii) la biomasse récoltable, soit la biomasse utile de laquelle on a soustrait la fraction qui restera sur le terrain après la fauche (fixée à 0.5 T ha^{-1} dans le cadre de ce travail, après différents essais dans le but d'optimiser la quantité fauchée tout en laissant suffisamment pour que la végétation reparte bien). On remarque sur la Figure 3.1 que la biomasse récoltable peut donc être temporairement négative, si la biomasse utile est inférieure à la fraction qui doit rester sur le terrain après la fauche, auquel cas il n'est pas possible d'effectuer une fauche à ce moment-là¹. Nous considérerons donc seulement cette dernière variable, la biomasse récoltable, dans les calculs de productivité des prairies.

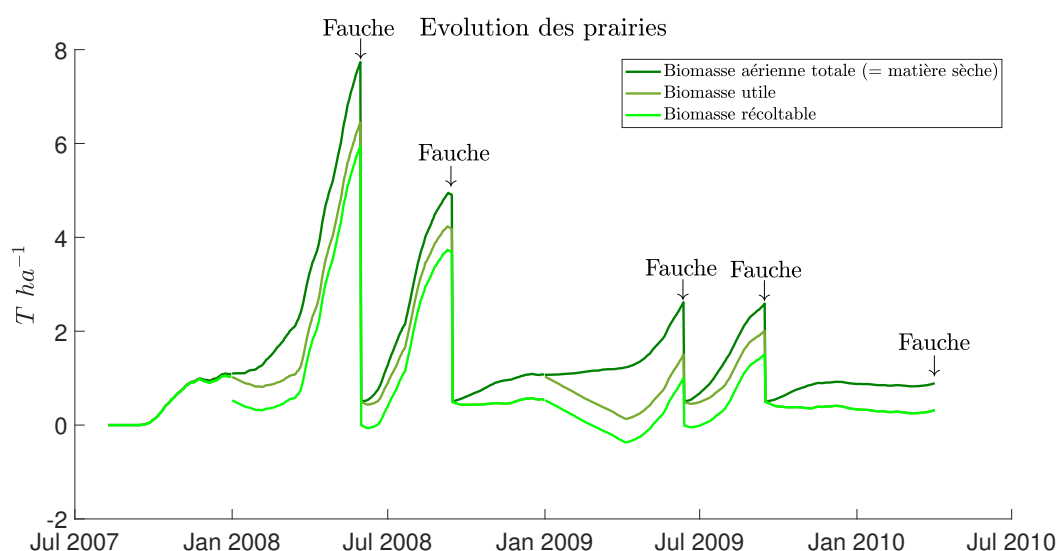


Figure 3.1 – Illustration de l'évolution des prairies avec celles de la 3ème rotation ICLS.

Rendement

Le premier indicateur composite de la productivité est le rendement, qui est composé en premier lieu des rendements totaux. La Figure 3.2 compare les productions des trois rotations à la fois en tonnes et en unités-céréales, en suivant ce concept introduit à la Section 2.4 (voir Tableau C.2 de l'Annexe C pour les coefficients des unités-céréales).

1. C'est pourquoi la fraction de biomasse devant rester sur le terrain après la fauche est fixée à 0 T ha^{-1} pour la dernière fauche.

On peut voir sur la Figure 3.2 que la rotation BAU est celle qui produit la plus grande masse de produits (en tonnes), avec respectivement 134% et 138% des quantités produites par les rotations Vegan et ICLS, qui sont elles quasiment égales. Par contre, lorsque l'on exprime la production en unités-céréales, c'est la rotation Vegan qui produit le plus (105% et 119% des rotations BAU et ICLS) : la rotation BAU voit sa production relative diminuer essentiellement à cause des betteraves et des pommes de terre qui ont une faible densité énergétique. Le Tableau C.3 de l'Annexe C, qui compare les productivités obtenues avec les moyennes wallonnes, nous permet de constater que les rendements obtenus sont proches des chiffres réels de nos régions, mis à part pour la féverole et le pois qui ont des rendements relativement faibles. Il convient de rappeler que ces cultures n'ont pas fait l'objet d'une paramétrisation, faute de données.

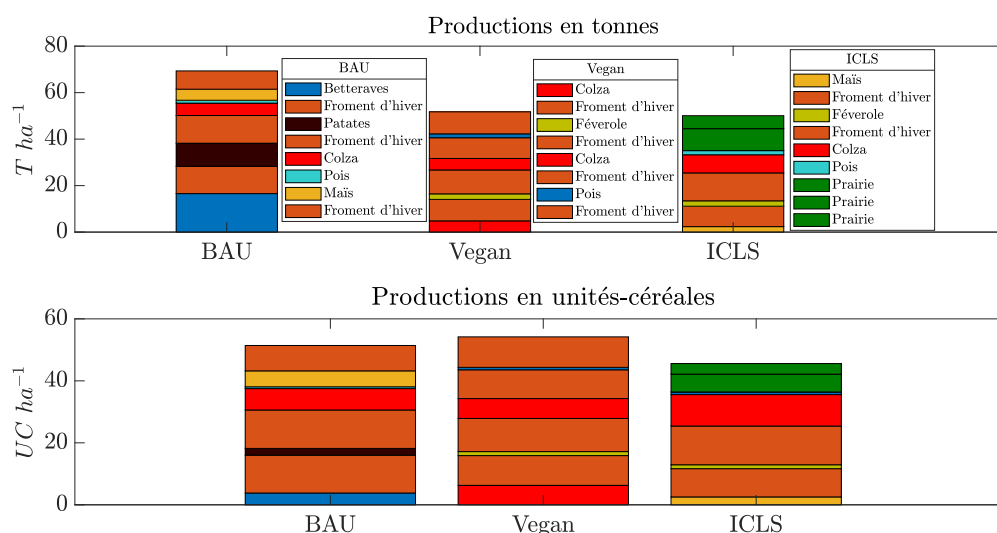


Figure 3.2 – Comparaison des productions des trois rotations. Le graphe du dessus compare les productions exprimées en tonnes tandis que le graphe du dessous compare les productions pondérées en unités-céréales. La production de chaque rotation est moyennée par rapport aux trois rotations simulées sur la période 1985-2009.

La Figure 3.3 compare l'évolution de la masse des organes récoltés pour les trois rotations (un agrandissement sur une seule rotation est disponible à l'Annexe C). On peut notamment y constater certaines différences dans les rendements de cultures similaires, certaines rotations cultivant par exemple en même temps du froment d'hiver, du colza ou de la féverole.

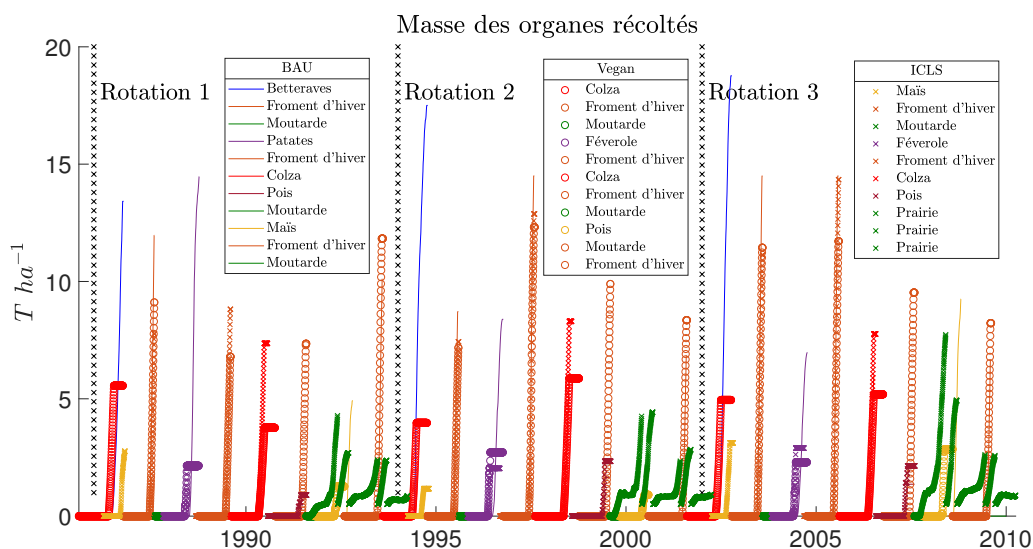


Figure 3.3 – Comparaison des évolutions (en tonnes par hectare) des masses des organes récoltés (variable *mafruit* dans STICS) de chacun des systèmes agricoles. Agrandissement à la Figure C.4 dans l'Annexe C.

Couverture végétale

Finalement, nous clôturons l'analyse vis-à-vis de la productivité en nous intéressant à la couverture végétale, soit le *Leaf Area Index* (LAI), représenté sur la Figure 3.4 pour une seule rotation. On peut voir que les pics de LAI sont relativement synchronisés.

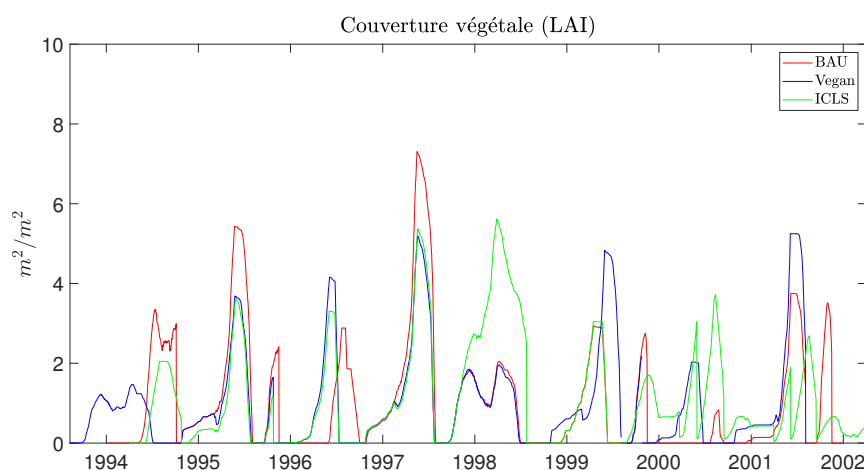


Figure 3.4 – Couverture végétale des 3 systèmes sur une rotation (1994-2002)

On peut également comparer le degré de couverture du sol en sommant les périodes de temps où le sol est quasiment à nu, c'est-à-dire où le LAI est inférieur à $0.3 m^2/m^2$

(ce choix de la valeur 0.3 étant arbitraire mais basé sur la Figure 3.4 pour permettre une meilleure différenciation entre les systèmes agricoles). Il résulte que le système BAU a un sol "découvert", sur trois rotations successives de 8 ans chacune, pendant 4122 jours (soit 47.02% du temps), contre 3304 jours pour le système Vegan (37.69% du temps) et 2872 pour le système ICLS (32.76% du temps). Ces différences s'expliquent par le fait que les systèmes Vegan et ICLS privilégient les cultures d'hiver aux cultures de printemps et qu'en plus, le système ICLS intègre également des prairies temporaires.

Or, on sait que la couverture végétale a un rôle crucial de protection contre l'érosion du sol et contre le ruissellement des eaux. Les plantes limitent cette érosion en fixant le sol avec leurs racines, en réduisant l'impact des gouttes d'eau avec leur canopée et en servant de barrière physique contre le flux des sédiments. Le ruissellement des eaux est quant à lui également limité par cette barrière physique qui stoppe aussi le flux d'eau et par la végétation qui intercepte les précipitations. Les racines des plantes aident également à structurer le sol et à améliorer sa capacité d'infiltration (Zuazo and Pleguezuelo, 2009). Cette différence en termes de couverture végétale entre les trois systèmes agricoles n'est donc pas du tout négligeable : Gyssels et al. (2005) indiquent ainsi que l'érosion du sol diminue de manière linéaire voire exponentielle (selon les modèles) lorsque la couverture végétale augmente. Il est néanmoins important de rappeler que le degré de couverture végétale établi sur toute la rotation dépend dans notre cas majoritairement des choix d'itinéraires techniques (cultures de printemps ou d'hiver, incorporation de prairies) déterminés avant même la simulation des différents systèmes.

3.1.2 Stabilité

Stock de carbone dans le sol

La Figure 3.5 compare l'évolution du stock de carbone dans la matière organique humifiée (rassemblant les fractions active et inerte) pour les trois systèmes agricoles sur trois rotations successives, tandis que la Figure 3.6 montre l'évolution de ce stock de carbone pour une seule rotation afin de voir l'influence de chaque culture. Tous les systèmes ont été initialisés en 1985, début de la première rotation, avec les mêmes variables d'état pédologiques, et démarrent donc avec le même stock de carbone.

On peut voir sur la Figure 3.5 que le système ICLS emmagasine beaucoup plus de carbone que les autres, le système Vegan étant celui qui en stocke le moins. Les prairies sont les principales responsables du stockage de carbone élevé du système ICLS.

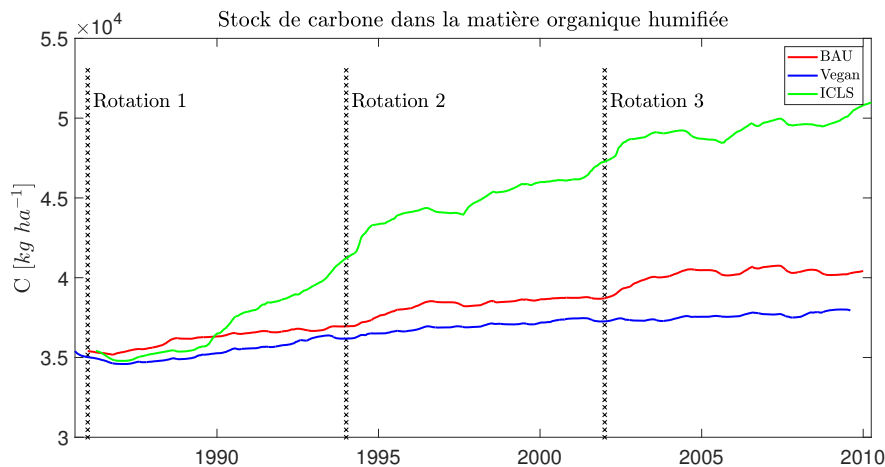
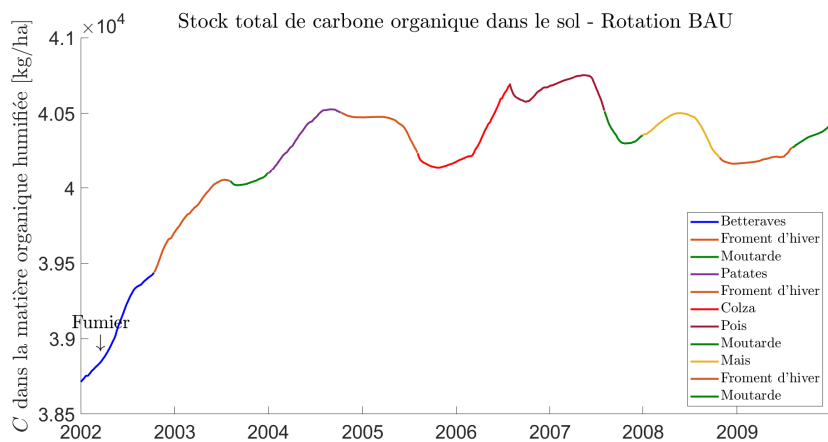


Figure 3.5 – Evolution du stock de carbone (C) dans la matière organique humifiée (fractions active et inerte) pour les trois systèmes sur trois rotations successives

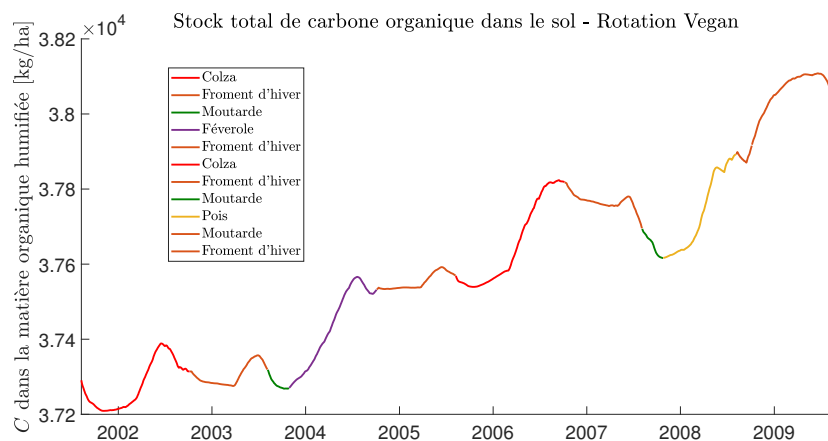
On voit sur la Figure 3.6c que les prairies temporaires permettent de stocker environ 1.5 t C ha^{-1} entre 2008 et 2010, soit $0.75 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Cela est en accord avec Soussana et al. (2004) qui estiment que la conversion d’une culture en prairie permet de stocker en moyenne $0.5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, avec une fourchette de $0.3\text{-}0.8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Soussana et al., 2004). Dans le cadre de ce travail, nous avons simulé des prairies constituées uniquement de fétuque (pour les raisons invoquées à la Section 2.3.3), mais il serait intéressant de simuler des prairies multi-espèces, qui séquestrent encore plus de carbone (Yang et al., 2019).

On voit également sur la Figure 3.6a et surtout sur la Figure 3.6c que le stock de carbone dans le sol augmente également beaucoup après l’épandage de fumier, ce qui explique les mauvaises performances du système Vegan, ce dernier n’en utilisant pas. Ceci est en accord avec la littérature scientifique, la méta-analyse de Maillard et Angers (2014) expliquant par exemple que le taux de carbone organique dans le sol est supérieur lorsqu’il y a épandage de fumier, ceci étant dû à l’apport direct de carbone du fumier mais également à l’apport indirect dû à l’augmentation de production primaire incluant les racines et les résidus de culture (Maillard and Angers, 2014).

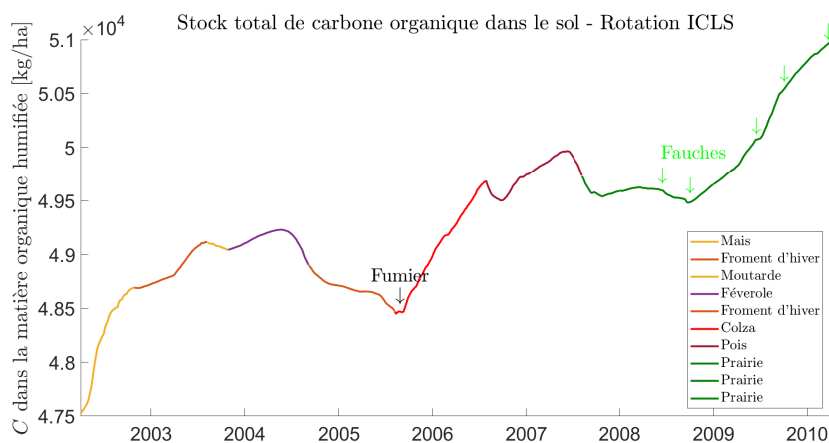
Mis à part les prairies et le fumier, il est difficile de distinguer l’influence spécifique de chaque culture sur le stock de carbone dans le sol, ceci variant fort d’une année à l’autre. On note néanmoins une légère augmentation de ce dernier après la destruction des intercultures de moutarde, qui sont laissées au sol et suivies par un déchaumage.



(a) Stock de carbone (C) dans la matière organique humifiée pour la rotation BAU (2001-2009)



(b) Stock de carbone (C) dans la matière organique humifiée pour la rotation Vegan (2001-2009)



(c) Stock de carbone (C) dans la matière organique humifiée pour la rotation ICLS (2001-2009)

Figure 3.6 – Influence de chaque culture sur le stock de carbone dans la matière organique humifiée, pour chacun des systèmes agricoles

Stocks d'azote et d'eau dans le sol

La Figure 3.7 montre l'évolution du stock d'azote (NO_3) dans le sol pour les trois systèmes sur trois rotations successives. On y aperçoit directement les trois très importants pics d'azote du système ICLS correspondant aux épandages de fumier ponctuels, ce qui est la conséquence du choix de modélisation effectué de simuler les déjections ovines en un unique épandage de fumier par rotation. On voit ainsi sur la Figure 3.7 que les pics d'azote durent très peu de temps : le sol ne bénéficie que peu de cet apport dont une bonne partie est lixiviée. Ce choix de modélisation a été décidé par souci de simplicité et de concision, mais comme on le verra également plus tard lors de l'étude des stress azotés, il serait intéressant de tester différentes modélisations avec d'autres modalités de simulation des déjections ovines, par exemple en étalant celles-ci en plusieurs fois pour homogénéiser le stock d'azote dans le sol.

