

## Evaluation du potentiel d'optimisation des schémas de fertilisation azotée du froment d'hiver, sur base d'une approche modélisation, à l'échelle wallonne

**Auteur :** Verlinden, Arnaud

**Promoteur(s) :** Dumont, Benjamin; Lenoir, Arthur

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

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2021-2022

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/13878>

---

### *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.*

---

**ÉVALUATION DU POTENTIEL  
D'OPTIMISATION DES SCHÉMAS DE  
FERTILISATION AZOTÉE DU FROMENT  
D'HIVER, SUR BASE D'UNE APPROCHE  
MODÉLISATION, A L'ÉCHELLE  
TERRITORIALE WALLONNE**

**Arnaud VERLINDEN**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**Année académique 2021-2022**

**Co-Promoteurs :  
Prof. Benjamin Dumont  
Ir. Arthur Lenoir**



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.

---

1. Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT.

**ÉVALUATION DU POTENTIEL  
D'OPTIMISATION DES SCHÉMAS DE  
FERTILISATION AZOTÉE DU FROMENT  
D'HIVER, SUR BASE D'UNE APPROCHE  
MODÉLISATION, A L'ÉCHELLE  
TERRITORIALE WALLONNE**

**Arnaud VERLINDEN**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**Année académique 2021-2022**

**Co-Promoteurs :  
Prof. Benjamin Dumont  
Ir. Arthur Lenoir**

## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mes deux co-promoteurs qui m'ont soutenu tout au long de ce travail. Merci à Mr Benjamin Dumont pour ses précieux conseils et son expertise du modèle. Merci à Mr Arthur Lenoir pour tous les conseils de codage, sa disponibilité et ses relectures avisées. Je remercie également Mme Lassois, présidente du jury, Mr Meersmans, Mr Rosillon et Mr Weykmans, les lecteurs et membres du jury.

Je tiens ensuite à remercier le service de phytotechnie tempérée pour son accueil et notamment l'équipe de l'open space pour tous les moments intellectuels ou moins sérieux partagés pendant ce travail. Les discussions étaient toujours très intéressantes et enrichissantes.

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes avec lesquelles j'ai eu l'occasion de passer de magnifiques moments extrascolaires. Je pense aux personnes que j'ai côtoyé au kot 55 et ses invités présents chaque midi qui sont maintenant mes amis proches, au kot Cénob avec ce magnifique élevage et le kot Fouillis qui m'a accueilli pour ces dernières années à la Faculté. Je remercie aussi les membres de la commission Cinsî et de l'équipe soft pour tous les mazouts partagés.

Je remercie aussi ma famille qui m'a toujours soutenu durant toutes mes années d'étude et qui n'a jamais hésité à m'aider lorsque j'en avais besoin. Je pense particulièrement à mes parents qui ont toujours cru en moi malgré mes premières années compliquées. Je n'en serais pas ici sans eux.

Enfin, un grand merci à Pauline qui m'accompagne depuis plus de 5 ans maintenant. Nous nous sommes soutenus dans les moments les plus compliqués et nous arrivons maintenant en même temps à la ligne d'arrivée.

## Résumé

Les enjeux économiques et environnementaux autour de la fertilisation azotée étant nombreux, il est important que l'azote soit épandu de façon raisonnée sur les cultures et particulièrement sur le froment d'hiver qui est la première culture en Belgique. L'utilisation de la modélisation apporte un nouveau regard et permet d'être plus rapide et moins coûteuse que des expérimentations en champ. L'objectif de cette étude est de spatialiser le modèle STICS à l'échelle wallonne et de déterminer le potentiel d'optimisation des fertilisations azotées.

Le modèle a tout d'abord été calibré selon des observations venant de champs expérimentaux de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. La calibration a été réalisée en étapes successives sur la phénologie, le LAI, la constitution du rendement et l'azote dans la récolte pour un total de 20 paramètres. Ensuite, la spatialisation a été testée sur deux stations météorologiques du réseau Pameseb du Centre wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W) et associées à environ 600 sols venant de la base de données Aardewerk (CNSW). 8 modalités de fertilisation sur 25 années ont été testées. L'analyse de la variance a été effectuée et des tests SNK ont été réalisés afin de déterminer une fertilisation optimale en fonction du rendement et du reliquat azoté après récolte.

Les résultats de la calibration se sont montrés satisfaisants pour aborder l'étape de spatialisation du modèle. L'analyse de la variance a montré une très grande dépendance du rendement et du reliquat à la fertilisation apportée. La spatialisation à grande échelle ne permet pas d'obtenir un optimum de fertilisation pour tous les types de sol testés. Cependant, une démarche alternative a été de travailler chaque sol séparément. Ainsi, il a été possible de trouver une fertilisation conseillée pour les sols pris en exemple.

Mots-clés : fertilisation azotée, calibration, spatialisation, modèle STICS, froment d'hiver.

## Abstract

As there are many economic and environmental issues surrounding nitrogen fertilization, it is important that nitrogen is applied in a reasoned manner to crops and particularly on winter wheat, which is the leading crop in Belgium. The use of modelling provides a new perspective and makes it possible to be faster and less costly than field experiments. The objective of this study is to spatialize the STICS model at the Walloon scale and to determine the potential for optimising nitrogen fertilization.

The model was first calibrated according to observations from the experimental fields of the Gembloux Agro-Bio Tech faculty. The calibration was carried out in successive steps on phenology, LAI, yield constitution and nitrogen in the crop for a total of 20 parameters. Then, the spatialization was tested on two meteorological stations of the Pameseb network of the Walloon Agronomic Research Center (CRA-W) and associated with about 600 soils from the Aardewerk database (CNSW). 8 fertilization modalities over 25 years were tested. Analysis of variance was performed and SNK tests were carried out to determine an optimal fertilization according to yield and post-harvest nitrogen residue.

The results of the calibration were satisfactory for approaching the spatialization stage of the model. The analysis of variance showed a very high dependence of yield and residual of nitrogen on the fertilization applied. The large-scale spatialization does not allow to obtain an optimum fertilization for all the tested soil types. However, an alternative approach was to work each soil separately. In this way, it was possible to find a recommended fertilization for the soils taken as examples.

Keywords : nitrogen fertilization, calibration, spatialization, STICS model, winter wheat.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Revue bibliographique</b>	<b>2</b>
2.1	Froment d'hiver . . . . .	2
2.2	Intérêt du calcul de la NUE . . . . .	2
2.2.1	Amélioration génétique . . . . .	3
2.2.2	Fertilisation azotée . . . . .	3
2.2.3	État nutritionnel de la plante . . . . .	4
2.3	Spatialisation des apports d'azote . . . . .	4
2.3.1	Sols de Wallonie . . . . .	5
2.3.2	Les modèles de culture . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Matériel et méthodes</b>	<b>9</b>
3.1	Calcul des données d'entrée du modèle STICS . . . . .	9
3.1.1	Sélection des sols et calcul des fonctions de pédotransfert . . . . .	9
3.1.2	Données climatiques . . . . .	13
3.1.3	Fichiers d'initialisation azotée . . . . .	14
3.2	Spatialisation du modèle . . . . .	14
3.2.1	Lien entre les sols et les stations météorologiques . . . . .	14
3.2.2	Itinéraire technique cultural . . . . .	14
3.3	Le modèle STICS . . . . .	15
3.3.1	Présentation du modèle . . . . .	15
3.3.2	Modules de STICS . . . . .	16
3.4	Calibration . . . . .	21
3.4.1	Données disponibles pour la calibration . . . . .	21
3.4.2	Méthodes de calibration . . . . .	22
3.4.3	Critères d'évaluation de la calibration . . . . .	26
3.5	Tests statistiques et logiciel . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Résultats et discussions</b>	<b>29</b>
4.1	Résultats et discussions de la calibration du modèle . . . . .	29
4.2	Résultats et discussions de la spatialisation . . . . .	34
4.2.1	Rendements et reliquats selon les classes texturales . . . . .	34
4.2.2	Optimisation de la fertilisation à l'échelle d'un sol unique . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Annexes</b>	<b>50</b>
7.1	Annexe 1 : Liste des stations météorologiques utilisées . . . . .	50
7.2	Annexe 2 : Analyse statistique générale . . . . .	50
7.3	Annexe 3 : Résultats de l'analyse de la variance sur le rendement . . . . .	51
7.4	Annexe 4 : Résultats de l'analyse de la variance sur le reliquat azoté . . . . .	52

7.5	Annexe 5 : Reliquat azoté en fonction de la fertilisation et selon les textures sur la station d'Ottignies . . . . .	53
7.6	Annexe 6 : Reliquat azoté en fonction de la fertilisation et selon les textures sur la station de Sombreffe . . . . .	54
7.7	Annexe 7 : Analyse statistique sur les sols uniques . . . . .	55

## Table des figures

1	Principe de fonctionnement du modèle STICS adapté du site de l' <i>INRA</i> (2017).	7
2	Triangle textural des sols (LOGANATHAN 1987) . . . . .	12
3	Spatialisation des sols selon les stations météorologiques . . . . .	15
4	Principaux modules de STICS (BRISSEON et al. 2008). . . . .	16
5	Stades du modèle pour la culture de blé (BRISSEON et al. 2008). . . . .	17
6	Fonction de densité pour différentes cultures (BRISSEON et al. 2008). . . . .	19
7	Courbe de dilution et calcul de l'INN (BRISSEON et al. 2008) . . . . .	20
8	Graphiques des différentes variables avant les calibrations. . . . .	32
9	Graphiques des différentes variables après les calibrations. . . . .	33
10	Graphique de la distribution des résultats du rendement . . . . .	34
11	Rendement en fonction de la fertilisation et selon les textures sur la station d'Ottignies . . . . .	36
12	Rendement en fonction de la fertilisation et selon les textures sur la station de Sombrefe . . . . .	37

## Table des tableaux

1	Données disponibles dans la base de données Aardewerk . . . . .	9
2	Tri des sols sur la base de données . . . . .	10
3	Méthode de calcul du contenu en calcaire . . . . .	11
4	Méthode de calcul de $q_0$ . . . . .	11
5	Méthode de calcul de l'albédo du sol . . . . .	11
6	Méthode de calcul des horizons . . . . .	12
7	Classement des sols wallons dans le triangle textural . . . . .	13
8	Données météorologiques selon le formalisme de STICS . . . . .	13
9	Modalités d'azote appliquées . . . . .	15
10	Valeur de la grandeur EBMAX selon le stade de la culture . . . . .	19
11	Modalités testées lors des essais . . . . .	22
12	Dates issues de l'itinéraire technique . . . . .	22
13	Paramètres optimisés lors de la calibration phénologique . . . . .	24
14	Paramètres optimisés lors de la calibration du LAI . . . . .	24
15	Paramètres optimisés lors de la calibration de la biomasse au-dessus du sol . . . . .	25
16	Paramètres optimisés lors de la calibration du nombre de grains . . . . .	25
17	Paramètres optimisés lors de la calibration du de la biomasse récoltée . . . . .	26
18	Paramètres optimisés lors de la calibration de l'azote . . . . .	26
19	Résultats de la calibration sur les paramètres testés. . . . .	29
20	Valeurs des critères d'évaluation du modèle. . . . .	30
21	Résultats des tests SNK pour la station d'Ottignies . . . . .	40
22	Résultats des tests SNK pour la station de Sombreffe . . . . .	41
23	Résultats des tests SNK sur le sol utilisé lors de la calibration. . . . .	42
24	Résultats des tests SNK sur un sol de la région d'Ottignies. . . . .	43

# 1 Introduction Générale

Dans le monde, la Nitrogen Use Efficiency (NUE) qui est le rapport entre l'azote exporté à la récolte et l'azote apporté par la fertilisation n'est que de 33% pour les céréales et de 50-55% en considérant toutes les cultures (BRENTROP et PALLIERE 2010; RAUN et JOHNSON 1999). Cela signifie que la moitié de l'azote apporté aux cultures ne s'y retrouve pas au final. Plus de 50% de l'azote apporté est donc perdu et à l'heure où les prix des fertilisants ont sensiblement augmenté, il devient nécessaire de pouvoir augmenter ce chiffre. De plus, l'azote perdu se retrouve dans la nature et cause de graves problèmes environnementaux avec de l'eutrophisation des milieux, de la pollution des eaux souterraines,... Des valeurs de NUE entre 70 et 80% sont préférables afin de limiter les risques de perte d'azote et de pertes des qualités nutritionnelles du sol. En effet, des valeurs trop hautes (au-dessus de 90%) sont aussi dévalorisantes car les sols seraient vidés de leurs nutriments et les plantes n'auraient pas une croissance optimale.

Le développement des modèles de culture et l'augmentation des puissances de calcul des ordinateurs permettent maintenant de pouvoir prédire les rendements actuels mais aussi dans un futur plus ou moins proche. Ces variations sont étudiées selon des adaptations des techniques culturales existantes mais aussi selon les variations du changement climatique qui sont à attendre dans le futur. De plus, les modèles écophysologiques permettent de mettre en place des outils d'aide à la décision et conseiller les agriculteurs sur les opérations à exécuter dans leurs parcelles. Les modèles permettent également d'être plus rapide que l'expérimentation en champ et de tester plus de paramètres en même temps. Ces modèles ont déjà montré que la culture du froment subira de plus en plus de stress avec l'augmentation des températures et les rendements seront impactés négativement (M. SEMENOV et al. 2014). De plus, les saisons culturales ont diminué d'approximativement 4 jours par décennie depuis 1947 ce qui signifie que les cultures doivent être adaptées (GOBIN 2018). Enfin, des tests peuvent être réalisés par la modélisation pour accompagner les recherches génétiques.

La fertilisation azotée est largement travaillée dans le monde à l'échelle de quelques parcelles (BLACKSHAW 2004; DUMONT, BASSO, BODSON et al. 2016; LITKE, GAILE et RUŽA 2018; LIU et SHI 2013) mais un travail à une échelle plus grande est moins fréquemment réalisé. Dans ce cadre, le but du présent travail est de spatialiser le modèle écophysologique STICS à l'échelle de la Wallonie afin de pouvoir optimiser le fractionnement de l'azote en fonction de la situation géographique et du type de sol. La calibration du modèle sera réalisée sur base d'observations en champ et les limites de la spatialisation seront discutées.

## 2 Revue bibliographique

### 2.1 Froment d'hiver

#### Description de la plante

Le froment d'hiver ou blé tendre (*Triticum aestivum* L.) est une espèce appartenant à la famille des Poacées. Cette céréale est la deuxième la plus produite avec 765 millions de tonnes dans le monde après le maïs (1.150 millions de tonnes) et devant le riz (755 millions de tonnes) (FAO 2019). Les grains de céréales sont utilisés pour la consommation humaine et animale, des produits industriels ou pour la production de bioéthanol (STUDNICKI et al. 2016). En 2019, le froment d'hiver couvrait 13% de la superficie agricole belge pour une production de 1.8 millions de tonnes (WAEYAERT 2020).

Dans la culture du froment d'hiver, il est nécessaire d'avoir une succession de jours courts et froids pour initialiser la vernalisation de la plante. Cette vernalisation permettra d'activer par la suite la mise en place des organes reproducteurs. Cela n'est pas le cas chez le froment de printemps qui n'a pas besoin de cet effet de vernalisation et qui est donc planté au printemps et récolté la même année. Le froment d'hiver, quant à lui, est semé lors de l'automne de l'année précédant l'année de récolte (TAULEMESSE 2015). La date idéale se situe entre le 15 octobre et le début du mois de novembre. Avant ces dates, les maladies seront plus propices à se développer si des bonnes conditions sont présentes et après, les préparations de sol pourront s'en retrouver compliquées à cause de l'humidité et les températures basses (*Livre Blanc Céréales* 2021).

Afin de mesurer la croissance de la culture, une échelle a été développée selon 10 stades majeurs et au sein de ces stades, des stades intermédiaires sont possibles selon les cultures (ZADOKS, CHANG et KONZAK 1974). L'échelle classiquement utilisée est l'échelle BBCH des céréales qui est dérivée de l'échelle créée par Zadoks (LANCASHIRE et al. 1991 ; WITZENBERGER, HACK et BOOM 1989).

### 2.2 Intérêt du calcul de la NUE

La NUE est un critère agro-environnemental qui peut être calculé globalement et pour le monde entier. C'est une valeur qui peut être comparée entre les cultures et entre les pays afin de connaître l'efficacité des différentes techniques culturales. La valeur de la NUE dépend de deux critères : l'azote exporté par la récolte et l'azote épandu pour la fertilisation.

En 2000, il a été estimé que l'agriculture européenne a utilisé entre 23.3 et 25.7 millions de tonnes d'azote et seulement 11.3 à 15.4 millions de tonnes ont été prélevées par les plantes. Cela crée un pool de 10.4 à 13.2 millions de tonnes qui est resté dans les sols ou a été simplement perdu. Cet azote est perdu par des émissions de  $N_2O$  et  $NO_x$  dans l'atmosphère, sous forme de  $NO_3$  par la lixiviation et par un écoulement de l'azote directement en surface (de VRIES et al. 2011). Dans le monde, la NUE moyenne est aux alentours de 50% (BRENTROP et PALLIERE 2010). Cela signifie qu'un agriculteur investissant dans les fertilisations azotées perd environ 50% de son investissement directement par les émissions et lixiviations mais aussi indirectement par une diminution potentielle du rendement de la culture et donc de son chiffre

d'affaires.

Il est donc nécessaire d'augmenter la NUE pour minimiser les pertes économiques et les pollutions environnementales (RAUN et SCHEPERS 2008). Pour augmenter ce rapport, il faut donc travailler soit sur l'augmentation de l'export de l'azote à la récolte soit sur la diminution de la fertilisation. La génétique de la plante, les techniques de fertilisation, les itinéraires techniques et l'état nutritionnel de la plante sont des points ayant été largement étudiés et permettant d'améliorer les deux critères de l'équation de la NUE.

### 2.2.1 Amélioration génétique

Tout d'abord, les variétés actuelles sont bien plus stables au niveau des rendements que les variétés dites anciennes. Le gain constaté sur le rendement en 25 années est de 0.45%/année. La quantité d'azote dans le grain a été augmentée de 0.39%/année et la quantité d'azote dans la paille a, de son côté diminué de 0.52%/année. On peut donc supposer que le travail génétique a été poussé afin de travailler la remobilisation de l'azote dans la plante et ainsi favoriser le taux de protéine dans la récolte (CORMIER et al. 2013). De plus, si la part d'azote prélevée par la plante augmente, la NUE est améliorée.

### 2.2.2 Fertilisation azotée

Avant de proposer une fertilisation sur une culture, il convient de connaître l'état azoté de son sol. VANDENBERGHE et al. (2013) ont proposé une évaluation de l'azote potentiellement lessivable (APL) sur plusieurs cultures afin d'établir des valeurs de référence. Ces valeurs sont très dépendantes des conditions météorologiques de l'année mais aussi de la culture en place. Par exemple, les cultures de légumes valorisent moins bien l'azote qui se situe en profondeur car ils n'ont pas les racines pour aller le chercher. Grâce à ces valeurs identifiées, les agriculteurs peuvent modifier leurs apports en azote pour la saison. L'utilisation de modèles a permis de mettre en évidence la même réponse aux cultures et aux années (JÉGO, SÁNCHEZ-PÉREZ et JUSTES 2012).

Ensuite, un travail important a été réalisé sur les apports azotés. Alors que la fraction recommandée pour la Wallonie en 1984 était de 130 kg N/ha pour une production d'environ 7 t/ha, elle est aujourd'hui de 185 kg N/ha et une production moyenne d'environ 9 t/ha (*Livre Blanc Céréales* 2021). Cette dose appliquée en Belgique permet d'atteindre plus fréquemment un rendement supérieur aux moyennes attendues (DUMONT, BASSO, LEEMANS et al. 2015).

Par contre, les moments d'application n'ont pas été modifiés depuis : ils sont toujours au moment du tallage (BBCH 23), du redressement (BBCH 30) et de la dernière feuille (BBCH 39) si le fractionnement compte 3 apports. Concernant un apport en 2 fractions, celles-ci seront faites au stade intermédiaire tallage-redressement (BBCH 29) et au stade de dernière feuille (BBCH 39). Habituellement, les différentes fractions apportent une quantité équivalente d'azote mais il arrive que selon les conditions, un des apports soit modifié pour mieux correspondre aux spécificités de l'année. Par exemple, la troisième dose apportée au stade BBCH 39 pourrait régulièrement être diminuée dans un intérêt agronomique mais aussi environnemental (DUMONT,

BASSO, BODSON et al. 2016).

En plus des dates, les méthodes d'application de l'azote ont aussi été testées. Plusieurs formats d'azote sont disponibles à la vente pour les agriculteurs (azote en solution liquide, en billes...). Une étude au Canada (BLACKSHAW 2004) s'est intéressée à l'importance du placement de l'azote auprès de la plante. Elle a démontré qu'une application de l'azote dans le sol (10cm) est préférable à une application sur le sol. Cela a favorisé l'absorption de l'azote par le froment et non par des adventices qui ont un système racinaire plus superficiel. L'application avec précision permet aussi d'augmenter les rendements de la culture tout en diminuant la quantité appliquée sur la parcelle.

### 2.2.3 État nutritionnel de la plante

L'état nutritionnel de la plante et principalement l'état azoté de la plante se définit avec l'INN : l'indice de nutrition azotée qui est le rapport entre l'absorption réelle d'azote et l'absorption critique de l'azote (équation 1) (LEMAIRE, JEUFFROY et GASTAL 2008).

$$INN = \frac{N_a}{N_c} \quad (1)$$

Autour de 1, l'INN indique que la plante a une bonne disponibilité de l'azote et n'est pas stressée. Au-dessus de 1, la plante a une consommation dite de luxe et en-dessous de 1, la plante n'a pas assez d'azote à sa disposition pour être en croissance optimale. Cette mesure est assez représentative de l'état de la culture et peut être utilisée dans des expériences mais est trop compliquée à mettre en place pour des agriculteurs. En outre, cette technique est destructive car il faut prélever des plants dans la parcelle. D'autres techniques plus simples à mettre en place et non destructrices ont donc été mises en place. Des essais avec des images prises par drone ont été concluants pour déterminer l'INN à plusieurs stades de croissance de la culture (ARANGUREN, CASTELLÓN et AIZPURUA 2020). La même étude a aussi travaillé sur des capteurs manuels permettant de mesurer le NDVI<sup>2</sup>. Il est ainsi possible d'estimer le rendement de la parcelle lorsque le passage du capteur est réalisé à des stades précis de la culture.

