

---

## **Spatialisation d'un modèle de culture en vue de déterminer le fractionnement azoté optimal pour la culture du froment d'hiver dans différents contextes pédoclimatiques**

**Auteur** : Lécivain, Achille

**Promoteur(s)** : Bodson, Bernard; Dumont, Benjamin

**Faculté** : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme** : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

**Année académique** : 2016-2017

**URI/URL** : <http://hdl.handle.net/2268.2/3026>

---

### *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.*

---



**LIÈGE université**  
**Gembloux**  
**Agro-Bio Tech**

# **SPATIALISATION D'UN MODELE DE CULTURE A L'ECHELLE WALLONNE : POTENTIEL ET LIMITES**

**LECRIVAIN ACHILLE**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

**ANNEE ACADEMIQUE 2016-2017**

**CO-PROMOTEURS:  
PR. BODSON BERNARD  
DR. DUMONT BENJAMIN**

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<sup>1</sup> de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

---

<sup>1</sup> Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par les promoteurs membre du personnel enseignant de GxABT.



**LIÈGE université**  
**Gembloux**  
**Agro-Bio Tech**

# **SPATIALISATION D'UN MODELE DE CULTURE A L'ECHELLE WALLONNE : POTENTIEL ET LIMITES**

**LECRIVAIN ACHILLE**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

**ANNEE ACADEMIQUE 2016-2017**

**CO-PROMOTEURS:  
PR. BODSON BERNARD  
DR. DUMONT BENJAMIN**

## **Remerciements**

Ce travail est le fruit d'un investissement de longs mois qui n'aurait été possible sans l'appui des nombreuses personnes y ayant contribué. Je tiens donc à remercier l'ensemble des personnes ayant participé de près ou de loin à ce travail.

Je tiens à remercier plus particulièrement les personnes suivantes.

Mr Dumont, mon co-promoteur pour l'ensemble des conseils prodigués, les aides apportées pour la programmation de certaines parties et la relecture de ce travail. Je remercie également Mme Charles, présidente du jury, Mr Bodson, mon co-promoteur, Mr Colinet, Mr Leemans et Mr Legrain, lecteurs et membres du jury.

Mr Vandenberg pour les critiques constructives apportées pour la discussion des sorties du modèle.

Je remercie Damien pour ses réponses aux questions, Tanguy pour sa bonne humeur et enfin Carine et Micheline pour le café.

Je remercie l'ensemble des étudiants avec lesquels j'ai eu la chance de partager de bons moments et plus particulièrement mes co-kotteurs, pour les nombreuses activités extrascolaires vécues.

Je remercie également mes parents, mes frères et sœurs, mes neveux et nièces et plus particulièrement mon filleul Osvald de m'avoir soutenu et encouragé durant ces derniers mois.

Last but not least, je tiens à remercier Sarah, ma copine, pour son soutien tout au long de mes études.

## ***Résumé***

Les modèles de culture sont de plus en plus utilisés à travers le monde comme appui à l'agriculture et comme outils d'aide à la décision. Dans ce cadre, le modèle de culture SALUS, développé au Michigan par Bruno Basso, a été calibré, validé et spatialisé à l'échelle de la Wallonie. L'objectif principal de cette étude est de déterminer le potentiel du modèle de culture ainsi que ses limites sous les conditions rencontrées dans nos régions.

Pour cela, des bases de données météorologiques (PAMESEB) et pédologiques (CNSW) ont été préparées. Ensuite, le modèle a été calibré selon les observations réalisées au sein d'un champ de la faculté agronomique de Gembloux pour 7 managements azotés et 6 saisons culturales. Au niveau de la spatialisation, deux dates de semis et trois managements azotés différents ont été testés pour 21 saisons.

La calibration a montré que le modèle était peu adapté à nos régions pour l'ensemble des sorties du modèle, excepté pour la simulation de la biomasse. Les résultats des simulations sur la biomasse totale, les rendements en grains et les gains unitaires ont également montré que ces sorties étaient principalement influencées par les variables climatiques. Il a donc été conclu qu'en l'état, le modèle est difficilement utilisable de manière efficiente en Wallonie.

## ***Abstract***

Crop models are more and more used throughout the world as support for agriculture and as tools for decision makings. In this context, SALUS crop model, developed at Michigan by Bruno Basso, was calibrated, validated and spatialized at the scale of the Wallonia. The main purpose of this study is to determine the potential and the limits of the crop model under meteorological conditions in our regions.

For that, meteorological (Pameseb) and pedological (CNSW) data bases were prepared. Then, the model was calibrated according to the observations realised within a field of the agronomic faculty of Gembloux for 7 nitrogen management and 6 cultural seasons. For the spatialization, two planting dates and three nitrogen management were tested for 21 seasons.

The calibration shown that the model is few adapted for our regions for all outputs of the model, except for the biomass. Results of the simulation of the biomass, the yields and the units gains are also shown that the outputs are mainly influenced by the meteorological conditions. It has therefor been concluded that, as it stands, the model is difficult to use efficiently in Wallonia.

# ***Table des matières***

1	Introduction Générale .....	1
2	Revue Bibliographique .....	2
2.1	Le froment .....	2
2.2	L'azote .....	2
2.3	Interactions génotype environnement management (G x E x M) .....	3
2.4	Les modèles de culture.....	4
2.4.1	Généralités sur les modèles de culture .....	4
2.4.2	Calibration et validation d'un modèle de culture .....	5
2.4.3	Spatialisation d'un modèle de culture .....	7
3	Matériel et méthode .....	9
3.1	Site expérimental et données de référence .....	9
3.2	Paramétrisation des données sol et météo .....	11
3.2.1	Base de données 'Sol' .....	11
3.2.2	Base de données Météo .....	17
3.3	Spatialisation du modèle de culture.....	19
3.4	Le modèle de culture SALUS.....	21
3.4.1	Généralités du modèle de culture SALUS.....	21
3.4.2	Entrées du modèle .....	21
3.4.3	Organisation du modèle .....	22
3.5	Calibration et validation du modèle de culture .....	28
3.5.1	Méthodes de calibration .....	28
3.5.2	Critères d'évaluation d'un modèle de culture .....	29
3.6	Logiciel.....	30
4	Résultats et discussions.....	31
4.1	Calibration des formalismes de SALUS.....	31
4.1.1	La phénologie .....	32
4.1.2	La surface foliaire (LAI) .....	35
4.1.3	La biomasse .....	36
4.1.4	Le rendement en grains.....	37
4.1.5	L'azote dans le sol.....	40
4.1.6	L'azote dans la plante .....	43

4.1.7	L'azote dans le grain .....	44
4.2	Résultats de la spatialisation du modèle de culture .....	45
4.2.1	Biomasse totale .....	45
4.2.2	Rendements en grains .....	46
4.2.3	Azote dans le grain .....	55
5	Conclusion et perspectives.....	59
6	Biblio.....	61
7	Annexe.....	66
7.1	Annexe 1.....	66
7.2	Annexe 2.....	67
7.3	Annexe 3.....	69
7.4	Annexe 4.....	70
7.5	Annexe 5.....	71
7.6	Annexe 6.....	72

## **Table des Figures**

Figure 1. Triangle textural (Loganathan, 1987) .....	16
Figure 2. Représentation des profils selon la teneur en argile de leur premier horizon .....	17
Figure 3. Représentation des stations météo wallonnes selon leur pluviosité moyenne annuelle [mm] .....	18
Figure 4. Représentation des stations météo wallonnes selon leur température moyenne quotidienne [°C]. .....	19
Figure 5. Représentation des sols selon leur proximité aux stations météo. ....	20
Figure 6. Diagramme représentant les composants de SALUS et leurs interactions .....	28
Figure 7. Représentation des phases phénologiques simulées et observées .....	33
Figure 8. Représentation des phases phénologiques simulées et observées .....	34
Figure 9. Représentation du gain total en vernalisation selon le jour après l'émergence .....	34
Figure 10. Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées de l'évolution de la biomasse au cours de la saison culturale pour le set de calibration .....	36
Figure 11. Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées de la biomasse en fin de saison culturale pour le set de validation .....	37
Figure 12. Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées du rendement en grains au cours de la saison culturale pour le set de validation .....	38
Figure 13. Représentation des rendements en grains simulés à maturité en fonction des observations pour le set de calibration .....	39
Figure 14. Représentation de l'évolution de la quantité d'azote présente dans les différents horizons .....	40
Figure 15. Représentation du cumul d'eau évapotranspirée et de précipitations par saison culturale .....	42
Figure 16. Représentation de l'évolution de la quantité d'azote dans l'horizon 0-30 et dans la plante de l'émergence à la sortie d'hiver .....	42
Figure 17. Évolution de la teneur en eau des différents horizons pour chaque saison. ....	43
Figure 18. Représentation des quantités d'azote présentes dans la plante. ....	44
Figure 19. Représentation des quantités d'azote présentes dans le grain .....	45
Figure 20. Représentation des profils de sol selon leur biomasse totale .....	46
Figure 21. Représentation des profils de sols selon leurs rendements en grains. ....	46
Figure 22. Boîtes à moustache des rendements moyens en grains selon la classe texturale .....	47
Figure 23. Représentation des coefficients de variation des rendements moyens en grains selon la classe texturale. ....	49
Figure 24. Boîtes à moustache des rendements moyens en grains selon la station météo .....	50
Figure 25. Représentation des coefficients de variation des rendements moyens en grains simulés selon la station météo .....	51
Figure 26. Représentation des boîtes à moustache des gains unitaires moyens en fonction de la classe texturale .....	52
Figure 27. Représentation des coefficients de variation pour les gains unitaires selon la classe texturale .....	52
Figure 28. Représentation des boîtes à moustache des gains unitaires moyens en fonction de la station météo .....	53
Figure 29. Représentation des coefficients de variation pour les gains unitaires selon la station météo .....	54

Figure 30. Représentation des gains moyens unitaires en azote dans le grain selon le profil de sol...	54
Figure 31. Représentation des profils de sols selon la quantité d'azote assimilée dans le grain. ....	55
Figure 32. Représentation des boîtes à moustache des gains unitaires en azote dans le grain selon la classe texturale.....	57
Figure 33. Représentation des coefficients de variation des gains unitaires en azote dans le grain selon la classe texturale. ....	57
Figure 34. Représentation des boîtes à moustaches des gains unitaires en azote dans le grain selon la station météorologique.....	58
Figure 35. Représentation des coefficients de variation des gains unitaires en azote dans le grain selon la station météorologique .....	58

## ***Table des Tableaux***

Tableau 1. Essais de management lors des saisons culturales 2008-2009 à 2013-2014 .....	9
Tableau 2. Date des observations sur les cultures pour les saisons 2008-2009 à 2013-2014 .....	10
Tableau 3. Quantité de reliquats azotés dans le profil en début de saison culturale .....	10
Tableau 4. Données disponibles pour chaque horizon et nécessaires au modèle de culture SALUS ...	11
Tableau 5. Traitement des données de la base de données Aardewerk .....	13
Tableau 6. Récapitulatif des paramètres calculés pour les différents horizons.....	15
Tableau 7. Correspondance des numéros et noms des classes texturales .....	16
Tableau 8. Données des stations météo .....	17
Tableau 9. Dates de semis testées .....	20
Tableau 10. Modalités de management testées .....	20
Tableau 11. Les différentes phases du modèle de culture SALUS et les stades clés les délimitant.....	22
Tableau 12. Paramètres impliqués dans la détermination des phases phénologiques .....	23
Tableau 13. Tableau reprenant le calcul pour le passage aux différentes phases phénologiques de la croissance .....	25
Tableau 14. Valeurs des critères d'évaluation de l'efficacité du modèle en dynamique.....	31
Tableau 15. Valeurs des critères d'évaluation de l'efficacité du modèle à maturité.....	31
Tableau 16. Valeurs et unités des paramètres du modèle de culture après calibration .....	32
Tableau 17. Classement des classes texturales selon leurs rendements.....	48
Tableau 18. Classement des stations météo selon leurs rendements.....	50
Tableau 19. Classement des classes texturales selon les quantités d'azote assimilées dans le grain ..	55
Tableau 20. Classement des stations météo selon les quantités d'azote assimilées dans le grain.....	56

# 1 Introduction Générale

En 2013, les Nations Unies évaluaient la population mondiale à 7.2 milliards d'individus. Selon leurs perspectives, 9.6 milliards d'humains habiteront la Terre d'ici 2050 avec des booms démographiques principalement dans les pays d'Afrique. Suite à cette importante croissance démographique, le monde se retrouve face à un défi de taille, nourrir l'ensemble de la population, tout en préservant l'environnement (Godfray et al., 2010).

Les céréales, dont le froment d'hiver fait partie, sont les aliments de base d'une grande partie de la population mondiale et sont donc très étudiées dans le but d'augmenter leurs rendements. Au moyen de ces études, de nouvelles espèces céréalières ont été créées. Ces espèces sont par exemple plus résistantes aux maladies ou au phénomène de verse. D'autres études ont montré que les pratiques culturales (travail du sol, apports azotés, irrigation,...) permettent également d'augmenter les rendements. Parmi l'ensemble des pratiques culturales, il ressort que la gestion azotée permet la plus importante augmentation des rendements (Chenu et al., 2011).

Dans cette optique, de nombreux modèles de culture ont été construits afin d'étudier l'impact des différents composants de la culture. Ces modèles sont des outils de recherche rapides. Ils permettent de déconvoluer facilement les interactions génotype-environnement-management. Par leur utilisation, les scientifiques peuvent conseiller des fumures azotées afin d'atteindre l'optimum de rendement tout en tenant compte des impacts des cultures sur l'environnement.

Dans ce cadre, **l'objectif du présent travail est de spatialiser un modèle de culture de froment d'hiver à l'échelle de la Wallonie afin de l'utiliser ultérieurement comme base scientifique de recherches.** Le potentiel de ce modèle ainsi que ses limites rencontrées dans nos conditions de culture wallonnes, seront également discutés.

## 2 Revue Bibliographique

### 2.1 Le froment

Le froment (*Triticum aestivum L.*) est une plante monocotylédone de la famille des graminées. Elle est la céréale la plus cultivée au monde devant le maïs et le riz (Maiorano et al., 2015). Les grains sont utilisés notamment pour l'alimentation, la consommation, les biocarburants,... (Studnicki et al., 2016).

Il en existe de nombreuses espèces caractérisées par des résistances différentes à de nombreux facteurs (Alem et al., 2002). On distingue les froments durs et les froments tendres. La différence principale réside dans le fait que les froments durs peuvent supporter des températures plus élevées que les froments tendres (Moule, 1971).

En Belgique, ce sont principalement les froments tendres qui sont cultivés. Les froments tendres d'hiver sont semés entre les mois d'octobre et janvier et récoltés en août. En 2015, les cultures de froment recouvraient en Belgique 198.481 hectares, soit 14.7 % de la surface cultivée en Belgique. La production totale était de 1.908.319 tonnes de froment, soit un rendement moyen de 9610 kilogrammes de froment par hectare cultivé (Waeyaert, 2016).

Les rendements des cultures de froment dépendent de la génétique, de la météo, du management, de la population et des stress (azote, eau,...) vécus durant la croissance (Batchelor et al., 2002 ; Mirschel et al., 2014).

### 2.2 L'azote

L'azote est un élément essentiel pour la croissance des plantes (Bichel et al., 2016). Les plantes le prélèvent dans le sol sous la forme nitrique. Il ne représente qu'une faible proportion de la matière sèche totale mais joue un rôle important sur la croissance en améliorant les rendements photosynthétiques et donc la croissance carbonée (Gate, 1995). Actuellement, son usage est devenu indispensable dans les systèmes d'agriculture (Robertson et al., 2009). Il permet de maximiser la croissance des plantes et le rendement des cultures mais aussi d'augmenter la teneur en protéines des grains (Giola et al., 2012).

Cependant, de nombreuses études ont démontré qu'un apport trop important ne permettait plus d'augmenter les rendements et pouvait avoir des conséquences environnementales sérieuses (Basso et al., 2005 ; Cassman K. G., Dobermann A., 2002). En effet, le nitrate excédentaire peut connaître différents destins. Les eaux souterraines en sont souvent polluées suite à la lixiviation alors que l'atmosphère l'est par des émissions d'oxydes nitreux. De plus, ce nitrate peut provoquer une augmentation des volatilisations d'ammoniac ou une acidification des sols (Zhu et al., 2002 ; Basso et al., 2005 ; Chen et al., 2008 ; Oehler et al., 2007).

Dans cette optique, l'application d'azote doit être raisonnée afin d'atteindre un rendement optimal économique et environnemental. Actuellement, de nombreux fermiers appliquent encore une quantité totale d'azote bien plus élevée que nécessaire pour atteindre le rendement maximal de la culture (Sui et al., 2013).

L'azote est apporté à la culture selon divers fractionnements. De nombreux auteurs ont réalisé des études sur le sujet. Yang et al. (2017) proposent un fractionnement optimal de 182 kg/ha pour un climat tempéré océanique et estime que l'apport d'azote permet d'augmenter les rendements des cultures de blé de 57 à 81 % selon les années climatiques mesurées.

En Belgique, la fumure azotée conseillée aux agriculteurs est d'environ 180 kg/ha en deux ou trois fractionnements (Bodson et al., 2016). Lorsque l'apport se fait en trois fractionnements, l'azote est apporté aux stades tallage<sup>2</sup>, redressement<sup>3</sup> et dernière feuille<sup>4</sup> avec 60 unités d'azote apportées à chaque apport. Lorsque l'apport se fait en deux fractionnements, l'azote est apporté au stade tallage-redressement et à la dernière feuille avec 90 unités d'azote par apport.

### **2.3 Interactions génotype environnement management (G x E x M)**

Lors de la production de cultures, les rendements obtenus dépendent d'un grand nombre de paramètres. Néanmoins, tous ces facteurs peuvent être ramenés à trois grands ensembles :

- Le génotype,
- L'environnement,
- Le management.

Les différentes espèces de froment n'ont pas les mêmes caractéristiques génotypiques. En effet, certaines espèces favorisent des rendements élevés, là ou d'autres favorisent une teneur en protéines élevée dans le grain. Lorsque l'on veut quantifier les effets de l'environnement ou du management sur la croissance de la culture, la même espèce, ou des espèces similaires, sont utilisées pour l'ensemble de l'expérience.

Au niveau de l'environnement, le sol et le climat sont les principaux domaines dans lesquels les variables peuvent entraîner des changements de rendement des cultures.

Batchelor et al., (2002) expliquent que les différences de répartition de nutriments au sein de la plante sont essentiellement dues aux propriétés physiques et chimiques des différents horizons du sol, au pH du sol et à la teneur en matières organiques. La difficulté principale lorsque l'on tente d'évaluer l'impact du sol sur les rendements provient du manque de données relatives aux sols (argile, limon, sable, teneur en Carbone organique,...) (Senthilkumar et al., 2009).

Pour le climat, Les rendements des cultures peuvent chuter suite à des évènements climatiques extrêmes et entraînent alors une perte importante pour l'agriculteur. Ces évènements climatiques extrêmes sont des sécheresses, des pluies trop intenses,... (Rosenzweig et al., 2001).

Mirschel et al. (2014) montrent que les saisons présentant des pluies plus faibles entraînent des rendements de culture bien inférieurs aux autres. Dans la même lignée, Balkovič et al. (2013)

---

<sup>2</sup> Le tallage est l'étape de la croissance à laquelle la plante commence à produire des talles secondaires à partir de la plantule.

<sup>3</sup> Le redressement est l'étape de croissance à laquelle la montaison commence.

<sup>4</sup> La dernière feuille correspond à l'étape de la croissance à laquelle *'le limbe de la dernière feuille est étalé'* (Bodson et al., 2016)

montrent que les rendements augmentent avec l'augmentation des précipitations mais diminuent avec l'augmentation de la radiation solaire reçue si les pluies n'augmentent pas.

Le management joue également un rôle important. Le principal facteur de management jouant un rôle important sur les rendements est l'apport azoté (cf. paragraphe 2.2). En Belgique, le livre blanc propose depuis 50 ans des études sur l'impact des apports d'azote sur les rendements des cultures.

Néanmoins, de nombreuses interactions sont également observées entre ces trois facteurs (Martín et al., 2014). En effet, il est par exemple important d'apporter de l'azote à la culture mais il est d'autant plus utile lorsqu'il l'est aux stades phénologiques adéquats et sous des conditions météorologiques adaptées.

La compréhension des interactions entre le génotype et l'environnement peut permettre de déterminer quels traits peuvent entraîner une augmentation des rendements des cultures (Yan et al., 2001).

Dans une étude visant à évaluer l'évolution des rendements selon les espèces de blé, Subira et al. (2015) ont démontré que 9.4 % de la variance total des rendements en blé étaient expliqués par les interactions entre l'espèce et l'environnement. Cette part est moins importante que celles de l'environnement ou de l'espèce (respectivement 76.4 % et 10.4 %) mais entraîne des modifications importantes des rendements. Cependant, Chenu (2015) souligne que de nombreuses recherches ont montré que les variations de rendements étaient dues dans l'ordre décroissant à l'environnement, aux interaction génotype x environnement et au génotype.

Les effets des facteurs seuls ou de leurs interactions sont évalués par l'analyse de la variance (ANOVA) dans de nombreuses études (Studnicki et al., 2016). Mohammadi et al. (2015) utilisent également une méthode de classification et d'ordination. Un dendrogramme avec l'ensemble des différentes combinaisons est construit. A partir de celui-ci, des classes peuvent être déterminées. Le but est alors de minimiser la variance au sein du groupe et de la maximiser entre les différents groupes.

## **2.4 Les modèles de culture**

### **2.4.1 Généralités sur les modèles de culture**

Durant ces 50 dernières années, l'agriculture a fortement évolué grâce à la contribution de nombreuses disciplines (ingénierie, économie) et au moyen de différents outils d'analyse (modèle, approche analytique) (Jones et al., 2016). Les modèles permettent de représenter la réalité, d'appliquer les théories et de fournir une approximation des résultats attendus expérimentalement. Ils sont de plus en plus exploités et utilisés en tant qu'outil d'aide à la décision et en tant qu'outils prévisionnels pour les rendements (Varella et al., 2008).

Deux grands types de modèle existent, les modèles empiriques, se basant sur des équations simulant les phénomènes observés et les modèles mécanistes, expliquant la croissance à partir de processus physiologiques connus et en lien avec l'environnement. Néanmoins, de nombreux modèles sont constitués de parties empiriques et mécanistes (Jame et al., 1996).

Brisson et al. (1992) soulignent que les modèles de culture sont construits à partir de deux principes en interaction, l'un génétique et l'autre trophique. Le premier est représenté par « *Un programme préétabli qui fixe la durée des différentes phases de développement de la culture en fonction des conditions de milieu et qui traduit une stratégie de l'espèce en termes de précocité, de pérennité ou d'adaptation au milieu.* » Le second présente « *les flux d'assimilats dans la plante entre des organes sources et des organes puits.* »

Jones et al. (2016) distinguent trois niveaux de modèles de culture, des plus simples aux plus complexes. Les plus simples permettent de suivre la croissance des plantes sans induire de stress. Dans ces modèles, seuls certains paramètres sont entrés (CO<sub>2</sub>, température,...) et la croissance de la biomasse est suivie. Un modèle de ce type est proposé par Wallach et al., (2006). La deuxième classe de modèles permet de prendre en compte certaines limitations de la culture (limitations en eau ou en nutriments,...) et d'y incorporer les pratiques agricoles. On y retrouve des modèles tels que STICS (Brisson et al., 2003), Ceres (Ritchie et al., 1985) ou SALUS (Dzotsi et al., 2015). Enfin, dans les modèles de la troisième classe tels que DSSAT-CSM (Jones et al., 2003), des facteurs de réduction sont ajoutés (insectes ravageurs, maladies,...).

De nombreux avantages sont attribués aux modèles. Les conditions de l'expérience sont sous contrôle total et leur répétabilité est aisée, contrairement aux expériences en champs au cours desquels le travail est dur et les conditions parfois compliquées (Fry et al., 2017). Leur prix est faible et le temps d'expérience est court (Semenov et al., 2007). Ils facilitent la compréhension des interactions sol-plante-atmosphère et peuvent être utilisés afin d'estimer certaines variables que l'on ne peut mesurer (Mirschel et al., 2014 ; Sexton et al., 2016). De plus, l'expérimentation seule en champ ne permet pas de bien quantifier le degré de variabilité des rendements et les modèles peuvent être un point d'appui pour cette quantification (Asseng et al., 2007). Cependant, de nombreux paramètres sont nécessaires pour utiliser ces modèles (climat, sols, management). Il est donc essentiel de disposer de bases de données complètes et précises afin de maximiser la précision des résultats obtenus avec les modèles (Wallach et al., 2011).

Les modèles existent pour un grand nombre de cultures (blé, maïs, soja, riz). De nombreux sont à même de simuler différents types de cultures, comme PEGASUS (Deryng et al., 2011), CERES (Ritchie et al., 1985), STICS (Brisson et al., 2003) ou SALUS (Dzotsi et al., 2015).

Brisson et al. (1992) montrent que de nombreux facteurs (génétique, environnement, management) ainsi que leurs interactions jouent un rôle important dans la croissance de la plante. Cela rend la mise au point d'un modèle de culture difficile. C'est pourquoi, lors de l'utilisation d'un modèle de culture, il est nécessaire de le calibrer et de le valider à partir de données expérimentales. Lorsqu'aucune expérience n'est simultanément menée à l'étude de modélisation, il est primordial de disposer de résultats d'expériences antérieures fiables.

#### **2.4.2 Calibration et validation d'un modèle de culture**

Lors de l'utilisation d'un modèle de culture, la phase de calibration est une étape obligatoire. Cette calibration a pour objectif d'ajuster les résultats obtenus avec le modèle à ceux obtenus expérimentalement et spécifiques à la région d'étude (Mirschel et al., 2014). Cela comprend notamment l'évaluation des paramètres du modèle à partir des données récoltées en champ

(Heidmann et al., 2008). Les paramètres sont vus comme des valeurs qui ne sont ni calculées par le modèle, ni mesurées ou observées (Wallach et al., 2006). Certains paramètres, comme l'efficacité de transpiration, sont d'ailleurs impossibles à calculer et leur évaluation au moyen d'une calibration est indispensable (Sexton et al., 2016).

Pour une étude visant à comparer l'efficacité de 8 modèles de croissance différents sous des conditions environnementales variées, Palosuo et al. (2011) ont observé qu'une calibration minimaliste ne permettait pas une bonne simulation des rendements et ce pour chaque modèle de culture. Il est donc essentiel de réaliser une calibration poussée et d'analyser précisément les paramètres sensibles du modèle.

Les différences de résultat observées entre l'expérience et le modèle sont dues à des erreurs. Il en existe deux grands types (Dumont et al., 2012) :

- Les erreurs de type I : Elles portent sur le développement du modèle. Les équations constituant le modèle sont exactes mais mal paramétrées, entraînant l'impossibilité d'une simulation correcte,
- Les erreurs de type II : Elles portent sur l'utilisation du modèle. Les équations utilisées sont fausses mais permettent néanmoins de simuler le phénomène dans la gamme de valeurs pour laquelle il a été paramétré.

Palosuo et al. (2011) présentent deux autres types d'erreur. Les erreurs dues à de mauvaises données d'entrée et les erreurs humaines de manipulation. Ce dernier type d'erreur est difficilement évaluable et le modélisateur ne peut jouer aucun rôle sur celles-ci.

