

# Étude de la réponse écophysiological du froment d'hiver et de ses besoins azotés au changement climatique

**GRYMONPREZ Lukas**

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2023 - 2024**

**PROMOTEUR : Pr.BENJAMIN DUMONT**





© 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.

# Étude de la réponse écophysiological du froment d'hiver et de ses besoins azotés au changement climatique

**GRYMONPREZ Lukas**

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2023 - 2024**

**PROMOTEUR : Pr.BENJAMIN DUMONT**



# Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais remercier le Pr. Dumont pour m'avoir permis de réaliser ce TFE qui était une opportunité de sortir de ma zone de confort et d'apprendre à utiliser des outils que je ne maîtrisais pas. Merci d'avoir pris du temps et d'avoir toujours été à l'écoute que cela soit par rapport au sujet de ce travail mais également par rapport aux doutes et interrogations tout au long de ce dernier.

J'aimerais également remercier toutes les personnes qui ont rendu ma vie étudiante plus agréable à vivre et d'avoir participé à des moments que je n'oublierai jamais. Je pense notamment à la fine équipe du Home et nos soupers très gastronomiques. Le Néon's et ses habitants tous autant bizarres les uns que les autres que cela soit pour nos nombreuses victoires de belote ou notre bar clandestin. Sans oublier bien évidemment l'ABI avec nos nombreuses bêtises folkloriques en tout genre et ces moments incroyables passés ensemble qui font de vous des êtres chers à mes yeux ! L'ABI ne perira pas !

Je remercie tout particulièrement mon acolyte Colleen sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour. Merci pour toute l'aide et le soutien que tu m'as fournis. Merci d'être là et de faire tout ce que tu fais, je suis plus qu'heureux de pouvoir finir ces études à tes côtés !

Enfin, le plus grand remerciement va à ma maman dont le soutien et l'écoute n'a jamais failli à travers les années. Merci à toi de m'avoir permis de faire ces études et d'avoir pu les vivre ainsi. Merci à toi d'avoir toujours été là pour moi !

Cet travail de fin d'étude est dédié à ma grand-mère qui m'a beaucoup inspiré dans la vie et qui a toujours été un exemple pour moi. J'aimerais tellement pouvoir vivre ces moments à venir avec toi et te montrer tout le chemin parcouru.



# Abstract

Climate change is represented by an increase in the concentration in  $CO_2$ , an increase in the average temperature at the surface of the globe and an increased variability in climatic conditions. In this situation, it is important to know how the phenology of field crops will be impacted and how farmers will be able to adapt.

Therefore, the nitrogen requirement of plants will evolve according to the climatic conditions. The aim of this study is to evaluate how it evolves in its presence in the Hesbaye region, Belgium.

Climate change is represented by the association of 3 representative profiles of the evolution of concentrations (RCP) and 3 time horizons (HT). In order to be representative of the chosen region and to bring variability, 10 soils were selected. In order to see the evolution of plant development in response to nitrogen fertilization, 10 contribution modalities were tested.

The results were expressed via variables derived from agronomic variables in order to express the value of aozte input by the plant. This expression of the plant is equivalent to measuring the satisfaction of the nitrogen requirement of the plant. Overall, the results express a more efficient photosynthesis thanks to the fertilizing effect  $CO_2$  which allows to conserve more water in the soil. Thus the stresses due to water deficits disappear and the limiting stress is linked to nitrogen deficiencies. With the evolution of climate change, the nitrogen requirement of winter wheat is moving towards higher fertilization values.

Keywords : Climate change - *Triticum aestivum* - Modelisation - Nutrient Use Efficiency - Climate scenarios

# Résumé

Le changement climatique est représenté par une augmentation de la concentration en  $CO_2$ , une augmentation de la température moyenne à la surface du globe ainsi qu'une variabilité accrue des conditions climatiques. Dans cette situation, il est important de savoir comment la phénologie des plantes de grandes cultures va être impactée et comment les agriculteurs vont pouvoir s'adapter.

De ce fait, le besoin azoté des plantes va évoluer en fonction des conditions climatiques en présence. Le but de cette étude est d'évaluer comment il évolue en sa présence dans la région de Hesbaye.

Le changement climatique est représenté par l'association de 3 profils représentatifs de l'évolution des concentrations (RCP) et 3 horizons temporels (HT). Afin d'être représentatif de la région choisie et d'amener de la variabilité, 10 sols ont été sélectionnés. Afin de voir l'évolution du développement de la plante en réponse à la fertilisation azotée, 10 modalités d'apport ont été testées.

Les résultats ont été exprimés via des variables dérivées de variables agronomiques afin d'exprimer la valorisation de l'apport d'azote par la plante. Cette expression de la plante revient à mesurer la satisfaction du besoin azoté de la plante. Globalement, les résultats expriment une photosynthèse plus performante grâce à l'effet fertilisant  $CO_2$  ce qui permet de conserver plus d'eau dans le sols. Ainsi les stress dûs aux déficits hydriques disparaissent et le stress limitant est liée aux carences en azotes. Avec l'évolution du changement climatique, le besoin azoté du froment d'hiver se dirige vers des valeurs de fertilisation plus élevées.

Mots clés : Changement climatique - *Triticum aestivum* - Modélisation - Efficience d'Utilisation des nutriments - Scénarios climatiques

# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Glossaire

<b>I</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>II</b>	<b>Revue bibliographique</b>	<b>2</b>
1	Changement climatique . . . . .	2
i	Les scénarios d'émission . . . . .	2
ii	Les impacts du changement climatique sur les grandes cultures en région tempérée . . . . .	3
2	La photosynthèse . . . . .	4
i	Généralités . . . . .	4
ii	Les métabolismes C3 et C4 . . . . .	4
3	Le froment d'hiver . . . . .	4
i	Description . . . . .	4
ii	Production . . . . .	5
iii	Notion de phénologie . . . . .	5
4	La modélisation . . . . .	5
i	Généralités . . . . .	5
ii	Intérêt des modèles écophysologiques . . . . .	6
5	Fertilisation azotée . . . . .	7
i	Recommandations . . . . .	7
ii	Efficience d'utilisation des nutriments . . . . .	8
iii	Coefficient apparent d'utilisation . . . . .	8
<b>III</b>	<b>Matériel et méthode</b>	<b>9</b>
1	Le modèle STICS . . . . .	9
i	Présentation du modèle . . . . .	9
ii	Principe de fonctionnement . . . . .	9
iii	Les modules . . . . .	10
iv	Développement de la plante . . . . .	11
v	Croissance de la plante . . . . .	13
vi	Besoins en eau de la plante . . . . .	14
vii	Formation du rendement . . . . .	16
2	Les données de référence . . . . .	17
i	Données météorologiques . . . . .	17
ii	Données pédologiques . . . . .	17

iii	Données d'itinéraire technique . . . . .	17
iv	Cultivar de référence . . . . .	18
3	Paramétrisation du modèle . . . . .	18
i	Fichiers météorologiques . . . . .	18
ii	Fichiers pédologiques . . . . .	19
iii	Sélection des variables pertinentes . . . . .	23
iv	Traitement statistique des données . . . . .	26
<b>IV Resultats et discussions</b>		<b>26</b>
1	Analyse statistique des variables de sortie . . . . .	27
i	Date de floraison et de maturité . . . . .	27
ii	Étude des stress . . . . .	30
iii	Biomasse aérienne à floraison et à maturité . . . . .	32
iv	Quantité d'azote absorbé par la plante à floraison et maturité . . . . .	35
v	Nombre de grains . . . . .	37
vi	Rendement . . . . .	40
2	Analyse statistique des variables dérivées . . . . .	42
i	Efficience agronomique d'utilisation des nutriments . . . . .	42
ii	Efficience physiologique d'utilisation des nutriments . . . . .	44
iii	Coefficient apparent d'utilisation . . . . .	46
3	Analyse en composantes principales . . . . .	47
<b>V Discussion générale et conclusion</b>		<b>53</b>
1	Discussion générale et conclusion . . . . .	53
2	Perspectives . . . . .	54
<b>VI Contribution personnelle</b>		<b>55</b>
<b>Appendices</b>		<b>64</b>
A	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la date de floraison	64
B	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la date de maturité	65
C	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de SWFAC.veg1 . .	66
D	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de SWFAC.veg2 . .	68
E	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de SWFAC.rep . . .	70
F	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de EWFAC.veg1 . .	73
G	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de EWFAC.veg2 . .	77
H	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de TPFAC.veg1 . .	77
I	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de TPFAC.veg2 . .	78
J	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de TPFAC.rep . . .	79
K	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de INNFAc.veg1 . .	80
L	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de INNFAc.veg2 . .	83
M	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la biomasse aérienne à floraison . . . . .	86

N	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la biomasse aérienne à maturité . . . . .	89
O	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la quantité d'azote absorbé par la plante à floraison . . . . .	92
P	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la quantité d'azote absorbé par la plante à maturité . . . . .	95
Q	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK du nombre de grains	98
R	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK du rendement . . . .	102
S	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de l'efficacité agromomique d'utilisation des nutriments . . . . .	105
T	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de l'efficacité physiologique d'utilisation des nutriments . . . . .	108
U	Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK du coefficient apparent d'utilisation . . . . .	111

# Table des figures

1	Emissions annuelles de $CO_2$ pour les différents RCPs jusqu'en 2100 . . . . .	2
2	Principe de fonctionnement STICS. Sources : INRA, 2019. . . . .	10
3	Modules de STICS. Sources : ARTRU, 2007. . . . .	11
4	Différents stades culture froment d'hiver. Sources : Brisson et al., 2008 . . . . .	12
5	Calcul de l'effet du $CO_2$ (FCO2) pour une espèce en fonction de son métabolisme C3/C4 : exemple du blé (C3) et du maïs (C4). Sources : N. N. BRISSON et al. (2009). . . . .	14
6	Dessin du diagramme résistif appliqué au système sol-culture. Sources : Brisson et al., 2008 . . . . .	15
7	Influence de l'espèce sur la résistance stomatique. Sources : Brisson et al., 2008 .	16
8	Triangle textural. Sources : Zribi, 2016 . . . . .	20
9	Méthode de calcul de l'intensité des stress . . . . .	25
10	Boxplots des date de (a) floraison et (b) maturité par scénario climatique sous les différents sols et fertilisations confondus . . . . .	28
11	Boxplots des date de (a) floraison et (b) maturité par fertilisation sous les différents sols et scénarios climatiques confondus . . . . .	29
12	Evolution de l'intensité du stress en fonction de la gestion azotée . . . . .	31
13	Boxplots de la biomasse aérienne à floraison par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus . . . . .	33
14	Boxplots de la biomasse maturité à floraison par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus . . . . .	34
15	Boxplots de la quantité d'azote absorbé par la plante à floraison par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus . . . . .	36
16	Boxplots de la quantité d'azote absorbé par la plante à maturité par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus . . . . .	36
17	Boxplots du nombre de grain par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus . . . . .	39
18	Boxplots du rendement par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus . . . . .	41
19	Boxplots de la $NUE_{ag}$ par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus . . . . .	43
20	Boxplots de la $NUE_{ag}$ par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus . . . . .	45
21	Boxplots de la CAU par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus . . . . .	47
22	Pourcentage de la variance expliquée en fonction du nombre de composantes . .	48
23	Analyse en composantes principales selon les 2 premiers axes . . . . .	49
24	Analyse en composantes principales selon les 2 premiers axes et regroupement par scénario climatique . . . . .	50

25	Analyse en composantes principales selon les 2 premiers axes et regroupement par fertilisation azotée . . . . .	51
----	--	----

# Liste des tableaux

1	Scénarios et horizons temporels étudiés . . . . .	18
2	Format des données météorologiques selon le formalisme de STICS . . . . .	19
3	Format des données disponibles dans la base de données Aardewerk . . . . .	19
4	Proportion des types de sols présents . . . . .	21
5	Sols sélectionnés . . . . .	21
6	Modalités de fertilisation azotée étudiées . . . . .	22
7	Variable de sorties de STICS étudiées . . . . .	23
8	Indices de stress étudiés . . . . .	24
9	Etablissement des méthodes de calcul des variables dérivées . . . . .	25
10	Valeurs moyennes des différents stress par scénario climatique pour toutes les fertilisations et sols confondus . . . . .	31
11	Valeurs moyennes de la biomasse aérienne à floraison par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus . . . . .	34
12	Valeurs moyennes de la biomasse aérienne à maturité par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus . . . . .	34
13	Valeurs moyennes de la quantité d'azote absorbé par la plante à floraison par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus . . . . .	37
14	Valeurs moyennes de la quantité d'azote absorbé par la plante à maturité par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus . . . . .	37
15	Valeurs du nombre de grain moyen et les groupes associés pour tous les sols et scénarios climatiques confondus . . . . .	38
16	Valeurs moyennes du nombre de grain par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus . . . . .	39
17	Valeurs de rendement moyen et les groupes associés pour tous les sols et scénarios climatiques confondus . . . . .	40
18	Valeurs moyennes du rendement par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus . . . . .	41
19	Groupes de l'efficience agronomique par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus . . . . .	42
20	Groupes de l'efficience physiologique par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus . . . . .	45
21	Groupes du coefficient apparent par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus . . . . .	46

# Acronymes

**ACP** Analyse en composantes principales.

**ANOVA** Analyse de la variance (analysis of variance).

**AOV** Analyse de la variance (analysis of variance).

**ATP** Adénose triphosphate.

**CAU** Coefficient d'utilisation apparent.

**CO<sub>2</sub>** Dioxyde de carbone.

**EWFAC** Indice de captage d'eau actif sur la RUE et la transpiration.

**GES** Gaz à effet de serre.

**GIEC** Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

**HT** Horizon temporelle.

**INNFCAC** Indice de stress azoté actif sur la croissance en biomasse.

**INRA** Institut national de la recherche agronomique.

**NFRAC** Fraction azotée.

**NUE<sub>ag</sub>** Efficience agronomique d'utilisation des nutriments.

**NUE<sub>phys</sub>** Efficience physiologique d'utilisation des nutriments.

**O<sub>2</sub>** Dioxygène.

**RCP** Profils représentatifs d'évolution de concentration.

**RCP\_HT** Scénario climatique.

**RUE** Radiation use efficiency.

**SAU** Surface agricole utile.

**SNK** Student-Newman-Keuls.

**STICS** Simulateur multi-disciplinaire pour les Cultures Standard.

**SWFAC** Indice de stress hydrique stomatique.

**TPFAC** Facteur de réduction de l'efficacité d'utilisation du rayonnement liée à la température.

# I Introduction

Le changement climatique représente un défi majeur pour l'agriculture mondiale (LESK et al., 2016). Depuis les années 1950, des changements considérables ont été observés, tels que le réchauffement des océans, la fonte des glaces et une élévation du niveau des mers. Les prévisions indiquent une accentuation des risques climatiques avec notamment l'augmentation de l'occurrence et l'intensité des événements extrêmes. Mais également des changements liés à la température et aux précipitations qui menacent la production alimentaire, ce qui souligne l'importance de comprendre l'impact de l'augmentation de  $CO_2$  sur les rendements agricoles (GIEC, 2014).

La consommation mondiale de blé devrait augmenter de manière importante d'ici 2026, il s'agit d'un aliment de base pour une grande partie de la société. En outre, la population mondiale, qui a plus que doublé depuis les années 1960, continuera de s'élever pour atteindre 9 milliards d'habitants d'ici 2050 (GODFRAY et al., 2010). Le défi pour l'agriculture consiste à répondre à ces besoins alimentaires croissants tout en minimisant l'impact sur le changement climatique.

L'optimisation de la productivité des cultures, notamment par une meilleure gestion de l'azote, est cruciale étant donné que la superficie des terres arables diminue. Les rendements des cultures dépendent de divers facteurs, dont certains peuvent être limitants comme l'eau et les nutriments, tandis que d'autres, comme la fertilisation azotée, ont un impact notable sur les rendements. Les études sur les céréales, comme le froment d'hiver, visent à accroître ces rendements via des pratiques culturales adaptées, telles que la gestion azotée (van ITTERSUM et al., 2013). Une meilleure compréhension de l'impact du changement climatique est une priorité de recherche (HERTEL et al., 2010).

Des modèles de culture sont développés pour évaluer l'impact des pratiques agricoles et conseiller les agriculteurs sur l'utilisation optimale des engrais azotés. Ces outils offrent la possibilité d'atteindre des rendements optimaux tout en réduisant l'impact environnemental de l'agriculture.

## II Revue bibliographique

### 1 Changement climatique

#### i Les scénarios d'émission

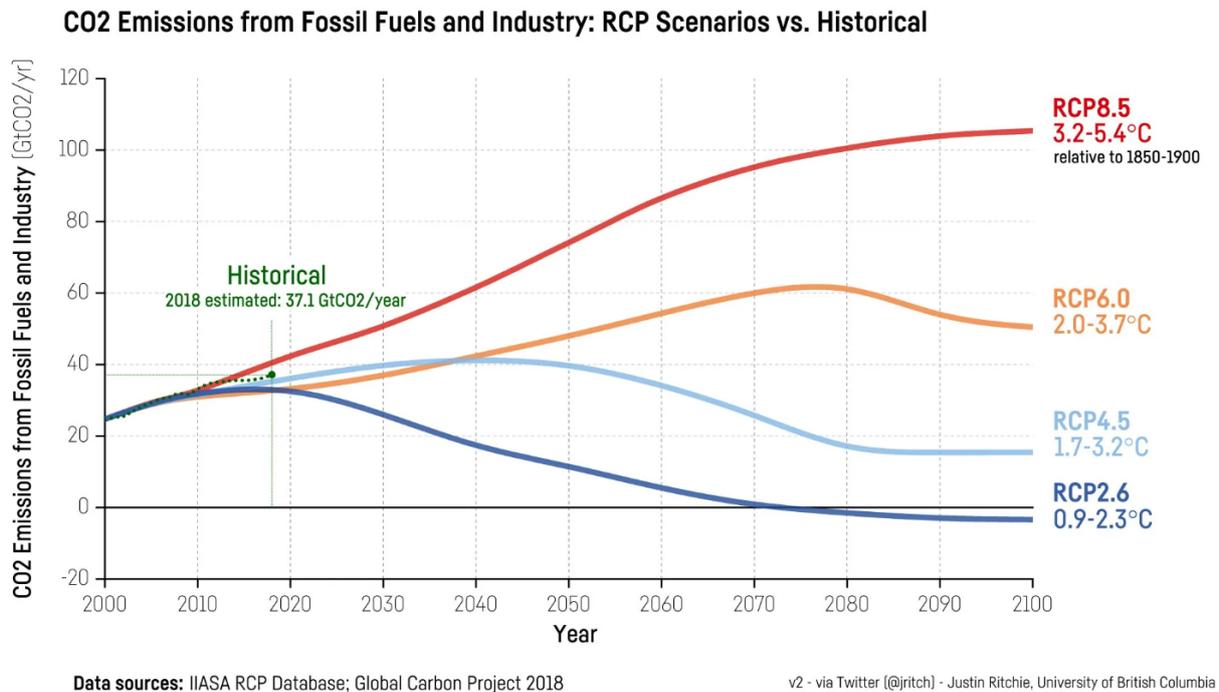


FIGURE 1 – Emissions annuelles de  $CO_2$  pour les différents RCPs jusqu'en 2100

Quatre schémas distincts appelés "profils représentatifs d'évolution de concentration" (RCP) ont été définis par le GIEC. Ils représentent l'évolution de l'occupation des sols, de la concentration des gaz à effet de serre d'origine anthropique dont le  $CO_2$ , des polluants atmosphériques (GIEC, 2014). Les dynamiques d'émission de  $CO_2$  sont catégorisées selon leur profil respectif (RCP) sur base des valeurs trouvées dans la littérature scientifique (Figure 1).

Ces différents niveaux d'émission sont caractérisés par des valeurs différentes de forçage radiatif liées à la concentration en gaz à effet de serre. Ainsi, le RCP2,6 est associé à la valeur de 2,6  $W/m^2$ , le RCP4,5 à 4,5  $W/m^2$ , le RCP6,0 à 6,0  $W/m^2$  et le RCP8,5 à 8,5  $W/m^2$  (RIAHI et al., 2011). Le forçage radiatif est une mesure qui décrit la perturbation de l'équilibre énergétique de la Terre en recevant plus de rayonnement qu'elle en émet. Cet outil permet de quantifier l'augmentation de température à la surface du globe (ANDREWS et al., 2010).

De ce fait, le RCP2,6 est le schéma qui possède la gamme de température la plus basse avec une concentration de  $CO_2$  de 475 ppm tandis que le RCP8,5 contient la gamme la plus haute avec 775ppm de  $CO_2$ . Les RCP intermédiaires que sont RCP4,5 et RCP6,0 possèdent respectivement des concentrations en  $CO_2$  de 525 et 575 ppm (Figure 1).

## ii Les impacts du changement climatique sur les grandes cultures en région tempérée

### Effet de l'augmentation de la température

L'émission de GES due aux activités anthropiques engendre une augmentation de la température atmosphérique et impacte significativement les agro-écosystèmes (HOSSAIN et al., 2021). Selon l'estimation du GIEC, l'augmentation de la température par rapport aux années 1850-1900 sera de minimum 0,9°C et maximum de 5,4°C (figure 1) (GIEC, 2014). Si les activités anthropiques continuent de suivre la tendance actuelle, il est possible que l'augmentation globale de la température terrestre soit de 6,4°C (HOSSAIN et al., 2021; SOLOMON et al., 2007). La réponse à l'augmentation des températures est variable en fonction des espèces de plante et du territoire. En Europe, les augmentations de température liées aux différents scénarios climatiques sont valables pour toutes les saisons et ont tendance à augmenter les productions céréales dans les zones au climat tempéré (LONG et al., 2005). Ces augmentations favorisent les processus physiologiques et engendrent un raccourcissement des saisons de croissance, ce qui réduit le temps de mise en place de l'appareil foliaire (BASSO et al., 2018; SEGUIN, 2010). Chaque espèce de plante possède une gamme de valeur de température qu'est l'optimum thermique, afin d'augmenter leur rendement les valeurs de températures ne doivent pas être inférieures ou supérieures (HURKMAN et al., 2003).

Les résultats de cette étude suggèrent qu'une variabilité croissante de la température produit un rendement moyen plus faible lorsque les températures de la saison de croissance se situent en dehors de la plage optimale pour la photosynthèse ou la croissance. D'autres études ont fait état d'une diminution du rendement avec l'augmentation de la variabilité de la température (RIHA et al., 1996).

### Effet de l'augmentation de la concentration en $CO_2$ de l'atmosphère

Le dioxyde de carbone joue un rôle majeur dans les processus physiologiques de la plante via la photosynthèse. L'augmentation de concentration de  $CO_2$  permet une meilleure production de sucre pour la croissance de la plante, ce qui stimule significativement le rendement. En effet, ayant une concentration relativement faible et stable dans l'atmosphère, le  $CO_2$  est actuellement le facteur limitant de la photosynthèse. Cela permet également de diminuer l'évapotranspiration des plantes via une teneur intracellulaire plus élevée (ASSENG et al., 2009; LONG et al., 2005).

En ce qui concerne les cultures en C3, elles bénéficieront également d'une diminution de la photorespiration (LONG et al., 2005). Les plantes en C3 sont limitées dans leur croissance par la concentration en  $CO_2$  à l'inverse des plantes en C4 qui sont capables de concentrer le  $CO_2$  dans leurs cellules. De ce fait, l'évolution de la concentration en  $CO_2$  montre une réponse d'augmentation de production de biomasse plus élevée pour les plantes en C3 (SEGUIN, 2010).

## 2 La photosynthèse

### i Généralités

La photosynthèse consiste en la conversion du dioxyde de carbone et de l'eau en oxygène et hydrates de carbone qu'est le glucose grâce à la présence d'énergie solaire. Il s'agit d'un processus de transformation de l'énergie solaire en énergie chimique par la plante. Autrement dit, les composés pauvres en énergie que sont le  $CO_2$  et l'eau sont transformés en composés riches en énergie que sont les hydrates de carbone et le dioxygène ( $O_2$ ) via l'intervention de l'énergie solaire. La photosynthèse se déroule majoritairement dans les feuilles qui sont les organes récepteurs de la lumière dû à leur disposition et la présence de composés photosynthétiques dont la chlorophylle (HALL & RAO, 1999).

Ce processus se déroule en 2 phases dont la première est photo-dépendante et qui convertit l'énergie lumineuse en énergie chimique (ATP) via des réactions d'oxydoréduction des protons de l'eau. La phase suivante n'est pas photo-dépendante, elle permet d'incorporer le carbone atmosphérique dans la matière organique de la plante via l'énergie produit lors de la première étape. Ainsi, la plante produit du glucose utile au développement de la plante.

### ii Les métabolismes C3 et C4

Chez les plantes, il existe plusieurs manière de réaliser la photosynthèse selon leur manière de fixer le carbone sur l'enzyme Rubisco, dit en C3 ou en C4 en fonction de leur type de métabolisme. La majorité des plantes sont de type C3. Elles possèdent un seul type de chloroplaste dont elles sont dépendantes pour la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique utilisée pour fixer le  $CO_2$  et synthétiser les hydrates de carbone. Les plantes de type C4 comportent un métabolisme qui est une adaptation complexe de la voie C3 qui permet la réduction de la photorespiration. En effet, les plantes C4 ont supprimé efficacement la photorespiration en favorisant la fixation du  $CO_2$  à l'aide d'une pompe biochimique. Ces plantes disposent également d'un compartimentage cellulaire ayant pour effet de diminuer les pertes en  $CO_2$  et en eau (FURBANK & TAYLOR, 1995).

## 3 Le froment d'hiver

### i Description

Le froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.), également appelé blé tendre d'hiver, est une espèce monocotylédone annuelle appartenant à la famille des Poaceae. Cette famille correspond aux graminées, groupe botanique contenant la majorité des céréales. Le froment est une céréale dont les grains sont principalement utilisés pour l'alimentation animale, la production de biocarburants ainsi que l'alimentation humaine et l'export dans une moindre mesure (DELCOUR et al., 2014; STUDNICKI et al., 2016). La culture de froment d'hiver correspond à la deuxième production céréalière mondiale avec 779,3 millions de tonnes (BURNY, 2010;

FAO, 2022).

La période de développement du froment d'hiver s'étend de l'automne d'une année et à la mi-été de l'année suivante. La date idéale de semis correspond à la période entre le 15 octobre et le début du mois de novembre (TAULEMESSE, 2015). De ce fait, la culture subit les faibles températures de l'hiver, ce qui est une étape importante de sa croissance. En effet, le froment a besoin d'une période où plusieurs jours froids et courts se succèdent. Cela permet le développement des organes reproducteurs lors du retour des températures plus élevées, ce processus est appelé la vernalisation (BLOOMFIELD et al., 2023).

## ii Production

A l'échelle de la Wallonie, la surface agricole utile (SAU) pour le froment d'hiver est de 123 905 hectares, ce qui équivaut à 67% des 185 413 hectares de cultures de froment belge pour une production de 1 136 124 tonnes soit 9,17 T/ha (STATBEL, 2023). Au niveau national, il s'agit donc de la première culture céréalière avec 57,4% de la SAU destinée aux céréales et 11% de la SAU totale pour une production de 1 521 593 tonnes soit 9,27 T/ha pour le rendement moyen (STATBEL, 2023). Ces valeurs de rendements varient selon la météo, la gestion, les stress de croissance et la génétique (BATCHELOR et al., 2002 ; MIRSCHEL et al., 2014).

## iii Notion de phénologie

Les différents facteurs cités ci-dessus ont un impact sur la phénologie de la culture qui correspond à : "La phénologie, dérivée du mot grec *phaino* qui signifie montrer ou apparaître, est l'étude des stades récurrents du cycle de vie des plantes et des animaux, en particulier leur calendrier et leurs relations avec le temps et le climat" (de BEURS et al., 2013).

Cette description du développement végétal est indispensable dans la gestion d'une culture au niveau des opérations culturales comme la fertilisation. Il existe donc des échelles phénologiques qui décrivent les stades de développement sur base des observations de la plante. Notamment l'échelle Zadok qui est une référence internationale pour le froment d'hiver (ZADOKS et al., 1974). Elle se base sur des nombres à deux chiffres correspondant aux stades principaux de croissance (premier chiffre) segmentée en stades intermédiaires (deuxième chiffre) (LARSEN et al., s. d.). L'échelle utilisée dans ce travail, est l'échelle BBCH qui provient de celle de Zadok (LANCASHIRE et al., 1991).

# 4 La modélisation

## i Généralités

La modélisation est actuellement un outil important dans la compréhension et la conception de systèmes de cultures. Les modèles de cultures utilisés sont qualifiés de modèle écophysologique. Ils prennent en compte de nombreux paramètres et mesures qui constituent l'ensemble sol-plante-climat via des équations et expriment ainsi la réponse de la culture.

L'agriculture a fortement évolué grâce à l'utilisation de modèles notamment la création de différents outils d'analyse et d'aide à la décision (DUMONT et al., 2012; JONES et al., 2017). La réalisation de simulations multiples peut ainsi permettre d'évaluer les besoins de la plante en fonction des scénarios impliqués tout en intégrant des critères agronomiques tels que la variation de la fertilisation azotée (DUMONT et al., 2018).

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité des processus de croissance d'une culture et des échanges avec l'environnement via l'application de concepts théoriques afin de fournir une approximation des résultats attendus expérimentalement (VARELLA et al., 2010). Le modèle est composé d'équations mathématiques qui reproduisent les conditions de sol, les conditions météorologiques et la gestion agricole (HOOGENBOOM et al., 2012).

Il existe deux types de modèle. D'un côté, les modèles statistiques considérés comme plus simples. Ils se basent sur des équations empiriques à partir d'informations statistiques comme les rendements précédents ou les données météorologiques. Ils ont été utilisés pour prédire à grande échelle le rendement des cultures (BREGAGLIO et al., 2015; JAME & CUTFORTH, 1996; LOBELL & BURKE, 2010). De l'autre côté, les modèles mécanistiques considérés comme plus complexes. Ils expliquent la croissance selon la mesure de taux instantanés des processus physiologiques en lieu avec leur environnement (BREGAGLIO et al., 2015; JAME & CUTFORTH, 1996; LOBELL & BURKE, 2010). Cependant, beaucoup de modèles sont constitués de parties empiriques et mécanistes (JAME & CUTFORTH, 1996).

Il existe de nombreux modèles de cultures qui sont capables de simuler différentes cultures comme SALUS (DZOTSI et al., 2015), CERES-Wheat (RITCHIE & OTTER, 1985), DAISY (ABRAHAMSEN & HANSEN, 2000) ou STICS (N. N. BRISSON et al., 2009) utilisé dans cette étude. STICS est un modèle mécanistique qui prend en compte certaines restrictions de culture (disponibilité en eau, nutriments) tout en mettant en place les pratiques agricoles (N. BRISSON et al., 2003).

## **ii Intérêt des modèles écophysologiques**

Ces aspects de la modélisation permettent un avantage important en sciences agronomique. Ils donnent une approximation théorique sans nécessiter le passage à l'expérimentation tout en restant modifiable à chaque instant. Ce qui est particulièrement intéressant quand le développement de la plante se déroule sur plusieurs années (TARDIEU, 2003).

De manière générale, les modèles apportent un certain nombre d'avantages par rapport aux expérimentations en champ. Notamment vis-à-vis de l'aspect de contrôle des conditions qui sont stables, de répétabilité des simulations (FRY et al., 2017), du temps court de réalisation et du faible prix (SEMENOV et al., 2007). Ils permettent également d'estimer certaines variables non mesurables en champ et de mieux quantifier qu'en expérimentation la variabilité de données agronomiques (ASSENG & TURNER, 2007). De manière générale, l'utilisation de modèles favorise la compréhension des interactions de la culture et de son

environnement (MIRSCHER et al., 2014; SEXTON et al., 2016). Pour toutes ces raisons, cela démontre le potentiel d'utilisation des modèles écophysologiques pour la comparaison des pratiques de gestion et leur variation au changement climatique (RODRÍGUEZ et al., 2019).

## 5 Fertilisation azotée

### i Recommandations

Selon SUI et al. (2013), de nombreux exploitants agricoles appliquent actuellement une quantité trop élevée d'azote par rapport aux besoins azotés de la plante afin d'atteindre un rendement maximal. Cependant, la fertilisation azotée doit être raisonnée car un apport excédentaire ne contribue plus à l'augmentation des rendements et peut nuire à l'environnement (BASSO & RITCHIE, 2005; CASSMAN et al., 2002). L'azote excédentaire peut alors : polluer l'atmosphère via l'émission d'oxyde nitreux et l'eau souterraine par la lixiviation dans les sols, acidifier les sols, etc. (BASSO & RITCHIE, 2005; CHEN et al., 2008; OEHLER et al., 2007).

