

Faculté des bioingénieurs

Potentiel agronomique du sorgho en Région wallonne face aux enjeux des changements climatiques impactant la culture du maïs fourrager

Auteur : Caroline Pierret

Promoteurs : Professeur Pierre Bertin (UCL/ELI/ELIA)

Monsieur Guy Foucart (CIPF)

Lecteurs : Professeur Xavier Draye (UCL/ELI/ELIA)

Monsieur Gilles Manssens (CIPF)

Année académique 2021-2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
bioingénieur : sciences agronomiques

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée dans la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je voudrais remercier mes deux promoteurs qui m'ont encadrée depuis le mois de mars 2021 jusqu'à aujourd'hui. Je remercie le Professeur Pierre Bertin pour ses remarques pertinentes et ses relectures. Je remercie également Monsieur Guy Foucart pour ses conseils pratiques et son regard toujours positif.

Je voudrais ensuite remercier tous les membres du personnel du CIPF qui m'ont aidée de près ou de loin dans ce travail. Merci particulièrement à Monsieur Thomas Lacroix pour son aide et sa patience lors des longues journées sur le terrain. Merci également à Monsieur Fabien Renard et à Monsieur Jean-François Oost pour leurs conseils.

Je voudrais remercier mes deux lecteurs, Monsieur Gilles Manssens et le Professeur Xavier Draye qui ont gentiment accepté de rejoindre l'aventure. Je remercie grandement ce dernier pour sa disponibilité, sa bonne humeur et ses nombreux conseils pour les analyses statistiques.

Merci à Monsieur Pierre Van Thor pour son aide sur le terrain et merci à Monsieur Marc de Toffoli pour ses conseils sur le bilan d'azote.

Je remercie ma famille pour son soutien et plus particulièrement mon papa et ma marraine pour leurs relectures.

Enfin, je voudrais remercier Martin, mes colocataires et mes amis pour leur soutien pendant toute cette période et pour les moments de détente qui m'ont fait beaucoup de bien.

Table des matières

Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des équations.....	X
Liste des abréviations.....	XI
Introduction.....	1
Première partie : Etat de l'art.....	2
1. Changements climatiques dans le monde.....	2
1.1. Rapports du GIEC.....	2
1.2. Vers un sixième rapport du GIEC	2
1.3. Répartition, intensité et fréquence des changements climatiques.....	3
2. Changements climatiques en Belgique.....	5
2.1. Changements climatiques belges déjà observés	5
2.2. Perspectives pour 2100 en Belgique	5
3. Le maïs	6
3.1. Origine et importance économique	6
3.2. Besoins environnementaux.....	6
3.3. Semis	6
3.4. Croissance	7
3.5. Problèmes rencontrés et sélection variétale	7
3.6. Récolte.....	8
3.7. Usages multiples	9
4. Le sorgho.....	9
4.1. Caractéristiques et origine	9
4.2. Besoins environnementaux.....	10
4.2.1. La température	10
4.2.2. La longueur du jour	10
4.2.3. L'eau.....	10
4.2.4. Les éléments minéraux	11
4.3. L'importance économique	11
4.4. Les variétés.....	13

4.5.	Morphologie.....	14
4.6.	Physiologie	15
4.6.1.	Phase végétative	15
4.6.2.	Phase de formation des organes reproducteurs	15
4.6.3.	Phase de remplissage et de maturation	16
4.7.	Techniques culturales en zone tempérée	17
4.7.1.	Préparation du sol.....	17
4.7.2.	Semis	17
4.7.3.	Fertilisation	17
4.7.4.	Désherbage	17
4.7.5.	Récolte	17
4.8.	Maladies et ravageurs	18
4.9.	Usages multiples	18
4.9.1.	L'alimentation humaine	18
4.9.2.	L'alimentation animale	18
4.9.3.	L'agro-énergie	19
4.10.	Les enjeux d'amélioration	21
5.	Comparaison entre le maïs et le sorgho	22
6.	CIPF	24
7.	Conditions météorologiques belges pour la saison 2021.....	25
8.	Objectifs.....	27
	Deuxième partie : Matériels et méthodes.....	28
1.	Matériel végétal	28
1.1.	Variétés de sorgho	28
1.2.	Variétés de maïs	28
2.	Dates de semis	29
2.1.	Comparaison 1	30
2.2.	Comparaison 2	30
3.	Les sites	31
3.1.	Vieusart	31
3.2.	Chaumont.....	32