Trois grandes difficultés sont rencontrées lors de la calibration d'un modèle (Guillaume et al., 2011) :

- Le choix de la procédure à adopter pour la calibration,
- Le choix des paramètres à ajuster,
- Le choix du critère à minimiser.

Différentes procédures existent pour la calibration d'un modèle. La première est la calibration par étape. Celle-ci consiste à choisir une valeur-cible et seuls quelques paramètres sont ajustés afin d'atteindre cette valeur-cible (Guillaume et al., 2011). Elle a pour avantage d'être numériquement plus efficace que l'estimation simultanée de plusieurs paramètres selon plusieurs variables de réponse. Néanmoins, les variables étant souvent liées les unes aux autres, lorsque des variables sont ajustées, il est commun que d'autres variables, précédemment ajustées soient affectées ayant alors des conséquences inconnues sur les résultats. Une deuxième procédure consiste à calibrer l'ensemble des paramètres simultanément. Cette procédure est cependant plus compliquée et le modélisateur ne peut comprendre de manière fine l'impact de chaque paramètre sur les sorties du modèle.

De manière générale, la calibration doit se faire sur le moins de paramètres possible. En effet, si de nombreux paramètres sont étudiés, cela diminue la qualité prédictive du modèle (Wallach et al., 2001).

Pour l'ajustement des paramètres, on distingue deux grandes approches, l'approche fréquentielle et l'approche bayésienne (Wallach et al., 2014).

Pour l'approche fréquentielle, on utilise des méthodes d'estimation afin d'approcher une valeur fixe des paramètres en se basant sur un échantillon de données (Touhami, 2014). Cette approche est la plus utilisée pour la calibration des modèles de culture. Trois méthodes sont distinguées (Dumont et al., 2012) :

- Trouver un maximum de paramètres dans la littérature et estimer les paramètres restants,
- Utiliser une méthode de régression. Les paramètres sont choisis successivement afin d'atteindre le meilleur ajustement du modèle. Lorsque cette méthode est utilisée, la paramétrisation s'arrête lorsque la variance résiduelle ne diminue plus ou lorsque l'ajustement atteint un écart fixé avant la calibration (Heidmann et al., 2008),
- Réaliser une étude de sensibilité du modèle et ajuster les paramètres les plus influents sur les réponses du modèle.

Dans l'approche bayésienne, les paramètres du modèle sont considérés comme des variables aléatoires dont les distributions permettent de caractériser le degré de connaissance des paramètres (Touhami, 2014). Une distribution dite '*à priori*' est déterminée pour chaque paramètre du modèle et ces distributions sont mises à jour avec les données expérimentales. Les sorties de cette méthode sont des distributions dites '*à posteriori*', et sont calculées selon le théorème de Bayes. Cette approche est très puissante et est de plus en plus utilisée grâce au récent développement des puissances de calcul des ordinateurs.

Lorsque l'on cherche à optimiser la calibration, de nombreux critères peuvent être optimisés. Dans son ouvrage, Wallach et al. (2006) proposent 12 critères différents. Parmi ceux-ci, on retrouve entre autres, l'erreur quadratique moyenne, l'efficacité du modèle ou encore l'erreur moyenne absolue.

Une fois le modèle calibré, une phase de validation doit être effectuée. Pour cela, le modèle est simulé sous différentes conditions environnementales afin de tester la précision de ses prédictions. Cette phase permet d'affiner le modèle (Jame et al., 1996).

### **2.4.3 Spatialisation d'un modèle de culture**

Au départ, les modèles de croissance des cultures ont été développés pour comprendre et simuler les processus de croissance à l'échelle du champ. Bien que les modèles soient construits sur le fait que les conditions en champs sont homogènes, ils sont devenus des outils utilisés également à l'échelle de la ferme, de la région ou même du pays. Cette spatialisation entraîne des erreurs inévitables, dues à des hétérogénéités spatiales (sol, météo, management) dont il est important de tenir compte lors de l'analyse des résultats (Balkovič et al., 2013).

Par leur spatialisation, les modèles permettent de mieux comprendre les variabilités spatiales au sein d'une région ou d'un pays (Launay et al., 2005). Les modèles permettent également de réaliser un nombre important de tests en un temps réduit. Les performances de cette spatialisation dépendent des formalismes du modèle, de la qualité de la calibration et des données d'entrée. Ces dernières sont souvent l'élément le plus restrictif dans la qualité prédictive des modèles spatialisés de culture

(Beaudoin et al., 2016). En effet, il n'est pas rare que les données soient incomplètes ou erronées. Il est alors difficile pour le modélisateur de les utiliser.

Lorsque l'objectif de la spatialisation du modèle est de permettre de conseiller les fermiers pour le management de la culture, il est essentiel de poser quelques hypothèses (Morell et al., 2016) :

- Les fermiers ont accès à toutes les informations et technologies nécessaires pour expérimenter la procédure simulée,
- Les données météo, le sol et le management sont connus,
- Une méthode de mise à niveau robuste est disponible.

Il est également évident que, pour pouvoir être spatialisé, un modèle de culture doit être développé de telle sorte qu'il soit possible de simuler différents types de conditions (climat, sol, management) sans devoir le calibrer pour toutes ces combinaisons.

Dans une expérience menée dans l'est de l'Allemagne, Mirschel et al. (2014) mesurent une différence de rendement entre les rendements simulés et observés de 2.69 %. Les rendements simulés sont presque automatiquement plus grands que les rendements observés. Les mêmes tendances ont également été observées par Morell et al., (2016).

### 3 Matériel et méthode

#### 3.1 Site expérimental et données de référence

Entre 2008 et 2014, une expérience visant à comprendre l'impact du management azoté sur les cultures mais également à mesurer les variabilités interannuelles a été menée sur un champ de la faculté agronomique de Gembloux.

Lors de chacune de ses saisons, sept managements azotés différents ont été testés (Tableau 1). Lors de l'apport en trois fractions, l'azote est apporté aux stades tallage, redressement et dernière feuille. Lors d'un apport azoté en deux fractions, l'azote est apporté aux stades redressement et dernière feuille.

Tableau 1. Essais de management lors des saisons culturales 2008-2009 à 2013-2014

	Fract. 1	Fract. 2	Fract. 3	Total
<b>Modalité 1</b>	0	0	0	0
<b>Modalité 2</b>	-	60	60	120
<b>Modalité 3</b>	30	30	60	120
<b>Modalité 4</b>	-	90	90	180
<b>Modalité 5</b>	60	60	60	180
<b>Modalité 6</b>	-	120	120	240
<b>Modalité 7</b>	60	60	120	240

Le champ sur lequel les données ont été récoltées est situé à Gembloux, rue du Bordia (LAT. : 50°N 33', LONG. : 4°E 42'). À partir de la base de données des cartes numériques des sols wallons (cf. paragraphe 3.2.1), il a été déterminé que le sol dont nous disposons des informations et le plus proche de ce champ est le profil '130EP003'. Ce sol fait partie de la classe des silt loam. Le tableau de l'Annexe 1 reprend les valeurs des principaux paramètres d'entrée du modèle pour chaque horizon de ce profil.

Au moyen de la base de données météorologique PAMESEB (cf. paragraphe 3.2.2), la station météo la plus proche du champ a été déterminée comme étant celle de Sombreffe. Les variables climatiques de cette station ont donc été assignées à ce sol pour les phases de calibration et validation. La moyenne annuelle des précipitations est de 749 millimètres d'eau et la température moyenne journalière est de 10.24 °C.

Pour la calibration et la validation de la phénologie de la plante, des données relatives aux saisons culturales 2008-2009 à 2013-2014 ont été employées. Ces données sont la date de semis, les dates des apports en azote auxquelles correspondent des stades clés de la croissance des plantes (tallage, redressement, dernière feuille), la date d'épiaison et la date de récolte. Le Tableau 2 présente ces dates pour chaque saison.

Il est important de spécifier que les dates de tallage, de redressement et de dernière feuille proviennent de l'itinéraire technique et sont donc les dates auxquels l'azote a été apporté à la

culture. Il est fort probable que les dates d'observation de ces stades soient légèrement antérieures à celles spécifiées.

**Tableau 2. Date des observations sur les cultures pour les saisons 2008-2009 à 2013-2014**

Saison	Semis	Tallage	Redressement	Der. feuille	Épiaison <sup>5</sup>	Récolte
2008-2009	23-10-08	17-03-09	30-04-08	27-05-09	17-06-09	12-08-09
2009-2010	19-10-09	25-03-10	29-04-10	31-05-10	19-06-10	22-08-10
2010-2011	28-10-10	23-03-11	15-04-11	12-05-11	14-06-11	18-08-11
2011-2012	20-10-11	20-03-12	06-04-12	15-05-12	04-06-12	05-08-12
2012-2013	08-11-12	15-04-13	02-05-13	04-06-13	24-06-13	13-08-13
2013-2014	24-10-13	12-03-14	07-04-14	19-05-14	11-06-14	05-08-14

Des variables écophysiologicals et environnementales mesurées tout au long de la saison culturale sont également disponibles. Celles-ci sont l'indice de surface foliaire, la biomasse sèche, le poids des grains secs, la teneur en azote dans le sol, la teneur en azote des plantes et la teneur en azote des grains. Ces variables permettront de calibrer et valider le modèle de culture SALUS aux conditions rencontrées sur le champ.

Dans cette étude, les 4 premières saisons serviront à la calibration du modèle de culture alors que les deux dernières ont été utilisées pour sa validation.

Pour chaque simulation, des reliquats azotés ont été imposés. Le Tableau 3 présente les reliquats azotés imposés dans les 5 premiers horizons du modèle de culture. Ces reliquats sont très faibles mais peuvent être expliqués. En effet, dans une phase d'initialisation de la simulation, la conversion de l'azote organique en azote minéral simulée par le modèle est apparue trop importante. De ce fait, si les reliquats azotés sont trop élevés en début de saison culturale, les quantités d'azote présentes dans le sol tout au long de la saison culturale seront elles aussi trop élevées.

**Tableau 3. Quantité de reliquats azotés dans le profil en début de saison culturale**

Profondeur [cm]	Reliquats azotés [kg/ha]
0 - 30	2
30 - 60	3
60 - 90	3
90 - 120	1.5
120 - 150	1.5

<sup>5</sup> Pour les saisons 2009-2010, 2011-2012 et 2012-2013, les dates d'épiaison n'ont pas été observées. Néanmoins, l'épiaison ayant lieu environ 20 jours après la dernière feuille, 20 jours ont été ajoutés à la date de la dernière feuille pour ces trois saisons et les dates ainsi déterminées ont été choisies comme dates d'épiaison.

Pour certaines variables, seules les observations relatives à la modalité 5 sont disponibles. Ces variables sont les stades phénologiques, l'indice de surface foliaire et la quantité d'azote dans le sol. Pour ces variables, les phases de calibration et validation ne se sont donc réalisées que sur ce management particulier.

## 3.2 Paramétrisation des données sol et météo

Comme présenté précédemment, les qualités prédictives du modèle de culture dépendent notamment des données d'entrée utilisées. Les données sol et météo doivent donc être préparées avec pour objectif de disposer de données d'entrée complètes et non erronées. Cette partie présente les différentes manipulations et calculs réalisés sur les bases de données.

### 3.2.1 Base de données 'Sol'

#### A. Analyse préliminaire des données

La base de données des cartes numériques des sols wallons (Legrain et al., 2011) a été utilisée comme source de données pour créer la base de données nécessaire pour les simulations du modèle. Celle-ci contenait un total de 6824 profils différents. Pour chaque profil, l'occupation du sol ainsi que les coordonnées (latitude et longitude en Lambert 72) sont connues. Les données des différents horizons sont également disponibles et sont reprises dans le Tableau 4.

Tableau 4. Données disponibles pour chaque horizon et nécessaires au modèle de culture SALUS

Données	Unités
Limite inférieure	[cm]
Limite supérieure	[cm]
Texture	[%]
pH KCl	[-]
pH H <sub>2</sub> O	[-]
Carbone organique total	[%]
Rapport C/N	[-]

Les différentes étapes de 'nettoyage' de cette base de données sont présentées ci-dessous et également synthétisées au Tableau 5.

Tout d'abord, seuls les profils intéressants pour l'agriculture ont été gardés. Ceux-ci sont les terres arables et les prairies permanentes (pouvant éventuellement être transformées en culture) et temporaires. Notons que les pépinières, les prairies de fauche, les plantations fruitières basses et les prés-vergers ont également été préservés car ces profils étaient indissociables des terres arables et prairies dans la base de données originale.

Ensuite, l'ensemble des sols pour lesquels les données de surface manquent ont été supprimés. En effet, cet horizon est l'horizon le plus important pour la croissance des plantes. Il est donc préférable de supprimer ces profils plutôt que de donner des valeurs approximatives pour les différents paramètres (texture, COT,...).

Le développement du profil est alors étudié. Si la profondeur du profil est inférieure à 50 centimètres, le profil est supprimé. Une condition est également posée sur les premiers horizons du sol. En effet, lorsque la limite inférieure du premier horizon était inférieure à 25 centimètres, la limite inférieure du second supérieure à 35 centimètres et que la différence entre ces deux limites était plus grande que 20 centimètres, un horizon intermédiaire était créé. Ce dernier a les mêmes caractéristiques que le premier horizon, sa limite supérieure correspond à la limite inférieure du premier horizon et sa limite supérieure est fixée à 30 centimètres. La limite supérieure du second horizon est alors également fixée à 30 centimètres. Cette étape est réalisée afin de ne pas biaiser le calcul du 'soil hospitality factor', qui contrôle la quantité de racines allouées à chaque horizon.

La profondeur des profils ne peut excéder 200 centimètres dans le modèle de culture SALUS. L'ensemble des horizons plus profonds a été supprimé et la limite inférieure du dernier horizon a été limitée à 200 centimètres lorsque cet horizon était plus profond.

La connaissance du carbone organique total est essentielle car c'est une variable d'entrée importante du modèle de culture SALUS. Lorsque la valeur du carbone organique total du premier horizon n'est pas donnée, le profil a été supprimé. Dans les autres cas, une valeur de 0.1 a été attribuée. De plus, lorsque le carbone organique total de certains horizons dépassait le seuil de '20', les profils correspondants ont été supprimés.

Pour certains profils, des horizons ayant les mêmes limites étaient présents. Cela peut arriver lorsque des parties d'un même horizon présentent des caractéristiques différentes. Le modèle de culture SALUS ne peut gérer cette caractéristique. Il a donc été décidé de ne garder qu'un seul des horizons.

Enfin, les teneurs en limon, sable et argile ont été vérifiées. Lorsque deux teneurs ou plus étaient manquantes pour un même horizon, le profil était supprimé. Enfin, notons que les charges caillouteuses étaient disponibles pour peu de profils de sols. Il a donc été décidé de ne pas les considérer comme entrée du modèle de croissance SALUS.

Tableau 5. Traitement des données de la base de données Aardewerk

Type de données	Problème possible	Traitement
Type de profil	Non adapté aux cultures	Suppression
Horizon de surface	Absent	Suppression
Profondeur du profil	Inférieure à 50 cm	Suppression
Horizons 1 et 2	Différence de profondeur trop importante	horizon intermédiaire
Profondeur du profil	Supérieure à 200 cm	Fixée à 200 cm
COT	Absent de l'horizon de surface	Suppression
COT	Absent des autres horizons	Fixée à 0.1
COT	Supérieur à 20	Suppression
Horizons	Données différentes pour le même horizon	Suppression du second
Teneur sable/argile/limon	Absentes	Suppression
Réserve en eau utile <sup>6</sup>	Négative	Suppression

### B. Détermination des variables d'entrée du modèle de culture

Lorsque toutes ces données sont 'nettoyées', certaines variables doivent encore être calculées via des fonctions de pédotransfert car elles sont des entrées importantes du modèle de culture SALUS. Notons que des routines internes permettent au modèle de calculer automatiquement ces variables.

La première variable devant être calculée est la densité apparente. En effet, celle-ci n'est pas donnée mais doit être connue pour calculer d'autres variables d'entrée du modèle. Pour ce faire, la fonction de pédotransfert de Bernoux et al. (1998) est utilisée. Elle est présentée à l'Eq. 1.

$$BD = 1.524 - 0.0046 * clay - 0.051 * COT - 0.0045 * pH + 0.001 * sand \quad \text{Eq. 1}$$

Avec :

- BD : La densité apparente [g \* cm<sup>-3</sup>],
- Clay : La teneur en argile [%],
- Sand : La teneur en sable [%],
- COT : Le carbone organique total [%],
- pH : Le pH [-].

Les teneurs en eau à la capacité au champ<sup>7</sup> (DUL) et au point de flétrissement<sup>8</sup> (LL) sont alors déterminées. Celles-ci permettent de connaître la disponibilité en eau du sol pour les plantes. Les Eq. 2 et Eq. 3 présentent leur détermination (Ritchie et al., 1999).

<sup>6</sup> Etape précisée ultérieurement

<sup>7</sup> La teneur en eau à la capacité au champ est définie comme étant la teneur en eau lorsque l'eau de la macroporosité s'est écoulée. (Braudeau, 1988)

<sup>8</sup> La teneur en eau au point de flétrissement est définie comme étant la teneur en eau à laquelle l'eau ne peut plus être prélevée par la plante. (Braudeau, 1988)

$$DUL = BD * 0.186 * \left(\frac{sand}{clay}\right)^{-0.141} + 0.01 * COT \quad \text{Eq. 2}$$

$$LL = \max \left\{ \begin{array}{l} DUL - 0.132 - 2.5 * 10^{-6} * e^{0.105 * sand} + 0.005 * COT \\ 0.01 \end{array} \right. \quad \text{Eq. 3}$$

Avec :

- DUL : La teneur en eau à la capacité au champ [ $\text{cm}^3 * \text{cm}^{-3}$ ],
- LL : La teneur en eau au point de flétrissement [ $\text{cm}^3 * \text{cm}^{-3}$ ].

La teneur en eau à la capacité au champ (DUL) ne peut dépasser la teneur en eau à la saturation car de l'air est toujours emprisonné dans la microporosité. Comme proposé par Ritchie et al. (1999), la DUL a été limitée à 92 % de la porosité.

La teneur en eau à saturation ainsi que la conductivité hydrique à saturation sont calculées selon Suleiman et al. (2001)(Eq. 4 et Eq. 5). La teneur en eau à saturation permet de connaître la teneur en eau lorsque le sol est gorgé d'eau alors que la conductivité hydrique à saturation permet de connaître la vitesse à laquelle le sol se ressuie lorsqu'il est saturé. Cette dernière est notamment utilisée dans le modèle pour calculer la quantité d'eau ruisselée après une pluie.

$$SAT = 1 - \frac{BD}{2.65} \quad \text{Eq. 4}$$

$$KSAT = \frac{37}{24} * \left(\frac{SAT - DUL}{DUL}\right)^2 \quad \text{Eq. 5}$$

Avec :

- Sat : La teneur en eau à saturation [ $\text{cm}^3 * \text{cm}^{-3}$ ],
- KSat : La conductivité hydrique à saturation [ $\text{cm/h}$ ].

Ensuite, l'azote total est calculé. Il se calcule en multipliant le rapport C/N par le carbone organique total. Lorsque la valeur du rapport C/N n'est pas donnée, l'azote total est calculé selon la seconde partie de l'Eq. 6 (Basso B., communication personnelle).

$$TOT_N = \begin{cases} COT * \frac{C}{N} & \text{si } \frac{C}{N} \text{ donné} \\ COT * \frac{0.05}{0.58} & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Eq. 6}$$

Avec :

- $TOT_N$  : L'azote total [%],
- C/N : Rapport Carbone sur Azote [-],
- COT : Le carbone organique total [%].

La dernière variable d'entrée du modèle calculée est le 'soil hospitality factor'. Ce facteur détermine la capacité qu'ont les racines pour se développer et se propager dans les différents horizons du sol. Lorsque l'horizon est peu profond (inférieur à 30 centimètres), celui-ci vaut 1. L'Eq. 7 présente la résolution lorsque la profondeur est supérieure à 30 centimètres (Ma et al., 2009).

$$SHF = \left(1 - \frac{depth}{300}\right)^{WCG} \quad \text{Eq. 7}$$

Avec :

- SHF : Le soil hospitality factor [-],
- Depth : La profondeur [cm],
- WCG : une constante exponentielle [-]. Dans le cas du blé, cette valeur vaut 2.5 Ma et al. (2009).

La Tableau 6 reprend l'ensemble des paramètres calculés avec le renvoi aux équations et aux sources correspondantes.

**Tableau 6. Récapitulatif des paramètres calculés pour les différents horizons**

Paramètre	Equation	Source
TOT <sub>N</sub>	Eq. 1	Basso B.
Densité apparente	Eq. 2	Bernoux et al. (1998)
Teneur en eau à la capacité au champ	Eq. 3	Ritchie et al. (1999)
Teneur en eau au point de flétrissement	Eq. 4	Suleiman et al. (2001)
Teneur en eau à saturation	Eq. 5	Suleiman et al. (2001)
Conductivité hydrique à saturation	Eq. 6	Basso et al. (2006)
Soil hospitality factor	Eq. 7	Ma et al. (2009)

Enfin, la réserve utile en eau a également été calculée (Eq. 8). Celle-ci correspond à la quantité d'eau potentielle que la plante peut absorber dans le sol. Pour certains horizons, elle était négative. Cela étant impossible, il a été décidé de supprimer l'ensemble des profils présentant un ou plusieurs horizons à réserve en eau utile négative. Cette étape est un critère supplémentaire dans le nettoyage des données.

$$REU = (DUL - LL) * haut * 10 \quad \text{Eq. 8}$$

Avec :

- REU : Réserve en eau utile [cm],
- Haut : Hauteur de l'horizon [cm].

En dehors de ces paramètres d'entrée du modèle et dans l'optique d'un post traitement, la classe texturale de chaque horizon a été déterminée selon le triangle textural proposé par la FAO (Loganathan, 1987). Ce triangle textural différencie douze classes texturales différentes (Figure 1).

Par la suite, cette classification permettra de comparer les rendements obtenus pour des sols de même classe ou de classes différentes.

Dans la suite de ce travail, les classes texturales seront présentées selon un nombre attribué. Le Tableau 7 reprend la correspondance entre une classe texturale et son nombre attribué. Il est à noter dès à présent que la classe 5, les silt loam, reprend 2800 profils de sols sur les 4000 conservés et qu'aucun sol de type clay loam (classe 10) ne se retrouve en région wallonne au terme du nettoyage.

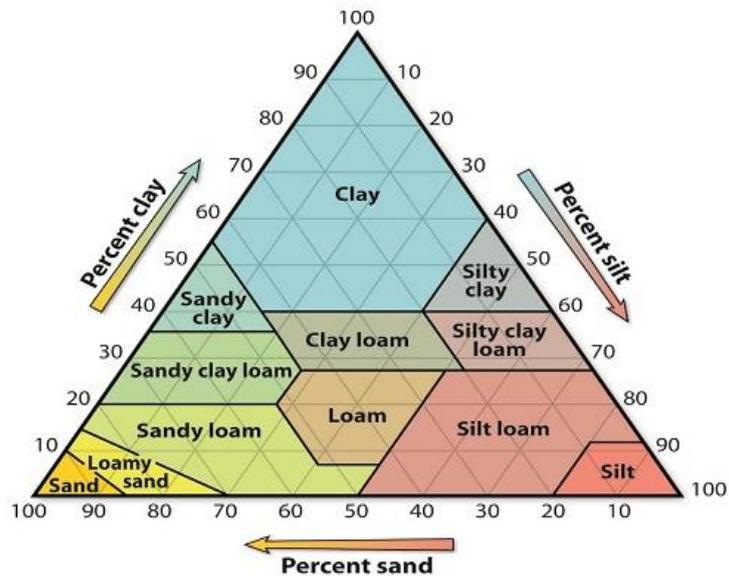


Figure 1. Triangle textural (Loganathan, 1987). 12 classes texturales différentes sont présentées dans ce triangle. Les classes texturales sont limitées par leurs teneurs en argile, limon et sable.

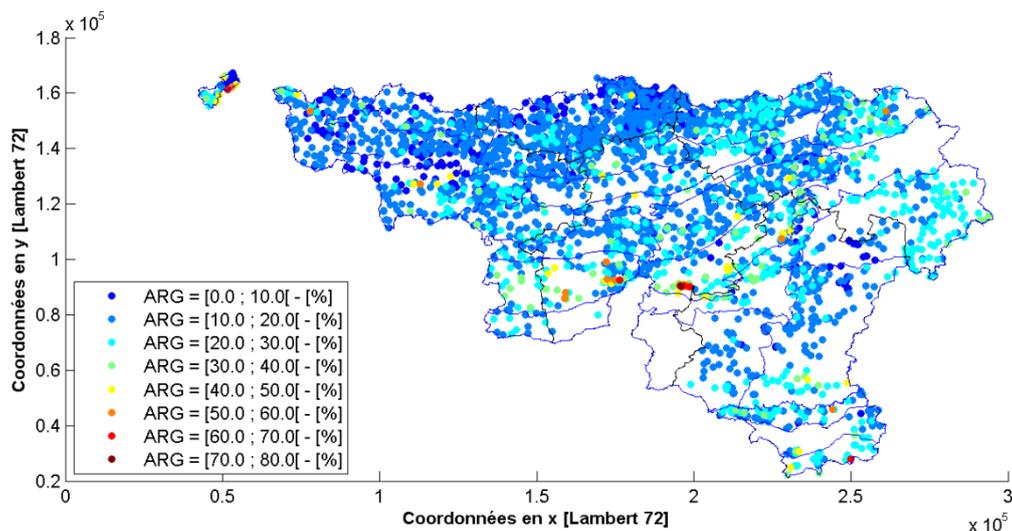
Tableau 7. Correspondance des numéros et noms des classes texturales

Type de sol	Classe
Sand	1
Loamy sand	2
Sandy loam	3
Loam	4
Silt loam	5
Silt	6
Sandy clay loam	7
Clay loam	8
Silty clay loam	9
Clay loam	10
Silty clay	11
Clay	12

### C. Exemples de résultats

Une fois, cette analyse préliminaire et les différentes variables d'entrée du modèle calculées, différentes cartes des sols peuvent être construites. À titre d'exemple, la Figure 2 représente les

profils de sols wallons selon la teneur en argile de leur premier horizon. D'autres cartes sont également présentées dans ce travail (cf. Annexe 2).



**Figure 2. Représentation des profils selon la teneur en argile de leur premier horizon.** Huit classes ont été créées afin de classer les teneurs en argile. Les couleurs chaudes correspondent à des teneurs en argile élevées alors que les couleurs froides correspondent à des teneurs en argile faibles.

### 3.2.2 Base de données Météo

#### *A. Analyse préliminaire des données issues de la base de données du Pameseb*

Le Tableau 8 présente les informations comprises dans les fichiers météo fournis par le Pameseb (Pameseb, 2017). Ces informations sont constituées de données quotidiennes pour 21 stations entre le 1<sup>er</sup> janvier 1995 et le 30 novembre 2016. Un nettoyage est indispensable sur ces données.