Dès lors, la fertilisation azotée doit être réfléchie afin d'être valorisée au mieux par la plante. Une des démarches possibles est de prendre en compte les reliquats des précédents culturaux afin d'être conscient de l'état azoté du sol. Cela permet de s'adapter au mieux pour la saison culturale à venir (JÉGO et al., 2012). Une autre application, cumulable avec la première, est de considérer la minéralisation de la matière organique comme source d'une partie des besoins azotés.

Malgré cela, la fertilisation aux stades de croissance appropriés reste indispensable. Les dates d'applications d'azote varient selon le schéma de fractionnement. Les schémas fractionnés en 3 apports se déroulent aux stades du tallage (BBCH 23), du redressement ou élongation des tiges (BBCH 30) et de la dernière feuille (BBCH 39). Ils ont respectivement pour but de fournir les nutriments nécessaires, de faciliter la montée des talles en épis et de maximiser le nombre de grains par épis. Quant à elle, la gestion azotée en 2 apports se réalisent aux stades du tallage-redressement (BBCH 29) et de la dernière feuille ou feuille étendard (BBCH 39) (LE SOUDER, 2023).

Au-delà de la date d'application, la quantité apportée est également importante. Selon YANG et al. (2017), un fractionnement optimal dans un climat tempéré océanique correspond à une dose totale de 182kg N/ha. Tandis qu'en Belgique, la fertilisation optimale conseillée aux agriculteurs est de 185kg N/ha en 3 fractions de 60, 60 et 65kgN/ha. Pour la modalité en 2 fractions, la dose recommandée est de 170kg N/ha avec 95kg/ha et 75kgN/ha pour la première et deuxième application (DUMONT & PIERREUX, 2022). Cependant, des modifications intra-saisonnières peuvent avoir lieu afin de s'adapter aux stress climatiques spécifiques de la saison culturale. De cette manière, dans le schéma typique en 3 apports, la 3ème application d'azote pourrait fréquemment être réduite pour maximiser les rendements agronomiques et économiques (DUMONT et al., 2016). Globalement, les besoins de la plante varient au

cours de son développement et de la saison culturale, ils sont faibles en début de saison puis augmentent à partir de l'allongement des tiges (BBCH30) (BODSON & FALISSE, 1996). Il est donc important de pouvoir caractériser l'évolution du besoin avec l'augmentation de la variabilité du climat lié au changement climatique.

## ii Efficience d'utilisation des nutriments

L'efficience d'utilisation des nutriments (NUE) est un critère agro-environnemental qui peut être utilisé pour la comparaison entre différentes cultures et pays pour mesurer l'efficience des itinéraires techniques appliqués dont la fertilisation azotée (MOHAMMED et al., 2018). Il en existe des multiples formes en fonction des objectifs des travaux de recherche. Ces indicateurs permettent de mesurer la valorisation des nutriments apportés pour des finalités économiques, agronomiques, physiologiques et environnementales (RAUN & SCHEPERS, 2008). De manière générale, la gestion de l'azote et les conditions météo sont les principales raisons de variation de la NUE (SEMENOV et al., 2007). Deux formes sont utilisées dans ce travail, l'efficience d'utilisation agronomique ( $NUE_{ag}$ ) et l'efficience d'utilisation physiologique ( $NUE_{phys}$ ). La première forme est un indicateur fréquemment utilisé afin d'estimer les doses recommandées d'engrais (CHUAN et al., 2013). Tandis que la  $NUE_{phys}$  est un indicateur plus complexe qui dépend du stade de développement de la plante, de l'activité photosynthétique et de la capacité à répondre aux stress.

## iii Coefficient apparent d'utilisation

Le coefficient apparent d'utilisation est un indicateur qui permet de mesurer l'efficacité d'un apport de fertilisation azotée en calculant la part qui a été valorisée par la plante. Le CAU à l'instar de la  $NUE_{ag}$  est également utilisé pour identifier les doses d'engrais recommandés (LIMAUX, 1994).

# III Matériel et méthode

## 1 Le modèle STICS

### i Présentation du modèle

STICS est un modèle développé par l'INRA en 1996 par Dominique Ripoche et Nadine Brisson, il est considéré comme un modèle robuste, dynamique et générique. STICS a été assemblé sur base de plusieurs modèles existants : BYM (eau), LIXIM (azote) et GOA (plante). A l'origine, ce modèle n'était capable que de simuler deux plantes, le maïs et le froment (« INRA », 2017).

Par la suite, STICS a été amélioré afin de considérer d'autres grandes cultures via l'ajout progressif de modules lors de son développement et de ses différentes versions. Depuis 2014, une équipe multidisciplinaire ainsi qu'un réseau scientifique se coordonnent pour son amélioration continue. A l'heure actuelle, STICS est en mesure de reproduire une vingtaine de cultures qu'elles soient annuelles ou pérennes, herbacées ou ligneuses (« INRA », 2017).

La version 8.50 de STICS a été adoptée et utilisée dans le cadre de ce travail.

### ii Principe de fonctionnement

STICS est capable de simuler les impacts du climat, de la gestion des sols et des cultures pour prédire la production végétale et son environnement, de manière quantitative et qualitative. Son fonctionnement est compris entre l'atmosphère (limite supérieure) et la jonction sol/sous-sol (limite inférieure). La borne inférieure est divisée en différentes couches horizontales constituées par leur propre teneur en azote organique, minérale et en eau. Dès lors, le sol au sein de STICS comprend 5 horizons différents modélisés individuellement par des couches de 1 cm. Au sein du profil de sol, on retrouve son interaction avec la plante via les racines et leur distribution (N. N. BRISSON et al., 2009).

Le fonctionnement de STICS se base sur un schéma dynamique de croissance du couvert végétal selon un pas de temps journalier. La répartition de la biomasse et des photos-assimilats est basée sur les relations d'équilibre entre les organes dits "sources" et "puits" (DIDIER, 2013). L'ensemble des variables végétales sont dues aux modules de STICS, ils structurent le modèle et sont responsables de différentes parties physiologiques des grandes cultures comme : le bilan hydrique, la construction du rendement, les transferts de nitrates, les stress (climatiques, carences), etc. Le module "développement phénologique" est un module majeur durant l'ensemble du cycle de vie de la plante. Il dirige le développement de la culture via la manipulation de la force et de l'accès des sources et puits. La croissance est également conditionnée par les sources qui nécessitent l'établissement des organes photosynthétiques. Tandis que les ressources produites seront ensuite remobilisées dans des organes de réserve ou

allouées à des fonctions physiologiques dont l'organisme a besoin (DIDIER, 2013).

STICS a besoin de données d'entrée pour réaliser la modélisation. Le système a besoin de données d'initialisation au niveau du sol pour représenter ses caractéristiques intrinsèques telles que la teneur en eau et en nutriments. De la même manière, des propriétés spécifiques relatives à la plante sont nécessaires (photopériode, variété, dormance, vernalisation). Des données climatiques doivent également être fournies afin de mesurer les valeurs de précipitation, de température et de rayonnement. Il faut munir le modèle d'un recensement de l'itinéraire technique appliqué (fertilisation, travail du sol, semis, etc.) (DIDIER, 2013) (Figure 2).

Après modélisation, STICS fournit des variables d'intérêts agronomiques (rendement, contenu en protéine) ainsi que des variables utiles pour établir un bilan environnemental de la culture (lixiviation des nitrates, émissions GES) (DIDIER, 2013).

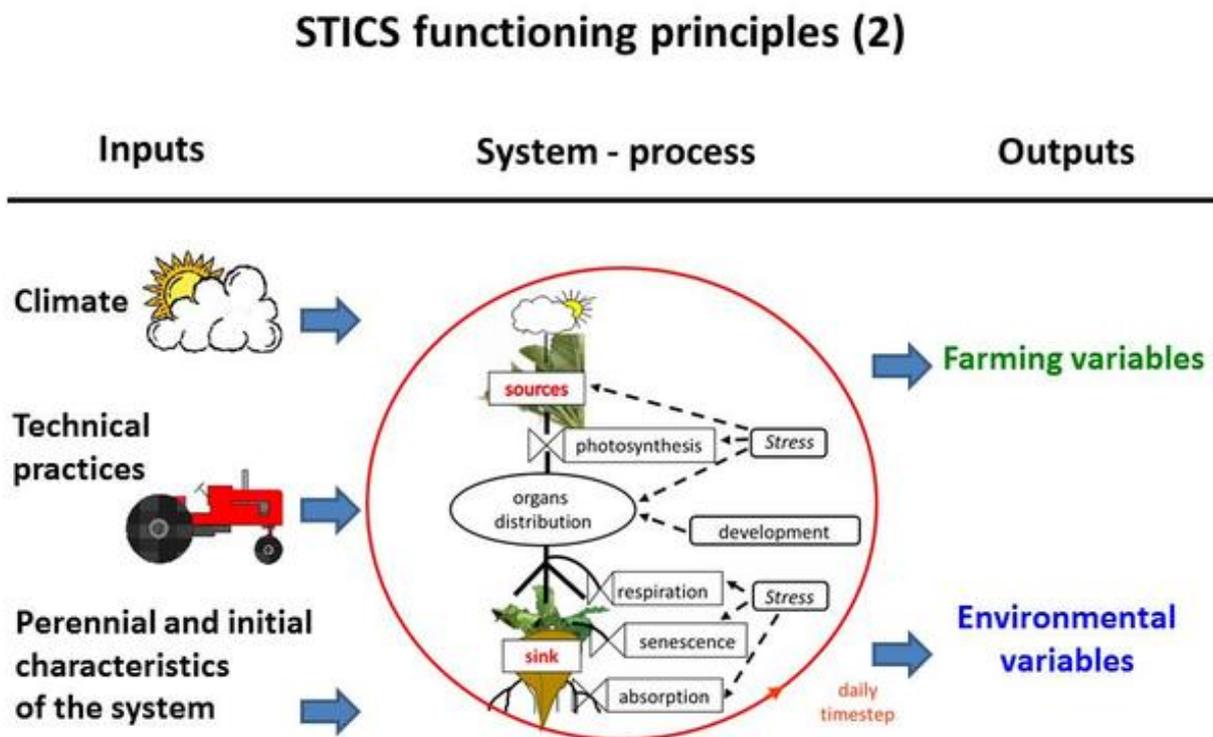


FIGURE 2 – Principe de fonctionnement STICS. Sources : INRA, 2019.

### iii Les modules

Les modules essentiels de STICS sont représentés à la figure 3. Ils sont divisés en deux parties en fonction de leur objectif, de part et d'autre du sol, correspondants aux parties aériennes et souterraines (plante + sol) (ARTRU, 2017).

Les modules particulièrement intéressants dans le cadre de ce travail sont décrits ci-dessous.

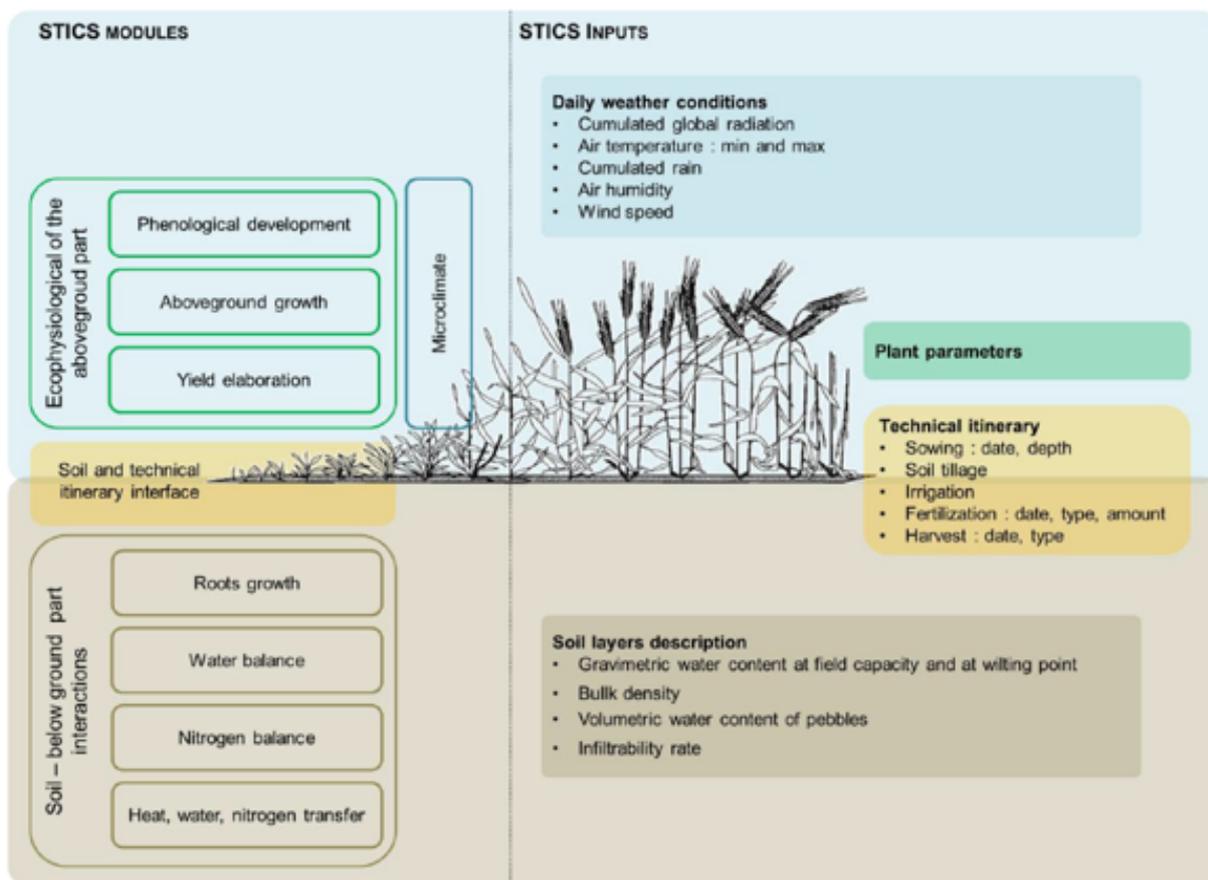


FIGURE 3 – Modules de STICS. Sources : ARTRU, 2007.

#### iv Développement de la plante

Au sein de STICS, il se trouve deux échelles indépendantes qui décrivent différemment les stades de développement de la plante. Il s'agit de l'échelle végétative et reproductive, qui prennent en charge réciproquement, les stades phénologiques et les stades d'organes récoltés. Ces dernières se succèdent ou s'opèrent simultanément, du moins en partie, en fonction des cultures. Le modèle a la capacité de distinguer deux types de plantes selon leur croissance, dite déterminée et indéterminée. En ce qui concerne les graminées comme le froment, elles possèdent une culture déterminée à l'inverse des betteraves sucrières ou des vignes. Pour ce type de plante, il est question de l'enchaînement des croissances végétative et reproductive (N. N. BRISSON et al., 2009).

Les différents stades réels de la culture du froment d'hiver sont repris à la figure 4 sous forme de paramètres de STICS. Ils sont définis par l'utilisation selon la calibration et le paramétrage des sommes de degrés-jours ou de l'itinéraire technique cultural. Au sein de ce

travail, les facteurs ont été calculés selon l'accumulation de degré-jour.

- IPLT : Jour de semis (itinéraire technique) ;
- IGER : Jour de germination du semis ;
- ILVE : Jour d'émergence ;
- IAMF : Jour de fin de la phase juvénile ;
- ILAT : Jour du début de la phase critique de l'apparition du nombre de grains ;
- ILAX : Jour de fin de croissance foliaire ;
- IDRP : Jour du début de remplissage des organes de récolte, en froment, ce stade est confondu avec iflo qui est le jour de floraison ;
- IMAT : Jour de maturité physiologique ;
- IREC : Jour de récolte.



FIGURE 4 – Différents stades culture froment d'hiver. Sources : Brisson et al., 2008

L'évolution de la phénologie de la plante du semis à la maturité physiologique est conditionnée par un facteur majeur qu'est la température. En effet, la plante accumule les degrés jours quotidiennement en fonction des données météorologiques. Les degrés jours sont calculés par la différence entre la température de l'air et la température de base de la culture. Le modèle va procéder à l'accumulation quotidienne, un jour donné est représenté par la notation  $I$ , afin de calculer chaque unité de développement quotidien (UPVT) (équation 1) (N. N. BRISSON et al., 2009). Lorsque que la somme des UPVT est égale ou supérieure à la valeur déterminée du stade spécifique, la plante aura atteint ce stade. Ce fonctionnement se répétera ainsi pour l'ensemble des stades établis. Il existe également, des oppositions au développement que sont les stress hydrique et azoté, la photopériode et la vernalisation.

$$UPVT(I) = UDV E C U L T (I) \cdot R F P I (I) \cdot R F V I (I) \cdot [STRESSDEV P \cdot \min(TURFAC(I), INNLA I (I)) + 1 - STRESSDEV] \quad (1)$$

- UPVT : Unité de développement quotidien [degrés-jours] ;
- UDEVCULT : Température effective pour le développement de la plante [degrés-jours] ;
- RFPI : Effet ralentissant de la photopériode sur le développement de la plante [/] ;
- RFVI : Effet ralentissant de la vernalisation sur le développement de la plante [/] ;
- STRESSDEV : Délai phasique maximum autorisé en raison du stress [/] ;
- TURFAC : Indice de stress hydrique en turgescence [/] ;
- INNLA I : Indice de stress azoté actif sur la croissance des feuilles.

## v Croissance de la plante

Le développement de la plante signifie également la croissance de chaque partie de la plante et la production de biomasse. Cette croissance est simulée et divisée en 2 parties distinctes, la fraction aérienne et racinaire.

En ce qui concerne la partie racinaire, elle est calculée en termes de longueur et non de biomasse au sein de STICS. Les racines sont définies par la densité racinaire au sein du sol. Leur évolution est propre à chaque espèce en fonction de la teneur en eau et de la température du sol (N. N. BRISSON et al., 2009).

Au niveau de la partie aérienne, on peut différencier la croissance en biomasse de la croissance des feuilles. De la même manière que le développement de la plante, la production de biomasse se calcule de manière journalière (équation 2). Cette variable se base sur le principe de captage du rayonnement et donc sur la RUE qui est propre à chaque espèce. D'autres facteurs présents agissent en tant que stress pour prendre en considération les impacts sur la respiration et la photosynthèse (N. N. BRISSON et al., 2009).

$$DLTAMS(I) = [EBMAX(I) \cdot RAIN(T(I)) - COEFBG \cdot RAIN(T(I))^2] \cdot FTEMP(I) \cdot SWFAC(I - 1) \cdot INNS(I - 1) \cdot EXOBIOM(I - 1) \cdot FCO2 + DLTAREMOBIL(I - 1) \quad (2)$$

- DLTAMS : Taux de croissance de la plante [t/ha] ;
- EBMAX : Valeur maximale de l'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE) [g.MJ-1] ;
- RAIN(T) : Rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par la canopée [MJ.m<sup>-2</sup>] ;
- COEFBG : Paramètre définissant l'effet du rayonnement sur l'efficacité de la conversion [/] ;
- FTEMP : Facteur de réduction de l'efficacité d'utilisation du rayonnement liée à la température [/] ;
- TCULT : Température de surface de la culture (moyenne journalière) [C°] ;
- SWFAC : Indice de stress hydrique stomatique [/] ;
- INNS : Indice de stress azoté actif sur la croissance en biomasse [/] ;
- EXOBIOM : Indice de captage d'eau actif sur la RUE et la transpiration [/] ;
- FCO2 : Effet du CO<sub>2</sub> sur la RUE (propre à chaque espèce) [/] ;
- DLTAREMOBIL : Quantité de la réserve remobilisée [g.m-3.jour-1].

Comme expliqué précédemment, les prévisions du GIEC mentionnent une possible augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> à une valeur supérieure à celle actuelle, 350 ppm. Le formalisme utilisé dans STICS (équation 3) exprime une relation exponentielle de l'effet de la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère sur la RUE.

$$FCO2 = 2 - \exp \left[ \log(2 - ALPHACO2_P) \cdot \frac{(CO2_C - 350)}{(600 - 350)} \right] \quad (3)$$

- ALPHACO2 : Coefficient permettant de modifier la RUE en cas d'augmentation de  $CO_2$  atmosphérique [/];
- $CO_{2c}$  : Teneur en  $CO_2$  atmosphérique [ppm];
- FCO2 : Effet du  $CO_2$  sur la RUE propre à chaque espèce [/].

Le calcul du paramètre se fait de façon à ce que la courbe passe par le point (600, ALPHACO2) (Figure 5). Les valeurs du paramètre ALPHACO2 se situent autour de 1,1 pour les plantes en C4 et 1,2 pour les plantes en C3 (PEART et al., 1989; RUGET et al., 1996; STOCKLE et al., 1992).

La valeur du coefficient ALPHACO2 se trouvent dans les alentours de 1,2 pour les plantes en C3 comme le froment d'hiver (PEART et al., 1989; RUGET et al., 1996; STOCKLE et al., 1992). De ce fait, une augmentation de la concentration en  $CO_2$  aura tendance à augmenter la valeur de FCO2 (figure 5). Les rendements des cultures de froment devrait donc augmenter comme on peut l'observer sur la relation à l'équation 2.

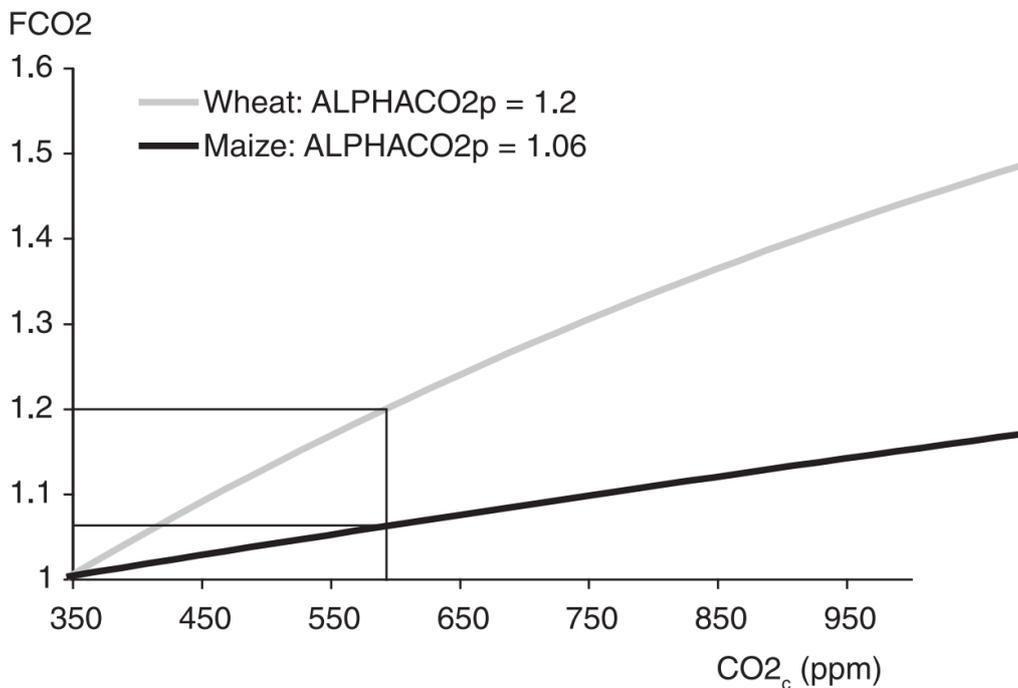


FIGURE 5 – Calcul de l'effet du  $CO_2$  (FCO2) pour une espèce en fonction de son métabolisme C3/C4 : exemple du blé (C3) et du maïs (C4). Sources : N. N. BRISSON et al. (2009).

## vi Besoins en eau de la plante

L'évaporation potentielle en eau liée au couvert végétal se calcule de deux manières équivalentes au sein de STICS. Notamment une qui se base sur le couvert végétal fractionné selon une approche fondée sur le bilan énergétique des canopées. Les calculs se basent sur l'utilisation de paramètres de résistances empiriques appropriés permettant de mesurer quatre flux d'évaporation d'eau (figure 6). Les résistances sont catégorisées en deux types. D'un côté, celles qui mesurent les flux entre le niveau de référence et le sol avec comme séparation intermédiaire la canopée. De l'autre côté, celles qui mesurent les flux de la couche limite et de surface de la canopée. La résistance de surface de la canopée se calcule selon l'équation 4 qui est notam-

ment influencée par une variable dépendante de la concentration en  $CO_2$  (figure 7) (équation 4) (N. N. BRISSON et al., 2009).

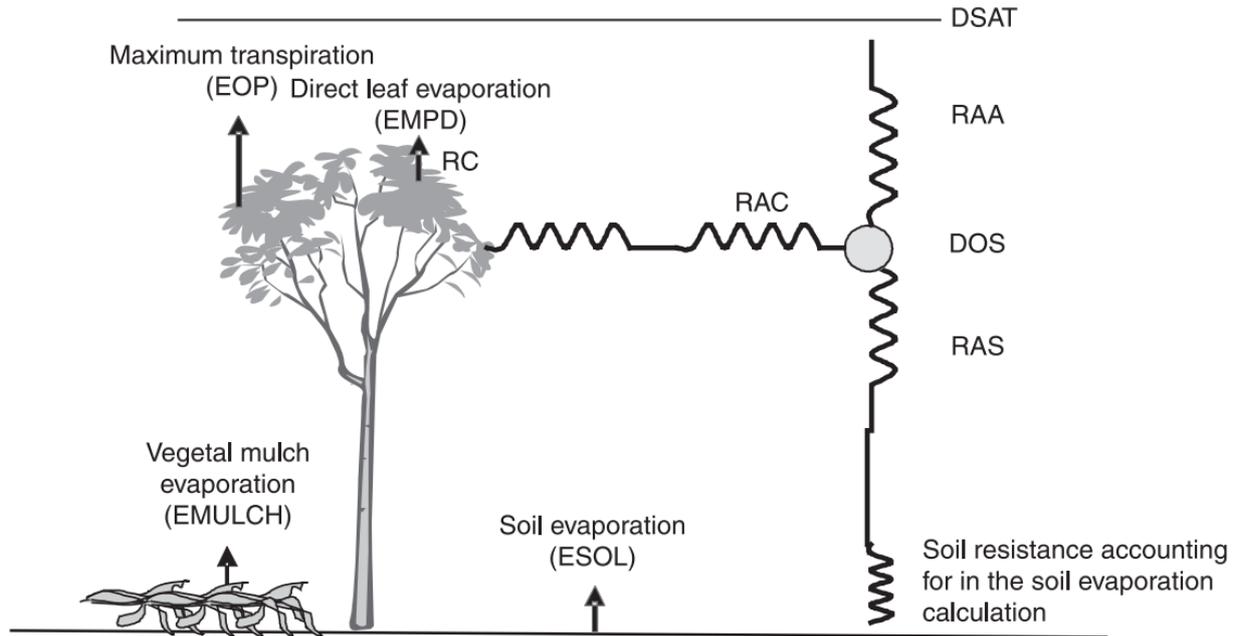


FIGURE 6 – Dessin du diagramme résistif appliqué au système sol-culture. Sources : Brisson et al., 2008

[H]

$$RC(I) = RSMIN_P \left( \frac{(0.5LAI_5I + 1)}{LAI(I)} \right) (0.039DSAT + 0.45) \left( \frac{28}{2.5 + TRG(I)} \right) FCO2S \quad (4)$$

- FCO2S : Effet du  $CO_2$  sur la résistance stomatique, propre à chaque espèce [/];
- FCO2 : Effet du  $CO_2$  sur la RUE, propre à chaque espèce [/];
- CO2c : Teneur en  $CO_2$  atmosphérique [ppm].

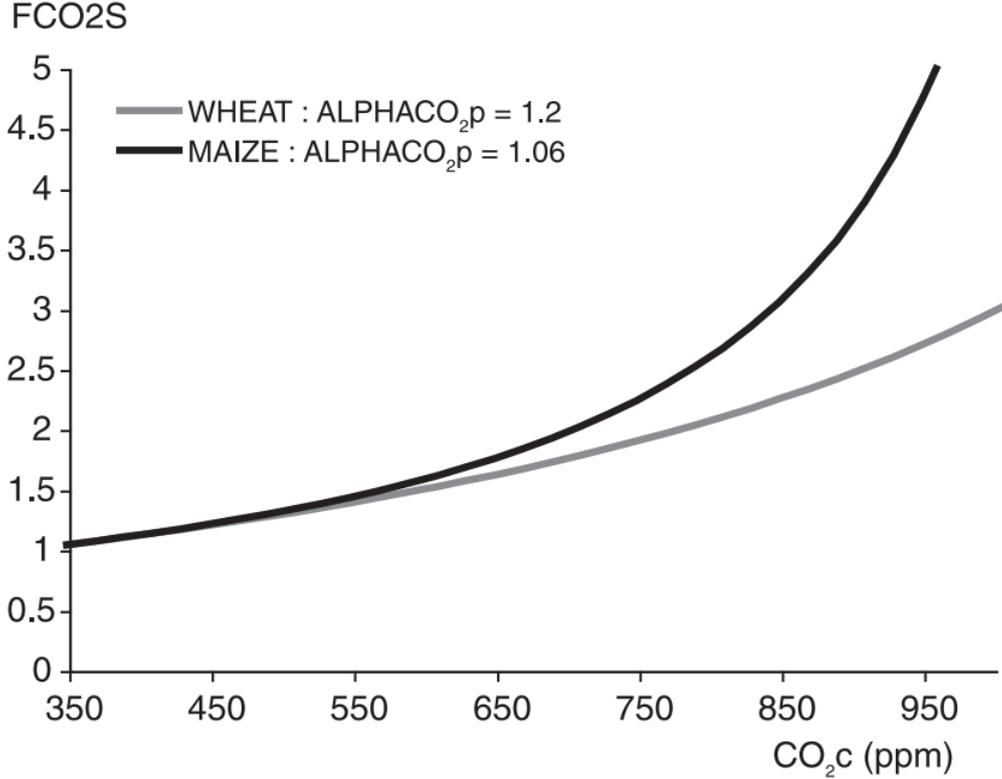


FIGURE 7 – Influence de l'espèce sur la résistance stomatique. Sources : Brisson et al., 2008

## vii Formation du rendement

Un des objectifs essentiels de la modélisation est sa capacité à prédire le rendement d'une culture en fonction de l'ensemble des données d'entrée et des potentiels stress présents. Au sein de STICS, le rendement en grain est exprimé en t/ha. Il est en fonction de deux composantes : le nombre de grain/m<sup>2</sup> défini au stade de la floraison (équation 5) et la masse du grain. Au sein de l'équation, le paramètre NBGRMAX est défini par la génétique de la plante tandis que la variable CGRAIN est dépendante de l'espèce (N. N. BRISSON et al., 2009).

$$NBGRAINS(IDRP) = CGRAIN_P \cdot VITMOY(IDRP) \cdot NBGRMAX_V \quad (5)$$

- NBGRAINS : Nombre de grains [grains/m<sup>2</sup>];
- VITMOY : Taux de croissance moyen pendant la période de latence (ILAT-IDRP) [g/m<sup>2</sup>];
- CGRAIN : Pente de la relation entre le nombre de grains et le taux de croissance pendant la période de latence (ILAT-IDRP) [m<sup>2</sup>/g];
- NBGRMAX : Nombre de grains maximum [grains/m<sup>2</sup>].

Dans le cadre de la modélisation, une autre variable agronomique est le rendement en matière sèche des organes récoltés (équation 6).

$$MAFRUIT(I) = \sum_{J=IDRP}^I \left( DLTAGS(J) - \frac{PGRAINGEL(I)}{100} \right) \quad (6)$$

- MAFRUIT : Matière sèche des organes récoltés [t/ha];
- DLTAGS : Le remplissage quotidien des grains [t/ha\*jour];
- PGRAINGEL : Le poids des grains gelés [g/m<sup>2</sup>].

## 2 Les données de référence

### i Données météorologiques

L'ensemble des données météorologiques utilisées pour simuler les conditions composant les scénarios climatiques historiques et futurs, proviennent du modèle ALARO-0 de l'IRM (« IRM », s. d.).

Ce modèle vient à l'origine de la fusion de deux modèles qui travaillent à des échelles différentes. D'un côté, le modèle de circulation générale ARPEGE qui travaille à une échelle territoriale plus importante. De l'autre, le modèle de zone limitée ALADIN. Le modèle ALARAO-0 permet donc de réaliser des simulations climatiques à l'échelle européenne (GIOT et al., 2016). Dès lors, les projections climatiques à l'échelle européenne sont réduites d'échelles et validées par comparaison avec des observations réelles. Dans un premier temps, elles le sont pour la Belgique, dans un deuxième temps à l'échelle régionale belge. Ces données ont été autant validées sur l'aspect spatial que temporel car il y a confirmation de la capacité du modèle à reproduire des conditions climatiques passées et à projet des climats futurs jusqu'en 2100 (« IRM », s. d.).