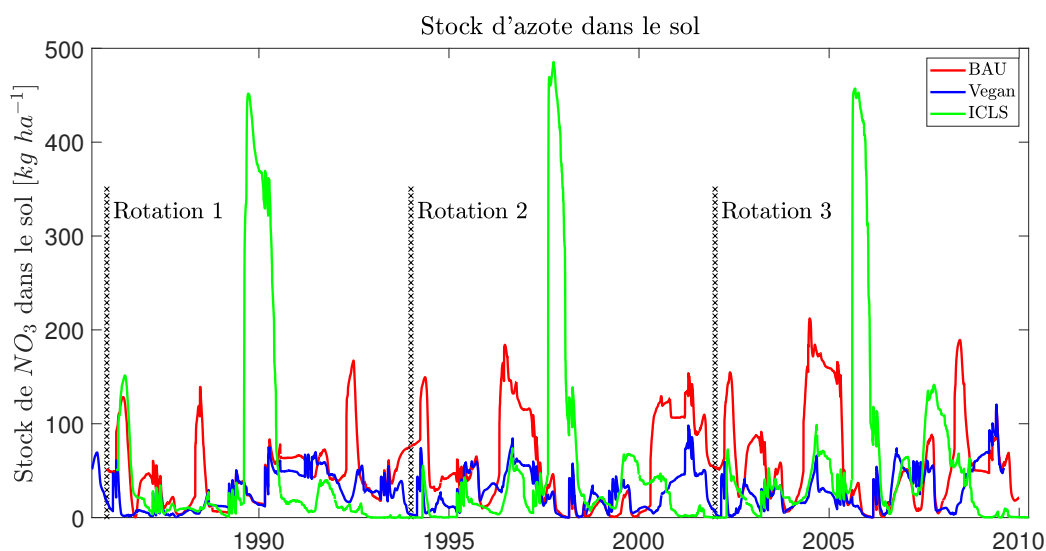


Figure 3.7 – Evolution du stock d'azote (NO_3) dans le sol pour les trois systèmes sur trois rotations successives

La Figure 3.8 montre l'évolution du stock d'eau dans le sol pour les trois systèmes (un agrandissement pour une seule rotation est disponible en Annexe C). Le principal enseignement de la Figure 3.8 est qu'il n'y a pas de différence majeure concernant le stock d'eau dans le sol entre les trois systèmes et qu'il n'y a pas une culture qui se distingue par sa consommation. On aperçoit néanmoins sur l'agrandissement de la Figure C.5 de l'Annexe C que le stock d'eau dans le sol varie moins pour le système ICLS par rapport aux deux autres systèmes.

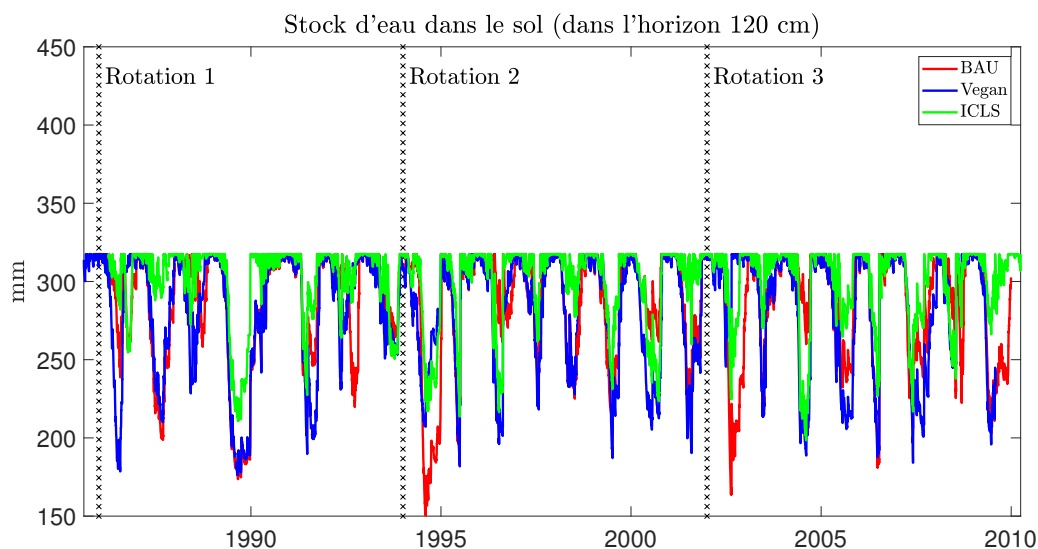


Figure 3.8 – Evolution du stock d’eau dans le sol (dans l’horizon 120 cm) pour les trois systèmes sur trois rotations successives. Agrandissement à la Figure C.5 dans l’Annexe C.

Stress hydrique et thermique

La Figure 3.9 représente l’influence des stress hydrique et thermique pour chaque système agricole et durant chacune des trois rotations successives. Cette influence est exprimée en additionnant le nombre de jours durant lesquels le stress a été supérieur à un certain seuil. Le stress hydrique représenté² réduit l’efficacité d’utilisation de la radiation (RUE, pour *Radiation Use Efficiency*) et la transpiration lorsqu’il n’y a pas assez d’eau dans la zone racinaire : on a ici fixé le seuil à 30%, c’est-à-dire qu’un jour est considéré comme sous stress hydrique lorsque le modèle réduit de 30% la RUE et la transpiration (voir Section 2.4 pour le processus de décision de ces seuils). Le stress thermique³, quant à lui, affecte également la RUE lorsque la température est trop basse ou trop élevée : le seuil a ici été fixé à 50%.

On peut voir sur la Figure 3.9 que le système ICLS est significativement moins sensible ($p < 0.05$) au stress hydrique que les deux autres systèmes, comme on pouvait s’y attendre lors de l’étude de l’évolution du stock d’eau dans le sol. Les systèmes Vegan et BAU ne sont quant à eux pas significativement différents ($p > 0.1$) même si le système Vegan a toujours moins de jours considérés comme sous stress hydrique. On peut expliquer cette hiérarchie en se rappelant que le système BAU est plus productif que le système Vegan

2. Il s’agit de la variable $1 - swfac$ dans le modèle STICS. Voir Annexe B pour plus de détails.

3. Il s’agit de la variable $1 - ftemp$ dans le modèle STICS. Voir Annexe B pour plus de détails.

qui lui est plus productif que le système ICLS (Figure 3.2) : or, au plus un système est productif, au plus il transpirera (via ses cultures) et donc au plus il prélèvera de l'eau, induisant potentiellement un stress hydrique plus tard dans la saison. On peut également noter que le stress hydrique est réparti de manière assez homogène entre les cultures de chaque système, mais on peut quand même pointer les pommes de terre, le pois et le maïs de la rotation BAU et les prairies de la rotation ICLS comme étant particulièrement impactées par ce stress hydrique (voir Figure C.6 de l'Annexe C pour plus de détails).

En ce qui concerne le stress thermique, le système BAU est significativement beaucoup plus touché ($p < 0.01$) mais il n'y a pas de différence significative entre les systèmes Vegan et ICLS ($p > 0.1$). Les cultures qui étaient particulièrement impactées par le stress hydrique le sont également par le stress thermique : on pointe sur la Figure C.7 de l'Annexe C le maïs, le pois et les pommes de terre du système BAU et le pois et les prairies du système ICLS comme étant particulièrement impactées par le stress thermique.

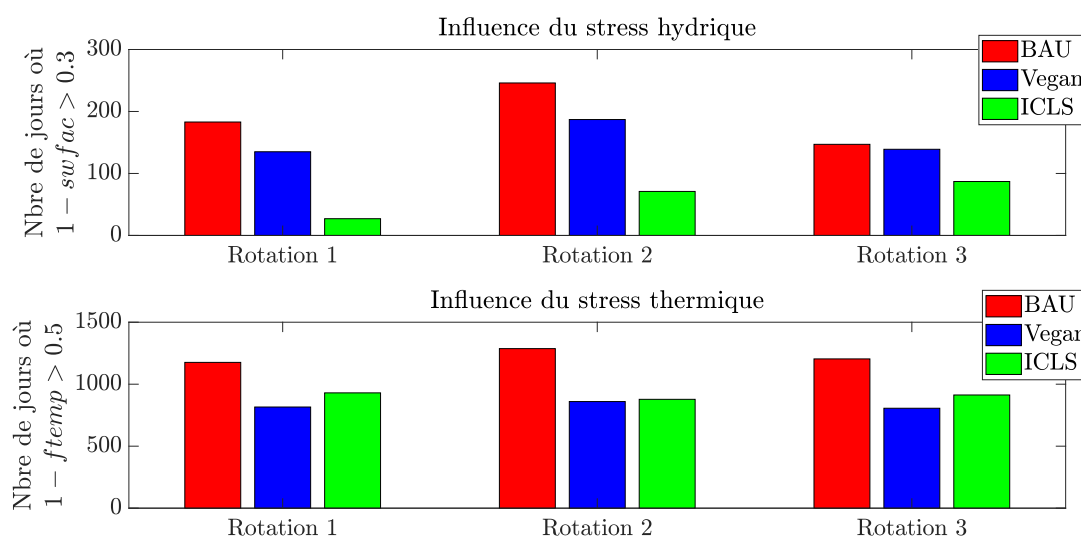


Figure 3.9 – Influence des stress hydrique (par insuffisance d'eau) et thermique (par température insuffisante ou excessive). La figure indique, pour chaque système agricole et durant chacune des trois rotations successives, le nombre de jours durant lesquels le stress a été supérieur à un certain seuil (respectivement 30% et 50% pour les stress hydrique et thermique).

Stress azoté

La Figure 3.10 représente l'influence du stress azoté pour chaque système agricole et durant chacune des trois rotations successives. Comme pour les autres stress, on a ici

représenté le nombre de jours où le stress⁴ était supérieur au seuil de 30%. On aperçoit directement que le système ICLS subit beaucoup plus l'influence du stress azoté, avec une différence très significative ($p < 0.01$). Cela est en très grande partie dû aux prairies, qui subissent un stress azoté d'au moins 30% plus de 58% du temps. Cela est une conséquence du choix de ne pas leur fournir de fertilisation azotée minérale, et de concentrer l'apport des déjections ovines en un seul épandage qui a lieu en Année 4 de la rotation : il n'y a donc plus assez d'azote pour les prairies. D'autres modalités de simulation ont été testées, notamment de séparer cet apport de fumier simulant les déjections en deux parties, une partie étant épandue juste avant le semis de la prairie : cela réduisait le stress azoté de cette dernière, mais ce stress restait conséquent. Comme cela sera discuté par la suite, il a été décidé de ne pas chercher à optimiser les itinéraires techniques dans le cadre de ce travail, ceci pouvant donner lieu à d'autres longues discussions sur l'influence de telle modalité de travail du sol, fertilisation, semis, etc., mais une telle étude constitue donc une piste de réflexion intéressante.

Il y a une faible différence dans l'influence du stress azoté entre les systèmes BAU et Vegan, ce dernier étant toujours un peu plus stressé, mais cette différence n'est pas significative ($p = 0.08$). Mis à part les prairies, les stress azotés sont assez partagés entre les différentes cultures (voir Figure C.8 de l'Annexe C pour plus de détails).

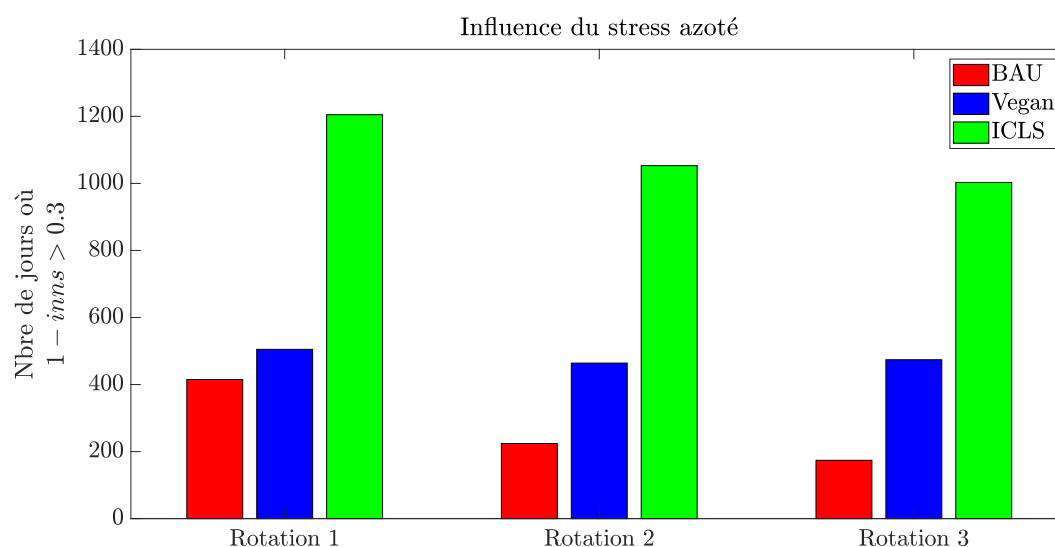


Figure 3.10 – Influence du stress azoté. La figure indique, pour chaque système agricole et durant chacune des trois rotations successives, le nombre de jours durant lesquels le stress a été supérieur au seuil de 30%.

4. Il s'agit de la variable $1 - inns$ dans le modèle STICS. Voir Annexe B pour plus de détails.

Rendements de froments d'hiver

On termine cette analyse de la stabilité par une comparaison des rendements de froment d'hiver, qui ont été volontairement placés en Années 2 et 4 de chacune des rotations afin qu'ils soient soumis au même climat. Les itinéraires techniques de ces froments d'hiver sont également identiques pour chacune des rotations, et la différence entre les rendements s'expliquera donc par l'état et la richesse du sol qui varie en fonction des antécédents cultureux.

La Figure 3.11 compare ces rendements de froment d'hiver pour trois rotations successives sur la période 1985-2009. Aucune différence significative systématique (chacun des 6 froments tenant lieu de répétition) n'a été relevée entre les trois systèmes ($p \gg 0.1$), mais il semble que, de manière générale, les rendements du système BAU sont un peu plus élevés. On peut néanmoins voir sur la Figure 3.12 que la variabilité des rendements du système BAU est également un peu plus élevée, surtout lorsque l'on considère la matière sèche : ceci semble indiquer, même si à nouveau cela n'est pas statistiquement significatif, que le système plus "spécialisé" BAU est plus performant mais également plus sensible aux aléas climatiques.

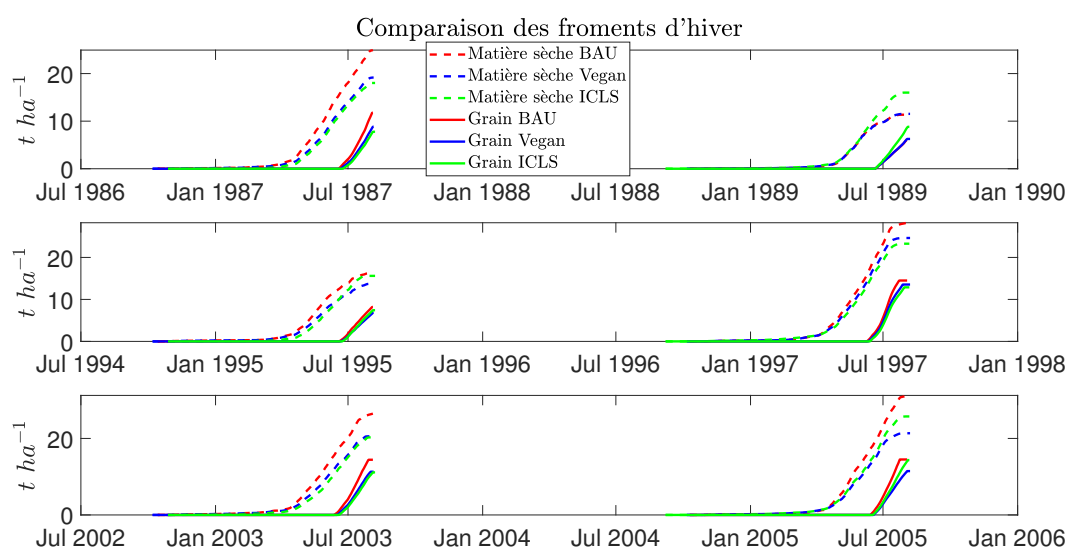


Figure 3.11 – Comparaison des rendements des froments d'hiver en Années 2 et 4 de chacune des rotations sur la période 1985-2009.

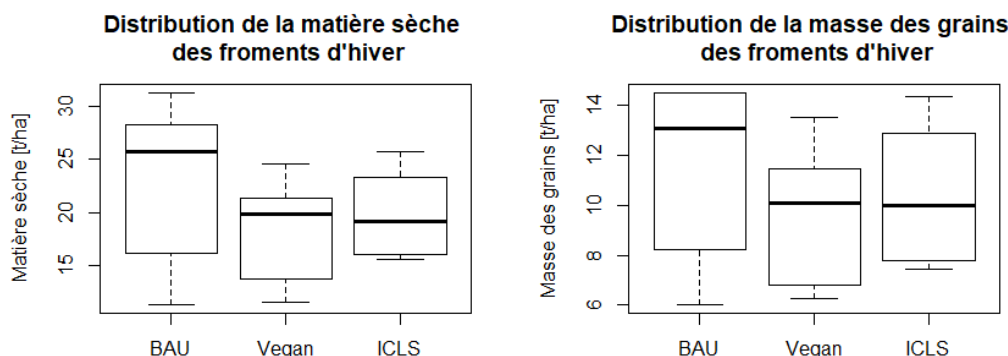
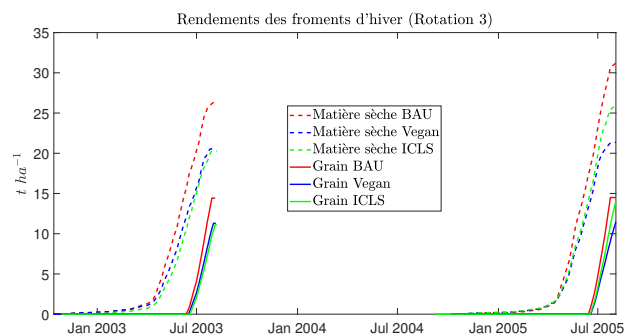


Figure 3.12 – Distribution des rendements de froment d’hiver pour chacun des systèmes agricoles. Pour chaque système sont recensés 6 rendements (en Années 2 et 4 de chacune des trois rotations successives).

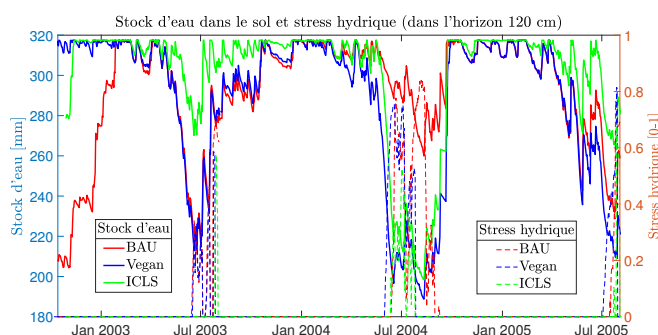
Afin d’essayer de constater quelles sont les variables d’état influant sur ces rendements de froment d’hiver, la Figure 3.13 compare l’évolution de certaines de ces variables d’état avec l’évolution du rendement. Sur la Figure 3.13b sont représentés le stock d’eau dans le sol et le stress hydrique (voir précédemment et Annexe B pour plus de détails). Ce stress hydrique réduit l’efficacité d’utilisation de la radiation (*RUE*, *Radiation Use Efficiency*) et la transpiration. Sur les Figures 3.13c et 3.13d sont respectivement représentés les stocks de carbone et d’azote dans le sol.

Nielsen et Halvorson (1991) indiquent que la disponibilité en eau dans le sol et la fertilité azotée sont les principaux facteurs limitant le rendement du froment d’hiver, mais expliquent qu’ils sont fortement liés : une meilleure fertilité azotée peut stimuler la croissance racinaire, augmentant la quantité d’eau dans le sol disponible pour la plante et réduisant donc son potentiel stress hydrique. Cependant, une plus grande fertilité azotée augmente également la biomasse aérienne de la plante et donc sa transpiration : on constate ainsi qu’un équilibre doit être établi entre les stocks d’eau et d’azote dans le sol pour limiter les stress et garantir un bon rendement final (Nielsen and Halvorson, 1991).

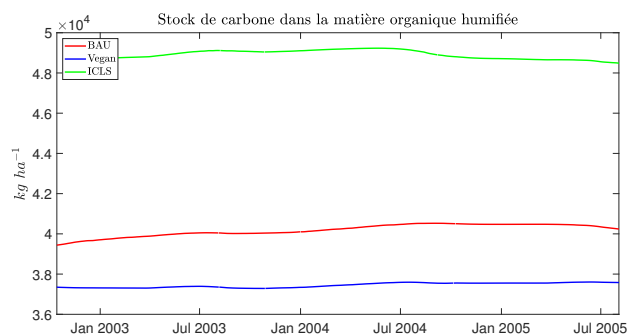
Dans notre cas, la variable critique est le stock d’azote dans le sol. En effet, on voit sur la Figure 3.13 qu’en 2003, le système ICLS subit moins le stress hydrique et a un stock de carbone dans le sol plus élevé, mais performe moins bien en ce qui concerne le rendement. Il est fort probable que c’est le stock d’azote dans le sol, plus faible que pour le système Vegan, qui l’a pénalisé. On peut tirer les mêmes conclusions de la saison culturale 2004-2005 : le système ICLS a là un meilleur stock d’azote dans le sol que le système Vegan, et obtient donc un rendement plus élevé. Pour les deux saisons, c’est le système BAU qui obtient les meilleurs rendements, malgré le fait qu’il semble légèrement plus subir le stress hydrique. On peut donc supposer que la disponibilité en eau était toujours suffisante pour soutenir les niveaux d’azote dans le sol présents, rendant ce dernier facteur le plus limitant.