**Tableau 8. Données des stations météo**

Variable	Unité
Identifiant de la station	[-]
Date	[jj-mm-aa]
Température minimale	[°C]
Température moyenne	[°C]
Température maximale	[°C]
Radiation solaire	[J / cm <sup>2</sup> ]
Pluie	[mm]
Vitesse du vent	[m/s]
Humidité relative	[%]

Pour certaines stations, des plages temporelles n'étaient pas stipulées car aucun capteur (température, pluie,...) n'avait pris de mesures. Ces stations ont été supprimées, portant le nombre de stations étudiées à 18 (cf. Annexe 3). Pour d'autres stations, certaines mesures étaient

manquantes pour quelques jours. La valeur manquante a été remplacée par la moyenne des mesures des autres années à la même date.

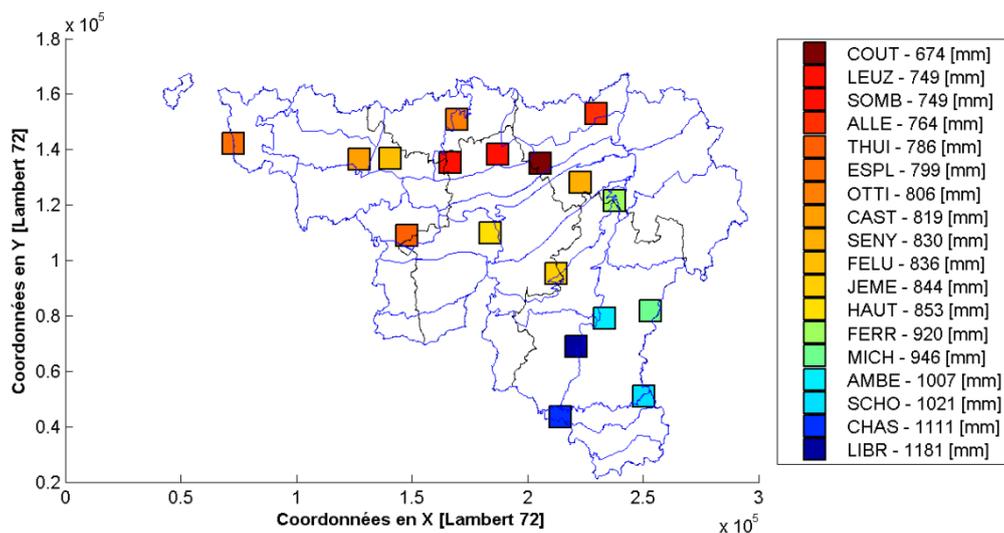
### B. Exemples de résultats

Une fois les analyses préliminaires réalisées sur les données météo, les données ont été mises en forme pour le modèle de culture SALUS. À titre d'exemple, les cartes des précipitations annuelles moyennes et des températures journalières moyennes sont présentées car elles permettent de mieux comprendre l'intérêt de la spatialisation d'un modèle de culture.

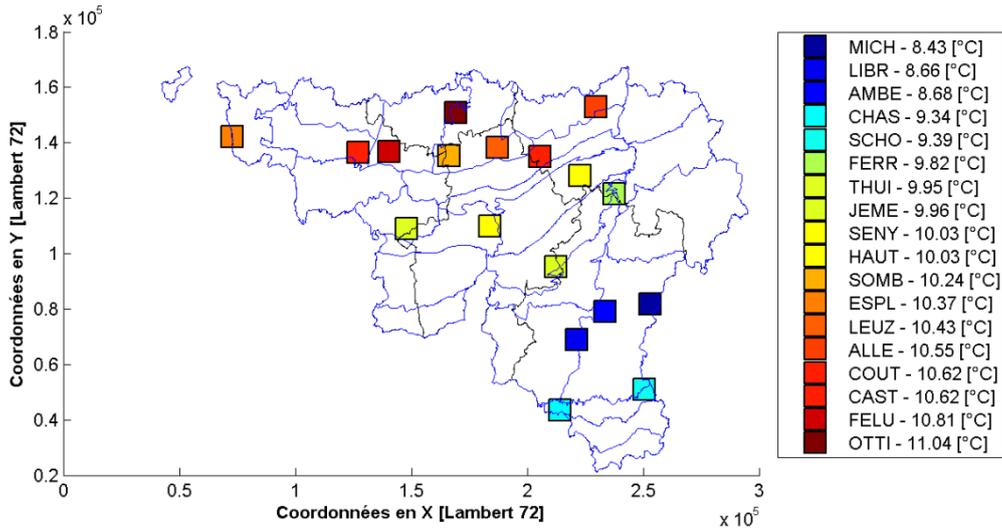
La Figure 3 montre la moyenne annuelle des précipitations observées aux différentes stations. On remarque d'importantes différences au sein de la Wallonie. En effet, la pluviosité est plus élevée dans le sud que dans le nord.

La Figure 4 montre la moyenne quotidienne de la température observée aux différentes stations. De nouveau, d'importantes variations sont remarquées au sein de la Wallonie avec une température moyenne journalière plus élevée dans le nord de la Wallonie que dans le sud.

Suite à ces deux observations, on peut conclure que le nord de la Wallonie est généralement plus sec et plus chaud que le sud.



**Figure 3. Représentation des stations météo wallonnes selon leur pluviosité moyenne annuelle [mm].** Dans cette figure, les couleurs chaudes représentent des pluviosités faibles alors que les couleurs froides représentent des pluviosités élevées. La pluviosité moyenne annuelle la plus élevée est observée à Libramont avec 1181 mm d'eau reçus en moyenne par an et la plus faible est observée à Couthuin avec 674 mm d'eau reçus annuellement. Les axes sont en coordonnées Lambert 72. Les lignes noires représentent les frontières des 5 provinces wallonnes et les lignes bleues représentent les lignes des différentes régions agricoles wallonnes.



**Figure 4. Représentation des stations météo wallonnes selon leur température moyenne quotidienne [°C].** Dans cette figure, les couleurs chaudes représentent des températures élevées alors que les couleurs froides représentent des températures basses. La température moyenne journalière la plus élevée est observée à Ottignies avec une moyenne journalière de 11°C et la température moyenne journalière la plus basse est observée à Michamps avec une moyenne journalière de 8.4 °C. Les axes sont en coordonnées Lambert 72. Les lignes noires représentent les frontières des 5 provinces wallonnes et les lignes bleues représentent les lignes des différentes régions agricoles wallonnes.

### 3.3 Spatialisation du modèle de culture

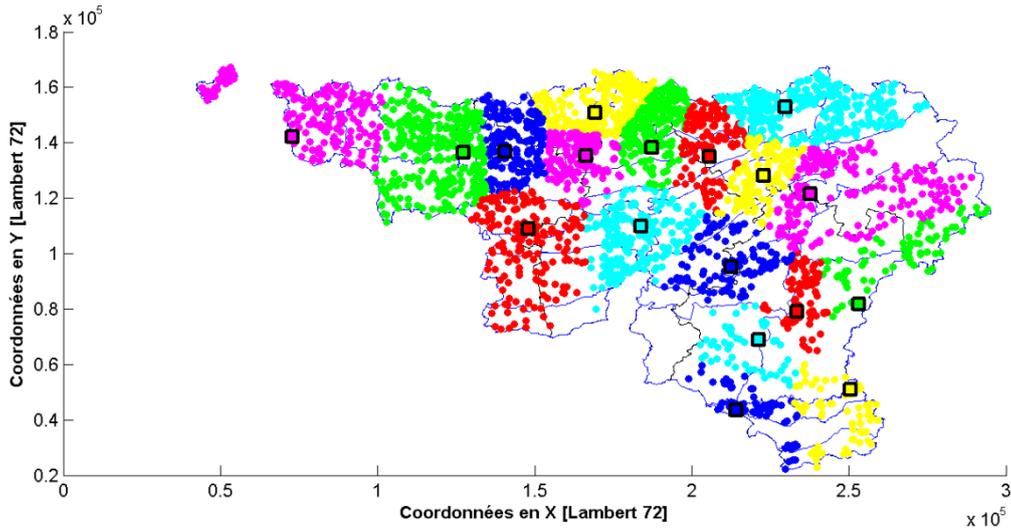
Vu l'hétérogénéité des données sol et météo, la spatialisation du modèle dans cette étude semble indispensable afin de disposer de résultats cohérents. Pour assigner une station météo de référence à chaque profil de sol, la distance de chaque profil de sol par rapport à chaque station météo a d'abord été calculée (Eq. 10).

$$dist = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad \text{Eq. 10}$$

Avec :

- Dist : La distance du sol à la station de météo,
- $X_j$  et  $Y_j$  : Les coordonnées en Lambert 72 de la station j,
- $X_i$  et  $Y_i$  : Les coordonnées en Lambert 72 du profil de sol i.

Ensuite, la station météo la plus proche de chaque profil est trouvée en déterminant la distance minimale parmi les distances calculées. La Figure 5 présente le résultat obtenu. On peut y voir que chaque profil de sol est représenté par un point de couleur correspondant à la couleur assignée à la station météo la plus proche (représentée par un carré).



**Figure 5. Représentation des sols selon leur proximité aux stations météo.** Les stations météo sont représentées par les carrés de couleur aux bords noirs. Les sols sont représentés par des points de couleur. La couleur des sols correspond à la couleur de la station météo la plus proche. Les axes sont en coordonnées Lambert 72. Les lignes noires représentent les frontières des 5 provinces wallonnes et les lignes bleues représentent les lignes des différentes régions agricoles wallonnes.

Un management uniforme a été appliqué pour l'entièreté de la Wallonie. La préparation du terrain est un labour d'une profondeur de 5 centimètres, effectué deux jours avant le semis. Deux dates de semis ont été testées (Tableau 9). Le semis s'est réalisé à une profondeur de 3 centimètres à une densité de 250 grains/m<sup>2</sup>. L'interligne choisi est de 14.5 cm.

**Tableau 9. Dates de semis testées**

Date	Jour Julien
15-10	288
15-11	319

Les reliquats azotés en début de saison culturale sont les mêmes que ceux utilisés pour la phase de calibration (Tableau 3). Il est important de spécifier que les reliquats azotés sont réinitialisés à ces valeurs pour chaque saison culturale. Cette réinitialisation a pour rôle d'isoler le signal climatique du management.

Le management de la culture a été choisi sur base des expérimentations réalisées au sein de la ferme expérimentale. Seules trois modalités ont été testées. Ces modalités sont toutes en trois fractionnements avec uniquement la dernière modalité changeante (Tableau 10).

**Tableau 10. Modalités de management testées**

	Fract. 1	Fract. 2	Fract. 3	Total
<b>Date</b>	24-03	20-04	19-05	-
<b>Modalité 1</b>	50	60	40	150
<b>Modalité 2</b>	50	60	75	185
<b>Modalité 3</b>	50	60	110	220

Comme présenté au paragraphe 2.2, lors d'un apport en trois fractions, les apports se font aux stades tallage, redressement et dernière feuille. Cependant, le modèle ne permet pas de spécifier les apports à ces stades, seules des dates peuvent être entrées. Il a donc été décidé de déterminer les dates moyennes auxquelles ces apports ont été effectués pour les saisons 2008-09 à 2013-14 sur les champs de la faculté.

### **3.4 Le modèle de culture SALUS**

#### **3.4.1 Généralités du modèle de culture SALUS**

SALUS est l'abréviation de 'System Approach to Land Use Sustainability'. Ce modèle se base principalement sur le modèle de culture Ceres (Ritchie et al., 1985). Il permet de simuler la croissance continue sous des conditions fixes de sol, météo, eau et culture selon différents managements pour plusieurs années. Le pas de temps est le jour et différentes stratégies de management peuvent être simulées simultanément (Basso et al., 2010).

Pour chaque jour, le bilan hydrique, les bilans du Phosphore et de l'Azote, la matière organique du sol, la balance thermique, le développement et la croissance de la culture ainsi que le management particulier sont simulés (Basso et al., 2006).

Les principaux avantages du modèle de culture SALUS sont (Basso et al., 2006) :

- Il est possible de comparer facilement les résultats obtenus par les simulations réalisées simultanément et selon différents formalismes,
- L'interface du modèle permet une comparaison des résultats aisée,
- Le modèle est adapté à un grand nombre de cultures (riz, soja, blé, pommes de terre,...),
- Chaque composant principal du modèle sol-eau-plante est calculé pour chaque jour et pour chaque stratégie.
- Les formalismes des différentes parties du modèle sont homogènes au niveau de leur complexité.

B. Basso et al. (2006) soulignent néanmoins le fait que le modèle de culture ne prend pas en compte les possibles ravageurs et maladies.

Cette section présentera l'organisation du modèle afin d'en comprendre le fonctionnement. Elle est principalement basée sur l'article de Basso et al., (2006).

#### **3.4.2 Entrées du modèle**

Pour chaque simulation, des fichiers d'entrée, appelés template, sont créés. C'est à partir des informations s'y trouvant que la simulation se réalisera. Ces entrées sont :

- Un sol, sous format « .sdb »,
- Un climat, sous format « .wdb »,
- Une culture, sous format « .cdb »,
- Une expérience, sous format « .xdb ».

Ces fichiers contiennent des informations précises. Les fichiers sol et climat contiennent les données récoltées par l'utilisateur. Les tableaux de l'Annexe 4 reprennent respectivement l'ensemble des

paramètres sols et météo utilisés comme entrées par le modèle. Ces deux premiers fichiers ont été générés à partir des deux bases de données nettoyées.

Le fichier culture reprend l'ensemble des paramètres génétiques du cultivar simulé. Le tableau de l'Annexe 4 présente l'ensemble des paramètres génétiques utilisés dans le modèle. Dans le fichier expérience, l'ensemble des paramètres liés à la gestion du sol et de la culture sont repris. Ceux-ci sont notamment la profondeur de semis, la date de semis, le type de fertilisation et le management, la préparation du champ, l'espace interligne ainsi que les conditions initiales (reliquats, précédent).

### 3.4.3 Organisation du modèle

Le modèle de culture SALUS est séparé en trois composants principaux. On y retrouve un set de modules de croissance de la culture, un module du carbone organique du sol (SOM) et du cycle des nutriments et un module du bilan hydrique du sol et de la température.

En termes de croissance, la phénologie est la première variable calculée car la simulation de cette dernière est des plus importantes. En effet, si la simulation des phases phénologiques est inadéquate, cela aura des répercussions sur les résultats dépendant de ces phases tels que la biomasse totale ou le poids total en grains (Jones et al., 1984). Le module phénologique a été réécrit afin de mieux comprendre son fonctionnement et a été interfacé avec un algorithme d'optimisation bayésien. La première partie de cette section s'attardera donc principalement sur la description du module phénologique du modèle de culture SALUS.

#### A. Le module phénologique du modèle

##### i. Les différentes phases phénologiques du modèle de culture

Le modèle de culture SALUS est séparé en 5 phases phénologiques différentes. Le Tableau 11 spécifie les stades clés d'observation délimitant les différentes phases du modèle de culture.

Tableau 11. Les différentes phases du modèle de culture SALUS et les stades clés les délimitant

Phase	Début	Fin
0	Semis	Émergence
1	Émergence	Redressement
2	Redressement	Dernière feuille
3	Dernière feuille	Épiaison
4	Épiaison	Récolte

Ces changements de phases se basent principalement sur la durée de vie exprimée en équivalent feuille, un formalisme propre au modèle (Eq. 13), dont le calcul dépend des températures journalières et de paramètres génétiques propres aux espèces.

##### ii. Les paramètres et les équations du module des phases phénologiques

Le Tableau 12 reprend l'ensemble des paramètres génétiques intervenant dans les calculs des phases phénologiques. La première colonne permet de spécifier lors de quelles phases phénologiques les différents paramètres jouent un rôle.

**Tableau 12. Paramètres impliqués dans la détermination des phases phénologiques.** La première colonne reprend les phases dans lesquelles les différents paramètres interviennent. La seconde colonne présente le nom du paramètre, la troisième sa signification et enfin la dernière reprend l'unité du paramètre.

Phase	Paramètre	Explication	Unité
Toutes les phases	PhotoC	Relation entre la photopériode et le phyllochrone	[-]
	Phy14	Phyllochrone lorsque l'ensoleillement dépasse 14 heures	[°Cd*leaf <sup>-1</sup> ]
	TbaseD	Température de base pour le développement	[°C]
	ToptD	Température optimale pour le développement	[°C]
Phase 0	LEtg	Equivalent feuille à la germination	[LeafEq]
	EmgInt	Calcul de l'interception de l'émergence de l'équivalent feuille	[LeafEq]
	EmgSlp	Calcul de la pente de l'émergence de l'équivalent feuille	[LeafEq *cm <sup>-1</sup> ]
Phase 1	Vcoef	Coefficient de vernalisation	[-]
	DelpH	Retard par heure d'augmentation de photopériode	[d*h <sup>-1</sup> ]
	PhHig	Limite supérieure de la photopériode	[h]
Phase 3	Phase3	Durée équivalente de la feuille pour la phase 3	[LeafEq]
Phase 4	LEgg	Equivalent feuille pour la croissance des grains	[LeafEq]

Afin de mieux comprendre le fonctionnement du modèle, le code permettant de définir les phases phénologiques a été réécrit. Dans cette partie du modèle, de nombreux paramètres sont calculés. Néanmoins, seuls les paramètres les plus importants seront présentés.

Premièrement, les degrés jours doivent être définis quotidiennement (Eq. 10). Ils dépendent des températures maximale et minimale observées et des températures de base et optimales de développement de la plante.

$$DTT = \frac{\min(T_{opt\ dev}, \max(T_{base\ dev}, T'_{min})) + \min(T_{opt\ dev}, \max(T_{base\ dev}, T'_{max}))}{2} - T_{base\ dev} \quad \text{Eq. 10}$$

Avec :

- DTT : degrés jours [°Cd],
- $T_{opt\ dev}$  : Température optimale pour le développement [°C],
- $T_{base\ dev}$  : Température de base pour le développement [°C],
- $T'_{min}$  : Température minimale [°C]<sup>9</sup>,
- $T'_{max}$  : Température maximale [°C]<sup>9</sup>.

Le phyllochrone doit également être calculé. Dans le modèle de culture SALUS, celui-ci est recalculé chaque jour. En effet, il a été montré dans plusieurs études que le phyllochrone variait selon la durée

---

<sup>9</sup> Pour les deux premières feuilles de la croissance de la plante, ce ne sont pas les températures maximale et minimale de l'air qui sont prises en compte dans le calcul des degrés jours mais les températures minimale et maximale de la couronne de la végétation. Celle-ci sont calculées quotidiennement dans le modèle de culture et ont également été utilisées dans le modèle réécrit.

du jour (Jame et al., 1999). Dans SALUS, Le phyllochrone dépend de la durée du jour, d'un paramètre définissant la relation entre la photopériode et la photosynthèse et du phyllochrone lorsque la durée de la journée est de 14 heures (Eq. 11).

$$phyl = \frac{15}{\frac{15}{phyl14} + photoC * (daylength - 14)} \quad \text{Eq. 11}$$

Avec :

- *phyl* : Le phyllochrone [ $^{\circ}\text{Cd} * \text{LeafEq}^{-1}$ ],
- *phyl14* : Le phyllochrone lorsque la durée du jour est de 14 heures [ $^{\circ}\text{Cd} * \text{LeafEq}^{-1}$ ],
- *photoC* : Constante marquant le rapport entre la photopériode et la photosynthèse [ $\text{LeafEq} * ^{\circ}\text{C}^{-1} * \text{h}^{-1}$ ],
- *daylength* : La longueur du jour [ $\text{h} * \text{d}^{-1}$ ].

L'évolution de la durée de vie exprimée en équivalent feuille quotidienne peut alors être déterminée. Elle est fonction des degrés-jours, du phyllochrone, d'un facteur de photopériode et d'un facteur d'action sur le phyllochrone (Eq. 12). On peut voir que cette évolution sera toujours positive ou nulle car aucun des paramètres n'est négatif.

$$dLeafEq = \frac{DTT * PhotoF}{phyl * phylF} \quad \text{Eq. 12}$$

Avec :

- *dLeafEq* : Évolution journalière de la durée de vie exprimée en équivalent feuille [ $\text{LeafEq}$ ],
- *PhotoF* : Facteur de la photopériode [-],
- *phylF* : Facteur du phyllochrone [-].

Ensuite, la durée totale de la croissance exprimée en équivalent feuille est calculée quotidiennement (Eq. 13). Lors de chaque passage de phase, cette quantité est remise à zéro. Cette quantité est calculée en additionnant la proportion de nouvelles feuilles produites au jour *j* à la quantité de nouvelles feuilles produites au jour *j* - 1.

$$LeafEq(j) = LeafEq(j - 1) + dLeafEq(j) \quad \text{Eq. 13}$$

Avec :

- *LeafEq* : La durée totale de la croissance exprimée en équivalent feuille [ $\text{LeafEq}$ ],
- *J* : Le jour [d],

### iii. Formalismes pour le passage des différentes phases du modèle de culture

Le Tableau 13 présente les formalismes entraînant les passages des différentes phases phénologiques du modèle. Les définitions des paramètres utilisés dans les équations peuvent être retrouvées dans le Tableau 12.

Tableau 13. Tableau reprenant le calcul pour le passage aux différentes phases phénologiques de la croissance

Passage	Calcul
... → 0	Semis
0 → 1	$LeafEq(j) \geq EmgInt + SlpInt * dep\_sow + LEtg$
1 → 2	induit
2 → 3	$LeafEq(j) \geq 5$
3 → 4	$LeafEq(j) \geq Phase3$
4 → ...	$LeafEq(j) \geq LEgg$

Pour le passage de la phase 1 à la phase 2, il faut que la croissance soit induite. Pour cela, il faut tout d'abord que la plante ait réalisé une phase de vernalisation<sup>10</sup> complète. Cette vernalisation dépend essentiellement des températures minimales et maximales ainsi que du coefficient de vernalisation (Tableau 12). L'Eq. 14 présente la détermination du gain de vernalisation journalier. Ce gain est calculé chaque jour et l'équation permettant de le déterminer dépend des températures minimales et maximales.

$$verday(i) = \begin{cases} \max(0, \min(1, 1.2 - 0.0037 * s1x^2)) & \text{si } Tmax > 0 \text{ et } Tmin > 0 \\ \frac{Tmax}{Tmax - Tmin} & \text{si } Tmax > 0 \text{ et } Tmin < 0 \\ 0 & \text{si } Tmax < 0 \text{ et } Tmin < 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 14}$$

Avec :

- Verday (i): le coefficient de vernalisation au jour i [-],
- S1x : La température moyenne journalière [°C]<sup>11</sup>.

Ensuite ce gain journalier est additionné au gain total calculé depuis le début de la vernalisation (Eq. 15).

$$vdays(i) = vdays(i - 1) + verday(i) \quad \text{Eq. 15}$$

Avec :

- Vdays(i) : gain total en vernalisation au jour i [-].

Enfin, la phase de vernalisation se termine lorsque le gain total en vernalisation est égal ou supérieur au coefficient de vernalisation. Ce coefficient est propre à chaque espèce et est appelé Vcoef (Tableau 12).

<sup>10</sup> La vernalisation est une exposition prolongée de la plante à des températures basses. Cette exposition est nécessaire pour le froment d'hiver, sans quoi, sa croissance s'interromprait (Ardo Kane, 2012). La plante resterait alors à l'état végétatif et ne produirait pas d'épis.

<sup>11</sup> S1x a été approximée dans l'externalisation par Tmoy. Cependant, dans la version complexe du modèle de culture, s1x correspond à la température du premier horizon de sol (0-2 cm).

Une fois la phase de vernalisation terminée, un facteur appelé rateofinduction est calculé (Eq. 16). Celui-ci dépend de DelpH (Tableau 12), de PhHig (Tableau 12) et de la longueur du jour. Une fois ce facteur supérieur à 1, la croissance est induite et le modèle passe de la phase phénologique 1 à la phase phénologique 2.

$$rateofind(j) = rateofind(j - 1) + \frac{1}{4 + \max(0, DelpH * (-Phot(j) + PhHig))} \quad \text{Eq. 16}$$

Avec :

- rateofind : Taux d'induction [-],
- j : le jour [d],
- DelpH : Retard par heure d'augmentation de photopériode [d\*h<sup>-1</sup>],
- Phot : Longueur du jour [h\*d<sup>-1</sup>],
- PhHig : Limite supérieure de la photopériode [h\*d<sup>-1</sup>].

La dernière phase se termine lorsque la plante arrive à maturité, soit lorsque la quantité de nouvelles feuilles produites durant la phase 4 est supérieure à LEgg (Tableau 12).

### ***B. Le set de modules de croissance de culture***

Il est basé sur les modèles de croissance Ceres (Ritchie et al., 1985) et la famille de modèles de culture IBSNAT (Basso et al., 2006). Il calcule le taux de croissance potentiel des plantes en utilisant la lumière reçue et les températures journalières. Les algorithmes de ces modèles ont été extraits et restructurés dans un module de croissance. Ce module de croissance est lié aux sous-modèles de l'eau du sol, du management et des nutriments permettant de simuler les éventuels stress qui peuvent surgir au cours de la saison culturale.

L'assimilation du carbone et la production de matière sèche sont une fonction du potentiel du taux de croissance pouvant être réduits par des limitations en eau ou en nutriments. Les principales entrées pour le sous-modèle de culture sont les coefficients génétiques, les températures minimale et maximale ainsi que la radiation solaire reçue quotidiennement. Il est important de noter que la biomasse totale et les rendements en grains sortis par le modèle de culture ont une teneur en humidité de 0 %.

Le tableau de l'Annexe 5 présente les différents paramètres qui ont été modifiés dans la phase de calibration.

Parmi ces paramètres, les paramètres les plus influents sur les rendements et la biomasse sont la radiation use efficiency (RUE), la surface foliaire équivalente à partir de laquelle la sénescence débute (LEsec), le facteur de sénescence des feuilles (Incsf) et enfin le poids spécifique maximum des feuilles (SLWmax). Leurs impacts sur les rendements et la biomasse sont facilement observables. En effet, une RUE faible entraîne une baisse des rendements et de la biomasse car la photosynthèse est moins importante. Si l'on diminue LEsec, la sénescence commence plus tôt et donc la surface foliaire diminue, ce qui diminue également la biomasse et les rendements en grains. Par contre si l'on augmente de manière trop importante LEsec, alors la sénescence commence tard et la biomasse est trop élevée. Pour le facteur Incsf, il ne joue un rôle que de 'multiplicateur', ce qui entraîne que s'il est

élevé, la sénescence sera d'autant plus rapide et la biomasse et les rendements faibles. S'il est faible, la sénescence sera d'autant plus faible et donc la biomasse et les rendements plus élevés. Enfin le paramètre SLWmax est utilisé dans la détermination du LAI. Etant utilisé au dénominateur, lorsqu'il est faible, il augmente la surface foliaire et donc la biomasse et lorsqu'il est élevé, il diminue la surface foliaire et donc la biomasse.

D'autres paramètres jouent un rôle sur les concentrations maximales en azote dans les parties végétatives (MxNVg) et dans le grain (MxNkr). Néanmoins, lorsque la valeur de ces paramètres était changée, des changements dans la biomasse et les rendements en grains étaient observés. Ces changements sont induits par des effets rétroactifs dus à des stress qui peuvent apparaître lorsque leurs valeurs sont changées.

Enfin, des paramètres jouant sur la croissance et l'assimilation d'azote dans les différentes phases phénologiques ont également été modifiés.