4. Plan expérimental	32
5. Itinéraire phytotechnique	33
5.1. Travail du sol	33
5.2. Fertilisation.....	34
5.3. Semis	34
5.4. Désherbage	34
5.5. Récolte.....	34
6. Mesures	35
6.1. Mesures du sol	35
6.1.1. Analyse granulométrique et chimique de sol	35
6.1.2. Analyse de l'azote	35
6.2. Mesures sur la plante	35
6.2.1. Pourcentage de levée	35
6.2.2. Teneur en chlorophylle	36
6.2.3. Surface foliaire	38
6.2.4. Nombre de talles.....	39
6.2.5. Hauteur des plantes	39
6.2.6. Pourcentage de verse	39
6.2.7. Mesures sur les racines des plantes	40
6.2.8. Contrôle qualité	41
7. Bilan d'azote et efficience de l'utilisation de l'azote	42
8. Analyses statistiques.....	43
8.1. Moyenne, écart-types et erreur standard	43
8.2. Analyse de la variance	44
8.3. Modèle RCBD mixte hiérarchisé.....	45
Troisième partie : Résultats.....	46
1. Effet du génotype et du site sur le pourcentage de levée des plantes	46
2. Effet de la position de la mesure sur la plante par rapport à la teneur en chlorophylle 47	
3. Effet du génotype sur l'indice lié à la teneur en chlorophylle de la plante sur la position	
1, au centre du limbe du milieu de la feuille la plus développée.....	49

4.	Effet du génotype et du site sur la surface foliaire totale de la plante	50
5.	Effet du génotype et du site sur la hauteur des plantes	51
6.	Effet du génotype et du site sur le nombre de talles moyen de sorgho	52
7.	Effet du génotype sur le pourcentage de verse à la récolte.....	53
8.	Effet du génotype et du site sur les performances fourragères des plantes	54
8.1.	Effet du génotype et du site sur le rendement en matière sèche	54
8.2.	Effet du génotype et du site sur le pourcentage de matière sèche de la plante.....	55
8.3.	Effet du génotype et du site sur la teneur en amidon dans la plante	56
8.4.	Effet du génotype et du site sur la teneur en cellulose dans la plante	57
8.5.	Effet du génotype et du site sur la teneur en matières totales protéiques de la plante	57
8.6.	Effet du génotype et du site sur la valeur énergétique de la plante	58
9.	Effet du génotype et du site sur le système racinaire	59
9.1.	Effet du génotype et du site sur le nombre de racines à différentes profondeurs ..	59
9.1.1.	De 0 à 30 cm de profondeur	59
9.1.2.	De 30 à 60 cm de profondeur	60
9.1.3.	De 60 à 90 cm de profondeur	61
9.2.	Effet du génotype et du site sur le poids sec des racines à différentes profondeurs	62
9.2.1.	De 0 à 30 cm de profondeur	62
10.	Efficienc de l'utilisation de l'azote	63
11.	Azote exporté par la plante	63
12.	Bilan d'azote.....	64
Quatrième partie : Discussion.....		65
1.	Effet du génotype et du site sur le pourcentage de levée des plantes.....	65
2.	Effet du génotype, du site et de la position de mesure sur l'indice lié à la teneur en chlorophylle de la plante.....	66
3.	Effet du génotype et du site sur la surface foliaire totale de la plante.....	68
4.	Effet du génotype et du site sur la hauteur des plantes.....	68
5.	Effet du génotype et du site sur le nombre de talles moyen de sorgho.....	69

6.	Effet du génotype sur le pourcentage de verse à la récolte.....	70
7.	Effet du génotype et du site sur les performances fourragères des plantes.....	71
7.1.	Effet du génotype et du site sur le rendement en matière sèche.....	71
7.2.	Effet du génotype et du site sur le pourcentage de matière sèche de la plante.....	72
7.3.	Effet du génotype et du site sur la teneur en amidon dans la plante.....	74
7.4.	Effet du génotype et du site sur la teneur en cellulose dans la plante	74
7.5.	Effet du génotype et du site sur la teneur en matières totales protéiques de la plante.....	75
7.6.	Effet du génotype et du site sur la valeur énergétique de la plante.....	75
8.	Effet du génotype et du site sur le système racinaire.....	76
9.	Analyses liées à l'azote.....	77
10.	Limites et amélioration du travail.....	78
	Conclusion.....	79
	Bibliographie.....	81
	Annexes.....	87