## 2.3 Spatialisation des apports d'azote

Au sein d'une même parcelle, les variabilités peuvent être assez importantes. Plusieurs travaux ont pu évaluer la surface minimale qu'il fallait considérer pour pouvoir évaluer la spatialisation des apports d'azote. La taille idéale de la résolution à adapter varie entre 1m et 3.7m si les mesures de NDVI sont réalisées avec des outils manuels alors qu'une résolution de 30m est suffisante lorsque des images satellites sont utilisées (CRAIN, WALDSCHMIDT et RAUN 2013; KUMHÁLOVÁ, NOVÁK et MADARAS 2018; TUBAÑA et al. 2008). Cette résolution satellitaire étant la plus petite disponible. Des différences importantes de rendement ont été trouvées dans des surfaces de moins de 1m<sup>2</sup> ce qui explique l'utilisation d'une résolution aussi fine (CRAIN, WALDSCHMIDT et RAUN 2013). Néanmoins, dans l'étude de TUBAÑA et al. (2008), les surfaces qui ont le mieux valorisé l'azote sont les surfaces de 13.4m<sup>2</sup> avec une NUE plus grande que les autres dimensions testées (0.84m<sup>2</sup> et 26.8m<sup>2</sup>). La spatialisation de la fertilisation par un modèle

---

2. Le NDVI est un indice de végétation normalisé permettant d'estimer la biomasse relative.



a également pu être testée (GUÉRIF et al. 2007) mais, pour des types de sol assez proches, le gain économique n'est pas présent.

### 2.3.1 Sols de Wallonie

Pour effectuer une spatialisation, une base de données de sols doit être disponible. En Belgique, ce travail a été réalisé pour proposer une carte des sols au 1/20000. Ce fut d'ailleurs un des premiers pays au monde à proposer ce type de carte et à une échelle aussi précise. Cela a été possible grâce à un travail de prélèvement d'échantillons étalé sur plusieurs dizaines d'années. C'est ainsi plus de 6.000.000 échantillons qui ont été récoltés et analysés afin de proposer une carte détaillée de la Belgique afin d'améliorer les pratiques agricoles (LEGRAIN et al. 2011). De ce travail est née la base de données Aardewerk qui est disponible pour différents travaux. Ces données ont ensuite été numérisées afin de créer la Carte Numérique des Sols de Wallonie.

Si l'on passe en revue l'état de santé de sol, celui-ci est à la baisse. En effet, le taux de carbone organique total (COT) est en diminution depuis plusieurs années et on estime qu'il a diminué de 10% entre 1947 et 2004 (GENOT et al. 2009). Selon une autre étude, le COT aurait même diminué de 20% sur la période 1949-1972 (VINCENT et al. 2019). Pour la période 2004-2014, les sols wallons affichaient un COT de 1.3%. Les pertes annoncées sont à relativiser car certaines régions agricoles se portent mieux que d'autres. Les régions où les cultures de rente sont majoritaires voient une augmentation du COT alors que les régions plus herbagères voient plutôt une perte prononcée du carbone présent dans le sol. Grâce à cette augmentation du COT, la Belgique se classe parmi les plus hauts rendements de l'Europe (au-delà de 7.4 t/ha) pour le froment d'hiver avec les Pays-Bas et l'Irlande (SCHILS et al. 2018). Cela est aussi valable pour la culture d'orge (au-delà de 6.3 t/ha) et le maïs sans irrigation (au-delà de 10t/ha).

### 2.3.2 Les modèles de culture

#### Généralités sur les modèles de culture

La culture du froment est la culture la plus modélisée dans le monde avec plus de 40 modèles différents disponibles. Viennent ensuite les cultures de maïs, de riz et de soja. De plus, ce sont principalement les États-Unis et l'Europe qui travaillent le développement des modèles (WHITE et al. 2011). Parmi ces modèles, certains ne sont destinés qu'à la culture du froment comme CERES-Wheat (RITCHIE J.T. 1984; SINGH, TRIPATHY et CHOPRA 2008) ou ARCWHEAT (WEIR et al. 1984) mais d'autres sont adaptés à plusieurs cultures comme SALUS (BASSO, CAMMARANO et al. 2009; BASSO et RITCHIE 2005), STICS (BRISSEON et al. 2008) ou DAISY (HANSEN 2002).

#### Utilité des modèles écophysiologiques

En général, l'intérêt de l'utilisation de modèles réside dans leur rapidité d'exécution. En quelques secondes, les résultats d'une année d'expérimentation sont disponibles. De plus, reproduire exactement les mêmes conditions d'une année à l'autre est très compliqué dans la pratique du terrain alors qu'avec un modèle, cela devient très simple et ils sont en plus peu coûteux (FRY et al. 2017; M. A. SEMENOV, JAMIESON et MARTRE 2007). Plusieurs recherches ont également eu lieu pour combiner plusieurs modèles de culture. Chaque modèle étant construit selon différents principes, les résultats peuvent être différents. Il a donc été prouvé qu'un ensemble de modèles performe mieux qu'un modèle unique pour une situation sur laquelle le modèle n'a

pas été spécifiquement calibré. Cette meilleure performance est due à un spectre plus large de travail et de possibilités rencontrés que ce qu'un seul modèle peut rencontrer. De plus, en utilisant un ensemble de modèles, il est possible de déterminer de nouveaux critères qui sont plus fiables (MARTRE et al. 2015). L'utilisation de modèles écophysologiques peut aussi aboutir à la création d'outils d'aide à la décision (OAD) (DUMONT, VANCUTSEM et al. 2012). Grâce à de multiples simulations, il sera possible d'anticiper les besoins de la plante en fonction de différents scénarios envisagés. Il est donc possible de développer un outil puissant qui pourra intégrer différents aspects tels que des critères agronomiques, économiques et environnementaux pour optimiser au mieux les fertilisations (DUMONT, BASSO, DESTAIN et al. 2018).

### **Fonctionnement du modèle STICS**

STICS est un modèle reconnu pour sa robustesse et qui a été testé sur de nombreux terrains et cultures différentes à travers le monde. Il compte en plus une communauté de travail importante avec, depuis 2014, un réseau scientifique et est coordonné par une équipe multidisciplinaire. STICS permet de simuler le comportement d'un système de culture avec comme limite supérieure, l'atmosphère et comme limite inférieure, l'interface entre le sol et le sous-sol. Le sol est divisé en couches horizontales avec leurs propres caractéristiques techniques. Le sol interagit avec la plante via les racines et leur distribution dans les couches du sol (BRISSON et al. 2008).

Comme le résume la figure 1, STICS fonctionne avec plusieurs fichiers d'entrée et simule avec un pas de temps journalier différentes variables qui vont régir la croissance de la plante. Plusieurs modules vont travailler en parallèle dont le plus important est celui du développement phénologique car il contrôle les forces des puits et des sources et cela pilote largement la croissance de la culture. D'autres modules pourront ajouter des stress qui auront été créés selon les conditions météorologiques ou à une carence en un élément. A la fin de la simulation, STICS fournit des données agronomiques comme le rendement, la quantité d'azote dans le grain permettant de connaître le contenu en protéines ou encore le poids de mille grains (PMG) mais aussi des sorties permettant de réaliser un bilan plutôt environnemental comme la lixiviation des nitrates ou les émissions de  $N_2O$  (INRA 2017).

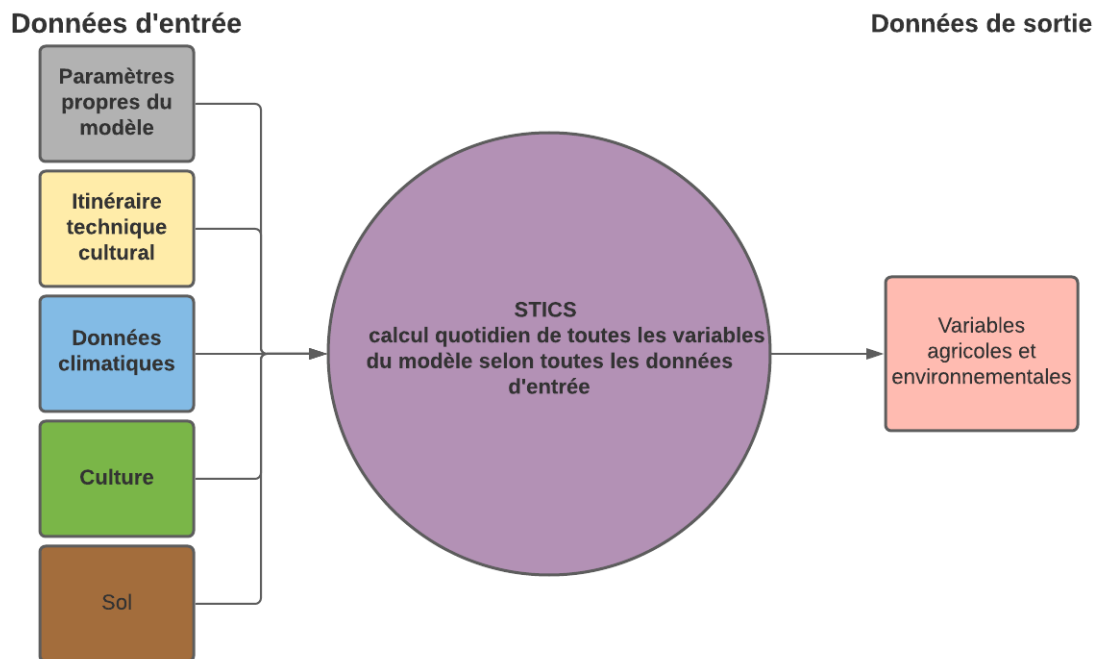


FIGURE 1 – Principe de fonctionnement du modèle STICS adapté du site de l'INRA (2017).

### Calibration et validation d'un modèle

Pour être efficient sur un territoire et sur une plante donnée, il est quasiment obligatoire d'effectuer une calibration du modèle. Le but de la calibration est d'estimer au mieux les paramètres du modèle selon des observations pour que le modèle donne les résultats les plus proches de la réalité. Il faut savoir que la calibration minimise l'erreur de prédiction pour les données utilisées lors de la calibration, il n'est pas certain que les paramètres identifiés soient pertinents pour d'autres populations (WALLACH 2011).

L'utilisation d'un modèle sans calibration ou sans une légère calibration peut entraîner des erreurs sur les données simulées et sur les travaux en découlant (PALOSUO et al. 2011 ; RÖTTER et al. 2012). Selon les deux mêmes études, il est nécessaire de réaliser une calibration spécifique à la région étudiée pour garantir la validité des résultats.

Plusieurs recommandations ont récemment été proposées par WALLACH, PALOSUO et al. (2021) pour optimiser le travail des chercheurs et obtenir une démarche globale. L'utilisation d'un algorithme de type simplex est recommandée, le choix des paramètres à optimiser doit être réalisé selon la construction et la connaissance du modèle, la fiabilité des données observées...

Différentes méthodes de calibration sont possibles selon la configuration de travail et la disponibilité des données. La méthode fréquentiste est une méthode où un set unique de paramètres optimisés donnera les valeurs simulées les plus proches de la réalité tout en minimisant des critères statistiques. Au sein de cette méthode, trois techniques sont utilisées (DUMONT, VANCUTSEM et al. 2012) :

- Rassembler des données issues de la littérature et ajuster les paramètres restants selon un traitement statistique,
- Choisir successivement des paramètres amenant à un meilleur ajustement du modèle selon une régression statistique,

- Réaliser une analyse de sensibilité des paramètres influençant le plus les réponses du modèle.

La méthode fréquentiste est régulièrement utilisée lorsque les paramètres à estimer sont peu nombreux et les observations assez nombreuses. Il est toujours utile de connaître les valeurs approximatives des paramètres optimisés afin de reconnaître une valeur correcte ou plutôt aberrante.

Une méthode alternative est la méthode bayésienne qui se popularise grandement grâce à l'évolution des puissances de calcul des ordinateurs. En effet, cette méthode fonctionne en deux temps. Premièrement, une distribution à priori du paramètre est établie. Ensuite, la distribution est améliorée selon les observations réalisées sur le terrain et par le théorème de Bayes. Cette méthode est utile lorsque beaucoup de paramètres sont à optimiser et lorsque peu de données sont disponibles.

Après avoir calibré un paramètre, il est important de déterminer par des critères statistiques si la nouvelle valeur améliore les simulations. Pour cela, des analyses des erreurs résiduelles sont pratiquées entre les observations et les simulations. Des critères simples comme le biais peuvent être utilisés mais peuvent être erronés si des grandes valeurs opposées se compensent. Un critère gommant cet effet est la racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE). Il s'exprime dans les mêmes unités que la variable observée facilitant ainsi les discussions. D'autres critères comme l'efficacité du modèle et la déviation normale ont été cités par DUMONT, VANCUTSEM et al. (2012) et WALLACH, MAKOWSKI et al. (2006).

Lorsque les paramètres ont été calibrés et ont amélioré statistiquement le modèle, il est important de les valider sur un jeu de données totalement indépendant des observations utilisées jusque là.

## 3 Matériel et méthodes

### 3.1 Calcul des données d'entrée du modèle STICS

#### 3.1.1 Sélection des sols et calcul des fonctions de pédotransfert

##### Tri préliminaire des sols

La base de données Aardewerk a été utilisée pour référencer les sols utiles à ce travail. Les données disponibles ont dû être adaptées à l'utilisation du modèle et les sols ont été triés selon différents critères et mis en forme pour correspondre au modèle d'entrée de STICS.

Les données pédologiques disponibles pour chaque horizon de chaque sol dans cette base de données sont spécifiées dans le tableau 1. Chaque sol a été découpé en différents horizons selon les échantillons de sol qui ont été réalisés.

Tableau 1 – Données disponibles dans la base de données Aardewerk

Nom	Unité
Limite supérieure de l'horizon	[cm]
Limite inférieure de l'horizon	[cm]
Argile	[%]
Limon	[%]
Sable	[%]
pH KCl	[/]
pH H2O	[/]
Carbone organique total	[%]

Les sols ont tout d'abord été sélectionnés selon leur occupation : les terres arables, les prairies temporaires, les prairies permanentes et les prairies de fauche qui peuvent être éventuellement transformées en terres arables. Dans ces sols, sont aussi repris les plantations fruitières à basse tige, les pépinières et les prés-vergers mais il est impossible d'en faire la distinction. Tous les sols sélectionnés sont ceux qui sont déjà utilisés en agriculture ou qui pourraient en avoir le potentiel.

Ensuite, les sols dont le carbone organique total (COT) n'était pas disponible dans le premier horizon n'ont pas été retenus. Si le COT n'était pas disponible pour un autre horizon, il a été imposé à 0,1. Les sols dont les données du premier horizon n'étaient pas présentes ont également été retirés de la base de données car c'est un horizon très important pour déterminer la croissance de la plante. Les sols dont l'épaisseur totale était de moins de 50 cm ont aussi été supprimés. Concernant les sols trop profonds ou ceux dont la profondeur du dernier horizon est inconnue, elle a été fixée à 200 cm. Toutes ces modifications sont résumées dans le tableau 2.

##### Calcul des données de sol selon les fonctions de pédotransfert

Le calcul de la densité apparente du sol a été fait selon l'équation de pédotransfert de BERNOUX et al. 1998 :

$$BD = 1.524 - 0.0046 * \text{clay} - 0.051 * \text{COT} - 0.0045 * pH + 0.001 * \text{sand} \quad (2)$$

Tableau 2 – Tri des sols sur la base de données

Données	Problème possible	Solution
Occupation du sol	Non conforme	Suppression du sol
Premier horizon	Aucune information	Suppression du sol
COT	Non disponible pour le premier horizon	Suppression du sol
COT	Non disponible pour un horizon autre que le premier	COT de l'horizon fixé à 0.1
Profondeur du sol	Inférieure à 50 cm	Suppression du sol
Profondeur du sol	Supérieure à 200 cm ou inconnue	Profondeur de l'horizon fixée à 200 cm

avec :

- BD : la densité apparente [ $g * cm^{-3}$ ],
- clay : la teneur en argile du sol [%],
- COT : le carbone organique total [%],
- pH : le pH du sol [/],
- sand : la teneur en sable du sol [%].

Les teneurs en eau à la capacité au champ (FC) et au point de flétrissement (WP) ont été calculées selon les équations de pédotransfert du package de RStudio, euptf2 (SZABÓ, WEYNANTS et WEBER 2021) en utilisant l'équation 2 (PTF02) dans les deux cas. Cette équation a comme données d'entrée : la texture, la profondeur moyenne de l'horizon et le contenu en carbone organique. Cependant, WP a été ajusté selon le maximum entre 0,01 et la valeur calculée (équation 3).

$$WP = \max \{ \text{valeur calculée dans euptf2}, 0,01 \} \quad (3)$$

Les valeurs calculées par les équations du package étant en  $cm^3/cm^3$ , elles doivent être divisées une première fois par la densité apparente du sol. Ensuite, il est possible de calculer les véritables données d'entrée du modèle qui sont les valeurs de microporosité HCCF (humidité à la capacité au champ de l'horizon) et HMINF (humidité au point de flétrissement de l'horizon) qui sont estimées selon les équations suivantes :

$$HCCF = \frac{FC}{BD} \quad (4)$$

$$HMINF = \frac{WP}{BD} \quad (5)$$

avec :

- HCCF : l'humidité à la capacité au champ [ $g * g^{-1}$ ],
- FC : la teneur en eau à la capacité au champ [ $g * cm^{-3}$ ],
- BD : la densité apparente [ $g * cm^{-3}$ ],
- HMINF : point de flétrissement [ $g * g^{-1}$ ],

— WP : teneur en eau au point de flétrissement [ $g * cm^{-3}$ ].

L'azote organique contenu dans le sol est calculé selon l'équation suivante :

$$N = COT * \frac{0.05}{0.58} \quad (6)$$

avec :

- N : l'azote organique [%],
- COT : le contenu en carbone organique total [%].

Le contenu en calcaire [%] du premier horizon est estimé selon les pourcentages en argile et en limon du premier horizon du sol dans le tableau 3 (RICHARD et CELLIER 1998).

Tableau 3 – Méthode de calcul du contenu en calcaire

Argile $\leq 8$ et limon $\leq 30$	Calcaire = 9
$24 \leq$ Argile et limon $\leq 47$	Calcaire = 7
Autres situations	Calcaire = 3

La limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol  $q_0$  [mm] est calculée selon le pourcentage d'argile dans le sol et pour le premier horizon dans le tableau 4 (RITCHIE 1972).

Tableau 4 – Méthode de calcul de  $q_0$

Argile $< 5$	$q_0 = 6$
$5 \leq$ Argile $< 25$	$q_0 = 9$
$25 \leq$ Argile $< 45$	$q_0 = 12$
$45 \leq$ Argile	$q_0 = 6$

Enfin, l'albédo du sol [/] est calculé selon la teneur en argile et la teneur en limon, pour le premier horizon uniquement, et est présenté dans le tableau 5 (RICHARD et CELLIER 1998).

Tableau 5 – Méthode de calcul de l'albédo du sol

Argile $\leq 8$ et limon $\leq 20$	Albedo = 0.25
$24 \leq$ Argile et limon $\leq 47$	Albedo = 0.18
$12 \leq$ Argile et $79 \leq$ limon	Albedo = 0.22
Argile $\leq 16$ et limon $\leq 76$	Albedo = 0.23
$23 \leq$ Argile et limon $\leq 72$	Albedo = 0.22
Dans les autres situations	Albedo = 0.22

### Calcul des horizons

Le modèle STICS n'acceptant que cinq horizons au maximum, il convient de regrouper les horizons des sols qui en comptent plus. En-dessous de cinq horizons, il n'est pas nécessaire de réaliser des modifications. La technique de calcul est présentée dans le tableau 6. Les horizons qui ont été modifiés ont été pondérés selon leur épaisseur afin de garder une valeur plus représentative du sol de départ. Ce choix de regroupement a été effectué afin de garder au maximum les horizons de surface qui seront les plus influents pour la croissance de la culture.

Tableau 6 – Méthode de calcul des horizons

10 horizons	1 = (1+2), 2 = (3+4), 3 = (5+6), 4 = (7+8), 5 = (9+10)
9 horizons	1 = 1, 2 = (2+3), 3 = (4+5), 4 = (6+7), 5 = (8+9)
8 horizons	1 = 1, 2 = 2, 3 = (3+4), 4 = (5+6), 5 = (7+8)
7 horizons	1 = 1, 2 = 2, 3 = 3, 4 = (4+5), 5 = (6+7)
6 horizons	1 = 1, 2 = 2, 3 = 3, 4 = 4, 5 = (5+6)

### Texture du sol

Enfin, la texture du sol a été calculée selon le système de classification de la FAO (LOGANATHAN 1987). Les sols ont été classés dans le triangle textural (Figure 2) et les résultats se retrouvent dans le tableau 7. Les sols fin limoneux représentent à eux seuls plus de 70% de l'échantillon c'est-à-dire près de 2800 sols sur les 4000 repris alors qu'aucun sol n'est présent dans la classe argile sableuse.