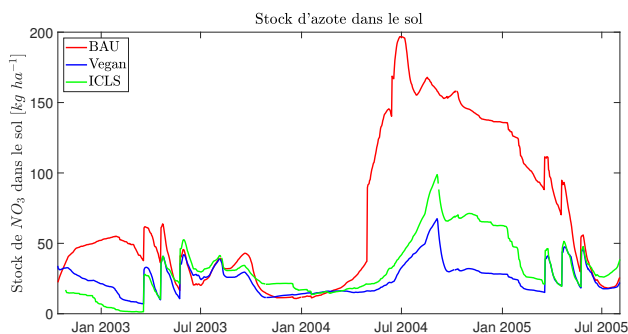
(a) Rendements des froments d'hiver pour la 3ème rotation successive



(b) Stock d'eau dans le sol (en traits pleins) et stress hydrique (en pointillés; 0 = stress nul, 1 = stress maximal)



(c) Stock de carbone dans le sol



(d) Stock d'azote dans le sol

Figure 3.13 – Comparaison des rendements de froment d'hiver en lien avec les stocks d'eau, de carbone et d'azote dans le sol pour la période de temps englobant les froments d'hiver de la 3ème rotation successive (2002-2005)

3.1.3 Environnement

La Figure 3.14 compare les émissions de CO_2 et N_2O liées aux trois rotations, avec une différenciation des émissions liées à chaque Unité de Simulation (associée à une culture ou une prairie).

Les émissions de CO_2 liées aux prairies de la rotation ICLS sont particulièrement élevées. Les chiffres sont néanmoins cohérents avec la littérature scientifique : Langeveld et al. (1997) ont estimé expérimentalement les émissions nettes de CO_2 d'une prairie néerlandaise à $(11 \pm 3) \times 10^3$ kg par hectare par an (Langeveld et al., 1997). Sur la Figure 3.14, ce chiffre doit être comparé avec les émissions de la deuxième Unité de Simulation⁵, qui dure exactement 1 an. Les émissions de CO_2 liées à cette deuxième Unité de Simulation sont de 9.538×10^3 kg par hectare par an, ce qui est donc cohérent avec les résultats de Langeveld et al. (1997). Sur la Figure 3.14, les émissions de N_2O annuelles liées à une prairie (deuxième Unité de Simulation) sont en moyenne (sur les trois rotations ICLS successives) de $0.9367 \text{ kg ha}^{-1}$: cela est en deçà d'une estimation de Soussana et al. (2007) qui indiquent une émission moyenne liée aux prairies de $2 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Soussana et al., 2007). Cette valeur assez basse peut s'expliquer par le fait que la fertilisation azotée est nulle⁶ et que les émissions de N_2O liées aux prairies dépendent principalement de celle-ci (Lemaire et al., 2016).

Il aurait été possible de valider tous ces chiffres en les comparant à la littérature scientifique. Cela ne poserait pas de difficulté particulière mais sortirait des limites de ce travail. Nous ne comparons donc pas ici les chiffres de manière absolue mais de manière relative, entre les systèmes agricoles et entre les périodes temporelles évaluées (changement climatique). Cela est pertinent puisque le même modèle est utilisé, et que donc son biais (s'il y en a) peut être estimé constant⁷.

On voit sur la Figure 3.14 que les émissions cumulées de CO_2 du système ICLS sont significativement plus élevées ($p < 0.01$ quand on compare répétition par répétition et non pas les moyennes) que celles des systèmes BAU et Vegan, qui eux ne présentent pas de différence significative ($p \gg 0.05$). Il n'y a par contre aucune différence significative ($p \gg 0.05$) entre les systèmes pour les émissions cumulées de N_2O .

5. La première Unité de Simulation liée aux prairies ne dure que quelques mois et la troisième dure 16 mois.

6. Pour rappel, toutes les déjections ovines sont simulées par un apport de fumier juste avant la culture de colza (voir l'itinéraire technique en Annexe A).

7. Cette hypothèse est néanmoins quelque peu simplificatrice, le biais pouvant dépendre de très nombreux paramètres comme le type de culture, le travail du sol, la couverture végétale, etc.

Mis à part les prairies déjà évoquées, aucune culture n'émet particulièrement beaucoup plus de gaz à effet de serre que les autres. On note que les émissions de N_2O liées au colza du système ICLS sont assez conséquentes, mais cela est directement dû au fait que l'apport de matière organique simulant le pâturage de toute la rotation est effectué juste avant le semis de cette culture (voir Annexe A).

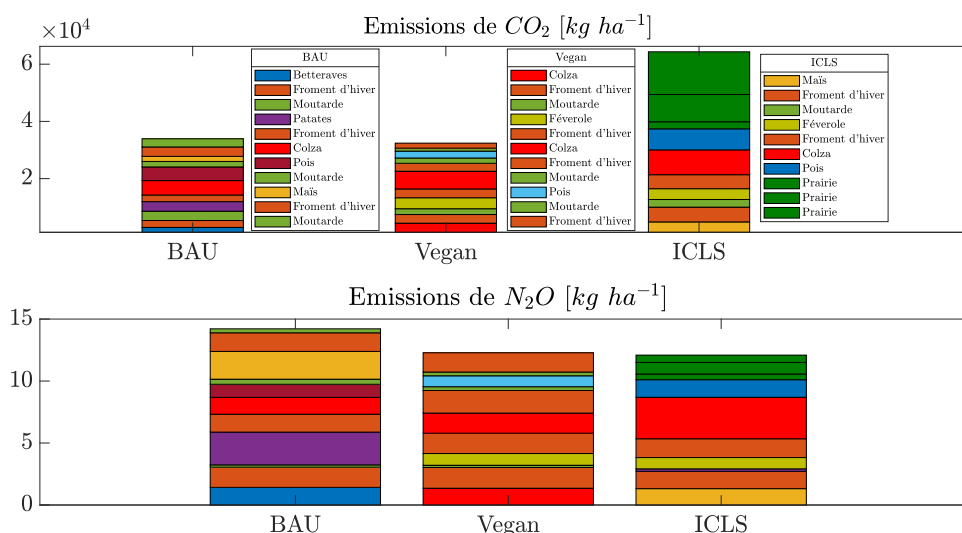


Figure 3.14 – Comparaison des émissions de CO₂ et N₂O liées aux trois rotations. Les émissions de chaque rotation sont exprimées en kilogrammes par hectare et sont moyennées par rapport aux trois rotations simulées sur la période 1985-2009.

3.1.4 Alimentation

La Figure 3.15 compare les performances alimentaires des trois systèmes agricoles via la répartition des calories dans un régime alimentaire optimisé à partir de leurs productions (voir Section 2.4 pour la méthodologie) et via le nombre de personnes nourries à travers ce régime. Le Tableau 3.1 indique la composition du troupeau nécessaire pour le régime optimal.

On peut voir que le système BAU est celui qui nourrit le plus de personnes, avec près de 25 personnes nourries par hectare par an, contre 23 personnes pour le système Vegan et 14 pour le système ICLS. Dans les systèmes BAU et Vegan, plus de la moitié des calories sont fournies par des céréales, tandis que le système BAU profite également beaucoup de sa production de pommes de terre, très énergétiques. Le système ICLS fournit lui un régime plus "équilibré", avec beaucoup de lait fourni par les vaches laitières nourries par les prairies.

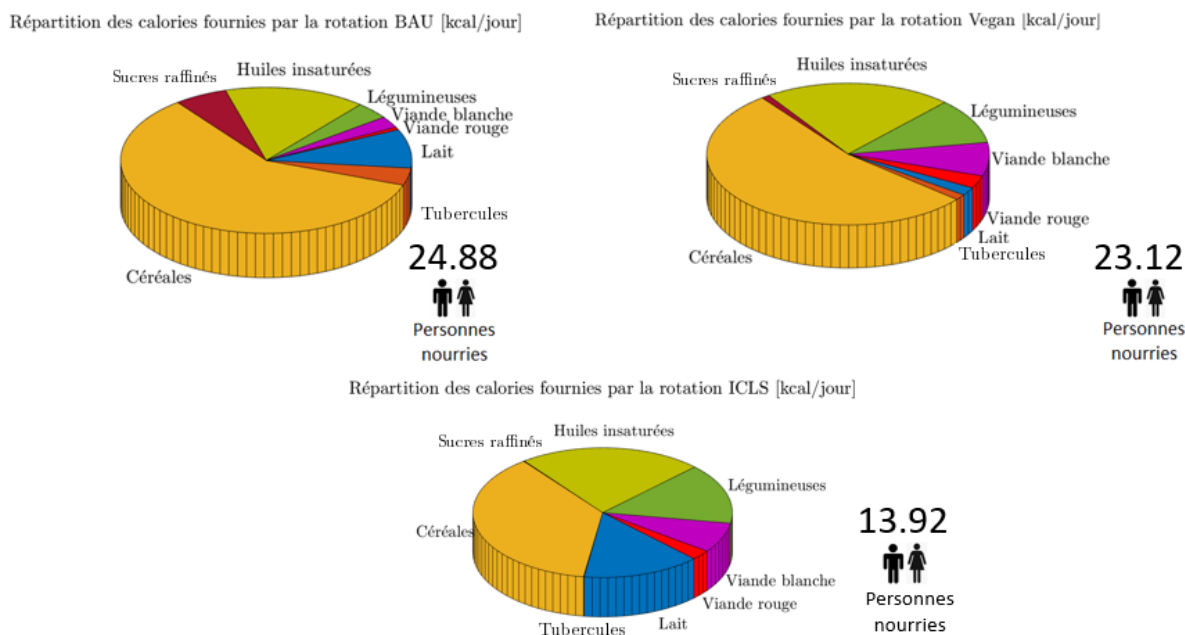


Figure 3.15 – Comparaison des performances alimentaires des systèmes agricoles, via la répartition des calories dans un régime alimentaire optimisé à partir de leurs productions et via le nombre de personnes nourries (par hectare et par an) à travers ce régime

Les trois régimes optimaux sont néanmoins composés de produits animaux : on voit dans le Tableau 3.1 que le système ICLS favorise les ruminants (ce qui s’explique évidemment par la présence des prairies) et que le système Vegan favorise les porcs, tous les systèmes ayant en commun d’utiliser beaucoup de poulets. Il est intéressant de constater que le système Vegan utilise également énormément de poules afin d’obtenir des oeufs : les trois systèmes n’utilisent donc pas du tout les mêmes proportions poulets/oeufs, contrairement à l’étude de De Clerck et al. (2021) dans laquelle les rotations étudiées favorisaient majoritairement les poulets, le modèle considérant alors qu’il était plus efficace d’utiliser l’énergie capturée par la biomasse des cultures pour produire de la viande plutôt que des oeufs (De Clerck et al., 2021).

De plus, l’incorporation d’animaux au sein du système décidée systématiquement par le modèle, même pour le système Vegan dont les cultures sont *a priori* pensées dans le but de se passer de l’élevage, interroge sur la pertinence agronomique et environnementale (sans entrer dans des questions d’éthique) de ce choix.

Composition du troupeau	Système BAU	Système Vegan	Système ICLS
Vaches laitières	3.2	0.7	3.4
Boeufs laitiers	2.1	0.4	2.3
Agneaux	0	0.1	3.6
Porcs	0	15.7	2.3
Boeufs viandeux	0	0	1.3
Poulets	197.6	377.3	372.9
Poules	0	123.9	1.8

Table 3.1 – Composition du troupeau pour le régime alimentaire optimal des trois systèmes

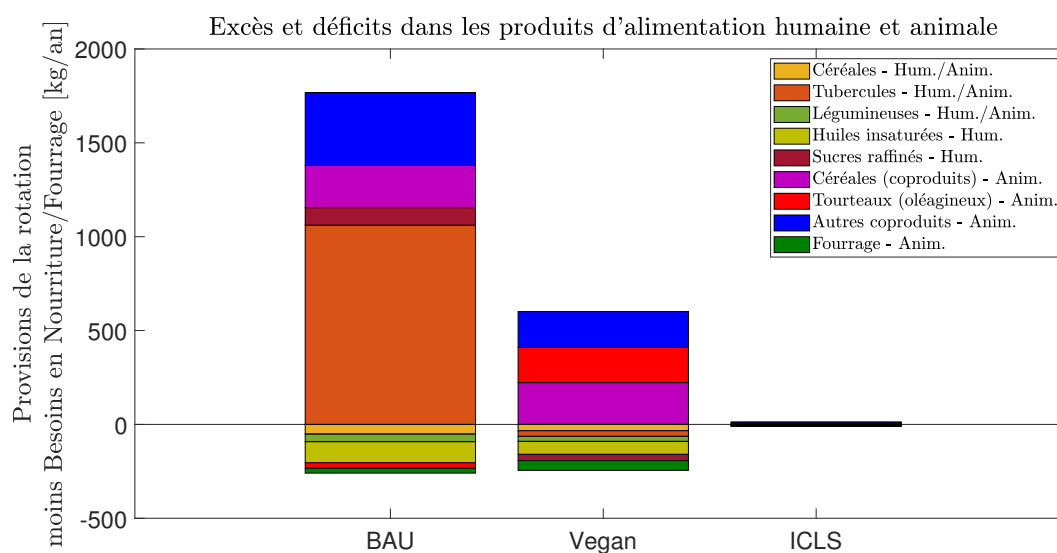


Figure 3.16 – Excès et déficits dans les produits d'alimentation humaine et animale dans les trois régimes alimentaires optimisés à partir des productions de chaque système agricole

La Figure 3.16 montre les excès et déficits dans les produits d'alimentation humaine et animale dans les trois régimes alimentaires optimaux. C'est là que la différence est la plus flagrante : le système BAU produit en larges excès mais nécessite également le plus d'importations, manquant notamment d'oléagineux et de fourrage. C'est par contre le seul système en excès de sucres raffinés, grâce à la présence des betteraves, là où les autres systèmes sont en déficit. La tendance est identique pour le système Vegan, qui doit par exemple importer des tubercules pour leur apport énergétique. A l'inverse, le système ICLS est extrêmement stable : il ne produit que très peu en excès, mais ne nécessite également que très peu d'importations. C'est donc ce système qui est le plus auto-suffisant,

arrivant le mieux à valoriser ses productions. Les animaux composant son troupeau, plus nombreux (en termes d'UGB), et principalement les ruminants, sont à même de convertir les coproduits non comestibles pour l'humain en lait et viande principalement, en accord avec De Clerck et al. (2021). Dans un monde où l'on veut recentrer le système alimentaire et diminuer la part des transports de marchandises, le système ICLS apparaît de ce point de vue-là comme le plus optimal.

3.2 Evolution future des systèmes agricoles

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous étudions l'évolution des systèmes agricoles sous des conditions climatiques futures, prédites selon les deux scénarios climatiques reconnus RCP4.5 et RCP8.5 (voir Section 2.4) pour les périodes de temps 2045-2069 et 2075-2099.

3.2.1 Evolution des indicateurs de productivité

La Figure 3.17 montre l'évolution de la production (en tonnes à l'hectare) des trois systèmes sous différents horizons temporels et différents scénarios climatiques. Le Tableau C.4 de l'Annexe C reprend toutes les productivités (exprimées en masse fraîche) pour chacune des cultures de chaque rotation et pour chaque scénario climatique.

La tendance générale, valable pour chacun des systèmes agricoles, est que leur production totale augmentera d'ici à la fin du siècle. Cela s'explique principalement par l'effet fertilisant du CO_2 : des concentrations atmosphériques élevées de CO_2 augmentent la photosynthèse et l'efficacité d'utilisation de l'eau (*water use efficiency*) par la plante (IPCC, 2013).

Comme expliqué dans la Section 2.3, cet effet est pris en compte par le modèle STICS via le facteur FCO_2 , augmentant l'efficacité d'utilisation de la radiation en fonction de la concentration en CO_2 . Nous avons vu à la Section 1.4 que les plantes, en fonction de leur nombre d'atomes de carbone permettant de fixer le CO_2 de l'atmosphère, réagissent différemment à une augmentation de la concentration de celui-ci (Seguin, 2010). Les plantes en C_3 voient leur efficacité d'utilisation de la radiation augmenter plus que celle des plantes en C_4 , ce qui est traduit dans le modèle par les valeurs du facteur FCO_2 plus élevées pour les plantes en C_3 . Ces valeurs sont reprises dans le Tableau C.5 de l'Annexe C, selon les périodes de temps et scénarios climatiques considérés et pour deux plantes différentes : le maïs, qui est une plante en C_4 , et le froment d'hiver, qui est une plante en C_3 .

On peut ainsi voir sur la Figure 3.17a que la betterave, plante en C_3 , voit sa productivité augmenter. Au contraire, le froment d'hiver, également plante en C_3 , voit sa productivité stagner, tandis que celle du maïs, plante en C_4 , augmente, surtout dans les scénarios RCP8.5 : ces deux derniers résultats sont quelque peu contraires à l'hypothèse

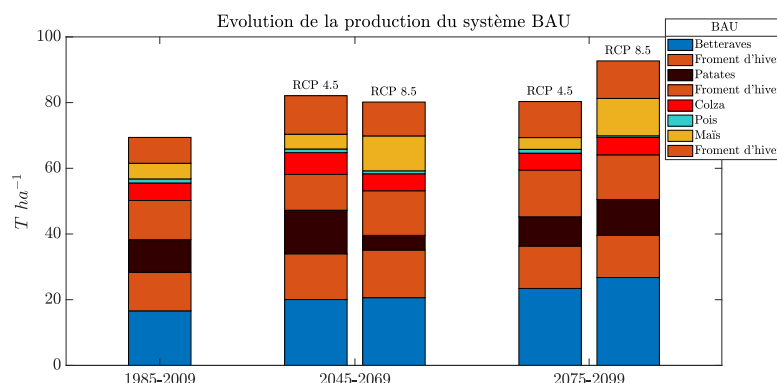
C₃/C₄ précédemment expliquée, hypothèse qui était par exemple également énoncée par l'étude de de Ridder et al. (2020) évoquée à la Section 1.4 de l'Etat de l'art qui dit que "*des cultures comme le maïs bénéficient beaucoup moins de l'effet fertilisant du CO₂ car elles fonctionnent déjà avec une efficacité maximale sous les concentrations de CO₂ actuelles*" (De Ridder et al., 2020). On peut donc supposer que le maïs a simplement mieux valorisé d'autres aspects environnementaux, via par exemple une meilleure résistance au stress hydrique. Le froment d'hiver, quant à lui, peut avoir été impacté négativement par les sécheresses printanières mais positivement par l'augmentation des températures hivernales.

La relative stagnation de la productivité du froment d'hiver a bien entendu un effet général beaucoup plus important sur la rotation Vegan, qui voit revenir cette culture tous les deux ans. Ce système agricole, qui ne contient que des cultures d'hiver, n'est donc que peu impacté par le changement climatique, comme indiqué sur la Figure 3.17b.

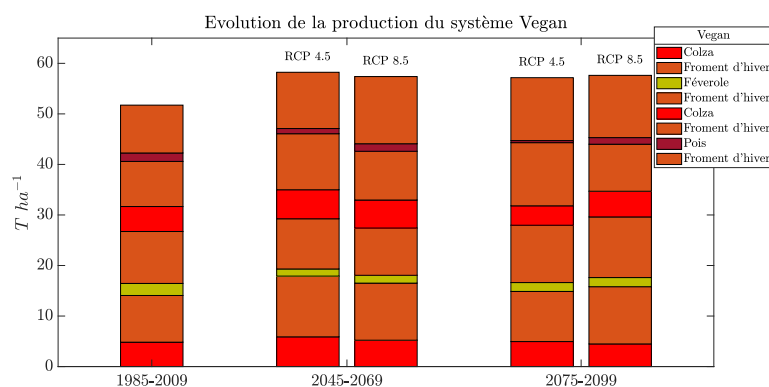
On voit finalement sur la Figure 3.17c que la productivité générale du système ICLS augmente. Cela est principalement dû à l'augmentation de la productivité du maïs et des prairies : une augmentation de la productivité de ces dernières est également notamment prédite par Fuhrer (2003), qui synthétise des études prédisant des augmentations de la production de biomasse de 8 à 30% (dépendant des espèces végétales de la prairie) face à une augmentation de la concentration en CO₂ (Fuhrer, 2003).

Les trois systèmes BAU, Vegan et ICLS connaissent donc une augmentation de leur productivité totale de respectivement 17%, 12% et 14% pour les années 2045-2069 (deux scénarios confondus) et de respectivement 25%, 11% et 29% pour les années 2075-2099 (deux scénarios confondus). Cette tendance indiquant des rendements à la hausse est donc en accord avec de nombreuses études détaillées dans la Section 1.4 de l'état de l'art, comme Kang et al. (2009) ou Iglesias et al. (2012).

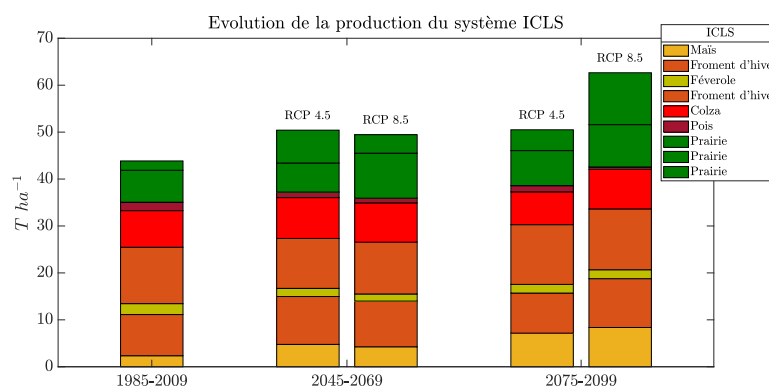
Ces résultats sont par contre bien plus positifs que Gobin (2010), qui prédit en Belgique, selon 3 scénarios climatiques différents, pour la période 2070-2100 par rapport à la période 1960-1989, une diminution du rendement de betteraves sucrières de 12 à 27% (contre, dans notre cas, une augmentation de 41% pour la période 2075-2099 (RCP4.5)), une diminution de 23 à 44% pour les pommes de terre principalement due aux sécheresses et vagues de chaleur (contre, dans notre cas, une diminution de 10% pour la période 2075-2099 (RCP4.5)), et une augmentation de 2 à 7% pour le froment d'hiver due notamment à l'augmentation des températures qui permettent une maturité des céréales plus précoce, et donc une meilleure résilience durant la floraison face aux sécheresses et stress thermiques (contre, dans notre cas, une augmentation de 21% pour la période 2075-2099 (RCP4.5) pour le système BAU) (Gobin, 2010). Il est néanmoins très important de préciser que Gobin (2010) ne prend pas en compte l'effet fertilisant du CO₂, ce qui explique que les résultats de ce travail sont bien plus positifs que ceux de Gobin (2010).