Les premiers sont les coefficients de répartition de la matière carbonée dans la feuille, dans la tige et dans le grain. La somme de ces trois coefficients doit toujours être égale à 1. Au départ de la saison culturale, ce coefficient vaut 0 pour le grain et la croissance est principalement simulée dans les feuilles. Ensuite, le coefficient augmente pour la tige et diminue pour les feuilles. La croissance du grain n'est simulée qu'en phase 4. Les seconds sont les concentrations relatives en azote dans les organes végétatifs et dans les grains de la plante. Contrairement aux coefficients de répartition, la somme des concentrations relatives n'est pas obligatoirement égale à 1. Au début de la phase 1, ces concentrations relatives valent 1 pour les organes végétatifs et 0 pour les grains. L'assimilation d'azote dans le grain n'est simulée qu'à partir de la phase 4 et celle-ci est maximale (égale à 1).

### ***C. Le module du carbone organique du sol (SOM) et du cycle des nutriments***

Il est dérivé du modèle Century, auquel de nombreuses modifications ont été apportées. Ce module simule la décomposition de la matière organique, la minéralisation de l'azote, la formation de nitrates et d'ammonium, l'immobilisation de l'azote, les pertes gazeuses d'azote et la dynamique du phosphore.

Trois pools de SOM sont retrouvés, un actif, un passif et un lent. Ils varient dans leur taux de turnover et ont un rapport C/N caractéristique.

Le SOM ainsi que la minéralisation et l'immobilisation de l'azote sont simulés par les trois pools de SOM. Le premier pool de SOM est dit métabolique et le second structural. Ils représentent respectivement les composés récalcitrants et facilement décomposables. Enfin le troisième pool représente un pool SOM actif de surface. Il permet de mieux représenter les systèmes de labours de conservation et les cultures vivaces.

Le sous-modèle du phosphore comprend une dynamique du phosphore organique et du phosphore inorganique. Le phosphore inorganique est lui-même divisé en trois pools, le labile, l'actif et le stable.

Les principales entrées pour ce module sont la texture, la densité apparente, la profondeur des horizons, le carbone organique total, l'azote organique total et la teneur en azote initial (Senthilkumar et al., 2009).

#### D. Le module du bilan hydrique du sol et de la température

Il est également basé sur le modèle Ceres mais de nombreuses révisions y ont été apportées pour le calcul du drainage, du ruissellement, de l'évaporation et de l'infiltration. Le modèle SALUS utilise un concept de 'time-to-ponding'<sup>12</sup> pour remplacer les calculs de ruissellement et d'infiltration du modèle Ceres.

Ce module simule le ruissellement de surface, l'infiltration, l'évaporation à la surface des feuilles, les flux d'eau saturé et insaturé, le drainage, la prise d'eau racinaire, l'évaporation du sol et la transpiration (Senthilkumar et al., 2009).

La Figure 6 présente les composants de SALUS ainsi que leurs interactions (Basso et al., 2006).

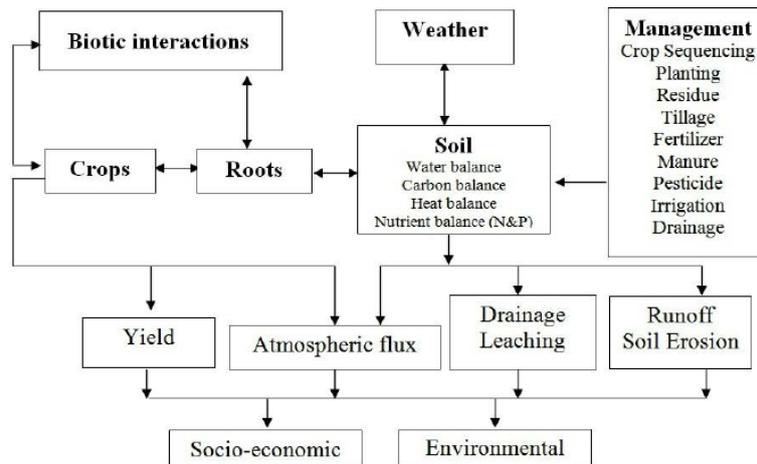


Figure 6. Diagramme représentant les composants de SALUS et leurs interactions

### 3.5 Calibration et validation du modèle de culture

#### 3.5.1 Méthodes de calibration

La calibration du modèle est divisée en deux parties. La première partie consiste à calibrer le module phénologique du modèle de culture. La seconde s'est attardée à la calibration des autres sorties du modèle de culture.

Cette séparation peut s'expliquer par le fait que le module de phase phénologique comprend un grand nombre de paramètres différents ayant de nombreuses interactions entre eux alors que pour les autres sorties du modèle, les paramètres sont moins nombreux pour chaque processus et leurs impacts plus connus.

La réécriture du code de la phénologie du modèle de culture a permis d'utiliser la fonction Dream, développée par Vrugt et al. (2008). Celle-ci est basée sur les chaînes de Markov, un processus

---

<sup>12</sup> Le 'time-to-ponding' est défini comme étant le temps pour que de l'eau libre apparaisse à la surface du sol durant une pluie (White et al., 1989). Ce temps permet de définir à quels moments l'érosion et le ruissellement peuvent avoir lieu en même temps.

bayésien, qui déterminent les valeurs des différents paramètres du modèle qui permettent d'optimiser l'efficacité de modélisation.

Dans ce processus, une distribution est attribuée 'à priori' à chaque paramètre. Ces distributions 'à priori' de chaque paramètre sont déterminées selon la littérature.

La fonction fait alors tourner plusieurs chaînes simultanément pour une exploration globale des distributions 'à priori'. La fonction ajuste automatiquement la gamme de valeur et l'orientation de la distribution de chaque paramètre pendant l'évolution vers les distributions 'à posteriori' (Vrugt et al., 2008).

Ensuite, à partir des distributions 'à posteriori', les valeurs de paramètre les plus utilisées par les différentes chaînes sont trouvées. Ces valeurs sont celles qui permettent d'optimiser.

Une fois le module phénologique calibré, la calibration des autres sorties du modèle peut se réaliser. Pour ce faire, une calibration manuelle a été réalisée. Une analyse de sensibilité a été conduite individuellement sur chaque paramètre. Ensuite, ceux-ci ont été modifiés afin d'ajuster au mieux les observations réalisées sur le terrain.

### 3.5.2 Critères d'évaluation d'un modèle de culture

Afin de déterminer l'efficacité de prédiction du modèle, quatre critères statistiques différents sont utilisés.

#### A. L'erreur quadratique moyenne

Le premier critère est l'erreur quadratique moyenne (RMSE). L'Eq. 17 en présente la détermination.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad \text{Eq. 17}$$

Avec :

- RMSE : Erreur quadratique moyenne,
- N : Nombre d'observations,
- $Y_i$  : Variables observées,
- $\hat{Y}_i$  : Variables simulées.

Afin de maximiser l'efficacité de prédiction du modèle, ce critère doit être proche de 0.

#### B. Le coefficient de détermination

Le second critère est le coefficient de détermination. Celui-ci varie de 0 à 1. L'Eq. 19 en présente la détermination.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n [(Y_i - \bar{Y}) * (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}) * \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})}} \right)^2 \quad \text{Eq. 19}$$

Avec :

- $R^2$  : Le coefficient de détermination,
- $\bar{Y}_i$  : Moyenne des variables observées,
- $\bar{\hat{Y}}$  : Moyenne des variables simulées.

Lorsque le modèle est parfait, le coefficient de détermination vaut 1.

### **C. L'efficience de modélisation**

Le troisième critère est l'efficience de modélisation. Il varie de  $-\infty$  à 1 (Eq. 18).

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})} \quad \text{Eq. 18}$$

Avec :

- EF : L'efficience de modélisation,

Lorsque l'efficience est égale à 1, le modèle est considéré comme parfait.

### **D. La déviation normale**

Enfin, le troisième critère est la déviation normale (Eq. 20). Il varie de  $-\infty$  à  $+\infty$ . Pour que le modèle soit parfait, il faut que celle-ci ait une valeur de 0.

$$ND = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i - \sum_{i=1}^N \hat{Y}_i}{\sum_{i=1}^N Y_i} \quad \text{Eq. 20}$$

Avec :

- ND : La déviation normale,

Un modèle est considéré comme efficace lorsque la déviation normale est comprise dans l'intervalle  $[-0.1 ; 0.1]$  et proche de 0 et l'efficience de modélisation supérieure à 0.5 (Brisson et al., 2002).

## **3.6 Logiciel**

L'entièreté des données, les analyses statistiques, les graphiques ont intégralement été réalisés avec le logiciel de programmation Matlab R2011a.

## 4 Résultats et discussions

### 4.1 Calibration des formalismes de SALUS

Dans cette partie les résultats de la calibration et de la validation seront présentés. Le Tableau 14 et le Tableau 15 présentent les résultats obtenus pour les différents critères d'évaluation de l'efficacité du modèle de culture. Le Tableau 14 reprend ces résultats pour l'ensemble des observations faites tout au long de la saison culturale alors que le Tableau 15 reprend ces résultats pour les observations réalisées en fin de saison culturale, c'est-à-dire à la maturité de la culture.

Lorsque la valeur d'un critère est écrite en rouge dans le tableau, cela signifie que le modèle ne répond pas aux conditions posées par Brisson et al., (2002). Dans le cas contraire, la valeur du critère est écrite en vert. Pour rappel les conditions pour lesquels un modèle simule bien la croissance de la culture sont une déviation normale située dans l'intervalle  $[-0.1; 0.1]$  et une efficacité de modélisation supérieure à 0.5.

Le Tableau 16 reprend les valeurs des paramètres pour la calibration du module phénologique. L'Annexe 6 présente les valeurs des paramètres pour la calibration des autres formalismes du modèle de culture.

**Tableau 14. Valeurs des critères d'évaluation de l'efficacité du modèle en dynamique.** Les valeurs écrites en rouge se rapportent aux valeurs ne respectant pas les conditions posées par (Brisson et al., 2002) pour déterminer l'efficacité de prédiction d'un modèle de culture. Les valeurs écrites en vert respectent ces conditions. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est exprimée en [jours] pour la phénologie, en  $[m^2/m^2]$  pour la surface foliaire et en [kg/ha] pour la biomasse, le rendement en grains, l'azote dans le sol et l'azote dans la plante. Les autres critères sont sans unité.

	Calibration				Validation			
	RMSE	R <sup>2</sup>	ND	EF	RMSE	R <sup>2</sup>	ND	EF
Pheno	10.92	0.87	0.003	0.80	21.24	0.72	0.04	0.25
LAI	1.65	0.27	0.27	-0.15	-	-	-	-
Biomasse	2570	0.86	-0.21	0.79	2069	0.9	-0.08	0.88
Grains	1923	0.66	0.07	0.64	2823	0.49	0.12	0.34
Nsol	44	0.01	-0.17	-1.6	38	0.03	-0.08	-0.68
Nplant	52	0.74	-0.4	0.26	-	-	-	-

**Tableau 15. Valeurs des critères d'évaluation de l'efficacité du modèle à maturité.** Les valeurs écrites en rouge se rapportent aux valeurs ne respectant pas les conditions posées par (Brisson et al., 2002) pour déterminer l'efficacité de prédiction d'un modèle de culture. Les valeurs écrites en vert respectent ces conditions. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est exprimée en [kg/ha] pour la biomasse, le rendement en grains, l'azote dans le sol et l'azote dans la plante. Les autres paramètres sont sans unité.

	Calibration				Validation			
	RMSE	R <sup>2</sup>	ND	EF	RMSE	R <sup>2</sup>	ND	EF
Biomasse	2602	0.56	-0.04	0.47	2269	0.64	0.066	-2.23
Grains	2219	0.19	-0.06	-0.16	2009	0.34	0.015	-7.60
Ngrain	75	0.26	-0.47	-1.47	34	0.56	-0.07	-0.57

### 4.1.1 La phénologie

Pour certains paramètres (EmgInt, EmgSlp, TbaseD, ToptD et PhotoC), des valeurs ont directement été assignées car celles-ci étaient connues (Dumont B., communication personnelle). Le Tableau 16 reprend l'ensemble des valeurs initiales et finales des différents paramètres. Les valeurs finales sont celles obtenues après calibration. Elles permettent d'optimiser l'efficacité de modélisation pour le set de données de calibration.

**Tableau 16. Valeurs et unités des paramètres du modèle de culture après calibration.** La première colonne reprend le nom du paramètre, la seconde sa valeur avant la calibration du modèle, la troisième, la valeur du paramètre suite à la calibration du modèle à nos régions et enfin la dernière reprend l'unité du paramètre. Le lecteur est renvoyé au Tableau 12 pour la signification de chaque paramètre.

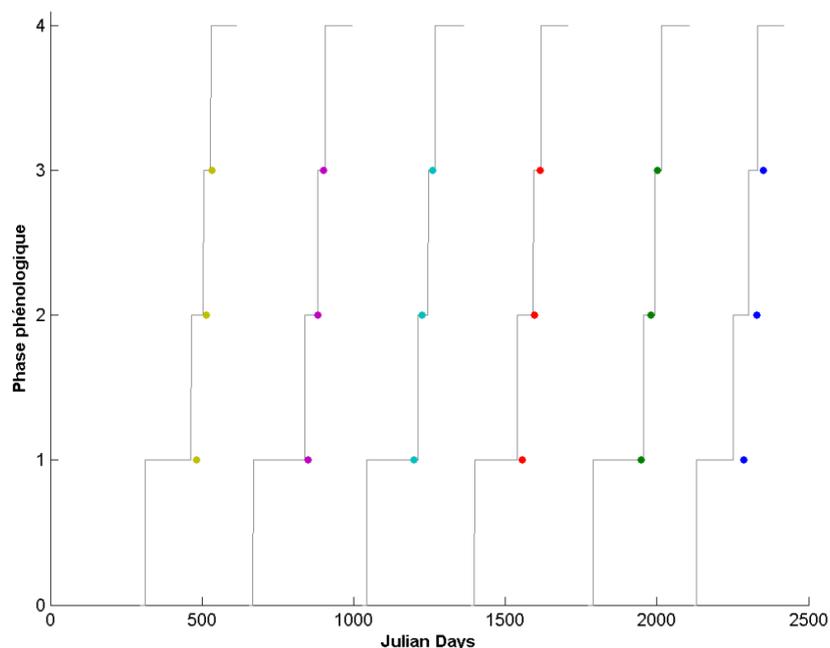
Paramètre	Valeur initiale	Valeur finale	Unité
PhotoC	0.007	0.007	[-]
Phy14	120	100	[Cd*leaf <sup>-1</sup> ]
TbaseD	0	0	[°C]
ToptD	26	26	[°C]
LEtg	0.8	0.4	[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
EmgInt	0.3	0.3	[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
EmgSlp	0.1	0.1	[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> *cm <sup>-1</sup> ]
Vcoef	80	107	[°C]
DelpH	-0.93	0.8	[d*h <sup>-1</sup> ]
PhHig	19	23	[h]
Phase3	3	4	[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
LEgg	4.5	14	[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]

Les critères présentés au paragraphe 3.5.2 ont été utilisés afin de déterminer l'efficacité de prédiction du modèle. Dans notre cas, l'erreur quadratique moyenne est de 10.924 jours pour le set de calibration et de 21.45 jours pour le set de validation. Cette erreur est importante pour les deux sets. En effet, dans une étude sur le blé de printemps, Ahmed et al.2016 obtiennent une RMSE de 1 à 5 jours à l'anthèse selon les différentes espèces étudiées. Au vu de cette erreur, les erreurs sur les autres variables (rendement en biomasse, rendement en grains,...) seront également importantes. Néanmoins, ces erreurs peuvent en partie être expliquées par le fait que les données disponibles provenaient de l'itinéraire technique et non des observations précises de la phénologie.

Malgré cette importante erreur quadratique, la déviation normale et l'efficacité de modélisation répondent aux critères posés au paragraphe 3.5.2 lorsque l'on considère la dynamique de la croissance (Tableau 14). En effet, la déviation normale du set de calibration est inférieure à 0.1 pour les deux sets alors que l'efficacité de modélisation est bien supérieure à 0.5 pour le set de calibration mais inférieure (0.25) pour le set de validation.

On peut donc conclure que le modèle a de bonnes qualités prédictives pour la phénologie mais qu'au vu de l'erreur quadratique moyenne et de l'efficacité de modélisation du set de validation, les résultats ultérieurs devront être discutés avec prudence.

La Figure 7 présente les phases phénologiques simulées par le modèle de culture. Ces dernières sont représentées par les lignes noires continues. Les points de couleur représentent les dates auxquelles les observations ont été réalisées.



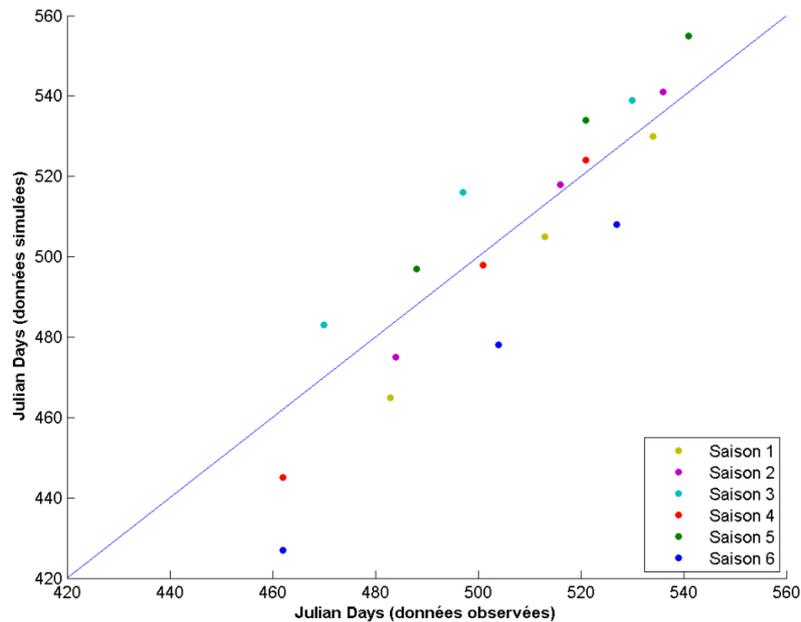
**Figure 7. Représentation des phases phénologiques simulées et observées.** Les phases phénologiques du modèle sont représentées par les lignes noires alors que les points de différentes couleurs (chaque couleur représentant une saison) représentent les dates auxquelles les observations ont été réalisées. L'axe x est en jours juliens alors que l'axe y reprend les numéros des différentes phases du modèle.

Afin de faciliter la visualisation des différences entre les données observées et simulées, la Figure 8 représente les données simulées en fonction des données observées. La bissectrice, droite sur laquelle tous les points devraient se trouver si le modèle était parfait est représentée en bleu. Seuls les passages aux phases 2, 3 et 4 (Tableau 11) sont représentés sur ces figures.

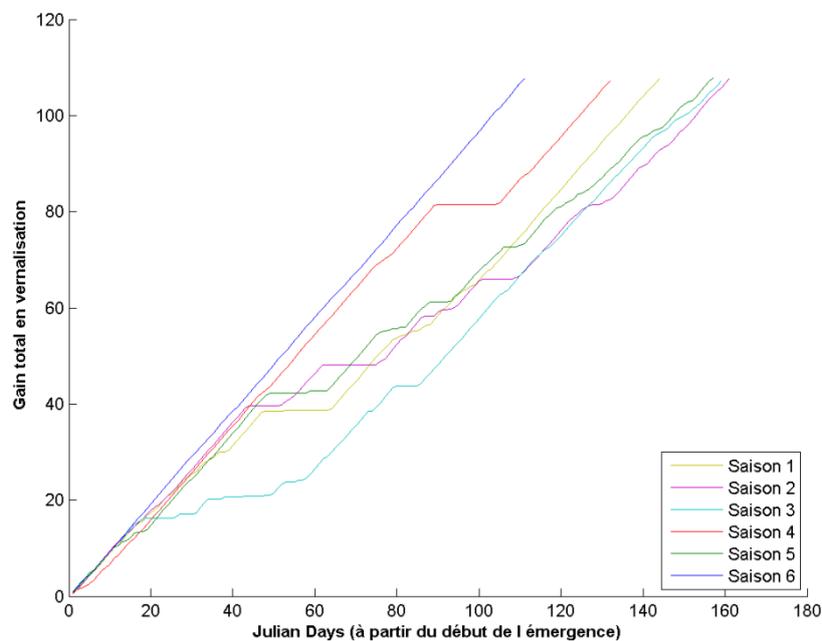
La simulation des saisons 1, 2, 4 et 6 montrent une avance de phase par rapport aux observations réalisées. Cette avance diminue lorsque l'on avance dans la saison culturale et ce pour chaque saison. À l'épiaison, les saisons 2 et 4 sont en retard alors que les saisons 1 et 6 sont toujours en avance de phase. La simulation des saisons 3 et 5 est toujours en retard de phase, ce retard restant plus ou moins égal tout le long de l'expérience pour les deux saisons.

La réécriture du code a permis de comprendre certains formalismes du module des phases phénologiques. Il a pu être remarqué que la vernalisation dépendait essentiellement des températures minimale et maximale journalières et que c'était cette vernalisation qui composait principalement la phase 1, l'induction ne prenant environ que 10 jours alors que la vernalisation dure en moyenne 144 jours. Ce formalisme semble induire des erreurs importantes dans nos régions. Pour les saisons 1, 4 et 6, les simulations du passage de la phase 1 à la phase 2 sont fortement en avance par rapport aux observations.

La Figure 9 montre l'évolution du gain total en vernalisation en fonction du jour après l'émergence. On peut voir que pour ces trois saisons, la vernalisation se termine environ 15 jours avant les trois autres saisons pour la saison 1 et jusqu'à 50 jours avant pour la saison 6.



**Figure 8. Représentation des phases phénologiques simulées et observées.** L'axe x reprend les dates auxquelles les observations ont été réalisées. L'axe y reprend les dates auxquelles les changements de phase ont été simulés par le modèle. Les dates sont données en jours juliens.



**Figure 9. Représentation du gain total en vernalisation selon le jour après l'émergence.** L'axe des abscisses reprend les jours juliens à partir de l'émergence et l'axe des ordonnées reprend le cumul de la vernalisation. A chaque saison est attribuée une couleur.

Deswarte (2016) explique qu'à la fin de la phase de vernalisation, la plante est au stade tallage herbacé. Il aurait donc pu être intéressant de calibrer la fin de la vernalisation simulée par le modèle de culture avec la date à laquelle la fraction tallage avait été apportée. Néanmoins, pour ce faire, les données de management disponibles doivent être plus précises. En effet, la fraction tallage est parfois apportée un peu plus tard qu'au départ de la reprise de végétation.

Finalement, ce formalisme de vernalisation est fort différent du formalisme utilisé dans le modèle de culture STICS (Brisson et al., 2008). Dans STICS, le formalisme de la phase phénologique correspondante est construit d'un processus de vernalisation et d'un second de photopériode. Cependant, ces deux processus se chevauchent et permettent la croissance à un taux plus faible au moyen d'un facteur diminuant l'accroissement des degrés-jours. De plus, les besoins en froid sont accumulés plus rapidement que dans le formalisme de vernalisation du modèle de culture SALUS. Dans le modèle de culture SALUS, le processus de vernalisation et de photopériode se suivent et constituent des seuils à atteindre. Durant ces deux phases, la croissance est empêchée car le modèle est en phase de latence. Ce formalisme semble être inadapté à nos régions.

Une autre interrogation qui peut être soulevée est le paramètre permettant de déterminer la longueur de la phase 2. Ce paramètre, nommé FinLeafEq, est fixé à une valeur de 5, représentant la proportion de nouvelle feuille produite durant cette phase. Ce paramètre ne varie pas d'une espèce à l'autre, ni d'une saison culturale à l'autre. En effet, le nombre de feuilles produites d'une saison à l'autre durant la phase de montaison peut varier (Dumont B., communication personnelle), allant généralement de 4 feuilles à 6 feuilles. Il serait intéressant que l'utilisateur puisse faire varier ce paramètre d'une unité, soit en le diminuant, soit en l'augmentant.

De plus, au fur et à mesure que l'on avance dans la saison culturale, on remarque que les différences de jours entre les simulations et les données observées diminuent (Figure 7 et Figure 8). Cela signifie que la longueur des phases simulées deux et trois sont plus courtes que dans la réalité. Cela est dû à la différence que l'on observe dès la première phase. La fonction dream utilisée pour la calibration essaye alors de 'rattraper' les importantes avances prises dès le début de saison pour ces 4 saisons culturales afin de minimiser l'erreur quadratique moyenne.

#### **4.1.2 La surface foliaire (LAI)**

Comme dit au paragraphe 3.1, les données relatives à la surface foliaire ne sont disponibles que pour la modalité 5, soit un fractionnement en 60-60-60.

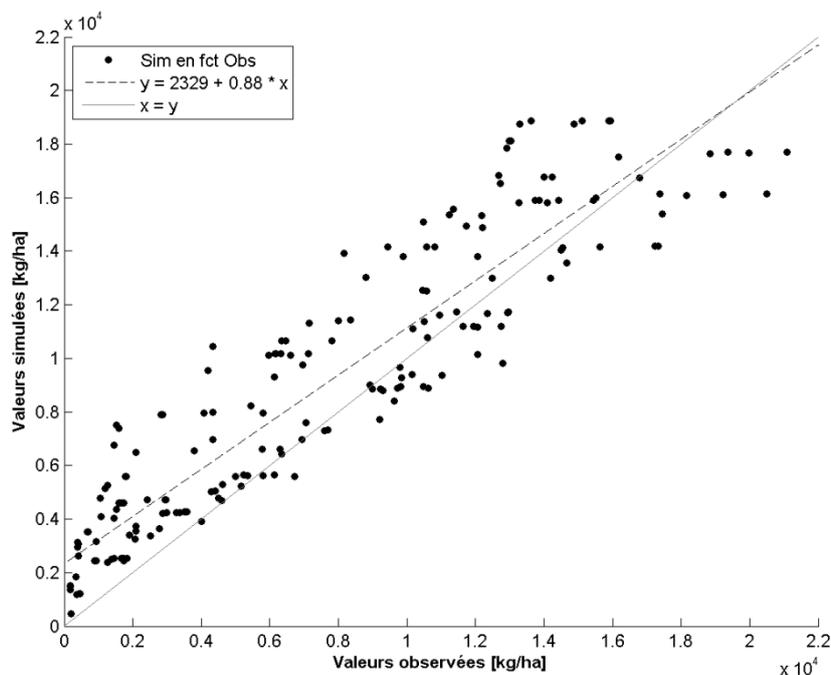
L'évaluation de l'efficacité de prédiction du modèle n'a été mesurée qu'en dynamique. De plus, les données n'étant disponibles que pour les 4 premières saisons, la phase de validation n'a pu être réalisée pour cette variable. Le Tableau 14 présente les résultats.

On remarque que l'efficacité de prédiction du modèle est faible pour cette variable. En effet, l'efficacité est inférieure à zéro alors que la déviation normale est de 0.2672. Cela signifie que le modèle ne simule pas correctement la surface foliaire de la culture dans nos régions. De plus, l'erreur quadratique, qui est de 1.65 [ $m^2/m^2$ ] est élevée. Lors de la calibration, il a pu être remarqué que ces critères pouvaient être meilleurs. Néanmoins, cela baissait l'efficacité de prédiction d'autres variables telles que la biomasse ou les rendements en grains. Cette baisse d'efficacité est due aux interdépendances des formalismes du modèle de culture.

### 4.1.3 La biomasse

Pour la biomasse, de nombreuses données étaient disponibles. Les résultats peuvent être présentés selon un suivi dynamique mais également uniquement pour la maturité.