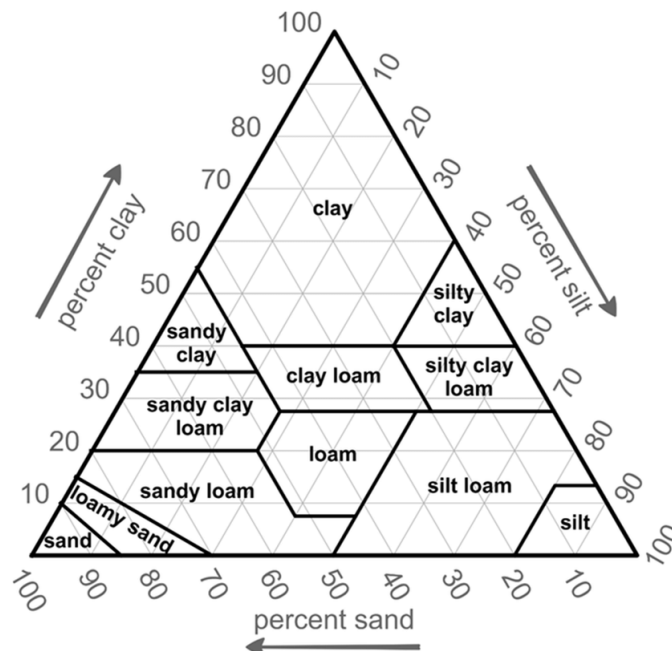


FIGURE 2 – Triangle textural des sols (LOGANATHAN 1987)

Lorsque toutes ces données sont regroupées, un fichier "sols.xml" est créé reprenant tous les sols sélectionnés, environ 4000, selon le formalisme d'entrée du modèle STICS.



Tableau 7 – Classement des sols wallons dans le triangle textural

Nom de la classe texturale	Proportion dans les sols retenus
Argile	0.56%
Argile limoneux	0.95%
Argile sableuse	0%
Limon	6.27%
Limon argileux	1.03%
Limon argileux fin	3.12%
Limon argilo-sableux	0.27%
Limon fin	70.22%
Limon sableux	4.06%
Limon très fin	13.26%
Sable limoneux	0.07%
Sable	0.20%

### 3.1.2 Données climatiques

Les données météorologiques ont été récupérées pour dix-huit stations (Annexe 1) du réseau Agromet en Wallonie (*Réseau Pameseb* 2021). Les données utilisées sont des mesures quotidiennes entre le 01/01/1995 et le 31/12/2020 et ont été retravaillées pour correspondre au formalisme de STICS (Tableau 8).

Tableau 8 – Données météorologiques selon le formalisme de STICS

Variable	Unité
Identifiant	[/]
Date	[aaaa-mm-jj]
Jour julien	[jjj]
Température minimale	[°C]
Température maximale	[°C]
Radiation solaire	[MJ * m <sup>-2</sup> * j <sup>-1</sup> ]
Evapotranspiration de la plante selon Penman	[mm * j <sup>-1</sup> ]
Somme de pluviométrie	[mm * j <sup>-1</sup> ]
Vitesse moyenne du vent	[m * s <sup>-1</sup> ]
Pression de vapeur	[mbars]
Concentration en CO <sub>2</sub>	[ppm]

Les valeurs de l'évapotranspiration n'étant pas disponibles, elles sont fixées à -999.99 qui est la valeur à indiquer dans le modèle lorsqu'une variable n'est pas présente. La concentration en CO<sub>2</sub> a été fixée à 390 ppm pour toutes les années et pour toutes les stations. De plus, certaines valeurs ne sont pas disponibles pour certains jours, elles ont donc été remplacées par la valeur moyenne des 26 années de la journée concernée. Un fichier pour une station météorologique de référence est aussi nécessaire pour le fonctionnement de STICS (Ernage\_SW\_STA.xml). On définit dans ce dernier la méthode de calcul du potentiel d'évapotranspiration, qui est celle de

Shuttleworth et Wallace.

Pour correspondre au formalisme de STICS, un fichier est créé par année et par station météorologique avec un nom de type "nomdestationannée.année".

### 3.1.3 Fichiers d'initialisation azotée

Le modèle STICS nécessite une initialisation du niveau d'azote dans le sol pour calculer efficacement la croissance de la culture et son interaction avec le sol. Ces données ont été reprises du Livre blanc (*Livre Blanc Céréales 2021*) pour toutes les années et pour les cinq horizons. Néanmoins, les mesures des quatrième et cinquième horizons ont été arrêtées en 2016 et ont été fixées à partir de ce moment-là à 13 et 12 kg  $NO_3$ /ha respectivement. Un fichier "INI.xml" est créé par année pour pouvoir être utilisé par le modèle STICS.

## 3.2 Spatialisation du modèle

### 3.2.1 Lien entre les sols et les stations météorologiques

Afin de travailler à l'échelle de la Wallonie, le modèle a été spatialisé en associant chacune des dix-huit stations météorologiques du réseau Agromet aux sols qui en sont les plus proches. Chaque sol possède une identification unique et une localisation exprimée en Lambert 72. Dès lors, la distance euclidienne entre chaque sol et chaque station peut être calculée selon l'équation 7 et la distance la plus courte est retenue afin d'associer chaque sol à une station. La figure 3 montre les résultats de la spatialisation des sols. Chaque sol est représenté par un cercle et chaque station météorologique est représentée par un triangle noir. Les couleurs indiquent le rapprochement réalisé entre les sols et les stations.

$$\text{dist} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (7)$$

avec :

- dist : la distance euclidienne entre le sol et la station,
- $x_j$  et  $y_j$  : les coordonnées de la station en Lambert 72,
- $x_i$  et  $y_i$  : les coordonnées du sol en Lambert 72.

### 3.2.2 Itinéraire technique cultural

L'itinéraire technique sera le même pour chaque année avec des modifications sur les fractions d'azote appliquées. Un travail du sol assez profond équivalent à un labour avec une profondeur de 25 centimètres sera effectué 10 jours avant le semis et une reprise de labour est effectuée la veille du semis à une profondeur de 10 centimètres. Le semis du froment d'hiver est réalisé le 15 octobre à une densité de 250 grains/ $m^2$ , à une profondeur de 3 cm et avec un inter-rang de 14,6 cm.

La fertilisation azotée est effectuée en trois fractions et selon les sommes de degrés-jours accumulés par la plante. Cette méthode est utilisée pour être certain d'apporter la fertilisation au bon moment et ne pas devoir imposer une date qui sera la même chaque année mais qui ne correspondra pas toujours au stade auquel la plante a le plus besoin d'azote. Les sommes de

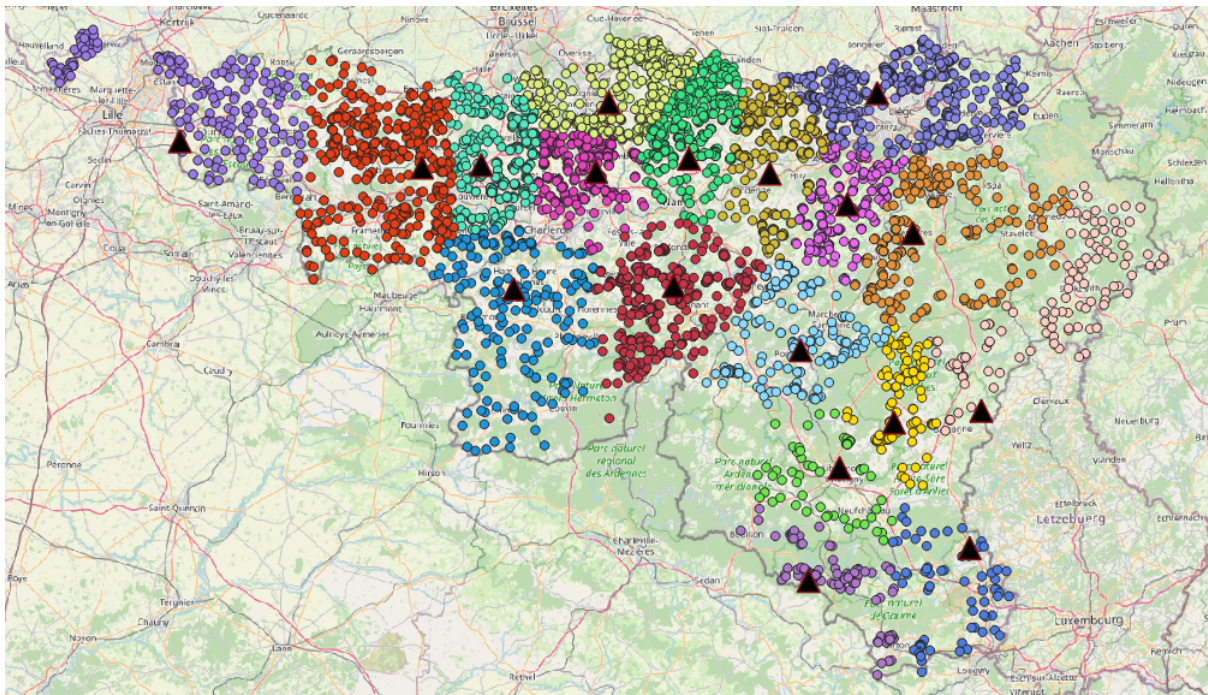


FIGURE 3 – Spatialisation des sols selon les stations météorologiques

degrés-jours utilisées sont de 110, 260 et 535 et correspondent aux stades de tallage, redressement et dernière feuille qui sont les stades BBCH 23, 30 et 39 respectivement (LANCASHIRE et al. 1991 ; WITZENBERGER, HACK et BOOM 1989).

Tableau 9 – Modalités d’azote appliquées

Modalités	1ère fraction (kg N/ha)	2ème fraction (kg N/ha)	3ème fraction (kg N/ha)	Total azote (kg N/ha)
1	0	0	0	0
2	15	15	15	45
3	30	30	30	90
4	45	45	45	135
5	60	60	60	180
6	75	75	75	225
7	90	90	90	270
8	105	105	105	315

La récolte se fait lorsque la maturité physiologique a été atteinte par les plantes sinon elle est limitée au 28 août.

### 3.3 Le modèle STICS

#### 3.3.1 Présentation du modèle

STICS pour Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard est un modèle dynamique et robuste initié à l’INRA en 1996 par Nadine Brisson et Dominique Ripoche. Au commencement, STICS a été constitué en couplant différents modèles déjà construits par l’INRA : GOA

(plante), BYM (eau) et LIXIM (azote) et ne pouvait simuler que deux plantes (le maïs et le froment). Au fur et à mesure des versions et des années, d'autres modules ont été rajoutés afin de constituer un modèle pouvant maintenant simuler plus de vingt cultures qu'elles soient pérennes ou annuelles, ligneuses ou herbacées (INRA 2017).

Lors de ce travail, la version 8.50 de STICS a été utilisée sur RStudio grâce au package SticsR-Packs (VEZY et al. 2020).

### 3.3.2 Modules de STICS

Les principaux modules de STICS sont présentés à la figure 4, divisés selon la simulation des parties aériennes ou racinaires. Les modules ayant un intérêt pour ce travail seront présentés ci-après.

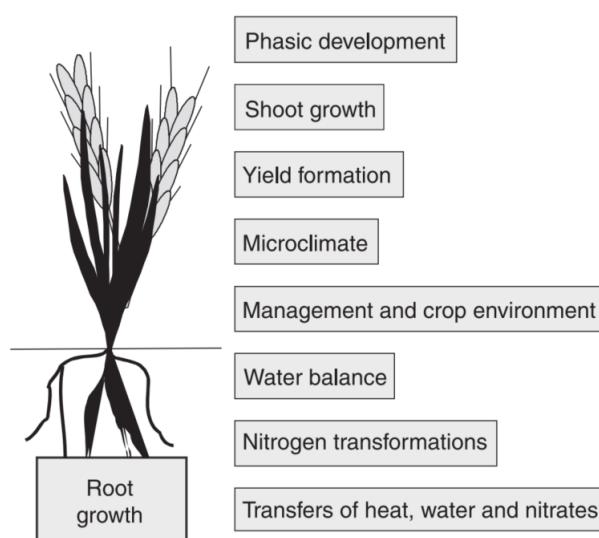


FIGURE 4 – Principaux modules de STICS (BRISSON et al. 2008).

#### Développement de la plante

Le modèle STICS est constitué de deux échelles indépendantes l'une de l'autre qui simulent les stades végétatifs pour l'une et les stades des organes récoltés pour l'autre. Ces deux échelles vont se succéder ou se réaliser simultanément ou du moins en partie selon les cultures. L'enchaînement des échelles se fera chez les plantes avec une culture déterminée comme les graminées ou les pois tandis que la réalisation simultanée se fera sur des cultures comme la vigne ou les betteraves sucrières (BRISSON et al. 2008).

La figure 5 représente les différents stades de la culture du froment repris dans le modèle STICS. Ceux-ci sont déterminés selon des sommes de degrés-jours que l'utilisateur peut paramétrer et où une calibration est applicable. Les paramètres de la figure 5 font référence à des stades réels qui soit sont calculés selon les accumulations de degrés-jours, soit ont été mis dans l'itinéraire technique cultural :

- iplt : le jour de semis (itinéraire technique),
- iger : le jour de germination du semis,

- ilve : le jour d'émergence,
- iamf : le jour de fin de la phase juvénile,
- ilat : le jour du début de la phase critique de l'apparition du nombre de grains,
- ilax : le jour de fin de croissance foliaire,
- idrp : le jour du début de remplissage des organes de récolte, en froment, ce stade est confondu avec iflo qui est le jour de floraison,
- imat : le jour de maturité physiologique,
- irec : le jour de récolte.



FIGURE 5 – Stades du modèle pour la culture de blé (BRISSEON et al. 2008).

Pour atteindre ces stades, le modèle va calculer l'accumulation quotidienne de degrés-jours par la plante selon les données météorologiques disponibles (equation 8, BRISSEON et al. 2008) où chaque journée est représentée par  $I$ . Lorsque la température cumulée aura atteint ou dépassé la somme de degrés-jours spécifiée pour un stade ou entre deux stades, le modèle considérera ce stade comme atteint et passera au stade suivant de la plante. Dans cette équation, le paramètre  $STRESSDEV_P$  sera travaillé lors de la calibration afin de modifier la réponse de la plante par rapport aux stress.

$$UPVT(I) = UDEVCULT(I) \cdot RFPI(I) \cdot RFVI(I) \cdot [STRESSDEV_P \cdot \min(TURFAC(I), INNLA I(I)) + 1 - STRESSDEV_P] \quad (8)$$

avec :

- $UPVT$  : l'unité de développement quotidien [degrés-jours],
- $UDEVCULT$  : la température effective pour le développement de la plante [degrés-jours],
- $RFPI$  : l'effet ralentissant de la photopériode sur le développement de la plante [/],
- $RFVI$  : l'effet ralentissant de la vernalisation sur le développement de la plante [/],
- $STRESSDEV_P$  : le délai physique maximum autorisé en raison du stress [/],
- $TURFAC$  : l'indice de stress hydrique de la turgescence [/],
- $INNLA I$  : l'indice de stress azoté actif sur la croissance des feuilles.

### Développement de la partie aérienne

La croissance des feuilles est calculée quotidiennement selon l'équation 9. Celle-ci est divisible en plusieurs critères dont certains sont présentés ci-dessous plus précisément.

$$DELTA I_1(I) = DELTA I_{dev}(I) \cdot DELTA I_T(I) \cdot DELTA I_{dens} \cdot DELTA I_{stress}(I) \quad (9)$$

avec :

- $DELTA I_1$  : le taux de croissance quotidien des feuilles [ $m^2 \text{feuille} * m^{-2} \text{sol} * \text{jour}^{-1}$ ],

- $DELTAI_{dev}$  : le taux de croissance du LAI [ $m^2 * plante^{-1} * \text{degrés-jours}^{-1}$ ],
- $DELTAI_T$  : la composante thermique [degrés-jours],
- $DELTAI_{dens}$  : la composante de densité [ $plant * m^{-2}$ ],
- $DELTAI_{stress}$  : la composante de stress en azote et eau [/].

La partie qui est intéressante pour ce travail est contenue dans les équations 10 et 11 qui sont les taux de croissance du LAI et la composante de densité. En effet, plusieurs paramètres de ces équations ont été travaillés lors de la calibration et il est ainsi possible de comprendre leur implication dans le calcul du développement foliaire de la plante.

$$DELTAI_{dev}(I) = \frac{DLAIMAXBRUT_P}{1 + \exp [PENTLAIMAX_P (VLAIMAX_P - ULAI(I))]} \quad (10)$$

avec :

- $DELTAI_{dev}$  : le taux de croissance du LAI [ $m^2 * plante^{-1} * \text{degrés-jours}^{-1}$ ],
- $DLAIMAXBRUT_P$  : le taux maximum de constitution du LAI [ $m^2 * plante^{-1} * \text{degrés-jours}^{-1}$ ],
- $PENTLAIMAX_P$  : un des paramètres de la courbe logistique de la croissance du LAI [/],
- $VLAIMAX_P$  : ULAI au point d'inflexion de la fonction  $DELTAI=f(ULAI)$  [/],
- $ULAI$  : unité de développement relatif quotidien pour le LAI [/].

$$DELTAI_{dens}(I) = DENSITE(I) \left( \frac{DENSITE(I)}{BDENS_P} \right)^{ADENS_V} \quad (11)$$

avec :

- $DELTAI_{dens}$  : la composante de densité [ $plant * m^{-2}$ ],
- $DENSITE$  : la densité de plantes [ $plant * m^{-2}$ ],
- $ADENS_V$  : le paramètre de compétition interplantes [/],
- $BDENS_P$  : la densité minimale à partir de laquelle la compétition interplantes commence [ $plante * m^{-2}$ ].

La figure 6 montre l'évolution de la fonction de densité du DELTAI en fonction de la densité de plantes. Comme la fonction dépend de paramètres qui peuvent diminuer la densité finale, la pente n'est plus égale à 1 lorsque  $BDENS_P$  est atteint.

L'équation 12 calcule la durée de vie des feuilles et est définie selon deux valeurs principales qui sont  $DURVIEI_P$ , la durée de vie des jeunes feuilles et  $DURVIEF_V$ , la durée de vie des dernières feuilles émises (BRISSON et al. 2008).  $DURVIEI_P$  est exprimé selon un ratio de  $DURVIEF_V$  et cette dernière est une valeur phénologique qui peut être paramétrée et qui sera calibrée par la suite. Dans cette équation,  $I$  a été remplacé par  $I_0$  car toutes les feuilles de la plante ont été émises.

$$DURAGE(I_0) = DURVIEI_P + \frac{ULAI(I_0) - VLAIMAX_P}{3 - VLAIMAX_P} (DURVIEF_V - DURVIEI_P) \quad (12)$$

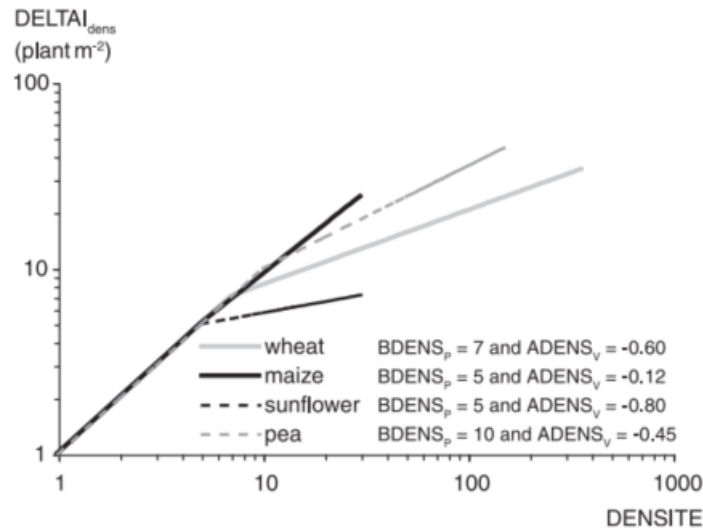


FIGURE 6 – Fonction de densité pour différentes cultures (BRISSEON et al. 2008).

avec :

- DURAGE : la durée de vie naturelle des feuilles [ $Q10^3$ ],
- DURVIEI<sub>p</sub> : la durée de vie d'une feuille jeune [/],
- ULAI : unité de développement relatif quotidien pour le LAI [/],
- VLAIMAX : ULAI au point d'inflexion de la fonction  $DELTA I = f(ULAI)$  [/],
- DURVIEF : la durée de vie maximale d'une feuille adulte [ $Q10$ ].

La croissance quotidienne de la biomasse aérienne ( $DTLAMS$  [ $t \cdot ha^{-1} \cdot jour^{-1}$ ]) est caractérisée selon le concept de RUE (radiation use efficiency), l'efficacité d'utilisation des radiations (MONTEITH 1972). La RUE est la pente de la relation entre la biomasse accumulée dans la plante et la radiation captée par la plante. Cette croissance quotidienne additionnée donne au moment de la récolte MASEC [ $t \cdot ha^{-1}$ ], la biomasse totale au-dessus du sol. DLTAMS dépend en partie de la radiation interceptée RAINI [ $MJ \cdot m^{-2}$ ] qui est une équation parabolique dont le maximum est EBMAX [ $g \cdot MJ^{-1}$ ] et est propre à chaque espèce cultivée. Cette grandeur EBMAX diffère selon les stades de la plante comme présenté dans le tableau 10 (BRISSEON et al. 2008). Les valeurs présentées dans ce tableau sont présentes dans le fichier "plant.xml" et seront optimisées lors de la calibration.

Tableau 10 – Valeur de la grandeur EBMAX selon le stade de la culture

Stade de la plante	Valeur de EBMAX
Phase juvénile (ilev-iamf)	EFCROIJUV
Phase végétative (iamf-idrp)	EFCROIVEG
Phase reproductive (idrp-imat)	EFCROIREPRO

### Stress en azote

Le statut en azote peut habituellement être calculé selon l'INN [/], l'indice de nutrition azotée

3. L'unité  $Q10$  est une unité thermique exponentielle ( $2.0^{UDEV CULT/10}$ ).

et être comparé à une valeur critique, NC, sur une courbe de dilution (Figure 7) propre à chaque espèce. Cet indice fonctionne bien en instantané mais la dynamique est plus compliquée à gérer surtout pour des plantes avec des réserves. Les stress en azote ont, dans le modèle, une valeur plancher qui est donnée par INNMIN [/] et cette valeur sera travaillée lors de la calibration.