Liste des figures

Figure 1 : Répartition et évolution des évènements climatiques extrêmes dans le monde depuis 1950 (GIEC, 2021).....	4
Figure 2 : Déficit hydrique du maïs grain pendant la saison culturale en Europe (Serra-Wittling et al., 2020)	8
Figure 3 : Carte mondiale de la production moyenne de sorgho de 2016 à 2020 (USDA, 2021)	12
Figure 4 : Augmentation de la production de sorgho en Europe de 2007 à 2021 (Sorghum-ID, 2021)	12
Figure 5 : Morphologie du sorgho (Lafarge, 1988)	14
Figure 6 : Le cycle du sorgho	16
Figure 7 : Schéma des multiples usages du sorgho	21
Figure 8 : Bilan (Précipitations - ETP) 2020-2021 et bilan (Précipitations - ETP) normal en mm, par décade du 1er mars au 31 août 2021 au poste climatologique d'Ernage-Gembloux (IRM).	26
Figure 9 : Panicules et épis des variétés de sorgho et de maïs utilisées dans nos essais.....	29
Figure 10 : Dates de semis des différentes variétés et comparaisons réalisées	30
Figure 11 : Image satellite, localisation du site de Vieusart	31
Figure 12 : Analyse de la texture du sol de Vieusart, triangle granulométrique.....	31
Figure 13 : Analyse de la texture du sol de Chaumont, triangle granulométrique	32
Figure 14 : Image satellite, localisation du site de Chaumont.....	32
Figure 15 : Plan expérimental d'un site de 36m sur 37m avec 4 répétitions (A,B,C,D), 6 génotypes (1,2,3,4,5,6), une zone de récolte (jaune) et une zone de prélèvement (orange)	33
Figure 16 : Parcelle à Chaumont le 19 juin 2021	35
Figure 17 : Chlorophyllomètre CCM200plus.....	36
Figure 18 : Relation entre l'indice lié à la teneur en chlorophylle et la concentration en chlorophylle dans les feuilles des sorghos et maïs	36
Figure 19 : Les différentes positions des mesures préliminaires liées à la chlorophylle.....	37
Figure 20 : Scanneur LI-3100c Area Meter (LI-COR)	38
Figure 21 : Pied de sorgho à 4 talles (la tige principale + 4 talles).....	39
Figure 22 : Verse de la variété de sorgho RGT AMIGGO à Vieusart le 9/10/2021	39
Figure 23 : Echantillon d'une carotte de terre avec une racine de maïs	40
Figure 24 : Echantillonnage des carottes de terre sur le terrain, tarière à l'horizontale.	40
Figure 25 : Pourcentage de levée en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, 19/06/2021	46
Figure 26 : Indice lié à la teneur en chlorophylle en fonction de la position de la mesure (de 1 à 6), du site et du génotype de sorgho ou de maïs, 13/08/2021	48
Figure 27 : Indice sur la teneur en chlorophylle en fonction du génotype de sorgho ou de maïs à Vieusart, 9/19/2021	49

Figure 28 : Surface foliaire totale de la plante en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, 2/09/2021.....	50
Figure 29 : Hauteur des plantes à la récolte en fonction du génotype de sorgho ou de maïs à Vieusart, 9/10/2021.....	51
Figure 30 : Nombre moyen de talles en fonction du site et du génotype de sorgho, 27/09/2021	52
Figure 31 : Pourcentage de verse en fonction du génotype de sorgho ou de maïs à Vieusart, 9/10/2021	53
Figure 32 : Rendement en matière sèche à la récolte en fonction en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs.....	54
Figure 33 : Pourcentage de matière sèche de la plante entière à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs	55
Figure 34 : Teneur en amidon de la plante entière à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs.....	56
Figure 35 : Teneur en cellulose de la plante entière à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs.....	57
Figure 36 : Teneur en matières protéiques totales de la plante entière à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs	58
Figure 37 : Valeur énergétique de la plante à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs.....	58
Figure 38 : Nombre de racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm ³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 0-30 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante)	59
Figure 39 : Nombre de racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm ³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 30-60 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante)	60
Figure 40 : Nombre de racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm ³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 60-90 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante)	61
Figure 41 : Poids des racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm ³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 0-30 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante))	62
Figure 42 : Efficience de l'utilisation de l'azote (NUE) en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs.....	63
Figure 43 : Azote exporté par la plante en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs	64
Figure 44 : Bilan d'azote avant et après la culture en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs.....	64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre le sorgho et le maïs	24
Tableau 2 : Les caractéristiques des variétés de sorgho et de maïs retenues pour cette étude	28