(a) Evolution de la production du système BAU sous différents horizons temporels et différents scénarios climatiques



(b) Evolution de la production du système Vegan sous différents horizons temporels et différents scénarios climatiques



(c) Evolution de la production du système ICLS sous différents horizons temporels et différents scénarios climatiques

Figure 3.17 – Evolution de la production (en tonnes à l'hectare) des trois systèmes sous différents horizons temporels et différents scénarios climatiques. On représente ici les productions pour une rotation de 8 ans, qui constituent la moyenne des productions des trois rotations simulées sur la période de 24 ans.

3.2.2 Evolution des indicateurs de stabilité

Stress hydrique, thermique et azoté

La Figure 3.18 montre l'évolution de l'influence du stress hydrique avec le changement climatique sur les trois systèmes pour chacune des trois rotations successives. On peut voir que, pour les systèmes BAU et Vegan, le stress hydrique devient globalement moins influent sous les scénarios climatiques futurs. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'avec plus de CO_2 dans l'atmosphère, l'efficacité d'utilisation de l'eau (*water-use efficiency*), définie comme le carbone gagné par la plante via la photosynthèse par unité d'eau perdue via la transpiration (Lavergne et al., 2019), augmente également : pour une molécule d'eau transpirée, la plante absorbera plus de CO_2 et produira donc plus de biomasse, satisfaisant ainsi son potentiel en consommant moins d'eau. Ces résultats sont donc très positifs par rapport à la littérature scientifique qui met en garde contre le risque élevé de stress hydrique à l'avenir, en particulier dans les régions (sub)tropicales et méditerranéennes (IPCC, 2019; World Health Organization et al., 2018; Rosenzweig et al., 2014; Iglesias et al., 2012; Zhao et al., 2017).

A contrario, pour le système ICLS, le stress hydrique devient de plus en plus influent avec le changement climatique : les prairies sont les plus touchées, ainsi que le maïs dans une moindre envergure. La vulnérabilité des prairies au stress hydrique est par exemple également prédite par Grant et al. (2014), qui conclut par expérimentation qu'une augmentation de la variabilité des précipitations diminuait le rendement d'une prairie tempérée (d'environ 19%) mais augmentait la qualité du fourrage (plus haut taux de protéine brute et plus faible contenu en fibres) (Grant et al., 2014).

La même tendance s'observe pour le stress thermique, dont l'évolution est représentée sur la Figure 3.19 : pour tous les systèmes agricoles, celui-ci tend à diminuer de plus en plus, et cela encore plus pour le scénario RCP8.5. Pour rappel, ce stress thermique impacte l'efficacité d'utilisation de la radiation (RUE). Ce stress thermique est défini dans STICS comme étant nul entre deux seuils de température, mais influent en-dessous d'une température critique T_{min} et au-dessus d'une autre température critique T_{max} (voir Annexe B), chaque température critique étant propre à chaque culture : ceci modélise le fait que des températures excessivement basses et excessivement hautes peuvent toutes deux affecter négativement la RUE (Bat-Oyun et al., 2012). On peut donc supposer que dans notre cas, le changement climatique ne fait pas passer la température beaucoup plus souvent au-dessus de T_{max} , mais que par contre celle-ci passe plus souvent au-dessus de T_{min} , réduisant ainsi le stress thermique dû à une température trop basse. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'avec de plus hautes températures, la croissance peut être plus précoce, permettant d'atteindre plus rapidement un LAI maximal et résultant ainsi en une plus haute interception de radiation solaire et donc en une plus grande RUE (ur Rahman et al., 2021).

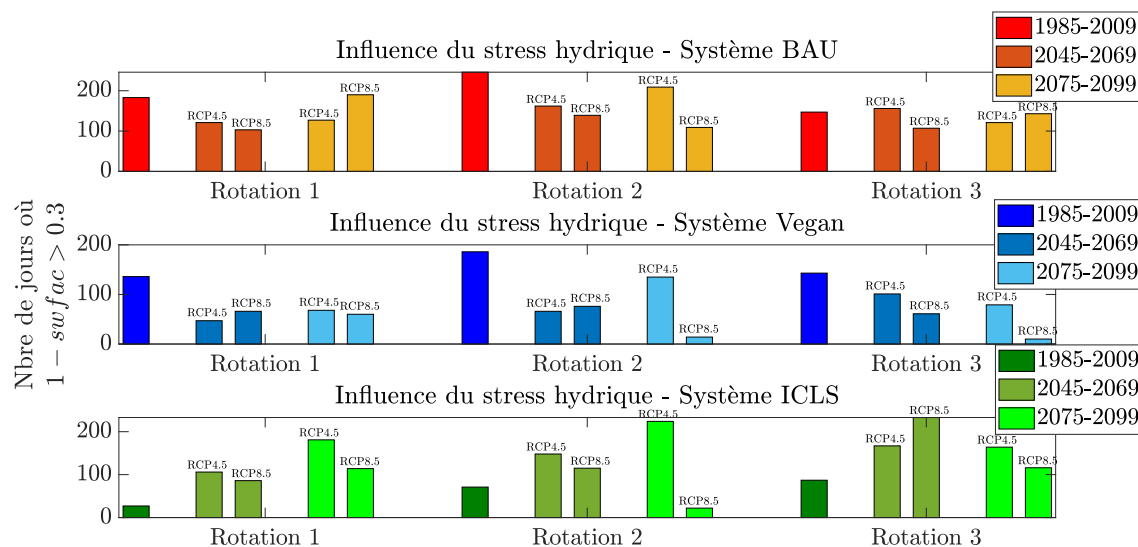


Figure 3.18 – Evolution de l'influence du stress hydrique avec le changement climatique sur les trois systèmes pour trois rotations successives

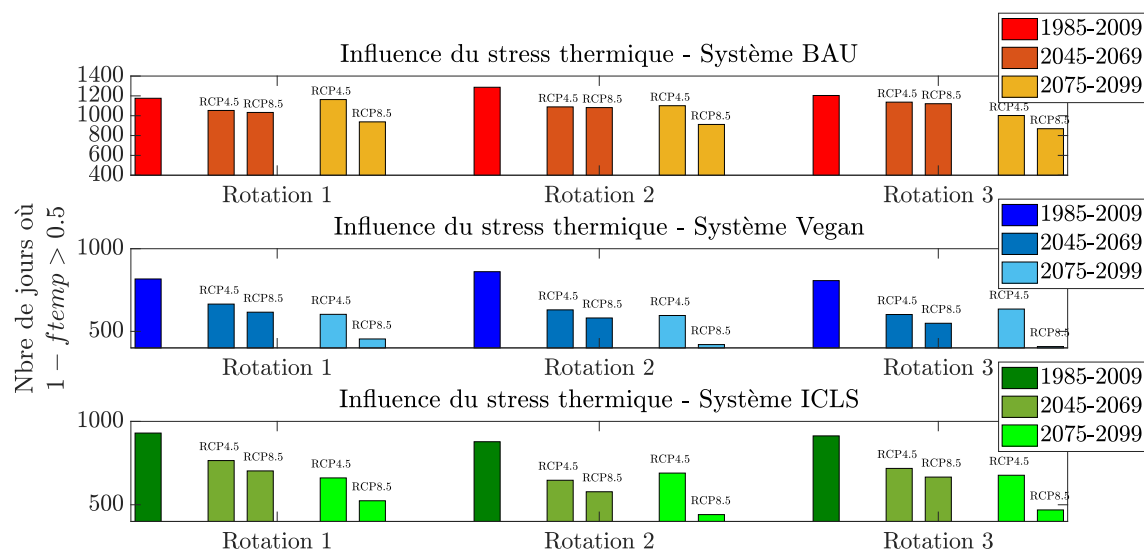


Figure 3.19 – Evolution de l'influence du stress thermique avec le changement climatique sur les trois systèmes pour trois rotations successives. Il est important de noter que les échelles sont différentes entre les sous-graphiques.

La Figure 3.20 représente l'évolution de l'influence du stress azoté. Ici, le résultat est plus nuancé : on assiste plutôt à une augmentation de ce stress dans les futures années, encore plus pour le scénario "pessimiste" RCP8.5. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une

augmentation de la biomasse, constatée à la Figure 3.17, mène à une augmentation des besoins en azote. Or, les intrants en azote (fertilisation azotée de synthèse, fumier, déjections ovines) n'ont pas augmenté, ce qui explique l'augmentation du stress azoté.

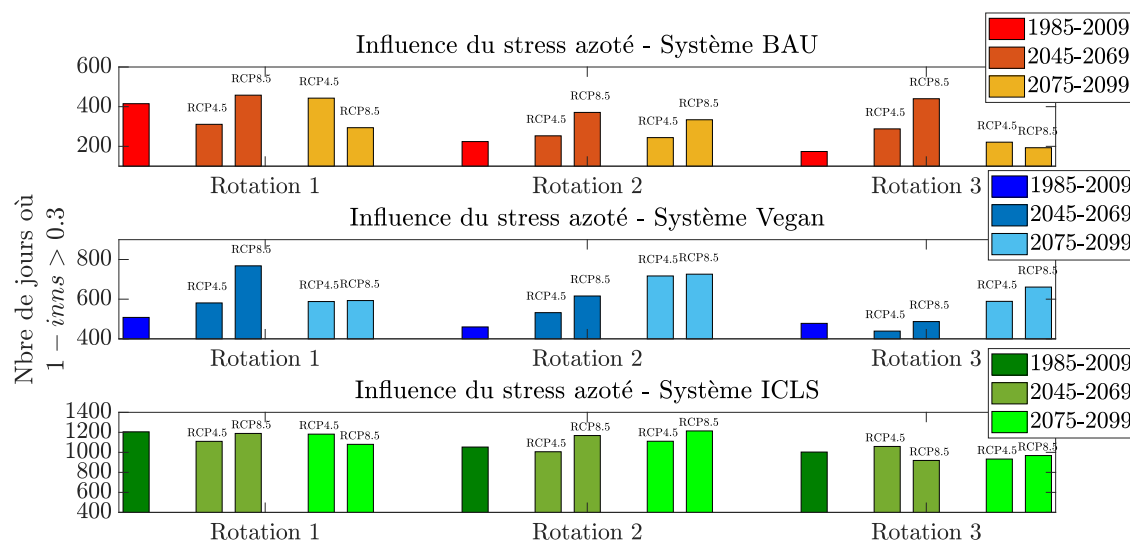


Figure 3.20 – Evolution de l'influence du stress azoté avec le changement climatique sur les trois systèmes pour trois rotations successives. Il est important de noter que les échelles sont différentes entre les sous-graphiques.

Stocks d'eau et de carbone dans le sol

La Figure 3.21 représente l'évolution du stock d'eau dans le sol avec le changement climatique. L'information principale qu'on peut tirer de cette figure est qu'il n'y a pas d'évolution significative ($p \gg 0.1$) : cela montre que la capacité de rétention d'eau est ici suffisante pour réussir à absorber les pluies qui seront, à l'avenir et donc dans les scénarios climatiques considérés, tout aussi abondantes mais plus rassemblées. Il faut rappeler que nous ne considérons pas de changement des caractéristiques du sol dans les scénarios climatiques, et que nous gardons donc un sol limoneux (voir Section 2.2) de très bonne qualité, caractéristique de la Hesbaye.

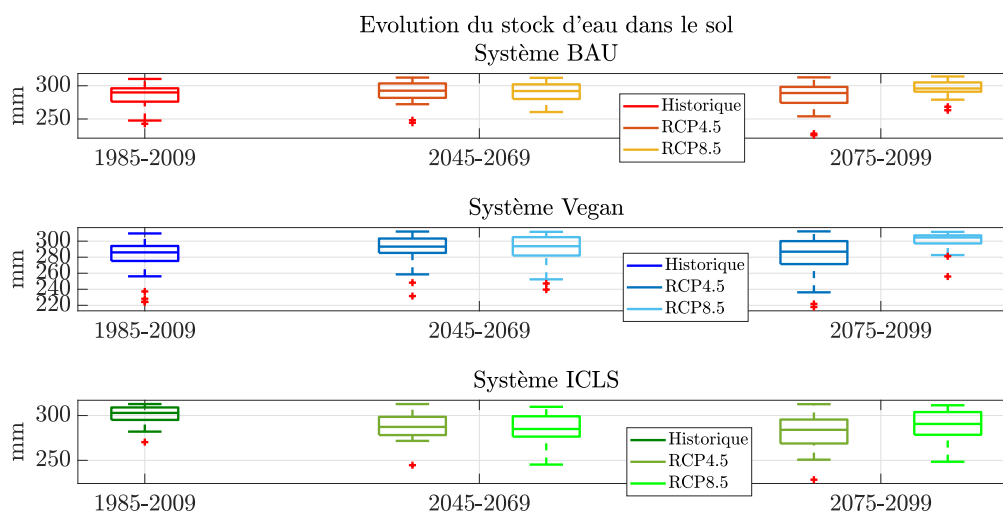


Figure 3.21 – Evolution du stock d’eau dans le sol avec le changement climatique sur les trois systèmes. Pour chacune des 5 périodes temporelles liées à un scénario climatique, le fichier d’initialisation est identique, c’est-à-dire que la période de 24 ans démarre avec le même stock d’eau dans le sol.

La Figure 3.22 montre l’évolution du stock de carbone dans la matière organique humifiée avec le changement climatique sur les trois systèmes agricoles. On observe globalement une diminution de ce stock de carbone ($p < 0.01$ au sein de chaque système entre les périodes 1985-2009 et 2075-2099 (les deux scénarios RCP confondus)), de plus en plus marquée lorsqu’on se projette loin dans le temps et pour le scénario "pessimiste" RCP8.5, ainsi qu’une augmentation de la variabilité, en particulier pour le système ICLS. Ceci peut s’expliquer par le fait que de plus hautes températures (présentes dans les scénarios climatiques futurs) entraînent une augmentation de l’activité des micro-organismes et donc accélèrent la minéralisation de la matière organique. Ce résultat est conforme avec Jones et al. (2005), qui prédisent grâce à la modélisation une diminution des stocks mondiaux de carbone dans le sol à l’horizon 2100, en expliquant que le taux de décomposition de la matière organique augmente avec les températures (Jones et al., 2005). Davidson et Janssens (2006) nuancent toutefois cette explication en développant plusieurs contraintes environnementales à la décomposition de la matière organique qui obscurcissent la sensibilité de cette décomposition face aux températures (Davidson and Janssens, 2006).

Cette diminution globale du stock de carbone dans le sol est néanmoins atténuée dans notre cas par l’augmentation des rendements cultureux, et principalement par celle de la moutarde (voir Tableau C.4 de l’Annexe C) qui est systématiquement détruite, laissée au sol et suivie par un déchaumage. Cela souligne l’importance des intercultures dans les systèmes de culture.

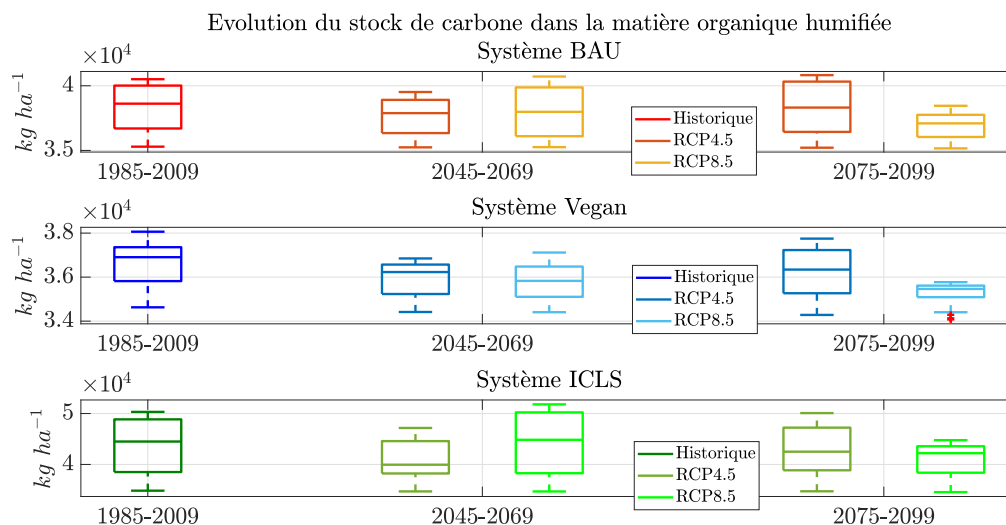


Figure 3.22 – Evolution du stock de carbone dans la matière organique humifiée avec le changement climatique sur les trois systèmes. Pour chacune des 5 périodes temporelles liées à un scénario climatique, le fichier d'initialisation est identique, c'est-à-dire que la période de 24 ans démarre avec le même stock de carbone.

3.2.3 Evolution des indicateurs environnementaux

Les Figures 3.23 et 3.24 montrent respectivement l'évolution des émissions de CO_2 et de N_2O avec le changement climatique pour les trois systèmes. On peut voir que, mis à part pour les émissions de CO_2 du système ICLS où les résultats sont plus nuancés, on assiste à une augmentation globale des émissions de gaz à effet de serre sous les futures conditions climatiques, encore plus marquée pour le scénario RCP8.5 par rapport au scénario RCP4.5. Ce résultat est en accord avec les hypothèses de rétro-action "positives" (au sens physique du terme) selon lesquelles les conséquences du changement climatique vont accentuer celui-ci (IPCC, 2013; IPCC, 2019). Il est néanmoins fort probable que ce résultat, surtout en ce qui concerne les émissions de CO_2 , est en grande partie dû à l'augmentation des rendements constatée à la Section 3.2.1 : si on met les deux en perspective, on note, entre les périodes 1985-2009 et 2075-2099 (RCP8.5) et pour les systèmes BAU, Vegan et ICLS, un changement des émissions de CO_2 liées à une rotation de respectivement +20.25%, +20.58% et -6.53% contre un changement des rendements de respectivement +30.92%, +12.13% et +40.19%. On voit ainsi que l'augmentation des rendements est supérieure à l'augmentation des émissions de CO_2 , et également que le système ICLS est, de ce point de vue-là, celui qui s'adapte le mieux au changement climatique puisqu'il augmente le plus ses rendements tout en diminuant ses émissions de CO_2 .

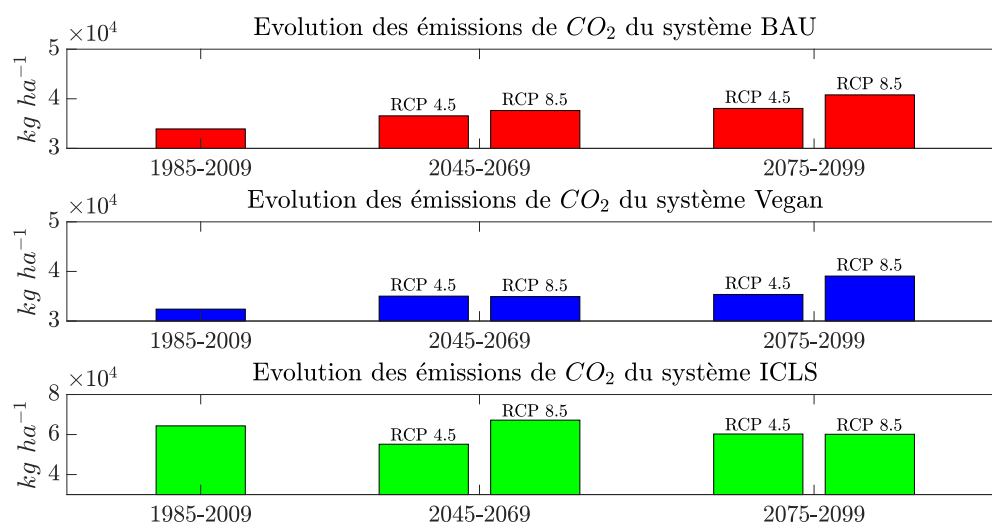


Figure 3.23 – Evolution des émissions de CO_2 avec le changement climatique pour les trois systèmes. Il est important de noter que l'échelle du graphique pour le système ICLS n'est pas identique aux deux autres.

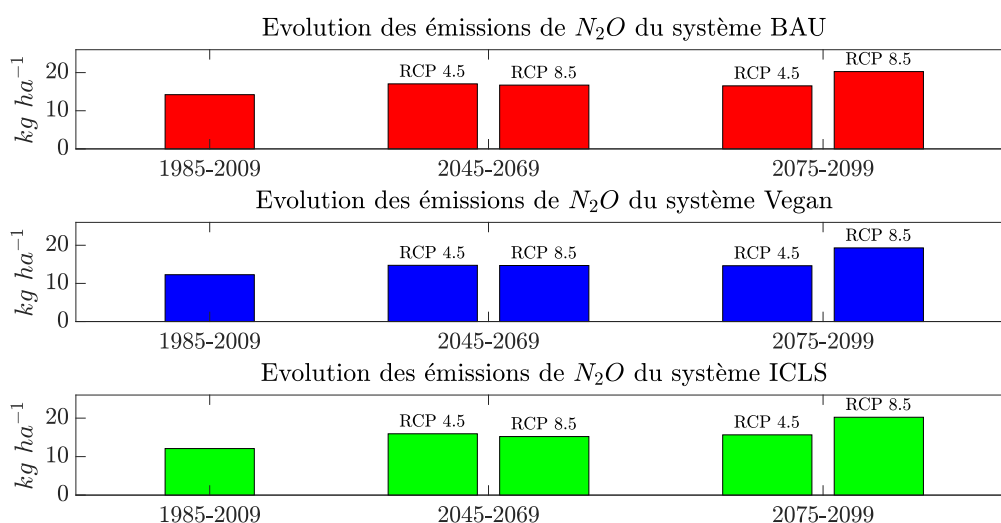


Figure 3.24 – Evolution des émissions de N_2O avec le changement climatique pour les trois systèmes.