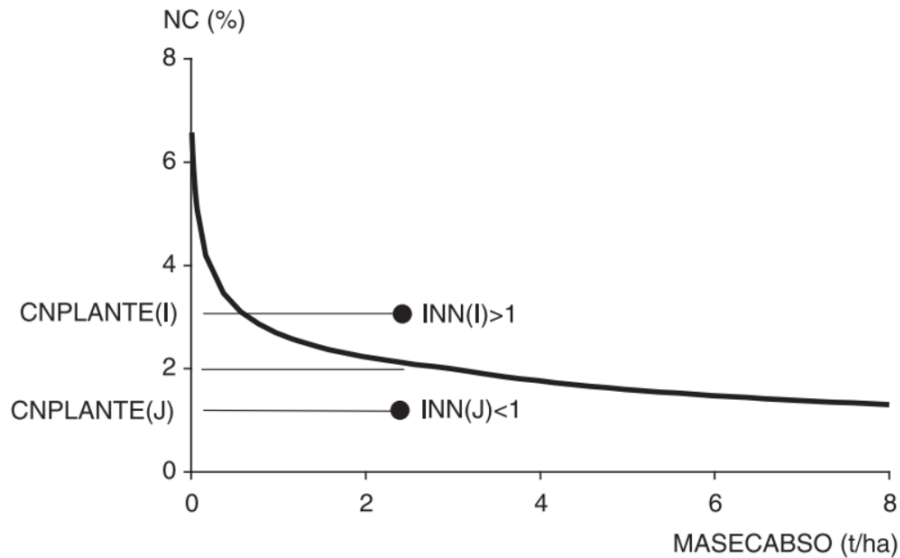


FIGURE 7 – Courbe de dilution et calcul de l'INN (BRISSEON et al. 2008)

### Formation du rendement

Comme dans de nombreux autres modèles, le but est de prévoir le rendement de la culture à la fin de la simulation en fonction des conditions météorologiques ou d'éventuels stress appliqués. Dans STICS, le nombre de grains par  $m^2$  est fixé selon l'équation 13 où  $CGRAIN_P$  est dépendant de l'espèce utilisée tandis que  $NBGRMAX$  est dépendant de la génétique. La variable  $CGRAIN$  sera optimisée lors de la calibration pour estimer au mieux la récolte. Lorsque le stade  $idrp$  (stade floraison) est dépassé, le nombre de grains peut diminuer en cas de gel et est noté  $PGRANGEL$  [ $g \cdot m^2$ ].

$$NBGRAINS (IDRP) = CGRAIN_P \cdot VITMOY (IDRP) \cdot NBGRMAX_V \quad (13)$$

avec :

- $NBGRAINS$  : le nombre de grains [ $grains \cdot m^{-2}$ ],
- $CGRAIN_P$  : pente de la relation entre le nombre de grains et le taux de croissance [ $grains \cdot g^{-1} \cdot jour$ ],
- $VITMOY$  : le taux de croissance moyen [ $g \cdot m^{-2} \cdot jour^{-1}$ ],
- $NBGRMAX$  : le nombre maximum de grains [ $grains \cdot m^{-2}$ ].

Le remplissage quotidien des grains  $DLTAGS$  [ $t \cdot ha^{-1} \cdot jour^{-1}$ ] est calculé selon un indice de récolte entre le jour du début de remplissage ( $idrp$ ) et le jour de la maturité ( $imat$ ). Cet indice de récolte dépend lui-même d'un facteur  $VITIRCARB$  [ $g \text{ grains} \cdot g \text{ biomasse}^{-1} \cdot jour^{-1}$ ].

Ensuite, le rendement exprimé  $MAFRUIT$  [ $t \cdot ha^{-1}$ ] est calculé selon l'équation 14.



$$MAFRUIT(I) = \sum_{J=IDRP}^I DLTAGS(J) - \frac{PGRAINGEL(I)}{100} \quad (14)$$

avec :

- MAFRUIT : la matière sèche des organes récoltés [ $t \cdot ha^{-1}$ ],
- DLTAGS : le remplissage quotidien des grains [ $t \cdot ha^{-1} \cdot jour^{-1}$ ],
- PGRAINGEL : le poids des grains gelés [ $g \cdot m^{-2}$ ].

Lorsque le rendement final a été calculé, le modèle calcule la masse de chaque grain qui ne peut excéder la masse maximale émise dans les paramètres de la plante (équation 15).

$$PGRAIN(I) = \min \left\{ \frac{MAFRUIT(I)}{NBGRAINS(I)} \cdot 100, PGRAINMAXI_V \right\} \quad (15)$$

avec :

- PGRAIN : le poids des grains [g],
- MAFRUIT : la matière sèche des organes récoltés [ $t \cdot ha^{-1}$ ],
- NBGRAINS : le nombre de grains [ $grains \cdot m^{-2}$ ],
- PGRAINMAXI\_V : le poids maximum d'un grain à 0% d'humidité [g].

## Qualité de la récolte

La quantité d'azote dans la graine récoltée QNgrain [ $kg \ N \cdot ha^{-1}$ ] dépend de la quantité d'azote dans la plante. Cette quantité va évoluer au cours de la saison tout en sachant que les grains ne sont pas développés avant la floraison dans le modèle. Un concept d'indice de récolte similaire à celui du carbone est alors utilisé mais cette fois pour l'azote avec le paramètre VITIRAZO. La quantité d'azote ajoutée dans la graine est calculée quotidiennement jusqu'à la maturité de la graine avec des effets de stress qui peuvent être ajoutés selon les conditions météorologiques.

## 3.4 Calibration

### 3.4.1 Données disponibles pour la calibration

Les données observées utilisées viennent de champs expérimentaux de Gembloux Agro-Bio Tech entre les années 2008 et 2014. Lors de ces essais, plusieurs modalités d'azote ont été testées (Tableau 11) et différentes mesures sur les plantes et le sol ont été réalisées. Les apports en trois fractions ont été réalisés aux stades tallage, redressement et dernière feuille tandis que les apports en deux fractions ont été faits aux stades redressement et dernière feuille. Le champ le plus proche présent dans la base de données Aardewerk est le sol dont l'identifiant est "130EP003" et sa station météorologique de référence est celle de Sombreffe. Ses données serviront donc pour la calibration et la validation.

Les dates de l'itinéraire technique cultural ont été utilisées afin de calibrer le modèle (Tableau 12). Il est important de préciser que ce ne sont pas les dates réelles des stades mais les dates auxquelles les apports ont été réalisés. Il est donc certain que le stade est atteint mais il a pu être atteint un peu plus tôt par la plante. Un biais peut donc être présent lors de la calibration

Tableau 11 – Modalités testées lors des essais

Modalités	Fraction 1	Fraction 2	Fraction 3	Total
1	0	0	0	0
2	-	60	60	120
3	30	30	60	120
4	-	90	90	180
5	60	60	60	180
6	-	120	120	240
7	60	60	120	240

et de la validation du modèle. De plus, certaines dates n’ont pas été répertoriées pour toutes les années de l’essai, elles ont donc été estimées selon d’autres critères. En effet, les dates de floraison des saisons 2008-2009, 2009-2010 et 2012-2013 n’ont pas été observées. Les dates ont été estimées en ajoutant 25 jours à la date d’observation de la dernière feuille. Le décalage de 25 jours est la moyenne de jours entre la date de la dernière feuille et la floraison lorsque celles-ci ont été observées.

Tableau 12 – Dates issues de l’itinéraire technique

Saison	Semis	Variété	Tallage	Redressement	Dernière feuille	Floraison	Récolte
2008-2009	23/10/08	Julius	17/03/09	14/04/09	27/05/09	21/06/09	12/08/09
2009-2010	19/10/09	Julius	25/03/10	29/04/10	31/05/10	22/06/10	22/08/10
2010-2011	28/10/10	Julius	23/03/11	15/04/11	12/05/11	12/06/11	18/08/11
2011-2012	20/10/11	Barok	20/03/12	06/04/12	15/05/12	07/06/12	05/08/12
2012-2013	08/11/12	Barok	15/04/13	02/05/13	04/06/13	29/06/13	13/08/13
2013-2014	24/10/13	Edgar	24/03/14	07/04/14	19/05/14	10/06/14	08/08/14

Pour la calibration, les dates de redressement, dernière feuille, floraison et récolte ont été utilisées. La date de récolte a été avancée de dix jours pour essayer de correspondre au stade de maturité de la plante. En effet, les dates dans STICS sont les dates auxquelles les stades sont atteints alors que la date de récolte est postérieure au stade de maturité. Dans le modèle, les stades proposés ci-dessus ont des noms spécifiques tels que vus au paragraphe 3.3.2.

D’autres données ont également été relevées au cours des années comme le LAI, la matière sèche totale au-dessus du sol, le poids de la récolte, la quantité en azote dans le grain et dans la plante, le poids de mille grains ainsi que des analyses de sol pour l’azote à plusieurs dates entre la sortie de l’hiver et la récolte.

### 3.4.2 Méthodes de calibration

La calibration a été effectuée avec le package CROPTIMIZR (BUIS et al. 2021) sur différents paramètres phénologiques mais aussi sur des paramètres conditionnant le rendement. L’algorithme de calcul utilisé est le simplex de Nelder-Mead qui est une méthode fréquentiste facilement paramétrable (NELDER et MEAD 1965). La méthode doit être paramétrée avec des observations à

comparer avec les simulations et des paramètres sur lesquels il est possible d'influer. Les paramètres seront modifiés directement par l'algorithme en suivant des valeurs de borne imposées. Il faut également donner le nombre de répétitions que l'algorithme doit effectuer avant de choisir la valeur optimale qui minimise tous les critères. Dans notre cas, le nombre de répétitions effectuées sera le double du nombre de paramètres à optimiser. L'algorithme prendra ainsi une valeur initiale aléatoire différente comprise dans les bornes pour chaque critère lors de chaque nouvelle répétition. L'algorithme va ainsi converger vers un minimum local pour les paramètres demandés. La valeur gardée à la fin des différentes répétitions sera celle qui minimise les critères statistiques du simplex. Les différentes calibrations présentées à la suite de ce paragraphe ont été réalisées séquentiellement et dans le même ordre. Cet ordre a été instauré car par exemple, il était inutile de calibrer le rendement de la culture alors que la phénologie n'était pas optimale et qu'elle influence grandement la formation des grains. Dans toutes les calibrations, une légère irrigation (5 mm) a été intégrée aux itinéraires techniques le lendemain du semis afin de favoriser la germination.

### **Calibration phénologique**

La première calibration a été réalisée sur l'aspect phénologique de la plante. Ce sont les sommes de degrés-jour qui gouvernent la croissance de la plante. Cette calibration s'est effectuée avec les années 2009, 2010, 2012 et 2014 pour la calibration et 2011 et 2013 pour la validation. Les variétés ayant des différences importantes, il a été préféré de calibrer et valider sur plusieurs variétés afin d'obtenir un cultivar moyen. La calibration a été réalisée sur la fertilisation de 180 kg N/ha en trois fractions car les dates d'observation étaient les mêmes pour toutes les fertilisations. Néanmoins, la validation est réalisée sur toutes les modalités de fertilisation des années concernées. Les variables observées pour ajuster les paramètres sont les dates de fin de phase juvénile (iamf), de fin de croissance foliaire (ilax), de floraison (iflo) et de maturité (imat). Les paramètres calibrés sont présentés dans le tableau 13.

Tableau 13 – Paramètres optimisés lors de la calibration phénologique

Nom du critère	Définition	Borne basse	Borne haute
stlevamf	la somme de degrés-jours entre l'émergence et la fin de la phase juvénile [degrés-jours]	50	400
stamflax	la somme de degrés-jours entre la fin de la phase juvénile et la fin de la croissance foliaire [degrés-jours]	50	350
stlevdrp	la somme de degrés-jours entre l'émergence et le début du remplissage des grains [degrés-jours]	400	1500
stdrpmat	la somme de degrés-jours entre le début du remplissage des grains et la maturité physiologique [degrés-jours]	600	1400
JVC	nombre de jours de vernalisation requis [jours]	10	70
stressdev	retard phasique maximal autorisé à cause des stress [/]	0.1	0.9
sensiphot	sensibilité photopériodique [/]	0	1

### Calibration du LAI

La suite de la calibration s'est effectuée sur les paramètres influençant le LAI, l'indice de surface foliaire. Les paramètres travaillés influencent la courbe du LAI au cours de l'année et sont présentés dans le tableau 14. Lors de cette calibration, les observations ont été comparées aux valeurs de LAI du modèle.

Tableau 14 – Paramètres optimisés lors de la calibration du LAI

Nom du critère	Définition	Borne basse	Borne haute
vlaimax	ULAI au point d'inflexion de la fonction DELTAI=f(ULAI) [/]	1.5	2.5
durvieF	durée de vie maximale d'une feuille adulte [/]	150	350
adens	paramètre de compétition interplants [/]	-1	0
dlaimaxbrut	taux maximum de constitution du LAI [ $m^2 * plante^{-1} * degrés-jours^{-1}$ ]	0.00001	0.005
innturgmin	paramètre de la fonction du stress azoté actif sur l'expansion des feuilles [/]	-2	1

La calibration du LAI s'est faite sur les années 2009, 2010 et 2012 et la validation sur l'année 2011. Les mesures du LAI n'ayant pas été faites lors des années 2013 et 2014, il n'était pas utile de les inclure dans les données. La calibration a été réalisée sur les fractionnements d'azote 0 kg N/ha et 180 kg N/ha en trois fractions car c'étaient les seules fertilisations pour lesquelles des mesures du LAI avaient été réalisées. La validation a été réalisée sur toutes les modalités d'azote de l'année 2011.

## Calibration du rendement

La troisième étape de la calibration concerne la formation du rendement. La première partie va être un travail sur la biomasse totale au-dessus du sol dont le nom dans le modèle est MASEC [ $t \cdot ha^{-1}$ ]. Les paramètres sur lesquels la calibration sera effectuée sont présentés dans le tableau 15. Ces paramètres influencent la croissance de la partie aérienne de la plante tout au long de la saison et chacun correspond à un stade de la plante (voir chapitre 3.3.2). Les mesures étant disponibles pour les six années, la même configuration a été adoptée que pour la calibration phénologique c'est-à-dire, les années 2009, 2010, 2012 et 2014 pour la calibration et les années 2011 et 2013 pour la validation. La calibration a été réalisée sur les fertilisations 0 et 180 kg N/ha en trois fractions et la validation est réalisée sur toutes les modalités d'azote. La variable observée a été dans ce cas MASEC, qui est la biomasse au-dessus du sol.

Tableau 15 – Paramètres optimisés lors de la calibration de la biomasse au-dessus du sol

Nom du critère	Définition	Borne basse	Borne haute
INNmin	valeur minimale du INN pour la culture [/]	0	1
efcroijuv	l'efficacité maximale de l'utilisation du rayonnement pendant la phase juvénile [ $g \cdot MJ^{-1}$ ]	1	7
efcroiveg	l'efficacité maximale de l'utilisation du rayonnement pendant la phase végétative [ $g \cdot MJ^{-1}$ ]	1	10
efcroirepro	l'efficacité maximale de l'utilisation du rayonnement pendant la phase de remplissage du grain [ $g \cdot MJ^{-1}$ ]	1	10

Le deuxième partie consiste à travailler sur les grains qui vont être formés et remplis. Dans le modèle, le nombre de grains est calculé par la grandeur "chargefruit" [nombre de grains  $\cdot m^{-2}$ ] et est comparé aux observations. Les paramètres calibrés sont présentés dans le tableau 16. Pour cette calibration, le nombre de grains maximum est paramétré au maximum des observations + 10% ce qui donne 28500 grains/ $m^2$ . Les données utilisées étant présentes sur les 6 années d'expérimentation, la configuration des données est la même que précédemment. Les années 2009-2010-2012 et 2014 sont utilisées pour la calibration et les années 2011 et 2013 pour la validation. La calibration a été réalisée sur les fertilisations 0 et 180 kg N/ha en trois fractions et la validation est réalisée sur toutes les modalités d'azote.

Tableau 16 – Paramètres optimisés lors de la calibration du nombre de grains

Nom du critère	Définition	Borne basse	Borne haute
cgrain	pente de la relation entre le nombre de grains et le taux de croissance [ $grains \cdot g^{-1} \cdot jour$ ]	0	0.3
cgrainv0	nombre de grains produits lorsque la pente est de 0 [ $grains \cdot m^{-2}$ ]	-1	1

La troisième partie de la formation du rendement consiste à calibrer la quantité de biomasse récoltée. La grandeur "mafruit" [tonnes  $\cdot ha^{-1}$ ] reprenant la quantité de biomasse récoltée est comparée aux observations. Le paramètre calibré est présenté dans le tableau 17. Le poids

maximum d'un grain "pgrainmaxi" a d'abord été paramétré à 110% de la plus haute observation, ce qui donne un poids de 0.058g. Les données utilisées étant présentes sur les 6 années d'expérimentation, la configuration des données est la même que précédemment. Les années 2009-2010-2012 et 2014 sont utilisées pour la calibration et les années 2011 et 2013 pour la validation. La calibration a été réalisée sur les fertilisations 0 et 180 kg N/ha en trois fractions et la validation est réalisée sur toutes les modalités d'azote.

Tableau 17 – Paramètres optimisés lors de la calibration du de la biomasse récoltée

Nom du critère	Définition	Borne basse	Borne haute
vitircarbT	le taux de croissance de l'indice de récolte C [g grains*g plantes <sup>-1</sup> *jour <sup>-1</sup> ]	0.00005	0.02

### Calibration de l'azote dans la récolte

La dernière étape de la calibration se concentre sur l'azote dans la plante et particulièrement dans les grains récoltés. Le paramètre "QNgrain" [kg\*ha<sup>-1</sup>] définit la quantité d'azote qui sera présente dans les grains lors de la récolte et est comparé aux observations. Le paramètre calibré est présenté dans le tableau 18. Les données utilisées étant présentes sur les 6 années d'expérimentation, la configuration des données est la même que précédemment. Les années 2009-2010-2012 et 2014 sont utilisées pour la calibration et les années 2011 et 2013 pour la validation. La calibration a été réalisée sur les fertilisations 0 et 180 kg N/ha en trois fractions et la validation est réalisée sur toutes les modalités d'azote.

Tableau 18 – Paramètres optimisés lors de la calibration de l'azote

Nom du critère	Définition	Borne basse	Borne haute
vitirazo	le taux de croissance de l'INN [g grains*g plantes <sup>-1</sup> *jour <sup>-1</sup> ]	0.001	0.04

### 3.4.3 Critères d'évaluation de la calibration

Les trois critères statistiques présentés ci-dessous seront utilisés afin de caractériser la calibration.

#### L'erreur quadratique moyenne

Le premier critère utilisé est la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne qui se calcule selon l'équation 16. Ce critère varie entre  $[0, +\infty]$ .

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (16)$$

avec :

— RMSE : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne,

- $N$  : le nombre d'observations,
- $Y_i$  : les variables observées,
- $\hat{Y}_i$  : les variables simulées.

Le résultat idéal est d'être proche de 0 pour maximiser l'efficacité de la calibration (DUMONT, VANCUTSEM et al. 2012).

### Efficiencce du modèle

Le second critère pour estimer la calibration est l'efficiencce du modèle qui se calcule selon l'équation 17.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (17)$$

avec :

- EF : l'efficiencce du modèle,
- $N$  : le nombre d'observations,
- $Y_i$  : les variables observées,
- $\hat{Y}_i$  : les variables simulées,
- $\bar{Y}$  : la moyenne des variables simulées.

Les valeurs de EF se situent dans l'intervalle  $[-\infty, 1]$  et l'idéal est d'être au plus proche de 1. Une valeur au-delà de 0.5 sera déjà considérée comme une valeur acceptable (DUMONT, VANCUTSEM et al. 2012).

### Le coefficient de détermination

Le troisième critère utilisé pour évaluer la calibration du modèle est le coefficient de détermination et se calcule selon l'équation 18.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N [(Y_i - \bar{Y}) * (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}) * \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})}} \right)^2 \quad (18)$$

avec :

- $R^2$  : le coefficient de détermination,
- $N$  : le nombre d'observations,
- $Y_i$  : les variables observées,
- $\hat{Y}_i$  : les variables simulées,
- $\bar{\hat{Y}}$  : la moyenne des variables simulées,
- $\bar{Y}$  : la moyenne des variables simulées.

La gamme de variation de ce critère se situe entre  $[0, 1]$  et au plus la valeur se rapproche de 1, plus le modèle est considéré comme une bonne simulation.

### **3.5 Tests statistiques et logiciel**

Lorsque toutes les simulations sont réalisées, une analyse de la variance est réalisée et des tests SNK post-hoc sont effectués afin de comparer les moyennes des rendements et des reliquats azotés par rapport aux différentes fertilisations.

L'entièreté des calculs, des traitements statistiques et des graphiques ont été réalisés sur RStudio 4.0.2 (R CORE TEAM 2020).



## 4 Résultats et discussions

### 4.1 Résultats et discussions de la calibration du modèle

Le tableau 19 reprend les valeurs des paramètres obtenues à la fin de toutes les calibrations. Certains ajustements manuels ont été effectués sur les valeurs proposées par l'algorithme. Le tableau 20 reprend les valeurs des critères statistiques utilisés pour l'évaluation de la calibration. Les valeurs de EF et  $R^2$  écrites en vert indiquent que la valeur du critère est supérieure à 0.5 et dans le cas contraire, les valeurs sont écrites en rouge.

Tableau 19 – Résultats de la calibration sur les paramètres testés.