### ii Données pédologiques

La base de données Aardewerk a été exploitée afin d'extraire les caractéristiques de l'ensemble des sols. Ils ont été ensuite sélectionnés afin d'être les plus caractéristiques de la région de Hesbaye. Les sols utilisés sont donc considérés comme représentatifs de la région. L'objectif de la sélection de plusieurs sols représentatifs étaient d'amener de la variabilité dans la réponse du modèle tout en simulant le développement d'une culture dans le cadre d'une région fortement agricole.

### iii Données d'itinéraire technique

L'itinéraire technique appliqué au sein de la modélisation suit une gestion agricole classique de la culture de froment d'hiver dans la région de Hesbaye. Les opérations décrites au sein de ce paragraphe seront identiques pour l'ensemble des années modélisées à l'exception de la fertilisation azotée (voir section ?). Le travail du sol consiste en un labour profond de 25 centimètres à 10 jours avant le semis et une reprise de labour à 10 cm dans le sol la veille du semis, le 14 octobre. Quant à lui, le semis se réalise à une profondeur de 3 centimètres selon une densité de 250 grains/m<sup>2</sup> et un inter-rang de 14,6 cm.

## iv Cultivar de référence

VERLINDEN (2022) ont procédé à un processus de calibration et de validation du modèle sur un mélange de variétés comportant des différences phénologiques importantes afin de créer une variété moyenne théorique de froment d’hiver. Ce cultivar de référence est utilisé dans ce travail et se base sur les variétés Julius, Barok et Edgar.

## 3 Paramétrisation du modèle

### i Fichiers météorologiques

Le changement climatique est présenté dans cette étude via la mise en place de 5 scénarios climatiques différents caractérisés chacun par une concentration atmosphérique en  $CO_2$  spécifique. Ces derniers sont composés de 2 profils représentatifs d’évolution de concentration (RCP) et de deux horizons temporels différents identifiés par leurs années médianes (Table 1). Le scénario historique RCP00\_HT00 sert de point de référence.

Scénario climatique (RCP_HT)	RCP	Horizon temporel	Concentration de $CO_2$ [ppm]
RCP00_HT00	RCP 0,0	1980-2010 (00)	385
RCP45_HT55	RCP 4,5	2040-2070 (55)	475
RCP45_HT85	RCP 4,5	2070-2100 (85)	525
RCP85_HT55	RCP 8,5	2040-2070 (55)	575
RCP85_HT85	RCP 8,5	2070-2100 (85)	775

TABLE 1 – Scénarios et horizons temporels étudiés.

Les fichiers climatiques générés par le modèle ALARO-0 contiennent différentes valeurs essentielles telles que le rayonnement solaire, les précipitations, la concentration en  $CO_2$ , etc. (Table 2). Un fichier correspond à la représentation d’une année spécifique au sein d’un seul et unique scénario climatique. En ce qui concerne l’évapotranspiration de la plante, les valeurs n’étaient pas disponibles. Les valeurs sont par défaut de -999.99 afin d’indiquer au modèle qu’aucune valeur n’est présente pour cette variable.

Nom	Unité
Identifiant	[/]
Date	[aaaa-mm-jj]
Jour julien	[jjj]
Température minimale	[jjj]
Température maximale	[°C]
Radiation solaire	[MJ m2 j1]
Evapotranspiration de la plante selon Penman	[mm j-1]
Somme de pluviométrie	[mm j-1]
Vitesse moyenne du vent	[m s-1]
Pression de vapeur	[mbars]
Concentration en $CO_2$	[ppm]

TABLE 2 – Format des données météorologiques selon le formalisme de STICS

Le modèle STICS a besoin également d'un fichier météo servant de référence pour mettre en évidence les caractéristiques de la station météorologique. Il correspond à celui de la station située à Ernage. Différents formalismes lié à STICS ont été sélectionnés pour ce fichier de station météo afin de réaliser la modélisation. De ce fait, la température de la culture est évalué via le formalisme "bilan énergétique". L'équation de "Shuttlewort et Wallace" est utilisée pour calculer le potentiel d'évapotranspiration (PET) et l'équation de Brutsaert est employé pour approximer le rayonnement net atmosphérique. Le formalisme "climate change" a été également activé au sein de ce fichier.

## ii Fichiers pédologiques

### Traitement des données

Dans un premier temps, les données pédologiques se structurent de façon à ce qu'un sol donné soit divisé en ses différents horizons selon échantillons réalisés. Les fichiers utilisés s'articulent de la même façon que dans le tableau 3.

Nom	Unité
Limite supérieure de l'horizon	[cm]
Limite inférieure de l'horizon	[cm]
Argile	[%]
Limon	[%]
Sable	[%]
pH KCl	[/]
pH $H_2O$	[/]
Carbone organique total	[%]

TABLE 3 – Format des données disponibles dans la base de données Aardewerk

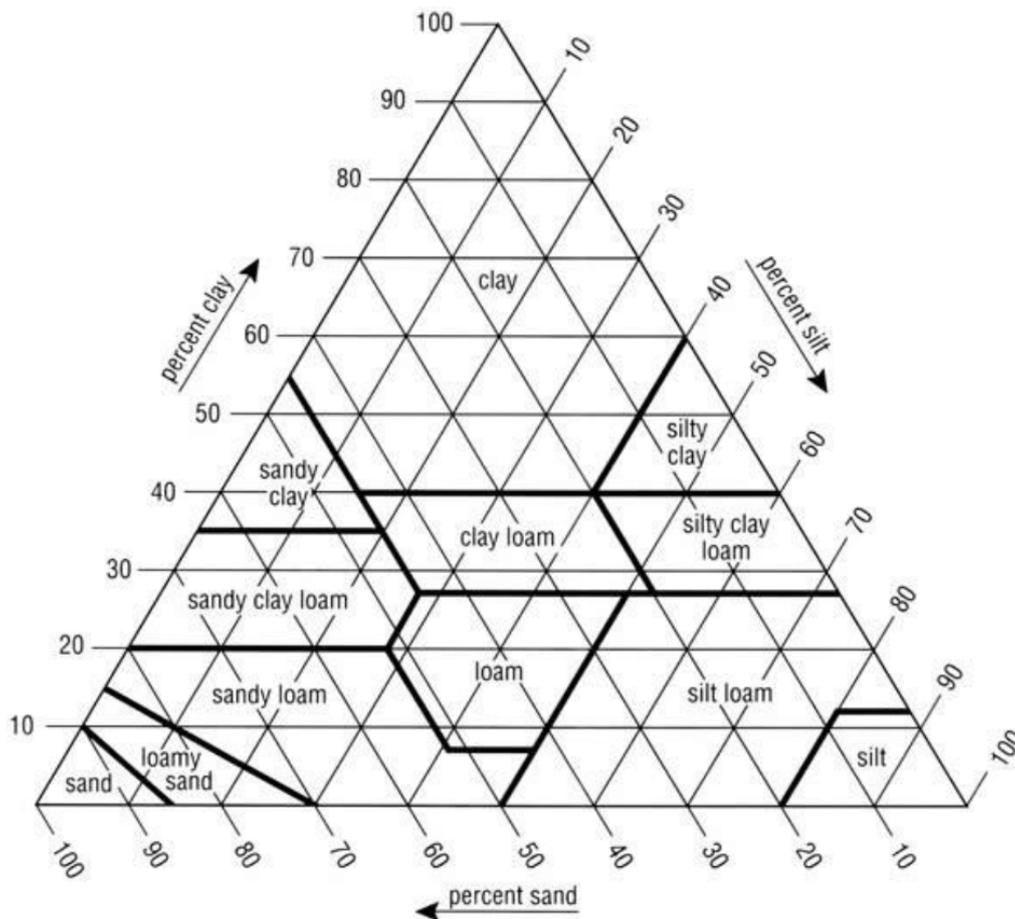


FIGURE 8 – Triangle textural. Sources : Zribi, 2016

La méthodologie VERLINDEN (2022) ainsi que ses données ont été utilisés dans le cadre de ce travail. De ce fait, le tri de sols selon leur occupation a sélectionné tous ceux ayant un potentiel agricole ou déjà utilisé dans le secteur agricole. Un traitement des données a également été opéré afin d'éviter les sols peu ou trop profonds ainsi que ceux ne disposant pas de valeur pour des variables précises. Certains paramètres nécessaires au fonctionnement de STICS ont été calculés selon des fonctions de pédotransfert tels que la densité apparente, l'albédo, la teneur en eau au point de flétrissement, la capacité au champ, etc. Un regroupement du nombre d'horizons a été réalisé afin de correspondre au formalisme de STICS. Le but est de garder le plus possible d'horizons de surface impactant de manière importante la croissance tout en pondérant leur profondeur pour rester représentatif par rapport au sol de départ. Une répartition texturale des sols a été procédée selon le système de classification de la FAO basé sur le triangle textural (Figure 8) (VERLINDEN, 2022).

### Sélection des sols

Une présélection des sols a été réalisée afin de ne contenir que les sols présents se trouvant dans un carré de 25 km de côté dont le centre est l'unité de Phytotechnie végétale de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. Dès lors, des statistiques descriptives ont été réalisées

afin d'identifier les catégories texturales les plus présentes pour cette aire géographique (table 4).

<b>Texture</b>	<b>Pourcentage [%]</b>
Argile limoneuse	0,26
Limon	1,82
Limon argileux fin	1,04
Limon fin	63,54
Limon sableux	1,04
Limon très fin	31,51
Sable limoneux	0,52
Sableux	0,26

TABLE 4 – Proportion des types de sols présents

Ces résultats montrent la domination spatiale des sols limoneux fins et très fins dans la région de Hesbaye. Dès lors pour être le plus représentatif possible de la région, il a été décidé de sélectionner les sols parmi ces catégories texturales qui sont le plus proches du point de référence étant l'unité de Phytotechnie végétale. Un calcul de distance euclidienne (équation 7) entre les coordonnées géographiques du point de référence et des sols a alors été opéré.

$$\text{DIST} = \sqrt{(X_s - X_0)^2 + (Y_s - Y_0)^2} \quad (7)$$

- DIST : La distance euclidienne entre le sol et le point de référence ;
- $X_s$  et  $Y_s$  : Les coordonnées du sol en Lambert 72 ;
- $X_0$  et  $Y_0$  : Les coordonnées du point de référence en Lambert 72.

L'objectif parallèle étant de créer de la variabilité, le choix a été de sélectionner 10 sols au sein des 2 types texturals les plus représentés. L'association de la distance euclidienne et de ce critère ont permis de distinguer 10 sols (tableau 5).

<b>Identifiant du sol sélectionné</b>	<b>Texture</b>
130EP001	Limon fin
130EP003	Limon fin
130EP032	Limon fin
130EP039	Limon fin
130EP038	Limon fin
130EP002	Limon très fin
130EP030	Limon très fin
130EP031	Limon très fin
130EP043	Limon très fin
130EP040	Limon très fin

TABLE 5 – Sols sélectionnés

## Fichiers itinéraires techniques

Ces fichiers contiennent toutes les informations relatives à la gestion de la culture comme la fertilisation, le travail du sol, l'irrigation, le semis avec leur lot de paramètres spécifiques comme les dates d'application, la profondeur de travail, la quantité d'eau, la densité de semis, etc. Dans cette étude, aucun apport de matière organique n'a été appliqué pour que l'entièreté de l'azote disponible pour la plante vienne de la fertilisation minérale et de l'azote déjà présent dans le sol grâce aux reliquats et à la minéralisation.

L'objectif de cette étude est d'évaluer comment le besoin azoté évolue avec le changement climatique. Dans ce cadre, 10 modalités de gestion azotée en 3 trois fractions ont été appliquées afin d'obtenir une fertilisation azotée variable. Un pas de 10kgN/ha par fraction a été choisi pour différencier les modalités (table 6). Ainsi cela permet d'avoir des quantités d'azotes inférieures et supérieures à la dose recommandée de 180kgN /ha. Les différentes fractions doivent être appliquées aux stades où la plante en a le plus besoin. Dès lors, au lieu d'appliquer la fertilisation à date fixe, elle sera réalisée en fonction de la somme des degrés-jours accumulés par la plante. Cela permet ainsi d'éviter les problèmes liés à la variabilité du climat dans un contexte de changement climatique. Les stades les plus nécessitants sont les stades BBCH 23, 30 et 39 qui correspondent réciproquement aux stades de tallage, redressement et dernière feuille. Les sommes de degrés-jours associées à ces stades sont de 110, 260 et 535 degrés-jours. La récolte se réalise systématiquement à la maturité physiologique si elle a été atteinte. Sinon la date permanente du 28 août a été fixée pour la récolte.

Modalité	1ère fraction [kgN/ha]	2ème fraction [kgN/ha]	3ème fraction [kgN/ha]	Azote total appliqué [kgN/ha]
N_000	0	0	0	0
N_030	10	10	10	30
N_060	20	20	20	60
N_090	30	30	30	90
N_120	40	40	40	120
N_150	50	50	50	150
N_180	60	60	60	180
N_210	70	70	70	210
N_240	80	80	80	240
N_270	90	90	90	270

TABLE 6 – Modalités de fertilisation azotée étudiées

### Fichier d'initialisation azotée

Afin d'assurer une bonne simulation de développement de la culture, le modèle STICS doit prendre en compte l'état azoté du sol. Cela se réalise via l'introduction d'un fichier d'initialisation azoté qui reprend les valeurs de concentration de nitrates par horizon. Celui utilisé dans cette étude est un fichier générique pour la région autour de Gembloux et est commun à toutes les années simulées.

### Création des unités de simulation

La modélisation dans STICS nécessite ce que l'on appelle des unités de simulations (USM). Une unité consiste en l'association des informations d'intérêt : l'initialisation du sol, les sols concernés, la station météorologique, la culture, l'itinéraire technique et le scénario climatique. La modélisation dans STICS requiert également une certaine méthodologie quant à la création des noms des USM pour leur identification au sein du logiciel. Le nom de chaque USM est alors créé selon les facteurs variables de cette étude dont voilà un exemple : "mod\_bUSM\_rcp85\_ht55\_130EP002\_N150\_2066".

- **rcp85\_ht\_55** : Scénario climatique concerné (RCP 8,5 et HT55, 2040-2070) ;
- **130EP002** : Identifiant du sol concerné (130EP002 sol limoneux très fin) ;
- **N150** : Modalité de fertilisation azotée concernée (application de 150 kgN/ha) ;
- **2066** : Année du début de la culture (2067 est l'année de récolte car le développement du froment s'étale sur deux années).

### iii Sélection des variables pertinentes

Suite à la modélisation, STICS génère un fichier de résultats par USM donné contenant une multitude de variables quelles soit phénologiques, agricoles ou environnementales. L'ensemble des variables n'a pas été pris en compte dans cette étude afin de sélectionner uniquement celles intéressantes pour répondre à l'objectif. L'ensemble des mesures considérées comme intéressantes sont reprises dans les différentes parties ci-dessous.

#### Variables de sorties de STICS

Les premières variables sélectionnées sont de caractère phénologique, elles concernent la date de floraison et de maturité de la culture et se mesurent en jours (Tableau 7).

Les variables suivantes traitent de l'aspect agronomiques de la culture, elles indiquent des mesures de croissance et de production (Tableau 7). Dès lors, la biomasse aérienne de la plante est évaluée aux deux stades de développement que sont la floraison et la maturité physiologique, elle se quantifie en t/ha. La quantité d'azote absorbé par la plante est également mesurée de la même manière et son unité est en kgN/ha. Les dernières variables agronomiques concernent une composante du rendement qu'est le nombre de grains mesuré en grains/m<sup>2</sup> et le rendement lui-même en t/ha.

Variable sélectionnée	Unité
Date de floraison et de maturité	[jours]
Biomasse aérienne à floraison et à maturité	[t/ha]
Quantité d'azote absorbé par la plante à floraison et à maturité	[kgN/ha]
Nombre de grains	[grains/m <sup>2</sup> ]
Rendement en grain	[t/ha]

TABLE 7 – Variable de sorties de STICS étudiées

## Indicateurs de stress

La deuxième catégorie de variables sélectionnées correspond aux différents stress (tableau 8). Ils sont d'origine hydrique pour certains comme SWFAC et EWFAC ou proviennent de carence comme INNFACT mais également d'origine climatique comme TPFAC. Les valeurs des indices de stress varient de 0 à 1 avec la valeur unitaire qui équivaut à une absence de stress.

Variable sélectionnée	Notation	Unité
Indice de stress hydrique stomatique	SWFAC	[0-1]
Indice de stress azoté actif sur la croissance en biomasse	INNFACT	[0-1]
Indice de captage d'eau actif sur la RUE et la transpiration	EWFAC	[0-1]
Facteur de réduction de l'efficacité d'utilisation du rayonnement liée à la température	TPFAC	[0-1]

TABLE 8 – Indices de stress étudiés

La méthode de calcul des stress a été remaniée afin de mieux percevoir l'intensité et le caractère ponctuel des stress. La valeur du stress final équivaut à la somme quotidienne (un jour= $I$ ) tout au long d'une année simulée de la différence entre valeur correspondant à l'absence de stress (1) et la valeur simulée quotidiennement du stress (équation 8).

$$STRESS_f = \sum_{I=240}^{625} (1 - STRESS(I)) \quad (8)$$

- $STRESS_f$  : valeur du stress final ;
- $STRESS(I)$  : valeur simulée quotidienne du stress en question.

Il s'agit en fait de l'aire sous la droite unitaire de l'intensité du stress en fonction de l'évolution phénologique de la plante comme démontré sur la figure 9. Ces stress pouvant apparaître aux différents stades de développement de la plante, il est essentiel d'opérer à des mesures du stress pour chaque phase. La phase juvénile ne sera pas présente au vu du peu de réponse observée lors de la modélisation. Afin de renforcer la capacité des variables à démontrer une réponse ponctuelle et d'identifier au mieux la temporalité des stress, la phase végétative a été scindée en deux. La phase végétative qui s'étend de la fin du stade juvénile (AMF) au début du stade floraison (FLO), est alors divisée en 2 par le stade de fin de croissance foliaire (ILAX). La période précédent ce stade sera alors qualifiée par le suffixe veg1 tandis que la période suivant ce stade aura le suffixe veg2.

Chaque facteur de stress sera alors décliné selon les différentes variables suivantes :

- SWFAC.veg1, SWFAC.veg2, SWFAC.rep
- EWFAC.veg1, EWFAC.veg2, EWFAC.rep
- INNFACT.veg1, INNFACT.veg2, INNFACT.rep
- TPFAC.veg1, TPFAC.veg2, TPFAC.rep

### Variables dérivées

Le dernier type de variable sélectionnée correspond aux variables dérivées dont le calcul se base sur des mesures agronomiques tels que le rendement, la quantité d'azote absorbé par

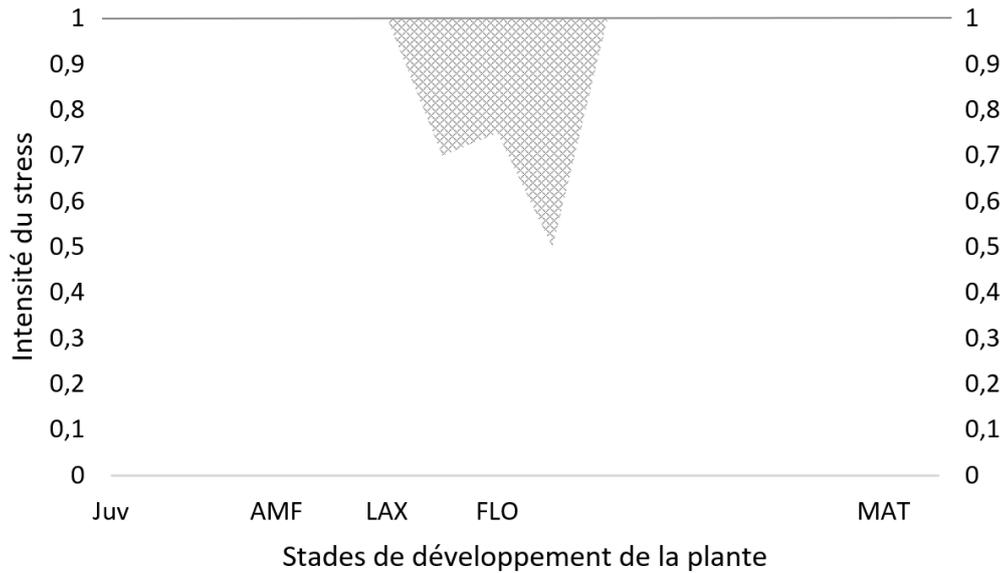


FIGURE 9 – Méthode de calcul de l'intensité des stress

la plante et la quantité d'azote appliqué (Tableau 9).

Variable	Méthode de calcul	Unité
Efficiace agronomique d'utilisation des nutriments ( $NUE_{ag}$ )	$NUE_{ag} = \frac{Y_F - Y_0}{F}$	[%]
Efficiace physiologique d'utilisation des nutriments ( $NUE_{phys}$ )	$NUE_{phys} = \frac{Y_F - Y_0}{U_F - U_0}$	[%]
Coefficient d'utilisation apparent (CAU)	$CAU = \frac{U_F - U_0}{F}$	[0-1]

TABLE 9 – Etablissement des méthodes de calcul des variables dérivées

- $Y_F$  : Rendement simulé pour un apport d'azote donné ;
- $Y_0$  : Rendement simulé pour la modalité témoin (aucune fertilisation) ;
- $F$  : Quantité d'azote appliquée correspondante ;
- $U_F$  : Quantité d'azote absorbé par la plante simulée pour un apport d'azote donné ;
- $U_0$  : Quantité d'azote absorbé par la plante simulée pour la modalité témoin (aucune fertilisation).

La CAU permet de mesurer la proportion de l'azote utilisé par la fertilisation qui se retrouve dans la partie aérienne de la plante. La  $NUE_{phys}$  permet de mesurer la performance de la plante dans toute sa globalité. La  $NUE_{ag}$  permet de mesurer la valorisation de la valeur ajoutée qu'est l'apport d'azote. Les trois variables sont ainsi reliées par le calcul simple suivant :

$$NUE_{ag} = CAU \cdot NUE_{phys} \quad (9)$$

## iv Traitement statistique des données

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé via le logiciel Rstudio. Le package "*agricolae*" a été utilisé pour l'exécution des analyses de variance ainsi que des tests de Student-Newman-Keuls de structuration des moyennes. L'analyse en composantes principales a été réalisé via le package "*stats*".

# IV Resultats et discussions

Cette section est dédiée à la présentation des résultats obtenus suite à la modélisation dans STICS et à leur analyse via différents tests statistiques. La première partie traite des variables de sortie liées à la phénologie telles que la date de floraison et de maturité. Ensuite, la seconde section étudie les stress présents considérés comme intéressants. Les différents stress seront traités par compartiment en fonction de leur réponse aux facteurs. Le troisième segment concerne l'analyse de variables agronomiques telles que la quantité d'azote absorbé par la plante à floraison et maturité, le nombre de grains et le rendement. Une autre partie présente les résultats de variables dérivées sur base de variables de sortie telles que la  $NUE_{ag}$ ,  $NUE_{phys}$  et la CAU. La dernière partie traite de l'analyse en composantes principales.

L'analyse statistique sur chaque variable s'est opérée via une analyse de la variance à trois facteurs fixes : NFrac (10 modalités), RCP\_HT (5 modalités) et Soil (10 modalités). Cette dernière a été réalisée sur RStudio avec la commande AOV.

Aucune interaction triple n'a été recensée au sein des résultats de l'Analyse de la Variance (AOV) 3. Si cette dernière présentait des interactions significatives (p-value < 0,05) à deux facteurs, une décomposition en AOV 2 a été réalisée pour chaque modalité du facteur RCP\_HT. Décomposition considérée comme pertinente étant donné que l'objectif de ce travail est d'identifier comment le besoin azoté évolue-t-il à l'avenir avec le changement climatique. Un test post hoc (SNK) de comparaison multiple a été appliqué afin d'évaluer les moyennes des facteurs pour chaque modalité du facteur RCP\_HT.

Si aucune interaction n'a été observée dans les résultats de l'AOV 3, aucune opération supplémentaire n'a été effectuée et un test SNK a été utilisé pour comparer les moyennes des modalités de chaque facteur.

Les résultats liés au facteur "Soil" ne sont présentés car il sert à apporter de la variabilité. D'ailleurs, aucune tendance n'est identifiable quant au type de sol présent.

En ce qui concerne les conditions d'application de l'Analyse de la Variance (ANOVA), ces dernières n'ont pas été respectées pour la totalité des variables. Cependant, le test d'analyse de variances a quand même été effectué au vu du très grand nombre de p-valeurs très hautement significatives (p-value < 0,001) au sein du test.

Finalement, une analyse multivariée en composantes principales a été réalisée afin d'évaluer quelles variables expliquent le mieux l'évolution et la variabilité générale des résultats.

## 1 Analyse statistique des variables de sortie

### i Date de floraison et de maturité

En ce qui concerne les variables liées à la phénologie que sont la date de floraison et de maturité, l'analyse de la variance à 3 facteurs n'a révélé aucune interaction double (Annexe A - B). Cependant, les résultats affichent des différences très hautement significatives (p-value < 0,001) entre les moyennes des 2 variables vis-à-vis des facteurs "NFrac" et "Soil" (Annexe A - B).

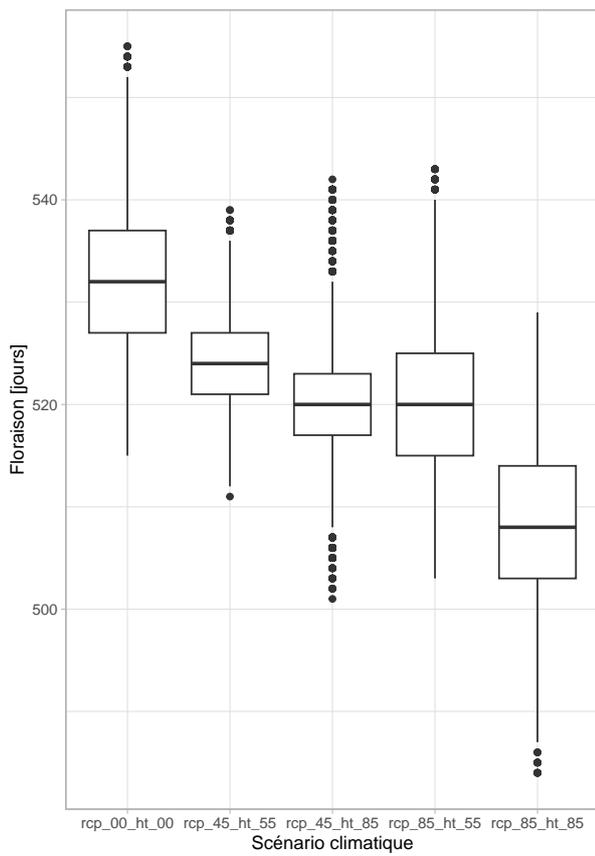
Le test SNK (Annexe A - B) démontre la présence de 4 groupes pour la variable "date de maturité" et 5 groupes pour la variable "date de floraison". Les valeurs moyennes maximales pour les 2 variables se trouvent au niveau du scénario climatique historique. Les valeurs moyennes, réciproquement pour la floraison et la maturité, sont de 532 et 580 jours juliens. Inversement, la modalité RCP8\_HT85 contient les valeurs minimales moyennes qui sont, réciproquement pour la floraison et la maturité, 508 et 555 jours juliens.

A la floraison on retrouve 3 groupes intermédiaires selon l'ordre décroissant de RCP45\_HT55, RCP85\_HT55, RCP45\_HT85 ayant pour date moyenne de 524, 521 et 520 jours juliens. Quant à la maturité, seulement 2 groupes sont distingués (Annexe A - B). Un groupe pour la modalité RCP45\_HT55 qui a comme valeur moyenne 570 jours juliens et le dernier groupe attribué aux modalités RCP45\_HT85 et RCP85\_HT55 avec 568 jours juliens.

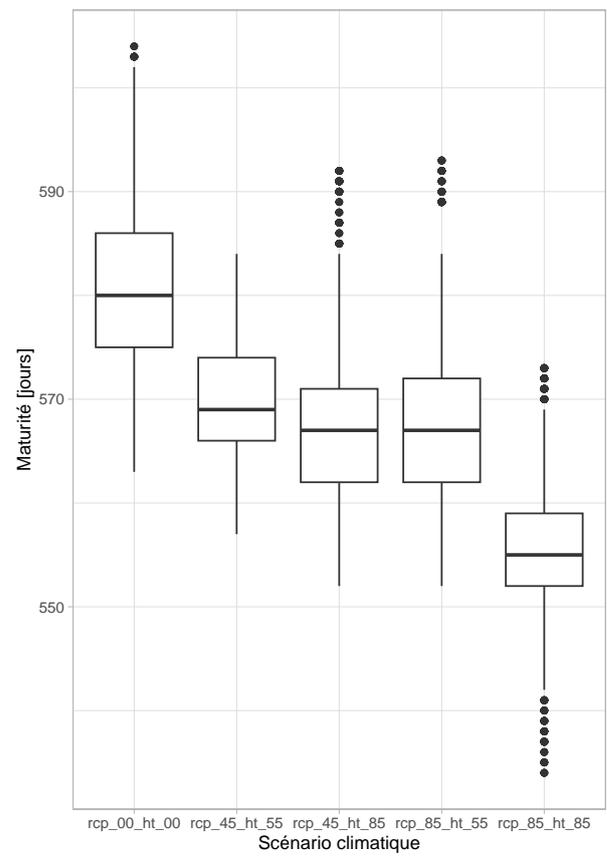
Les résultats du test SNK portant sur le facteur NFrac montrent des valeurs moyennes rassemblées dans 9 groupes pour la floraison et 10 groupes pour la maturité. Les modalités de "NFrac" successives sont toujours statistiquement équivalentes à la dose précédente. Chaque dose de fertilisation est considérée comme non significativement différente de la dose précédente à l'exception de la première dose "N000". Ces valeurs moyennes diminuent avec l'augmentation de la fertilisation azotée.

### Discussion des résultats

Les résultats indiquent qu'au plus un scénario climatique possède des valeurs élevées de concentration en  $CO_2$ , au plus sa phénologie sera avancée. Cela confirme que l'effet fertilisant  $CO_2$  réduit le temps nécessaire pour atteindre autant pour la date de floraison que de maturité (EITZINGER et al., 2003). C'est la raison pour laquelle il y a un tel écart entre le dernier scénario climatique et le reste car ce dernier contient une concentration de  $CO_2$  bien plus élevée. D'ailleurs, les scénarios climatiques regroupés pour la date de maturité se situent à des concentrations assez semblables en  $CO_2$ .