3.2.4 Evolution des indicateurs alimentaires

La Figure 3.25 montre l'évolution du nombre de personnes nourries par chaque système agricole face au changement climatique. On peut voir que, de pair avec l'augmentation

globale des rendements constatée à la Section 3.2.1, ce nombre de personnes nourries augmente : les rotations BAU, Vegan et ICLS nourrissent respectivement 30.55%, 10.64% et 11.93% personnes de plus par hectare et par an en 2075-2099 (RCP8.5) par rapport à la période 1985-2009. Il n'y a par contre que peu de différences entre les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5.

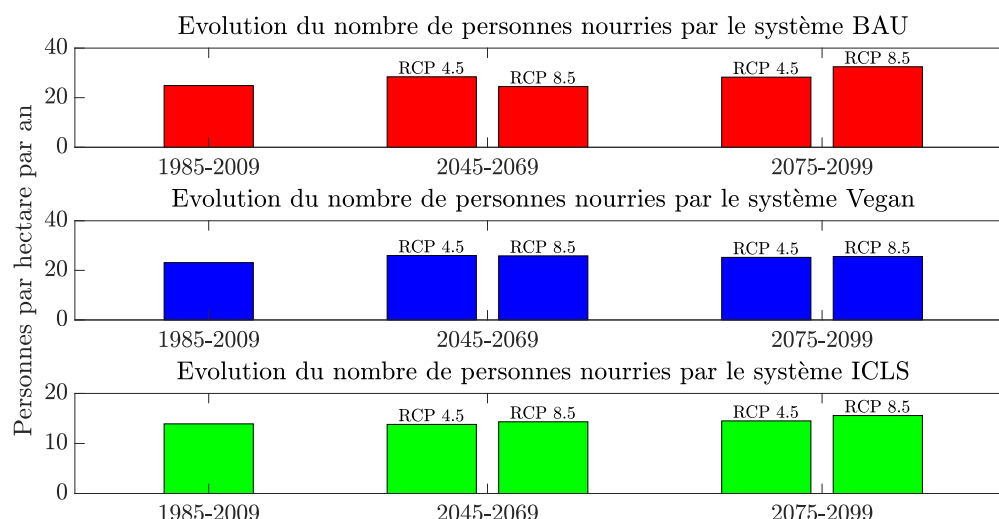


Figure 3.25 – Evolution avec le changement climatique du nombre de personnes nourries (par hectare et par an) par les trois systèmes, calculées avec le processus d’optimisation d’utilisation alimentaire de la rotation. Il est important de noter que les échelles sont différentes entre les deux premiers sous-graphiques et le troisième.

Nous n’étudions pas ici l’évolution avec le changement climatique des autres indicateurs alimentaires car ceux-ci ne varient que très peu : la composition des repas "optimaux" reste fort semblable, puisque les rendements augmentent de manière assez semblable, et les excès et déficits dans les produits alimentaires, caractérisant l’auto-suffisance, gardent les mêmes proportions mais en augmentant de manière absolue (voir Figure C.9 dans l’Annexe C). Pour la composition du troupeau "optimal" associé au régime optimisé, il est intéressant néanmoins de constater que pour la période 2075-2099 (RCP8.5), le système ICLS privilégie encore plus les ruminants, remplaçant une bonne partie des poulets par des agneaux (voir Tableau C.6 de l’Annexe C par rapport au Tableau 3.1) : ceci s’explique facilement par le résultat constaté à la Section 3.2.1 selon lequel la productivité des prairies a augmenté beaucoup plus que les autres cultures du système ICLS.

3.3 Synthèse comparative multi-critères

Dans cette dernière section, nous résumons les principales performances agronomiques, environnementales et alimentaires des trois systèmes agricoles considérés dans le cadre de ce travail.

3.3.1 Conditions climatiques actuelles

La Figure 3.26 compare ces performances sous des conditions climatiques historiques récentes, pour la période 1985-2009. La méthodologie de calcul des différents critères est explicitée dans le Tableau C.7 de l'Annexe C : le principe général est que ces critères sont relatifs, c'est-à-dire que chaque critère est divisé par la moyenne des notes obtenues (rendant les critères adimensionnels). Les notations sont également conçues de sorte à ce que les meilleures performances (haut rendement, résistance au stress, moins d'émissions de gaz à effet de serre, etc.) se voient attribuer les plus hautes notes (à "l'extérieur" du graphique).

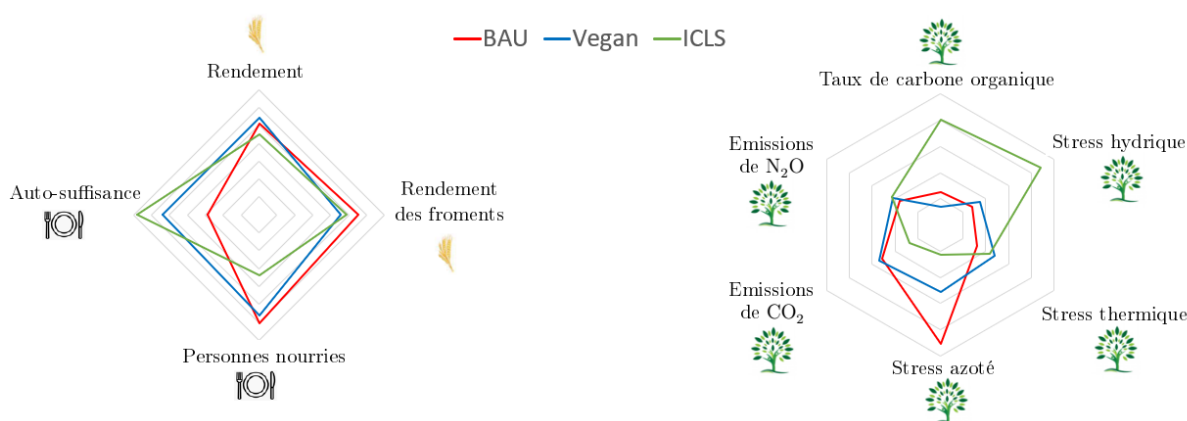


Figure 3.26 – Comparaison multi-critères des performances agronomiques, environnementales et alimentaires des systèmes agricoles pour la période 1985-2009. Les axes sont sans unités, chaque critère étant divisé par la moyenne des notes obtenues, mais les notations sont conçues de sorte à ce que les meilleures performances (haut rendement, résistance au stress, etc.) se voient attribuer les plus hautes notes (à "l'extérieur" du graphique).

On peut voir sur la Figure 3.26 que le système BAU est relativement assez productif : il permet de nourrir plus de personnes, obtient des meilleurs rendements de froments d'hiver et un bon rendement total (exprimé en unités-céréales). Il subit également très peu de stress azoté, notamment grâce à l'apport de fumier réalisé en début de rotation et aux fertilisations azotées très régulières. Le régime découlant du système BAU est par contre très peu auto-suffisant, reposant largement sur de larges imports (et exports) de produits agricoles, témoignant pertinemment du système alimentaire industriel dominant

qui repose sur le transport et la transformation des marchandises qui font s'envoler les "kilomètre-assiettes" de nos aliments (*food miles*), au sens large de ce terme qui inclut à la fois distance physique et nombre d'intermédiaires (Frison et al., 2016; Schnell, 2013).

L'auto-suffisance est le point fort principal du système ICLS, qui importe et exporte extrêmement peu pour offrir un régime alimentaire de qualité. Il est également très résistant au stress hydrique et stocke énormément de carbone dans le sol par rapport aux deux autres systèmes, ceci étant principalement dû à ses prairies. Il subit un peu plus le stress azoté mais cela est dû en très grande partie aux prairies, dont la fertilisation azotée (inexistante) pourrait être optimisée : on notera ainsi que c'est la rotation ICLS qui utilise le moins de fertilisants azotés (680 kg ha^{-1} sur toute la rotation de 8 ans contre 1160 pour la rotation BAU et 1120 pour la rotation Vegan; voir Annexe A). Il faut finalement se rappeler que certains avantages du système ICLS tels que la régulation des adventices et ravageurs que permet l'intégration fonctionnelle du bétail et des prairies ne sont pas pris en compte par le modèle.

Le système Vegan semble être un système "médian", ne performant de manière exceptionnelle nulle part mais n'ayant aucune lacune particulière. On notera néanmoins son faible taux de carbone organique dans le sol, directement lié à l'absence d'engrais d'origine animale. Il pourrait être intéressant de simuler un plus grand nombre de rotations successives afin de constater si ce faible taux de carbone dans le sol ne devient pas de plus en plus limitant.

3.3.2 Conditions climatiques futures

La Figure 3.27 compare l'évolution des performances entre les périodes 1985-2009 et 2075-2099 (RCP8.5). Le Tableau C.8 de l'Annexe C reprend les valeurs absolues de ces évolutions. A nouveau, les notes sont conçues de sorte à ce qu'un pourcentage positif indique une amélioration des performances (augmentation du rendement ou diminution du stress ou des émissions de gaz à effet de serre par exemple). La Figure 3.27 compare ces pourcentages de manière relative : chaque pourcentage propre à un système agricole est divisé par la moyenne des pourcentages des trois systèmes différents (rendant à nouveau les critères adimensionnels).

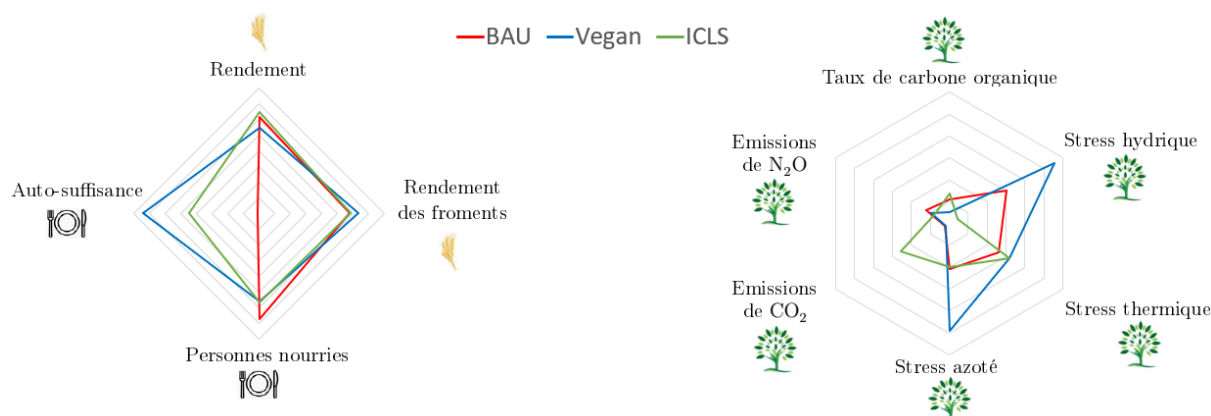


Figure 3.27 – Comparaison multi-critères de l'évolution des performances agronomiques, environnementales et alimentaires des systèmes agricoles entre les périodes 1985-2009 et 2075-2099 (RCP8.5). Les axes sont sans unités, chaque critère étant divisé par la moyenne des notes obtenues, mais les notations sont conçues de sorte à ce que les meilleures évolutions (augmentation des rendements, diminution des émissions de gaz à effet de serre ou des stress, etc.) se voient attribuer les plus hautes notes (à "l'extérieur" du graphique).

On peut ainsi voir sur la Figure 3.27 que l'évolution climatique des rendements des trois systèmes est relativement similaire, même si le système ICLS est celui qui connaît la plus forte augmentation (+40.19%) en terme de rendement et le système BAU celui qui permet de nourrir encore plus de personnes (+30.55%). Le système Vegan est par contre le seul qui voit son degré d'auto-suffisance augmenter.

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, le système ICLS est le seul système qui voit ses émissions de CO₂ diminuer, mais il est par contre celui qui connaît la plus forte augmentation de ses émissions de N₂O et le seul qui subit encore plus le stress hydrique. Les trois systèmes subissent également tous une forte diminution de leur stockage de carbone dans le sol, le système Vegan étant celui qui connaît la pire diminution (-94.31%) alors qu'il était déjà le moins performant pour ce critère sous les conditions climatiques actuelles.

Conclusion

La comparaison de systèmes agricoles complets, représentés dans le cadre de ce travail par la succession de trois rotations sur des périodes totales de 24 ans, ne fait pas l'objet de nombreuses études. Elle requiert quasiment obligatoirement la modélisation de ces rotations, puisqu'une expérience de terrain serait extrêmement longue et laborieuse à mettre en place. La modélisation nous aura ici permis de comparer des performances très variées, couvrant des critères de productivité, de stabilité et de résistance au stress, d'émission de gaz à effet de serre mais également d'alimentation lorsque les sorties du modèle étaient injectées dans un processus d'optimisation d'utilisation alimentaire de la rotation. La modélisation aura également rendu possible une analyse prospective de l'évolution face au changement climatique de toutes ces performances.

Il apparaît finalement des résultats obtenus et synthétisés à la fin du Chapitre 3 que les trois systèmes agricoles investigués contrastent fortement selon les impacts étudiés. On remarque ainsi que le système *Business-as-usual* est relativement performant en termes de rendement mais s'avère plus fragile face aux stress hydrique et thermique. Il permet également de nourrir plus de personnes mais au prix d'une bien plus grande dépendance aux imports de produits agricoles externes à la rotation. Ce système est donc, sur beaucoup de points, l'opposé du système *Intégré Cultures-Elevage* : ce dernier nourrit un peu moins de monde mais avec une bien plus grande auto-suffisance, une forte résistance aux stress, surtout hydrique, et un stockage de carbone très élevé en bonne partie dû aux prairies temporaires qui le composent. Cette plus forte résilience du système ICLS est confirmée par l'analyse de l'évolution face au changement climatique de ses performances : il verrait à l'avenir son rendement global augmenter, plus que les deux autres systèmes étudiés, et ses émissions totales de CO₂ diminuer, à l'inverse des deux autres. Le système *Vegan* apparaît quant à lui comme un système médian, dont les performances actuelles se situent souvent entre celles des deux autres. Cela ne l'empêche pas d'être le système qui voit son auto-suffisance et sa résistance aux stress augmenter de la meilleure manière face au changement climatique. Néanmoins, conformément à l'intuition, l'absence d'animaux lui est fort préjudiciable, en particulier par rapport au stock de carbone organique dans le sol, et ceci se renforcera encore plus à l'avenir, surtout lorsque le scénario plus "pessimiste" RCP8.5 est considéré.

Un des principaux avantages de la modélisation se situe dans son abilité à pouvoir produire une quantité infinie de simulations et donc de résultats. Une première perspective pour élargir la portée de ce travail pourrait donc être de considérer d'autres rotations culturales. Nous en avons ici analysé trois, qui étaient le résultat d'un processus d'optimisation sur base de leurs performances alimentaires théoriques et qui sont également contrastées par leur intégration de l'élevage, mais il ne faut pas perdre de vue que ces rotations ne sont pas l'unique reflet d'un *système agricole*. Elles ne peuvent représenter à elles seules une manière d'intégrer l'élevage au sein d'un agroécosystème, ce processus d'intégration étant continu et pouvant donc prendre une infinité de modalités, allant de l'abolissement pur et simple de l'élevage jusqu'à l'intégration fonctionnelle des animaux en passant par le pâturage plus ou moins régulier d'intercultures, l'insertion de prairies dans la rotation, l'usage de fumier interne ou externe à l'exploitation, etc. Le choix des cultures et variétés et leur place au sein de la rotation est également très large, et il serait donc intéressant de simuler et analyser d'autres modalités. L'essai d'intercultures et de prairies multi-espèces serait ainsi une piste intéressante.

Il aurait également été possible d'optimiser les itinéraires techniques des rotations simulées dans le cadre de ce travail. En faire varier les paramètres tels que les dates des semis, récolte, fertilisation et travail du sol, les densité et profondeur de semis, la quantité d'azote apportée à chaque fertilisation, etc. serait possible : il ne serait pas compliqué d'implémenter cela dans un code d'optimisation testant à la chaîne une multitude de valeurs pour tous ces paramètres en visant par exemple à maximiser le rendement tout en minimisant les émissions de gaz à effet de serre. En plus de permettre l'analyse de l'influence de tel ou tel facteur technique, un tel processus d'optimisation permettrait également de corriger un éventuel biais dû au caractère parfois arbitraire du choix des itinéraires techniques : ceux-ci ont ici été constitués avec les conseils de phytotechniciens expérimentés et l'aide de la littérature spécialisée, mais ils sont tous déterminés avant même le début de la rotation. Cela ne remplace pas le regard de l'agriculteur sur le terrain qui, en fonction de la météo, choisira par exemple de repousser ou avancer telle intervention. Par souci de simplicité, il a été décidé de ne pas effectuer ce processus d'optimisation dans le cadre de ce travail, car cela ferait l'objet de longues discussions et analyses, mais ceci pourrait donc constituer une piste d'approfondissement digne d'intérêt. Il serait peut-être ainsi judicieux, au vu des résultats obtenus, de séparer l'apport de matière organique simulant le pâturage ovin dans le système ICLS en plusieurs parties, ce qui serait plus proche de la réalité dans laquelle les moutons excrètent très régulièrement et permettrait également d'étaler cet apport et d'optimiser son absorption par les cultures.

Toujours concernant le système ICLS, une autre piste d'amélioration serait d'affiner le calcul de la charge animale, c'est-à-dire du nombre d'ovins pâturant. Sans connaissance du processus de pâturage et d'alimentation des ovins réellement établi dans le cadre du projet EcoFoodSystem, nous avons ici considéré que les moutons ne pâturent que les prairies, et non pas également l'interculture de l'Année 2 de la rotation (celle-ci ne durant qu'un

peu moins de deux mois), et décidé que la rotation ne devait nourrir les moutons qu'à la belle saison (printemps et été) des prairies. Il serait donc judicieux d'inclure le pâturage de l'interculture, ce qui augmenterait légèrement le fourrage disponible pour nourrir les moutons ainsi que la fertilisation apportée via leurs déjections, et de considérer comment intégrer dans l'analyse l'alimentation des ovins lorsque ceux-ci ne sont pas nourris par les prairies.

Afin de pousser plus loin l'analyse des rotations et itinéraires techniques sélectionnés dans le cadre de ce travail, il serait également possible de considérer d'autres variables de sortie, tant agronomiques qu'environnementales et alimentaires. La modélisation de ces rotations et itinéraires constitue l'étape la plus fastidieuse et la plus compliquée, et celle-ci ayant été faite, il serait assez facile de pratiquer d'autres analyses puisque le modèle STICS produit un très grand nombre de variables de sortie, comme par exemple le lessivage d'azote. Etudier d'autres types d'impacts, par exemple économiques, dérivant des rendements, du nombre d'interventions et donc de la consommation de carburant associée, de la quantité d'azote minéral devant être achetée, etc. serait également pertinent.

Une dernière piste d'approfondissement serait d'analyser l'effet d'un décalage des années de départ des rotations. Il est en effet possible que la mauvaise performance d'une rotation s'explique par exemple par le fait que la culture de maïs, semé en avril, est située une année où ce mois-là a été soumis à une intense sécheresse. Le résultat aurait été tout autre si la rotation avait été décalée d'un an et que cette sécheresse intervenait lors d'une culture d'hiver déjà bien implantée. Les rotations durant 8 ans, il serait donc intéressant de pratiquer 7 "décalages" pour moyenner les résultats.

Pour conclure, il ne faut jamais perdre de vue que ces résultats proviennent de modèles qui ne pourront jamais intégrer parfaitement toute la complexité des agroécosystèmes. Il ressort de ce travail que le changement climatique n'aura pas que des désavantages : augmentation des rendements et diminution de certains stress hydrique, thermique et azoté font partie des "bonnes nouvelles" apportées. Néanmoins, le modèle ne prenant pas en compte d'autres effets probables du changement climatique, tels que la diminution des pollinisateurs ou le développement des maladies et ravageurs (IPCC, 2019), on doit être particulièrement vigilant quant à l'élaboration de conclusions hâtives et avoir connaissance des hypothèses considérées. Le contraste entre les performances agronomiques, environnementales et alimentaires obtenues souligne la pertinence d'analyser des systèmes agricoles avec un regard le plus large possible et invite à se rappeler que, partout et toujours, l'exactitude se trouve dans la nuance.