Pour la calibration et la validation en dynamique, le modèle donne des résultats satisfaisants excepté pour la déviation normale en calibration qui est supérieure à  $|0.1|$  (Tableau 14). La Figure 10 représente l'ensemble des valeurs de biomasses simulées en fonction des valeurs de biomasses observées. La droite de régression et la bissectrice sont également représentées, respectivement en traits discontinus noirs et en une ligne continue grise.



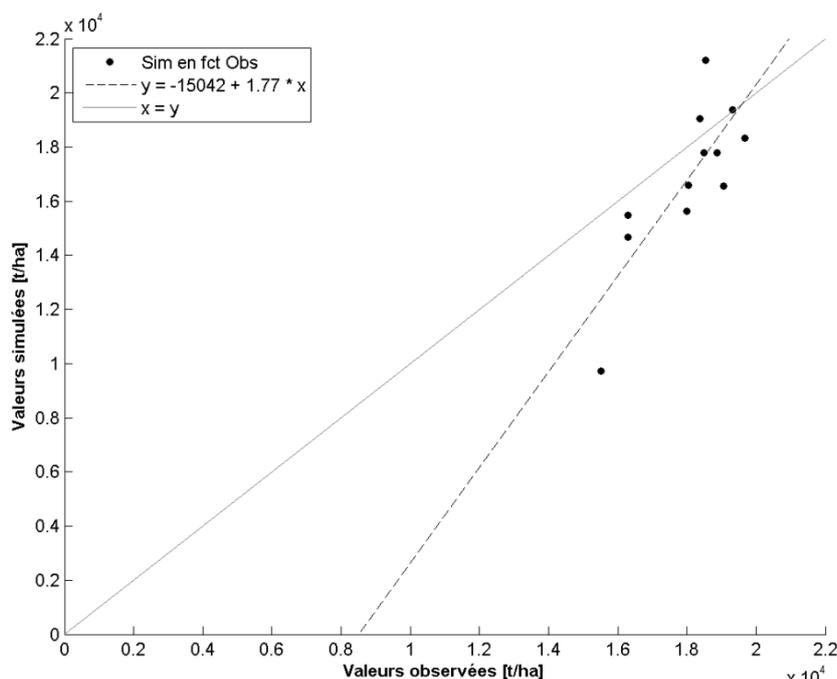
**Figure 10. Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées de l'évolution de la biomasse au cours de la saison culturale pour le set de calibration.** La courbe en traits discontinus représente la droite de régression calculée entre les valeurs simulées et les valeurs observées. La courbe grise représente la bissectrice. Dans le cas d'un modèle parfait, tous les points se situeraient sur cette dernière ligne.

Sur la Figure 10, on peut s'apercevoir que le modèle surestime la biomasse lorsque celle-ci est faible.

Au vu des valeurs des critères, on peut conclure que le modèle simule correctement la croissance de la biomasse tout au long de la saison culturale.

À maturité, l'efficacité de modélisation ne remplit pas le critère de validation d'un modèle pour les deux sets de données (Tableau 15). Pour le set de calibration, l'efficacité est un peu en-dessous de la limite mais pour le set de validation, cette efficacité est fortement négative.

La Figure 11 permet d'expliquer en partie cette efficacité de modélisation fortement négative pour le set de validation. On peut en effet y voir une valeur de biomasse simulée bien inférieure à celle observée. La droite de régression en est d'ailleurs fortement affectée et possède un coefficient de 1.77. On peut voir que la plupart des valeurs se trouvent en-dessous de la bissectrice, ce qui signifie que le modèle sous-estime la biomasse à maturité.



**Figure 11. Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées de la biomasse en fin de saison culturale pour le set de validation.** La courbe en traits discontinus représente la droite de régression calculée entre les valeurs simulées et les valeurs observées. La courbe grise représente la bissectrice. Dans le cas d'un modèle parfait, tous les points se situeraient sur cette dernière ligne.

Excepté pour le set de validation à maturité, le modèle simule correctement la croissance de la biomasse. Toutefois, la faible valeur de biomasse simulée par rapport à la valeur de biomasse observée visible sur la Figure 11 correspond à une culture sur laquelle aucun apport d'azote n'a été simulé. Lorsque l'on sait que les modèles ont été construits pour reproduire la croissance en condition de management azoté traditionnel, la simulation des cultures ne recevant pas d'apport d'azote peut être remise en question. Enfin, comparativement à d'autres modèles de culture (Mirschel et al., 2014 ; Morell et al., 2016), SALUS semble sous-estimer les valeurs de biomasse à maturité dans nos régions.

#### 4.1.4 Le rendement en grains

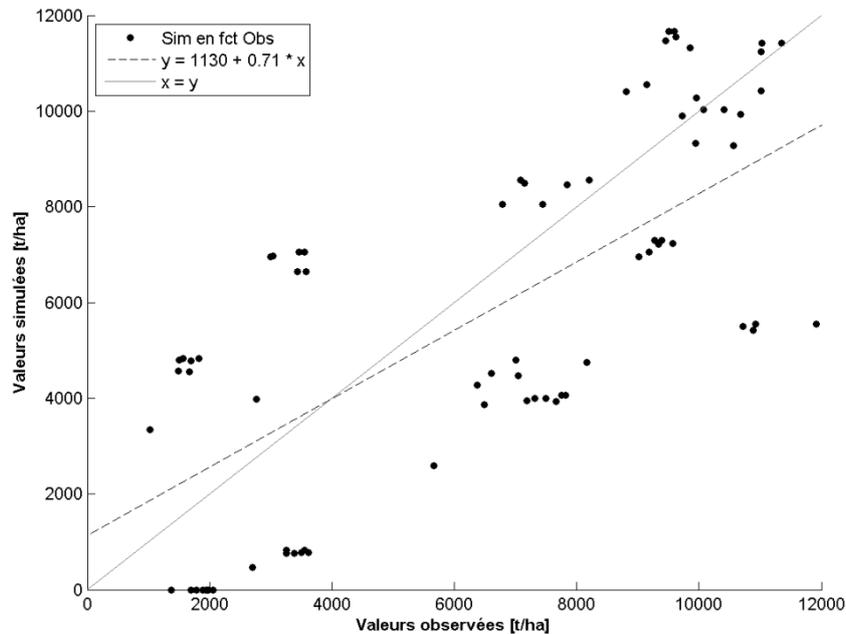
Comme pour le suivi de la biomasse, un suivi dynamique et à maturité ont été faits pour les rendements en grains.

Pour le suivi dynamique des rendements en grains, le modèle répond bien pour la simulation du set de calibration. En effet, l'efficacité de modélisation est bien supérieure à 0.5 et la déviation normale est inférieure à 0.1 (Tableau 14).

Par contre, les résultats du set de validation sont insatisfaisants. En effet, l'efficacité de modélisation est de 0.34 alors que la déviation normale est supérieure à 0.1 (0.12). La Figure 12 montre que les points sont distants de la bissectrice en début d'expérience. De plus, les rendements simulés sont tantôt inférieurs aux rendements observés, tantôt supérieurs. On peut également remarquer qu'en début de saison culturale, les rendements de chaque saison ont des valeurs semblables et que donc les points représentant ces rendements forment des groupes distincts.

Cette tendance peut s'expliquer par le fait que pour certaines saisons, le remplissage du grain se réalisait trop tôt par rapport aux données observées alors que pour d'autres, ce démarrage se faisait trop tard. Cela est probablement dû au fait que les phases phénologiques sont pour certaines en avance de phase et pour d'autres en retard de phase.

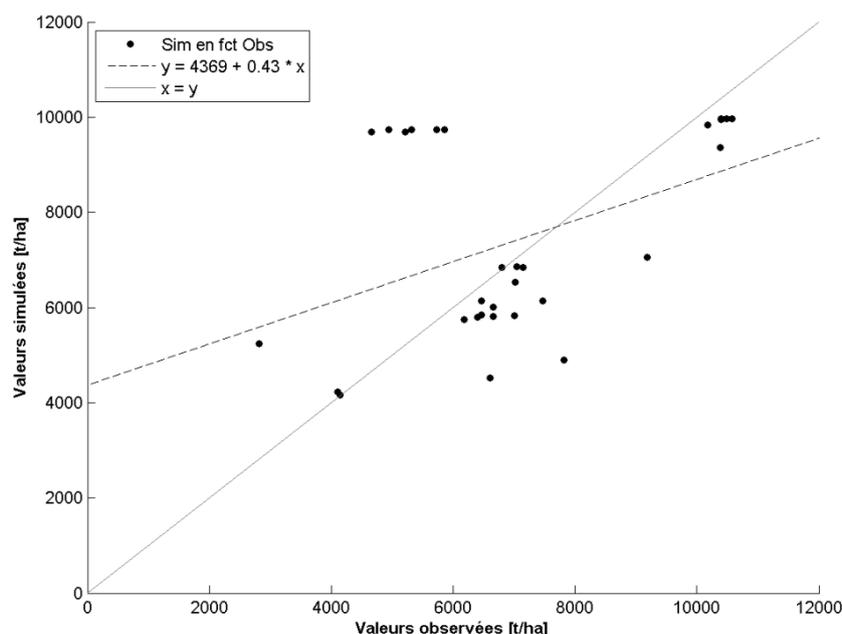
Enfin, l'erreur quadratique moyenne est également plus élevée pour le set de validation (2823 kg/ha) que pour le set de calibration (1923 kg/ha).



**Figure 12. Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées du rendement en grains au cours de la saison culturale pour le set de validation.** La courbe en traits discontinus représente la droite de régression calculée entre les valeurs simulées et les valeurs observées. La courbe grise représente la bissectrice. Dans le cas d'un modèle parfait, tous les points se situeraient sur cette dernière ligne.

Le Tableau 15 montre les résultats de l'efficacité de prédiction du modèle pour les rendements en grains à maturité. On y voit que cette efficacité est très faible pour les deux sets de données. L'efficacité de modélisation est même très fortement négative pour le set de validation (- 7.6). Pour le set de validation, cela est dû à une valeur de rendement simulée très faible, comme il a été observé pour la biomasse au paragraphe 4.1.3.

La Figure 13 représente les rendements en grains à maturité pour le set de calibration. On y voit que les rendements sont toujours sous-estimés excepté pour une saison, pour laquelle les rendements sont bien plus élevés. La saison pour laquelle les rendements simulés sont plus élevés que les observés est la saison 4. Cette saison est en avance de phase au début de la saison culturale mais est néanmoins en léger retard en fin de saison (Figure 8). La même dynamique est également observée pour la biomasse totale à maturité. Ces différences peuvent être dues à des stress subis par la culture qui n'auraient cependant pas été simulés correctement par le modèle de culture.



**Figure 13. Représentation des rendements en grains simulés à maturité en fonction des observations pour le set de calibration.** La courbe en traits discontinus représente la droite de régression calculée entre les valeurs simulées et les valeurs observées. La courbe grise représente la bissectrice. Dans le cas d'un modèle parfait, tous les points se situeraient sur cette dernière ligne.

Il a pu être montré que le modèle donnait de moins bons résultats pour les rendements en grains que pour la biomasse. De plus, les rendements en grains à maturité donnent des résultats insatisfaisants pour les deux sets de données.

Lorsque l'on se concentre sur la dynamique des rendements, il est remarqué que les simulations de certaines saisons commencent la croissance du grain avant les observations de terrain. Cependant, cela est contradictoire avec ce qui devrait normalement être simulé. En effet, les observations dynamiques des rendements en grains comprennent les masses des glumelles autour des grains. Or, ces glumelles ne sont pas comprises dans la masse simulée des grains. Cela signifie donc que tout au long de la saison, les rendements simulés devraient être inférieurs aux rendements observés. Une explication pourrait venir de l'imparfaite calibration de la phénologie du modèle.

Nous avons également vu au paragraphe 3.4.3.B que les coefficients de répartition avaient été modifiés afin de mieux simuler les rendements en grains. Cependant, cela induit une croissance trop précoce des grains. Une piste à envisager serait d'étudier finement l'impact de ces coefficients de variation pour limiter cette croissance précoce tout en continuant à simuler efficacement la croissance des grains.

Enfin, le modèle a été développé aux États-Unis. Dans ce pays, les rendements en grains, environ 3500 kg/ha (Johansson, 2016), sont beaucoup plus faibles que dans nos régions, environ 10000 kg/ha. Le modèle a montré des réponses favorables pour les rendements en grains en région méditerranéenne, dans lesquels les rendements étaient inférieurs à 4000 kg/ha (Basso et al., 2010). Néanmoins, aucune étude n'a été réalisée auparavant avec ce modèle dans nos régions et n'a montré les réponses du modèle de culture SALUS lorsque les rendements étaient élevés. Les formalismes du modèle sont donc probablement plus adaptés à des rendements faibles, ne

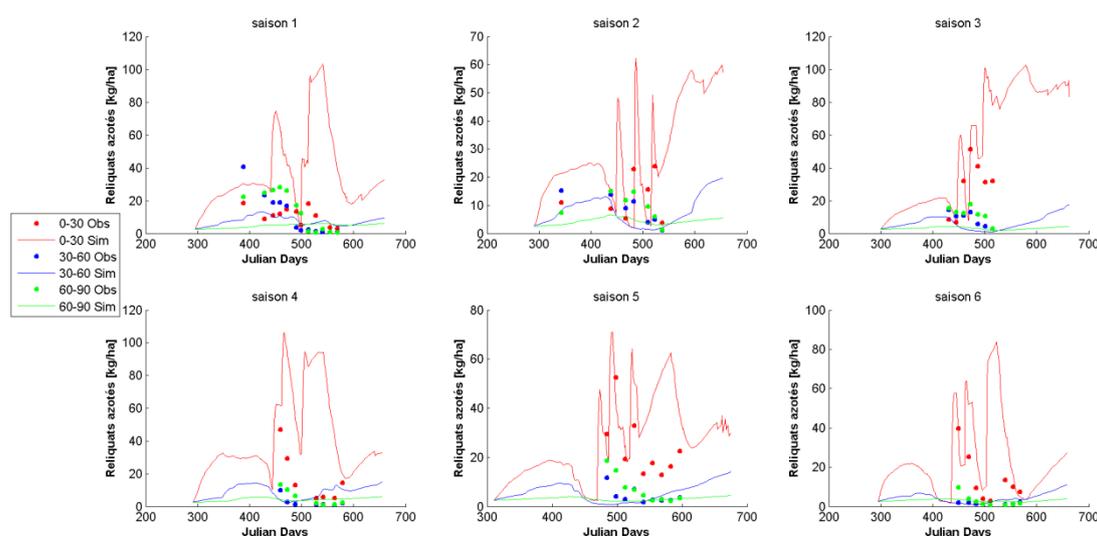
permettant alors pas une bonne simulation des rendements élevés, pouvant expliquer les difficultés rencontrées pour simuler les rendements rencontrés dans nos régions et la sous-estimation générale des rendements en grains et de la biomasse.

#### 4.1.5 L'azote dans le sol

Le suivi de l'azote dans le sol est important car il peut soit être assimilé par la plante pour sa croissance, soit connaître différents destins dans l'environnement (cf. paragraphe 2.2).

Comme le montre le Tableau 14, l'efficacité de prédiction du modèle pour l'azote dans le sol est peu fiable. En effet, l'efficacité de modélisation est négative pour les deux sets de données alors que la déviation normale est inférieure à 0.1 pour le set de validation uniquement (égal à -0.08).

La Figure 14 représente l'évolution de l'azote dans les horizons 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm pour les six saisons d'observation. Les valeurs simulées sont représentées en lignes continues alors que les observations de terrain sont représentées par des points. Il est important de rappeler que seules des observations pour la modalité 5 de management azoté (Tableau 1) sont disponibles. Les sauts brusques que l'on peut observer pour chaque saison dans le premier horizon correspondent aux moments auxquels de l'azote a été apporté à la culture.



**Figure 14. Représentation de l'évolution de la quantité d'azote présente dans les différents horizons.** L'axe des abscisses reprend les jours juliens alors que l'axe des ordonnées reprend les quantités d'azote dans le sol. L'horizon le moins profond (0-30 cm) est représenté en rouge, le second (30-60 cm) en bleu et enfin le troisième (60-90) en vert. Les courbes continues correspondent aux valeurs simulées par le modèle alors que les points correspondent aux données observées.

Comme on peut le voir, pour le premier horizon de sol, les simulations des saisons 2 et 6 ont des dynamiques semblables aux observations et les valeurs simulées s'ajustent aux observations. Les simulations des saisons 1 et 4 ne reproduisent pas correctement les observations. Enfin, les simulations des saisons 3 et 5 s'ajustent aux observations au début de la saison culturale. Néanmoins, plus on avance dans ces saisons, plus la simulation s'écarte des observations. Pour la saison 3, cela est probablement dû à une période de sécheresse et le modèle ne parvient pas à représenter adéquatement les phénomènes durant cette période.

Sur la Figure 14, on observe également qu'au début de la saison culturale, la quantité d'azote présente dans le sol augmente pour le premier horizon 0-30. Cette augmentation d'azote dans le premier horizon est due à la conversion de l'azote organique en azote inorganique. Cependant, la quantité d'azote ne fluctue que très peu pour les horizons 2 et 3. Or, c'est durant cette période que le processus de lixiviation est le plus important. Cette stabilité dans les horizons 2 et 3 signifie que l'azote ne sort pas de l'horizon 1 pour se diriger vers les horizons inférieurs plus bas et donc qu'aucune lixiviation n'est simulée.

Pour qu'il y ait lixiviation de l'azote dans le profil, il faut que l'eau passe des horizons supérieurs vers les horizons inférieurs. La première vérification fut donc de vérifier si le sol n'était pas sec au départ de l'expérience. En effet, si le sol est trop sec, par exemple avec une teneur en eau inférieure à la teneur en eau au point de flétrissement, il n'y aurait aucun drainage de l'eau dans le profil et l'azote resterait alors dans l'horizon 0-30. Néanmoins, le sol disposait au début de chaque saison d'une quantité d'eau potentiellement extractable pour la plante de minimum 130 centimètres.

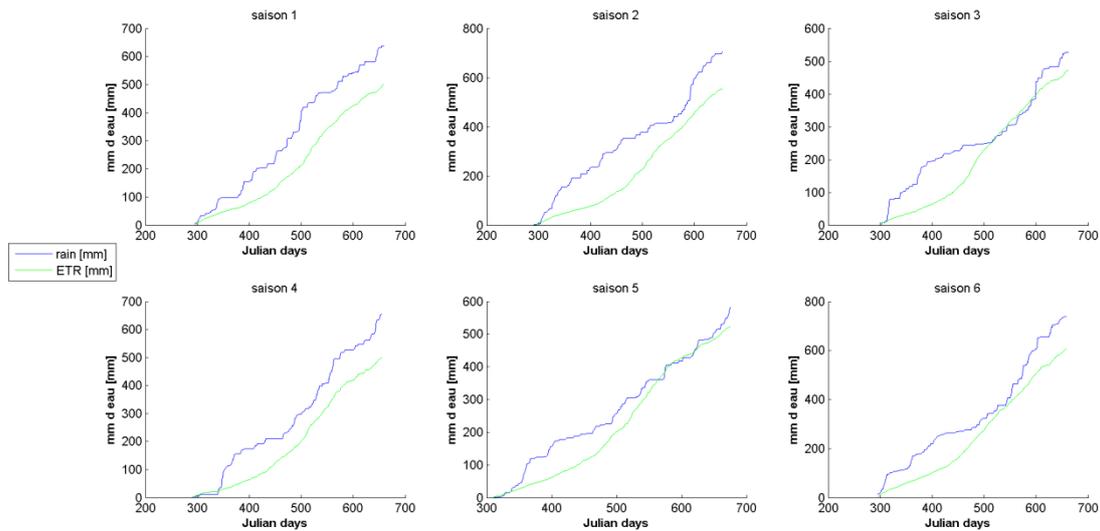
Cela signifie donc que la teneur en eau de l'horizon en début de saison culturale était supérieure à la teneur en eau au point de flétrissement et que l'écoulement était possible.

Une seconde hypothèse est que l'évapotranspiration totale (de la plante et du sol) soit plus élevée que la quantité d'eau tombée lors des précipitations au cours de la saison et que cette évapotranspiration totale entraîne l'assèchement du sol jusqu'à une teneur en eau au point de flétrissement.

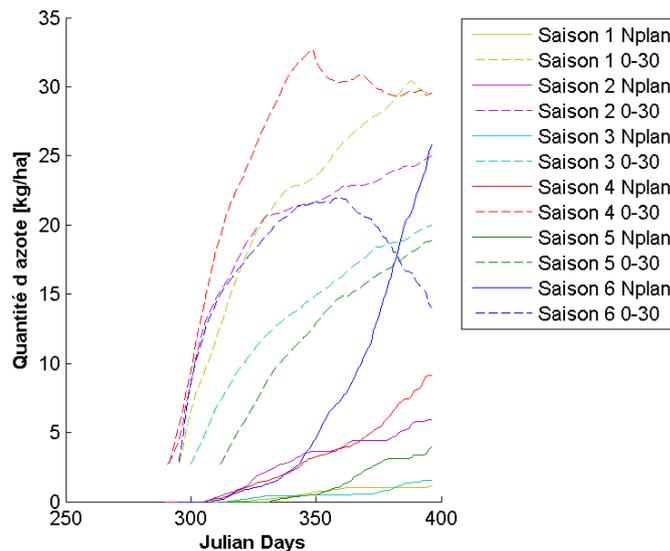
La Figure 15 présente les cumuls des précipitations et de l'évapotranspiration pour chaque saison culturale. On peut y voir qu'en fin de chaque saison culturale, les précipitations sont plus élevées que l'évapotranspiration. Si l'on s'intéresse au début de ces saisons culturales, période d'intérêt dans le cas de la lixiviation de l'azote, le cumul des précipitations est toujours plus élevé que le cumul d'évapotranspiration, excepté pour le début de la saison 4. Cela ne veut cependant pas dire que l'évapotranspiration n'est jamais supérieure aux précipitations au cours d'une journée. Les teneurs en eau du profil ont donc été vérifiées et il a pu être remarqué que le sol conservait toujours une réserve utile en eau élevée, signifiant ainsi que l'évapotranspiration n'est pas trop élevée et n'entraîne donc pas un assèchement du sol. Dès lors, l'hypothèse développée, à savoir que l'évapotranspiration est trop importante, peut être rejetée.

Une troisième hypothèse est que l'azote serait pompé dès le départ par la plante expliquant alors l'absence de lixiviation. La Figure 16 représente l'évolution des quantités d'azote dans l'horizon 0-30 et dans la plante jusqu'au 31 janvier. Excepté pour la saison 6, les quantités d'azote pompées par la culture sont faibles.

On remarque également que la quantité d'azote dans l'horizon 0-30 augmente continuellement pour les saisons 1, 2, 3 et 5, laissant penser qu'aucune lixiviation n'est simulée. Pour les saisons 4 et 6, l'augmentation est marquée au début. La quantité d'azote atteint ensuite un pic et diminue. On peut voir que cette diminution va de pair avec les quantités d'azote dans la plante qui sont les plus élevées. Ces deux saisons sont également les saisons pour lesquels les simulations des phases phénologiques étaient en avance par rapport aux observations. Cela pourrait donc être corrélé.



**Figure 15. Représentation du cumul d'eau évapotranspirée et de précipitations par saison culturale.** L'axe des abscisses reprend les jours juliens alors que l'axe des ordonnées reprend les quantités d'eau. Les cumuls des précipitations sont représentés par les courbes bleues et les cumuls d'eau évapotranspirée par les courbes vertes.

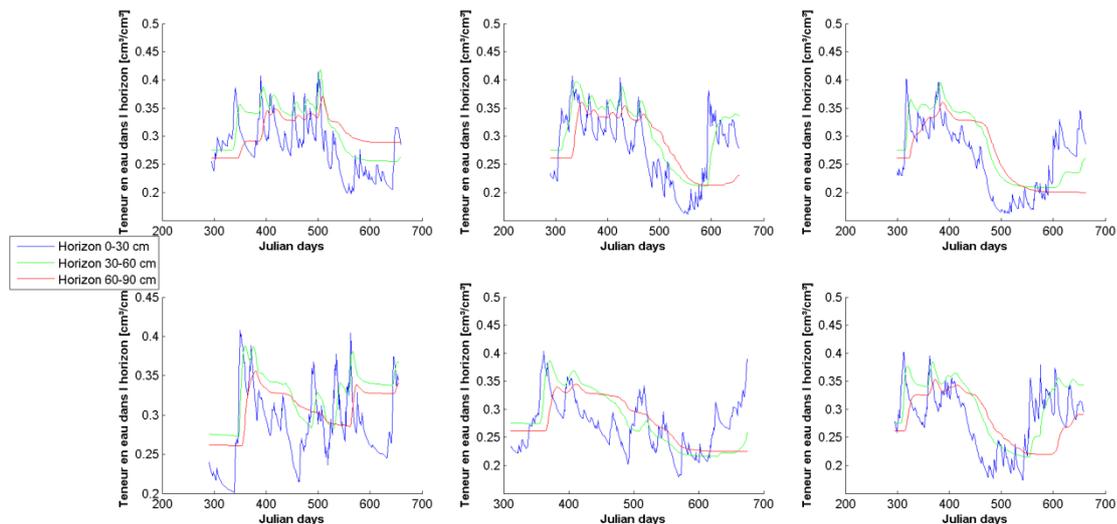


**Figure 16. Représentation de l'évolution de la quantité d'azote dans l'horizon 0-30 et dans la plante de l'émergence à la sortie d'hiver.** L'axe des abscisses reprend les jours juliens jusqu'en sortie d'hiver alors que l'axe des ordonnées reprend les quantités d'azote dans le premier horizon 0-30 et dans la plante. Chaque saison est représentée par une couleur. L'évolution de la quantité d'azote dans le premier horizon 0-30 est représentée par les courbes discontinues et l'évolution de la quantité d'azote dans la plante est représentée par une ligne continue.

Une quatrième hypothèse serait qu'aucun drainage n'est simulé au sein du profil. Afin de vérifier cela, les teneurs en eau dans les différents horizons du sol ont été étudiées (Figure 17). On peut voir que l'horizon 1 présente la dynamique la plus variable. En effet, cet horizon est directement soumis aux pluies et est donc plus susceptible de connaître d'importantes variations. Les teneurs en eau des horizons 2 et 3 varient bien lors de l'hiver, ce qui signifie que de l'eau passe bien des horizons

supérieurs vers les horizons inférieurs. La lixiviation de l'azote n'est donc pas empêchée par l'absence d'écoulement entre l'horizon supérieur et les horizons inférieurs.

Enfin, une dernière hypothèse explorée serait que la conductivité hydrique à saturation soit faible. Néanmoins, la conductivité hydrique du sol utilisée dans la calibration du modèle est de 1.39 cm/h, soit 33.5 cm/j. Cela correspond à un sol considéré comme perméable avec de bonnes capacités de drainage (Degré A., 2016). Cette variable d'entrée n'est donc pas la limite qui empêche le drainage du sol.