Groupe de calibration	Nom du paramètre	Valeur initiale	Valeur finale
Calibration phénologique	stlevamf	260	320
	stamflax	275	320
	stlevdrp	790	880
	stdrpmat	790	810
	JVC	55	45
	stressdev	0.2	0.2
	sensiphot	0	0.2
Calibration du LAI	vlaimax	2.2	2.2
	durvieF	290	250
	adens	-0.5	-0.6
	dlaimaxbrut	0.00045	0.0005
	innturgmin	-0.65	-2
Calibration de la biomasse au-dessus du sol	INNmin	0.3	0.14
	efcroijuv	2.1	2.1
	efcroiveg	4.2	4.51
	efcroirepro	4.2	4
Calibration du nombre de grains	cgrain	0.0333	0.03
	cgrainv0	0.1576	0.123
Calibration de la biomasse récoltée	vitircarbT	0.00066	0.00073
Calibration de l'azote	vitirazo	0.0145	0.018

Tableau 20 – Valeurs des critères d’évaluation du modèle.

L’erreur moyenne quadratique (RMSE) est exprimée en [degrés-jours] pour la calibration phénologique, en [ $\text{m}^2 \text{ feuille} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sol}$ ] pour la calibration du LAI, en [ $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ] pour les calibrations de la biomasse au-dessus du sol et la biomasse récoltée et en [ $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ] pour la calibration du nombre de grains et la calibration de l’azote dans la plante.

Groupe de calibration	Variable observée	Calibration			Validation		
		RMSE	EF	R <sup>2</sup>	RMSE	EF	R <sup>2</sup>
Calibration phénologique	iamfs	6.7	0.46	0.59	1.83	0.95	0.99
	ilaxs	7	-0.24	0.43	7.31	0.60	0.99
	iflos	6.1	0.15	0.52	1.73	0.99	0.96
	imats	5.6	0.35	0.42	5.96	-4.7	0.955
Calibration du LAI	LAI	0.76	0.73	0.73	0.65	0.25	0.52
Calibration de la biomasse au-dessus du sol	masec	1.57	0.93	0.93	1.53	0.91	0.95
Calibration du nombre de grains	chargefruit	2028	0.83	0.83	5223	0.17	0.61
Calibration de la biomasse récoltée	mafruit	2.04	0.71	0.6	2.62	0.42	0.81
Calibration de l’azote dans la récolte	QNgrain	35.33	0.7	0.65	58.72	0.29	0.90

Le premier tableau (tableau 19) indique que certaines valeurs n’ont pas ou peu changé alors que d’autres ont été plus largement modifiées. La plus grande partie de la calibration a été effectuée sur la phénologie de la plante car cette partie influence toute la croissance de la plante. Toutes les sommes de degrés-jours ont été augmentées car comme le montre la figure 8, les simulations étaient sous-estimées par rapport aux observations. Après la calibration, les valeurs simulées sont plus proches des observations et ont une légère tendance à être surestimées. Rappelons que les dates observées viennent de l’itinéraire technique et non d’observations réelles des stades et que les variétés étaient différentes selon les années. Ces variétés possèdent des phénologies différentes qui ont une influence sur les dates observées. La plus grande erreur visuelle est sur la date de maturité (imats) qui est une date observée déduite de la date de récolte et cela se confirme dans l’efficacité du modèle lors de l’étape de validation (tableau 20). Le décalage sur la date de maturité est difficilement rattrapable car les observations sont assez peu précises pour ce stade. Cette première étape est assez critique pour toute la suite de la calibration et les valeurs en découlant pourront influencer les valeurs trouvées par la suite. Pour de prochains essais, connaître le jour précis du stade serait une plus-value pour la calibration du modèle. Ces données sont assez compliquées à relever sur le terrain mais permettraient des possibilités de simulation plus importantes et plus justes.

Ensuite, le LAI est un peu contrasté car ce formalisme est assez compliqué à aborder dans le modèle. Le graphique avant calibration paraît assez bon mais comme les valeurs phénologiques sont modifiées, il convient de retravailler les valeurs des paramètres influençant le LAI. Les critères sont remplis lors de la phase de calibration mais retombent lors de la phase de validation. Il serait intéressant de procéder à des mesures du LAI selon plusieurs sources comme avec des drones ou des images satellites Sentinel 2. Cela a amélioré grandement les qualités de prédiction du modèle STICS (BOURDIN et al. 2017).

Les meilleures valeurs obtenues sont pour la biomasse au-dessus du sol. STICS est reconnu pour cette partie et il n’est donc pas étonnant de retrouver de telles valeurs pour les critères. Cela se confirme sur le graphique qui montre une droite très proche de la droite (1 : 1) ce qui signifie

que les simulations sont presque égales aux observations.

La calibration du nombre de grains donne également de bons résultats sauf sur la partie validation où l'efficacité n'est pas élevée. En comparant les figures 8 et 9, la pente de la courbe est améliorée et une distinction plus importante entre les fractions azotées est présente. Cette distinction vient également du travail de la sensibilité de la plante aux stress azotés qui a été modifiée lors des calibrations précédentes. Malgré des bons critères lors de la calibration, les valeurs sont moins bonnes lors de la phase de validation avec une erreur quadratique qui est plus que doublée par rapport à la valeur lors de la calibration. Les résultats sont comparables à l'étude de BEAUDOIN et al. (2018) où les rendements étaient un peu inférieurs aux observations.

La calibration de la récolte est légèrement sous-estimée par rapport aux observations mais la pente de la courbe est redressée. L'efficacité du modèle est alors de 0.42 lors de la phase de validation mais le  $R^2$  est bien au-dessus de 0.5. Les valeurs simulées sont rehaussées par l'augmentation du paramètre vitircarbT qui définit l'accumulation quotidienne de grains.

Enfin, la dernière étape de calibration effectuée sur la quantité d'azote dans le grain (QNgrain) montre une amélioration nette de la courbe. Les différentes dynamiques travaillées jusqu'ici ont modifié la quantité d'azote et une meilleure réponse en fonction des fertilisations est présente.

Aucune calibration n'a été réalisée sur les variables d'azote dans le sol (AZnit<sub>1,2,3</sub> et azomes). Le modèle est apparu très sensible à l'initialisation du contenu en azote dans une autre étude réalisée (BOURDIN et al. 2017). Il paraît donc important de traiter ces variables dans la calibration.

La calibration qui a été réalisée séquentiellement pour mieux comprendre l'impact de chaque modification pourrait aussi être réalisée en une étape. Une étude a montré que lorsque les calibrations sont réalisées simultanément, il en ressortait de meilleurs résultats (GUILLAUME et al. 2011). Cette même étude proposait aussi de travailler à la fois les données en saison et à la fin de la saison lorsque toutes ces variables voulaient être ajustées. Alors que lorsque l'on s'intéresse uniquement à des données de fin de saison comme le rendement, il est plus intéressant de calibrer uniquement ces variables directement et ne pas réaliser la calibration sur des données de saison. La démarche utilisée ici était plutôt complète pour pouvoir également utiliser les valeurs trouvées dans d'autres travaux de recherche qui s'intéresseraient plus à la prédiction du rendement et où les variables en cours de saison sont les plus importantes.

En général, les résultats des critères statistiques de la calibration montrent que le modèle est moins efficace sur les données de calibration que sur les données de validation pour la partie phénologique. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est quasiment tout le temps dans une gamme correcte à l'exception des données de calibration phénologique. La calibration a donc amélioré les valeurs simulées et permet de travailler avec de nouvelles valeurs à inclure dans le modèle.

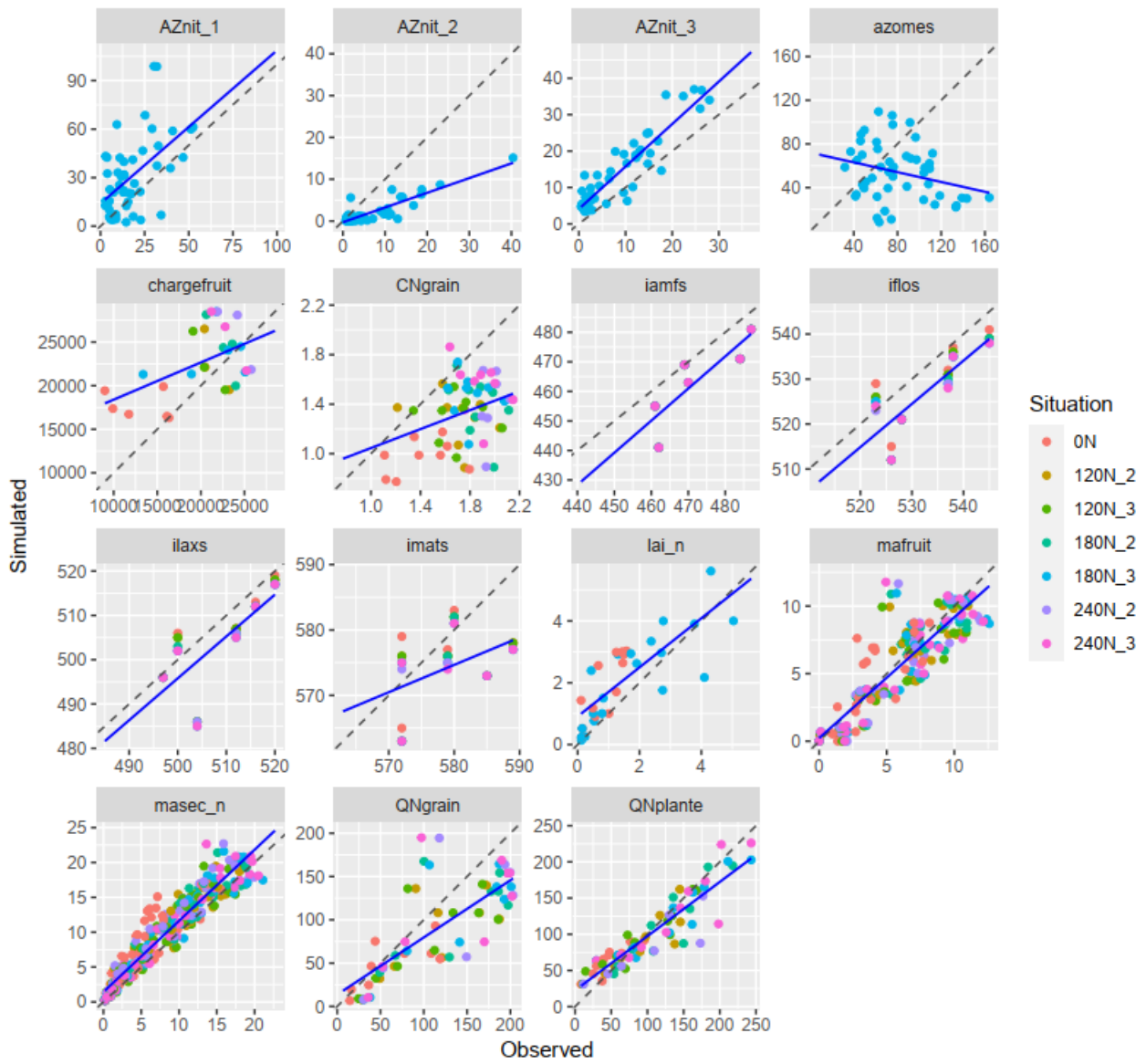


FIGURE 8 – Graphiques des différentes variables avant les calibrations.

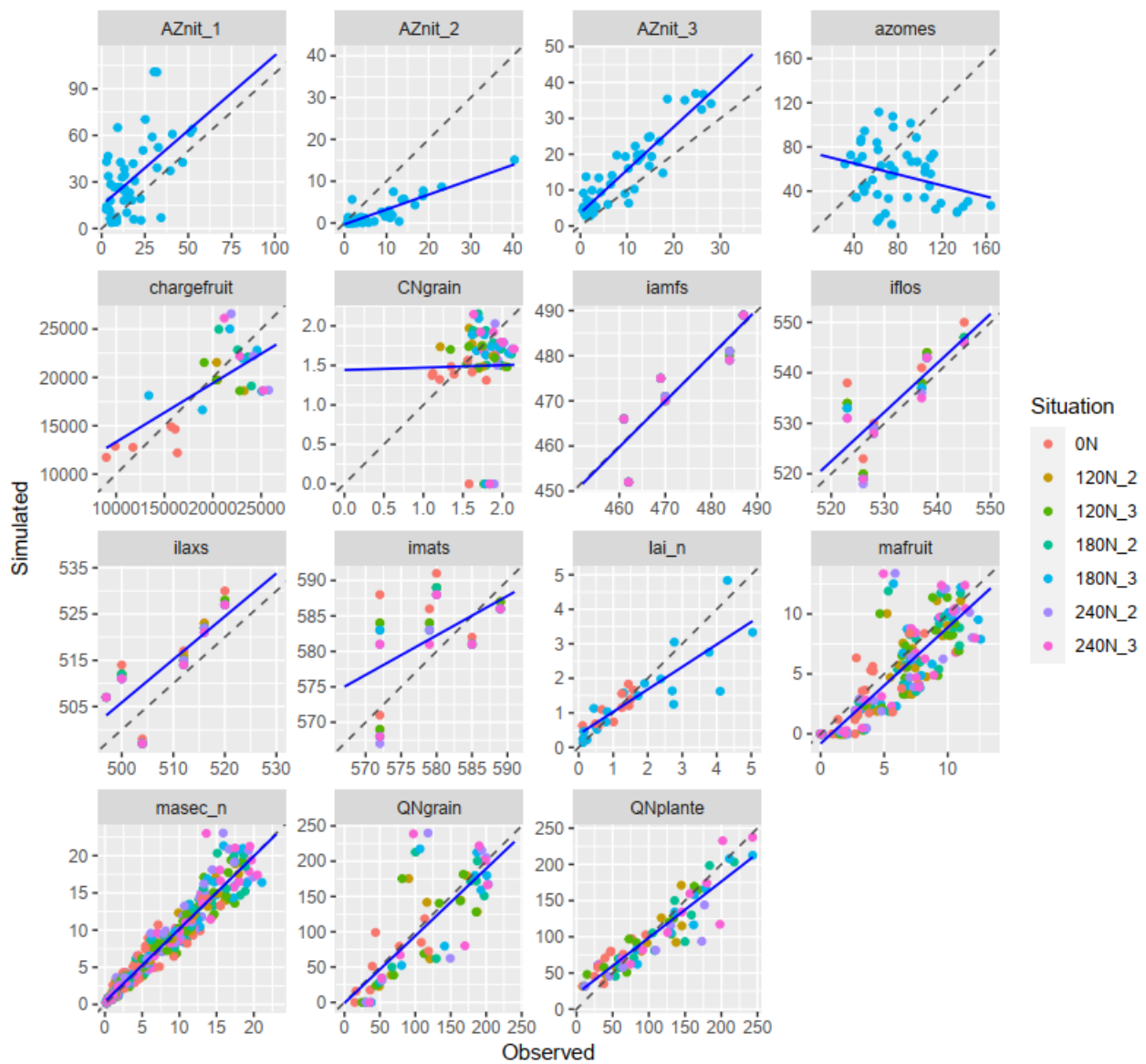


FIGURE 9 – Graphiques des différentes variables après les calibrations.

## 4.2 Résultats et discussions de la spatialisation

La spatialisation du modèle a été testée sur deux stations (Ottignies et Sombreffe) pour un total d'environ 600 sols afin d'optimiser les ressources disponibles. Chaque simulation prend entre 2 et 3 secondes et pour chaque sol, il y a un total de 200 simulations (25 années x 8 schémas de fertilisation) ce qui augmente très rapidement les temps de calcul. Les résultats se concentrent sur le rendement en grain (mafruit) et le reliquat azoté dans le sol (azomes). Ces deux paramètres ont été choisis afin de pouvoir obtenir un optimum entre la production et l'azote laissé dans le sol après la culture.

Des analyses de la variance ont été effectuées afin de voir un effet d'un des facteurs étudiés (fertilisation, station et texture du sol) sur le rendement ou le reliquat azoté. Lors de ces tests, aucune interaction triple n'a été détectée mais toutes les interactions doubles à l'exception d'une étaient très hautement significatives (Annexe 2). Il a donc été décidé de travailler uniquement selon un seul facteur qui est la fertilisation. Les conditions d'application ont été testées avec un test de Shapiro pour la normalité de la distribution et un test de Levene pour l'homogénéité des variances. Les conditions d'application n'étaient pas toujours respectées mais les tests de variance ont tout de même été effectués car le test possède une puissance suffisante.

A titre d'exemple, le test de Shapiro pour la station d'Ottignies, un sol limoneux et selon le rendement donne une p-valeur de  $1.016e-05$  et le graphique de la distribution est présenté en figure 10. La p-valeur du test de Levene est de  $3.06e-07$ .

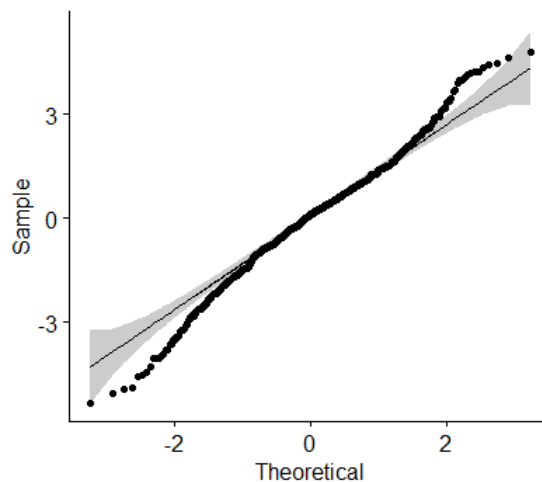


FIGURE 10 – Graphique de la distribution des résultats du rendement

### 4.2.1 Rendements et reliquats selon les classes texturales

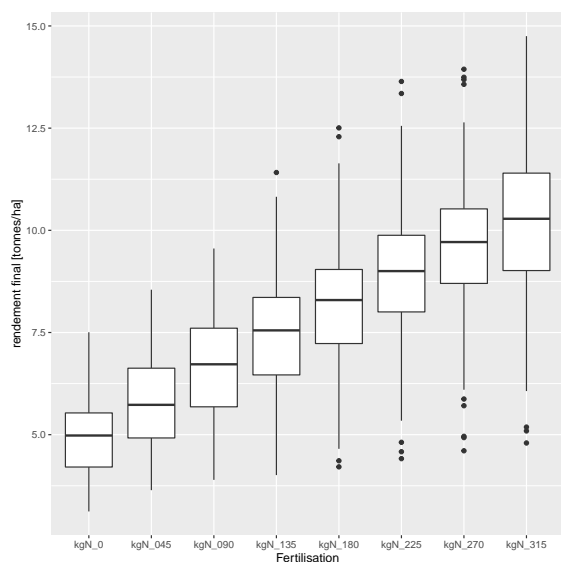
Au sein des deux stations utilisées, il n'est apparu que 6 types de sol différents sur les 11 qui étaient présents dans la base de données. Les résultats de l'analyse de la variance sont présentés à l'annexe 3. A l'exception des sols dont la texture est "limon argileux fin" de la station d'Ottignies, la fertilisation a un effet très hautement significatif sur le rendement de la culture. Il en est de même sur le reliquat azoté où toutes les valeurs sont largement inférieures à 0.001 (Annexe 4).

Les rendements en fonction des sols sont représentés dans les figures 11 et 12. Les rendements les plus élevés apparaissent dans les différents sols limoneux dans la station d'Ottignies. Pour

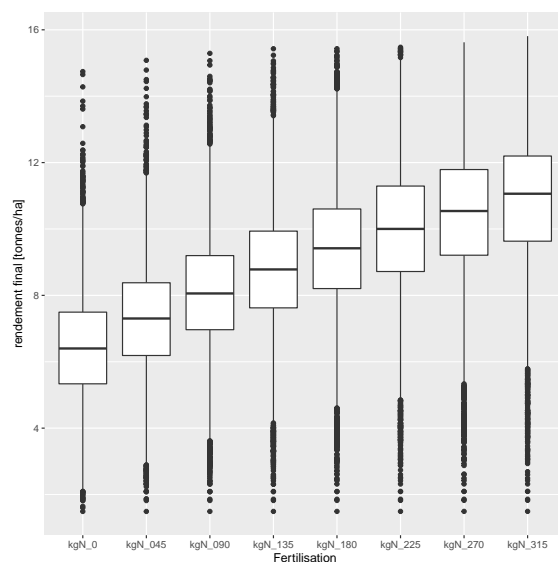
la même station, les autres types de sols ont un rendement plus faible mais avec des valeurs moins dépendantes des fertilisations. Il apparaît une moins grande croissance du rendement par rapport aux fertilisations que sur les sols limoneux.

Pour la station de Sombreffe, les rendements les plus élevés sont à nouveau à l'actif des différents sols limoneux. Les deux autres types de sol ont cette fois une croissance plus importante. Le sol argilo-limoneux a cependant une très petite production avec au meilleur un rendement de 3.5 t/ha ce qui est assez peu pour la Belgique.

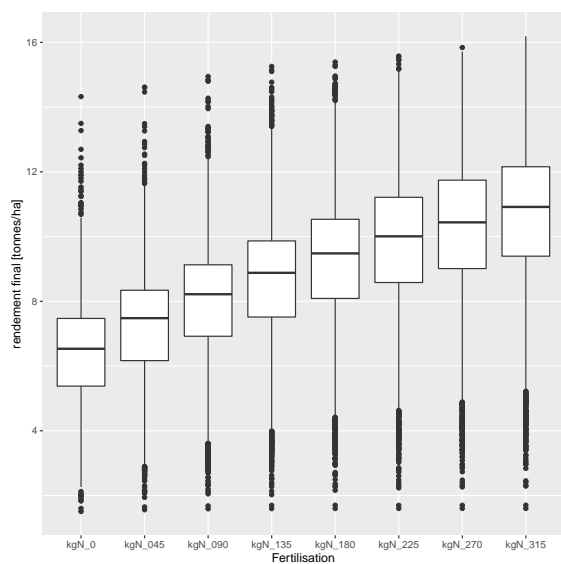
Les reliquats azotés sont présents dans les annexes 5 et 6. Les reliquats de certains sols semblent assez importants et principalement pour les sols de type limoneux fin et très fin. Des valeurs extrêmes atteignent un reliquat de plus de 500 voire 1000 kg N/ha ce qui semble tout à fait improbable. Ces résultats proviennent de sols ayant un COT assez important (autour des 10%) alors que la moyenne des sols belges est autour de 1.3%. Le reste des sols donne des valeurs plus cohérentes entre 50 et 300 kg N/ha. Ces sols ayant des COT trop élevés pourraient être retirés des données utilisées pour ne pas interférer avec les sols ayant des valeurs plus proches des moyennes.