* *
*

Bibliographie

- Alberdi, G., Zubillaga, M. B., Brent, Z., Choplin, G., Claeys, P., Conti, M., Corrado, A., Duncan, J., Ferrando, T., McKeon, N., et al. (2020). A collective response from food sovereignty scholars on the EU's Farm to Fork Strategy.
- Bat-Oyun, T., Shinoda, M., and Tsubo, M. (2012). Effects of water and temperature stresses on radiation use efficiency in a semi-arid grassland. *Journal of Plant Interactions*, 7(3) :214–224.
- Bell, L. W., Moore, A. D., and Kirkegaard, J. A. (2014). Evolution in crop–livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in australia. *European Journal of Agronomy*, 57 :10–20.
- Bloor, J., Jay-Robert, P., Le Morvan, A., and Fleurance, G. (2012). Déjections des herbivores domestiques au pâturage : caractéristiques et rôle dans le fonctionnement des prairies. *INRA Productions animales*, 25(1) :45–56.
- Bonaudo, T., Bendahan, A. B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., Magda, D., and Tichit, M. (2014). Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy*, 57 :43–51.
- Brankatschk, G. and Finkbeiner, M. (2014). Application of the Cereal Unit in a new allocation procedure for agricultural life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, 73 :72–79.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., et al. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of agronomy*, 18(3-4) :309–332.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., and Beaudoin, N. (2009). *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Editions Quae.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., et al. (1998). STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18 :311–346.
- Cline, W. R. (2007). *Global warming and agriculture : Impact estimates by country*. Peterson Institute.
- Darnhofer, I., Lindenthal, T., Bartel-Kratochvil, R., and Zollitsch, W. (2010). Conventionalisation of organic farming practices : from structural criteria towards an assess-

- ment based on organic principles. a review. *Agronomy for sustainable development*, 30(1) :67–81.
- Davidson, E. A. and Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081) :165–173.
- de Albuquerque Nunes, P. A., Laca, E. A., de Faccio Carvalho, P. C., Li, M., de Souza Filho, W., Kunrath, T. R., Martins, A. P., and Gaudin, A. (2021). Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. *Scientific reports*, 11(1) :1–14.
- De Clerck, C., Dumont, B., and Bindelle, J. (2021). Investigating the ability of crop rotations to supply contrasting eating patterns in order to reconnect local food production and consumption through model-based optimization. Manuscript in submission.
- De Ridder, K., Couderé, K., Depoorter, M., Liekens, I., Pourria, X., Steinmetz, D., Vanuytrecht, E., Verhaegen, K., and Wouters, H. (2020). Evaluation of the socio-economic impact of climate change in belgium. Summary for policymakers, National Climate Commission.
- De Schutter, O. (2010a). *L'économie politique de la faim : garantir le droit à l'alimentation dans un monde de ressources rares*, pages 56–57. Groupe ESA.
- De Schutter, O. (2010b). *L'économie politique de la faim : garantir le droit à l'alimentation dans un monde de ressources rares*, pages 52–55. Groupe ESA.
- De Schutter, O. et al. (2019). Vers une politique alimentaire commune pour l'Union européenne. Les réformes et réalignements politiques nécessaires pour construire des systèmes alimentaires durables en Europe. Rapport adopté par le Panel d'IPES-FOOD. *Synthèse*.
- De Silva, C., Weatherhead, E., Knox, J. W., and Rodriguez-Diaz, J. (2007). Predicting the impacts of climate change—a case study of paddy irrigation water requirements in sri lanka. *Agricultural water management*, 93(1-2) :19–29.
- Delaby, L. (2018). Fiche 4 : Les déjections au pâturage. <https://www.encyclopediapratis.eu/wp-content/uploads/2018/07/Fiche-04-Les-dejections-au-paturage.pdf>.
- Dury, J., Schaller, N., Garcia, F., Reynaud, A., and Bergez, J. E. (2012). Models to support cropping plan and crop rotation decisions. a review. *Agronomy for sustainable development*, 32(2) :567–580.
- European Commission (2020a). A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system.
- European Commission (2020b). Commission's recommendations for Belgium's CAP strategic plan.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., and Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of environmental management*, 91(1) :1–21.

- Frison, E. A. et al. (2016). From uniformity to diversity : a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems.
- Fuhrer, J. (2003). Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 97(1-3) :1–20.
- Gerten, D., Heck, V., Jägermeyr, J., Bodirsky, B. L., Fetzer, I., Jalava, M., Kummu, M., Lucht, W., Rockström, J., Schaphoff, S., et al. (2020). Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sustainability*, 3(3) :200–208.
- Giot, O., Termonia, P., Degrauwe, D., De Troch, R., Caluwaerts, S., Smet, G., Berckmans, J., Deckmyn, A., De Cruz, L., De Meutter, P., et al. (2015). Validation of the ALARO-0 model within the EURO-CORDEX framework. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(10).
- Gobin, A. (2010). Modelling climate impacts on crop yields in belgium. *Climate Research*, 44(1) :55–68.
- Gómez-Limón, J. A. and Sanchez-Fernandez, G. (2010). Empirical evaluation of agricultural sustainability using composite indicators. *Ecological economics*, 69(5) :1062–1075.
- Grant, K., Kreyling, J., Dienstbach, L. F., Beierkuhnlein, C., and Jentsch, A. (2014). Water stress due to increased intra-annual precipitation variability reduced forage yield but raised forage quality of a temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186 :11–22.
- Gray, S. B. and Brady, S. M. (2016). Plant developmental responses to climate change. *Developmental Biology*, 419(1) :64–77.
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., and Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water : a review. *Progress in physical geography*, 29(2) :189–217.
- Hiel, M.-P., Barbieux, S., Pierreux, J., Olivier, C., Lobet, G., Roisin, C., Garré, S., Colinet, G., Bodson, B., and Dumont, B. (2018). Impact of crop residue management on crop production and soil chemistry after seven years of crop rotation in temperate climate, loamy soils. *PeerJ*, 6 :e4836.
- Iglesias, A., Quiroga, S., Moneo, M., and Garrote, L. (2012). From climate change impacts to the development of adaptation strategies : challenges for agriculture in europe. *Climatic Change*, 112(1) :143–168.
- Iizumi, T., Shiogama, H., Imada, Y., Hanasaki, N., Takikawa, H., and Nishimori, M. (2018). Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981–2010 compared with preindustrial levels. *International Journal of Climatology*, 38(14) :5405–5417.
- IPCC (2013). Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

- IPCC (2014). Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC (2019). Climate Change and Land : an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPES-Food (2020). Covid-19 and the crisis in food systems : Symptoms, causes, and potential solutions.
- Janssen, S. and Van Ittersum, M. K. (2007). Assessing farm innovations and responses to policies : a review of bio-economic farm models. *Agricultural systems*, 94(3) :622–636.
- Jones, C., McConnell, C., Coleman, K., Cox, P., Falloon, P., Jenkinson, D., and Powlson, D. (2005). Global climate change and soil carbon stocks ; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology*, 11(1) :154–166.
- Jousseins, C. and Tchakerian, E. (2014). Que mangent les brebis ? régimes alimentaires et niveaux d'autonomie des élevages. https://www.inn-ovin.fr/wp-content/uploads/2017/04/INOSYS-RESEAUX-ELEVAGE_THEMA-Que-mangent-les-brebis.pdf. Consulté le 31 mai 2021.
- Kang, Y., Khan, S., and Ma, X. (2009). Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security—a review. *Progress in natural Science*, 19(12) :1665–1674.
- Kirschbaum, M. U. (2011). Does enhanced photosynthesis enhance growth ? lessons learned from co2 enrichment studies. *Plant physiology*, 155(1) :117–124.
- Knoden, D., Lambert, R., Nihoul, P., Stilmant, D. and Pochet, P., Crémer, S., and Luxen, P. (2007). Fertilisation raisonnée des prairies. *Les livrets de l'agriculture*.
- Kollas, C., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Manevski, K., Müller, C., Palosuo, T., Armas-Herrera, C. M., Beaudoin, N., Bindi, M., Charfeddine, M., et al. (2015). Crop rotation modelling—A European model intercomparison. *European Journal of Agronomy*, 70 :98–111.
- Kulak, M., Nemecek, T., Frossard, E., and Gaillard, G. (2013). How eco-efficient are low-input cropping systems in Western Europe, and what can be done to improve their eco-efficiency ? *Sustainability*, 5(9) :3722–3743.
- Langeveld, C., Segers, R., Dirks, B., Van den Pol-van Dasselaar, A., Velthof, G., and Hensen, A. (1997). Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from pasture on drained peat soils in the Netherlands. *European Journal of Agronomy*, 7(1-3) :35–42.
- Lavergne, A., Graven, H., De Kauwe, M. G., Keenan, T. F., Medlyn, B. E., and Prentice, I. C. (2019). Observed and modelled historical trends in the water-use efficiency of plants and ecosystems. *Global change biology*, 25(7) :2242–2257.

- Leemans, V., De Cruz, L., Dumont, B., Hamdi, R., Delaplace, P., Heinesh, B., Garré, S., Verheggen, F., Theodorakopoulos, N., and Longdoz, B. (2017). Selection of meteorological conditions to apply in an Ecotron facility. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, page 7895.
- Lemaire, G., Ryschawy, J., and de Faccio, P. C. (2016). Agricultural intensification and diversity for reconciling production and environment. *Food Production and Nature Conservation : Conflicts and Solutions*, page 113.
- Maillard, É. and Angers, D. A. (2014). Animal manure application and soil organic carbon stocks : A meta-analysis. *Global Change Biology*, 20(2) :666–679.
- Maxim, L., Spangenberg, J. H., and O'Connor, M. (2009). An analysis of risks for biodiversity under the DPSIR framework. *Ecological economics*, 69(1) :12–23.
- Mazoyer, M. and Roudart, L. (2002). *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Editions du Seuil.
- Mosnier, C., Duclos, A., Agabriel, J., and Gac, A. (2017). Orfee : A bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions. *Agricultural Systems*, 157 :202–215.
- Muller, A., Schader, C., Scialabba, N. E.-H., Brüggemann, J., Isensee, A., Erb, K.-H., Smith, P., Klocke, P., Leiber, F., Stolze, M., et al. (2017). Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nature communications*, 8(1) :1–13.
- Nielsen, D. and Halvorson, A. (1991). Nitrogen fertility influence on water stress and yield of winter wheat. *Agronomy journal*, 83(6) :1065–1070.
- Peterson, C. A., Bell, L. W., Carvalho, P. C. d. F., and Gaudin, A. (2020). Resilience of an Integrated Crop–Livestock System to Climate Change : A Simulation Analysis of Cover Crop Grazing in Southern Brazil. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4 :222.
- Ripoche-Wachter, D. and Lecharpentier, P. (2017). JavaSTICS 1.4 - STICSv8.5 : User guide.
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., et al. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9) :3268–3273.
- Schnell, S. M. (2013). Food miles, local eating, and community supported agriculture : putting local food in its place. *Agriculture and Human Values*, 30(4) :615–628.
- Seguin, B. (2010). Le changement climatique : conséquences pour les végétaux. *Quaderni. Communication, technologies, pouvoir*, 71 :27–40.
- Sen, A. (1990). Food, economics and entitlements. *The political economy of hunger*, 1 :34–50.
- Sinclair, T. R. (2006). A reminder of the limitations in using beer’s law to estimate daily radiation interception by vegetation. *Crop science*, 46(6) :2343–2347.

- Soussana, J.-F., Allard, V., Pilegaard, K., Ambus, P., Amman, C., Campbell, C., Ceschia, E., Clifton-Brown, J., Czóbel, S., Domingues, R., et al. (2007). Full accounting of the greenhouse gas (CO₂, N₂O, CH₄) budget of nine European grassland sites. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121(1-2) :121–134.
- Soussana, J.-F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., and Arrouays, D. (2004). Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil use and management*, 20(2) :219–230.
- SPW (2020). L’agriculture wallonne en chiffres. Technical Report D/2020/11802/20, SPW Agriculture Environnement et Ressources naturelles, 15 Avenue Prince de Liège - 5100 Jambes.
- Statbel (2019). Chiffres agricoles 2019. <https://statbel.fgov.be/sites/default/files/files/documents/landbouw/8.1%20Land-%20en%20tuinbouwbedrijven/DBREF-L05-2019-TAB-A-FR.xlsx>. Consulté le 29 mai 2021.
- Statbel (2020a). Exploitations agricoles et horticoles. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures>. Consulté le 3 mai 2021.
- Statbel (2020b). L’agriculture belge en chiffres. Technical Report S000.01F/2020, SPF Economie, North Gate III - Bd. Albert II, 16 B-1000 Bruxelles.
- Steduto, P. and Albrizio, R. (2005). Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea : II. Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130(3-4) :269–281.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., and Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water : I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3) :426–437.
- Talukder, B., Hipel, K. W., and vanLoon, G. W. (2018). Using multi-criteria decision analysis for assessing sustainability of agricultural systems. *Sustainable Development*, 26(6) :781–799.
- Thornton, P. K. and Herrero, M. (2001). Integrated crop–livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. *Agricultural systems*, 70(2-3) :581–602.
- Tribouillois, H., Constantin, J., and Justes, E. (2018). Cover crops mitigate direct greenhouse gases balance but reduce drainage under climate change scenarios in temperate climate with dry summers. *Global change biology*, 24(6) :2513–2529.
- ur Rahman, M. H., Ahmad, I., Wang, D., Fahad, S., Afzal, M., Ghaffar, A., Saddique, Q., Khan, M. A., Saud, S., Hassan, S., et al. (2021). Influence of semi-arid environment on radiation use efficiency and other growth attributes of lentil crop. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(11) :13697–13711.
- Van Cauwenbergh, N., Biala, K., Bielders, C., Brouckaert, V., Franchois, L., Cidat, V. G., Hermy, M., Mathijs, E., Muys, B., Reijnders, J., et al. (2007). SAFE—A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 120(2-4) :229–242.

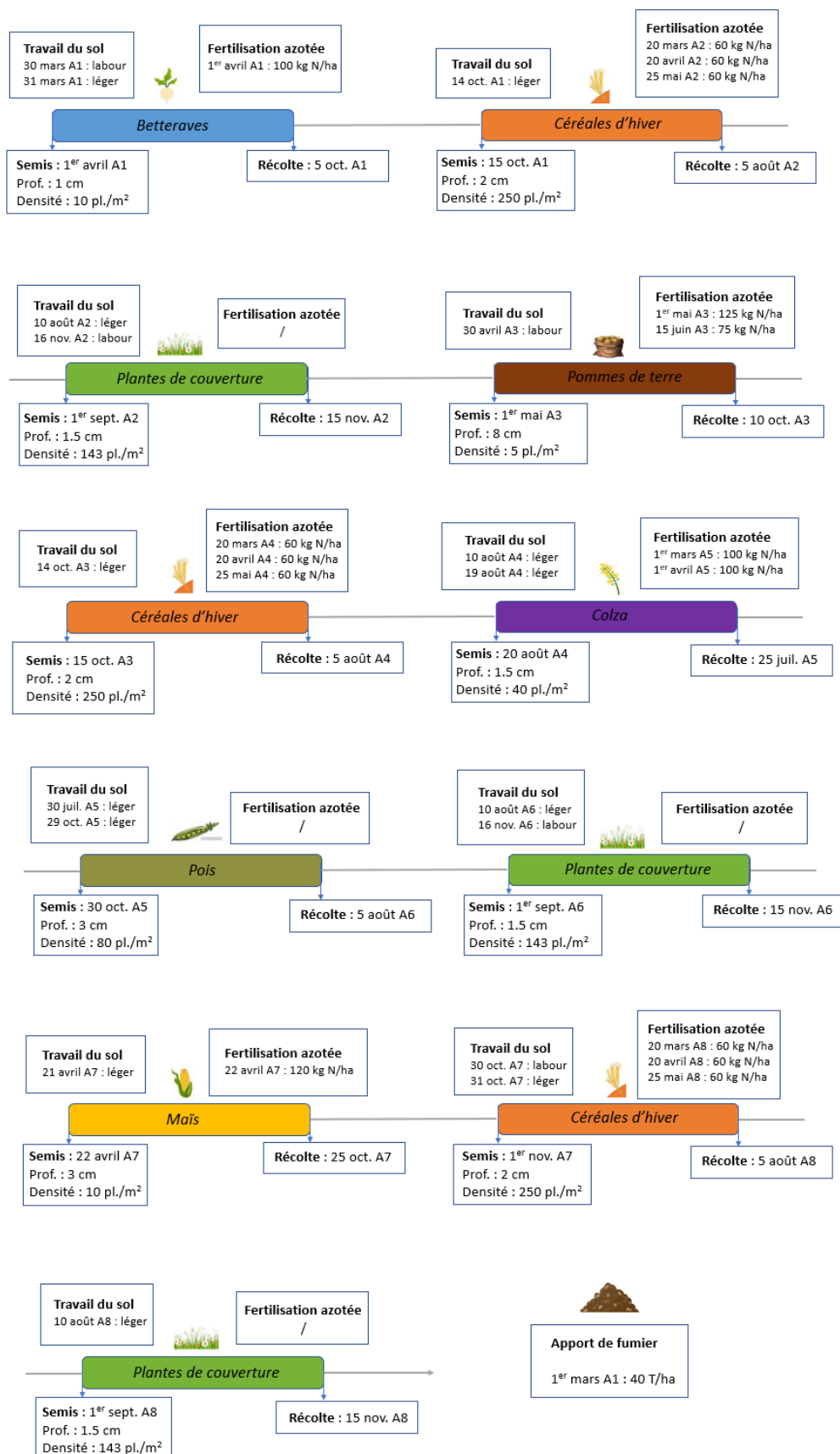
- Vrugt, J. A., Ter Braak, C., Diks, C., Robinson, B. A., Hyman, J. M., and Higdon, D. (2009). Accelerating Markov chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self-adaptive randomized subspace sampling. *International journal of nonlinear sciences and numerical simulation*, 10(3) :273–290.
- WalOnMap (2021). <http://geoportail.wallonie.be/walonmap>. Consulté le 10 novembre 2020.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., and David, C. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. a review. *Agronomy for sustainable development*, 29(4) :503–515.
- Whisler, F., Acock, B., Baker, D., Fye, R., Hodges, H., Lambert, J., Lemmon, H., McKinion, J., and Reddy, V. (1986). Crop simulation models in agronomic systems. In *Advances in agronomy*, volume 40, pages 141–208. Elsevier.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., et al. (2019). Food in the Anthropocene : the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170) :447–492.
- World Health Organization et al. (2018). *The state of food security and nutrition in the world 2018 : building climate resilience for food security and nutrition*. Food & Agriculture Org.
- World Health Organization et al. (2020). *The state of food security and nutrition in the world 2020 : Transforming food systems for affordable healthy diets*. Food & Agriculture Org.
- Yang, Y., Tilman, D., Furey, G., and Lehman, C. (2019). Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature communications*, 10(1) :1–7.
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., et al. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(35) :9326–9331.
- Znaor, D., Baret, P., de Herde, V., and Antier, C. (2017). Les conséquences environnementales et économiques d’une conversion de l’agriculture wallonne vers un modèle à faible apport d’intrants.
- Zuazo, V. H. D. and Pleguezuelo, C. R. R. (2009). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers : a review. *Sustainable agriculture*, pages 785–811.

Annexe A

Itinéraires techniques

Dans cette annexe sont présentés les itinéraires techniques (modalités de semis, récolte, travail du sol et fertilisation) considérés dans le cadre de ce travail pour chacun des systèmes agricoles considérés.

Pour chacun de ces itinéraires techniques, les dates d'interventions (semis, récolte, travail du sol, fertilisation, fauche) sont fixes : elles ne sont par exemple pas dépendantes de l'état de la plante, de son stade de développement ou du nombre de degrés-jours.