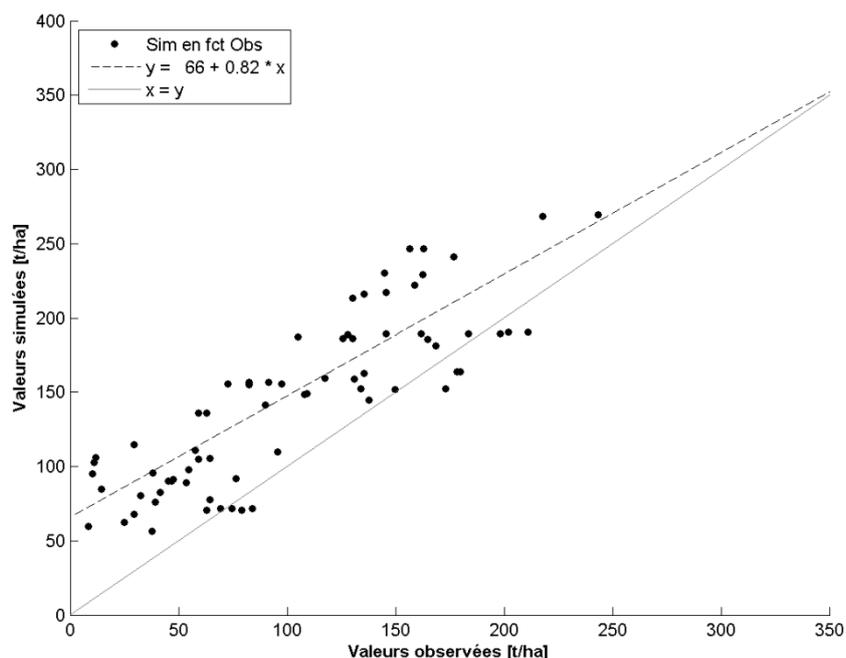
**Figure 17. Évolution de la teneur en eau des différents horizons pour chaque saison.** L'axe des abscisses reprend les jours juliens alors que l'axe des ordonnées reprend les teneurs en eau dans le sol. La teneur en eau du premier horizon est représentée en bleu, celle du deuxième en vert et celle du troisième en rouge.

En conclusion, l'absence de lixiviation n'a pu être expliquée dans cette étude car tous les processus pouvant l'en empêcher sont simulés correctement. Il faudrait se pencher plus en détail sur les formalismes de l'azote afin de déterminer l'origine exacte de l'absence de lixiviation entre horizons. Cependant, à ce jour, nous ne disposons pas des formalismes spécifiques à l'azote.

#### 4.1.6 L'azote dans la plante

Pour cette variable, aucune observation n'a été réalisée pour les deux saisons composant le set de validation. Seuls les résultats concernant le set de calibration seront donc présentés. Avec une efficacité de modélisation de 0.26 et une déviation normale de -0.4 (Tableau 14), on peut dire que le modèle ne simule pas correctement l'assimilation de l'azote par la plante.

La Figure 18 représente les quantités simulées d'azote présentes dans la plante en fonction des quantités observées d'azote présentes dans la plante. En général, la simulation surestime la quantité d'azote présente dans la plante, principalement en début d'expérience. Cette surestimation diminue lorsque l'on avance dans la saison, sans toutefois se résorber.



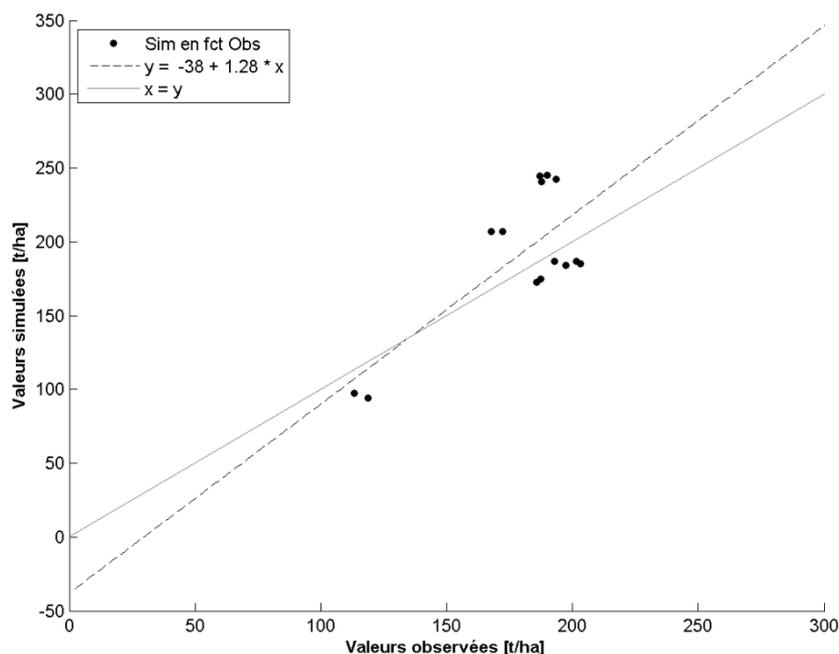
**Figure 18. Représentation des quantités d'azote présentes dans la plante.** Les quantités simulées sont représentées en fonction des quantités observées. La courbe en traits discontinus représente la droite de régression calculée entre les valeurs simulées et les valeurs observées. La courbe grise représente la bissectrice. Dans le cas d'un modèle parfait, tous les points se situeraient sur cette dernière ligne.

#### 4.1.7 L'azote dans le grain

Pour cette variable, seules les observations à maturité sont disponibles. Le Tableau 15 montre que l'erreur quadratique moyenne est moins élevée pour le set de validation que pour le set de calibration. Néanmoins, l'efficacité de modélisation est négative dans les deux cas (-1.47 pour le set de calibration et -0.57 pour le set de validation). La Figure 19 représente la régression linéaire sur le set de validation pour les quantités d'azote présentes dans le grain.

On peut y voir que les points sont regroupés selon les saisons. Ainsi, pour la première saison, la simulation surestime la quantité d'azote dans le grain (environ 40 kg/ha de plus, soit une erreur de 22 % par rapport aux observations). Pour la seconde saison, les valeurs sont légèrement sous-estimées (environ 14 kg/ha, soit une erreur de 8 %).

Les formalismes pour l'assimilation de l'azote dans le grain ne sont pas détaillés et il apparaît que le modèle simule uniquement une valeur finale d'azote une fois le grain arrivé à maturité. Il serait intéressant de connaître la dynamique de l'assimilation d'azote dans le grain afin de voir l'évolution de son accumulation.



**Figure 19. Représentation des quantités d'azote présentes dans le grain.** Les quantités simulées sont représentées en fonction des quantités observées. La courbe en traits discontinus représente la droite de régression calculée entre les valeurs simulées et les valeurs observées. La courbe grise représente la bissectrice. Dans le cas d'un modèle parfait, tous les points se situeraient sur cette dernière ligne.

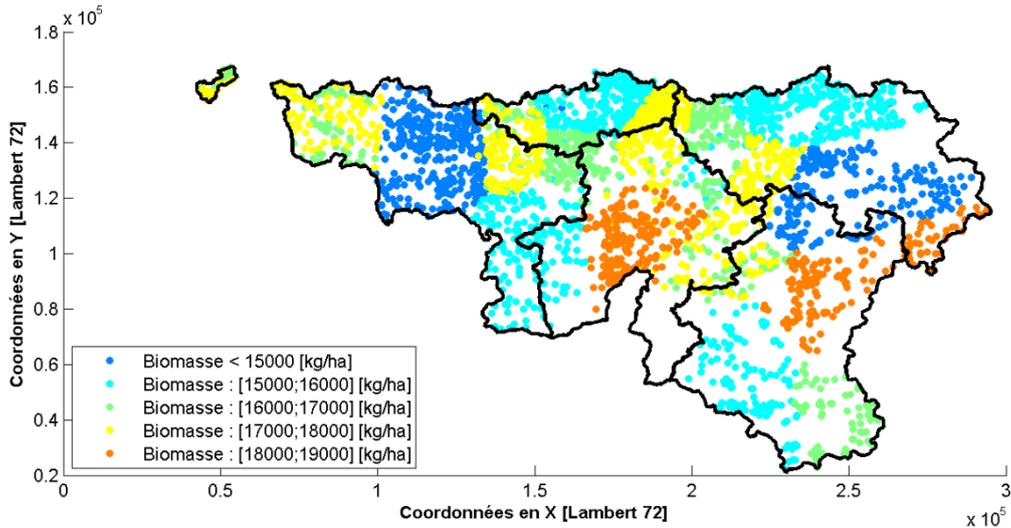
## 4.2 Résultats de la spatialisation du modèle de culture

Dans cette partie, quelques résultats simulés par le modèle seront présentés. Au vu des performances, parfois faibles du modèle, les résultats de la spatialisation se sont concentrés sur une analyse des données moyennes sur les séries temporelles dans le but de dégager le potentiel et limites de la spatialisation du modèle de culture SALUS en Wallonie.

### 4.2.1 Biomasse totale

La Figure 20 représente les biomasses totales moyennes produites par profil de sol. Cette moyenne a été réalisée pour les 21 années simulées, les deux dates de semis et les trois fractionnements azotés. Cinq classes sont représentées. La première classe (bleu foncé) contient les profils produisant en moyenne une biomasse totale inférieure à 15 t/ha. La dernière classe reprend l'ensemble des profils produisant en moyenne une biomasse totale de 18 à 19 t/ha.

Si l'on compare cette figure à la Figure 5 qui représente les sols selon leur proximité aux stations météo, on observe le même découpage. Cette carte montre également que les sols soumis aux mêmes conditions climatiques présentent très peu de variabilité. Cela signifie que la biomasse totale simulée par le modèle dépend principalement des variables météorologiques et que le sol paraît y jouer un rôle mineur.

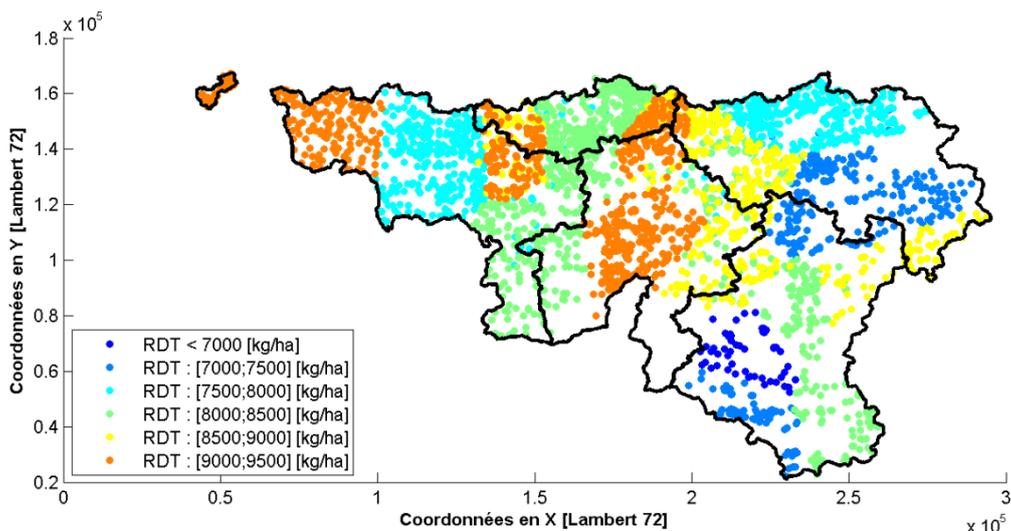


**Figure 20. Représentation des profils de sol selon leur biomasse totale.** Les couleurs de chaque profil dépendent de la classe dans laquelle se situe la biomasse totale du profil. On observe 5 classes différentes. La plus faible représentée en bleu reprend l'ensemble des sols pour lesquels la biomasse est inférieure à 15000 kg/ha. La dernière, représentée en orange reprend les sols pour lesquels la biomasse est comprise entre 18000 et 19000 kg/ha.

#### 4.2.2 Rendements en grains

##### A. Rendements moyens en grains

La Figure 21 représente les rendements moyens en grains de chaque profil. Les moyennes des rendements ont été calculées sur les 21 saisons simulées, les deux dates de semis et les trois managements azotés testés. Ces rendements ont été classés en différentes classes selon leurs valeurs. Sur ce graphique, on retrouve 6 classes différentes. La première classe contient les rendements inférieurs à 7000 kg/ha alors que la dernière classe contient les rendements compris entre 9000 et 9500 kg/ha.



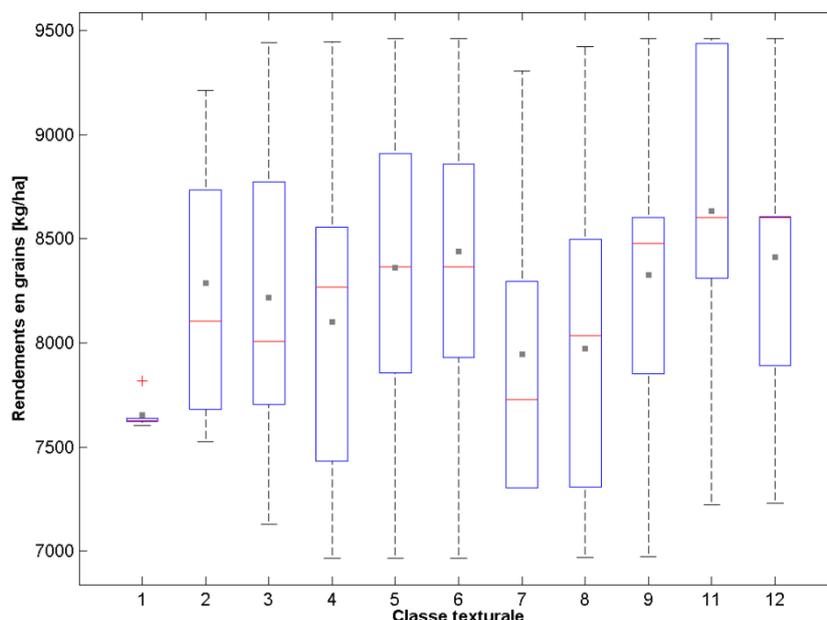
**Figure 21. Représentation des profils de sol selon leurs rendements en grains.** Les couleurs de chaque profil dépendent de la classe dans laquelle se situe le rendement en grains du profil. On observe 5 classes différentes. La plus faible représentée en bleu foncé reprend l'ensemble des sols pour lesquels les rendements sont inférieurs à 7000 kg/ha. La dernière, représentée en orange reprend les sols pour lesquels les rendements sont compris entre 9000 et 9500 kg/ha.

On y observe une répartition semblable à celle observée sur la carte des biomasses totales produites (Figure 20). Les rendements en grains simulés dépendent principalement des variables météorologiques. Les rendements moyens en grains les plus élevés sont observés autour des stations météo d’Esplechin, Feluy, Haut-le-Wast et Leuze, alors que les plus faibles le sont autour de la station météorologique de Libramont. Comme pour la biomasse, aucun pattern autre que celui des stations n’a pu être dégagé.

### ***B. Rendements moyens en grains en fonction de la classe texturale***

Comme précisé au paragraphe 3.2.1.B, pour chaque horizon, la classe texturale a été déterminée sur base du triangle textural de la FAO (Loganathan, 1987). Le Tableau 7 présente la correspondance entre les noms et numéros des différentes classes texturales utilisées dans ce travail.

À partir de ces classes, il est possible de déterminer les moyennes des rendements moyens selon chaque classe texturale. Pour ce faire, la classe texturale du premier horizon de chaque profil a été utilisée. La Figure 22 présente les boîtes à moustache pour les rendements en grains pour chaque classe texturale. Les moyennes des rendements par classe texturale sont représentées en gris. Les lignes rouges représentent les médianes. Le rectangle central (en bleu) représente les données centrales, allant du quartile 25 au quartile 75. Les lignes noires en pointillés indiquent les données reprenant les données entre les percentiles 1 et 99. Les données aberrantes sont représentées par les ‘+’ rouges.



**Figure 22. Boîtes à moustache des rendements moyens en grains selon la classe texturale.** L’axe des abscisses reprend les différentes classes texturales alors que l’axe des ordonnées reprend les rendements en grain. Les moyennes sont représentées par de carrés gris.

En Wallonie, aucun des profils gardés pour cette expérience n’est de type Sandy clay (classe 10). Le rendement moyen le plus faible est de 7652 kg/ha pour les sols sableux (classe texturale 1) et le rendement moyen le plus élevé est de 8635 kg/ha pour les silty clay (classe texturale 11). Le rendement moyen entre les classes texturales ne varie donc que d’environ 1000 kg/ha. Nous verrons par la suite que cette valeur est faible par rapport aux différences de rendements rencontrées entre

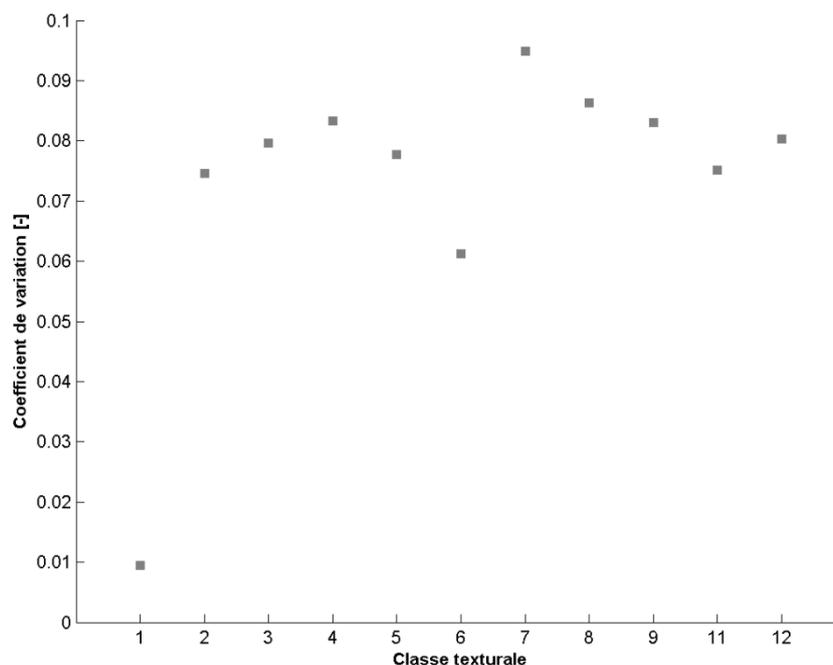
les stations météo. Néanmoins, il est important de ne pas considérer cette variation comme un critère statistique. Le coefficient de variation, dont il est discuté à l'aide de la Figure 23, est en effet plus adapté et permet de mieux se rendre compte des différences de rendements dues à la classe texturale.

Afin de déterminer les classes texturales ayant des rendements semblables, un test de Tukey honest significant difference a été réalisé. Préalablement à ce test, une analyse de la variance à un facteur doit être réalisée. Les résultats obtenus au moyen de cette analyse permettent alors de construire le Tableau 17 présenté ci-dessous. Celui-ci montre l'appartenance des classes texturales aux différents groupes de moyennes selon les rendements moyens simulés. Deux groupes de moyennes sont déterminés. On peut voir que les sols possédant une teneur en limon faible et une teneur en sable importante présentent les rendements les moins élevés (groupe B).

**Tableau 17. Classement des classes texturales selon leurs rendements.** Deux groupes de moyennes sont présents, le groupe A et le groupe B. Les classes texturales faisant partie des deux groupes de moyenne ont donc des rendements semblables aux rendements de toutes les autres classes texturales. Les classes texturales n'appartenant pas à la même classe texturale ont des rendements significativement différents. Le lecteur est renvoyé vers le Tableau 7 pour la correspondance des nombres aux différentes classes texturales.

Classe texturale	Rendement moyen [kg/ha]	Groupe de moyennes
11	8635	A
6	8438	A
12	8414	A B
5	8363	A B
9	8328	A B
2	8289	A B
3	8216	B
4	8101	B
8	7974	B
7	7947	A B
1	7652	B

Enfin, la Figure 23 représente le coefficient de variation des rendements moyens simulés en fonction de la classe texturale. Le coefficient de variation est le rapport de l'écart type sur la moyenne et est adimensionnel. Excepté pour la classe texturale 1, le coefficient de variation des autres classes est supérieur à 0.06, soit 6 %. Nous verrons par la suite que cela représente une variation importante par rapport aux coefficients de variations au sein des stations météo. Néanmoins, entre les différentes classes texturales, ce coefficient de variation ne varie que très peu.



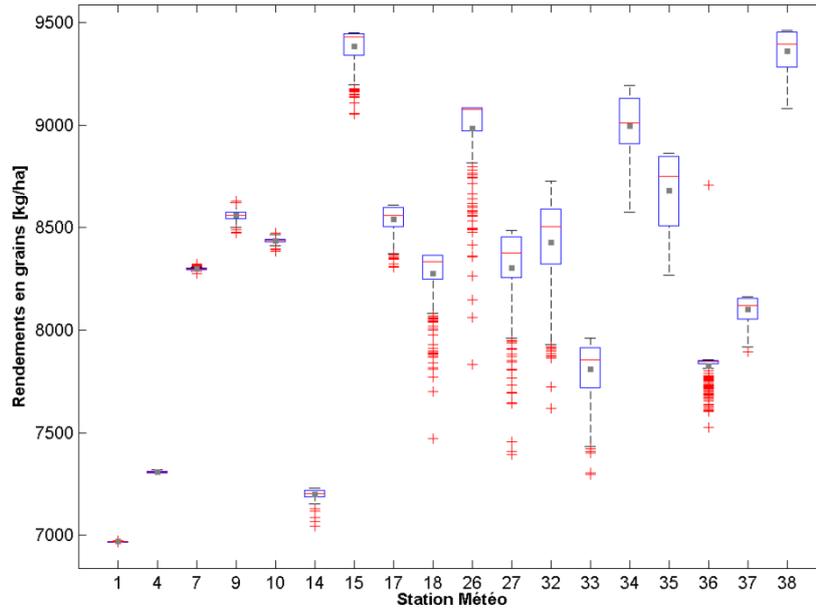
**Figure 23. Représentation des coefficients de variation des rendements moyens en grains selon la classe texturale.** L'axe des abscisses reprend la classe texturale alors que l'axe des ordonnées reprend le coefficient de variation correspondant.

### ***C. Rendements moyens en grains en fonction des variables climatiques***

La Figure 24 représente les boîtes à moustache des rendements moyens simulés en fonction de la station météo. Le rendement moyen le plus faible est de 6968 kg/ha autour de Libramont alors que le plus élevé est de 9383 kg/ha autour de Haut-le-Wast. La variation est donc d'environ 2400 kg/ha entre le rendement le plus faible et le plus élevé. Cette variation est plus élevée que celle observée entre les différentes classes texturales.

On observe que la variabilité des rendements pour une même station météo est très faible mais que cette variabilité est plus importante entre les différentes stations météo. De plus, de nombreuses données aberrantes, représentées par les '+' de couleur rouge, sont présentes. La plupart de ces données sont par ailleurs inférieures aux autres données.

Le Tableau 18 présente le classement des stations météo selon leurs rendements moyens. Pour ce classement, 11 groupes de moyennes sont déterminés sur les 18 stations météo étudiées. De ce fait, peu de groupes sont constitués de plus d'une station météo. De plus, on observe qu'aucune station météo ne fait partie de deux groupes de moyennes différents.



**Figure 24. Boîtes à moustache des rendements moyens en grains selon la station météo.** L'axe des abscisses reprend les différentes classes texturales alors que l'axe des ordonnées reprend les rendements en grain. Les moyennes sont représentées par de carrés gris.

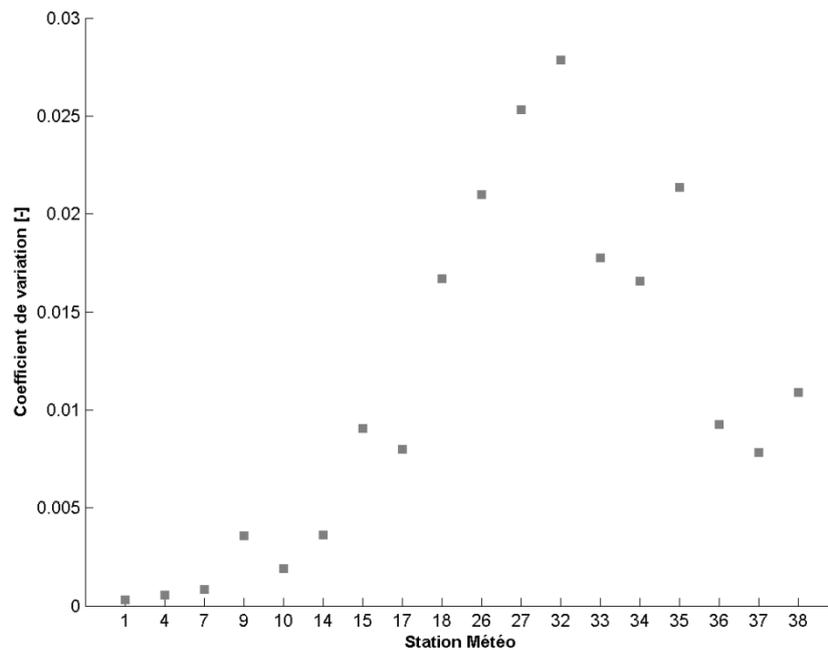
**Tableau 18. Classement des stations météo selon leurs rendements.** 11 classes sont déterminées dans cette classification. Le lecteur est renvoyé vers l'Annexe 3 pour la correspondance des identifiants aux différentes stations météo.

Station météo	Rendement moyen [kg/ha]	Groupe de moyennes
15	9383	A
38	9361	A
34	8997	B
26	8680	B
35	8560	C
9	8541	D
17	8436	D
10	8429	E
32	8303	E
27	8300	F
7	8274	F
18	8100	F
37	8300	G
36	7825	H
33	7809	H
4	7308	I
14	7200	J
1	6968	K

Enfin, la Figure 25 représente les coefficients de variation des rendements moyens simulés pour chaque station météo. On observe que ce coefficient est peu important pour chaque station

météorologique, expliquant les faibles variabilités de rendements pour les sols soumis aux mêmes conditions météorologiques.

Néanmoins, les coefficients de variation entre les différentes stations météorologiques varient plus que les coefficients de variation entre les différentes classes texturales. En effet, le facteur multiplicatif entre les coefficients de variation le moins élevé et le plus élevé pour les stations météo est de 90. Pour les classes texturales, ce facteur multiplicatif est de 10. Cela explique la plus grande variabilité de rendements observée entre les stations météo par rapport aux variabilités de rendements observées entre les classes texturales.



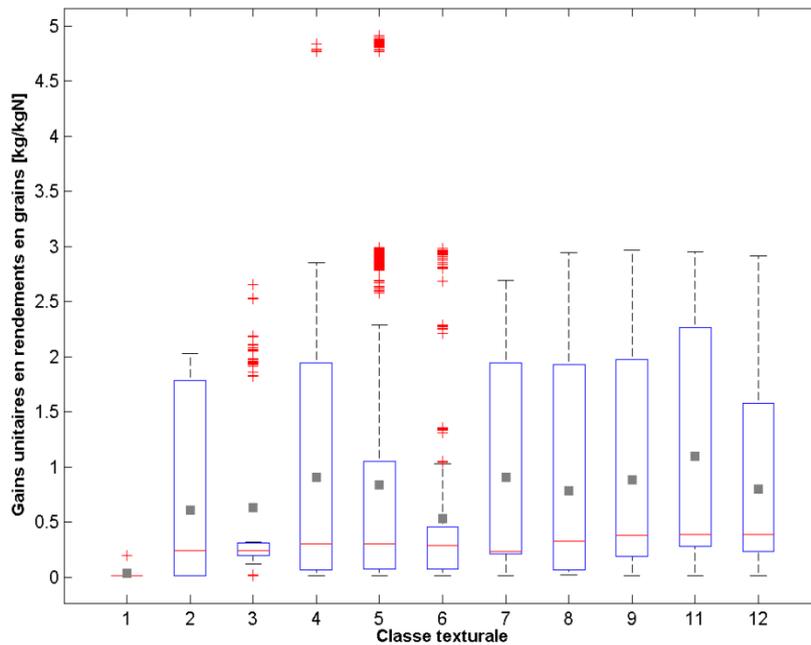
**Figure 25. Représentation des coefficients de variation des rendements moyens en grains simulés selon la station météo.**  
L'axe des abscisses reprend la station météo alors que l'axe des ordonnées reprend le coefficient de variation correspondant.