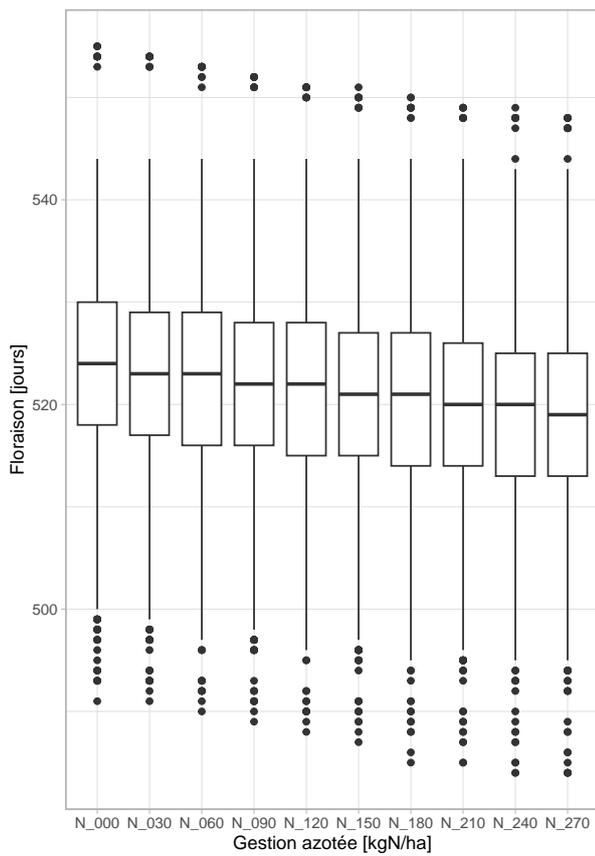


(a) Iflos sur RCP

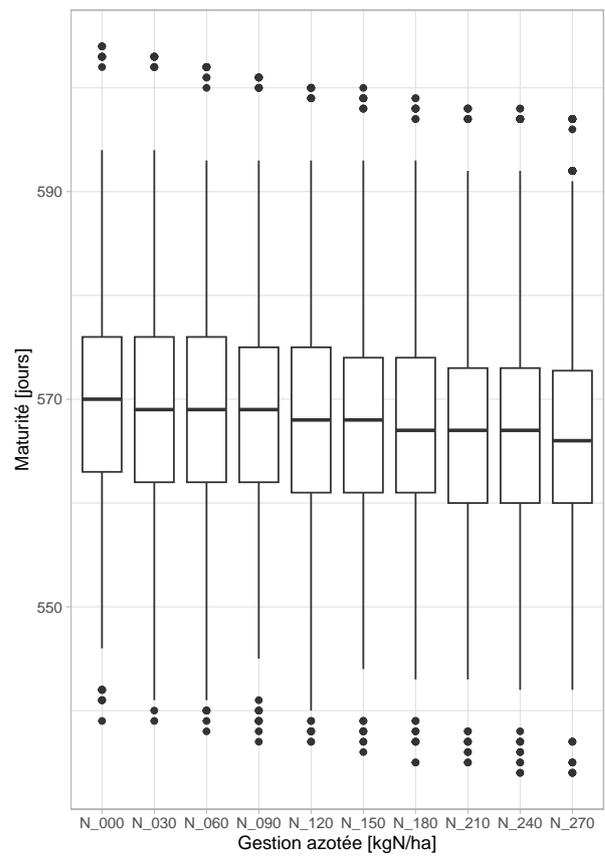


(b) Imat sur RCP

FIGURE 10 – Boxplots des date de (a) floraison et (b) maturité par scénario climatique sous les différents sols et fertilisations confondues



(a) Floraison sur Nfrac



(b) Maturité sur Nfrac

FIGURE 11 – Boxplots des date de (a) floraison et (b) maturité par fertilisation sous les différents sols et scénarios climatiques confondus

L'augmentation de la fertilisation azotée produit également une avancée au niveau de la phénologie de la plante. Cependant, l'effet lié à la gestion azotée est moindre comparé à celui du scénario climatique. Il provient d'un rétro-effet dans le formalisme de calcul de STICS. Dès lors, il est considéré que globalement la phénologie n'est pas impactée par la fertilisation azotée.

## ii Étude des stress

Une analyse de la variance a été appliquée sur l'ensemble des stress. Les stress présents ont réagi différemment à l'analyse de la variance à 3 facteurs. L'AOV3 des variables "SWFAC.veg2" et "INNFAC.veg1" a recensé 3 interactions doubles significatives entre les 3 facteurs (Annexe D - K). Tandis que pour les variables "EWFAC.veg1", "INNFAC.veg2", "SWFAC.rep" et "SWFAC.veg1" l'analyse de la variance indique 2 interactions doubles avec un élément commun qu'est le facteur "RCP\_HT" (Annexe F - L - E - C). Une analyse de la variance à deux facteurs décomposée par modalité de "RCP\_HT" a été réalisée pour les variétés citées ci-dessus. L'AOV 3 des variables "EWFAC.veg2", "TPFAC.veg1", "TPFAC.veg2" et "TPFAC.rep", n'a montré aucune interaction entre les trois facteurs (Annexe G - H - I - J). Ci-dessous, les variables de stress vont être examinées séparément selon l'impact sur leur réponse des facteurs.

La première analyse consiste à examiner l'impact du changement climatique sur les stress. Les variables présentes dans cette partie sont celles dont les moyennes sont considérées comme significativement différentes ou dont l'ANOVA a subi une décomposition par scénario climatique. En conditions historiques, les stress importants dont les valeurs sont les plus élevées correspondent aux variables "SWFAC.rep", "TPFAC.veg1", "INNFAC.veg1" et "INNFAC.veg2" (Table 10). Avec l'évolution des scénarios climatiques, les stress liés à la variable SWFAC diminuent fortement voir disparaissent avec l'évolution des scénarios climatiques. En ce qui concerne les stress liés à "EWFAC", ils augmentent avec le changement climatique par rapport aux conditions historiques. Cependant, les valeurs liées à la variable "EWFAC.veg2" augmentent de manière assez hétérogène en fonction du "RCP\_HT" et restent faibles quel que soit le scénario futur. Le tableau? permet de remarquer que les stress liés à "TPFAC" augmentent avec le changement climatique par rapport au scénario historique. Les valeurs restent tout de même assez minimales à l'exception de la variable "TPFAC.veg1" qui contient des observations assez élevées. Les variables relatives au stress azoté nommées "INNFAC" augmentent dans des proportions différentes avec l'évolution des scénarios climatiques. La variable "INNFAC.veg1" augmente très légèrement et exprime les valeurs les plus hautes de tous les stress. Tandis que la variable "INNFAC.veg2" augmente de manière plus importante mais expose des valeurs moins élevées mais tout de même importantes.

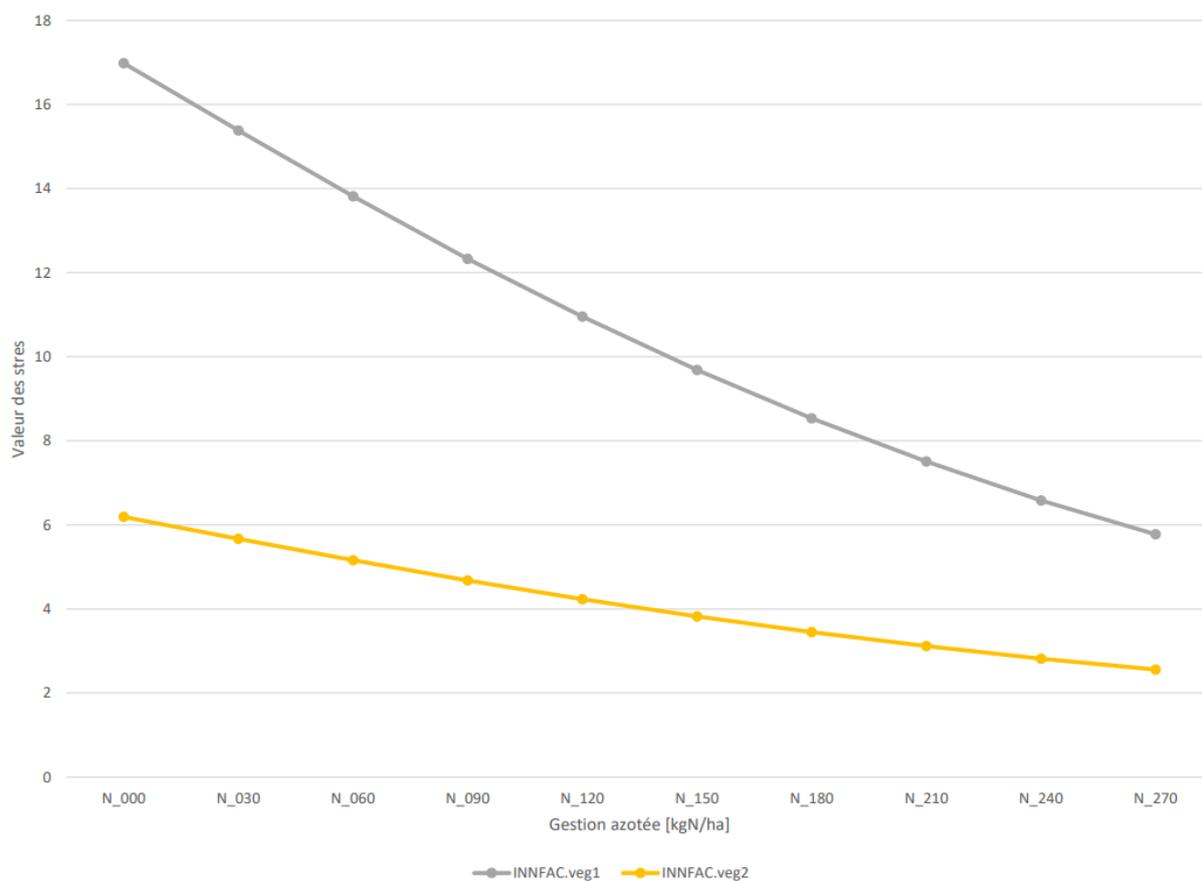


FIGURE 12 – Evolution de l'intensité du stress en fonction de la gestion azotée

	SWFAC.veg1	SWFAC.veg2	SWFAC.rep	EWFAC.veg1	EWFAC.veg2
rcp_00_ht_00	0,0000157	0,27	11,53	0,10	0,34
rcp_45_ht_55	/	0,14	8,93	0,98	0,45
rcp_45_ht_85	/	0,06	6,46	2,81	0,30
rcp_85_ht_55	/	0,02	5,30	1,16	0,16
rcp_85_ht_85	/	/	2,11	3,25	0,52
	TPFAC.veg1	TPFAC.veg2	TPFAC.rep	INNFAc.veg1	INNFAc.veg2
rcp_00_ht_00	3,13	0,16	0,47	10,47	5,43
rcp_45_ht_55	4,65	0,31	0,71	10,91	5,99
rcp_45_ht_85	5,23	0,33	0,57	11,06	6,49
rcp_85_ht_55	4,23	0,34	0,59	10,69	6,84
rcp_85_ht_85	4,26	0,31	0,62	10,64	7,09

TABLE 10 – Valeurs moyennes des différents stress par scénario climatique pour toutes les fertilisations et sols confondus

Vis-à-vis de la fertilisation azotée, seulement 2 variables semblent subir une modification de leur réponse avec l'augmentation de l'apport d'azote (Figure 12). Les variables "INNFAc.veg1" et "INNFAc.veg2" diminuent très fortement au fur et à mesure de l'augmentation du facteur "NFrac". Cependant, ces variables restent à des valeurs très élevées.

## Discussion des résultats

Les résultats montrent une diminution très importante pour les variables liées au stress par déficit d'eau, ce stress est levé quel que soit le type de sol. Cela est dû à l'effet fertilisation  $CO_2$  qui permet une meilleure photosynthèse (ROSENBERG et al., 1990). Cela induit une réduction du besoin de transpiration de la plante et permet une meilleure conservation de l'eau dans les sols. A l'inverse, le phénomène d'anoxie va augmenter avec l'évolution des scénarios climatiques. Notamment durant la première phase végétative dû aux précipitations hivernales abondantes et de la meilleure conservation de l'eau dans le sol.

En ce qui concerne les stress thermiques liés à la variable "TPFAC", malgré leur augmentation légère, ils sont considérés comme non impactant. En effet, le changement climatique induira des coups de chaud ponctuels. Cependant, en moyenne dans nos latitudes, les températures ne sont pas assez élevées pour le froment d'hiver et ne génèrent pas de stress suffisant pour impacter la croissance de la plante.

L'analyse des résultats indiquent que les stress azotés seront les stress les plus importants à l'avenir. Notamment la carence azotée en deuxième phase végétative qui augmente significativement avec l'évolution des scénarios climatiques par rapport à la première phase végétative. L'augmentation de ce stress azoté est dû potentiellement à la création de biomasse qui se réalise principalement durant la phase végétative. En effet, l'accroissement de production de biomasse avec les scénarios de changement climatique (voir section suivante) a nécessité une meilleure absorption de l'azote du sol (ROUDIER et al., 2011). De ce fait, l'azote devient un facteur limitant pour la croissance de la plante qui peut être pallié car les variables assimilées aux carences azotées, "INNFAC", diminuent logiquement de manière importante avec l'augmentation de l'apport d'azote.

### iii Biomasse aérienne à floraison et à maturité

A propos de la biomasse aérienne à floraison et à maturité, l'analyse de la variance à 3 facteurs a indiqué 3 interactions doubles (Annexe M - N). Les AOV 2 par modalité du facteur "RCP\_HT" sur les deux variables dévoilent des différences très hautement significatives ( $p$ -value  $< 0,001$ ) des moyennes des deux facteurs que sont "Soil" et "NFrac" (Annexe M - N).

Le test SNK (Annexe M - N) démontre la présence d'un groupe de moyennes par modalité de "NFrac", au sein des modalités décomposées "RCP\_HT" pour les deux 2 variables de biomasse aérienne (Figure 13 - 14). Dès lors, on peut observer que chaque modalité de "NFrac" présente une biomasse moyenne significativement différente pour tous les scénarios climatiques.

Il y a une seule exception où deux modalités de fertilisation appartiennent au même groupe. Elles concernent la variable de biomasse aérienne à maturité et se trouvent au niveau des modalités N240 et N270 pour le scénario climatique historique (Figure 14). Ces moyennes valent réciproquement 18,54 et 18,96 t/ha et appartiennent au groupe qui a la

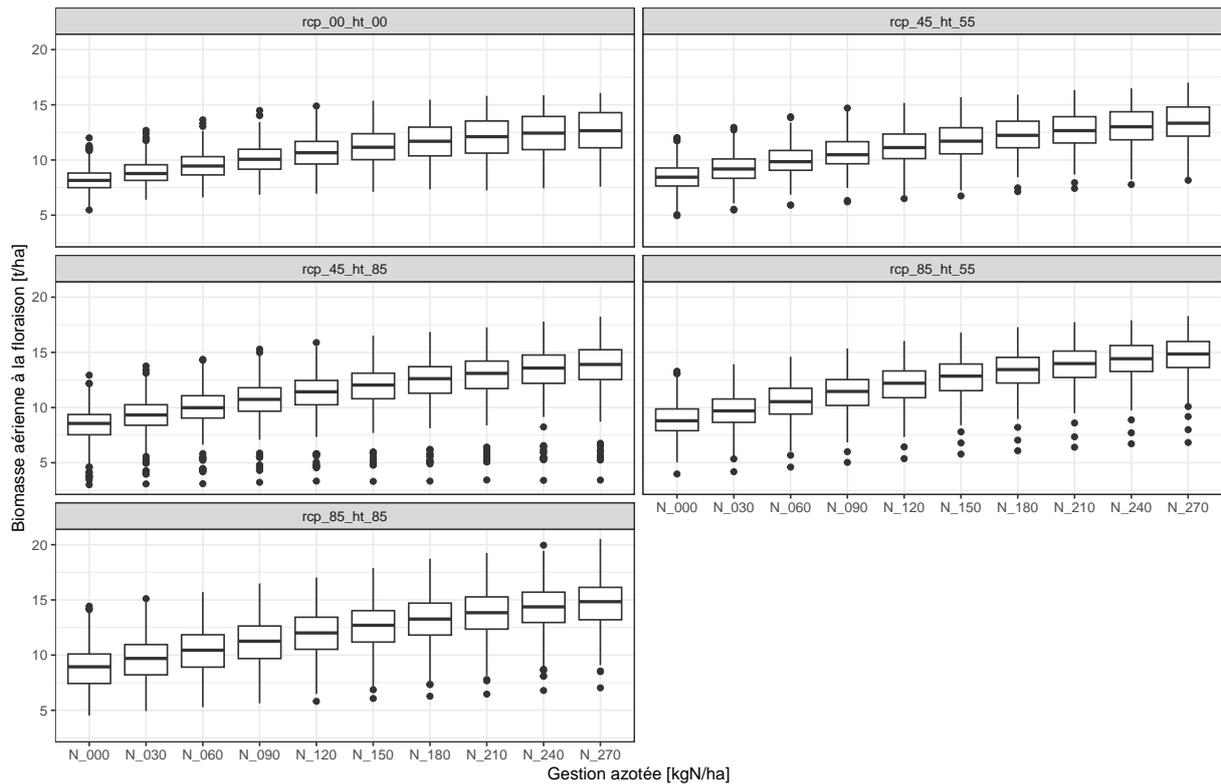


FIGURE 13 – Boxplots de la biomasse aérienne à floraison par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus

biomasse aérienne moyenne à maturité la plus faible de "RCP00\_HT00" (Table 12). Les valeurs moyennes des groupes des deux variables évoluent de manière croissante avec l'augmentation de la fertilisation au sein des différentes modalités du facteur "RCP\_HT" (Figure 13 - 14).

En ce qui concerne l'évolution entre les différentes modalités des "RCP\_HT", on peut remarquer que les biomasses aériennes à floraison et maturité pour les scénarios futurs sont supérieures au scénario historique et évoluent différemment selon les variables.

Vis-à-vis de la variable de biomasse aérienne à floraison les valeurs maximales et minimales se trouvent réciproquement aux modalités "RCP85\_HT55" et "RCP45\_HT55". Tandis que les valeurs intermédiaires se trouvent, selon un ordre décroissant, sous les scénarios "RCP85\_HT85" et "RCP45\_HT85".

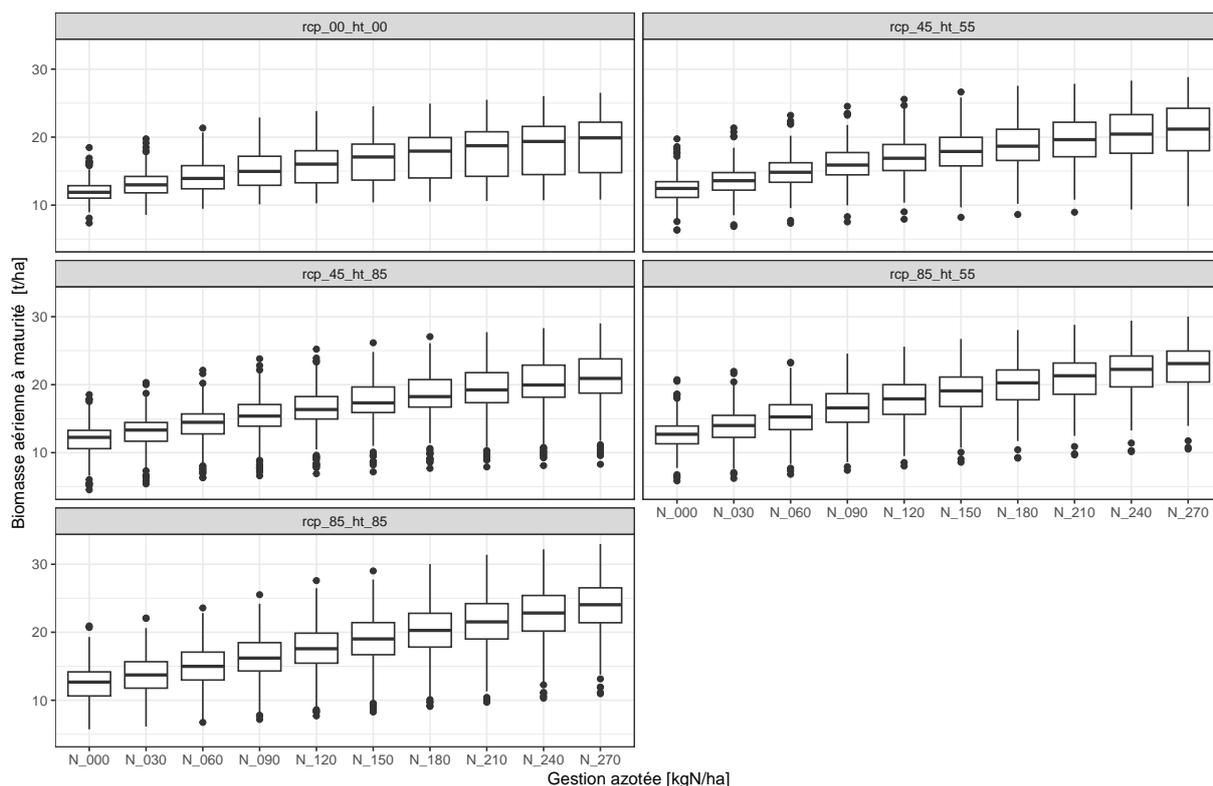


FIGURE 14 – Boxplots de la biomasse maturité à floraison par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus

Scénario climatique	Biomasse aérienne moyenne à floraison [t/ha]										
	N000	N030	N060	N090	N120	N150	N180	N210	N240	N270	Moyenne
rcp_00_ht_00	8,20	8,89	9,53	10,13	10,68	11,18	11,61	11,99	12,30	12,56	10,71
rcp_45_ht_55	8,45	9,22	9,95	10,64	11,25	11,80	12,28	12,70	13,08	13,42	11,28
rcp_45_ht_85	8,41	9,18	9,90	10,59	11,20	11,80	12,34	12,82	13,28	13,66	11,32
rcp_85_ht_55	8,86	9,70	10,53	11,32	12,06	12,71	13,31	13,84	14,30	14,69	12,13
rcp_85_ht_85	8,86	9,62	10,39	11,14	11,86	12,54	13,16	13,73	14,24	14,68	12,02

TABLE 11 – Valeurs moyennes de la biomasse aérienne à floraison par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus

Scénario climatique	Biomasse aérienne moyenne à maturité [t/ha]										
	N000	N030	N060	N090	N120	N150	N180	N210	N240	N270	Moyenne
rcp_00_ht_00	12,03	13,09	14,13	15,06	15,93	16,71	17,40	18,04	18,54	18,96	15,99
rcp_45_ht_55	12,36	13,62	14,87	16,02	17,05	17,98	18,82	19,60	20,35	20,98	17,16
rcp_45_ht_85	11,92	13,05	14,20	15,33	16,38	17,44	18,42	19,31	20,16	20,92	16,71
rcp_85_ht_55	12,68	13,96	15,27	16,56	17,78	18,91	19,94	20,92	21,81	22,58	18,04
rcp_85_ht_85	12,50	13,66	14,90	16,20	17,52	18,83	20,11	21,37	22,57	23,69	18,14

TABLE 12 – Valeurs moyennes de la biomasse aérienne à maturité par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus

L'ordre des scénarios climatiques futurs associés aux valeurs moyennes pour la variable biomasse aérienne à maturité suit l'ordre croissant suivant :

"RCP45\_HT85", "RCP45\_HT55", "RCP85\_HT55" et "RCP85\_HT85".

## Discussion des résultats

La différence entre la biomasse aérienne à floraison et à maturité permet de nous dire que la majorité de la biomasse est produite durant la phase végétative. De plus, ces résultats confirment que l'augmentation de concentration en  $CO_2$  sous différents scénarios climatiques permet d'améliorer la production de biomasse aérienne à floraison et à maturité (ACOCK & ACOCK, 1993). En effet, étant donné que les stress hydriques et ceux liés à la température sont levés, cela permet un accroissement de biomasse (voir section précédente).

Pour ce qui est de l'impact de la fertilisation azotée, il semble qu'il y a très peu d'équivalence statistique, ce qui signifie qu'il y a des gains significatifs dès qu'il y a augmentation de la fertilisation appliquée. Le stress présent majoritairement étant celui lié à la fertilisation azotée, des quantités plus importantes d'azote permettent donc de maximiser la production biomasse à floraison et à maturité.

### iv Quantité d'azote absorbé par la plante à floraison et maturité

En ce qui concerne la quantité d'azote absorbé par la plante à floraison et à maturité, l'analyse de la variance à 3 facteurs a indiqué 2 interactions doubles avec pour facteur commun "RCP\_HT" (Annexe O - P). Des AOV 2 par modalité du facteur "RCP\_HT" ont été réalisées sur les deux variables. Elles indiquent des différences très hautement significatives (p-value < 0,001) de la quantité moyenne d'azote absorbé par la plante par rapport aux deux facteurs qui sont "Soil" et "NFrac" (Annexe O - P).

Le test SNK (Annexe O - P) révèle que chaque groupe de moyennes ne contient à chaque fois qu'une seule modalité de "NFrac". Dès lors, il existe 10 groupes de moyennes par modalité décomposée de "RCP\_HT" pour les deux variables de quantité d'azote absorbée par la plante (Figure 15-16). Chaque modalité de fertilisation admet une valeur moyenne significativement différente des autres quel que soit le scénario climatique.

Les valeurs moyennes des deux variables, au sein des différentes modalités du facteur "RCP\_HT", augmentent avec des quantités plus importantes de fertilisation (Figure 15 - 16).

A propos de l'évolution des différents scénarios climatiques, la quantité d'azote absorbé par la plante à floraison et maturité augmente par rapport au scénario de référence quel que soit le scénario futur (Table 13 - 14). Les valeurs maximales, pour les deux variables, se trouvent sous le "RCP85\_HT55" puis diminuent en passant par le "RCP85\_HT85" puis par "RCP45\_HT55" pour arriver à la valeur minimale pour la modalité "RCP45\_HT85".

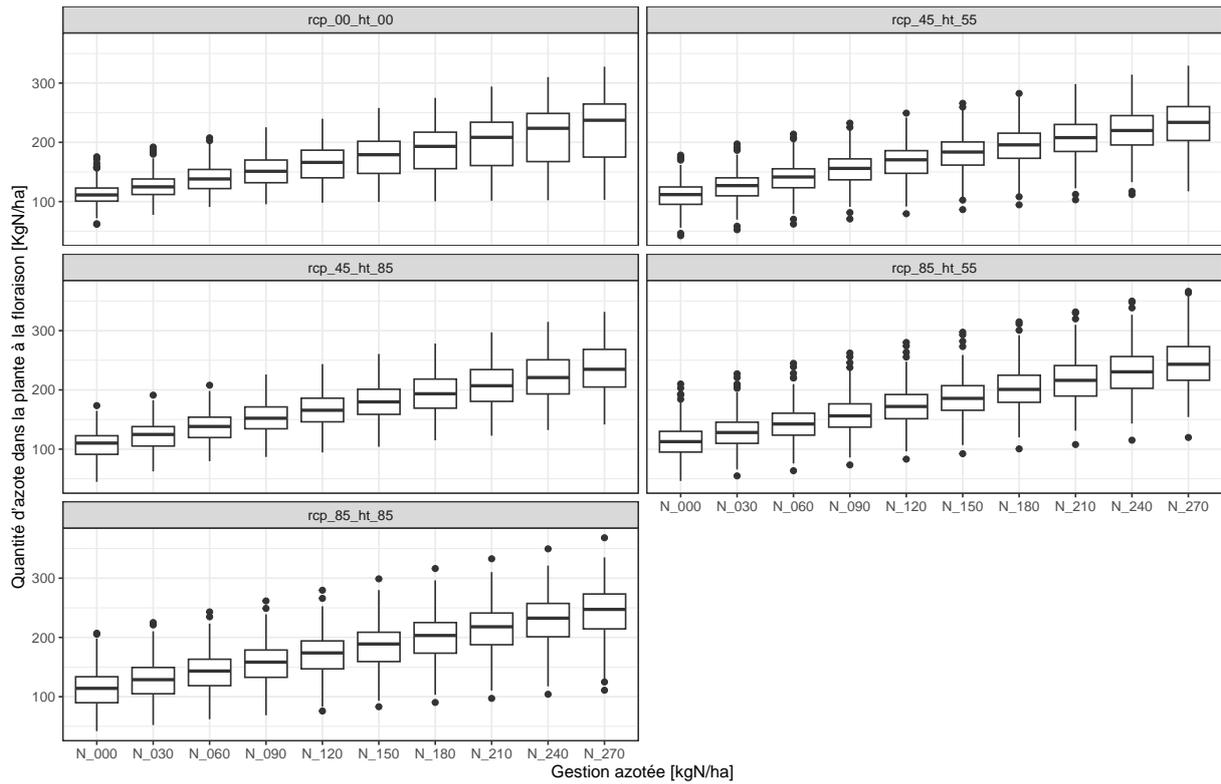


FIGURE 15 – Boxplots de la quantité d'azote absorbé par la plante à floraison par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus

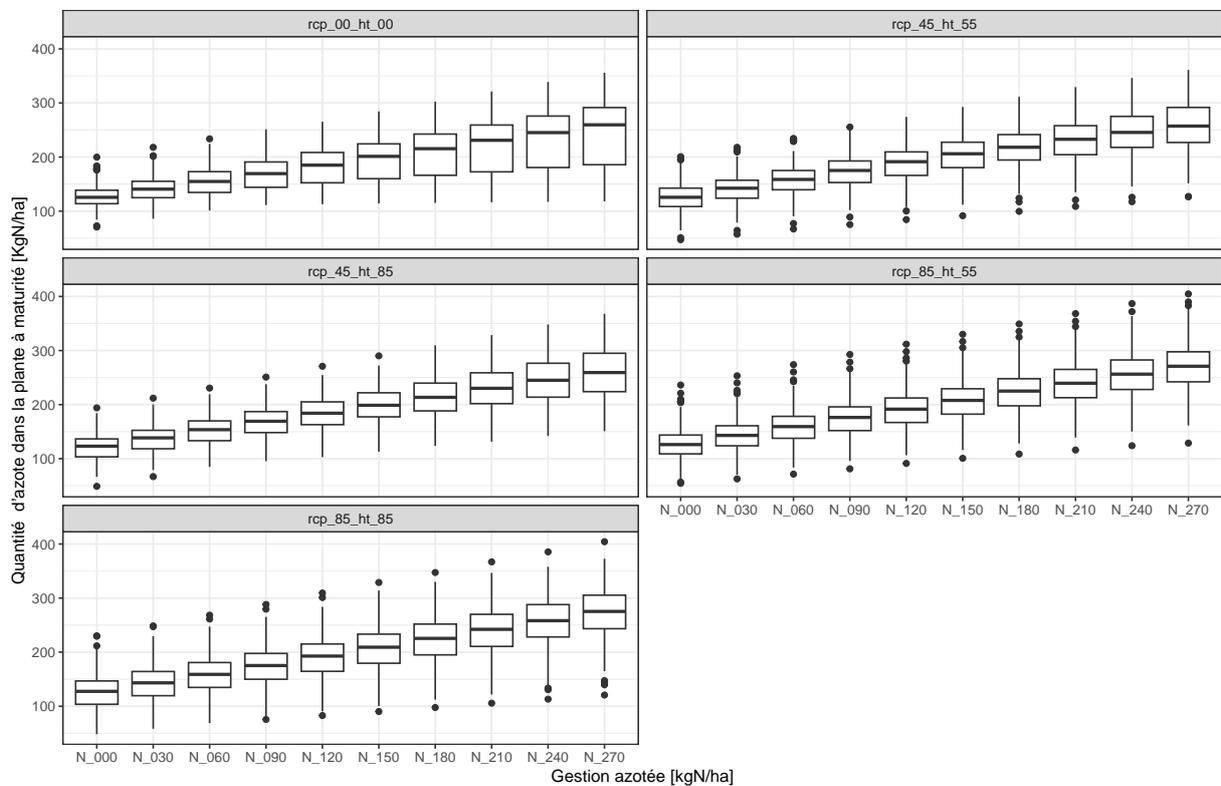


FIGURE 16 – Boxplots de la quantité d'azote absorbé par la plante à maturité par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus

Scénario climatique	Quantité d'azote absorbé par la plante à floraison [kgN/ha]										
	N000	N030	N060	N090	N120	N150	N180	N210	N240	N270	Moyenne
rcp_00_ht_00	112,25	125,69	138,74	151,45	164,12	176,59	188,77	200,85	212,34	223,34	169,41
rcp_45_ht_55	110,85	125,39	139,69	153,76	167,53	181,18	194,51	207,42	220,26	232,50	173,31
rcp_45_ht_85	107,94	122,49	136,96	151,52	165,71	180,05	194,16	208,00	221,80	235,10	172,37
rcp_85_ht_55	113,14	127,99	142,69	157,55	172,36	186,94	201,79	216,63	231,20	245,42	179,57
rcp_85_ht_85	111,61	126,41	141,09	155,77	170,59	185,33	200,05	214,79	229,32	243,56	177,85

TABLE 13 – Valeurs moyennes de la quantité d'azote absorbé par la plante à floraison par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus

Scénario climatique	Quantité d'azote absorbé par la plante à maturité [kgN/ha]										
	N000	N030	N060	N090	N120	N150	N180	N210	N240	N270	Moyenne
rcp_00_ht_00	126,99	141,44	155,59	169,14	182,50	195,55	208,35	221,03	233,00	244,50	187,81
rcp_45_ht_55	125,69	141,53	157,25	172,63	187,57	202,31	216,71	230,65	244,52	257,68	193,65
rcp_45_ht_85	120,74	136,23	151,89	167,67	183,16	198,80	214,28	229,43	244,46	259,01	190,57
rcp_85_ht_55	127,24	143,16	159,12	175,30	191,35	207,27	223,21	239,24	254,91	270,15	199,10
rcp_85_ht_85	125,60	141,44	157,33	173,53	190,03	206,53	223,15	239,84	256,37	272,61	198,64

TABLE 14 – Valeurs moyennes de la quantité d'azote absorbé par la plante à maturité par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus

## Discussion des résultats

Lorsque qu'il y a soustraction entre les valeurs d'azote absorbé par la plante à maturité et à floraison, les résultats indiquent que la majorité de l'azote absorbé se réalise durant la phase végétative.

Les scénarios climatiques futurs contenant des concentrations supérieures en  $CO_2$  permettent à la plante d'absorber plus d'azote. En effet, les résultats démontrent que l'effet fertilisant  $CO_2$  permet à la plante de laisser plus d'eau dans les sols via la réduction de l'évapotranspiration. Dès lors, cette eau présente dans les sols rend l'azote du sol mobilisable pour la plante. Cet effet combiné à la réduction des stress liés à la température et à l'eau explique la meilleure absorption d'azote par la plante.