Liste des équations

Equation 1 : Ratio de l'indice lié à la teneur en chlorophylle	36
Equation 2 : Le rendement frais (t/ha).....	42
Equation 3 : Efficience agronomique d'utilisation de l'azote - Nitrogen Use Efficiency.....	42
Equation 4 : Bilan d'azote [kg N/ha].....	42
Equation 5 : Bilan d'azote simplifié [kg N/ha].....	43

Liste des abréviations

- BMR = Brown Mid Rib = nervure brune centrale
- CIPF = Centre indépendant de promotion fourragère
- CIRAD = Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
- CRA-W = Centre de recherche agronomique de Wallonie
- FAO = Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
- GES = Gaz à effet de serre
- GIEC = Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- IRM = Institut royal météorologique de Belgique
- MS = Matière sèche
- NUE = Nitrogen use efficiency
- UN = Unité d'azote
- VEM = Voeder eenheid voor melk, unité alimentaire d'une vache laitière

Introduction

En Wallonie, 8 % de la surface utile agricole est occupée par du maïs fourrager et du maïs grain (CIPF, 2021a; SPW, 2017). La culture du maïs possède de nombreuses qualités : elle contient une énergie hautement digestible pour le bétail, elle atteint de bons rendements et est peu sensible aux ravageurs et maladies dans nos régions (Renoux, 2014). Cependant, le maïs a une demande élevée en eau et les sécheresses à répétition liées au réchauffement climatique impactent négativement son rendement. Selon le GIEC, les conditions environnementales seront de plus en plus difficiles pour cette culture (GIEC et al., 2021). Nous nous sommes donc demandée si nous ne pourrions pas nous tourner vers une espèce mieux adaptée à ces nouvelles conditions.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons choisi d'étudier le sorgho, une plante tropicale d'origine africaine plus résistante à la sécheresse et moins exigeante en intrant. L'objectif de ce mémoire est d'expérimenter la culture du sorgho en Région wallonne et d'étudier son potentiel agronomique afin de proposer cette céréale aux agriculteurs comme une alternative rentable au maïs fourrager. Ce travail comporte quatre parties dans le but d'évaluer le rendement et la qualité de la plante sur deux types de sol filtrant de la Région wallonne.

La première partie, « Etat de l'Art », traite différents concepts qui sont nécessaires à la compréhension de l'objectif. Au travers des rapports du GIEC, nous abordons les changements climatiques dans le monde puis en Belgique avant de présenter les deux espèces étudiées : le maïs et le sorgho.

La deuxième partie, « Matériels et méthodes », explique l'expérimentation que nous avons mise en place, les variétés utilisées, les sites étudiés, les mesures prises et les analyses statistiques effectuées sur le logiciel R Studio.

La troisième partie, « Résultats », illustre graphiquement et statistiquement les tendances de nos mesures sur les caractéristiques des plantes et du sol. Nous pouvons distinguer l'effet du site, l'effet de l'espèce et l'effet du génotype sur ces mesures.

La quatrième partie, « Discussion », interprète les résultats obtenus et les compare à la littérature dans le but final de répondre à l'objectif principal dans la conclusion et d'y apporter des perspectives pour l'avenir.