#### ***D. Gains unitaires en rendements selon la classe texturale***

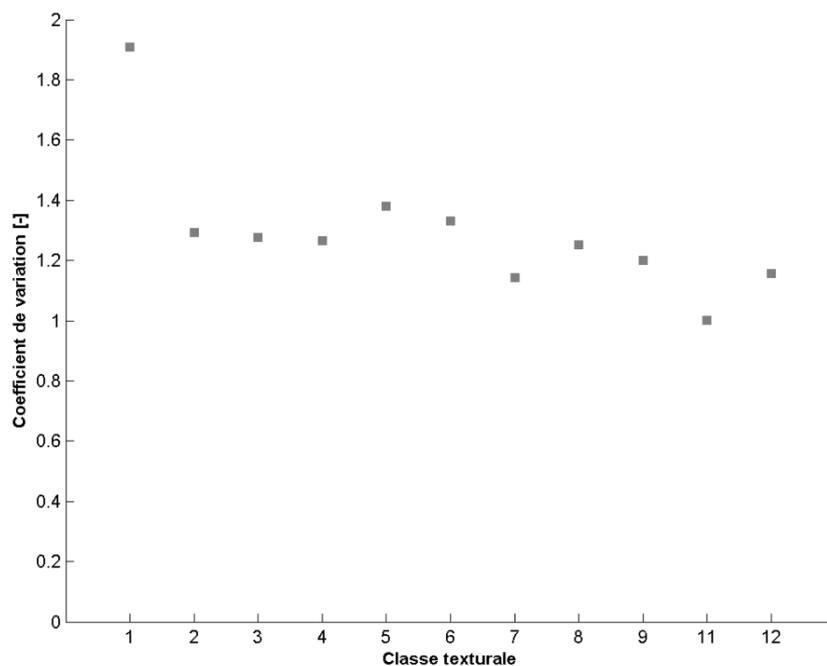
Le gain unitaire en rendement correspond aux kg/ha de grains que l'on gagne à chaque kg N/ha que l'on ajoute. Dans cette étude, ce gain se calcule par rapport au troisième fractionnement apporté à la culture car seul ce fractionnement varie entre les différents managements simulés. Pour rappel cette troisième fraction est de 40, 75 ou 110 kg N/ ha. Seuls les résultats de la première date de semis, soit le 15-10, seront présentés. Les résultats pour la seconde date de semis présentent des résultats ayant des patterns semblables à ceux qui vont être présentés ci-dessous.

La Figure 26 représente les boîtes à moustache pour les gains unitaires de rendements selon la classe texturale. Les variabilités au sein des classes texturales sont importantes. De nombreux gains considérés comme aberrants sont présents. On voit également que les sols sableux (classe 1) possèdent les gains unitaires moyens les plus faibles. Cela pourrait être dû à une lixiviation importante de l'azote.

Enfin, la Figure 27 présente les coefficients de variation pour les gains unitaires en fonction de la classe. Ces gains unitaires sont importants. En effet, ceux-ci sont plus grands que 1, cela signifie que l'écart type est plus grand que la moyenne pour chaque classe texturale. La dispersion des gains unitaires au sein de chaque classe texturale est donc élevée.



**Figure 26. Représentation des boîtes à moustache des gains unitaires moyens en fonction de la classe texturale.** L'axe des abscisses reprend l'identifiant des classes texturales alors que l'axe des ordonnées reprend les gains unitaires en rendements en grains. Les carrés gris représentent les moyennes des gains unitaires moyens pour la date du semis du 15 – 10.



**Figure 27. Représentation des coefficients de variation pour les gains unitaires selon la classe texturale.** L'axe des abscisses reprend l'identifiant des classes texturales alors que l'axe des ordonnées reprend le coefficient de variation moyen.

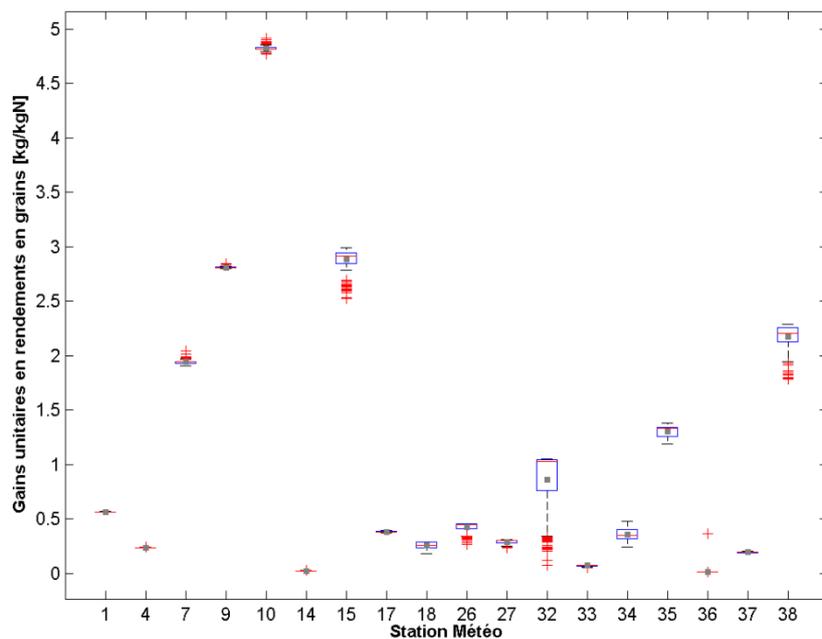
### E. Gains unitaires en rendements selon les variables climatiques

Dans cette partie, les gains unitaires en rendements selon les variables climatiques sont présentés.

La Figure 28 présente les boîtes à moustache pour les gains unitaires en fonction des stations météo. On y voit que la taille de ces boîtes à moustache est souvent faible. Cela signifie que les variabilités des gains unitaires au sein d'une même station météorologique sont peu élevées.

La Figure 29 représente les coefficients de variation des gains unitaires selon la station météo. Ces coefficients, excepté pour les stations météo 32 et 36, sont faibles et ne dépassent pas 20 %. Cela corrobore les observations réalisées précédemment, c'est-à-dire que la variabilité des gains unitaires au sein d'une même station météo est très faible et donc que les gains des sols influencés par des mêmes conditions climatiques sont semblables, quelle que soit la classe texturale de ces sols.

Le coefficient de variation plus important pour la station météorologique 32 peut s'expliquer par le fait que pour la station météo 32, de nombreuses données aberrantes sont présentes (Figure 29). Pour la station météo 36, cela est dû au fait que pour cette station, une valeur de gain est bien plus importante que les autres. Cette dernière augmente considérablement l'écart type de la distribution et donc le coefficient de variation du gain unitaire en rendements en grains.

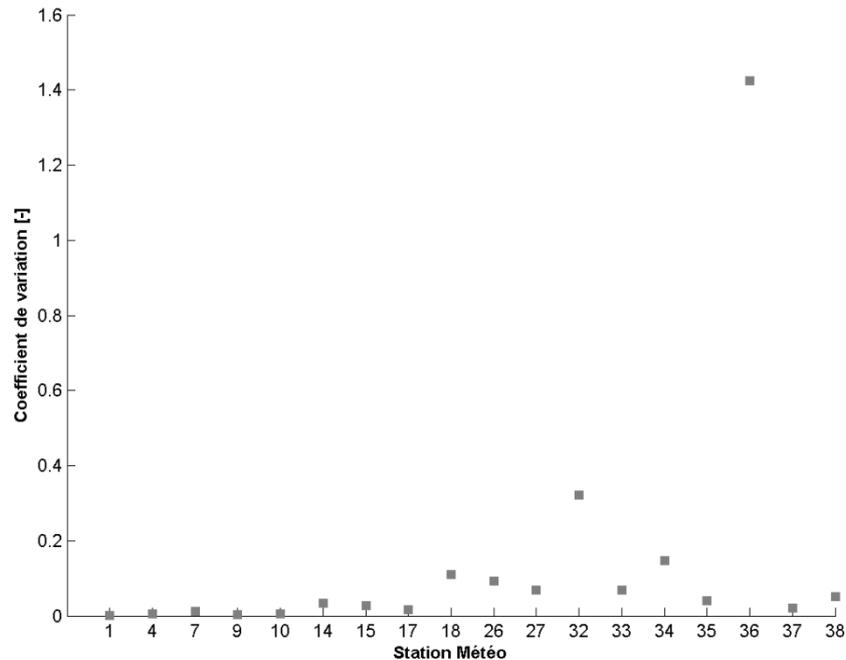


**Figure 28. Représentation des boîtes à moustache des gains unitaires moyens en fonction de la station météo.** L'axe des abscisses reprend l'identifiant des stations météo alors que l'axe des ordonnées reprend les gains unitaires en rendements en grains. La ligne grise représente les moyennes des gains unitaires moyens pour la date du semis du 15 – 10.

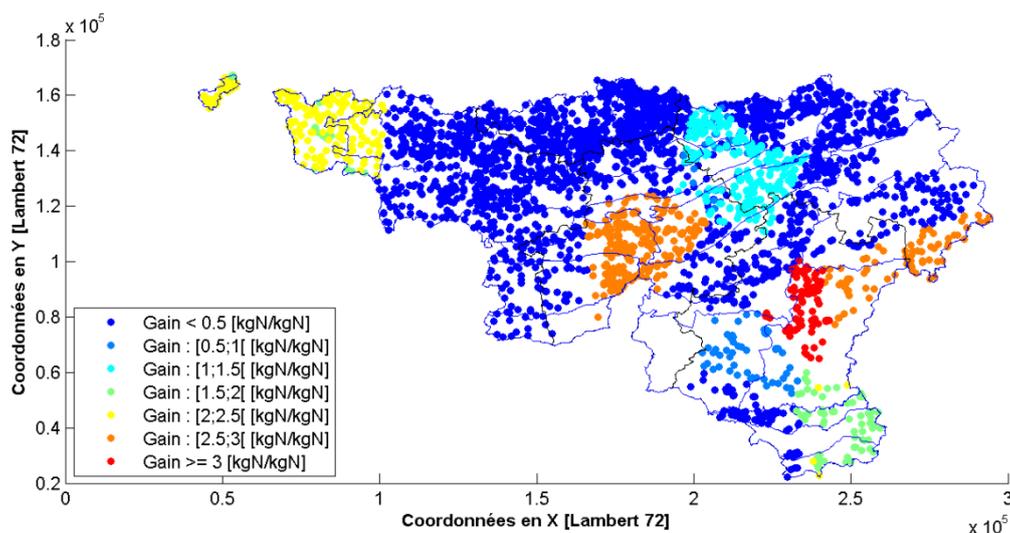
Afin de corroborer ce qui a été observé au niveau des gains unitaires de rendements en Wallonie, la Figure 30 a été construite. Celle-ci représente les profils de sols individuellement selon le gain unitaire moyen obtenu pour la première date de semis en réalisant la moyenne des rendements pour les 21 années de simulation. On voit que le gain moyen unitaire est principalement influencé par les variables climatiques. Peu de variabilité est observable au sein de chaque 'région climatique'.

Néanmoins, la variabilité entre les régions est moins importante que la variabilité observée avec la carte de rendements (Figure 30).

Ces gains moyens unitaires semblent faibles. Néanmoins, cela peut s'expliquer par le fait que deux fractionnements azotés, 110 kg N/ha au total, ont déjà été apportés à la plante avant le troisième fractionnement. Cela signifie que la plante est en bon état sanitaire et que sa croissance n'est généralement pas entravée par des stress azotés.



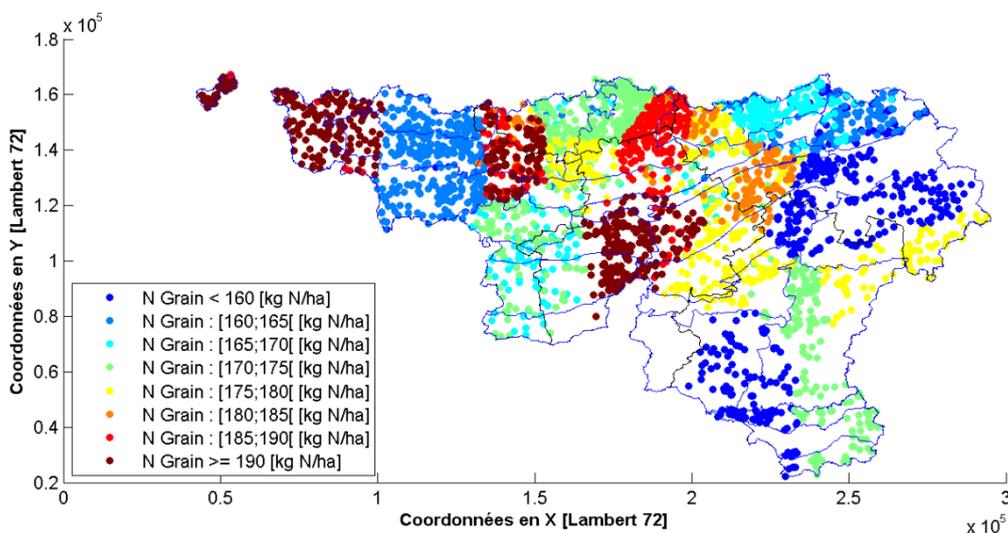
**Figure 29. Représentation des coefficients de variation pour les gains unitaires selon la station météo.** L'axe des abscisses reprend l'identifiant des stations météo alors que l'axe des ordonnées reprend le coefficient de variation moyen.



**Figure 30. Représentation des gains moyens unitaires en azote dans le grain selon le profil de sol.** On distingue 7 classes différentes de gains moyens unitaires. Les gains moyens les plus élevés sont observés autour de la station météorologique d'Amberloup.

### 4.2.3 Azote dans le grain

La Figure 31 représente les profils de sols selon les quantités d'azote assimilées dans le grain. On peut y voir que pour cette variable, les conditions météorologiques jouent de nouveau un rôle prépondérant. Huit classes sont représentées. Si l'on compare cette carte avec la Figure 21, on peut s'apercevoir que les 'régions climatiques' possédant les rendements en grains les plus importants possèdent également les teneurs en azote dans le grain les plus importantes.



**Figure 31. Représentation des profils de sols selon la quantité d'azote assimilée dans le grain.** 8 classes sont présentes. La plus petite classe reprend les sols ayant assimilé moins de 160 kg d'azote/ha dans le grain alors que la plus grande reprend les sols ayant assimilé plus de 190 kg d'azote/ha dans le grain.

Le Tableau 19 reprend le classement des moyennes des quantités d'azote assimilées dans le grain en fonction de la classe texturale. De plus nombreux groupes de moyennes sont créés pour cette variable que pour les précédentes étudiées. Deux groupes contiennent un nombre important de classes texturales. Comme pour les rendements, les sols possédant les teneurs en limon faible et en sable importante présentent les rendements les moins élevés (groupe C).

**Tableau 19. Classement des classes texturales selon les quantités d'azote assimilées dans le grain.** 5 groupes de moyennes sont créés dans ce cas. On peut voir que 2 grands groupes ressortent, et que ces deux grands groupes représentent l'ensemble des classes texturales.

Classe texturale	Azote dans le grain [kg N/ha]	Groupe de moyennes
11	179	A
6	176	A B
12	175	A C D
5	174	A C
9	173	A C E
2	173	A C E
3	171	C
4	168	C
8	166	C
7	165	B C
1	161	C

Le Tableau 20 reprend le classement des moyennes des quantités d'azote assimilées dans le grain selon la station météo. Quatorze groupes de moyennes ont été créés pour 18 stations météo.

**Tableau 20. Classement des stations météos selon les quantités d'azote assimilées dans le grain.** Quatorze groupes de moyennes apparaissent dans ce tableau, laissant penser que la variabilité entre les stations météo est importante.

Station météo	Azote dans le grain [kg N/ha]	Groupe de moyennes
38	194	A
15	192	B
34	188	C
26	188	C
35	180	D
17	178	E
9	177	E
32	176	F
27	174	G
18	173	G H
7	172	H I
10	172	I
37	170	J
36	164	K
33	163	K
4	152	L
14	150	M
1	145	N

#### ***A. Gains unitaires en azote dans les grains selon la classe texturale***

La Figure 32 présente les boîtes à moustache pour les gains unitaires en azote dans le grain en fonction de la classe texturale. Ces gains unitaires en azote dans le grain représentent les quantités d'azote assimilées dans le grain lorsque l'on ajoute 1 kg d'azote par hectare. On peut voir que ces gains sont faibles selon la classe texturale.

On voit également que la variabilité est importante au sein de chaque classe texturale. Cela s'observe sur la Figure 33. En effet, les coefficients de variation sont supérieurs à 1 ce qui signifie que l'écart-type est supérieur à la moyenne et que la distribution est fortement variable. On observe également que les coefficients de variation sont peu variables entre les différentes classes, laissant à penser qu'une fois de plus, cette sortie du modèle est également principalement influencée par les variables climatiques.

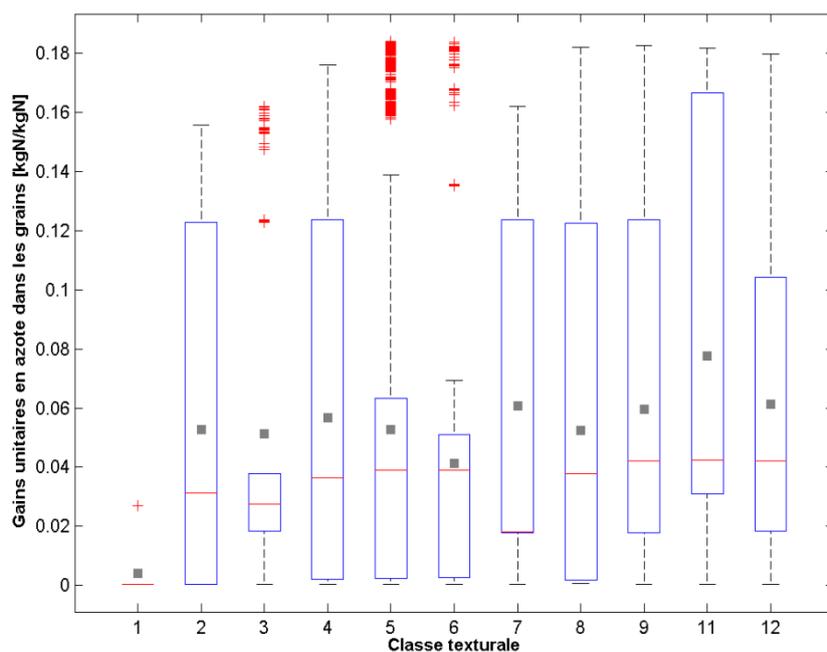


Figure 32. Représentation des boîtes à moustache des gains unitaires en azote dans le grain selon la classe texturale. L'axe des abscisses reprend les classes texturales et l'axe des ordonnées reprend les rendements gains unitaire en azote dans le grain. Les carrés gris représentent les gains unitaires moyens.

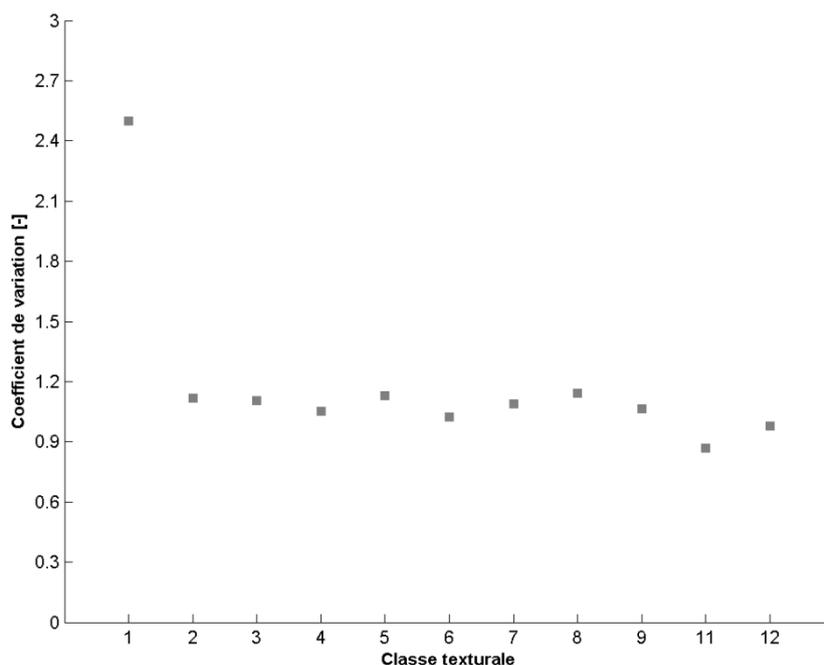
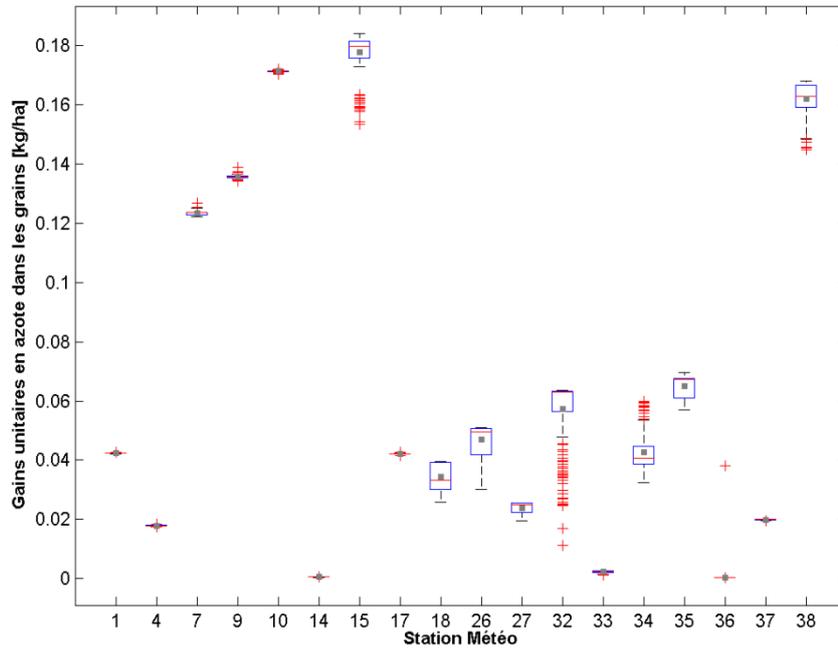


Figure 33. Représentation des coefficients de variation des gains unitaires en azote dans le grain selon la classe texturale.

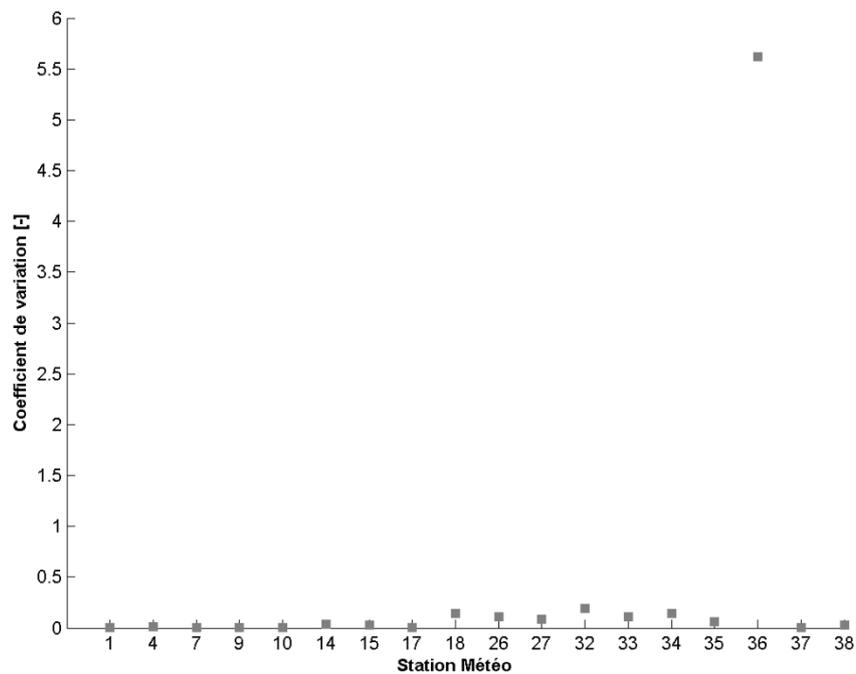
### B. Gains unitaires en azote dans les grains selon les variables météorologiques

La Figure 34 présente les boîtes à moustache pour les gains unitaires en azote dans le grain selon la station météorologique. On y voit que la variabilité est faible au sein des stations météorologiques. Cela est d'ailleurs corroboré par la Figure 35 qui montre que les coefficients de variation des stations météorologiques sont faibles. Le haut coefficient de variation de la station 36 est dû à une valeur

erronée très éloignée du reste de la distribution de cette station. Cette valeur est probablement due au même profil de sol que celle observée au paragraphe 4.2.2.E.



**Figure 34. Représentation des boîtes à moustaches des gains unitaires en azote dans le grain selon la station météorologique.** L'axe des abscisses reprend les stations météo et l'axe des ordonnées reprend les rendements gains unitaire en azote dans le grain. Les carrés gris représentent les gains unitaires moyens.



**Figure 35. Représentation des coefficients de variation des gains unitaires en azote dans le grain selon la station météorologique.** L'axe des abscisses reprend les stations météo et l'axe des ordonnées reprend les rendements gains unitaire en azote dans le grain.

## 5 Conclusion et perspectives

Au cours de ce travail, il a été montré que la phase de calibration reste une opération délicate et de nombreux problèmes ont été mis en évidence :

- Les erreurs sur les phases phénologiques sont importantes et quelques formalismes paraissent inadaptés à nos conditions. Disposer de résultats d'expérience pour lesquelles les phénomènes sont observés et non de l'itinéraire technique serait une plus-value pour l'étude. En effet, l'itinéraire technique n'est pas toujours en parfaite adéquation avec les observations. Cela induit des erreurs qui peuvent être facilement évitables. De plus, les formalismes de la vernalisation et de la photopériode pourraient être revus,
- La dynamique de l'azote a montré quelques manquements. En effet, il semble qu'aucune lixiviation ne soit simulée par le modèle durant l'hiver, ne reflétant pas la réalité. Par ailleurs, le formalisme régissant l'assimilation de l'azote dans le grain paraît également être inadapté et il pourrait être intéressant de pouvoir disposer du suivi dynamique de l'assimilation d'azote dans le grain simulée par le modèle,
- Un manque évident d'informations sur le modèle. Pour le modèle de culture STICS (Brisson et al., 2003), des manuels reprenant l'ensemble des paramètres et en présentant les impacts sur les sorties du modèle ont été édités. Il serait intéressant de disposer d'un manuel similaire pour ce modèle de culture afin d'en faciliter la calibration.