En ce qui concerne la fertilisation azotée, les résultats expriment des gains significatifs par apport d'azote. Le peu d'équivalence statistique semble logique étant donné que si la disponibilité en azote pour la plante est élevée, la plante peut donc absorber plus d'azote que cela soit au stade floraison et maturité.

Au stade floraison : établissement déjà de 80% des réserves et on voit que la plante y est déjà. Un froment exporte (QNPlant.mat) environ 360 kg dont 180 kg viennent du sol et 180 kg viennent de la fertilisation.

### v Nombre de grains

L'AOV 3 a révélé 3 interactions doubles (Annexe Q). Une AOV 2 a donc été réalisée sur les facteurs "NFrac" et "Soil" par modalité du facteur "RCP\_HT". Elle montre des différences

très hautement significatives ( $p$ -value  $< 0,001$ ) entre le nombre de grains moyen pour les deux facteurs utilisés, sous chacun des scénarios climatiques "RCP\_HT" (Annexe Q).

Les résultats du test SNK (Annexe Q) ont révélé que chaque fertilisation était détenue dans un seul groupe au sein de chaque modalité du facteur "RCP\_HT" (Figure 17). De ce fait, à chaque modalité de la fertilisation azotée est associée un nombre de grains significativement différent des autres pour l'ensemble des scénarios climatiques.

Une exception est recensée au niveau du scénario climatique historique. La modalité "RCP00\_HT00" ne contient que 9 groupes (Table 15). La modalité N240 obtient un score équivalent aux deux groupes dont le nombre de grains moyen est maximal au sein de ce scénario climatique, a et b. Sa valeur de 21 371 grains/m<sup>2</sup> a été estimée par le test SNK comme non significativement différente des moyennes de N210 et N270. Ces dernières sont réciproquement de 20 863 et 21 752 grains/m<sup>2</sup>.

NFrac	Moyenne du nombre de grains [grains/m <sup>2</sup> ]	groups
N_270	21751,66	a
N_240	21370,97	ab
N_210	20862,5	b
N_180	20203,43	c
N_150	19394,88	d
N_120	18544,24	e
N_090	17600,34	f
N_060	16676,36	g
N_030	15654,97	h
N_000	14615,14	i

TABLE 15 – Valeurs du nombre de grain moyen et les groupes associés pour tous les sols et scénarios climatiques confondus

Toutes les valeurs moyennes augmentent avec la hausse de la fertilisation au sein des différentes modalités du facteur "RCP\_HT" (Figure 17). Les résultats indiquent un déplacement des valeurs comprises dans les quartiles 2 et 3 qui se décalent vers une valeur maximum commune aux différentes modalités de gestion azotée.

L'analyse de l'évolution du nombre de grains en fonction des "RCP\_HT" montre différentes réponses selon le scénario climatique malgré qu'ils soient tous plus élevés que le scénario de référence. La valeur maximale se trouve sous le "RCP85\_HT55" puis les valeurs diminuent en passant par le "RCP85\_HT85" puis par "RCP45\_HT55" pour arriver à la valeur minimale pour la modalité "RCP45\_HT85".

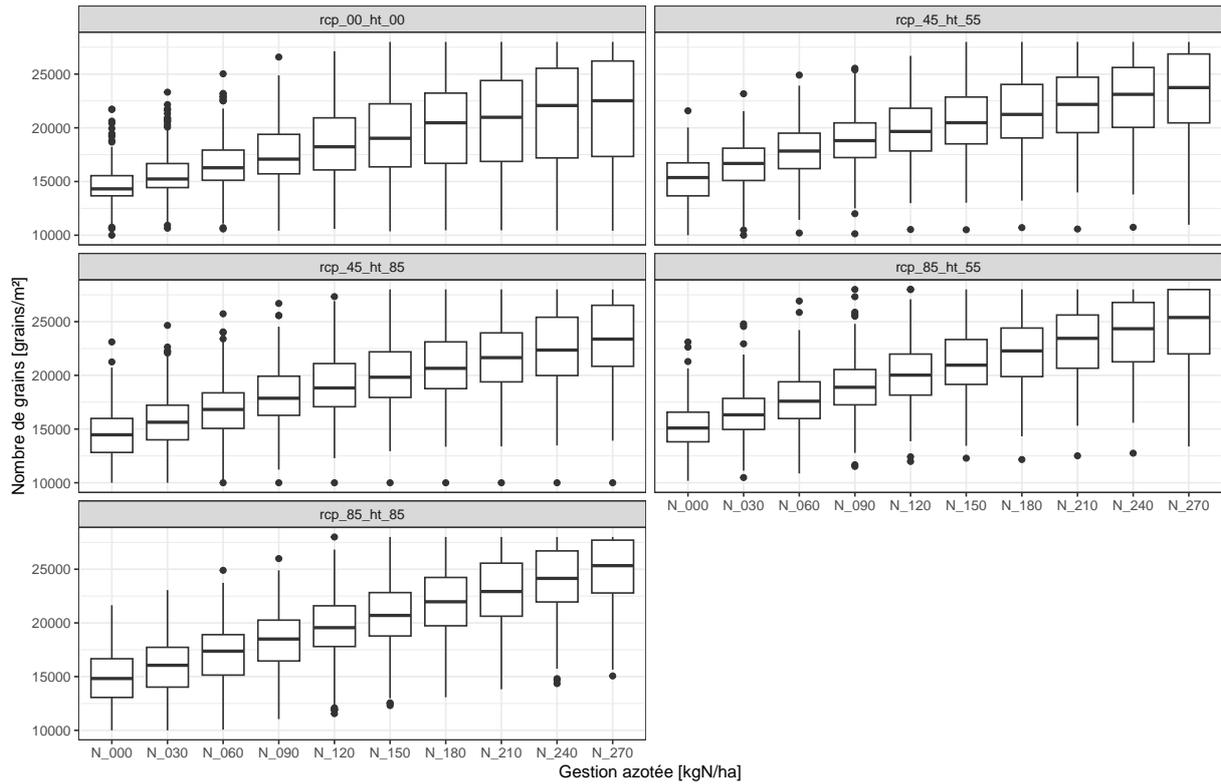


FIGURE 17 – Boxplots du nombre de grain par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus

Scénario climatique	Nombre de grains [grains/m <sup>2</sup> ]										
	N000	N030	N060	N090	N120	N150	N180	N210	N240	N270	Moyenne
rcp_00_ht_00	14615,14	15654,97	16676,36	17600,34	18544,24	19394,88	20203,43	20862,5	21370,97	21751,66	18667,45
rcp_45_ht_55	15284,19	16510,23	17731,86	18831,93	19813,41	20645,29	21403,62	22116,62	22773,66	23384,1	19849,49
rcp_45_ht_85	14534,82	15677,46	16867,56	18042,47	19100,54	20020,33	20942,52	21820,98	22619,14	23371,85	19299,77
rcp_85_ht_55	15232,08	16459,49	17742,28	18989,35	20201,39	21276,81	22301,9	23226,05	23965,22	24616,98	20401,16
rcp_85_ht_85	14885,14	15913,38	17053,34	18256,5	19472,09	20667,92	21824,63	22901,08	23900,63	24746,7	19962,14

TABLE 16 – Valeurs moyennes du nombre de grain par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus

## Discussion des résultats

Les résultats montrent que le nombre de grains est impacté positivement par le changement climatique. Le nombre de grains est une composante déterminée durant la phase végétative de la plante et est associée aux stress en phase de pré-floraison. L'avancement de la physiologie de la plante et l'augmentation de certains stress en phase végétative ne semblent pas impacter négativement le nombre de grains produits. Cela est probablement compensé par l'impact plus important de l'effet fertilisation  $CO_2$ . La présence d'une plus grande biomasse au stade de floraison indique qu'il est logique d'avoir un nombre de grains plus grand avec l'évolution des scénarios climatiques.

L'apport d'azote permet également d'augmenter significativement le nombre de grains moyen. Les quantités les plus importantes d'azote permettent de maximiser le nombre moyen

de grains pour les modalités testées. Les résultats montrent qu'avec l'augmentation de la fertilisation azotée, le nombre de grains produits par la plante se rapproche d'une valeur maximum. Dès lors, les conditions de croissance ont permis d'atteindre la limite génétique du froment d'hiver, défini par la calibration du modèle. On voit que cette borne génétique est également atteinte de manière plus rapide et proche avec le changement climatique par rapport au scénario historique.

## vi Rendement

L'analyse de la variance à 3 facteurs n'a recensé aucune interaction triple pour la variable rendement mais a mis en évidence trois interactions doubles hautement significatives ( $p$ -value  $< 0,001$ ) entre les facteurs (Annexe R). Une AOV 2 par modalité de "RCP\_HT" a été ensuite réalisée. Elle indique des différences très hautement significatives ( $p$ -value  $< 0,001$ ) des valeurs moyennes du rendement sous chacun des scénarios climatiques (Annexe R) pour les deux facteurs "NFrac" et "Soil".

Les test SNK révèlent qu'au sein de chaque modalité du facteur "RCP\_HT", on retrouve 10 groupes (Annexe R). Il s'agit d'un groupe par modalité de "NFrac", on retrouve alors un rendement moyen significativement différent par modalité de fractionnement (Figure 18).

Il existe une exception pour ce qui est du scénario de référence qui recense 9 groupes. En effet, la modalités N240 appartient aux deux groupes avec les valeurs les plus élevées, a et b (Table 17). Sa valeur moyenne de rendement de 9,52 t/ha a été considérée comme non significativement différente des valeurs de 9,70 t/ha pour la modalité N270 et 9,29 t/ha pour la modalité N210.

	Moyenne de rendement [t/ha]	groups
<b>N__270</b>	9,707085	a
<b>N__240</b>	9,518374	ab
<b>N__210</b>	9,287106	b
<b>N__180</b>	9,009824	c
<b>N__150</b>	8,666253	d
<b>N__120</b>	8,299982	e
<b>N__090</b>	7,885461	f
<b>N__060</b>	7,483687	g
<b>N__030</b>	7,039256	h
<b>N__000</b>	6,575414	i

TABLE 17 – Valeurs de rendement moyen et les groupes associés pour tous les sols et scénarios climatiques confondus

Les rendements moyens évoluent à la hausse avec l'augmentation d'apport d'azote au

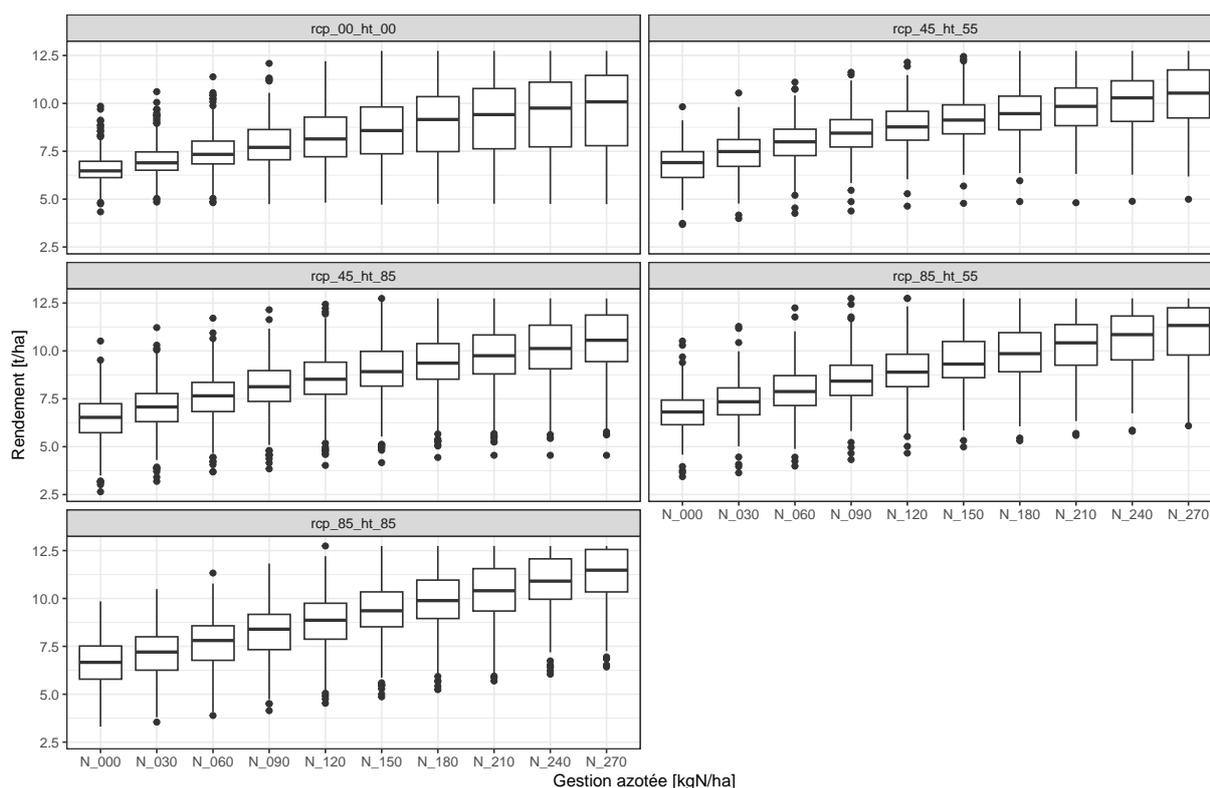


FIGURE 18 – Boxplots du rendement par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus

sein des différentes modalités du facteur "RCP\_HT" (Figure 18).

La réponse du rendement varie selon les scénarios climatiques mais cette réponse reste supérieure au scénario de référence pour l'ensemble des "RCP\_HT" liés à des horizons temporels futurs (Table 18). La valeur minimale se trouve sous le "RCP45\_HT85" puis les valeurs croissent via le "RCP45\_HT55" puis par "RCP85\_HT85" et afin la valeur maximale sous "RCP85\_HT55".

Scénario climatique	Rendement [t/ha]										Moyenne
	N000	N030	N060	N090	N120	N150	N180	N210	N240	N270	
rcp_00_ht_00	6,58	7,04	7,48	7,89	8,30	8,67	9,01	9,29	9,52	9,71	8,35
rcp_45_ht_55	6,82	7,38	7,92	8,40	8,81	9,17	9,50	9,83	10,14	10,42	8,84
rcp_45_ht_85	6,47	7,02	7,58	8,11	8,58	8,99	9,40	9,78	10,13	10,47	8,65
rcp_85_ht_55	6,83	7,38	7,94	8,50	9,02	9,49	9,94	10,36	10,71	11,01	9,12
rcp_85_ht_85	6,62	7,12	7,65	8,20	8,75	9,29	9,82	10,31	10,77	11,17	8,97

TABLE 18 – Valeurs moyennes du rendement par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus

## Discussion des résultats

Un gain de rendement est observé avec l'évolution de la concentration en  $CO_2$  de l'atmosphère. Les hausses de rendement proviennent de l'effet fertilisation  $CO_2$ . Ces aug-

mentations peuvent venir également des rayonnements interceptés par la plante qui sont en augmentation sous les différents scénarios climatiques futurs.

Au sein de chaque scénario climatique, le rendement maximum correspond aux modalités ayant les plus grandes quantités d'azote. De manière générale, une dose d'azote supérieure permet d'améliorer de manière significative le rendement. Ces résultats liés au rendement confirment ce qui avait été vu pour la variable du nombre de grains. Le nombre de grains faisant partie des composantes du rendement, il semble normal que la réponse soit similaire. De ce fait, il est constaté que les conditions de croissance ont permis d'atteindre également la limite génétique pour le rendement.

## 2 Analyse statistique des variables dérivées

### i Efficience agronomique d'utilisation des nutriments

L'AOV 3 a recensé deux interactions doubles hautement significatives (p-value < 0,001) avec comme facteur commun "RCP\_HT" (Annexe S). Une analyse de la variance à deux facteurs par modalité de "RCP\_HT" a été exécutée. Elle a affiché des différences très hautement significatives (p-value < 0,001) des moyennes de la  $NUE_{ag}$  pour les facteurs "Soil" et "NFrac" de chacun des scénarios climatiques. A l'exception de la modalité "RCP85\_HT85" qui possède des moyennes significativement différentes (p-value < 0,05) avec une p-valeur de 0,0234 pour le facteur "NFrac" (Annexe S).

Le test SNK indique la présence d'un nombre différent de groupes pour chacun des scénarios climatiques (Table 19)(Annexe S). Ainsi les modalités "RCP00\_HT00" et "RCP85\_HT55" contiennent 4 groupes de moyennes significativement différentes. Tandis que la modalité "RCP45\_HT55" contient 6 groupes et celle liée au scénario climatique "RCP45\_HT85" en contient 5. Le scénario "RCP85\_HT85" ne contient que des groupes dont les moyennes sont non significativement différentes. Le test SNK révèle qu'avec l'évolution des scénarios climatiques, de plus en plus de fertilisations appartiennent au groupe avec la moyenne la plus haute, le groupe a. A tel point que toutes les fertilisations appartiennent au même groupe de moyennes et ne sont pas significativement différentes pour le "RCP85\_HT85".

Scénario climatique	Efficience agronomique d'utilisation des nutriments								
	N030	N060	N090	N120	N150	N180	N210	N240	N270
rcp_00_ht_00	a	a	ab	ab	abc	abc	bcd	cd	d
rcp_45_ht_55	a	a	ab	bc	cd	de	ef	ef	f
rcp_45_ht_85	a	a	a	ab	bc	cd	cde	de	e
rcp_85_ht_55	a	a	a	a	ab	ab	bc	cd	d
rcp_85_ht_85	a	a	a	a	a	a	a	a	a

TABLE 19 – Groupes de l'efficience agronomique par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus

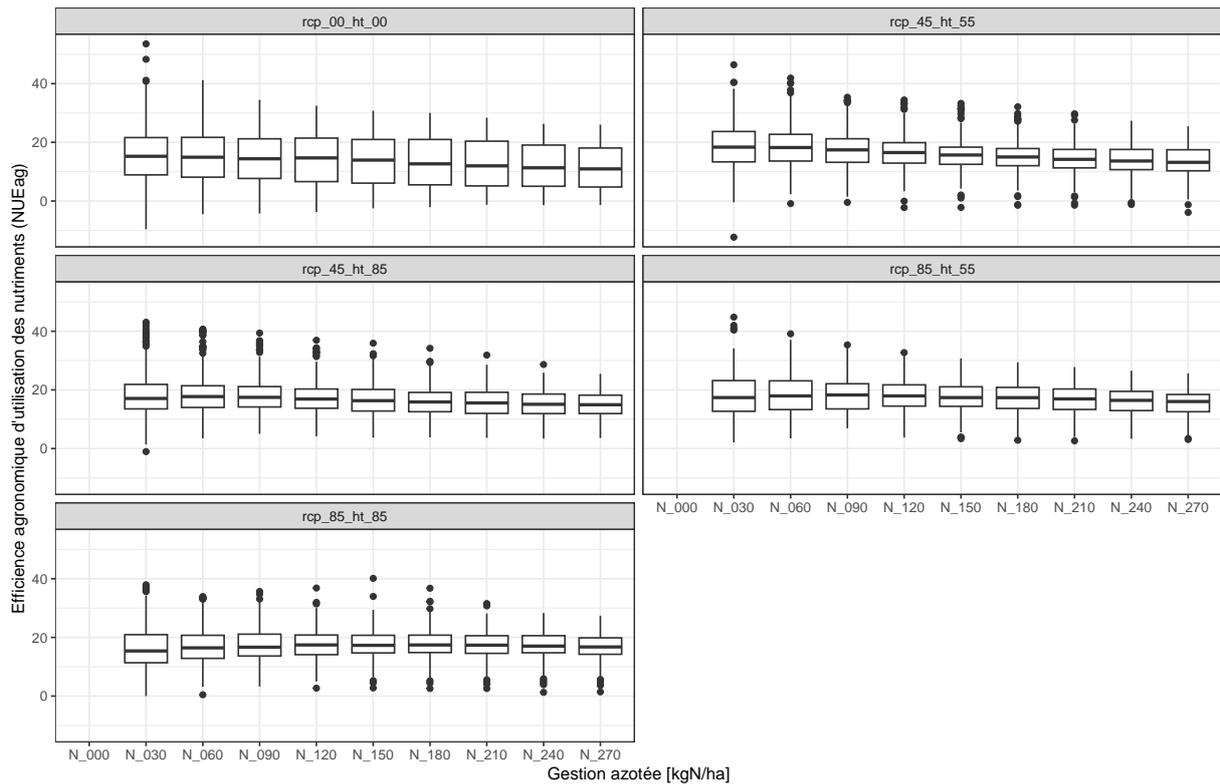


FIGURE 19 – Boxplots de la  $NUE_{ag}$  par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus

L'efficience agronomique moyenne évolue à la baisse avec l'augmentation d'apport d'azote au sein des différentes modalités du facteur "RCP\_HT" (Figure 19).

## Discussion des résultats

Globalement, les résultats montrent qu'il y a moins de groupes significativement différents pour cette variable que pour toutes les variables vues précédemment. Il est considéré que la globalité des données appartient à la loi des grands nombres au vu de la quantité de données et des réponses très linéaires des variables. L'observation de groupes statistiques différents pour chaque niveau de fertilisation pour les autres variables indique qu'il y a tellement de points que les statistiques classiques telles que l'analyse de la variance et le test SNK ne sont pas adaptés pour avoir des équivalences statistiques.

Dès lors, l'analyse via des variables agronomiques dérivées permet de mettre en évidence des équivalences statistiques à l'inverse des variables absolues. Étant donné que le calcul de cette variable se fait en relatif avec des valeurs à fertilisation 0, cela permet d'avoir des réponses dans une gamme qui permet de travailler avec ces statistiques. En effet, le calcul de la  $NUE_{ag}$  revient à calculer la pente entre une fertilisation donnée et la fertilisation 0 pour le rendement.

Quel que soit le scénario climatique, il semble que l'efficience agronomique diminue avec

l'augmentation d'apport d'azote. Cela signifie que la quantité de rendement par kilo d'azote apporté diminue avec l'augmentation de la fertilisation azotée. A valeur de fertilisation faible la pente est forte mais au plus il y a de l'azote au moins la plante est efficace car la pente s'aplatit. La valorisation de l'azote est un indicateur équivalent à la mesure du besoin azoté. Dès lors, à partir du moment où l'augmentation devient marginale, lorsqu'un plateau est atteint, cela indique que la plante valorise proportionnellement moins l'azote apporté. Autrement dit, on se rapproche du point où la plante a satisfait son besoin azoté.

Le test SNK (Table 19) révèle une augmentation des équivalences statistiques des doses de fertilisation avec l'évolution des scénarios climatiques. Afin d'identifier quand le besoin azoté est satisfait, les deux derniers groupes statistiques de chaque modalité de "RCP\_HT" seront spécifiquement analysés. Il s'agit des deux derniers groupes de chaque modalité car on ne connaît pas l'évolution de la  $NUE_{ag}$  au delà de "N270". De plus, la fertilisation "N180" sur le scénario historique, fertilisation de référence pour le froment d'hiver, appartient au groupe c (Table 19). Ce qui justifie l'intérêt agronomique de considérer ces deux groupes. Les résultats (Table 19) indiquent un étagement en escalier de ces deux derniers groupes avec l'évolution des scénarios climatiques, cela prouve une évolution du besoin azoté lié à l'effet fertilisation  $CO_2$ .

Autrement dit, le besoin en azote pour que la plante maintienne sa capacité à produire évolue avec le changement climatique, l'optimum se décale à des valeurs de fertilisation plus élevées.

## ii Efficience physiologique d'utilisation des nutriments

L'AOV 3 signale deux interactions doubles hautement significatives (p-value < 0,001) avec "RCP\_HT" comme facteur commun (Annexe T) pour la variable d'efficience physiologique d'utilisation des nutriments ( $NUE_{phys}$ ). Une AOV 2 par modalité de "RCP\_HT" a été réalisée. Elle a indiqué des différences très hautement significatives (p-value < 0,001) de la  $NUE_{ag}$  pour l'ensemble des scénarios climatiques vis-à-vis des deux facteurs. A l'exception de la modalité "RCP85\_HT85" dont les moyennes pour le facteur "NFrac" ne sont pas considérées comme significativement différentes (Annexe T).

Le test SNK révèle qu'avec l'évolution des scénarios climatiques (Annexe T), les deux derniers groupes contenant les moyennes considérées comme les plus faibles se structurent en escalier par rapport aux valeurs de fertilisation (Table 20). A tel point que toutes les fertilisations appartiennent au même groupe de moyennes et ne sont pas significativement différentes pour le "RCP85\_HT85".

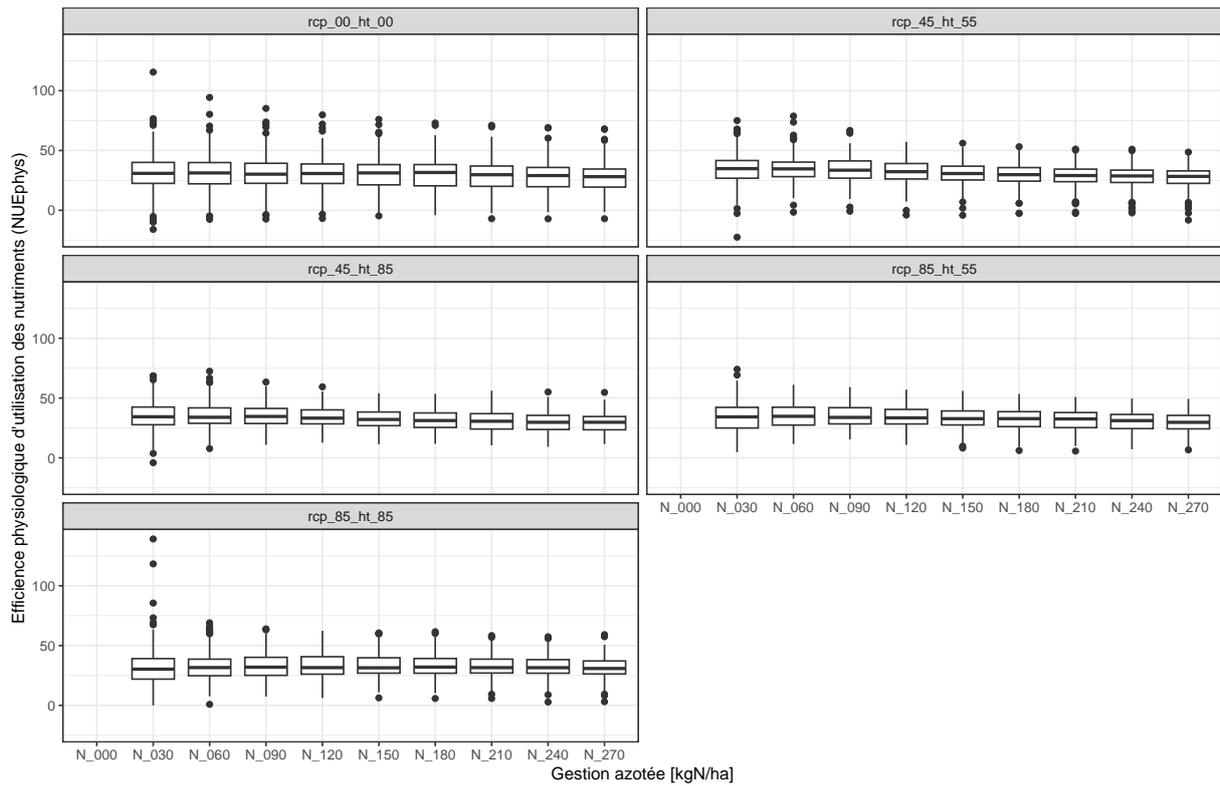


FIGURE 20 – Boxplots de la  $NUE_{ag}$  par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus

Scénario climatique	Efficience physiologique d'utilisation des nutriments								
	N030	N060	N090	N120	N150	N180	N210	N240	N270
rcp_00_ht_00	a	a	a	a	ab	ab	abc	bc	c
rcp_45_ht_55	a	a	ab	bc	cd	de	ef	ef	f
rcp_45_ht_85	a	a	a	ab	bc	cd	cde	de	e
rcp_85_ht_55	a	a	a	ab	abc	bc	cd	de	e
rcp_85_ht_85	a	a	a	a	a	a	a	a	a

TABLE 20 – Groupes de l'efficience physiologique par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus

L'efficience physiologique moyenne évolue à la baisse avec l'augmentation d'apport d'azote au sein des différentes modalités du facteur "RCP\_HT" (Figure 20).

## Discussion des résultats

En ce qui concerne l'efficience physiologique des nutriments, sa réponse au changement climatique et à la fertilisation azotée est similaire à celle de la  $NUE_{ag}$ . Malgré tout, elle ne représente pas le même aspect de la physiologie et du développement de la plante. Elle exprime le gain de rendement produit par rapport à l'azote absorbé. En d'autres termes elle représente la partie qui a pu être allouée dans le grain par rapport à l'azote prélevé par l'ensemble de la plante.

De la même façon que pour la  $NUE_{ag}$ , on voit que l'effet fertilisation  $CO_2$  a un impact sur le besoin azoté. L'optimum de fertilisation azotée, afin de combler le besoin azoté, de la plante se trouve à des valeurs de fertilisation plus élevées que la dose actuellement recommandée de 180 kgN/ha.

### iii Coefficient apparent d'utilisation

L'AOV 3 pour la variable qu'est le coefficient d'utilisation de l'azote (CAU) indique deux interactions doubles dont une très hautement significative (p-value < 0,001) entre les facteurs "RCP\_HT" et "Soil" (Annexe U). L'autre quant à elle est hautement significative et concerne l'interaction "NFrac" et "RCP\_HT". Dès lors, une AOV 2 par modalité de "RCP\_HT" a été appliquée. Cette dernière montre que les moyennes sont très hautement significatives (p-value < 0,001) vis-à-vis du facteur "Soil" pour l'ensemble des modalités de "RCP\_HT". En ce qui concerne le facteur "NFrac", on retrouve des différences, entre les moyennes, très hautement significatives (p-value < 0,001) pour le "RCP45\_HT55" et significatives (p-value < 0,05) pour le "RCP00\_HT00". L'AOV 2 indique que la p-valeur du "RCP85\_HT85" pour le facteur "NFrac" est très proche de la valeur seuil de 0,05 (Annexe U).

Le test SNK (Table 21) ne détecte aucune moyenne significativement différente pour le "RCP00\_HT00" malgré le résultat de l'AOV (Annexe U). Le test SNK ne montre pas de différence quant à l'évolution des scénarios climatiques.

Scénario climatique	Coefficient apparent d'utilisation								
	N030	N060	N090	N120	N150	N180	N210	N240	N270
rcp_00_ht_00	a	a	a	a	a	a	a	a	a
rcp_45_ht_55	a	a	ab	abc	abc	abc	abc	bc	c
rcp_45_ht_85	a	a	a	a	a	a	a	a	a
rcp_85_ht_55	a	a	a	a	a	a	a	a	a
rcp_85_ht_85	a	a	a	a	a	a	a	a	a

TABLE 21 – Groupes du coefficient apparent par scénario climatique et fertilisation pour tous les sols confondus

L'efficacité physiologique n'évolue pas avec l'apport d'azote au sein des différentes modalités du facteur "RCP\_HT" (Figure 21).

## Discussion des résultats

Le coefficient apparent d'utilisation est également une variable dérivée. De la même façon que la  $NUE_{ag}$  et  $NUE_{phys}$ , elle permet de créer un gradient normalisé par l'apport en fertilisation, ce qui revient à calculer des pentes. Elle représente le taux d'exportation de ce qui a été fertilisé entre l'azote absorbé par la plante fertilisée et la plante sans apport extérieur dont l'azote provient de la minéralisation. Globalement le coefficient est assez stable que cela soit par rapport à l'évolution de la fertilisation et des scénarios climatiques.