Figure A.1 – Itinéraires techniques du système *Business-as-usual* (BAU)

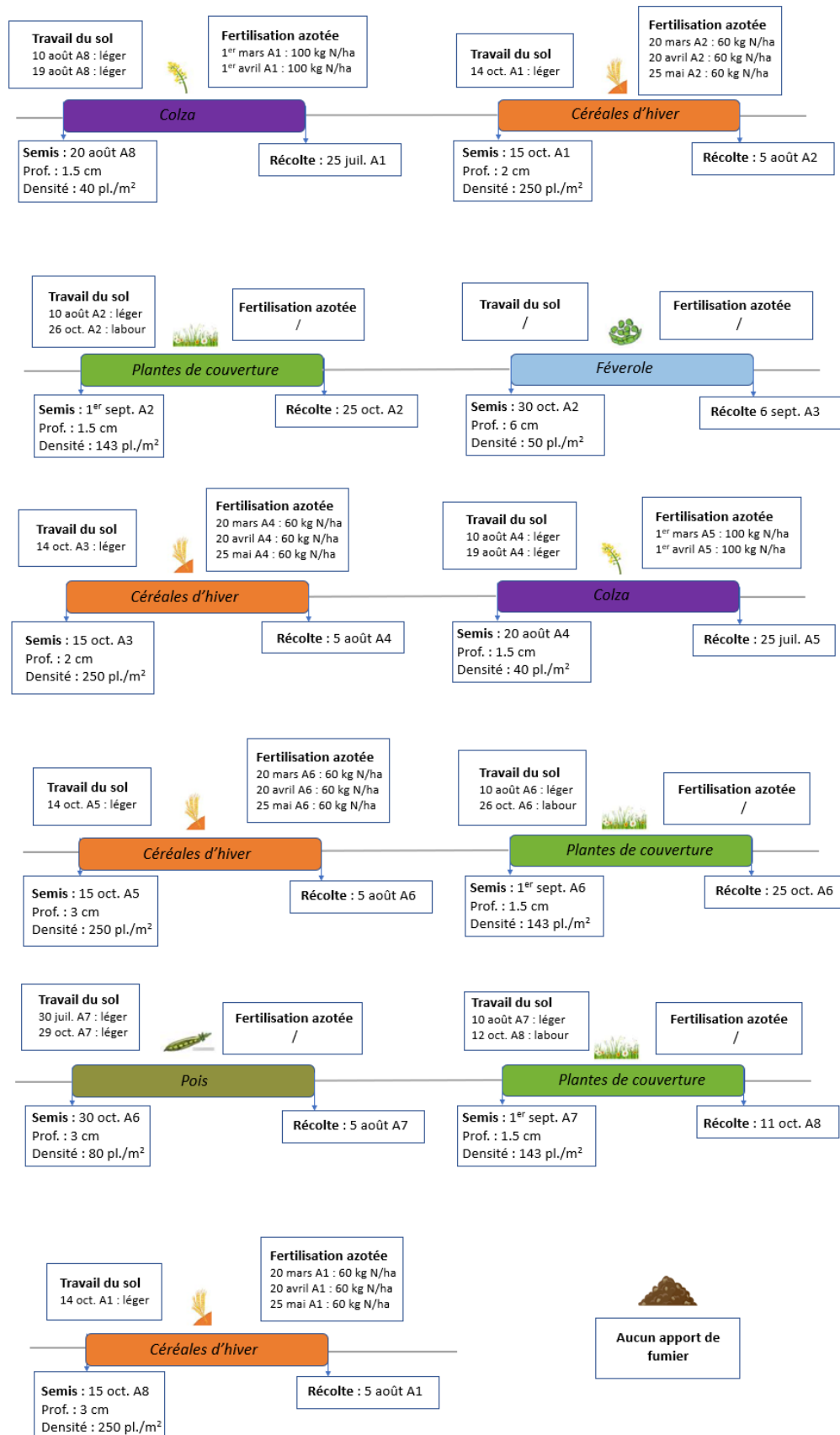


Figure A.2 – Itinéraires techniques du système Vegan

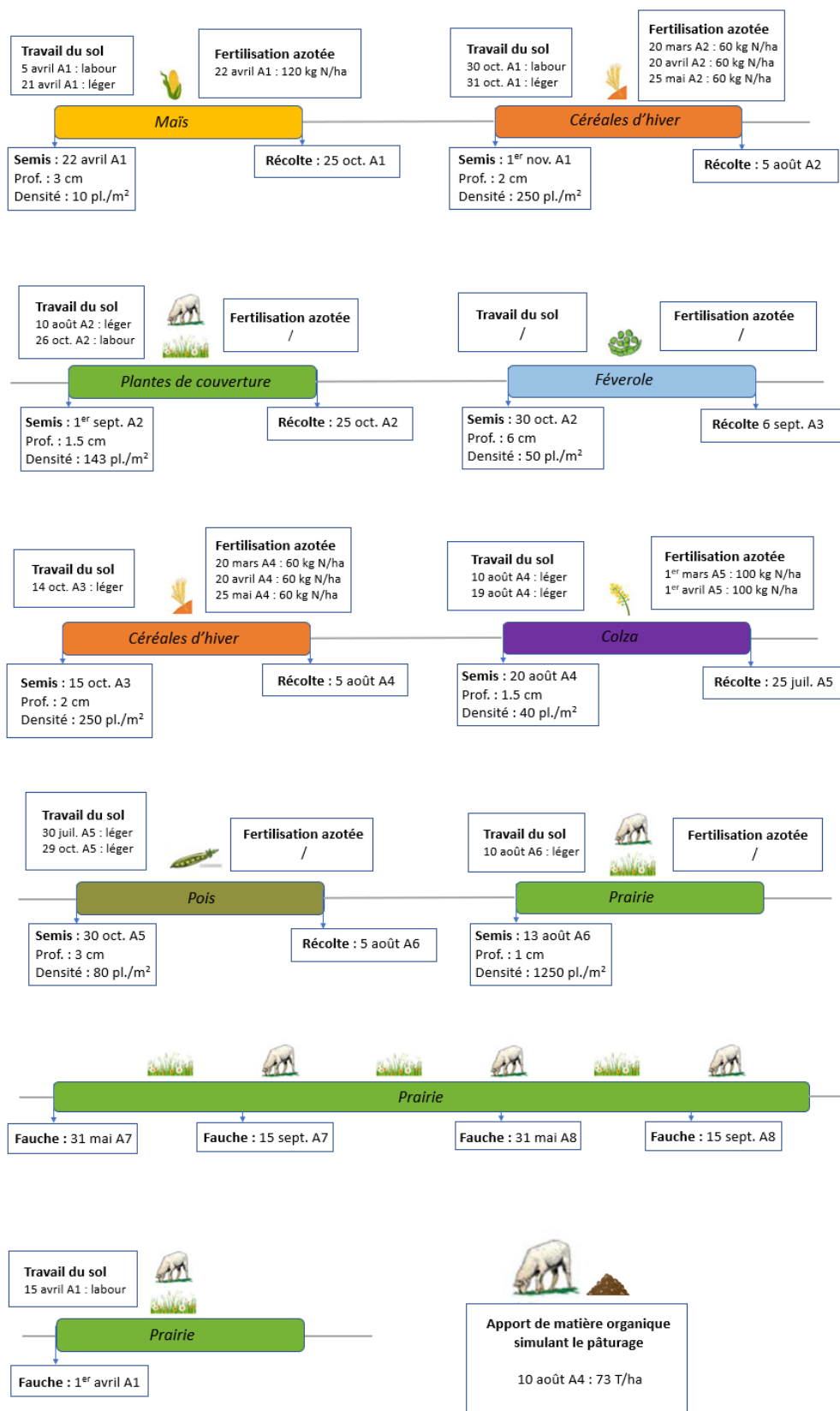


Figure A.3 – Itinéraires techniques du système Intégré Cultures-Elevage (ICLS)

Annexe B

Equations importantes du modèle STICS

Cette annexe a pour objectif de compléter la Section 2.3 en présentant certaines équations du modèle STICS parmi les plus importantes, notamment parce qu'elles impliquent des variables étudiées de manière brute (pratiquement toutes les variables sont bien sûr utilisées par le modèle lors de chaque simulation mais nous nous penchons ici sur les variables dont l'évolution est directement analysée).

Le modèle STICS comportant des centaines d'équations, il serait impossible et hors sujet de toutes les présenter ici. Le lecteur intéressé pourra se référer pour plus de détails à Brisson et al. (2009), duquel est tirée toute cette annexe.

Croissance de la partie aérienne

La biomasse de la partie aérienne est la somme de chaque incrément journalier de biomasse, représenté par la variable DLTAMS. Celle-ci est définie par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} DLTAMS(I) = & [EBMAX(I) \times RAIN(T(I) - COEFB_G \times RAIN(T(I))^2] \\ & \times FTEMP(I) \times SWFAC(I - 1) \times INNS(I - 1) \times EXOBIOM(I - 1) \times FCO2 \\ & + DLTAREMOBIL(I - 1) \end{aligned} \tag{B.1}$$

L'équation B.1 peut être divisée en trois parties. DLTAMS au jour I est premièrement égal à la radiation interceptée (RAINT) au jour I multipliée par l'efficacité maximale d'utilisation de la radiation (EBMAX) au jour I, spécifique à chaque espèce. On soustrait alors de cela la radiation interceptée multipliée par un effet de saturation de la radiation (COEFB_G).

La deuxième partie de l'équation B.1 constitue la deuxième ligne : on multiplie le résultat précédemment obtenu par des facteurs influençant les processus de photosynthèse et respiration. Certains de ces facteurs sont ceux du jour précédent I-1, cela dépendant de la manière dont ont été implémentés les différents modules de STICS. On retrouve parmi ces facteurs les coefficients de stress étudiés dans le cadre de ce travail FTEMP, SWFAC et INNS, ainsi que l'effet fertilisant du CO₂ FCO2. Ce dernier coefficient est déjà discuté dans le corps du travail, et les coefficients de stress FTEMP, SWFAC et INNS sont définis dans la suite de cette annexe. Ces derniers sont compris entre 0 et 1 : sur base de l'équation B.1, un stress égal à 1 correspond donc à un stress nul et un stress égal à 0 correspond à un stress maximal. Néanmoins, pour que ce soit plus intuitif, nous étudions dans le cadre de ce travail l'opposé de ces stress (respectivement 1-FTEMP, 1-SWFAC et 1-INNS). Ceci est reprécisé dans le corps du travail.

La troisième partie de l'équation B.1 est constituée de l'ajout de DLTAREMOBIL(I-1), qui désigne la remobilisation de réserves hivernales par les plantes pérennes.

Indice de stress thermique FTEMP

L'indice de stress thermique FTEMP permet de décroître l'efficacité d'utilisation de la radiation (RUE) lorsque la température est trop basse ou trop haute. Il dépend de la température et est défini par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{if } TCULT(I) < TEOPT_P \quad & FTEMP(I) = 1 - \left(\frac{TCULT(I) - TEOPT_P}{TEMIN_P - TEOPT_P} \right)^2 \\
 \text{if } TEOPT_P \leq TCULT(I) \leq TEOPTBIS_P \quad & FTEMP(I) = 1.0 \\
 \text{if } TCULT(I) > TEOPTBIS_P \quad & FTEMP(I) = 1 - \left(\frac{TCULT(I) - TEOPTBIS_P}{TEMAX_P - TEOPTBIS_P} \right)^2
 \end{aligned}
 \tag{B.2}$$

L'équation B.2 est représentée sur la Figure B.1 qui montre l'évolution de FTEMP en fonction de la température.

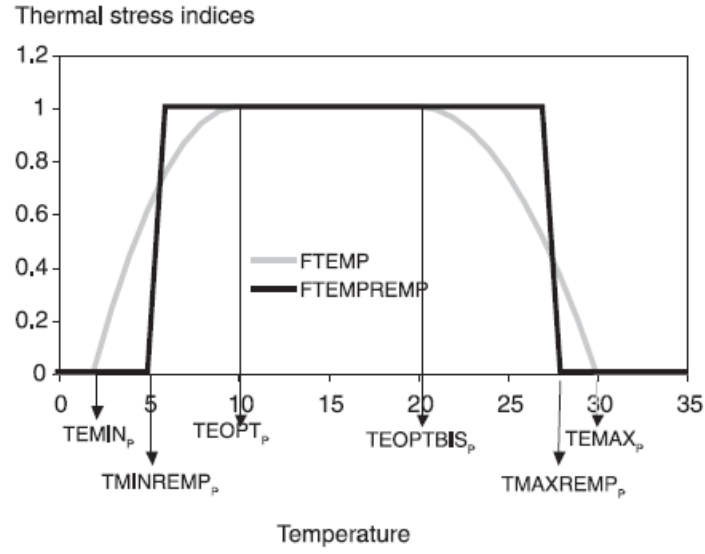


Figure B.1 – Définition du facteur de stress thermique FTEMP

Indice de stress hydrique SWFAC

L'indice de stress hydrique SWFAC permet de décroître la RUE et la transpiration lorsqu'il n'y a pas assez d'eau dans la zone racinaire. Il dépend donc du contenu disponible en eau au-dessus du point de flétrissement dans la zone racinaire, dénommé TETA, et est défini par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \text{if } TETA(I) < TETSTOMATE \quad SWFAC &= \frac{TETA(I)}{TETSTOMATE} \\ \text{if } TETA(I) \geq TETSTOMATE \quad SWFAC &= 1 \end{aligned} \quad (B.3)$$

L'équation B.3 est représentée sur la Figure B.2 qui montre l'évolution de SWFAC en fonction de TETA. D'autres indices de stress hydrique existent dans STICS mais ils sont de moindre importance et ne sont pas étudiés dans le cadre de ce travail.

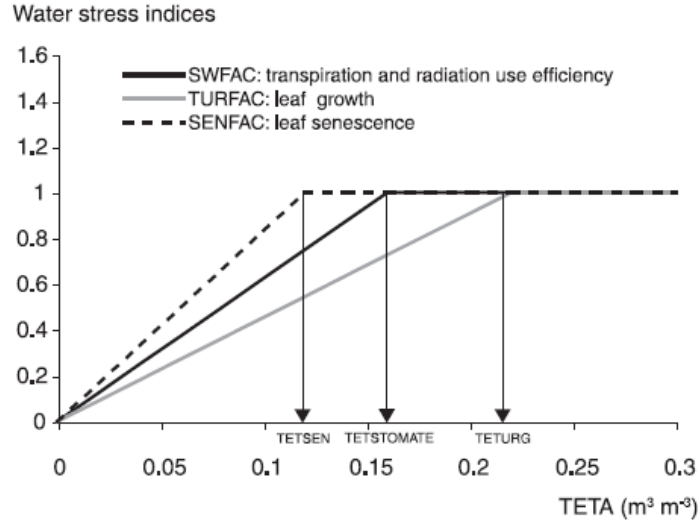


Figure B.2 – Définition du facteur de stress hydrique SWFAC

Indice de stress azoté INNS

Comme expliqué au Chapitre 3, on caractérise si une plante est soumise au stress azoté ou non en comparant, à un instant t , l'état de la plante (défini par la concentration en azote et la matière sèche accumulée) par rapport à une courbe concentration de la plante/MS accumulée critique propre à la plante. L'indice de nutrition azotée INN est le ratio entre la concentration réelle d'azote (CNPLANTE en % de la matière sèche) et la concentration critique (NC) correspondant à la même biomasse (MASECABSO en t ha⁻¹), selon l'équation suivante illustrée sur la Figure B.3 :

$$INN(I) = \frac{CNPLANTE(I)}{NC(I)} \quad (B.4)$$

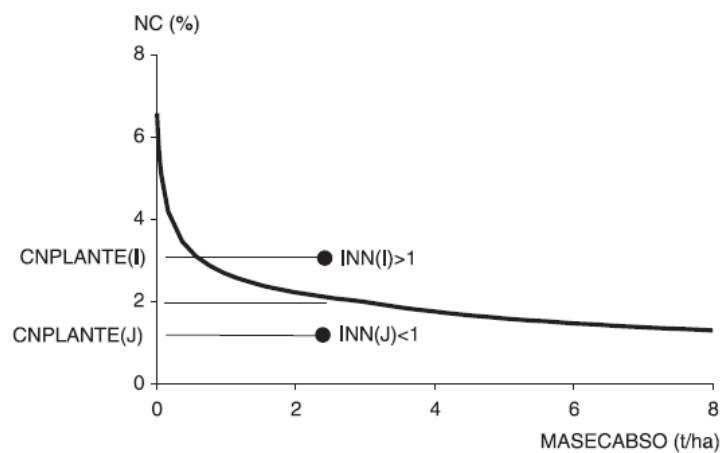


Figure B.3 – Calcul de l'indice de nutrition azotée INN

L'indice de stress azoté INNS décroît alors la RUE lorsque l'indice de nutrition azotée INN est trop bas : son évolution est illustrée par la Figure B.4.

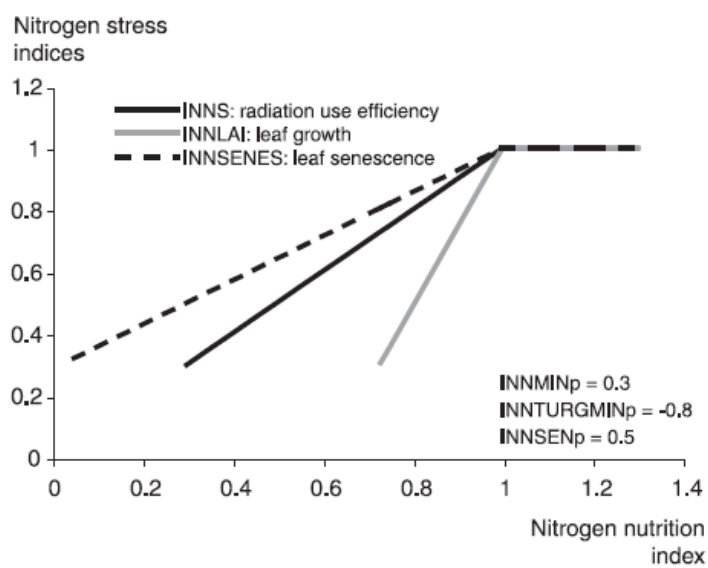


Figure B.4 – Définition du facteur de stress azoté INNS

Annexe C

Tableaux et figures supplémentaires

Régime alimentaire de référence

La Figure C.1 indique la composition du régime alimentaire de référence de la Commission EAT-Lancet (Willett et al., 2019).

	Macronutrient intake (possible range), g/day	Caloric intake, kcal/day
Whole grains*		
Rice, wheat, corn, and other†	232 (total grains 0–60% of energy)	811
Tubers or starchy vegetables		
Potatoes and cassava	50 (0–100)	39
Vegetables		
All vegetables	300 (200–600)	..
Dark green vegetables	100	23
Red and orange vegetables	100	30
Other vegetables	100	25
Fruits		
All fruit	200 (100–300)	126
Dairy foods		
Whole milk or derivative equivalents (eg, cheese)	250 (0–500)	153
Protein sources‡		
Beef and lamb	7 (0–14)	15
Pork	7 (0–14)	15
Chicken and other poultry	29 (0–58)	62
Eggs	13 (0–25)	19
Fish§	28 (0–100)	40
Legumes		
Dry beans, lentils, and peas*	50 (0–100)	172
Soy foods	25 (0–50)	112
Peanuts	25 (0–75)	142
Tree nuts	25	149
Added fats		
Palm oil	6.8 (0–6.8)	60
Unsaturated oils¶	40 (20–80)	354
Dairy fats (included in milk)	0	0
Lard or tallow	5 (0–5)	36
Added sugars		
All sweeteners	31 (0–31)	120
<p>For an individual, an optimal energy intake to maintain a healthy weight will depend on body size and level of physical activity. Processing of foods such as partial hydrogenation of oils, refining of grains, and addition of salt and preservatives can substantially affect health but is not addressed in this table.</p> <p>*Wheat, rice, dry beans, and lentils are dry, raw. †Mix and amount of grains can vary to maintain isocaloric intake. ‡Beef and lamb are exchangeable with pork and vice versa. Chicken and other poultry is exchangeable with eggs, fish, or plant protein sources. Legumes, peanuts, tree nuts, seeds, and soy are interchangeable. §Seafood consist of fish and shellfish (eg, mussels and shrimps) and originate from both capture and from farming. Although seafood is a highly diverse group that contains both animals and plants, the focus of this report is solely on animals. ¶Unsaturated oils are 20% each of olive, soybean, rapeseed, sunflower, and peanut oil. Some lard or tallow are optional in instances when pigs or cattle are consumed.</p>		
Table 1: Healthy reference diet, with possible ranges, for an intake of 2500 kcal/day		

Figure C.1 – Régime alimentaire de référence de la Commission EAT-Lancet. Figure tirée de Willett et al. (2019).

Localisation du site expérimental

La Figure C.2 montre une vue aérienne du site d'expérimentation présenté à la Section 2.2 tandis que la Figure C.3 indique sa localisation.

Parcelle de la zone d'essais agricoles de 30 ha

Image satellite : Ortho 2018 SPW



Figure C.2 – Vue aérienne du site d'implantation des parcelles d'essai de 30 hectares à Gembloux (Belgique). Image générée avec le logiciel QGISv3.12.

Localisation de la parcelle d'essais agricoles à Gembloux (Belgique)

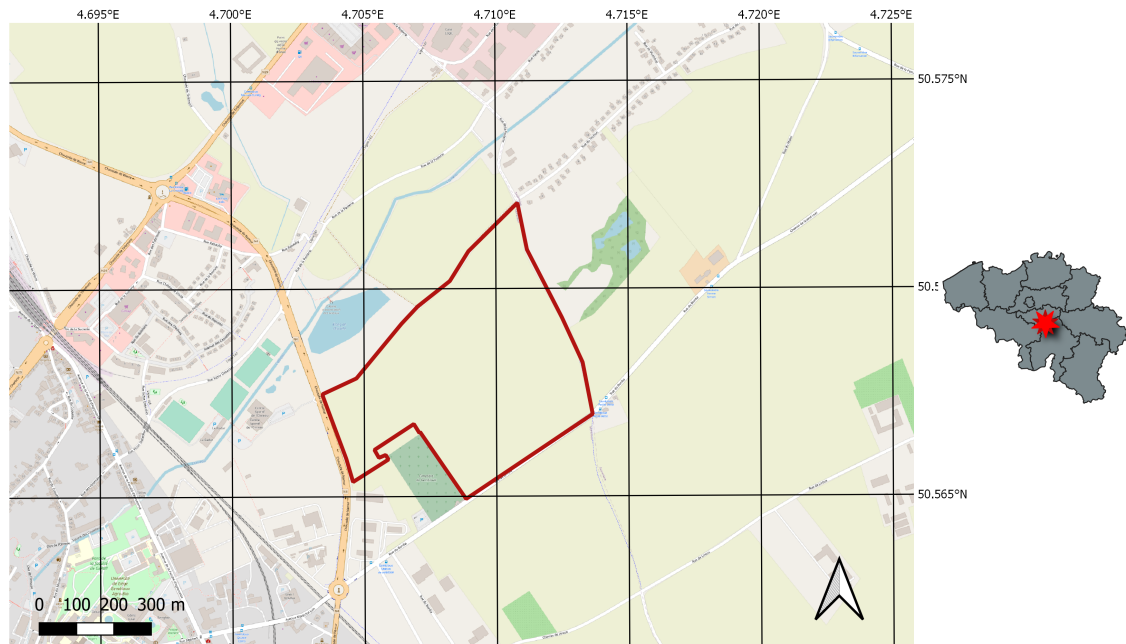


Figure C.3 – Localisation du site d’implantation des parcelles d’essai. La carte de gauche montre où se trouve le site par rapport à la ville de Gembloux (au nord-est), tandis que la carte de droite montre la localisation du site au sein de la Belgique. Image générée avec le logiciel QGISv3.12.

Stades phénologiques

Le Tableau C.1 reprend les stades phénologiques du modèle STICS, présentés dans la Section 2.3.