Néanmoins, ce modèle présente également quelques avantages. Il est par exemple aisé de modifier les coefficients de répartition de la matière carbonée et les concentrations relatives en azote au sein de chaque phase. Au moyen de ces paramètres, il est possible d'accroître ou de diminuer la vitesse de certains processus physiologiques tels que la croissance du grain ou de la plante. Dans d'autres modèles de culture, ces formalismes reposent sur des paramètres constants et fixés que l'utilisateur ne peut modifier.

Les sorties du modèle de culture étudiées dans ce travail, soit la biomasse, les rendements en grain, l'azote dans les grains et les gains unitaires ont montré une véritable dépendance à la spatialisation réalisée préalablement. De plus, il a été remarqué que la classe texturale influençait peu les rendements. Afin d'améliorer la spatialisation du modèle de culture ainsi que les résultats obtenus, différentes perspectives sont proposées :

- Il apparaît que la charge caillouteuse peut être considérée en entrée du modèle. Disposer de ces données pour l'entièreté des profils de sol aurait permis d'en envisager la paramétrisation. En effet, il est fort probable que, sur certains sols étudiés, la charge caillouteuse aurait impacté certaines entrées du modèle telle la teneur en eau à la capacité au champ, ce qui aurait de ce fait influencé les sorties du modèle,
- Il serait à priori intéressant de pousser l'analyse statistique afin de déterminer l'interaction entre les classes texturales et les variables climatiques. Ainsi, les proportions dans lesquelles chaque facteur influence les rendements auraient pu être déterminées de façon plus fine,
- Réaliser des statistiques à l'échelle intra-annuelle et non sur les moyennes de l'ensemble des saisons simulées. Une plus grande variabilité serait observée entre les différentes classes texturales et les stress pourraient être observables et interprétés. Dans l'optique d'une

gestion azotée fine, il conviendrait également de pousser l'étude à l'échelle intra-annuelle en prélude au développement d'un outil d'aide à la décision,

- Concernant les variables climatiques, il pourrait être intéressant de coupler le modèle avec une base de données météorologiques à haute résolution spatiale (tel que le projet AGROMET, actuellement développé par le CRA (Rosillon, 2017)). Cela permettrait d'avoir un gradient plus fin que celui obtenu avec la méthodologie utilisée,
- Le triangle textural utilisé, celui de la FAO (Loganathan, 1987) est peut-être inadapté. En effet, Forges et al. (2008) comparent les différents triangles texturaux utilisés dans le monde. Il souligne que malgré le fait que le triangle de la FAO soit utilisé dans de nombreux contextes pédologiques différents, il est toujours préférable d'utiliser les triangles adaptés à la région d'étude. Cela n'aurait pas changé la méthodologie utilisée mais aurait éventuellement permis de mettre en évidence les différences entre les classes texturales.

Finalement, il ne faut pas perdre de vue qu'un modèle doit être utilisé comme un outil et que celui-ci ne représente pas l'exacte réalité. Des erreurs seront toujours rencontrées et elles restent inévitables car la transcription de phénomènes réels en équations est complexe. Les modèles doivent donc être utilisés en connaissance de cause et il incombe à son utilisateur de pouvoir critiquer et discuter des résultats simulés par le modèle utilisé.

Lors de ce travail, il a été conclu qu'en l'état, le modèle est difficilement utilisable de manière efficace en Wallonie, dans l'optique du développement d'outils d'aide à la décision visant la prédiction des rendements en grain ou la gestion de la fertilisation azotée.

## 6 Biblio

- Alem C., Labhilili M., Brahmi K., Jlibene M., Nasrallah N. & Filali-Maltouf A., 2002. Adaptations hydrique et photosynthétique du blé dur et du blé tendre au stress salin. *C. R. Biol.* **325**, 1097–1109.
- Ardo Kane N., 2012. Régulation et étude de fonction de facteurs de transcription MADS-box associés à la vernalisation chez le blé (*Triticum aestivum* L.) 322.
- Asseng S. & Turner N.C., 2007. Modelling Genotype × Environment × Management Interactions To Improve Yield , Water Use Efficiency and Grain Protein in Wheat. *Scale Complex. Plant Syst. Res. Gene-Plant-Crop Relations* 91–102.
- Balkovič J., van der Velde M., Schmid E., Skalský R., Khabarov N., Obersteiner M., Stürmer B. & Xiong W., 2013. Pan-European crop modelling with EPIC: Implementation, up-scaling and regional crop yield validation. *Agric. Syst.* **120**, 61–75.
- Basso B., Cammarano D., Troccoli A., Chen D. & Ritchie J.T., 2010. Long-term wheat response to nitrogen in a rainfed Mediterranean environment: Field data and simulation analysis. *Eur. J. Agron.* **33**(2), 132–138.
- Basso B. & Ritchie J.T., 2005. Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan. *Agric. Ecosyst. Environ.* **108**(4), 329–341.
- Basso B., Ritchie J.T., Grace P.R. & Sartori L., 2006. Simulation of tillage systems impact on soil biophysical properties using SALUS model. *Riv. Agron.* **4**, 677–688.
- Batchelor W.D., Basso B. & Paz J.O., 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Eur. J. Agron.* **18**(1–2), 141–158.
- Beaudoin N., Gallois N., Viennot P., Le Bas C., Puech T., Schott C., Buis S. & Mary B., 2016. Evaluation of a spatialized agronomic model in predicting yield and N leaching at the scale of the Seine-Normandie Basin. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1–30.
- Bernoux M., Arrouays D., Cerri C., Volkoff B. & Jolivet C., 1998. Bulk density of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Sci. J.* **162**(3), 743–749.
- Bichel A., Oelbermann M. & Echarte L., 2016. Impact of residue addition on soil nitrogen dynamics in intercrop and sole crop agroecosystems. *Geoderma*.
- Bodson B. & Watillon B., 2016. *Le Livre blanc*, 306.
- Braudeau E., 1988. Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol basé sur l'étude de la courbe de retrait. *CR Acad. Sci. Sér. 2* (January 1988), 1933–1936.
- Brisson N. & Delecolle R., 1992. Développement et modèles de simulation. *Agron. EDP Sci.* **12**(3), 253–263.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B. & Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* **18**(3–4), 309–332.
- Brisson N., Launay M., Mary B. & Beaudoin N., 2008. *Conceptual basis, formalisations and*

- parameterization of the STICS crop model*. Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N. eds., 297.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., B. N., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.-H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B. & Justes E., 2002. STICS : A generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances . II . Model validation for wheat and Maize. *Agronomie*. **22**, 69–82.
- Cassman K. G., Dobermann A. W.D.T., 2002. Agroecosystems , Nitrogen-use Efficiency , and Nitrogen Management. *AMBIO A J. Hum. Environ.* **31**(2), 132–140.
- Chen D., Li Y., Grace P. & Mosier A.R., 2008. N<sub>2</sub>O emissions from agricultural lands: A synthesis of simulation approaches. *Plant Soil* **309**(1–2), 169–189.
- Chenu K., 2015. Characterizing the crop environment - nature, significance and applications. *Crop Physiol.* 321–348.
- Chenu K., Cooper M., Hammer G.L., Mathews K.L., Dreccer M.F. & Chapman S.C., 2011. Environment characterization as an aid to wheat improvement : interpreting genotype – environment interactions by modelling water-deficit patterns in **62**(6), 1743–1755.
- Deryng D., Sacks W.J., Barford C.C. & Ramankutty N., 2011. Simulating the effects of climate and agricultural management practices on global crop yield. *Glob. Biogeochem. Cycles* **25**(2), GB2006.
- Deswarte J.-C., 2016. La vernalisation : un passage au froid nécessaire nécessaire pour fleurir.
- Dumont B., Vancutsem F., Seutin B., Bodson B., Destain J.P. & Destain M.F., 2012. Simulation de la croissance du blé à l'aide de modèles écophysologiques: Synthèse bibliographique des méthodes, potentialités et limitations. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **16**(3), 382–392.
- Dzotsi K.A., Basso B. & Jones J.W., 2015. Parameter and uncertainty estimation for maize, peanut and cotton using the SALUS crop model. *Agric. Syst.* **135**, 31–47.
- Forges A.R. De, Feller C. & Arrouays M.J.D., 2008. Perdus dans le triangle des textures. *Etude Gest. des sols* **15**(2), 97–111.
- Fry J., Guber A.K., Ladoni M., Munoz J.D. & Kravchenko A.N., 2017. Geoderma The effect of up-scaling soil properties and model parameters on predictive accuracy of DSSAT crop simulation model under variable weather conditions. *Geoderma* **287**, 105–115.
- Gate P., 1995. *Ecophysiologie du blé : De la plante à la culture*. Lavoisier ed., 429.
- Giola P., Basso B., Pruneddu G., Giunta F. & Jones J.W., 2012. Impact of manure and slurry applications on soil nitrate in a maize-triticale rotation: Field study and long term simulation analysis. *Eur. J. Agron.* **38**(1), 43–53.
- Godfray C.H.J., Beddington J.R., Crute I.R., Haddad L., Lawrence D., Muir J.F., Pretty J., Robinson S., Thomas S.M. & Toulmin C., 2010. Food Security : The Challenge of **327**(February), 812–819.
- Guillaume S., Bergez J.E., Wallach D. & Justes E., 2011. Methodological comparison of calibration procedures for durum wheat parameters in the STICS model. *Eur. J. Agron.* **35**(3), 115–126.
- Heidmann T., Tofteng C., Abrahamsen P., Plauborg F., Hansen S., Battilani A., Mazurczyk W., Vacek J. & Coutinho J., 2008. Calibration procedure for a potato crop growth model using information

- from across Europe. *Ecol. Modell.* **211**, 209–223.
- Jame Y.W. & Cutforth H.W., 1996. Crop growth models for decision support systems. *Can. J. Plant Sci.* **76**(1), 9–19.
- Jame Y.W., Cutforth H.W. & Ritchie J.T., 1999. Temperature response function for leaf appearance rate in wheat and corn. *Can. J. Plant Sci.* **79**(1), 1–10.
- Johansson R., 2016. Crop production, 51.
- Jones C.A., Ritchie J.T., Kiniry J.R., Godwin D.C. & Otter S.I., 1984. The CERES Wheat and Maize Models. *ICRISAT Cent. India. Patancheru, A.P* 95–100.
- Jones J.W., Antle J.M., Basso B., Boote K.J., Conant R.T., Foster I., Charles H., Godfray J., Herrero M., Howitt R.E., Janssen S., Keating B.A., Munoz-Carpena R., Porter C.H., Rosenzweig C. & Wheeler T.R., 2016. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agsy.*
- Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J. & Ritchie J.T., 2003. *The DSSAT cropping system model*, *European Journal of Agronomy*, 235-265.
- Launay M. & Guerif M., 2005. Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications. *Agric. Ecosyst. Environ.* **111**(1–4), 321–339.
- Legrain X., Demarcin P., Colinet G. & Bock L., 2011. Cartographie des sols en Belgique : aperçu historique et présentation des travaux actuels de valorisation et de révision de la Carte Numérique des Sols de Wallonie **15**, 647–656.
- Loganathan P., 1987. Soil quality considerations in the selection of sites for aquaculture. <http://www.fao.org/docrep/field/003/AC172E/AC172E04.htm>
- Ma L., Hoogenboom G., Saseendran S.A., Bartling P.N.S., Ahuja L.R. & Green T.R., 2009. Effects of estimating soil hydraulic properties and root growth factor on soil water balance and crop production. *Agron. J.* **101**(3), 572–583.
- Maiorano A., Martre P., Asseng S., Ewert F., Muller C., Rotter R.P., Ruane A.C., Semenov M.A., Wallach D., Wang E., Alderman P.D., Kassie B.T., Biernath C., Basso B., Cammarano D., Challinor A.J., Doltra J., Dumont B., Rezaei E.E., Gayler S., Kersebaum K.C., Kimball B.A., Koehler A.K., Liu B., O’Leary G.J., Olesen J.E., Ottman M.J., Priesack E., Reynolds M., Stratonovitch P., Streck T., Thorburn P.J., Waha K., Wall G.W., White J.W., Zhao Z. & Zhu Y., 2015. Crop model improvement reduces the uncertainty of the response to temperature of multi-model ensembles. *F. Crop. Res.* **202**, 5–20.
- Martín M.M., Olesen J.E. & Porter J.R., 2014. A genotype , environment and management ( GxExM ) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark. *Agric. For. Meteorol.* **187**(January 2015), 1–13.
- Mirschel W., Wieland R., Wenkel K.O., Nendel C. & Guddat C., 2014. YIELDSTAT - A spatial yield model for agricultural crops. *Eur. J. Agron.* **52**, 33–46.
- Mohammadi R., Farshadfar E. & Amri A., 2015. ScienceDirect Interpreting genotype × environment interactions for grain yield of rainfed durum wheat in Iran. *CJ* **3**(6), 526–535.

- Morell F.J., Yang H.S., Cassman K.G., Wart J. Van, Elmore R.W., Licht M., Coulter J.A., Ciampitti I.A., Pittelkow C.M., Brouder S.M., Thomison P., Lauer J., Graham C., Massey R. & Grassini P., 2016. Can crop simulation models be used to predict local to regional maize yields and total production in the U.S. Corn Belt? *F. Crop. Res.* **192**, 1–12.
- Moule C., 1971. *Phytotechnie spéciale, tome 2 : Céréales*, 98.
- Oehler F., Bordenave P. & Durand P., 2007. Variations of denitrification in a farming catchment area. *Agric. Ecosyst. Environ.* **120**(2–4), 313–324.
- Palosuo T., Kersebaum K.C., Angulo C., Hlavinka P., Moriondo M., Olesen J.E., Patil R.H., Ruget F., Rumbaur C., Takáč J., Trnka M., Bindi M., Çaldağ B., Ewert F., Ferrise R., Mirschel W., Şaylan L., Šiška B. & Rötter R., 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *Eur. J. Agron.* **35**(3), 103–114.
- Pameseb, 2017. Promotion de l'Agrométéorologie en Wallonie.
- Ritchie J.T., Gerakis A. & Suleiman A., 1999. Simple Model To Estimate Field-Measured Soilwater Limits. *Trans. ASAE* **42**(6), 1609–1614.
- Ritchie J.T. & Otter S., 1985. Description and performance of CERES-Wheat. a user-oriented wheat yield model. *Usda-Ars.Ars* **38**, 159–175.
- Robertson G.P. & Vitousek P.M., 2009. Nitrogen in Agriculture: Balancing the Cost of an Essential Resource. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **34**(1), 97–125.
- Rosenzweig C., Iglesias A., Yang X.B., Epstein P.R. & Chivian E., 2001. Climate change and extreme weather events **2**(2), 90–104.
- Rosillon D., 2017. Les projets : AGROMET.
- Semenov M.A., Jamieson P.D. & Martre P., 2007. Deconvoluting nitrogen use efficiency in wheat: A simulation study. *Eur. J. Agron.* **26**(3), 283–294.
- Senthilkumar S., Basso B., Kravchenko a. N. & Robertson G.P., 2009. Contemporary Evidence of Soil Carbon Loss in the U.S. Corn Belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **73**(6), 2078.
- Sexton J. & Everingham Y., 2016. A theoretical and real world evaluation of two Bayesian techniques for the calibration of variety parameters in a Sugarcane Crop Model, 45.
- Studnicki M., Wijata M., Sobczyński G., Samborski S., Gozdowski D. & Rozbicki J., 2016. Effect of genotype, environment and crop management on yield and quality traits in spring wheat. *J. Cereal Sci.* **72**, 30–37.
- Subira J., Álvaro F., García L.F. & Royo C., 2015. Breeding effects on the cultivar × environment interaction of durum wheat yield. *Eur. J. Agron.* **68**, 78–88.
- Sui B., Feng X., Tian G., Hu X., Shen Q. & Guo S., 2013. Optimizing nitrogen supply increases rice yield and nitrogen use efficiency by regulating yield formation factors. *F. Crop. Res.* **150**, 99–107.
- Suleiman a & Ritchie J.T., 2001. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity. *Trans. ASAE* **44**(1), 235–239.
- Touhami H. Ben, 2014. Calibration Bayésienne d'un modèle d'étude d'écosystème prairial : outils et

applications à l'échelle de l'Europe.

- Varella H., Guérif M. & Buis S., 2008. Global sensitivity analysis (gsa) measures the quality of parameter estimation. case of soil parameter estimation with a crop model. *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* **3**(1), 310–319.
- Vrugt J., Ter Braak J., Gupta H. V & Robinson Æ.B.A., 2008. Equifinality of formal ( DREAM ) and informal ( GLUE ) Bayesian approaches in hydrologic modeling, *Stoch Env. Res Risk Assess* 16.
- Waeyaert N., 2016. Chiffres clés de l'agriculture, 52.
- Wallach D., Buis S., Lecharpentier P., Bourges J., Clastre P., Launay M., Bergez J.E., Guerif M., Soudais J. & Justes E., 2011. A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environ. Model. Softw.* **26**(4), 386–394.
- Wallach D., Goffinet B., Bergez J.E., Debaeke P., Leenhardt D. & Aubertot J.N., 2001. Parameter estimation for crop models: A new approach and application to a corn model. *Agron. J.* **93**(4), 757–766.
- Wallach D., Makowski D. & Jones J.W., 2006. *Working with Dynamic Crop Models. Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 447.
- Wallach D., Makowski D., Jones J.W. & Brun F., 2014. *Working with Dynamic Crop Models*, Working with Dynamic Crop Models, 311-343.
- White I., Sully M.J. & Melville M.D., 1989. Use and Hydrological Robustness of Time-to-Incipient-Ponding. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **53**, 1343–1346.
- Yan W. & Hunt L. a, 2001. Interpretation of Genotype x Environment Interaction for Winter Wheat Yield in Ontario. *Crop Sci* **41**(1), 19–25.
- Yang X., Lu Y., Ding Y., Yin X., Raza S. & Tong Y., 2017. Optimising nitrogen fertilisation: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008–2014). *F. Crop. Res.* **206**, 1–10.
- Zhu Z.L. & Chen D.L., 2002. Nitrogen fertilizer use in China - Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* **63**(2–3), 117–127.

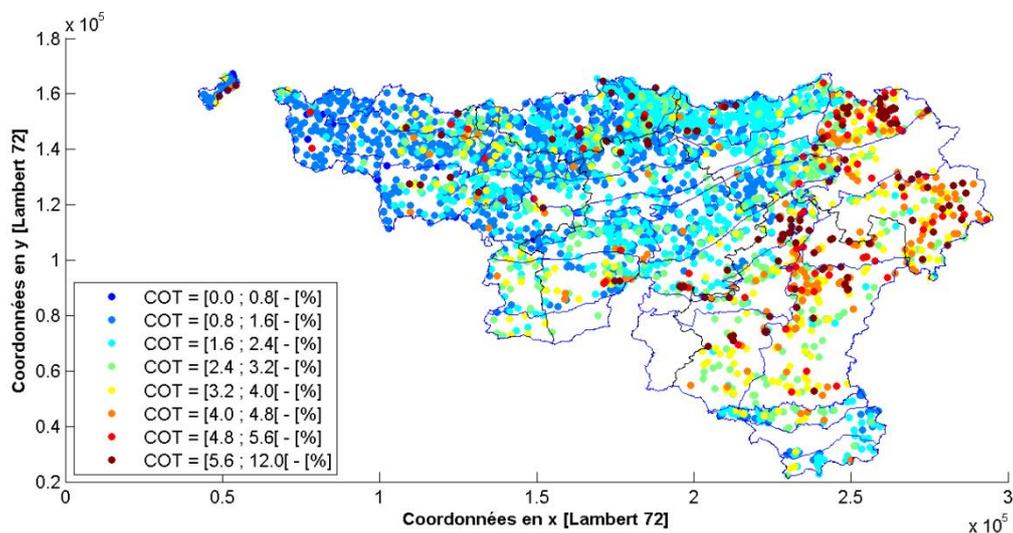
## 7 Annexe

### 7.1 Annexe 1

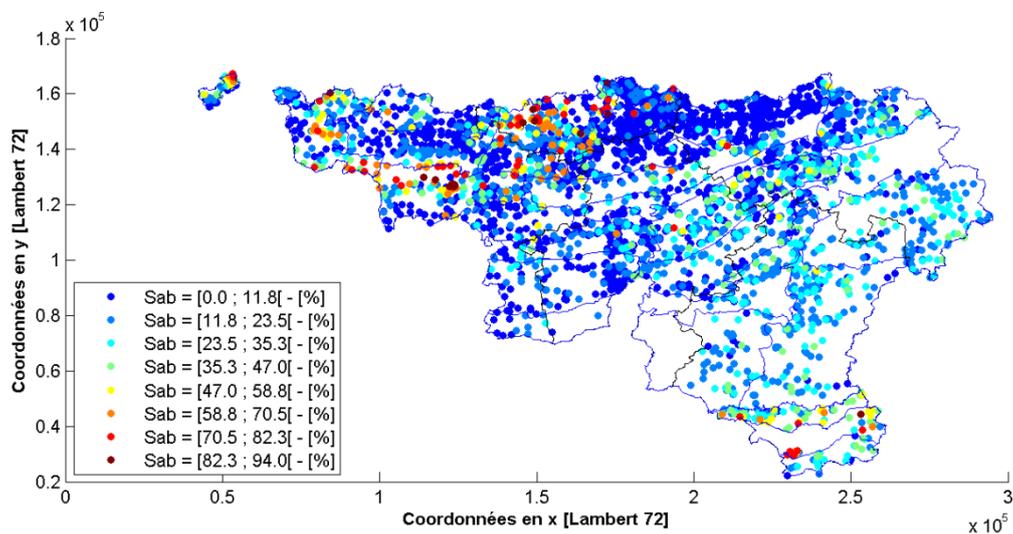
Les différents paramètres d'entrée du modèle de culture du sol '130EP003'

Horizon	Prof.	LL	DUL	SAT	SHF	KSat	BD	OC	Argile	Limon	TotN
1	28	0.16	0.30	0.48	1	0.59	1.37	1.4	12.9	81.1	0.12
2	60	0.21	0.35	0.48	0.58	0.23	1.38	0.5	21.9	75.3	0.04
3	105	0.19	0.33	0.47	0.31	0.29	1.41	0.3	17.4	78.7	0.03
4	135	0.20	0.33	0.47	0.12	0.25	1.41	0.3	17.0	79.7	0.03
5	160	0.22	0.36	0.47	0.04	0.17	1.39	0.3	20.7	77	0.03
6	200	0.20	0.34	0.47	0.01	0.23	1.41	0.2	18.0	78.8	0.02

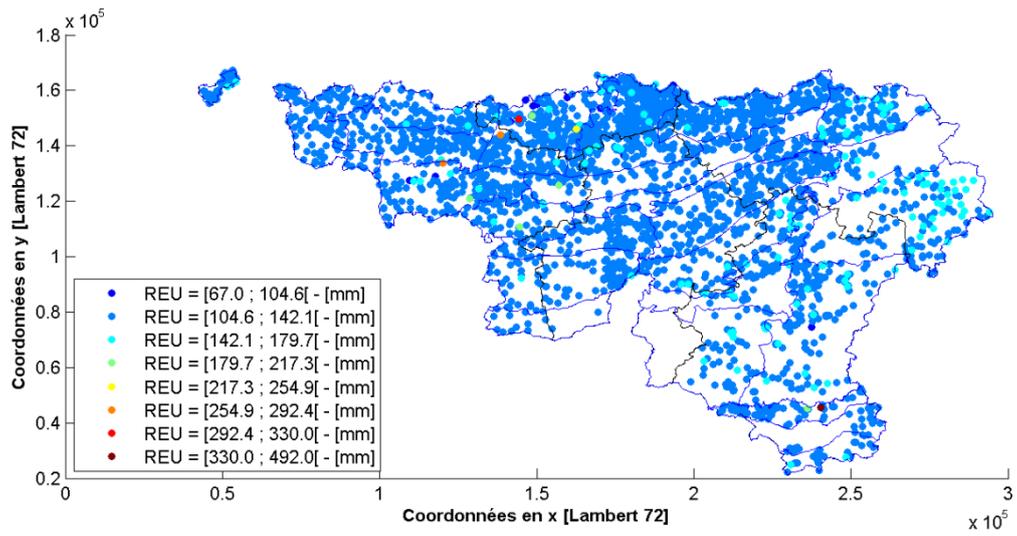
## 7.2 Annexe 2



Représentation des profils de sols en fonction de la teneur en carbone organique total du premier horizon



Représentation des profils de sols en fonction de la teneur en sable du premier horizon



**Représentation des profils de sols en fonction de la réserve en eau utile**

## 7.3 Annexe 3

Les différentes stations météo et leurs identifiants respectifs

Identifiant	Nom
33	Alleur
10	Amberloup
36	Casteau
4	Chassepierre
32	Couthuin
38	Esplechin
34	Feluy
14	Ferrières
15	Haut-le-Wastia
17	Jemelle
26	Leuze
1	Libramont
18	Ottignies
9	Michamps
7	Schockville
35	Seny
27	Sombreffe
37	Thuillies

## 7.4 Annexe 4

### Entrée du modèle de culture pour les différents horizons des sols

Variables	Unités
Type de sol	[-]
Limite inférieure du profil	[cm]
Teneur en eau au point de flétrissement	[cm <sup>3</sup> *cm <sup>-3</sup> ],
Teneur en eau à la capacité au champ	[cm <sup>3</sup> *cm <sup>-3</sup> ],
Conductivité hydrique à saturation	[cm*h <sup>-1</sup> ]
Soil Hospitality Factor	[-]
Densité apparente	[g*g <sup>-1</sup> ]
Teneur en Carbone organique total	[%]
Teneur en argile – limon - sable	[%]
Azote total	[%]
pH eau	[-]
pH KCl	[-]

### Entrée du modèle de culture pour les différentes stations météos

Variables	Unités
Année	[-]
Jour de l'année	[-]
Radiation solaire reçue	[Mj* m <sup>-2</sup> *day <sup>-1</sup> ]
Température maximale	[°C]
Température minimale	[°C]
Précipitations	[mm]

## 7.5 Annexe 5

Les différents paramètres du modèle de culture modifiés durant la phase de calibration

Paramètre	Explication	Gamme
LT50c	Température à laquelle la moitié de la population meurt	-
PhLow	Limite inférieure de la photopériode	[6-24]
KrPGR	Taux de remplissage journalier des grains à la température optimale	[0.001-0.1]
MxNVg	Concentration maximale en Azote dans les parties végétatives	[0.005-0.05]
MxNKr	Concentration maximale en Azote dans les grains	[0.005-0.05]
MnNMlt	Multiplicateur pour la concentration minimale en Azote	[0.4-1]
ToptP	Température optimale pour la photosynthèse	[10-30]
RUE	Efficacité de l'utilisation des rayonnements	-
LEsec	Equivalent feuille lorsque la première feuille commence sa senescence	[0-30]
Incsf	Facteur pour le taux journalier de senescence des feuilles	[0-1]
SLWmax	Poids maximal spécifique des feuilles	[0.001-0.01]

## 7.6 Annexe 6

Les différents paramètres du modèle de culture modifiés durant la phase de calibration

Paramètre	Valeur initiale	Valeur finale
LT50c	-28	-35
PhLow	8	6
KrPGR	0.0019	0.1
MxNVg	0.035	0.042
MxNKr	0.03	0.021
MnNMlt	0.6	0.65
ToptP	19	17.5
RUE	2.5	2.6
LEsec	2	2.5
Incsf	0.6	0.45
SLWmax	0.007	0.0067