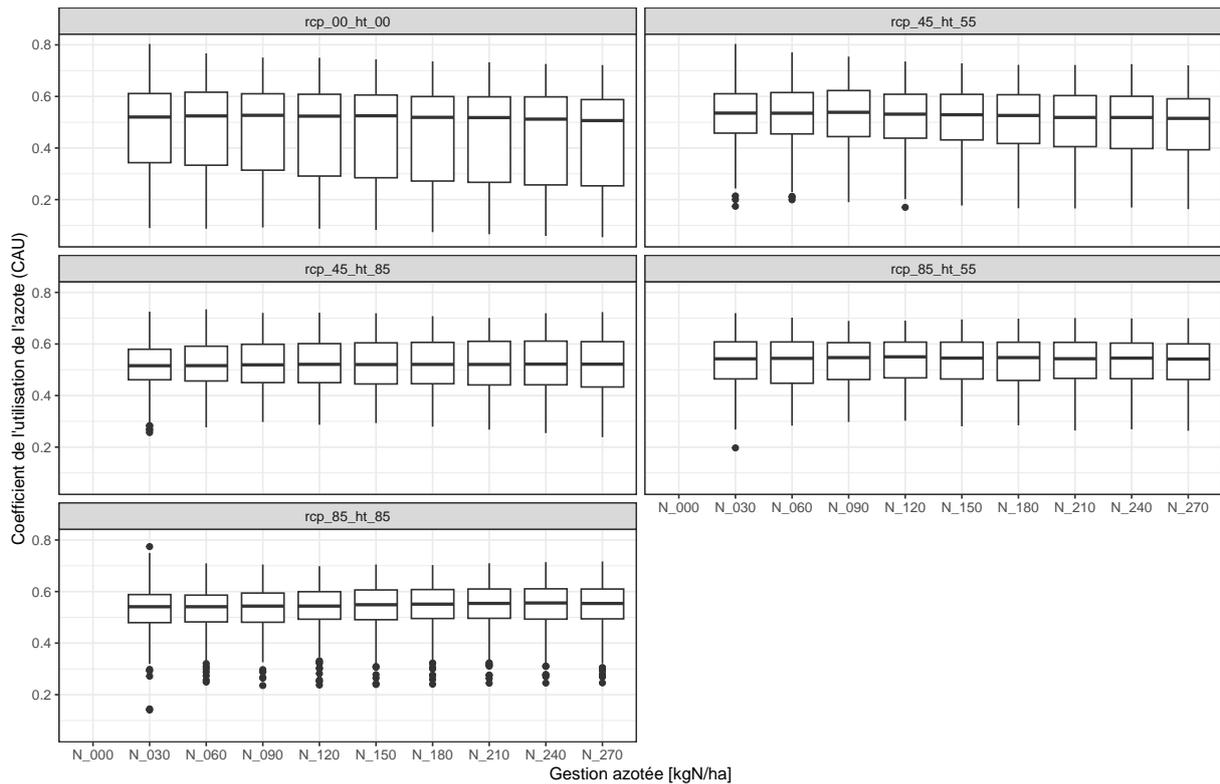


FIGURE 21 – Boxplots de la CAU par fertilisation et scénario climatique pour tous les différents sols confondus

Globalement, le modèle répond en moyenne comme il faut à la fertilisation pour le changement climatique et la fertilisation par rapport de la CAU. En effet, les valeurs de CAU de 60% semblent correctes car les valeurs de référence semblent aller de 40% à 100%. Cependant, les valeurs de cette variable ne sont pas réellement stables. Elles le sont dû à la quantité importante de données présentes. Le fait que cet indice ne soit pas calculé sur une période assez courte de temps (stade phénologique) comme il l'est souvent a également peut-être un impact.

### 3 Analyse en composantes principales

Les résultats montrent une chute brutale de la proportion de variance expliquée au niveau de la deuxième composante principale (Figure 22). La variance expliquée semble décroître de manière assez constante pour les composantes principales restantes.

Les données se structurent principalement selon la première composante principale. L'ACP indique plusieurs regroupements de variables fortement corrélées entre elles (Figure 23).

En ce qui concerne l'évolution des ellipses du facteur "RCP\_HT", les résultats indiquent une structuration dans la deuxième dimension (Figure 24).

L'analyse en composantes principales montre que la fertilisation azotée dirige 34% des données

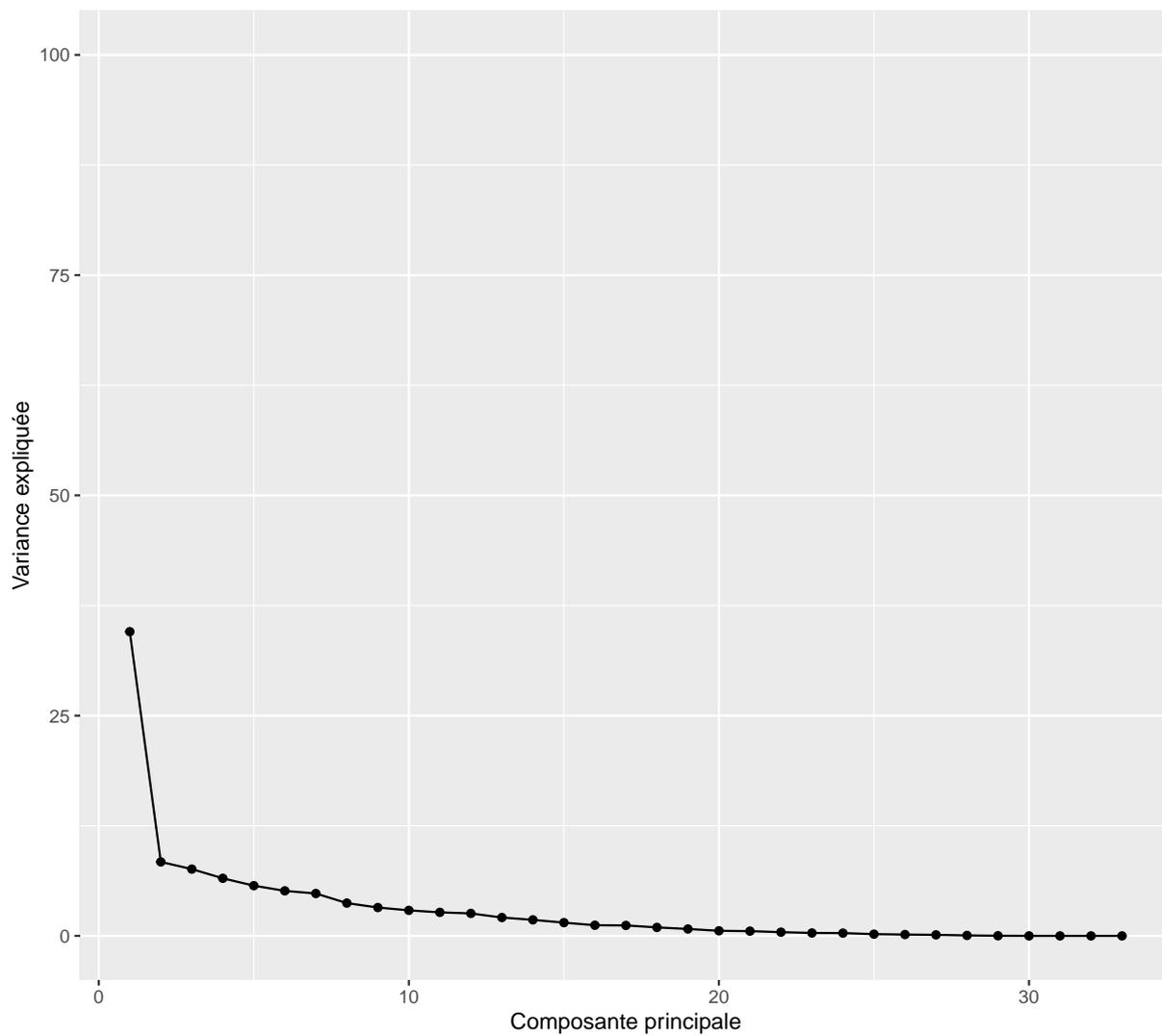


FIGURE 22 – Pourcentage de la variance expliquée en fonction du nombre de composantes



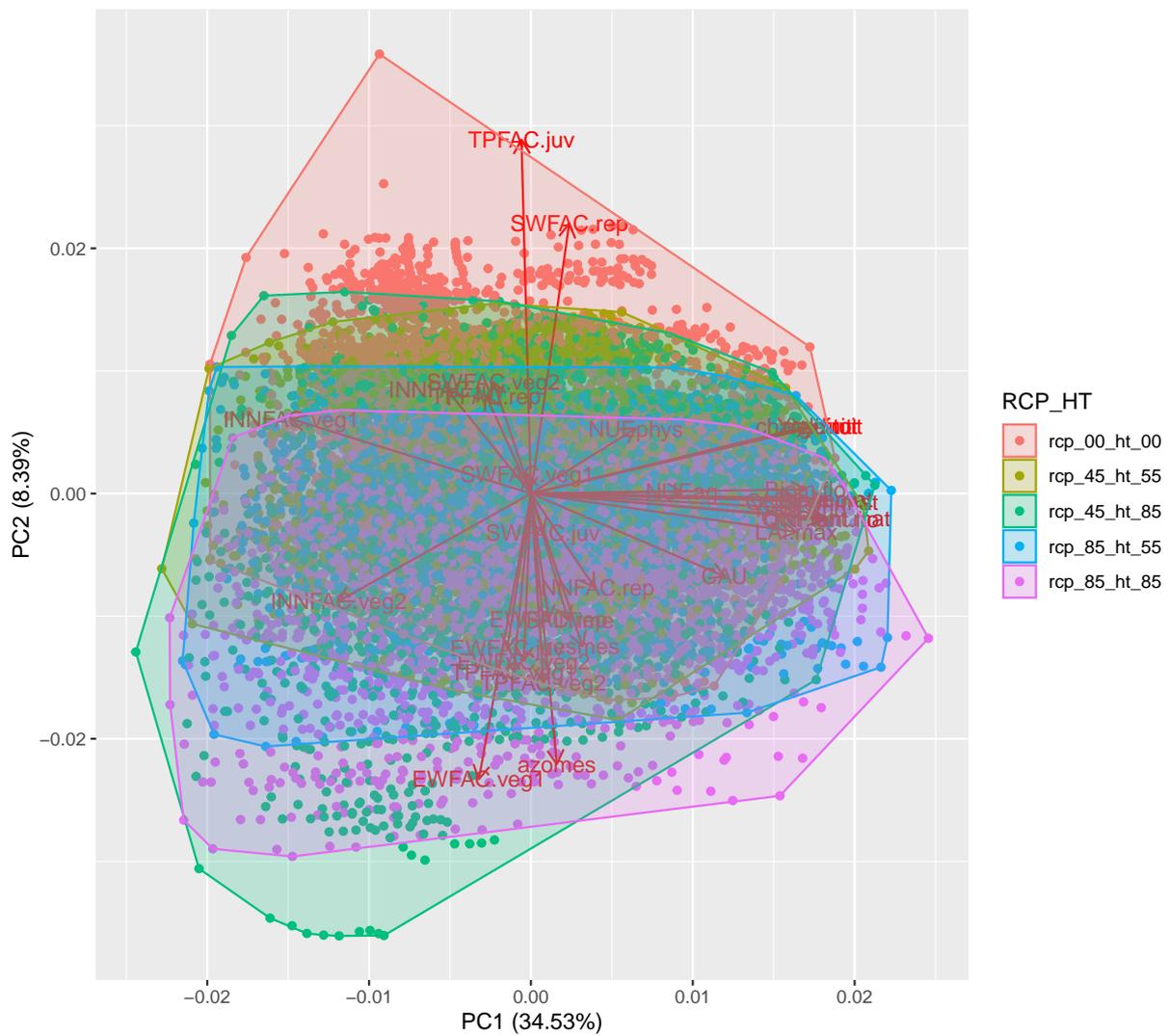


FIGURE 24 – Analyse en composantes principales selon les 2 premiers axes et regroupement par scénario climatique



présente au sein du jeu de données. Cette première composante est fortement reliée au facteur de fertilisation azotée. Cela permet d'affirmer que la gestion de l'azote va dominer l'explication de la variabilité du changement climatique. Cela s'observe notamment grâce aux forts contrastes présents en ce qui concerne le facteur "NFrac" pour les différentes variables. Moins de modalité de la gestion azotée aurait amené à une affirmation inverse.

# V Discussion générale et conclusion

## 1 Discussion générale et conclusion

L'objectif de ce travail était d'identifier l'évolution du besoin azoté du froment d'hiver en Hesbaye suite à son développement sous différents scénarios représentant le changement climatique en Hesbaye.

Les résultats identifient un impact du changement climatique sur le besoin azoté du froment d'hiver. En effet, l'augmentation de la concentration en  $CO_2$ , associée aux RCP4,5 et 8,5 pour les horizons temporels 2040-2070 et 2070-2100, induit des réponses physiologiques différentes qui ont pour conséquence de modifier le besoin azoté de la plante. De manière générale, la période de croissance du froment d'hiver est écourtée dû à l'effet fertilisation  $CO_2$  qui permet aux plantes de procéder à une photosynthèse plus performante. Cela implique alors la création plus importante de sucres disponibles pour la plante afin de produire de la biomasse. Les mêmes tendances sont observées en ce qui concerne les variables de la quantité d'azote absorbé, du nombre de grains et du rendement malgré une période de développement plus courte. L'augmentation d'efficacité de la photosynthèse induit également une réduction du besoin de transpiration de la plante ce qui permet de mieux conserver l'eau dans les sols. La quantité plus importante d'eau dans les sols rend l'azote du sol mobilisable par la plante ce qui permet d'augmenter la quantité d'azote absorbé par la plante. Dès lors, il est logique de dire que l'effet fertilisant  $CO_2$  impacte positivement les variables physiologiques et agronomiques de cette étude.

Toutes les valeurs de ces variables agronomiques sont également augmentées dû à la réponse globale des stress au changement climatique. De manière générale, lorsqu'on prend l'ensemble des stress en considération, leur valeur totale diminue avec le changement climatique. Le stress lié au déficit d'eau disparaît presque grâce à l'effet fertilisation  $CO_2$  qui induit plus d'eau dans les sols. A l'inverse, le stress lié à l'anoxie augmente légèrement mais reste léger à cause des pluies hivernales intenses et du contenu en eau des sols plus élevée. La même tendance est recensée pour les stress thermiques car malgré l'occurrence plus élevée des phénomènes de températures extrêmes, les moyennes restent tolérables pour le froment d'hiver. Le stress de carences azotées quant à lui augmente fortement en deuxième phase végétative et devient le facteur limitant de développement des plantes étant donné que les autres stress semblent être levés.

Étant donné que les carences azotées semblent être le facteur de réduction du potentiel de développement du froment d'hiver sous des scénarios climatiques représentant le changement climatique, il est pertinent de s'intéresser à l'évolution du besoin azoté. Les résultats indiquent une augmentation de valeurs significatives dès qu'il y a un apport d'azote en quantité supérieure pour l'ensemble des variables agronomiques à quelques exceptions près. Dès lors, chaque scénario climatique contient 10 réponses significativement différentes de la

variable concernée selon l'apport de fertilisation azotée. Il semble donc qu'avec le changement climatique, les quantités maximales d'azote apportées sont à privilégier pour satisfaire le besoin azoté du froment d'hiver.

Cependant, au vu du nombre de données prises en considération notamment à cause des sols, il y a beaucoup de contraste dans la base de données. Les données sont considérées comme appartenant à la loi des grands nombres au vu de leur quantité et des réponses très linéaires des variables. Il y a tellement de points que toutes les moyennes de chaque variable sont significativement différentes. Dans ce cadre, les tests SNK et de l'analyse de la variance ne sont pas adaptés pour observer des équivalences statistiques.

L'utilisation de variables dérivées permet de palier au problème des variables absolues étant donné qu'elles sont calculées en relatif par rapport à la modalité sans fertilisation. Ces valeurs permettent ainsi de quantifier la valorisation de l'azote fournie, ce qui revient à mesurer le besoin azoté. En ce qui concerne les variables d'efficacité d'utilisation des nutriments,  $NUE_{ag}$  et  $NUE_{phys}$ , le groupe contenant les valeurs maximales moyennes a tendance à se décaler vers des valeurs de fertilisation azotée plus élevées avec l'évolution des scénarios climatiques. Autrement dit, le besoin azoté sera satisfait à des valeurs de fertilisation plus élevée avec l'augmentation de la concentration atmosphérique en  $CO_2$ . A tel point, que le scénario climatique contenant le plus de  $CO_2$  pour l'horizon temporel 2070-2100 ne montre plus de différences significatives entre les modalités de fertilisation azotée. Vis-à-vis du coefficient apparent d'utilisation (CAU), les résultats indiquent une réponse stable que cela soit par rapport à la fertilisation azotée ou à l'évolution des scénarios climatiques. Cela vient probablement du fait que cet indicateur a été calculé sur une période longue de temps car sa réponse moyenne semble cohérente.

En conclusion, il est possible d'affirmer que la fertilisation azotée domine l'explication de la variabilité de la réponse du froment d'hiver par rapport au changement climatique en tant que stress limitant. Et que le besoin azoté du froment d'hiver en réponse au changement climatique se dirige vers des valeurs de fertilisation plus élevées.

## 2 Perspectives

Cette étude a permis de mettre en évidence l'évolution du besoin azoté du froment d'hiver sous différents scénarios de changement climatique en Hesbaye.

En ce qui concerne les sols, on a créé de la variabilité pour capter une réponse plus forte de la plante. Une autre perspective serait de réaliser cette méthode à l'échelle de champ ou de sous régions agricoles. La création d'un outil d'automatisation sur base de cette méthode pourrait également être utilisé pour analyser le besoin azoté à l'échelle de champs. Une autre approche serait d'appliquer cette méthode par type de sol afin de mettre en évidence les différentes réponses du sol et ainsi imaginer des stratégies d'adaptation spécifique pour les exploitants.

Afin d'être plus représentatif de la réalité, cette méthode pourrait être modifiée pour intégrer des apports de matière organique et ainsi mettre en évidence les différences de réponses du froment d'hiver entre les deux méthodes.

Une autre approche serait d'appliquer cette méthode en vue d'une transition agro-écologique via la modélisation d'une culture de froment-pois. Étant donné que le facteur limitant est la carence azotée, l'association du froment avec une légumineuse permettrait de voir une dynamique différente du besoin azoté pour une futur culture potentielle.

Au vu des résultats obtenus comme le nombre de grains qui a atteint le plafond génétique, des modélisations pourraient être réalisées afin de créer des idéotypes. L'objectif serait de créer un cultivar virtuel pour éviter les plafonds obtenus et ainsi créer des ébauches de variétés adaptées au changement climatique.

## **VI Contribution personnelle**

Lors de la réalisation de ce travail de fin d'études, j'ai compris l'intérêt des outils technologiques dans le monde de la recherche et plus particulièrement sur la thématique du changement climatique. Dans un premier temps, je devais réaliser ce travail sur un autre sujet mais cela a été changé. J'ai donc du apprendre à m'adapter, ce qui m'a permis d'acquérir des capacités d'autonomie et d'organisation. Cette autonomie associée à mon manque de pratique sur les logiciels informatiques ont vraiment été un défi éprouvant mais cela m'a poussé à m'impliquer à fond.

# Références

- ABRAHAMSEN, P., & HANSEN, S. (2000). Daisy : an open soil-crop-atmosphere system model. *Environmental Modelling & Software*, 15(3), 313-330. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00003-7)
- ACOCK, B., & ACOCK, M. C. (1993). Modeling approaches for predicting crop ecosystem responses to climate change [Section : 38 \_eprint : <https://online-library.wiley.com/doi/pdf/10.2135/1993.internationalcropscience.c45>]. In *International crop science i* (p. 299-306). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2135/1993.internationalcropscience.c45>
- ANDREWS, T., FORSTER, P. M., BOUCHER, O., BELLOUIN, N., & JONES, A. (2010). Precipitation, radiative forcing and global temperature change [\_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2010GL043991>]. *Geophysical Research Letters*, 37(14). <https://doi.org/10.1029/2010GL043991>
- ARTRU, S. (2017, juin 6). *Impact of spatio-temporal shade on crop growth and productivity, perspectives for temperate agroforestry* [thèse de doct., ULiège - Université de Liège] [Publisher : ULiège - Université de Liège]. Récupérée janvier 3, 2024, à partir de <https://orbi.uliege.be/handle/2268/211276>
- ASSENG, S., & TURNER, N. C. (2007). Modelling genotype  $\times$  environment  $\times$  management interactions to improve yield, water use efficiency and grain protein in wheat. *Scale and Complexity in Plant Systems Research : Gene-Plant-Crop Relations*, 21, 91-102. Récupérée août 9, 2023, à partir de <https://library.wur.nl/ojs/index.php/frontis/article/view/1298>
- ASSENG, S., CAO, W., ZHANG, W., & LUDWIG, F. (2009, avril 15). Crop Physiology, Modelling and Climate Change : Impact and Adaptation Strategies. In *Crop Physiology* (p. 511-543). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374431-9.00020-7>
- BASSO, B., DUMONT, B., MAESTRINI, B., SHCHERBAK, I., ROBERTSON, G. P., PORTER, J. R., SMITH, P., PAUSTIAN, K., GRACE, P. R., ASSENG, S., BASSU, S., BIERNATH, C., BOOTE, K. J., CAMMARANO, D., SANCTIS, G. D., DURAND, J.-L., EWERT, F., GAYLER, S., HYNDMAN, D. W., ... ROSENZWEIG, C. (2018). Soil Organic Carbon and Nitrogen Feedbacks on Crop Yields under Climate Change [Publisher : Crop Science Society of America, United States]. *Agricultural and Environmental Letters*, 3 :180026. <https://doi.org/10.2134/ael2018.05.0026>
- BASSO, B., & RITCHIE, J. T. (2005). Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in michigan. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 108(4), 329-341. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.01.011>
- BATCHELOR, W. D., BASSO, B., & PAZ, J. O. (2002). Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(1), 141-158. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00101-6)
- BLOOMFIELD, M. T., CELESTINA, C., HUNT, J. R., HUTH, N., ZHENG, B., BROWN, H., ZHAO, Z., WANG, E., STEFANOVA, K., HYLES, J., RATHJEN, T., & TREVASKIS, B. (2023).

- Vernalisation and photoperiod responses of diverse wheat genotypes [Publisher : CSIRO PUBLISHING]. *Crop and Pasture Science*, 74(5), 405-422. <https://doi.org/10.1071/CP22213>
- BODSON, B., & FALISSE, A. (1996). Ecophysiologie de la production végétale : l'exemple du blé [Publisher : Probio, Belgium]. *Probio-Revue*, 19(1). Récupérée janvier 1, 2024, à partir de <https://orbi.uliege.be/handle/2268/72319>
- BREGAGLIO, S., FRASSO, N., PAGANI, V., STELLA, T., FRANCONI, C., CAPPELLI, G., ACUTIS, M., BALAGHI, R., OUABBOU, H., PALEARI, L., & CONFALONIERI, R. (2015). New multi-model approach gives good estimations of wheat yield under semi-arid climate in morocco. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 157-167. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0225-6>
- BRISSON, N., GARY, C., JUSTES, E., ROCHE, R., MARY, B., RIPOCHE, D., ZIMMER, D., SIERRA, J., BERTUZZI, P., BURGER, P., BUSSIÈRE, F., CABIDOCHÉ, Y. M., CELLIER, P., DEBAEKE, P., GAUDILLÈRE, J. P., HÉNAULT, C., MARAUX, F., SEGUIN, B., & SINOQUET, H. (2003). An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 309-332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)
- BRISSON, N. N., LAUNAY, M., MARY, B. B., & BEAUDOIN, N. N. (2009). *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Editions Quae. Récupérée janvier 2, 2024, à partir de [https://belinra.inrae.fr/doc\\_num.php?explnum\\_id=3396](https://belinra.inrae.fr/doc_num.php?explnum_id=3396)
- BURNY, P. (2010, février). 10. Production et échanges mondiaux de céréales en 2009-2010 et production communautaire en 2009. In *Libre Blanc Céréales - Edition 2010*. Récupérée novembre 9, 2023, à partir de <https://www.gembloux.ulg.ac.be/phytotecnique-temperee/LIVREBLANC/LBfev2010/pb/10.%20Economie.pdf>
- CASSMAN, K. G., DOBERMANN, A., & WALTERS, D. T. (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management [Publisher : Royal Swedish Academy of Sciences]. *AMBIO : A Journal of the Human Environment*, 31(2), 132-140. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.132>
- CHEN, D., LI, Y., GRACE, P., & MOSIER, A. R. (2008). N<sub>2</sub>O emissions from agricultural lands : a synthesis of simulation approaches. *Plant and Soil*, 309(1), 169-189. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9634-0>
- CHUAN, L., HE, P., PAMPOLINO, M. F., JOHNSTON, A. M., JIN, J., XU, X., ZHAO, S., QIU, S., & ZHOU, W. (2013). Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China : Yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Research*, 140, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.020>
- de BEURS, K. M., COOK, R. B., MAZER, S., HAGGERTY, B., HOVE, A., HENEGBRY, G. M., BARNETT, L., THOMAS, C. L., & POHLAD, B. R. (2013). Phenology in higher education : ground-based and spatial analysis tools. In M. D. SCHWARTZ (Éd.), *Phenology : an integrative environmental science* (p. 585-602). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0\\_31](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_31)
- DELCOUR, A., VAN STAPPEN, F., GHEYSSENS, S., DECRUYENAERE, V., STILMANT, D., BURNY, P., RABIER, F., LOUPPE, H., & GOFFART, J.-P. (2014). État des lieux des flux céréaliers en Wallonie selon différentes filières d'utilisation [Publisher : Presses Agronomiques de

- Gembloux, Gembloux, Belgium]. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18(2), 181-192. Récupérée août 10, 2023, à partir de <https://orbi.uliege.be/handle/2268/171015>
- DIDIER, A. (2013, juin 4). *Modélisation de la croissance, des relations sources-puits et du rendement en sucre de la betterave sucrière (Beta vulgaris L.) sous des régimes contrastés de nutrition azotée* [thèse de doct., AgroParisTech]. Récupérée janvier 3, 2024, à partir de <https://pastel.hal.science/pastel-00949047>
- DUMONT, B., & PIERREUX. (2022, septembre). *Livre Blanc Céréales – Septembre 2022*. CENTRE WALLON DE RECHERCHES AGRONOMIQUES (CRA-W) GEMBLOUX. Récupérée novembre 9, 2023, à partir de <https://www.livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2023/04/2022-09-LivreBlanc.pdf>
- DUMONT, B., BASSO, B., DESTAIN, J.-P., MEZA MORALES, W., & BODSON, B. (2018). Développement d'un système d'aide à la décision multicritère pour l'optimisation de la fertilisation azotée. Récupérée avril 24, 2023, à partir de <https://orbi.uliege.be/handle/2268/220356>
- DUMONT, B., BASSO, B., SHCHERBAK, I., PAUSTIAN, K., NENDEL, C., GRACE, P., THORBURN, P., CAMMARANO, D., ASSENG, S., BIERNATH, C., BOOTE, K. J., SANCTIS, G. D., DURAND, J.-L., GRANT, R., GAYLER, S., KENT, J., PRIESACK, E., RIPOCHE, D., RUANE, A. C., ... ROSENZWEIG. (2016). Crop yields, soil organic carbon and soil nitrogen content change under climate change. Récupérée août 9, 2023, à partir de <https://orbi.uliege.be/handle/2268/202318>
- DUMONT, B., VANCUTSEM, F., SEUTIN, B., BODSON, B., DESTAIN, J.-P., & DESTAIN, M.-F. (2012). Simulation de la croissance du blé à l'aide de modèles écophysologiques : Synthèse bibliographique des méthodes, potentialités et limitations. [Publisher : Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgium]. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 16(3). Récupérée août 11, 2023, à partir de <https://orbi.uliege.be/handle/2268/129589>
- DZOTSI, K. A., BASSO, B., & JONES, J. W. (2015). Parameter and uncertainty estimation for maize, peanut and cotton using the SALUS crop model. *Agricultural Systems*, 135, 31-47. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2014.12.003>
- EITZINGER, J., ŠTASTNÁ, M., ŽALUD, Z., & DUBROVSKÝ, M. (2003). A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. *Agricultural Water Management*, 61(3), 195-217. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00024-6)
- FAO. (2022, novembre). *Perspectives de l'alimentation* (Publication semestrielle). Division du commerce et des marchés. Rome, Italie. Récupérée octobre 14, 2023, à partir de <https://www.fao.org/3/cc3762fr/cc3762fr.pdf>
- FRY, J., GUBER, A. K., LADONI, M., MUNOZ, J. D., & KRAVCHENKO, A. N. (2017). The effect of up-scaling soil properties and model parameters on predictive accuracy of DSSAT crop simulation model under variable weather conditions. *Geoderma*, 287, 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.012>

- FURBANK, R., & TAYLOR, W. (1995). Regulation of Photosynthesis in C3 and C4 Plants : A Molecular Approach. *The Plant Cell*, 7(7), 797-807. Récupérée janvier 3, 2024, à partir de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC160868/>
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse* (Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]) (Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]). GIEC. Genève, Suisse. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf)
- GIOT, O., TERMONIA, P., DEGRAUWE, D., DE TROCH, R., CALUWAERTS, S., SMET, G., BERCKMANS, J., DECKMYN, A., DE CRUZ, L., DE MEUTTER, P., DUERINCKX, A., GERARD, L., HAMDI, R., VAN DEN BERGH, J., VAN GINDERACHTER, M., & VAN SCHAEYBROECK, B. (2016). Validation of the ALARO-0 model within the EURO-CORDEX framework [Publisher : Copernicus GmbH]. *Geoscientific Model Development*, 9(3), 1143-1152. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1143-2016>
- GODFRAY, H. C. J., BEDDINGTON, J. R., CRUTE, I. R., HADDAD, L., LAWRENCE, D., MUIR, J. F., PRETTY, J., ROBINSON, S., THOMAS, S. M., & TOULMIN, C. (2010). Food security : the challenge of feeding 9 billion people. *Science (New York, N.Y.)*, 327(5967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- HALL, D. O., & RAO, K. K. (1999). *Photosynthesis /* (6ème édition) [Place : London : Publisher : Arnold,]. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- HERTEL, T., BURKE, M., & LOBELL, D. (2010). The poverty implications of climate-induced crop yield changes by 2030. *Global Environmental Change*, 20(4), 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.001>
- HOOGENBOOM, G., JONES, J. W., TRAORE, P. C. S., & BOOTE, K. J. (2012). Experiments and data for model evaluation and application. In J. KIHARA, D. FATONDI, J. W. JONES, G. HOOGENBOOM, R. TABO & A. BATIONO (Éd.), *Improving soil fertility recommendations in africa using the decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT)* (p. 9-18). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2960-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2960-5_2)
- HOSSAIN, A., SKALICKY, M., BRESTIC, M., MAITRA, S., ASHRAFUL ALAM, M., SYED, M. A., HOSSAIN, J., SARKAR, S., SAHA, S., BHADRA, P., SHANKAR, T., BHATT, R., KUMAR CHAKI, A., EL SABAGH, A., & ISLAM, T. (2021). Consequences and mitigation strategies of abiotic stresses in wheat (*triticum aestivum* l.) under the changing climate [Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Agronomy*, 11(2), 241. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020241>
- HURKMAN, W. J., MCCUE, K. F., ALTENBACH, S. B., KORN, A., TANAKA, C. K., KOTHARI, K. M., JOHNSON, E. L., BECHTEL, D. B., WILSON, J. D., ANDERSON, O. D., & DUPONT, F. M. (2003). Effect of temperature on expression of genes encoding enzymes for starch biosynthesis in developing wheat endosperm. *Plant Science*, 164(5), 873-881. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00076-1)

- INRA [INRAE - STICS]. (2017). Récupérée octobre 22, 2023, à partir de <https://stics.paca.hub.inrae.fr/>
- IRM [KMI]. (s. d.). Récupérée octobre 15, 2023, à partir de <https://www.meteo.be/fr/infos/newsletter/articles-2020>
- JAME, Y., & CUTFORTH, H. (1996). Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 76(1). <https://doi.org/10.4141/cjps96-003>
- JÉGO, G., SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M., & JUSTES, E. (2012). Predicting soil water and mineral nitrogen contents with the STICS model for estimating nitrate leaching under agricultural fields. *Agricultural Water Management*, 107, 54-65. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.007>
- JONES, J. W., ANTLE, J. M., BASSO, B., BOOTE, K. J., CONANT, R. T., FOSTER, I., GODFRAY, H. C. J., HERRERO, M., HOWITT, R. E., JANSSEN, S., KEATING, B. A., MUNOZ-CARPENA, R., PORTER, C. H., ROSENZWEIG, C., & WHEELER, T. R. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, 155, 240-254. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014>
- LANCASHIRE, P. D., BLEIHOLDER, H., BOOM, T. V. D., LANGELÜDDEKE, P., STAUSS, R., WEBER, E., & WITZENBERGER, A. (1991). A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds [eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x>]. *Annals of Applied Biology*, 119(3), 561-601. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x>
- LARSEN, J., SMITH, P., COWBROUGH, M., FALK, D., QUESNEL, G., BAUTE, T., TENUTA, A., & JOHNSON, P. (s. d.). *Un guide de champ sur les stades de croissances des céréales* (Guide N° 6250F-0108). Université de Guelph. Récupérée octobre 8, 2023, à partir de <https://www.cropscience.bayer.ca/-/media/Bayer-CropScience/Country-Canada-Internet/Growers-Tools/Resources-and-Guides/French/un-guide-le-champ-sur-les-stades-de-croissance-des-cereales.ashx?la=fr-CA&hash=507E716B181F3B482FD58ED3617AE40CE76AA30F>
- LE SOUDER, C. (2023, janvier 12). *Fertilisation du blé tendre : fractionner l'azote en trois apports* [ARVALIS]. Récupérée janvier 2, 2024, à partir de <https://www.arvalis.fr/infotechniques/fractionner-lazote-en-trois-apports>
- LESK, C., ROWHANI, P., & RAMANKUTTY, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production [Number : 7584 Publisher : Nature Publishing Group]. *Nature*, 529(7584), 84-87. <https://doi.org/10.1038/nature16467>
- LIMAU, F. (1994, février 4). *Facteurs de variation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais : conséquences pour la conduite de la fertilisation azotée du blé d'hiver en Lorraine* [thèse de doct., Institut National Polytechnique de Lorraine]. Récupérée janvier 4, 2024, à partir de <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01776570>
- LOBELL, D. B., & BURKE, M. B. (2010). On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11), 1443-1452. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008>
- LONG, S. P., AINSWORTH, E. A., LEAKEY, A. D. B., & MORGAN, P. B. (2005). Global food insecurity. treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone un-

- der large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 360(1463), 2011-2020. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1749>
- MIRSCHER, W., WIELAND, R., WENKEL, K.-O., NENDEL, C., & GUDDAT, C. (2014). YIELD-STAT – a spatial yield model for agricultural crops. *European Journal of Agronomy*, 52, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.015>
- MOHAMMED, A., YUSUF, M., DECHASA, N., & ABDUSELAM, F. (2018). Effects of Integrated Nutrient Management on Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth, Yield and Yield Components at Haramaya Watershed, Eastern Ethiopia. *Open Access Library Journal*, 5, 3974. <https://doi.org/10.4236/oalib.1103974>
- OEHLER, F., BORDENAVE, P., & DURAND, P. (2007). Variations of denitrification in a farming catchment area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120(2), 313-324. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.10.007>
- PEART, R. M., J. W., J., CURRY, R. B., BOOTE, K., & HARTWELL ALLEN, L. (1989). In *In the potential effects of global change on the united states, vol 1*. U.S. Environmental Protection Agency.
- RAUN, W. R., & SCHEPERS, J. S. (2008). Nitrogen management for improved use efficiency [Section : 17 \_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronmonogr49.c17>]. In *Nitrogen in agricultural systems* (p. 675-693). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c17>
- RIAHI, K., RAO, S., KREY, V., CHO, C., CHIRKOV, V., FISCHER, G., KINDERMANN, G., NAKICENOVIC, N., & RAFAJ, P. (2011). RCP 8.5—a scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1), 33. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- RIHA, S. J., WILKS, D. S., & SIMOENS, P. (1996). Impact of temperature and precipitation variability on crop model predictions. *Climatic Change*, 32(3), 293-311. <https://doi.org/10.1007/BF00142466>
- RITCHIE, J., & OTTER, S. (1985). Description and performance of CERES-Wheat : A user-oriented wheat yield model [Citation de l'article : Ritchie, J.T. and Otter, S. (1985) Description and Performance of CERES-Wheat : A User-Oriented Wheat Yield Model. In : ARS Wheat Yield Project. ARS-38. Natl Tech Info Serv, Spring-Field, Missouri, 159-175.]. *USDA-ARS, ARS-38, 38*.
- RODRÍGUEZ, A., RUIZ-RAMOS, M., PALOSUO, T., CARTER, T. R., FRONZEK, S., LORITE, I. J., FERRISE, R., PIRTIOJA, N., BINDI, M., BARANOWSKI, P., BUIS, S., CAMMARANO, D., CHEN, Y., DUMONT, B., EWERT, F., GAISER, T., HLAVINKA, P., HOFFMANN, H., HÖHN, J. G., ... RÖTTER, R. P. (2019). Implications of crop model ensemble size and composition for estimates of adaptation effects and agreement of recommendations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264, 351-362. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.018>
- ROSENBERG, N. J., KIMBALL, B. A., MARTIN, P., & COOPER, C. F. (1990). From climate and CO2 enrichment to evapotranspiration. [Publisher : John Wiley and Sons Inc.].