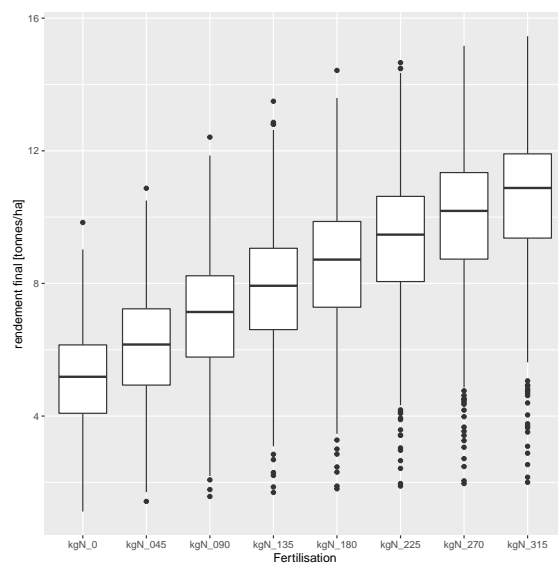
(a) Sol limoneux



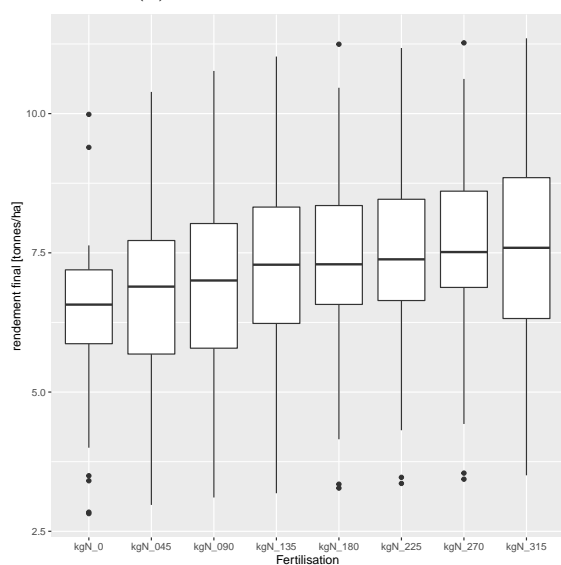
(b) Sol limoneux fin



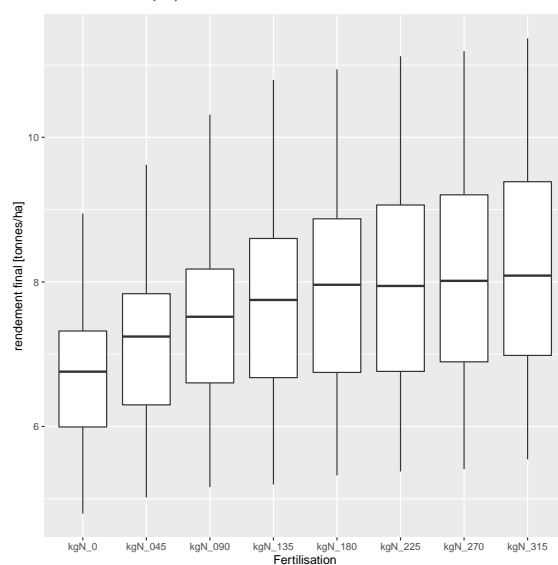
(c) Sol limoneux très fin



(d) Sol limono-sableux



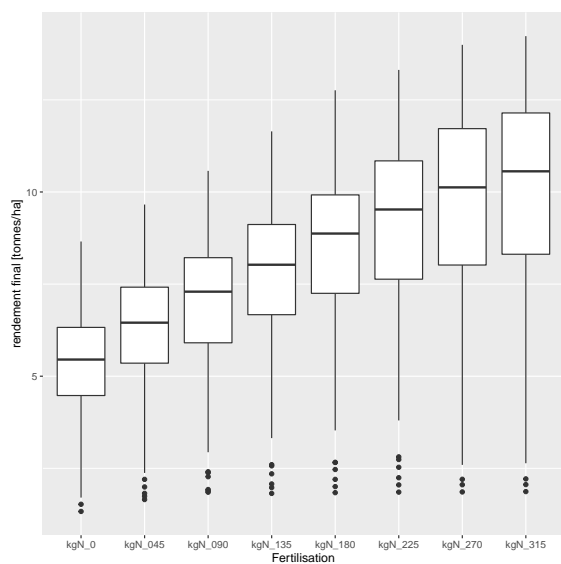
(e) Sol limono-argileux fin



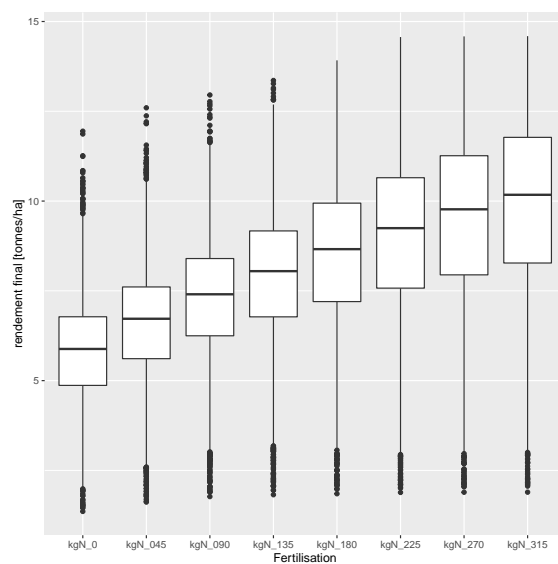
(f) Sol argilo-limoneux

FIGURE 11 – Rendement en fonction de la fertilisation et selon les textures sur la station d'Ottignies

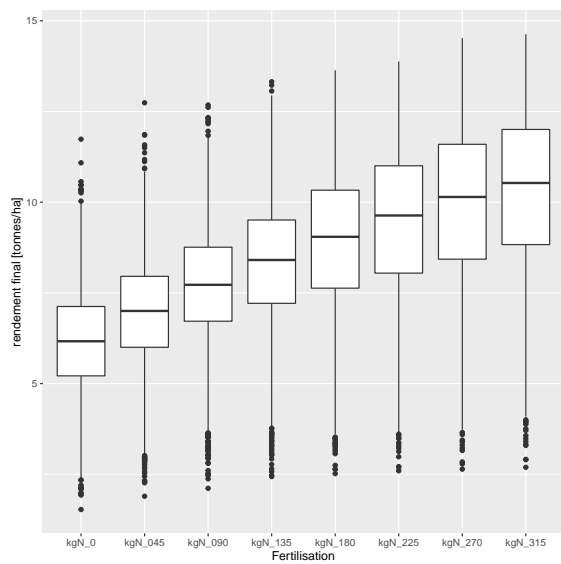




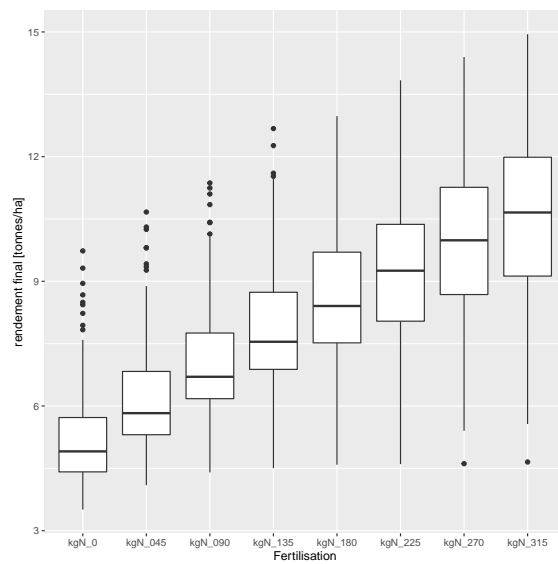
(a) Sol limoneux



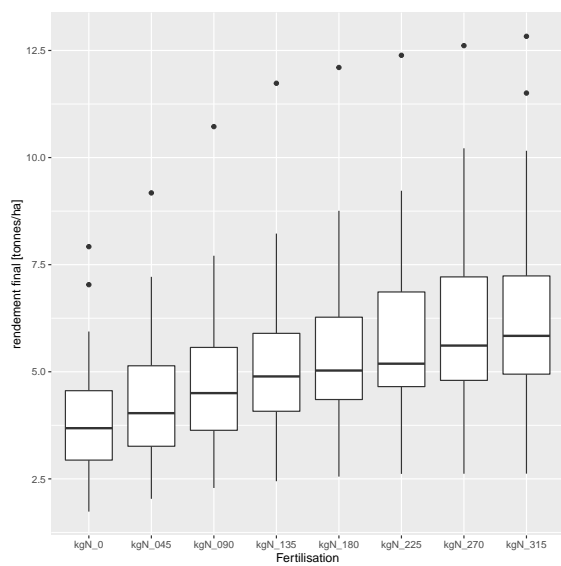
(b) Sol limoneux fin



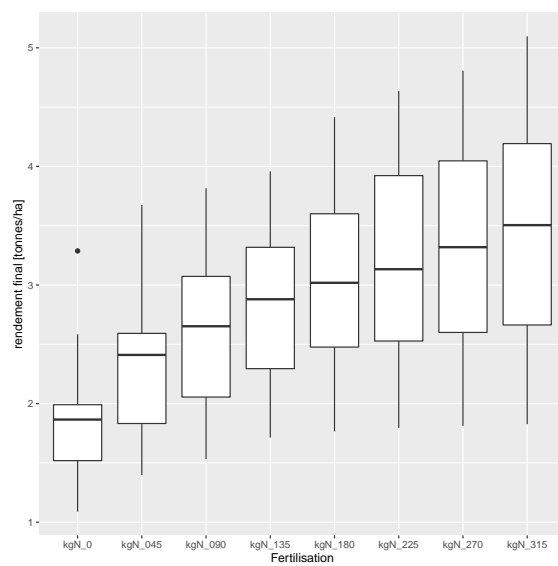
(c) Sol limoneux très fin



(d) Sol limono-sableux



(e) Sol limono-argileux fin



(f) Sol argilo-limoneux

FIGURE 12 – Rendement en fonction de la fertilisation et selon les textures sur la station de Sombreffe

## Résultats des tests SNK

Ces tests a posteriori ont pour but d'étudier les différences entre les moyennes en attribuant des groupes statistiques aux différentes valeurs. Les résultats des deux stations sont présentés dans les tableaux 21 et 22. Le but est de trouver une fertilisation où le rendement est maximum et où le reliquat azoté dans le sol est minimum.

Il est possible de trouver une valeur de fertilisation optimale pour les sols "argile limoneux" de la région d'Ottignies qui est de 45 kg N/ha. Cette valeur maximise le rendement tout en laissant un reliquat minimum. Pour le même sol dans la région de Sombreffe, l'optimum semble être de 135 kg N/ha.

Pour les sols avec la texture "limon argileux fin", l'optimum pour la région d'Ottignies semble être de 0 kg N/ha. Dans la région de Sombreffe, l'optimum semble être entre 135 et 180 kg N/ha.

Pour les autres types de sol, il est impossible de trouver un optimum car un groupe différent a été attribué pour chaque fertilisation avec quelques variations minimales.

## Discussions des tests SNK

A l'exception de deux types de sol, il n'est pas possible de trouver de solution pratique pour les autres textures présentes. La dose de 0 kg N/ha pour le sol "limon argileux fin" est assez peu représentative des pratiques agricoles actuelles. Cette dose optimise le rendement car peu importe la fertilisation, il semble que la plante ne donne pas de réponse différente. Pour le reliquat, il est considéré égal pour les doses de 0, 45 et 90 kg N/ha. Si l'agriculteur n'a aucune différence sur le rendement, il est mieux pour lui de ne pas appliquer de fertilisant car il n'aura pas de réponse significative. Ces simulations ayant été faites indépendamment les unes des autres, un effet à long terme d'un non fertilisation n'est pas pris en compte. Une application nulle de fertilisation pourrait être sans conséquence sur le rendement comme c'est le cas ici mais il faut aussi tenir compte de la rotation de cultures dans laquelle est inscrite la culture de froment. Des répercussions sur d'autres cultures pourraient avoir lieu suite à un manque d'azote dans le sol après la culture. Les groupes de reliquat étant modifiés, cela montre qu'il y a bien une dynamique de l'azote dans le sol et qu'il faudra être attentif à l'état de santé du sol après un manque d'apport.

Les autres valeurs trouvées oscillent entre 45 et 180 kg N/ha. L'optimum wallon étant de 185 kg N/ha (*Livre Blanc Céréales* 2021), il n'est pas étonnant de retrouver cette valeur citée comme résultat. Il faut rappeler que le coût économique n'a pas été pris en compte dans ce travail mais il serait intéressant de l'inclure pour apporter un résultat plus complet.

Concernant les textures de sol pour lesquelles il n'a pas été possible de trouver un optimum, les causes sont diverses. Une des premières choses à réaliser serait une calibration de la variable "azomes". Cela semble être nécessaire à la vue des figures 8 et 9 et sera à étudier pour la suite du projet dans lequel s'inscrit ce travail. Cette calibration améliorerait peut-être la réponse du modèle à l'azote restant mais cela ne changera pas le nombre de sols étudiés qui semble être l'effet le plus important. Il apparaît qu'en étudiant trop de sols en une fois, la valeur spécifique de chaque sol a été perdue et il n'est plus possible d'optimiser la fertilisation sur un grand nombre de sols. Chaque croisement entre texture et fertilisation reprend trop de données pour donner une lettre à plusieurs fertilisations différentes. Il y a donc une différence qui est repérée

pour chaque fraction azotée alors que les valeurs semblent assez proches les unes des autres. S'il n'est pas possible de travailler à l'échelle d'une texture, il est nécessaire de repasser à l'échelle des sols uniques et quelques exemples sont présentés à la suite des tableaux. Enfin, la démarche n'a été testée que pour 2 stations reprenant seulement 6 types de sol différents. Effectuer la spatialisation complète à l'échelle wallonne permettra peut-être de trouver des optimums dans d'autres stations et pour les autres types de sol. Rien ne peut donc être conclu pour ces stations à l'heure actuelle. En outre, la calibration de la plante a été réalisée selon des observations venant de la région de Gembloux. Dans le cadre de ce travail, cela ne pose pas réellement de point de discussion car les deux stations utilisées sont assez proches de cette région, l'une étant même celle du sol utilisé lors de la calibration. Néanmoins, si la spatialisation veut être complète, il serait intéressant de disposer d'observations venant d'autres centres de recherches situés à d'autres endroits de la Wallonie afin de réaliser d'autres calibrations régionales. Cela pourrait donner une significativité supplémentaire aux résultats trouvés.

Un seul itinéraire technique cultural a été testé avec une date de semis moyenne, un travail du sol conventionnel avec du labour, un apport d'azote à la surface... Le modèle permet de faire varier ces paramètres facilement et cela aurait probablement un effet sur les rendements et les reliquats azotés. Il est vrai que le modèle ne simule pas d'adventices ou de maladies mais une modification de la forme de l'azote ou de l'endroit où il est apporté aura un effet sur le prélèvement par la plante et sur le reliquat également. Le travail du sol aura un effet sur la culture, la germination ou encore l'écoulement de l'eau dans le sol. Cependant, il faut garder à l'esprit que chaque modification testée apportera un nombre important de simulations supplémentaires. Dans les conditions actuelles, la spatialisation du modèle à l'échelle de la Wallonie compte déjà plus de 800.000 simulations. Les moyens informatiques à disposition ne seront dès lors peut-être plus suffisants.

Tableau 21 – Résultats des tests SNK pour la station d'Ottignies

Fertilisation	Argile limoneux		Limon		Limon fin		Limon très fin		Limon sableux		Limon argileux fin	
	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe
315	8,15	a	10,13	a	10,84	a	10,6	a	10,52	a	7,54	a
270	8,05	a	9,51	b	10,41	b	10,2	b	9,94	b	7,48	a
225	7,92	ab	8,86	c	9,91	c	9,74	c	9,28	c	7,36	a
180	7,8	ab	8,15	d	9,36	d	9,2	d	8,57	d	7,25	a
135	7,61	ab	7,43	e	8,74	e	8,61	e	7,83	e	7,09	a
90	7,38	ab	6,63	f	8,04	f	7,93	f	7,02	f	6,87	a
45	7,13	ab	5,79	g	7,28	g	7,19	g	6,15	g	6,60	a
0	6,74	b	4,91	h	6,43	h	6,35	h	5,19	h	6,24	a
Fertilisation	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe
315	302,97	a	46,96	a	142,48	a	152,2	a	48,89	a	411,78	a
270	280,72	ab	38,71	b	128,15	b	137,15	b	40,41	b	385,49	ab
225	259,82	bc	31,45	c	115,65	c	123,94	c	33,61	c	360,76	bc
180	240,85	cd	25,25	d	104,46	d	112,06	d	27,96	d	337,75	cd
135	223,23	de	19,88	de	94,78	e	101,37	e	22,96	e	315,78	cde
90	207,40	ef	15,41	ef	85,62	f	91,88	f	19,04	f	296,99	def
45	192,88	ef	11,53	f	77,79	g	83,44	g	15,97	fg	279,59	ef
0	180,96	f	8,9	f	70,97	h	76,04	h	13,91	g	264,71	f

Tableau 22 – Résultats des tests SNK pour la station de Sombrefe

Fertilisation	Argile limoneux		Limon		Limon fin		Limon très fin		Limon sableux		Limon argileux fin	
	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe	Rendement	Groupe
315	3,46	a	10,02	a	9,85	a	10,25	a	10,51	a	6,17	a
270	3,33	ab	9,56	a	9,47	b	9,86	b	9,94	b	5,94	ab
225	3,18	ab	8,99	b	9,02	c	9,42	c	9,31	c	5,66	ab
180	3,03	abc	8,38	c	8,49	d	9,89	d	8,58	d	5,3	bc
135	2,83	bc	7,71	d	7,88	e	8,27	e	7,86	e	5,01	cd
90	2,60	cd	6,99	e	7,24	f	7,60	f	7,06	f	4,64	de
45	2,31	d	6,18	f	6,55	g	6,89	g	6,18	g	4,23	ef
0	1,84	e	5,29	g	5,78	h	6,10	h	5,22	h	3,78	f
Fertilisation	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe	Reliquat	Groupe
315	153,07	a	84,47	a	133,03	a	136,40	a	56,97	a	188,96	a
270	134,57	bc	72,24	b	117,83	b	120,80	b	46,54	b	170,65	ab
225	117,80	cd	61,95	c	104,22	c	106,77	c	38,10	c	153,86	bc
180	102,95	de	53,36	cd	92,34	d	94,45	d	30,93	d	138,50	cd
135	90,23	ef	45,43	de	81,72	e	83,56	e	24,13	e	124,18	def
90	79,73	ef	38,31	ef	71,84	f	73,48	f	18,75	f	110,98	ef
45	70,84	fg	32,55	f	62,93	g	64,23	g	14,44	fg	98,88	f
0	63,94	g	28,56	f	55,67	h	56,68	h	11,93	g	88,27	f

## 4.2.2 Optimisation de la fertilisation à l'échelle d'un sol unique

Comme la technique générale sur plusieurs sols ayant la même texture et dépendant de la même station météorologique n'a pas été concluante, le travail doit être réalisé à une échelle inférieure qui est celle d'un sol en lui-même. Il faudrait trouver un optimum de fertilisation pour chaque sol et puis remonter au niveau de la texture pour trouver la fertilisation qui correspond le mieux selon les résultats trouvés pour chaque sol.

### Exemple sur le sol utilisé lors de la calibration

Le premier sol étudié est le sol utilisé pour la calibration (130EP003). Ce sol est de type "limon fin" avec un COT de 1.4% et un pH de 6 pour le premier horizon qui s'étend de 0 à 28 cm. L'analyse de la variance à un critère montre une influence très hautement significative du facteur fertilisation sur le rendement et sur le reliquat azoté (Annexe 7). Les résultats des tests SNK sont présentés dans le tableau 23. Les groupes statistiques comptent moins de lettres que les résultats précédents. Il est ici possible de trouver un croisement entre le rendement et le reliquat où la fertilisation serait entre 135 et 180 kg N/ha qui sont des valeurs pratiquées en région wallonne. En effet, pour le rendement, il n'y a pas de différence de groupe entre les fractions 180 à 315 kg N/ha car elles possèdent toutes la lettre "a". Du point de vue du reliquat, il n'y a pas de différence significative entre les fractions 0 à 135 kg N/ha car la lettre "e" y est présente. En travaillant sur un sol unique, on retrouve la spécificité que l'on pouvait espérer en travaillant à une plus haute échelle et des résultats plus pratiques.

Tableau 23 – Résultats des tests SNK sur le sol utilisé lors de la calibration.

130EP003		
Fertilisation	Rendement	Groupe
315	9.91	a
270	9.49	a
225	9.06	ab
180	8.53	ab
135	7.88	bc
90	7.20	cd
45	6.48	de
0	5.68	e
Fertilisation	Reliquat	Groupe
315	144.89	a
270	128.97	ab
225	114.03	bc
180	99.84	cd
135	89.27	cde
90	79.04	de
45	69.11	e
0	60.90	e

### Exemple du même principe sur un autre sol

Le deuxième sol étudié selon cette technique est le sol "116WP026" qui est un sol limono-sableux

et dépendant de la station météorologique d'Ottignies. Ce sol possède un COT de 1.6% et un pH de 5.5 pour le premier horizon s'étendant de 0 à 28cm. L'analyse de la variance selon la fertilisation sur le rendement et le reliquat se montre à nouveau très hautement significative. Les résultats des test SNK sont présentés dans le tableau 24. Cette fois, il est possible d'isoler une fertilisation optimale pour maximiser le rendement et minimiser le reliquat qui est la fertilisation de 135 kg N/ha. Au niveau du rendement, la fertilisation optimale n'est pas statistiquement différente de la fertilisation maximale de 315 kg N/ha. Quant au reliquat, il est lui aussi, non significativement différent d'une fertilisation nulle.