Stades en phase végétative	Stades en phase reproductive
<i>IPLT</i> : Semis ou plantation	
<i>IGER</i> : Germination	
<i>ILEV</i> : Emergence (plantes annuelles) ou débourrement (plantes pérennes)	
<i>ILET</i> : Fin du stade de sensibilité au gel des plantules	<i>ILAT</i> : Début de la phase critique de l'apparition du nombre de grains
<i>IAMF</i> : Accélération maximale de la croissance foliaire - Fin de la phase juvénile	<i>IFLO</i> : Floraison
	<i>IDRP</i> : Début du remplissage des organes récoltés
<i>ILAX</i> : <i>LAI</i> maximale - Fin de croissance foliaire	<i>INOUE</i> : Nouaison
	<i>IDEBDES</i> : Début de l'assèchement des fruits
	<i>IMAT</i> : Maturité physiologique
<i>IREC</i> : Récolte	

Table C.1 – Stades phénologiques du modèle STICS. Tableau adapté de Brisson et al. (2003).

Facteurs de conversion pour les unités-céréales

Produit agricole	Facteur de conversion [UC/kg]
Système BAU	
Betterave	0.23
Froment d'hiver	1.04
Pomme de terre	0.22
Colza	1.3
Pois	0.47
Maïs	1.08
Système Vegan	
Chanvre	1.00
Froment d'hiver	1.04
Féverole	0.54
Colza	1.3
Pois	0.47
Système ICLS	
Maïs	1.08
Froment d'hiver	1.04
Féverole	0.54
Colza	1.3
Pois	0.47
Prairie (pâturage)	0.16
Prairie (herbe ensilage)	0.27
Prairie (foin)	0.61

Table C.2 – Facteurs de conversion pour passer d'un 1 kilogramme de produit agricole à son équivalent en Unités-Céréales (Brankatschk and Finkbeiner, 2014)

Productivités à l’hectare

Le Tableau C.3 indique les productivités moyennes (sur base des trois rotations successives simulées et des une ou plusieurs occurrences de chaque culture au sein d’une rotation) calculées pour chaque système agricole. A titre d’indication, la troisième colonne reprend les productivités moyennes belges entre 2014 et 2018, tirées de Statbel (2020a) et utilisées dans De Clerck et al. (2021).

Pour certaines cultures, on considère la masse de grain tandis que pour d’autres, on considère la plante entière. Toutes les productivités sont exprimées en masse fraîche.

Produit agricole	Productivité calculée [T/ha]	Productivité moyenne belge [T/ha]
Système BAU		
Betterave	92.02	89
Froment d’hiver	12.08	8.9
Pomme de terre	48.27	50
Colza	5.77	4.37
Pois	1.43	5
Maïs ensilage	8.9	15
Moutarde	1.7	/
Système Vegan		
Colza	5.31	4.37
Froment d’hiver	10.89	8.9
Féverole	2.74	5
Pois	1.92	5
Moutarde	0.72	/
Système ICLS		
Maïs ensilage	7.27	15
Froment d’hiver	11.95	8.9
Féverole	2.67	5
Colza	8.48	4.37
Pois	2.06	5
Prairie temporaire	9.43	10
Moutarde	0.8	/

Table C.3 – Productivités à l’hectare des trois systèmes agricoles, calculées dans le cadre de ce travail via la modélisation (2ème colonne) et moyennes belges (Statbel, 2020a)

Masse des organes récoltés

La Figure C.4 compare les évolutions (en tonnes par hectare) des masses des organes récoltés (variable *mafruit* dans STICS) sur une seule rotation. Il s'agit donc d'un agrandissement de la Figure 3.3 du Chapitre 3, auquel le lecteur intéressé doit se référer pour la légende.

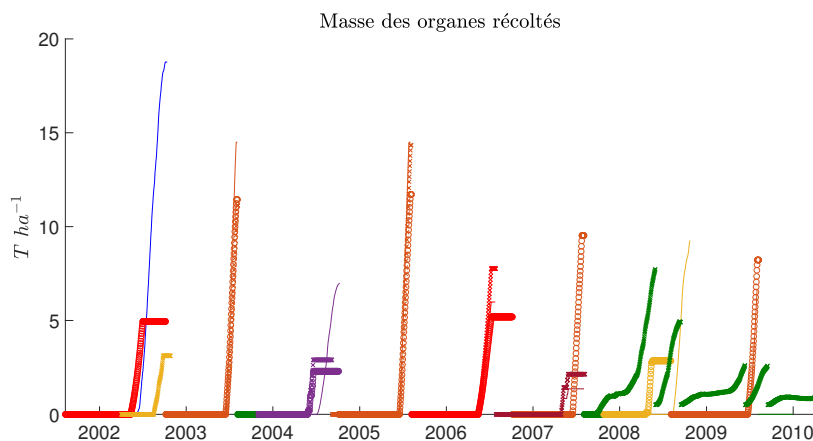


Figure C.4 – Agrandissement pour la 3ème rotation

Stock d'eau dans le sol

La Figure C.5 montre l'évolution du stock d'eau dans le sol pour une seule rotation. Il s'agit donc d'un agrandissement de la Figure 3.8 du Chapitre 3.

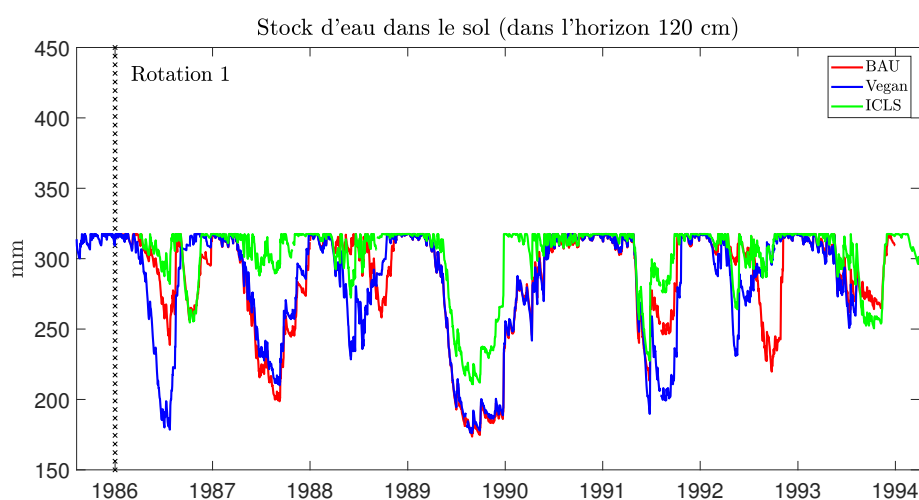


Figure C.5 – Agrandissement pour une seule rotation

Influences des stress hydrique, thermique et azoté par culture

Les Figures C.6, C.7 et C.8 montrent respectivement les influences des stress hydrique, thermique et azoté pour chaque culture.

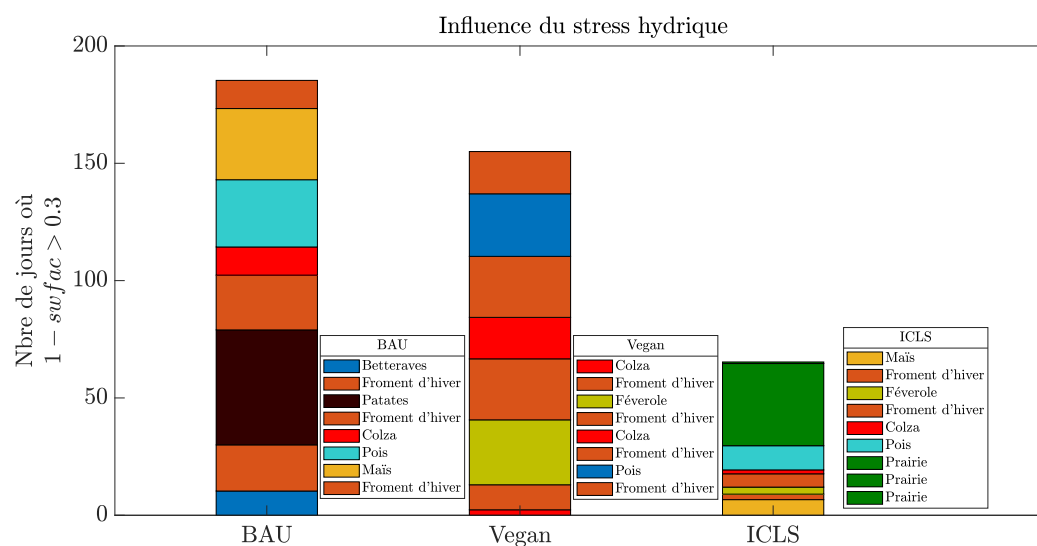


Figure C.6 – Influence du stress hydrique par culture (moyenne sur les trois rotations successives)

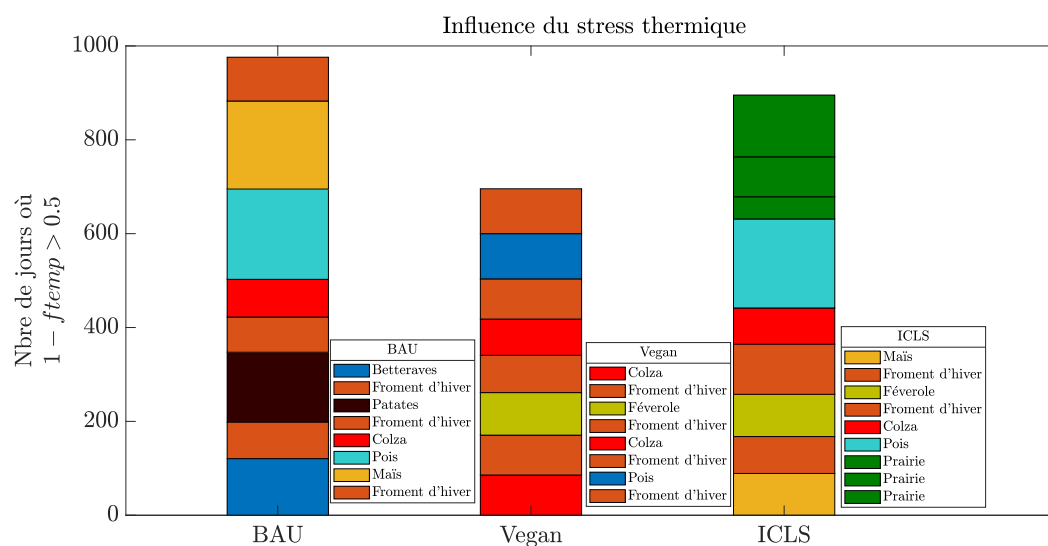


Figure C.7 – Influence du stress thermique par culture (moyenne sur les trois rotations successives)

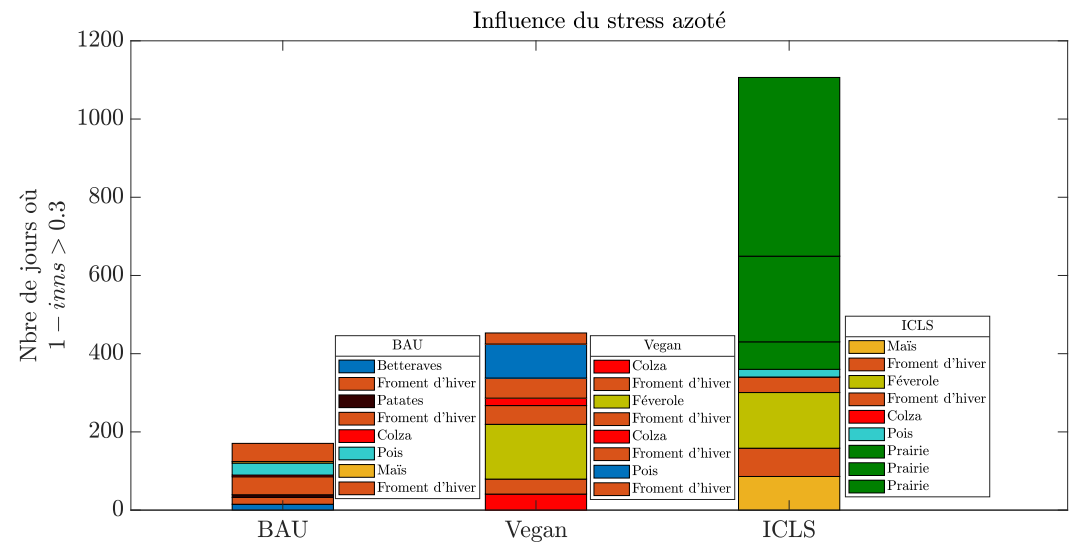


Figure C.8 – Influence du stress azoté par culture (moyenne sur les trois rotations successives)

Evolution des productivités à l'hectare

Le Tableau C.4 compare les productivités calculées (en matière fraîche) pour les différents scénarios climatiques. Ces productivités sont moyennées sur base des trois rotations successives simulées et des une ou plusieurs occurrences de chaque culture au sein d'une rotation.

Produit agricole	Productivités calculées [T/ha]				
	1985-2009	2045-2069		2075-2099	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Système BAU					
Betterave	92.02	111.37	114.57	130.13	148.6
Froment d'hiver	12.08	14	14.71	14.59	14.49
Pomme de terre	48.27	64.4	21.66	43.22	53.14
Colza	5.77	7.22	5.62	5.64	5.77
Pois	1.43	1.27	1.04	1.33	0.57
Maïs ensilage	8.9	8.54	16.4	8.38	16.3
Moutarde	1.7	1.74	2.02	1.55	2.43
Système Vegan					
Colza	5.31	6.32	5.85	4.78	5.2
Froment d'hiver	10.89	12.69	12.52	13.28	12.91
Féverole	2.74	1.62	1.78	2.02	2.07
Pois	1.92	1.18	1.72	0.48	1.5
Moutarde	0.72	1.15	1.25	0.79	1.88
Système ICLS					
Maïs ensilage	7.27	10.08	8.47	12.5	13.77
Froment d'hiver	11.95	11.98	11.94	12.22	13.43
Féverole	2.67	1.99	1.74	2.12	2.18
Colza	8.48	9.46	9.09	7.59	9.15
Pois	2.06	1.35	1.56	0.47	0.6
Prairie temporaire	9.43	9.19	13.16	10.55	12.06
Moutarde	0.8	1.6	1.04	1.99	3.59

Table C.4 – Evolution des productivités à l'hectare des trois systèmes agricoles

Facteurs de l'effet fertilisant du CO₂

Le Tableau C.5 indique les valeurs du facteur FCO₂ (effet du CO₂ sur l'efficacité d'utilisation de la radiation (RUE)) selon la plante et le scénario climatique.

Plante	1985-2009	2045-2069		2075-2099	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Maïs (plante en C ₄)	1	1.0305	1.0542	1.0424	1.0998
Froment d'hiver (plante en C ₃)	1	1.1056	1.182	1.1446	1.3157

Table C.5 – Facteur FCO₂ (effet du CO₂ sur l'efficacité d'utilisation de la radiation (RUE)) selon la plante et le scénario climatique

Evolution des indicateurs alimentaires

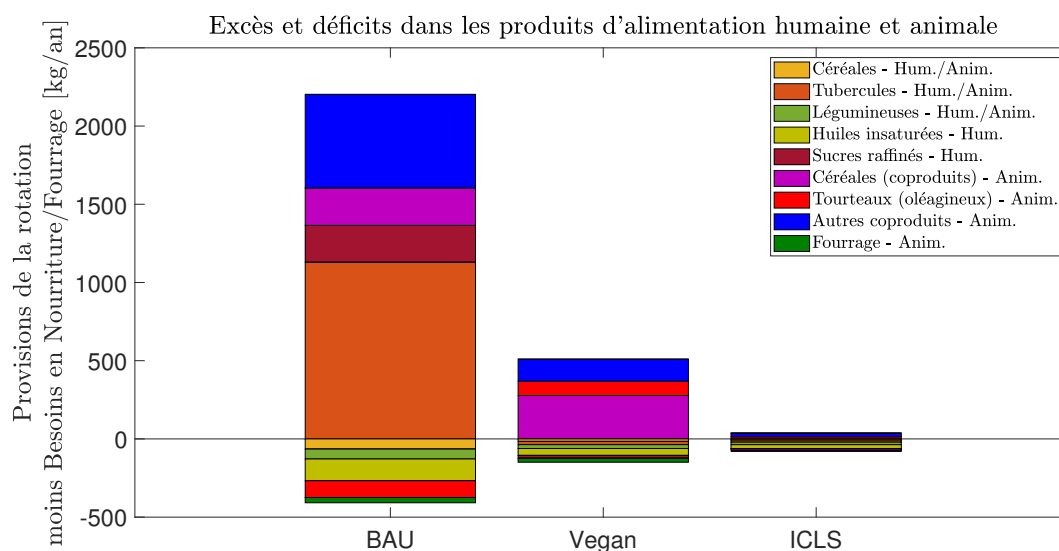


Figure C.9 – Excès et déficits dans les produits d'alimentation humaine et animale dans les trois régimes alimentaires optimisés à partir des productions de chaque système agricole pour la période 2075-2099 (RCP8.5)

Composition du troupeau	Système BAU	Système Vegan	Système ICLS
Vaches laitières	4.5	1.1	3.9
Boeufs laitiers	3	0.7	2.7
Agneaux	0	0	32.4
Porcs	0	17	0
Boeufs viandeux	0	0	0
Poulets	55.6	577.3	309.8
Poules	0	37.2	11.3

Table C.6 – Composition du troupeau pour le régime alimentaire optimal des trois systèmes pour la période 2075-2099 (RCP8.5)

Calcul des critères pour la comparaison multi-critères

Critère	Indicateur intermédiaire I1	Indicateur final
Critères agronomiques		
Rendement	Moyenne de la somme des rendements (en unités-céréales) de chacune des trois rotations successives	I1/mean(all I1)
Rendement des froments d'hiver	Rendement moyen des froments d'hiver d'années 2 et 4 de chacune des trois rotations successives	I1/mean(all I1)
Critères alimentaires		
Auto-suffisance	Pour un repas optimisé : somme des calories excédentaires divisée par la somme des calories déficitaires	10-I1/mean(all 10-I1)
Personnes nourries	Nbre de rotations nourries par la rotation	I1/mean(all I1)
Critères environnementaux		
Emissions de CO ₂	Moyenne de la somme des émissions de CO ₂ de chacune des trois rotations successives	I1/mean(all I1)
Emissions de N ₂ O	Moyenne de la somme des émissions de N ₂ O de chacune des trois rotations successives	I1/mean(all I1)
Stress hydrique	Somme des jours où $swfac < 0.3$ sur les trois rotations successives	Mean(all I1)/I1
Stress thermique	Somme des jours où $ftemp < 0.5$ sur les trois rotations successives	Mean(all I1)/I1
Stress azoté	Somme des jours où $inns < 0.3$ sur les trois rotations successives	Mean(all I1)/I1
Taux de carbone organique	Gain de carbone dans la matière organique humifiée sur les trois rotations successives	I1/mean(I1)

Table C.7 – Calculs pour les critères de la comparaison multi-critères de la Section 3.3

Evolution des indicateurs de la comparaison multi-critères

Le Tableau C.8 montre l'évolution entre les périodes 1985-2009 et 2075-2099 (RCP8.5) des indicateurs intermédiaires de la comparaison multi-critères (Section 3.3), définis dans la deuxième colonne du Tableau 2.1, en pourcents. Afin d'avoir une convention uniforme selon laquelle un pourcentage positif est apprécié (meilleurs rendements, moins d'émissions de gaz à effet de serre ou moins de stress par exemple), pour les émissions de gaz à effet de serre et les jours sous influence de stress hydrique, thermique et azoté, nous mettons l'opposé de la valeur obtenue : ainsi, si un système passe de 100 jours sous influence de stress hydrique en 1985-2009 à 80 jours en 2075-2099 (RCP8.5), nous indiquerons une évolution de +20%.

Critère	BAU	Vegan	ICLS
Critères agronomiques			
Rendement	+30.92%	+12.13%	+40.19%
Rendement des froments d'hiver	+11.57%	+19.48%	+12.45%
Critères alimentaires			
Auto-suffisance	-12.87%	+6.35%	-1.35%
Personnes nourries	+30.55%	+10.64%	+11.93%
Critères environnementaux			
Emissions de CO ₂	-20.25%	-20.58%	+6.53%
Emissions de N ₂ O	-42.58%	-57.25%	-67.29%
Stress hydrique	+23.26%	+81.94%	-36.22%
Stress thermique	+25.85%	+48.41%	+47.3%
Stress azoté	+0.98%	+36.93%	+0.03%
Taux de carbone organique	-57.2%	-94.31%	-41.53%

Table C.8 – Evolution entre les périodes 1985-2009 et 2075-2099 (RCP8.5) des indicateurs de la comparaison multi-critères (Section 3.3), définis dans le Tableau 2.1

DECLARATION SUR L'HONNEUR CONTRE LE PLAGIAT

Mathieu Delandmeter
Rue Haute, 14
1340 Ottignies

« Modélisation de systèmes agricoles -

Analyse prospective de l'évolution face au changement climatique des performances agronomiques, environnementales et alimentaires de systèmes de production agricole contrastés »

Travail de Fin d'Etudes présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Agroécologie

Promoteurs : Pr. Benjamin Dumont et Pr. Jérôme Bindelle

Je certifie qu'il s'agit d'un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie, de surcroît, que je n'ai ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets. Le non-respect de ces dispositions est passible de constituer un obstacle rédhibitoire à la validation de mon TFE et donc à l'obtention du diplôme convoité.

Ottignies, le 30 mai 2021.

Mathieu Delandmeter