- Climate change and US water resources.*, 151-175. Récupérée janvier 4, 2024, à partir de <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19911959038>
- ROUDIER, P., SULTAN, B., QUIRION, P., & BERG, A. (2011). The impact of future climate change on West African crop yields : What does the recent literature say ? *Global Environmental Change*, 21(3), 1073-1083. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007>
- RUGET, F., BETHENOD, O., & COMBE, L. (1996). Repercussions of increased atmospheric CO2 on maize morphogenesis and growth for various temperature and radiation levels. *Maydica*, (41), 181. Récupérée janvier 3, 2024, à partir de <https://hal.inrae.fr/hal-02687835>
- SEGUIN, B. (2010). Le changement climatique : conséquences pour les végétaux [Place : Paris Publisher : Éditions de la Maison des sciences de l'homme]. *Quaderni*, 71(1), 27-40. <https://doi.org/10.4000/quaderni.525>
- SEMENOV, M. A., JAMIESON, P. D., & MARTRE, P. (2007). Deconvoluting nitrogen use efficiency in wheat : a simulation study. *European Journal of Agronomy*, 26(3), 283-294. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.10.009>
- SEXTON, J., EVERINGHAM, Y., & INMAN-BAMBER, G. (2016). A theoretical and real world evaluation of two bayesian techniques for the calibration of variety parameters in a sugarcane crop model. *Environmental Modelling & Software*, 83, 126-142. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.05.014>
- SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K., TIGNOR, M., & MILLER, H. (2007). *GIEC. summary for policymakers*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/2/241>
- STATBEL. (2023). *Exploitations agricoles et horticoles* [Statbel]. Récupérée janvier 1, 2024, à partir de <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures>
- STOCKLE, C. O., WILLIAMS, J. R., ROSENBERG, N. J., & JONES, C. A. (1992). A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops : Part I—Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural Systems*, 38(3), 225-238. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(92\)90067-X](https://doi.org/10.1016/0308-521X(92)90067-X)
- STUDNICKI, M., WIJATA, M., SOBCZYŃSKI, G., SAMBORSKI, S., GOZDOWSKI, D., & ROZBICKI, J. (2016). Effect of genotype, environment and crop management on yield and quality traits in spring wheat. *Journal of Cereal Science*, 72, 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.09.012>
- SUI, B., FENG, X., TIAN, G., HU, X., SHEN, Q., & GUO, S. (2013). Optimizing nitrogen supply increases rice yield and nitrogen use efficiency by regulating yield formation factors. *Field Crops Research*, 150, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.06.012>
- TARDIEU, F. (2003). Virtual plants : modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in Plant Science*, 8(1), 9-14. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)00008-0)
- TAULEMESSE, F. (2015, juin 16). *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* [thèse de doct., Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II].  
Récupérée août 10, 2023, à partir de <https://theses.hal.science/tel-01229768>
- van ITTERSUM, M. K., CASSMAN, K. G., GRASSINI, P., WOLF, J., TITTONELL, P., & HOCHMAN, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research*, *143*, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- VARELLA, H., GUÉRIF, M., & BUIS, S. (2010). Global sensitivity analysis measures the quality of parameter estimation : the case of soil parameters and a crop model. *Environmental Modelling & Software*, *25*(3), 310-319. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.09.012>
- VERLINDEN, A. (2022). Evaluation du potentiel d'optimisation des schémas de fertilisation azotée du froment d'hiver, sur base d'une approche modélisation, à l'échelle wallonne [Accepted : 2022-03-25T12 :29 :43Z Publisher : Université de Liège, Liège, Belgique Section : Université de Liège]. Récupérée août 9, 2023, à partir de <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/13878>
- YANG, X., LU, Y., DING, Y., YIN, X., RAZA, S., & TONG, Y. (2017). Optimising nitrogen fertilisation : a key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008–2014). *Field Crops Research*, *206*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.016>
- ZADOKS, J. C., CHANG, T. T., & KONZAK, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals [\_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>]. *Weed Research*, *14*(6), 415-421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>

## A Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la date de floraison

[1] "===Date de floraison==="

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
data\$NFrac	9	29992	3332	61.014	< 2e-16	***
data\$RCP_HT	4	864198	216049	3955.725	< 2e-16	***
data\$Soil	9	3580	398	7.283	1.2e-10	***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	103	3	0.053		1
data\$NFrac:data\$Soil	81	113	1	0.025		1
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	128	4	0.065		1
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	75	0	0.004		1
Residuals	14000	764637	55			

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===Date de floraison==="

[1] "=====

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
data\$NFrac	9	29992	3332	63.059	< 2e-16	***
data\$RCP_HT	4	864198	216049	4088.263	< 2e-16	***
data\$Soil	9	3580	398	7.527	4.48e-11	***
Residuals	14477	765056	53			

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===Date de floraison==="

[1] "=====

[1] "- SNK by NFrac -"

data[, ii] groups

N_000	523.3179	a
N_030	522.9207	ab
N_060	522.4517	bc
N_090	521.9517	c
N_120	521.4207	d
N_150	520.8993	de
N_180	520.3738	ef
N_210	519.8572	fg
N_240	519.3821	gh
N_270	518.9193	h

```
[1] "-- SNK by RCP_HT --"
      data[, ii] groups
rcp_00_ht_00  532.3810    a
rcp_45_ht_55  524.1228    b
rcp_85_ht_55  520.6776    c
rcp_45_ht_85  520.1348    d
rcp_85_ht_85  508.4310    e
```

## B Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la date de maturité

```
[1] "===Date de maturité==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	19965	2218	42.636	< 2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	927950	231988	4458.848	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	2565	285	5.478	1.5e-07 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	78	2	0.042	1
data\$NFrac:data\$Soil	81	105	1	0.025	1
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	50	1	0.027	1
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	61	0	0.004	1
Residuals	14000	728400	52		

```
---
```

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

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "===Date de maturité==="
```

```
[1] "=====
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	19965	2218	44.071	< 2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	927950	231988	4608.906	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	2565	285	5.663	7.33e-08 ***
Residuals	14477	728694	50		

```
---
```

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

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "===Date de maturité==="
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "-- SNK by NFrac --"
```

```
      data[, ii] groups
N_000  570.0034    a
N_030  569.7159   ab
```

```

N_060  569.3566  bc
N_090  568.9648  cd
N_120  568.5455  de
N_150  568.1159  ef
N_180  567.6641  fg
N_210  567.2207  gh
N_240  566.8241  hi
N_270  566.4386  i
[1] "-- SNK by RCP_HT --"
      data[, ii] groups
rcp_00_ht_00  580.4976  a
rcp_45_ht_55  570.1766  b
rcp_85_ht_55  567.7755  c
rcp_45_ht_85  567.5945  c
rcp_85_ht_85  555.3807  d

```

### C Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de SWFAC.veg1

```
[1] "===SWFAC.veg1==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	0.0000008	8.572e-08	0.938	0.4901
data\$RCP_HT	4	0.0000006	1.421e-07	1.555	0.1833
data\$Soil	9	0.0000013	1.421e-07	1.555	0.1225
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	0.0000031	8.572e-08	0.938	0.5747
data\$NFrac:data\$Soil	81	0.0000069	8.572e-08	0.938	0.6360
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	0.0000051	1.421e-07	1.555	0.0181 *
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	0.0000278	8.572e-08	0.938	0.7787
Residuals	14000	0.0012790	9.135e-08		

```
---
```

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

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "===SWFAC.veg1==="
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "--- rcp_00_ht_00---
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	0.0000039	4.286e-07	0.938	0.490
tmp\$Soil	9	0.0000064	7.104e-07	1.555	0.123
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	0.0000347	4.286e-07	0.938	0.635
Residuals	2800	0.0012790	4.568e-07		

```
[1] " "
```

[1] "---- rcp\_45\_ht\_55----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$Soil	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	0	0	NaN	NaN
Residuals	2800	0	0		

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_85----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$Soil	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	0	0	NaN	NaN
Residuals	2800	0	0		

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_55----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$Soil	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	0	0	NaN	NaN
Residuals	2800	0	0		

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_85----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$Soil	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	0	0	NaN	NaN
Residuals	2800	0	0		

[1] " "

[1] "=====

[1] "===SWFAC.veg1===

[1] "=====

[1] "----rcp\_00\_ht\_00----"

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N_270	1.201034e-04	a
N_240	3.641379e-05	a
N_000	0.000000e+00	a
N_030	0.000000e+00	a
N_060	0.000000e+00	a
N_090	0.000000e+00	a
N_120	0.000000e+00	a
N_150	0.000000e+00	a

N\_180 0.000000e+00 a  
 N\_210 0.000000e+00 a

## D Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de SWFAC.veg2

[1] "===SWFAC.veg2==="

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
data\$NFrac	9	53.5	5.94	39.094	<2e-16	***
data\$RCP_HT	4	139.8	34.94	229.890	<2e-16	***
data\$Soil	9	84.6	9.40	61.863	<2e-16	***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	52.4	1.45	9.573	<2e-16	***
data\$NFrac:data\$Soil	81	15.7	0.19	1.274	0.0494	*
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	102.7	2.85	18.768	<2e-16	***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	18.9	0.06	0.384	1.0000	
Residuals	14000	2127.8	0.15			

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===SWFAC.veg2==="

[1] "=====

[1] "---- rcp\_00\_ht\_00----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
tmp\$NFrac	9	78.1	8.679	18.128	<2e-16	***
tmp\$Soil	9	135.2	15.018	31.369	<2e-16	***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	19.8	0.245	0.511	1	
Residuals	2800	1340.5	0.479			

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_55----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
tmp\$NFrac	9	23.6	2.622	14.247	<2e-16	***
tmp\$Soil	9	42.3	4.705	25.562	<2e-16	***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	11.0	0.136	0.738	0.961	
Residuals	2800	515.4	0.184			

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_85----"

Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
----	--------	---------	---------	--------

```

tmp$NFrac          9   3.51  0.3901   4.705 3.18e-06 ***
tmp$Soil           9   7.62  0.8470  10.216 1.24e-15 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81   2.52  0.0311   0.375      1
Residuals         2800 232.14  0.0829

```

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_55----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	0.63	0.07028	4.941	1.31e-06 ***
tmp\$Soil	9	2.19	0.24286	17.072	< 2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	1.26	0.01552	1.091	0.273
Residuals	2800	39.83	0.01423		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_85----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$Soil	9	0	0	NaN	NaN
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	0	0	NaN	NaN
Residuals	2800	0	0		

[1] " "

[1] "=====

[1] "===SWFAC.veg2===

[1] "=====

[1] "----rcp\_00\_ht\_00----"

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

```

N_270 0.53113852      a
N_240 0.48106703     ab
N_210 0.41578155    abc
N_180 0.35297610    bcd
N_150 0.29142979    cde
N_120 0.22783417    def
N_090 0.16460983    efg
N_060 0.10826979    fg
N_030 0.07347293     g
N_000 0.04561769     g

```

[1] "----rcp\_45\_ht\_55----"

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

```

N_270 0.28164872      a
N_240 0.25057190     ab
N_210 0.21688003     abc
N_180 0.18286448     bcd
N_150 0.14865990     cde
N_120 0.10727869     def
N_090 0.07746900     ef
N_060 0.04724834     f
N_030 0.02951410     f
N_000 0.01486141     f
[1] "----rcp_45_ht_85----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 0.10421824      a
N_240 0.09878117      a
N_210 0.08935348      ab
N_180 0.07794514      abc
N_150 0.06542962     abcd
N_120 0.04965031     abcd
N_090 0.03702024     abcd
N_060 0.02209669     bcd
N_030 0.01011472     cd
N_000 0.00488731     d
[1] "----rcp_85_ht_55----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 4.493221e-02     a
N_240 3.886317e-02     ab
N_210 3.201824e-02     abc
N_180 2.718303e-02     abcd
N_150 2.116379e-02     abcd
N_120 1.548997e-02     bcd
N_090 1.054321e-02     cd
N_060 6.271897e-03     cd
N_030 2.348655e-03     d
N_000 8.251724e-05     d

```

## E Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de SW-FAC.rep

```
[1] "===SWFAC.rep==="
```

```
Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
```

data\$NFrac	9	60505	6723	327.152	<2e-16	***
data\$RCP_HT	4	148512	37128	1806.771	<2e-16	***
data\$Soil	9	37797	4200	204.369	<2e-16	***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	6137	170	8.296	<2e-16	***
data\$NFrac:data\$Soil	81	672	8	0.404		1
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	3554	99	4.804	<2e-16	***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	855	3	0.128		1
Residuals		14000	287692			21

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===SWFAC.rep===

[1] "=====

[1] "---- rcp\_00\_ht\_00----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	21533	2392.5	76.963	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	14559	1617.6	52.037	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	666	8.2	0.264	1
Residuals	2800	87042	31.1		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_55----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	18372	2041.4	69.523	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	10373	1152.6	39.253	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	412	5.1	0.173	1
Residuals	2800	82214	29.4		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_85----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	13705	1522.7	59.751	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	8211	912.4	35.801	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	156	1.9	0.076	1
Residuals	2800	71358	25.5		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_55----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	10335	1148.3	78.565	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	5931	659.0	45.084	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	139	1.7	0.117	1
Residuals	2800	40925	14.6		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
 [1] " "  
 [1] "---- rcp\_85\_ht\_85----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	2698	299.7	136.384	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	2277	253.0	115.112	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	154	1.9	0.865	0.798
Residuals	2800	6154	2.2		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
 [1] " "  
 [1] "=====

[1] "===SWFAC.rep==="  
 [1] "=====

[1] "----rcp\_00\_ht\_00----"  
 [1] "- SNK by NFrac -"  
 tmp[, ii] groups

N\_270 14.946529 a  
 N\_240 14.490618 a  
 N\_210 13.988944 ab  
 N\_180 13.328527 bc  
 N\_150 12.548296 cd  
 N\_120 11.654868 d  
 N\_090 10.518910 e  
 N\_060 9.268721 f  
 N\_030 7.923743 g  
 N\_000 6.596619 h

[1] "----rcp\_45\_ht\_55----"  
 [1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups  
 N\_270 12.357982 a  
 N\_240 11.821640 ab  
 N\_210 11.177627 bc  
 N\_180 10.450061 cd  
 N\_150 9.704557 de  
 N\_120 8.866694 e

```

N_090  7.879761    f
N_060  6.812046    g
N_030  5.635064    h
N_000  4.590865    i
[1] "----rcp_45_ht_85----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  9.731858    a
N_240  9.100572   ab
N_210  8.405820   bc
N_180  7.680115   cd
N_150  6.970540   d
N_120  6.102874   e
N_090  5.307584   ef
N_060  4.506635   fg
N_030  3.759869   gh
N_000  3.071416   h

```

```

[1] "----rcp_85_ht_85----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  3.8412047   a
N_240  3.4034184   b
N_210  2.8944636   c
N_180  2.4867986   d
N_150  2.0507871   e
N_120  1.7241416   f
N_090  1.4729358   g
N_060  1.2702424   gh
N_030  1.0768300   hi
N_000  0.8673527   i
[1] " "

```

## F Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de EW-FAC.veg1

```
[1] "===EWFAC.veg1==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	27	3	0.154	0.998
data\$RCP_HT	4	20245	5061	257.625	<2e-16 ***
data\$Soil	9	7668	852	43.367	<2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	19	1	0.027	1.000

```

data$NFrac:data$Soil          81    13    0  0.008  1.000
data$RCP_HT:data$Soil        36  5005   139  7.077 <2e-16 ***
data$NFrac:data$RCP_HT:data$Soil 324    12    0  0.002  1.000
Residuals                    14000 275041   20

```

---

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

```

[1] " "
[1] "====="
[1] "===EWFAC.veg1==="
[1] "====="
[1] "---- rcp_00_ht_00----"

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	0.51	0.0568	0.543	0.844
tmp\$Soil	9	16.45	1.8275	17.483	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	0.50	0.0062	0.059	1.000
Residuals	2800	292.68	0.1045		

---

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

```

[1] " "
[1] "---- rcp_45_ht_55----"

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	2	0.26	0.040	1
tmp\$Soil	9	877	97.40	15.352	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	3	0.04	0.006	1
Residuals	2800	17764	6.34		

---

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

```

[1] " "
[1] "---- rcp_45_ht_85----"

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	34	3.8	0.070	1
tmp\$Soil	9	5275	586.2	10.793	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	19	0.2	0.004	1
Residuals	2800	152061	54.3		

---

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

```

[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_55----"

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	1	0.06	0.005	1
tmp\$Soil	9	1197	132.99	11.016	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	0	0.01	0.000	1

Residuals 2800 33803 12.07

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_85----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	9	1.0	0.038	1
tmp\$Soil	9	5307	589.7	23.217	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	2	0.0	0.001	1
Residuals	2800	71121	25.4		

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===EWFAC.veg1===

[1] "=====

[1] "----rcp\_00\_ht\_00----"

[1] "- SNK by Soil -"

tmp[, ii] groups

sol_130EP043	0.21610503	a
sol_130EP001	0.20717490	a
sol_130EP032	0.17905107	ab
sol_130EP003	0.13585269	b
sol_130EP038	0.05549703	c
sol_130EP039	0.05480162	c
sol_130EP031	0.03137310	c
sol_130EP040	0.02942086	c
sol_130EP030	0.02902659	c
sol_130EP002	0.02519262	c

[1] "----rcp\_45\_ht\_55----"

[1] "- SNK by Soil -"

tmp[, ii] groups

sol_130EP043	1.7429718	a
sol_130EP032	1.7002062	a
sol_130EP001	1.6025200	a
sol_130EP003	1.4654453	a
sol_130EP039	0.7857532	b
sol_130EP038	0.7663078	b
sol_130EP040	0.5484417	b
sol_130EP030	0.5447106	b
sol_130EP031	0.4798529	b
sol_130EP002	0.2121390	b

```
[1] "---rcp_45_ht_85---"
```

```
[1] "- SNK by Soil -"
```

```
      tmp[, ii] groups
```

```
sol_130EP043 4.6730546      a
sol_130EP032 4.6392247      a
sol_130EP001 4.2170014      a
sol_130EP003 3.9580526      a
sol_130EP039 2.0957184      b
sol_130EP038 2.0753557      b
sol_130EP031 2.0081657      b
sol_130EP040 1.8998076      b
sol_130EP030 1.8599594      b
sol_130EP002 0.6530317      b
```

```
[1] "---rcp_85_ht_55---"
```

```
[1] "- SNK by Soil -"
```

```
      tmp[, ii] groups
```

```
sol_130EP003 2.8421866      a
sol_130EP043 1.4445910      b
sol_130EP032 1.4094267      b
sol_130EP001 1.2891946      b
sol_130EP040 0.9250050      bc
sol_130EP031 0.9080714      bc
sol_130EP030 0.8788715      bc
sol_130EP038 0.8015031      bc
sol_130EP039 0.7946240      bc
sol_130EP002 0.3366270      c
```

```
[1] "---rcp_85_ht_85---"
```

```
[1] "- SNK by Soil -"
```

```
      tmp[, ii] groups
```

```
sol_130EP003 6.678807      a
sol_130EP043 3.943300      b
sol_130EP032 3.838725      bc
sol_130EP001 3.395921      bcd
sol_130EP031 3.077514      bcde
sol_130EP030 2.862140      bcde
sol_130EP040 2.725928      cde
sol_130EP039 2.434983      def
sol_130EP038 1.958282      ef
sol_130EP002 1.544462      f
```

## G Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de EWFAC.veg2

```
[1] "===EWFAC.veg2==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	16	1.76	0.798	0.618
data\$RCP_HT	4	223	55.78	25.336	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	150	16.71	7.589	3.51e-11 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	7	0.19	0.088	1.000
data\$NFrac:data\$Soil	81	2	0.03	0.012	1.000
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	45	1.26	0.573	0.981
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	4	0.01	0.006	1.000
Residuals	14000	30822	2.20		

---

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

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "===EWFAC.veg2==="
```

```
[1] "=====
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	16	1.76	0.823	0.595
data\$RCP_HT	4	223	55.78	26.149	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	150	16.71	7.832	1.31e-11 ***
Residuals	14477	30881	2.13		

---

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

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "===EWFAC.veg2==="
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "- SNK by RCP_HT -"
```

	data[, ii]	groups
rcp_85_ht_85	0.5178777	a
rcp_45_ht_55	0.4519760	a
rcp_00_ht_00	0.3396078	b
rcp_45_ht_85	0.2992891	b
rcp_85_ht_55	0.1609206	c

## H Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de TPFAC.veg1

```
[1] "===TPFAC.veg1==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	12	1.3	0.161	0.998
data\$RCP_HT	4	6856	1714.1	209.513	<2e-16 ***
data\$Soil	9	10	1.1	0.135	0.999
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	2	0.1	0.007	1.000
data\$NFrac:data\$Soil	81	3	0.0	0.004	1.000
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	9	0.2	0.030	1.000
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	1	0.0	0.000	1.000
Residuals	14000	114540	8.2		

---

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

```
[1] " "
[1] "====="
[1] "===TPFAC.veg1=== "
[1] "====="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	12	1.3	0.166	0.997
data\$RCP_HT	4	6856	1714.1	216.623	<2e-16 ***
data\$Soil	9	10	1.1	0.140	0.999
Residuals	14477	114555	7.9		

---

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

```
[1] " "
[1] "====="
[1] "===TPFAC.veg1=== "
[1] "====="
[1] "- SNK by RCP_HT -"
```

	data[, ii]	groups
rcp_45_ht_85	5.231169	a
rcp_45_ht_55	4.648474	b
rcp_85_ht_85	4.255843	c
rcp_85_ht_55	4.234874	c
rcp_00_ht_00	3.129699	d

## I Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de TP-FAC.veg2

```
[1] "===TPFAC.veg2=== "
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	2.1	0.230	2.170	0.0211 *
data\$RCP_HT	4	68.4	17.095	161.079	<2e-16 ***
data\$Soil	9	0.6	0.066	0.624	0.7775

```

data$NFrac:data$RCP_HT          36    0.2   0.004   0.040 1.0000
data$NFrac:data$Soil            81    0.0   0.000   0.004 1.0000
data$RCP_HT:data$Soil          36    0.5   0.014   0.128 1.0000
data$NFrac:data$RCP_HT:data$Soil 324   0.2   0.001   0.006 1.0000
Residuals                      14000 1485.8  0.106

```

---

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

```

[1] " "
[1] "====="
[1] "===TPFAC.veg2==="
[1] "====="

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	2.1	0.230	2.242	0.0169 *
data\$RCP_HT	4	68.4	17.095	166.467	<2e-16 ***
data\$Soil	9	0.6	0.066	0.645	0.7592
Residuals	14477	1486.7	0.103		

---

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

```

[1] " "
[1] "====="
[1] "===TPFAC.veg2==="
[1] "====="

```

```

[1] "- SNK by RCP_HT -"
      data[, ii] groups
rcp_85_ht_55  0.3441247    a
rcp_45_ht_85  0.3252902    b
rcp_85_ht_85  0.3146806    b
rcp_45_ht_55  0.3141147    b
rcp_00_ht_00  0.1550333    c

```

## J Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de TP-FAC.rep

```

[1] "===TPFAC.rep==="

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	6.0	0.664	3.453	0.000291 ***
data\$RCP_HT	4	83.9	20.964	109.081	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	0.6	0.071	0.368	0.950415
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	0.6	0.016	0.085	1.000000
data\$NFrac:data\$Soil	81	0.2	0.002	0.012	1.000000
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	0.3	0.009	0.046	1.000000
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	0.2	0.001	0.003	1.000000

```

Residuals                14000 2690.6   0.192
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "====="
[1] "===TPFAC.rep==="
[1] "====="
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
data$NFrac    9   6.0   0.664   3.569 0.000192 ***
data$RCP_HT   4  83.9  20.964 112.744 < 2e-16 ***
data$Soil     9   0.6   0.071   0.381 0.944897
Residuals  14477 2691.9   0.186

```

```

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "====="
[1] "===TPFAC.rep==="
[1] "====="
[1] "- SNK by RCP_HT -"
      data[, ii] groups
rcp_45_ht_55  0.7051024      a
rcp_85_ht_85  0.6186500      b
rcp_85_ht_55  0.5908088      c
rcp_45_ht_85  0.5720970      c
rcp_00_ht_00  0.4694497      d

```

## K Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de INNFAC.veg1

```

[1] "===INNFAC.veg1==="
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
data$NFrac    9 189846  21094 2165.667 < 2e-16 ***
data$RCP_HT   4   622    156  15.966 4.78e-13 ***
data$Soil     9  48839  5427  557.127 < 2e-16 ***
data$NFrac:data$RCP_HT  36  1003    28   2.859 2.50e-08 ***
data$NFrac:data$Soil   81  2338    29   2.963 < 2e-16 ***
data$RCP_HT:data$Soil  36  1761    49   5.023 < 2e-16 ***
data$NFrac:data$RCP_HT:data$Soil 324  180    1   0.057      1
Residuals                14000 136363   10

```

```

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "

```

[1] "=====

[1] "===INNFACT.veg1===

[1] "=====

[1] "---- rcp\_00\_ht\_00----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	28834	3204	267.901	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	5641	627	52.406	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	257	3	0.265	1
Residuals	2800	33485	12		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_55----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	36774	4086	472.225	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	9675	1075	124.234	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	474	6	0.677	0.988
Residuals	2800	24228	9		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_85----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	39750	4417	342.69	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	12051	1339	103.89	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	679	8	0.65	0.993
Residuals	2800	36088	13		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_55----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	44153	4906	521.487	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	8758	973	103.445	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	534	7	0.701	0.98
Residuals	2800	26341	9		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_85----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	41337	4593	792.802	<2e-16 ***

```

tmp$Soil          9  14475    1608 277.622 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81   573       7  1.221 0.0898 .
Residuals        2800 16221       6

```

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===INNFAc.veg1===

[1] "=====

[1] "---rcp\_00\_ht\_00---

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N\_000 15.879504 a

N\_030 14.543310 b

N\_060 13.199009 c

N\_090 11.861583 d

N\_120 10.606241 e

N\_150 9.482787 f

N\_180 8.471281 g

N\_210 7.607354 h

N\_240 6.853991 i

N\_270 6.235344 j

[1] "---rcp\_45\_ht\_55---

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N\_000 17.125318 a

N\_030 15.489585 b

N\_060 13.891183 c

N\_090 12.379320 d

N\_120 11.033368 e

N\_150 9.791367 f

N\_180 8.700712 g

N\_210 7.740157 h

N\_240 6.855405 i

N\_270 6.059880 j

[1] "---rcp\_45\_ht\_85---

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N\_000 17.448186 a

N\_030 15.756862 b

N\_060 14.164013 c

N\_090 12.682158 d

```

N_120 11.318209      e
N_150  9.997754      f
N_180  8.809074      g
N_210  7.739741      h
N_240  6.773800      i
N_270  5.933848      j
[1] "---rcp_85_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_000 17.405102      a
N_030 15.688612      b
N_060 14.004253      c
N_090 12.381404      d
N_120 10.876733      e
N_150  9.502898      f
N_180  8.278670      g
N_210  7.171728      h
N_240  6.196532      i
N_270  5.351600      j
[1] "---rcp_85_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_000 17.047654      a
N_030 15.422572      b
N_060 13.828859      c
N_090 12.339876      d
N_120 10.925432      e
N_150  9.644308      f
N_180  8.405787      g
N_210  7.266275      h
N_240  6.224283      i
N_270  5.291497      j

```

## L Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de INN-FAC.veg2

```
[1] "===INNFAC.veg2==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	31125	3458	567.041	< 2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	5152	1288	211.177	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	5727	636	104.329	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	427	12	1.946	0.000593 ***

```

data$NFrac:data$Soil          81    63    1  0.129 1.000000
data$RCP_HT:data$Soil        36   828   23  3.770 2.08e-13 ***
data$NFrac:data$RCP_HT:data$Soil 324    66    0  0.033 1.000000
Residuals                    14000 85384    6

```

---

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

```

[1] " "
[1] "===INNFACT.veg2==="

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	31125	3458	567.041	< 2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	5152	1288	211.177	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	5727	636	104.329	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	427	12	1.946	0.000593 ***
data\$NFrac:data\$Soil	81	63	1	0.129	1.000000
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	828	23	3.770	2.08e-13 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	66	0	0.033	1.000000
Residuals	14000	85384	6		

---

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

```

[1] "=====
[1] "===INNFACT.veg2==="
[1] "=====
[1] "---rcp_00_ht_00---"
[1] "- SNK by NFrac -"

```

```

      tmp[, ii] groups
N_000  7.423291      a
N_030  6.951719      b
N_060  6.479144      c
N_090  6.055689      d
N_120  5.612803      e
N_150  5.185396      f
N_180  4.747246      g
N_210  4.291523      h
N_240  3.945085     hi
N_270  3.633582      i

```