Tableau 24 – Résultats des tests SNK sur un sol de la région d'Ottignies.

116WP026		
Fertilisation	Rendement	Groupe
315	4.99	a
270	4.69	ab
225	4.42	ab
180	4.18	abc
135	3.9	abcd
90	3.56	bcd
45	3.21	cd
0	2.83	d
Fertilisation	Reliquat	Groupe
315	57.10	a
270	49.79	ab
225	42.99	abc
180	97.17	bcd
135	31.38	cde
90	26.41020	cde
45	21.98	de
0	18.77	e

### Discussion de la technique d'optimisation par sols uniques

L'utilisation de cette technique est plus chronophage mais permet de retrouver l'information et les spécificités propres à chaque sol. Des groupes statistiques tels que trouvés au niveau de chaque texture pourraient se retrouver mais cela sera moins fréquent car il n'y a pas autant de données et les conséquences ne sont pas les mêmes. Si pour un sol, les groupes devaient tous être différents, il pourrait être possible de ne pas tenir compte de ce sol et de n'utiliser que les autres pour trouver un optimum pour la texture et la station dont il est question. De plus, toutes les textures de toutes les stations ne seront pas à analyser. Des optimums sont trouvés dès les tests généraux ce qui permet de ne pas devoir analyser chaque sol présent dans la base de données.

## 5 Conclusions

Le but de ce travail était de calibrer le modèle STICS à l'échelle wallonne et de le spatialiser afin d'optimiser le fractionnement azoté sur le froment d'hiver selon la texture du sol et la situation géographique.

La calibration a été réalisée sur le sol de Gembloux qui était le plus proche des données d'observation disponibles. Les résultats étant satisfaisants, la calibration a pu être validée et utilisée dans la spatialisation du modèle. Certains paramètres, surtout au niveau de la phénologie, ont été plus compliqués à optimiser en raison de l'origine des données qui n'étaient pas des réelles données observées. Cependant, cette calibration reste unique pour la taille de la Wallonie. Ce n'est pas un grand territoire mais il serait intéressant de réaliser des calibration régionales avec des données venant d'autres stations de recherches agronomiques. Cela apporterait vraisemblablement une meilleure réponse du modèle pour les régions concernées. Pour terminer cette partie, il semble qu'une calibration de la variable reprenant l'azote dans le sol s'avèrera nécessaire. Celle-ci n'a pas été réalisée mais selon les graphiques présentés, cela ajustera mieux les données pour l'optimisation de la fertilisation.

Ensuite, les résultats de la spatialisation ont montré un effet largement significatif de la fertilisation sur le rendement et le reliquat laissé dans le sol après la récolte. Les rendements sont assez proches de la réalité grâce à la calibration sauf sur un type de sol où des modifications devront probablement être faites. Les niveaux de reliquat de certains sols sont également trop élevés pour certaines textures et il serait intéressant de réaliser un tri supplémentaire dans les sols disponibles afin d'écarter les sols ayant un COT trop élevé.

Concernant l'optimisation de l'azote, la spatialisation n'a pas donné les résultats attendus étant donné la quantité importante de sols utilisés dans le travail. Le nombre élevé de sols n'a pas permis de distinguer des groupes de rendement ou de reliquat selon les fertilisations apportées pour toutes les textures présentes. Il apparaît que le travail d'optimisation doit être réalisé à l'échelle d'un sol et non à un niveau plus élevé. Le modèle STICS reste un outil que l'on doit utiliser en soutien et ne pas considérer comme l'exacte vérité. Des erreurs seront toujours possibles et ce sera à l'utilisateur d'interpréter les résultats avec le recul nécessaire.

En conclusion, la spatialisation du modèle STICS pour la Wallonie a été testée et les résultats sont satisfaisants. L'optimisation de la fertilisation azotée s'avère être légèrement plus compliquée mais le travail par sol et les modifications proposées semblent apporter des solutions pertinentes.



## 6 Bibliographie

### Références

- ARANGUREN, M., A. CASTELLÓN et A. AIZPURUA (2020). « Crop Sensor Based Non-destructive Estimation of Nitrogen Nutritional Status, Yield, and Grain Protein Content in Wheat ». In : *Agriculture* 10.5, p. 148. DOI : 10.3390/agriculture10050148.
- BASSO, B., D. CAMMARANO, D. CHEN, G. CAFIERO, M. AMATO, G. BITELLA, R. ROSSI et F. BASSO (2009). « Landscape Position and Precipitation Effects on Spatial Variability of Wheat Yield and Grain Protein in Southern Italy ». In : *Journal of Agronomy and Crop Science* 195.4, p. 301-312. DOI : 10.1111/j.1439-037X.2008.00351.x.
- BASSO, B. et J. T. RITCHIE (2005). « Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize–alfalfa rotation in Michigan ». In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 108.4, p. 329-341. DOI : 10.1016/j.agee.2005.01.011.
- BEAUDOIN, N., N. GALLOIS, P. VIENNOT, C. LE BAS, T. PUECH, C. SCHOTT, S. BUIS et B. MARY (2018). « Evaluation of a spatialized agronomic model in predicting yield and N leaching at the scale of the Seine-Normandie Basin ». In : *Environmental Science and Pollution Research* 25.24. DOI : 10.1007/s11356-016-7478-3.
- BERNOUX, M., C. CERRI, D. ARROUAYS, C. JOLIVET et B. VOLKOFF (1998). « Bulk Densities of Brazilian Amazon Soils Related to Other Soil Properties ». In : *Soil Science Society of America Journal* 62.3, p. 743-749. DOI : 10.2136/sssaj1998.03615995006200030029x.
- BLACKSHAW, R. E. (2004). « Application method of nitrogen fertilizer affects weed growth and competition with winter wheat ». In : *Weed Biology and Management* 4.2, p. 103-113. DOI : 10.1111/j.1445-6664.2004.00126.x.
- BOURDIN, F., F. MORELL, D. COMBEMALE, P. CLASTRE, M. GUÉRIF et A. CHANZY (2017). « A tool based on remotely sensed LAI, yield maps and a crop model to recommend variable rate nitrogen fertilization for wheat ». In : *Advances in Animal Biosciences* 8.2, p. 672-677. DOI : 10.1017/S2040470017000887.
- BRENTROP, F. et C. PALLIERE (2010). « Nitrogen Use Efficiency as an Agro- Environmental Indicator ». In : OECD Workshop on Agri-Environmental Indicators. Leysin, Switzerland, 23-26 March 2010.
- BRISSON, N., M. LAUNAY, B. MARY et N. BEAUDOIN (2008). *Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model*. OCLC : 800287311. Paris : Editions Quae. ISBN : 978-2-7592-0290-4.
- BUIS, S., M. GINER, P. LECHARPENTIER et STICSRPACKS (2021). *CroptimizR : A Package for Parameter Estimation, Uncertainty and Sensitivity Analysis for Crop Models*. <https://github.com/SticsRPacks/CroptimizR>, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4066451>.
- CORMIER, F., S. FAURE, P. DUBREUIL, E. HEUMEZ, K. BEAUCHÊNE, S. LAFARGE, S. PRAUD et J. LE GOUIS (2013). « A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.) » In : *Theoretical and Applied Genetics* 126.12, p. 3035-3048. DOI : 10.1007/s00122-013-2191-9.
- CRAIN, J. L., K. M. WALDSCHMIDT et W. R. RAUN (2013). « Small-Scale Spatial Variability in Winter Wheat Production ». In : *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44.19, p. 2830-2838. DOI : 10.1080/00103624.2013.812735.

- De VRIES, W., A. LEIP, G. REINDS, J. KROS, J. LESSCHEN et A. BOUWMAN (2011). « Comparison of land nitrogen budgets for European agriculture by various modeling approaches ». In : *Environmental Pollution* 159.11, p. 3254-3268. DOI : 10.1016/j.envpol.2011.03.038.
- DUMONT, B., B. BASSO, B. BODSON, J.-P. DESTAIN et M.-F. DESTAIN (2016). « Assessing and modeling economic and environmental impact of wheat nitrogen management in Belgium ». In : *Environmental Modelling & Software* 79, p. 184-196. DOI : 10.1016/j.envsoft.2016.02.015.
- DUMONT, B., B. BASSO, J.-P. DESTAIN, W. MEZA MORALES et B. BODSON (2018). « Développement d'un système d'aide à la décision multicritère pour l'optimisation de la fertilisation azotée ». In : Phloème 2018 - Premières Biennales de l'innovation céréalière. Paris, France.
- DUMONT, B., B. BASSO, V. LEEMANS, B. BODSON, J.-P. DESTAIN et M.-F. DESTAIN (2015). « Systematic analysis of site-specific yield distributions resulting from nitrogen management and climatic variability interactions ». In : *Precision Agriculture* 16.4, p. 361-384. DOI : 10.1007/s11119-014-9380-7.
- DUMONT, B., F. VANCUTSEM, B. SEUTIN, B. BODSON, J.-P. DESTAIN et M.-F. DESTAIN (2012). « Simulation de la croissance du blé à l'aide de modèles écophysologiques : synthèse bibliographique des méthodes, potentialités et limitations ». In : *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, p. 11.
- FAO (2019). URL : <https://www.fao.org/> (visité le 09/12/2021).
- FRY, J., A. GUBER, M. LADONI, J. D. MUNOZ et A. N. KRAVCHENKO (2017). « The effect of up-scaling soil properties and model parameters on predictive accuracy of DSSAT crop simulation model under variable weather conditions ». In : *Geoderma* 287, p. 105-115. DOI : 10.1016/j.geoderma.2016.08.012.
- GENOT, V., G. COLINET, V. BRAHY et L. BOCK (2009). « L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4 - sol 1 de "L'Etat de l'Environnement wallon 2006-2007") ». In : *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, p. 18.
- GOBIN, A. (2018). « Weather related risks in Belgian arable agriculture ». In : *Agricultural Systems* 159, p. 225-236. DOI : 10.1016/j.agry.2017.06.009.
- GUÉRIF, M., V. HOULÈS, B. MARY, N. BEAUDOIN, J. M. MACHET, S. MOULIN et B. NICOUILLAUD (2007). *Modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé fondée sur le modèle de culture Stics et des indicateurs agroenvironnementaux*. P. 225-248.
- GUILLAUME, S., J.-E. BERGEZ, D. WALLACH et E. JUSTES (2011). « Methodological comparison of calibration procedures for durum wheat parameters in the STICS model ». In : *European Journal of Agronomy* 35.3, p. 115-126. DOI : 10.1016/j.eja.2011.05.003.
- HANSEN, S. (2002). *Daisy, a flexible Soil-Plant-Atmosphere system Model*, p. 47.
- INRA (2017). URL : <https://www6.paca.inrae.fr/stics/> (visité le 26/11/2021).
- JÉGO, G., J. SÁNCHEZ-PÉREZ et E. JUSTES (2012). « Predicting soil water and mineral nitrogen contents with the STICS model for estimating nitrate leaching under agricultural fields ». In : *Agricultural Water Management* 107, p. 54-65. DOI : 10.1016/j.agwat.2012.01.007.
- KUMHÁLOVÁ, J., P. NOVÁK et M. MADARAS (2018). « Monitoring Oats and Winter Wheat Within-Field Spatial Variability by Satellite Images ». In : *Scientia Agriculturae Bohemica* 49.2, p. 127-135. DOI : 10.2478/sab-2018-0018.
- LANCASHIRE, P. D., H. BLEIHOLDER, T. V. D. BOOM, P. LANGELÜDDEKE, R. STAUSS, E. WEBER et A. WITZENBERGER (1991). « A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds ». In : *Annals of Applied Biology* 119.3, p. 561-601. DOI : 10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x.

- LEGRAIN, X., P. DEMARCIN, G. COLINET et L. BOCK (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 ». In : *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, p. 10.
- LEMAIRE, G., M.-H. JEUFFROY et F. GASTAL (2008). « Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage ». In : *European Journal of Agronomy* 28.4, p. 614-624. DOI : 10.1016/j.eja.2008.01.005.
- LITKE, L., Z. GAILE et A. RUŽA (2018). « Effect of nitrogen fertilization on winter wheat yield and yield quality ». In : *Agronomy Research*, p. 10. DOI : 10.15159/AR.18.064.
- LIU, D. et Y. SHI (2013). « Effects of Different Nitrogen Fertilizer on Quality and Yield in Winter Wheat ». In : *Advance Journal of Food Science and Technology* 5.5, p. 646-649. DOI : 10.19026/ajfst.5.3141.
- Livre Blanc Céréales* (2021). URL : <https://www.livre-blanc-cereales.be/> (visité le 02/10/2021).
- LOGANATHAN, P. (1987). *Soil quality considerations in the selection of sites for aquaculture*.
- MARTRE, P., D. WALLACH, S. ASSENG, F. EWERT, J. W. JONES, R. P. RÖTTER, K. J. BOOTE, A. C. RUANE, P. J. THORBURN, D. CAMMARANO, J. L. HATFIELD, C. ROSENZWEIG, P. K. AGGARWAL, C. ANGULO, B. BASSO, P. BERTUZZI, C. BIERNATH, N. BRISSON, A. J. CHALLINOR, J. DOLTRA, S. GAYLER, R. GOLDBERG, R. F. GRANT, L. HENG, J. HOOKER, L. A. HUNT, J. INGWERSEN, R. C. IZAURRALDE, K. C. KERSEBAUM, C. MÜLLER, S. N. KUMAR, C. NENDEL, G. O'LEARY, J. E. OLESEN, T. M. OSBORNE, T. PALOSUO, E. PRIESACK, D. RIPOCHE, M. A. SEMENOV, I. SHCHERBAK, P. STEDUTO, C. O. STÖCKLE, P. STRATONOVITCH, T. STRECK, I. SUPIT, F. TAO, M. TRAVASSO, K. WAHA, J. W. WHITE et J. WOLF (2015). « Multimodel ensembles of wheat growth : many models are better than one ». In : *Global Change Biology* 21.2, p. 911-925. DOI : 10.1111/gcb.12768.
- MONTEITH, J. L. (1972). « Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems ». In : *Journal of Applied Ecology* 9.3, p. 747-766.
- NELDER, J. A. et R. MEAD (1965). « A Simplex Method for Function Minimization ». In : *The Computer Journal* 7.4, p. 308-313. DOI : 10.1093/comjnl/7.4.308.
- PALOSUO, T., K. C. KERSEBAUM, C. ANGULO, P. HLAVINKA, M. MORIONDO, J. E. OLESEN, R. H. PATIL, F. RUGET, C. RUMBAUR, J. TAKÁČ, M. TRNKA, M. BINDI, B. ÇALDAĞ, F. EWERT, R. FERRISE, W. MIRSCHEL, L. ŞAYLAN, B. ŠIŠKA et R. RÖTTER (2011). « Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe : A comparison of eight crop growth models ». In : *European Journal of Agronomy* 35.3, p. 103-114. DOI : 10.1016/j.eja.2011.05.001.
- R CORE TEAM (2020). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- RAUN, W. R. et J. S. SCHEPERS (2008). « Nitrogen Management for Improved Use Efficiency ». In : *Agronomy Monographs*. Sous la dir. de J. S. SCHEPERS et W. R. RAUN. Madison, WI, USA : American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, p. 675-693. DOI : 10.2134/agronmonogr49.c17.
- RAUN, W. R. et G. V. JOHNSON (1999). « Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production ». In : *Agronomy Journal* 91.3, p. 357-363. DOI : 10.2134/agronj1999.00021962009100030001x.
- Réseau Pameseb* (2021). URL : <https://agromet.be/fr/reseau-pameseb/> (visité le 06/10/2021).

- RICHARD, G. et P. CELLIER (1998). « Effect of tillage on bare soil energy balance and thermal regime : an experimental study ». In : *Agronomie* 18.3, p. 163-181. DOI : 10.1051/agro:19980301.
- RITCHIE, J. T. (1972). « Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover ». In : *Water Resources Research* 8.5, p. 1204-1213. DOI : 10.1029/WR008i005p01204.
- RITCHIE J.T., O. S. (1984). « Description and performance of CERES-Wheat, a user oriented wheat yield model ». In : *USDA-ARS-SR*, p. 159-175.
- RÖTTER, R. P., T. PALOSUO, K. C. KERSEBAUM, C. ANGULO, M. BINDI, F. EWERT, R. FERRISE, P. HLAVINKA, M. MORIONDO, C. NENDEL, J. E. OLESEN, R. H. PATIL, F. RUGET, J. TAKÁČ et M. TRNKA (2012). « Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe : A comparison of nine crop models ». In : *Field Crops Research* 133, p. 23-36. DOI : 10.1016/j.fcr.2012.03.016.
- SCHILS, R., J. E. OLESEN, K.-C. KERSEBAUM, B. RIJK, M. OBERFORSTER, V. KALYADA, M. KHITRYKAU, A. GOBIN, H. KIRCHEV, V. MANOLOVA, I. MANOLOV, M. TRNKA, P. HLAVINKA, T. PALOSUO, P. PELTONEN-SAINIO, L. JAUHAINEN, J. LORGEOU, H. MARROU, N. DANALATOS, S. ARCHONTOULIS, N. FODOR, J. SPINK, P. ROGGERO, S. BASSU, A. PULINA, T. SEEHUSEN, A. UHLEN, K. ŻYŁOWSKA, A. NIERÓBCA, J. KOZYRA, J. SILVA, B. MAÇÃS, J. COUTINHO, V. ION, J. TAKÁČ, M. I. MÍNGUEZ, H. ECKERSTEN, L. LEVY, J. HERRERA, J. HILTBRUNNER, O. KRYVOBOK, O. KRYVOSHEIN, R. SYLVESTER-BRADLEY, D. KINDRED, C. TOPP, H. BOOGAARD, H. de GROOT, J. LESSCHEN, L. van BUSSEL, J. WOLF, M. ZIJLSTRA, M. P. van LOON et M. van ITTERSUM (2018). « Cereal yield gaps across Europe ». In : *European Journal of Agronomy* 101, p. 109-120. DOI : 10.1016/j.eja.2018.09.003.
- SEMENOV, M. A., P. JAMIESON et P. MARTRE (2007). « Deconvoluting nitrogen use efficiency in wheat : A simulation study ». In : *European Journal of Agronomy* 26.3, p. 283-294. DOI : 10.1016/j.eja.2006.10.009.
- SEMENOV, M., P. STRATONOVITCH, F. ALGHABARI et M. GOODING (2014). « Adapting wheat in Europe for climate change ». In : *Journal of Cereal Science* 59.3, p. 245-256. DOI : 10.1016/j.jcs.2014.01.006.
- SINGH, A. K., R. TRIPATHY et U. CHOPRA (2008). « Evaluation of CERES-Wheat and Crop-Syst models for water–nitrogen interactions in wheat crop ». In : *Agricultural Water Management* 95.7, p. 776-786. DOI : 10.1016/j.agwat.2008.02.006.
- STUDNICKI, M., M. WIJATA, G. SOBCZYŃSKI, S. SAMBORSKI et J. GOZDOWSKI D.and Rozbicki (2016). « Effect of genotype, environment and crop management on yield and quality traits in spring wheat ». In : *Journal of Cereal Science* 72, p. 30-37. DOI : 10.1016/j.jcs.2016.09.012.
- SZABÓ, B., M. WEYNANTS et T. K. D. WEBER (2021). « Updated European hydraulic pedo-transfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (euptfv2) ». In : *Geoscientific Model Development* 14.1, p. 151-175. DOI : 10.5194/gmd-14-151-2021.
- TAULEMESSE, F. (2015). « Analyse écophysiological et génétique de l'absorption d'azote post-floraison chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) en relation avec la concentration en protéines des grains ». In : p. 195.
- TUBAÑA, B. S., D. B. ARNALL, S. L. HOLTZ, J. B. SOLIE, K. GIRMA et W. R. RAUN (2008). « Effect of Treating Field Spatial Variability in Winter Wheat at Different Resolutions ». In : *Journal of Plant Nutrition* 31.11, p. 1975-1998. DOI : 10.1080/01904160802403144.

- VANDENBERGHE, C., M. D. TOFFOLI, F. BACHELART, O. IMBRECHT, R. LAMBERT et J.-M. MARCOEN (2013). « Contrôle de l'azote potentiellement lessivable dans le sol en début de période de lixiviation. Établissement des valeurs de référence ». In : *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, p. 6.
- VEZY, R., S. BUIS, P. LE CHARPENTIER et M. GINER (2020). *SticsRPacks : Easily Install and Load 'SticsRPacks' Packages*. <https://github.com/SticsRPacks/SticsRPacks>.
- VINCENT, Q., C. CHARTIN, I. KRÜGER, B. van WESEMAEL et M. CARNOL (2019). « La qualité biologique et le carbone organique des sols agricoles en Wallonie ». In : p. 38.
- WAEYAERT, N. (2020). *Chiffres clés de l'agriculture*. Statbel.
- WALLACH, D. (2011). « Crop Model Calibration : A Statistical Perspective ». In : *Agronomy Journal* 103.4, p. 1144-1151. DOI : 10.2134/agronj2010.0432.
- WALLACH, D., D. MAKOWSKI, J. W. JONES et F. BRUN (2006). *Working with dynamic crop models : evaluation, analysis, parameterization, and applications*. Elsevier.
- WALLACH, D., T. PALOSUO, P. THORBURN, Z. HOCHMAN, E. GOURDAIN, F. ANDRIANASOLO, S. ASSENG, B. BASSO, S. BUIS, N. CROUT, C. DIBARI, B. DUMONT, R. FERRISE, T. GAISER, C. GARCIA, S. GAYLER, A. GHAHRAMANI, S. HIREMATH, S. HOEK, H. HORAN, G. HOOGENBOOM, M. HUANG, M. JABLON, P.-E. JANSSON, Q. JING, E. JUSTES, K. C. KERSEBAUM, A. KLOSTERHALFEN, M. LAUNAY, E. LEWAN, Q. LUO, B. MAESTRINI, H. MIELENZ, M. MORIONDO, H. NARIMAN ZADEH, G. PADOVAN, J. E. OLESEN, A. POYDA, E. PRIESACK, J. W. M. PULLENS, B. QIAN, N. SCHÜTZE, V. SHELIA, A. SOUISSI, X. SPECKA, A. K. SRIVASTAVA, T. STELLA, T. STRECK, G. TROMBI, E. WALLOR, J. WANG, T. K. WEBER, L. WEIHERMÜLLER, A. de WIT, T. WÖHLING, L. XIAO, C. ZHAO, Y. ZHU et S. J. SEIDEL (2021). « The chaos in calibrating crop models : Lessons learned from a multi-model calibration exercise ». In : *Environmental Modelling & Software* 145, p. 105206. DOI : 10.1016/j.envsoft.2021.105206.
- WEIR, A. H., P. L. BRAGG, J. R. PORTER et J. H. RAYNER (1984). « A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations ». In : *The Journal of Agricultural Science* 102.2, p. 371-382. DOI : 10.1017/S0021859600042702.
- WHITE, J. W., G. HOOGENBOOM, B. KIMBALL et G. W. WALL (2011). « Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production ». In : *Field Crops Research* 124.3, p. 357-368. DOI : 10.1016/j.fcr.2011.07.001.
- WITZENBERGER, A., H. HACK et T. BOOM (1989). « Erläuterungen zum BBCH-Dezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides—Mit Abbildungen ». In : *Gesunde Pflanzen* 41, p. 384-388.
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG et C. F. KONZAK (1974). « A decimal code for the growth stages of cereals ». In : *Weed research* 14.6. Place : [Oxford, England] : Publisher : Blackwell Science.

## 7 Annexes

### 7.1 Annexe 1 : Liste des stations météorologiques utilisées

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

### 7.2 Annexe 2 : Analyse statistique générale

[1] "anova 3 pour le rdt"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
texture	5	13373	2675	628.214	< 2e-16 ***
NFrac	7	223028	31861	7483.720	< 2e-16 ***
IDstat	1	12040	12040	2827.965	< 2e-16 ***
texture:NFrac	35	1408	40	9.451	< 2e-16 ***
texture:IDstat	5	4213	843	197.918	< 2e-16 ***
NFrac:IDstat	7	161	23	5.394	3.38e-06 ***
texture:NFrac:IDstat	35	74	2	0.497	0.994
Residuals	113104	481528	4		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

[1] "anova 3 pour le reliquat"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
texture	5	38362082	7672416	1251.900	<2e-16 ***
NFrac	7	66082035	9440291	1540.362	<2e-16 ***
IDstat	1	5308521	5308521	866.186	<2e-16 ***
texture:NFrac	35	994454	28413	4.636	<2e-16 ***
texture:IDstat	5	7736537	1547307	252.473	<2e-16 ***
NFrac:IDstat	7	79629	11376	1.856	0.0723 .

```

texture:Nfrac:IDstat      35      74857      2139      0.349 0.9999
Residuals                 113104 693171108      6129
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

### 7.3 Annexe 3 : Résultats de l'analyse de la variance sur le rendement

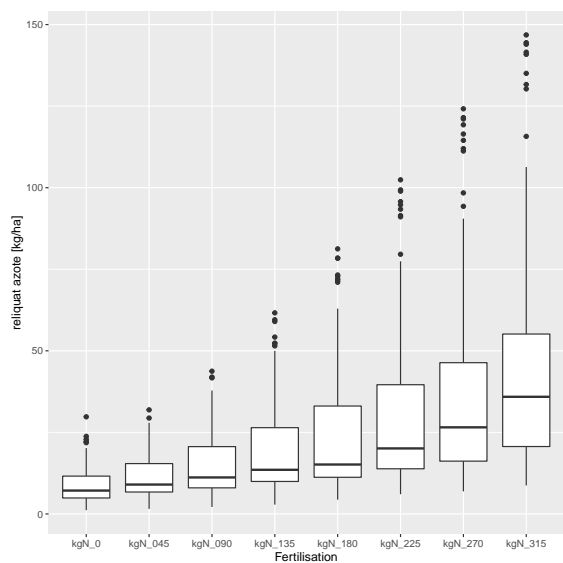
<b>Ottignies</b>	Facteurs	DF	Sum Squarred	Mean Squarred	F value	p-value
Argile limoneux	Nfrac	7	41.5	5.922	2.767	0.00921**
	Résidus	192	410.9	2.140		
Limon	Nfrac	7	2334	333.4	135.6	<2e-16***
	Résidus	792	1947	2.5		
Limon fin	Nfrac	7	73016	10431	2436	<2e-16***
	Résidus	34792	148797	4		
Limon très fin	Nfrac	7	45160	6451	1337	<2e-16***
	Résidus	23192	111894	5		
Limon sableux	Nfrac	7	9741	1391.5	339.9	<2e-16***
	Résidus	3192	13067	4.1		
Limon argileux fin	Nfrac	7	36.4	5.205	1.418	0.2
	Résidus	192	704.6	3.670		
<b>Ottignies</b>	Facteurs	DF	Sum Squarred	Mean Squarred	F value	p-value
Argile limoneux	Nfrac	7	53.22	7.603	13.54	3.49e-14***
	Résidus	192	107.78	0.561		
Limon	Nfrac	7	2888	412.6	77.97	<2e-16***
	Résidus	1192	6307	5.3		
Limon fin	Nfrac	7	67037	9577	2327	<2e-16***
	Résidus	36992	152255	4		
Limon très fin	Nfrac	7	19201	2743	688.7	<2e-16***
	Résidus	10192	40591	4		
Limon sableux	Nfrac	7	4794	684.9	275.5	<2e-16***
	Résidus	1592	3958	2.5		
Limon argileux fin	Nfrac	7	369.5	52.78	21	<2e-16***
	Résidus	592	1487.9	2.51		

## 7.4 Annexe 4 : Résultats de l'analyse de la variance sur le reliquat azoté

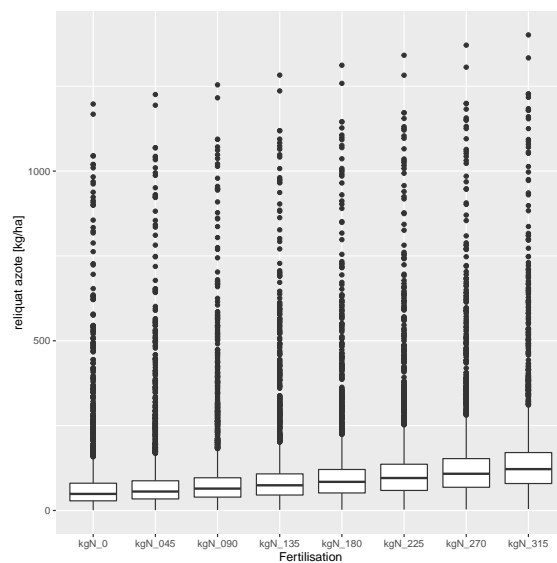
<b>Louvain</b>	Facteurs	DF	Sum Squarred	Mean Squarred	F value	p-value
Argile limoneux	NFrac	7	323645	46235	18.65	<2e-16***
	Résidus	192	475966	2479		
Limon	NFrac	7	126920	18131	37.56	<2e-16***
	Résidus	792	382362	483		
Limon fin	NFrac	7	19102235	2728891	236.6	<2e-16***
	Résidus	34792	401779256	11548		
Limon très fin	NFrac	7	14435691	2062242	582.7	<2e-16***
	Résidus	23192	82085167	3539		
Limon sableux	NFrac	7	428030	61147	112.1	<2e-16***
	Résidus	3192	1740801	545		
Limon argileux fin	NFrac	7	471282	67326	14.54	3.86e-15***
	Résidus	192	8888769	4629		
<b>Ottignies</b>	Facteurs	DF	Sum Squarred	Mean Squarred	F value	p-value
Argile limoneux	NFrac	7	174305	24901	66.88	<2e-16***
	Résidus	192	71484	372		
Limon	NFrac	7	408544	58363	32.35	<2e-16***
	Résidus	1192	2150781	1804		
Limon fin	NFrac	7	23786965	3398138	740.2	<2e-16***
	Résidus	36992	169828960	4591		
Limon très fin	NFrac	7	6959307	994187	336.7	<2e-16***
	Résidus	10192	30093485	2953		
Limon sableux	NFrac	7	359311	51330	71.29	<2e-16***
	Résidus	1592	1146244	720		
Limon argileux fin	NFrac	7	654741	93534	21.91	<2e-16***
	Résidus	592	2527834	4270		



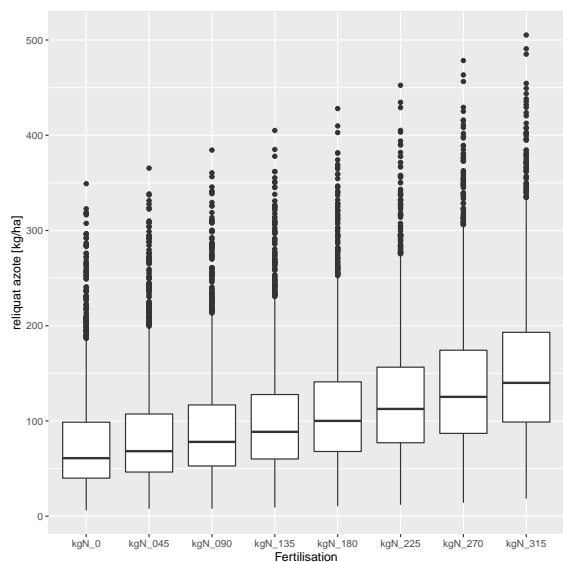
## 7.5 Annexe 5 : Reliquat azoté en fonction de la fertilisation et selon les textures sur la station d'Ottignies



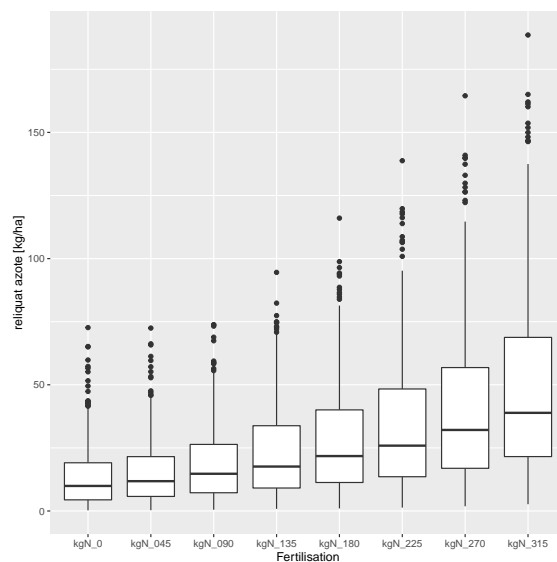
(a) Sol limoneux



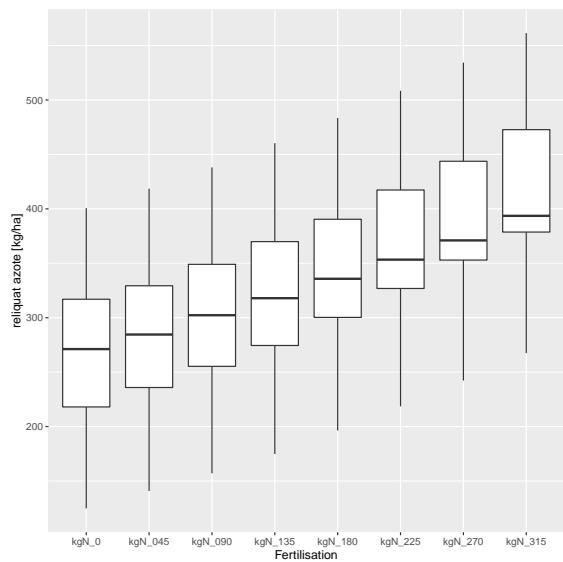
(b) Sol limoneux fin



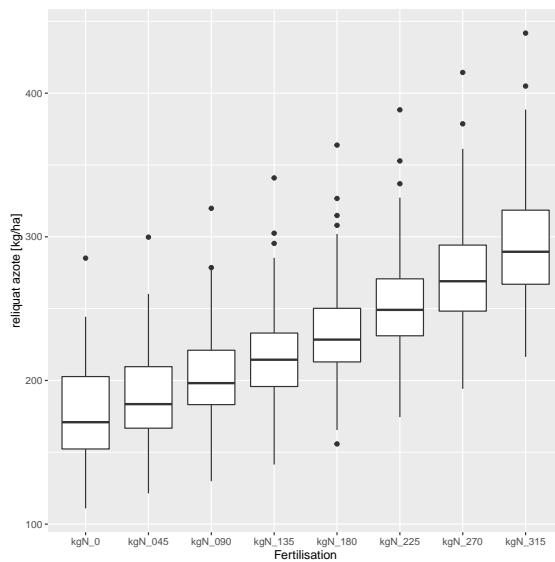
(c) Sol limoneux très fin



(d) Sol limono-sableux

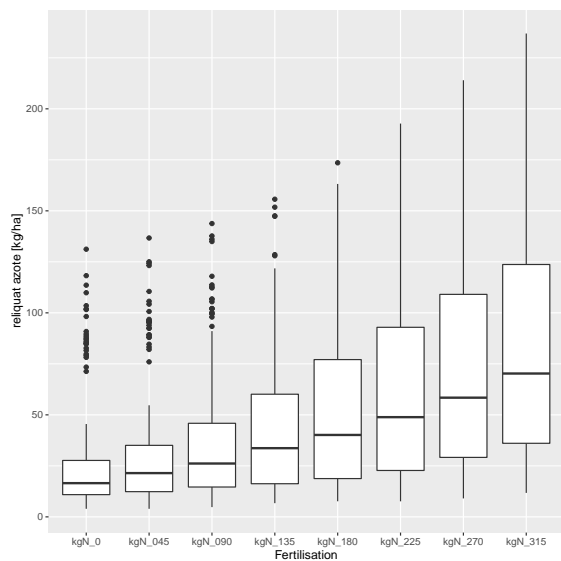


(e) Sol limono-argileux fin

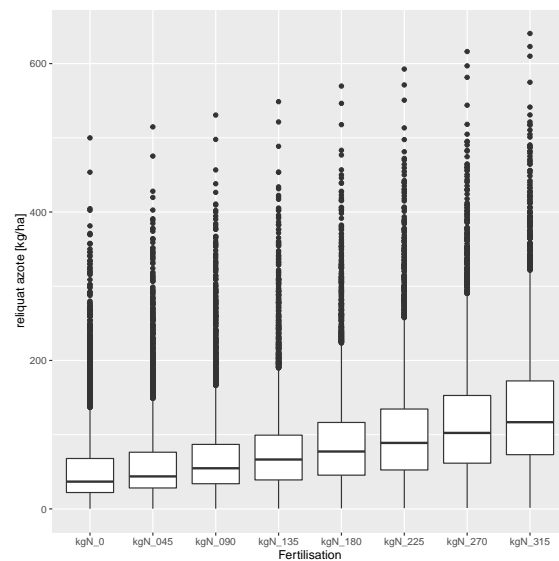


(f) Sol argilo-limoneux

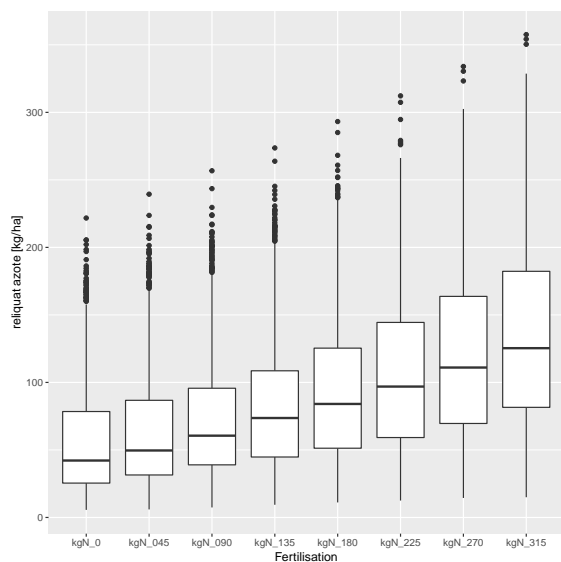
## 7.6 Annexe 6 : Reliquat azoté en fonction de la fertilisation et selon les textures sur la station de Sombreffe



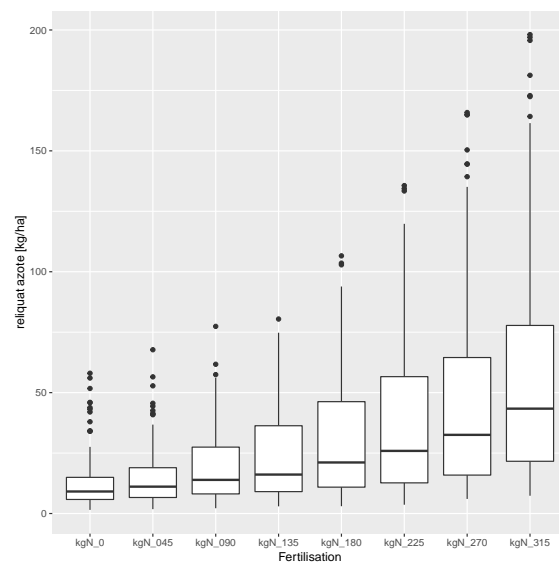
(a) Sol limoneux



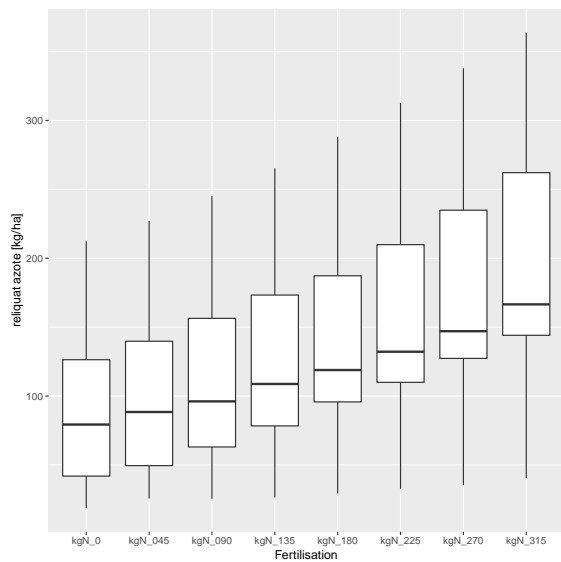
(b) Sol limoneux fin



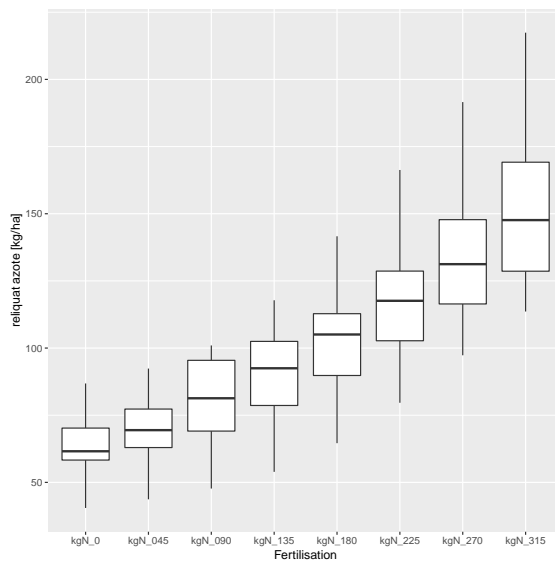
(c) Sol limoneux très fin



(d) Sol limono-sableux



(e) Sol limono-argileux fin



(f) Sol argilo-limoneux

## 7.7 Annexe 7 : Analyse statistique sur les sols uniques

Sol 130EP003

ANOVA rendement

Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
NFrac	7	390.7	55.81	14.29 6.77e-15 ***
Residuals	192	750.1	3.91	

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

SNK Rendement

"=====

"== SNK post hoc test =="

"=====

mafruit groups

kgN_315	9.907629	a
kgN_270	9.492853	a
kgN_225	9.060118	ab
kgN_180	8.530657	ab
kgN_135	7.881279	bc
kgN_090	7.195836	cd
kgN_045	6.475906	de
kgN_0	5.681033	e

ANOVA reliquat

Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
NFrac	7	151592	21656	14.15 9.08e-15 ***
Residuals	192	293776	1530	

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

SNK reliquat

"=====

"== SNK post hoc test =="

"=====

azomes groups

kgN_315	144.88569	a
kgN_270	128.96562	ab
kgN_225	114.02701	bc
kgN_180	99.83777	cd
kgN_135	89.26826	cde
kgN_090	79.03945	de
kgN_045	69.10609	e
kgN_0	60.90279	e

Sol 116WP026

ANOVA rendement

Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
NFrac	7	96.1	13.732	5.815 3.96e-06 ***
Residuals	192	453.4	2.361	

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

SNK Rendement

"=====

"== SNK post hoc test =="

"=====

mafruit groups

kgN_315	4.989760	a
kgN_270	4.690386	ab
kgN_225	4.422272	ab
kgN_180	4.176537	abc
kgN_135	3.902061	abcd
kgN_090	3.564618	bcd
kgN_045	3.207932	cd
kgN_0	2.834526	d

ANOVA reliquat

Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
NFrac	7	32291	4613	8.994 1.4e-09 ***
Residuals	192	98481	513	

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

SNK reliquat

"=====

"== SNK post hoc test =="

"=====

azomes groups

kgN_315	57.10095	a
kgN_270	49.78804	ab
kgN_225	42.99043	abc
kgN_180	37.17336	bcd
kgN_135	31.38323	cde
kgN_090	26.41020	cde
kgN_045	21.98274	de
kgN_0	18.76642	e