```

[1] "---rcp_45_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"

```

```

      tmp[, ii] groups
N_000  8.136935      a
N_030  7.672416      b
N_060  7.186539      c
N_090  6.717626      d

```

```

N_120  6.198318    e
N_150  5.710518    f
N_180  5.236073    g
N_210  4.784565    gh
N_240  4.342528    hi
N_270  3.957100    i
[1] "---rcp_45_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_000  8.960124    a
N_030  8.417419    b
N_060  7.843577    c
N_090  7.285299    d
N_120  6.714201    e
N_150  6.199728    f
N_180  5.670759    g
N_210  5.137024    h
N_240  4.612228    i
N_270  4.090748    j
[1] "---rcp_85_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_000  8.973448    a
N_030  8.627338    ab
N_060  8.222248    b
N_090  7.733519    c
N_120  7.217474    d
N_150  6.683122    e
N_180  6.093587    f
N_210  5.498236    g
N_240  4.931336    h
N_270  4.424789    i
[1] "---rcp_85_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_000  9.597587    a
N_030  9.123343    b
N_060  8.623964    c
N_090  8.049050    d
N_120  7.471454    e
N_150  6.847467    f
N_180  6.240408    g

```

```

N_210  5.610480    h
N_240  4.986388    i
N_270  4.360590    j

```

## M Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la biomasse aérienne à floraison

```
[1] "===Biomasse aérienne à floraison==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	41671	4630	1660.866	< 2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	4015	1004	360.015	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	8567	952	341.435	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	500	14	4.986	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$Soil	81	545	7	2.416	2.25e-11 ***
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	1009	28	10.057	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	21	0	0.023	1
Residuals	14000	39029	3		

```
---
```

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

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "===Biomasse aérienne à floraison==="
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "--- rcp_00_ht_00---
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	5787	643.1	277.09	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	842	93.6	40.32	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	75	0.9	0.40	1
Residuals	2800	6498	2.3		

```
---
```

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

```
[1] " "
```

```
[1] "--- rcp_45_ht_55---
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	7410	823.3	403.567	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	1348	149.8	73.434	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	106	1.3	0.642	0.995
Residuals	2800	5712	2.0		

```
---
```

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

```
[1] " "
```

```
[1] "--- rcp_45_ht_85---
```

```

                Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      9   8248   916.4 235.901 <2e-16 ***
tmp$Soil       9   1692   188.0  48.398 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81    118    1.5   0.376      1
Residuals     2800 10877    3.9
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_55----"
                Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      9  10372  1152.5 512.485 <2e-16 ***
tmp$Soil       9   1887   209.6  93.219 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81    141    1.7   0.776   0.93
Residuals     2800  6297    2.2
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_85----"
                Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      9  10354  1150.5 334.003 <2e-16 ***
tmp$Soil       9   3807   423.0 122.796 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81    125    1.5   0.449      1
Residuals     2800  9645    3.4
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "======"
[1] "===Biomasse aérienne   floraison==="
[1] "======"
[1] "----rcp_00_ht_00----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 12.563947      a
N_240 12.299542      b
N_210 11.985255      c
N_180 11.605143      d
N_150 11.176666      e
N_120 10.680929      f
N_090 10.125198      g
N_060  9.534937      h
N_030  8.890632      i
N_000  8.197212      j

```

```

[1] "----rcp_45_ht_55----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 13.418884      a
N_240 13.084711      b
N_210 12.696654      c
N_180 12.278629      d
N_150 11.800835      e
N_120 11.254710      f
N_090 10.640763      g
N_060  9.949428      h
N_030  9.216058      i
N_000  8.450971      j
[1] "----rcp_45_ht_85----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 13.659084      a
N_240 13.275766      b
N_210 12.824751      c
N_180 12.341077      d
N_150 11.799982      e
N_120 11.203328      f
N_090 10.589672      g
N_060  9.898807      h
N_030  9.175940      i
N_000  8.414354      j
[1] "----rcp_85_ht_55----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 14.693220      a
N_240 14.302657      b
N_210 13.839894      c
N_180 13.308156      d
N_150 12.711054      e
N_120 12.058631      f
N_090 11.317531      g
N_060 10.528014      h
N_030  9.704485      i
N_000  8.857111      j
[1] "----rcp_85_ht_85----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups

```

N_270	14.681912	a
N_240	14.236239	b
N_210	13.730221	c
N_180	13.164017	d
N_150	12.537792	e
N_120	11.864825	f
N_090	11.138888	g
N_060	10.389558	h
N_030	9.620771	i
N_000	8.859259	j

## N Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la biomasse aérienne à maturité

[1] "===Biomasse aérienne à maturité==="

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	125923	13991	1740.163	< 2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	9531	2383	296.336	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	26721	2969	369.272	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	3334	93	11.517	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$Soil	81	1109	14	1.703	8.85e-05 ***
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	4717	131	16.297	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	269	1	0.103	1
Residuals	14000	112564	8		

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===Biomasse aérienne à maturité==="

[1] "=====

[1] "---- rcp\_00\_ht\_00----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	14615	1623.9	184.866	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	1709	189.8	21.612	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	236	2.9	0.332	1
Residuals	2800	24595	8.8		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_55----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	22126	2458.5	318.516	<2e-16 ***

```

tmp$Soil          9   3910   434.4  56.286 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81    311    3.8   0.497      1
Residuals        2800  21612    7.7
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_45_ht_85----"
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      9  24488  2720.9  312.23 <2e-16 ***
tmp$Soil       9   4868   540.9   62.07 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81    311    3.8    0.44      1
Residuals     2800  24400    8.7
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_55----"
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      9  29807   3312  469.914 <2e-16 ***
tmp$Soil       9   6002   667   94.624 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81    294    4    0.515      1
Residuals     2800  19734    7
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_85----"
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      9  38220   4247  535.067 <2e-16 ***
tmp$Soil       9  14950   1661  209.292 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81    227    3    0.352      1
Residuals     2800  22223    8
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "====="
[1] "===Biomasse aérienne   maturit ===
[1] "====="
[1] "----rcp_00_ht_00----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  18.96076      a
N_240  18.53677      a
N_210  18.03553      b

```

```

N_180  17.40468      c
N_150  16.70810      d
N_120  15.93355      e
N_090  15.06013      f
N_060  14.13416      g
N_030  13.08989      h
N_000  12.03261      i
[1] "---rcp_45_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  20.98136      a
N_240  20.35011      b
N_210  19.60266      c
N_180  18.81931      d
N_150  17.97732      e
N_120  17.04729      f
N_090  16.02293      g
N_060  14.86514      h
N_030  13.61716      i
N_000  12.36357      j
[1] "---rcp_45_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  20.92431      a
N_240  20.15818      b
N_210  19.30813      c
N_180  18.41748      d
N_150  17.44034      e
N_120  16.38326      f
N_090  15.32986      g
N_060  14.20152      h
N_030  13.05050      i
N_000  11.92496      j
[1] "---rcp_85_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  22.58183      a
N_240  21.80746      b
N_210  20.92192      c
N_180  19.94458      d
N_150  18.90587      e
N_120  17.78173      f

```

```

N_090 16.55798      g
N_060 15.26718      h
N_030 13.96447      i
N_000 12.68123      j
[1] "---rcp_85_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 23.69131      a
N_240 22.57452      b
N_210 21.37062      c
N_180 20.11279      d
N_150 18.82787      e
N_120 17.52462      f
N_090 16.19515      g
N_060 14.90045      h
N_030 13.66444      i
N_000 12.49875      j

```

## O Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la quantité d'azote absorbé par la plante à floraison

```

[1] "===Quantité d'azote absorbé par la plante à floraison==="

              Df  Sum Sq Mean Sq  F value  Pr(>F)
data$NFrac      9 23109600 2567733 3071.439 < 2e-16 ***
data$RCP_HT     4  199329   49832   59.608 < 2e-16 ***
data$Soil       9  3925594  436177  521.741 < 2e-16 ***
data$NFrac:data$RCP_HT 36   94094    2614    3.126 9.2e-10 ***
data$NFrac:data$Soil  81   76810     948    1.134  0.193
data$RCP_HT:data$Soil 36  305269    8480  10.143 < 2e-16 ***
data$NFrac:data$RCP_HT:data$Soil 324   6615     20    0.024  1.000
Residuals      14000 11704048    836

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "======"
[1] "===Quantité d'azote absorbé par la plante à floraison==="
[1] "======"
[1] "--- rcp_00_ht_00---"

              Df  Sum Sq Mean Sq  F value  Pr(>F)
tmp$NFrac      9 3664039  407115 366.098 <2e-16 ***
tmp$Soil       9  445090   49454  44.472 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81  10706    132   0.119    1

```

```

Residuals          2800 3113711    1112
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_45_ht_55----"
          Df  Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac    9 4386429  487381  684.00 <2e-16 ***
tmp$Soil     9  657142   73016  102.47 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81  16740    207    0.29      1
Residuals   2800 1995119    713
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_45_ht_85----"
          Df  Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac    9 4800373  533375  765.758 <2e-16 ***
tmp$Soil     9  753481   83720  120.196 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81  19689    243    0.349      1
Residuals   2800 1950288    697
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_55----"
          Df  Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac    9 5189191  576577  670.04 <2e-16 ***
tmp$Soil     9  829195   92133  107.07 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81  20197    249    0.29      1
Residuals   2800 2409446    861
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_85----"
          Df  Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac    9 5163661  573740  718.624 <2e-16 ***
tmp$Soil     9 1545955  171773  215.150 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81  16093    199    0.249      1
Residuals   2800 2235484    798
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "====="
[1] "===Quantité d'azote absorbé par la plante à floraison==="

```

```

[1] "=====
[1] "----rcp_00_ht_00----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  223.3365      a
N_240  212.3363      b
N_210  200.8544      c
N_180  188.7671      d
N_150  176.5852      e
N_120  164.1233      f
N_090  151.4495      g
N_060  138.7409      h
N_030  125.6947      i
N_000  112.2540      j
[1] "----rcp_45_ht_55----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  232.5015      a
N_240  220.2555      b
N_210  207.4214      c
N_180  194.5134      d
N_150  181.1803      e
N_120  167.5263      f
N_090  153.7627      g
N_060  139.6944      h
N_030  125.3935      i
N_000  110.8484      j
[1] "----rcp_45_ht_85----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  235.0973      a
N_240  221.8029      b
N_210  208.0025      c
N_180  194.1583      d
N_150  180.0518      e
N_120  165.7149      f
N_090  151.5187      g
N_060  136.9609      h
N_030  122.4938      i
N_000  107.9437      j
[1] "----rcp_85_ht_55----"
[1] "- SNK by NFrac -"

```

```

      tmp[, ii] groups
N_270 245.4247      a
N_240 231.1950      b
N_210 216.6254      c
N_180 201.7901      d
N_150 186.9420      e
N_120 172.3570      f
N_090 157.5487      g
N_060 142.6923      h
N_030 127.9893      i
N_000 113.1388      j
[1] "----rcp_85_ht_85----"
[1] "- SNK by NFrac -"

```

```

      tmp[, ii] groups
N_270 243.5556      a
N_240 229.3213      b
N_210 214.7881      c
N_180 200.0529      d
N_150 185.3258      e
N_120 170.5869      f
N_090 155.7698      g
N_060 141.0879      h
N_030 126.4069      i
N_000 111.6095      j

```

## P Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de la quantité d'azote absorbé par la plante à maturité

```
[1] "===Quantité d'azote absorbé par la plante à maturité==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	27284670	3031630	3028.553	<2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	283474	70869	70.797	<2e-16 ***
data\$Soil	9	4786681	531853	531.314	<2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	167231	4645	4.641	<2e-16 ***
data\$NFrac:data\$Soil	81	92865	1146	1.145	0.176
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	428147	11893	11.881	<2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	12178	38	0.038	1.000
Residuals	14000	14014224	1001		

```
---
```

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

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

[1] "===Quantité d'azote absorbé par la plante à maturité==="

[1] "=====

[1] "---- rcp\_00\_ht\_00----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	4090416	454491	317.768	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	489121	54347	37.998	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	14395	178	0.124	1
Residuals	2800	4004730	1430		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_55----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	5162624	573625	606.263	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	778893	86544	91.468	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	23169	286	0.302	1
Residuals	2800	2649262	946		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_85----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	5693100	632567	799.431	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	910078	101120	127.794	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	23831	294	0.372	1
Residuals	2800	2215558	791		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_55----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	6072806	674756	698.505	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	1019430	113270	117.257	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	24485	302	0.313	1
Residuals	2800	2704800	966		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_85----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	6432955	714773	820.274	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	2017306	224145	257.229	<2e-16 ***

```
tmp$NFrac:tmp$Soil  81  19164  237  0.272  1
Residuals          2800 2439873  871
```

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===Quantité d'azote absorbé par la plante à maturité===

[1] "=====

[1] "---rcp\_00\_ht\_00---

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N\_270 244.4955 a

N\_240 233.0026 b

N\_210 221.0336 c

N\_180 208.3483 d

N\_150 195.5545 e

N\_120 182.4968 f

N\_090 169.1366 g

N\_060 155.5925 h

N\_030 141.4428 i

N\_000 126.9918 j

[1] "---rcp\_45\_ht\_55---

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N\_270 257.6773 a

N\_240 244.5247 b

N\_210 230.6482 c

N\_180 216.7065 d

N\_150 202.3062 e

N\_120 187.5680 f

N\_090 172.6307 g

N\_060 157.2548 h

N\_030 141.5286 i

N\_000 125.6870 j

[1] "---rcp\_45\_ht\_85---

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N\_270 259.0101 a

N\_240 244.4580 b

N\_210 229.4280 c

N\_180 214.2760 d

N\_150 198.8017 e

```

N_120 183.1569      f
N_090 167.6736      g
N_060 151.8927      h
N_030 136.2293      i
N_000 120.7439      j
[1] "----rcp_85_ht_55----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 270.1527      a
N_240 254.9148      b
N_210 239.2392      c
N_180 223.2137      d
N_150 207.2651      e
N_120 191.3508      f
N_090 175.2981      g
N_060 159.1221      h
N_030 143.1649      i
N_000 127.2384      j
[1] "----rcp_85_ht_85----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 272.6079      a
N_240 256.3707      b
N_210 239.8447      c
N_180 223.1508      d
N_150 206.5341      e
N_120 190.0290      f
N_090 173.5265      g
N_060 157.3311      h
N_030 141.4388      i
N_000 125.6033      j

```

## Q Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK du nombre de grains

```
[1] "===Nombre de grain==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
data\$NFrac	9	1.147e+11	1.275e+10	1514.835	< 2e-16	***
data\$RCP_HT	4	5.187e+09	1.297e+09	154.087	< 2e-16	***
data\$Soil	9	1.993e+10	2.214e+09	263.112	< 2e-16	***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	1.677e+09	4.658e+07	5.535	< 2e-16	***
data\$NFrac:data\$Soil	81	1.335e+09	1.648e+07	1.958	6.52e-07	***

```

data$RCP_HT:data$Soil          36 2.628e+09 7.301e+07    8.676 < 2e-16 ***
data$NFrac:data$RCP_HT:data$Soil 324 1.704e+08 5.260e+05    0.063      1
Residuals                      14000 1.178e+11 8.415e+06

```

---

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

```

[1] " "
[1] "====="
[1] "===Nombre de grain==="
[1] "====="
[1] "--- rcp_00_ht_00---"

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	1.599e+10	1.777e+09	145.111	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	1.601e+09	1.779e+08	14.528	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	2.756e+08	3.402e+06	0.278	1
Residuals	2800	3.428e+10	1.224e+07		

---

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

```

[1] " "
[1] "--- rcp_45_ht_55---"

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	1.936e+10	2.151e+09	256.837	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	2.818e+09	3.131e+08	37.386	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	3.381e+08	4.174e+06	0.498	1
Residuals	2800	2.345e+10	8.374e+06		

---

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

```

[1] " "
[1] "--- rcp_45_ht_85---"

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	2.336e+10	2.595e+09	323.753	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	4.392e+09	4.880e+08	60.885	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	2.636e+08	3.254e+06	0.406	1
Residuals	2800	2.244e+10	8.016e+06		

---

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

```

[1] " "
[1] "--- rcp_85_ht_55---"

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	2.732e+10	3.035e+09	439.319	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	4.397e+09	4.885e+08	70.715	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	3.473e+08	4.288e+06	0.621	0.997
Residuals	2800	1.934e+10	6.909e+06		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_85----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	3.039e+10	3.376e+09	516.75	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	9.348e+09	1.039e+09	158.97	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	2.803e+08	3.461e+06	0.53	1
Residuals	2800	1.830e+10	6.534e+06		

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===Nombre de grain==="

[1] "=====

[1] "----rcp\_00\_ht\_00----"

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N_270	21751.66	a
N_240	21370.97	ab
N_210	20862.50	b
N_180	20203.43	c
N_150	19394.88	d
N_120	18544.24	e
N_090	17600.34	f
N_060	16676.36	g
N_030	15654.97	h
N_000	14615.14	i

[1] "----rcp\_45\_ht\_55----"

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N_270	23384.10	a
N_240	22773.66	b
N_210	22116.62	c
N_180	21403.62	d
N_150	20645.29	e
N_120	19813.41	f
N_090	18831.93	g
N_060	17731.86	h
N_030	16510.23	i
N_000	15284.19	j

[1] "----rcp\_45\_ht\_85----"

```

[1] "-- SNK by NFrac --"
      tmp[, ii] groups
N_270 23371.85      a
N_240 22619.14      b
N_210 21820.98      c
N_180 20942.52      d
N_150 20020.33      e
N_120 19100.54      f
N_090 18042.47      g
N_060 16867.56      h
N_030 15677.46      i
N_000 14534.82      j
[1] "----rcp_85_ht_55----"
[1] "-- SNK by NFrac --"
      tmp[, ii] groups
N_270 24616.98      a
N_240 23965.22      b
N_210 23226.05      c
N_180 22301.90      d
N_150 21276.81      e
N_120 20201.39      f
N_090 18989.35      g
N_060 17742.28      h
N_030 16459.49      i
N_000 15232.08      j
[1] "----rcp_85_ht_85----"
[1] "-- SNK by NFrac --"
      tmp[, ii] groups
N_270 24746.70      a
N_240 23900.63      b
N_210 22901.08      c
N_180 21824.63      d
N_150 20667.92      e
N_120 19472.09      f
N_090 18256.50      g
N_060 17053.34      h
N_030 15913.38      i
N_000 14885.14      j

```

## R Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK du rendement

[1] "===Rendement==="

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	9	22875	2541.6	1486.460	< 2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	1034	258.4	151.120	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	4606	511.8	299.328	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	36	416	11.5	6.753	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$Soil	81	280	3.5	2.022	1.69e-07 ***
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	666	18.5	10.815	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	324	35	0.1	0.063	1
Residuals	14000	23938	1.7		

---

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

[1] " "

[1] "=====

[1] "===Rendement==="

[1] "=====

[1] "---- rcp\_00\_ht\_00----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	3032	336.9	146.597	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	345	38.4	16.693	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	58	0.7	0.311	1
Residuals	2800	6435	2.3		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_55----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	3762	418.0	290.745	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	675	75.0	52.152	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	69	0.9	0.593	0.999
Residuals	2800	4025	1.4		

---

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

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_85----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	9	4735	526.1	273.15	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	942	104.7	54.36	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	81	62	0.8	0.40	1

```

Residuals          2800    5393      1.9
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_55----"
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      9   5364   595.9 419.880 <2e-16 ***
tmp$Soil       9   1042   115.8  81.566 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81     73     0.9   0.635  0.995
Residuals     2800   3974     1.4
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_85----"
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      9   6398   710.9 484.219 <2e-16 ***
tmp$Soil       9   2268   252.0 171.626 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 81     53     0.6   0.442     1
Residuals     2800   4111     1.5
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
[1] " "
[1] "====="
[1] "====Rendement===="
[1] "====="
[1] "----rcp_00_ht_00----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270  9.707085      a
N_240  9.518374     ab
N_210  9.287106      b
N_180  9.009824      c
N_150  8.666253      d
N_120  8.299982      e
N_090  7.885461      f
N_060  7.483687      g
N_030  7.039256      h
N_000  6.575414      i
[1] "----rcp_45_ht_55----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 10.424825      a

```

```

N_240 10.137964      b
N_210  9.829139      c
N_180  9.502633      d
N_150  9.170431      e
N_120  8.811751      f
N_090  8.396539      g
N_060  7.916881      h
N_030  7.380525      i
N_000  6.823015      j
[1] "---rcp_45_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 10.465721      a
N_240 10.129851      b
N_210  9.779350      c
N_180  9.403338      d
N_150  8.993664      e
N_120  8.578630      f
N_090  8.109160      g
N_060  7.578325      h
N_030  7.017312      i
N_000  6.466528      j
[1] "---rcp_85_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 11.007076      a
N_240 10.705016      b
N_210 10.357280      c
N_180  9.940063      d
N_150  9.489862      e
N_120  9.018633      f
N_090  8.495784      g
N_060  7.943262      h
N_030  7.375583      i
N_000  6.827853      j
[1] "---rcp_85_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_270 11.170429      a
N_240 10.774411      b
N_210 10.313392      c
N_180  9.818737      d

```

```

N_150  9.293609    e
N_120  8.751585    f
N_090  8.200976    g
N_060  7.648839    h
N_030  7.116089    i
N_000  6.621871    j

```

## S Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de l'efficacité agronomique d'utilisation des nutriments

```
[1] "===NUEag==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	8	14823	1853	47.587	< 2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	24617	6154	158.060	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	25948	2883	74.048	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	32	5748	180	4.614	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$Soil	72	1542	21	0.550	0.999
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	4714	131	3.363	4.55e-11 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	288	1647	6	0.147	1.000
Residuals	12600	490590	39		

```
---
```

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

```
1450 observations effacées parce que manquantes
```

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "===NUEag==="
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "---- rcp_00_ht_00----"
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	3921	490.1	7.073	2.79e-09 ***
tmp\$Soil	9	4001	444.6	6.416	4.68e-09 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	435	6.0	0.087	1
Residuals	2520	174598	69.3		

```
---
```

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

```
290 observations effacées parce que manquantes
```

```
[1] " "
```

```
[1] "---- rcp_45_ht_55----"
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	8730	1091.3	31.727	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	9860	1095.5	31.850	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	340	4.7	0.137	1

```

Residuals          2520  86680   34.4
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
290 observations effacées parce que manquantes
[1] " "
[1] "---- rcp_45_ht_85----"
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      8   4564   570.5  17.660 <2e-16 ***
tmp$Soil       9   7894   877.2  27.153 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 72    445     6.2   0.191      1
Residuals     2520  81406   32.3
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
290 observations effacées parce que manquantes
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_55----"
      Df Sum Sq Mean Sq F value  Pr(>F)
tmp$NFrac      8   2861   357.6  11.609 2.52e-16 ***
tmp$Soil       9   3892   432.5  14.039 < 2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 72   1027    14.3   0.463      1
Residuals     2520  77628   30.8
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
290 observations effacées parce que manquantes
[1] " "
[1] "---- rcp_85_ht_85----"
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tmp$NFrac      8    495    61.9   2.220 0.0234 *
tmp$Soil       9   5014   557.1  19.978 <2e-16 ***
tmp$NFrac:tmp$Soil 72    942    13.1   0.469 1.0000
Residuals     2520  70277   27.9
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
290 observations effacées parce que manquantes
[1] " "
[1] "======"
[1] "===NUEag==="
[1] "======"
[1] "----rcp_00_ht_00----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_030 15.46141      a

```

```

N_060  15.13789    a
N_090  14.55608    ab
N_120  14.37141    ab
N_150  13.93893    abc
N_180  13.52450    abc
N_210  12.91282    bcd
N_240  12.26233    cd
N_270  11.59878    d
[1] "---rcp_45_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_030  18.58366    a
N_060  18.23109    a
N_090  17.48360    ab
N_120  16.57280    bc
N_150  15.64944    cd
N_180  14.88677    de
N_210  14.31488    ef
N_240  13.81229    ef
N_270  13.34004    f
[1] "---rcp_45_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_060  18.52994    a
N_030  18.35945    a
N_090  18.25146    a
N_120  17.60084    ab
N_150  16.84757    bc
N_180  16.31561    cd
N_210  15.77534    cde
N_240  15.26385    de
N_270  14.81182    e
[1] "---rcp_85_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_060  18.59016    a
N_090  18.53257    a
N_030  18.25767    a
N_120  18.25650    a
N_150  17.74673    ab
N_180  17.29006    ab
N_210  16.80680    bc

```

```

N_240  16.15485    cd
N_270  15.47861    d
[1] "---rcp_85_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_150  17.81158    a
N_180  17.76036    a
N_120  17.74761    a
N_210  17.57867    a
N_090  17.54561    a
N_240  17.30225    a
N_060  17.11612    a
N_270  16.84651    a
N_030  16.47392    a

```

## T Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK de l'ef- ficiency physiologique d'utilisation des nutriments

```
[1] "===NUEphys==="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$NFrac	8	39669	4959	45.458	< 2e-16 ***
data\$RCP_HT	4	19214	4804	44.037	< 2e-16 ***
data\$Soil	9	32711	3635	33.320	< 2e-16 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	32	10476	327	3.001	2.78e-08 ***
data\$NFrac:data\$Soil	72	4071	57	0.518	1
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	10343	287	2.634	3.69e-07 ***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	288	5844	20	0.186	1
Residuals	12600	1374418	109		

```
---
```

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

1450 observations effacées parce que manquantes

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "===NUEphys==="
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "--- rcp_00_ht_00---"
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	7101	887.6	5.069	2.85e-06 ***
tmp\$Soil	9	8015	890.6	5.086	7.71e-07 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	2137	29.7	0.170	1
Residuals	2520	441307	175.1		

```
---
```

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

290 observations effacées parce que manquantes

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_55----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	19747	2468.3	26.890	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	14761	1640.1	17.868	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	1018	14.1	0.154	1
Residuals	2520	231315	91.8		

---

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

290 observations effacées parce que manquantes

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_85----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	13177	1647.1	18.958	<2e-16 ***
tmp\$Soil	9	11148	1238.7	14.258	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	1044	14.5	0.167	1
Residuals	2520	218935	86.9		

---

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

290 observations effacées parce que manquantes

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_55----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	8957	1119.7	13.208	< 2e-16 ***
tmp\$Soil	9	3642	404.6	4.773	2.49e-06 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	2915	40.5	0.478	1
Residuals	2520	213629	84.8		

---

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

290 observations effacées parce que manquantes

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_85----"

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	1164	145.5	1.362	0.208
tmp\$Soil	9	5488	609.7	5.707	7.24e-08 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	2801	38.9	0.364	1.000
Residuals	2520	269232	106.8		

---

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

290 observations effacées parce que manquantes

```

[1] " "
[1] "=====
[1] "===NUEphys==="
[1] "=====
[1] "---rcp_00_ht_00---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_060  31.63714      a
N_030  31.57869      a
N_090  30.94258      a
N_120  30.77961      a
N_150  30.19129     ab
N_180  29.63771     ab
N_210  28.59395     abc
N_240  27.64130     bc
N_270  26.73200      c
[1] "---rcp_45_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_030  34.97566      a
N_060  34.61101      a
N_090  33.60653     ab
N_120  32.27253     bc
N_150  30.80749     cd
N_180  29.58948     de
N_210  28.73811     ef
N_240  27.93762     ef
N_270  27.20870      f
[1] "---rcp_45_ht_85---"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_060  35.59019      a
N_030  35.36155      a
N_090  34.88337      a
N_120  33.76610     ab
N_150  32.39116     bc
N_180  31.56838     cd
N_210  30.74525     cde
N_240  29.94119     de
N_270  29.33167      e
[1] "---rcp_85_ht_55---"
[1] "- SNK by NFrac -"

```

```

      tmp[, ii] groups
N_060 34.93248      a
N_090 34.74969      a
N_030 34.55056      a
N_120 34.26614     ab
N_150 33.39374     abc
N_180 32.55839     bc
N_210 31.68913     cd
N_240 30.57264     de
N_270 29.50846     e

```

```
[1] "----rcp_85_ht_85----"
```

```
[1] "- SNK by NFrac -"
```

```

      tmp[, ii] groups
N_120 33.38325      a
N_150 33.33168      a
N_090 33.26837      a
N_180 33.10549      a
N_060 32.68185      a
N_210 32.67213      a
N_240 32.15619      a
N_030 31.87575      a
N_270 31.39440      a

```

## U Résultats de l'analyse de la variance et du test SNK du coefficient apparent d'utilisation

```
[1] "====CAU===="
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
data\$NFrac	8	0.30	0.0379	2.617	0.00734	**
data\$RCP_HT	4	10.51	2.6280	181.645	< 2e-16	***
data\$Soil	9	8.51	0.9457	65.366	< 2e-16	***
data\$NFrac:data\$RCP_HT	32	0.85	0.0264	1.826	0.00297	**
data\$NFrac:data\$Soil	72	0.17	0.0023	0.159	1.00000	
data\$RCP_HT:data\$Soil	36	1.44	0.0400	2.766	7.71e-08	***
data\$NFrac:data\$RCP_HT:data\$Soil	288	0.11	0.0004	0.027	1.00000	
Residuals	12600	182.30	0.0145			

```
---
```

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

```
1450 observations effacées parce que manquantes
```

```
[1] " "
```

```
[1] "=====
```

```
[1] "====CAU===="
```

[1] "=====

[1] "---- rcp\_00\_ht\_00----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	0.57	0.07115	2.158	0.0279 *
tmp\$Soil	9	1.63	0.18072	5.481	1.72e-07 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	0.03	0.00035	0.011	1.0000
Residuals	2520	83.09	0.03297		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
290 observations effacées parce que manquantes

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_55----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	0.45	0.05594	4.024	9.23e-05 ***
tmp\$Soil	9	2.42	0.26942	19.380	< 2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	0.03	0.00047	0.034	1
Residuals	2520	35.03	0.01390		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
290 observations effacées parce que manquantes

[1] " "

[1] "---- rcp\_45\_ht\_85----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	0.020	0.00256	0.259	0.979
tmp\$Soil	9	1.950	0.21661	21.880	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	0.085	0.00118	0.119	1.000
Residuals	2520	24.949	0.00990		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
290 observations effacées parce que manquantes

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_55----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	0.006	0.00079	0.092	0.999
tmp\$Soil	9	2.017	0.22411	26.069	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	0.068	0.00094	0.110	1.000
Residuals	2520	21.664	0.00860		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
290 observations effacées parce que manquantes

[1] " "

[1] "---- rcp\_85\_ht\_85----

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tmp\$NFrac	8	0.105	0.01313	1.883	0.0584 .
tmp\$Soil	9	1.935	0.21495	30.842	<2e-16 ***
tmp\$NFrac:tmp\$Soil	72	0.069	0.00096	0.137	1.0000
Residuals	2520	17.563	0.00697		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
 290 observations effacées parce que manquantes

[1] " "

[1] "=====

[1] "===CAU===

[1] "=====

[1] "----rcp\_00\_ht\_00----"

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N\_030 0.4817014 a

N\_060 0.4766782 a

N\_090 0.4682758 a

N\_120 0.4625420 a

N\_150 0.4570847 a

N\_180 0.4519807 a

N\_210 0.4478179 a

N\_240 0.4417117 a

N\_270 0.4351989 a

[1] "----rcp\_45\_ht\_55----"

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N\_030 0.5280519 a

N\_060 0.5261303 a

N\_090 0.5215968 ab

N\_120 0.5156752 abc

N\_150 0.5107947 abc

N\_180 0.5056639 abc

N\_210 0.4998152 abc

N\_240 0.4951569 bc

N\_270 0.4888531 c

[1] "----rcp\_45\_ht\_85----"

[1] "- SNK by NFrac -"

tmp[, ii] groups

N\_090 0.5214415 a

N\_150 0.5203856 a

N\_120 0.5201088 a

```

N_180 0.5196233      a
N_060 0.5191477      a
N_210 0.5175436      a
N_030 0.5161817      a
N_240 0.5154754      a
N_270 0.5120973      a
[1] "----rcp_85_ht_55----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_120 0.5342703      a
N_090 0.5339969      a
N_150 0.5335114      a
N_210 0.5333372      a
N_180 0.5331962      a
N_240 0.5319850      a
N_060 0.5313951      a
N_030 0.5308851      a
N_270 0.5293124      a
[1] "----rcp_85_ht_85----"
[1] "- SNK by NFrac -"
      tmp[, ii] groups
N_240 0.5448642      a
N_270 0.5444612      a
N_210 0.5440063      a
N_180 0.5419301      a
N_150 0.5395386      a
N_120 0.5368803      a
N_090 0.5324791      a
N_060 0.5287956      a
N_030 0.5278486      a

```