Première partie : Etat de l'art

1. Changements climatiques dans le monde

1.1. Rapports du GIEC

Le GIEC, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, a été créé en 1988 et regroupe 195 pays. Ces experts publient un rapport de synthèse tous les 6-7 ans sur l'évolution des changements climatiques en se basant sur des études scientifiques. Cinq rapports de synthèse ont déjà vu le jour. Le sixième est en cours de rédaction et sera terminé en octobre 2022. Pour y arriver, trois groupes de travail ont publié respectivement les rapports "The Physical Science Basis" ; "Impacts, Adaptation and Vulnerability" ; "Mitigation of Climate Change"(GIEC, 2022b). Le rapport final en fera une synthèse. Il sera ensuite examiné lors du bilan de l'accord de Paris en 2023 et évaluera les 17 objectifs du développement durable mis en place par l'organisation des Nations Unies (GIEC, 2022b). Dans le cadre du présent travail, nous allons nous pencher tout particulièrement sur la partie "Physical Science Basis" (GIEC, 2021).

1.2. Vers un sixième rapport du GIEC

Le rapport du premier groupe de travail du GIEC fait le point sur de nombreuses constatations à propos du climat depuis l'ère industrielle (GIEC, 2021). Pour la première fois dans l'histoire, le GIEC pointe du doigt, sans aucun doute, les activités humaines comme directement responsables des changements climatiques. Avec celles-ci, nous sommes passés d'une concentration dans l'atmosphère de 277 ppm de CO₂ à 412 ppm de CO₂ entre 1750 et 2020. L'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère a de grandes conséquences sur notre environnement (GIEC, 2021).

Cette hausse d'émissions de GES a entraîné des dérèglements climatiques. De 2011 à 2020, la température moyenne de l'atmosphère a augmenté de 1,09°C par rapport à celle entre 1850 et 1900. Les scientifiques ont mis en évidence une relation linéaire entre l'augmentation des GES et l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère. Par augmentation de 1000 Gt de CO₂, l'atmosphère connaît une augmentation moyenne de 0,45°C (GIEC, 2021). Le GIEC a estimé cinq scénarios en fonction des efforts effectués en termes d'émissions de GES. Le premier scénario (SSP1-1.9) respecte l'Accord de Paris avec une augmentation maximale de 1,5°C avant 2100, le deuxième (SSP2-2.6) entre dans l'optique du développement durable, le troisième (SSP3-4.5) est intermédiaire, le quatrième (SSP4-7.0) rencontre des rivalités régionales et le dernier (SSP5-8.5) a un développement principalement basé sur des énergies fossiles (Nations Unies, 2015; Vailles, 2021). A présent, à moins d'arriver immédiatement à d'importantes réductions de CO₂, même le meilleur scénario (SSP1-1.9) n'arrivera pas à rester sous une augmentation moyenne de l'atmosphère de 1,5°C d'ici 2100

(GIEC, 2022a). Rappelons-nous que dans le scénario le plus alarmant (SSP5-8.5), les experts évoquent une augmentation de 5,7°C en moyenne dans l'atmosphère d'ici 2100 (GIEC, 2021).

Le cycle global de l'eau est également perturbé depuis l'ère industrielle. De manière générale, les précipitations moyennes ont augmenté sur les terres depuis 1950, plus particulièrement depuis 1980. En fonction des scénarios relatifs aux émissions des GES, les précipitations moyennes augmenteront en conséquence. Il y en aura davantage au-dessus des hautes latitudes, sur le Pacifique au niveau de l'équateur et sur les régions des moussons alors qu'elles diminueront sur certaines parties subtropicales et sur certaines zones des tropiques (GIEC, 2021).

1.3. Répartition, intensité et fréquence des changements climatiques

Le GIEC a étudié l'évolution des événements climatiques extrêmes depuis l'ère industrielle : les fortes températures, les fortes précipitations et les sécheresses liées à l'agriculture et à l'écologie. (Figure 1) (GIEC, 2021).

La fréquence de ces trois phénomènes a augmenté depuis 1950 à travers le monde (GIEC, 2021). La certitude de l'affirmation varie de faible à élevée (Figure 1).

Les événements avec de fortes chaleurs ont été calculés en fonction des températures maximales quotidiennes, de la durée, de la fréquence et de l'intensité de l'évènement. Les experts remarquent une augmentation dans pratiquement toutes les régions du monde (Figure 1).

Les fortes précipitations ont pu être mesurées en fonction de la quantité d'eau tombée sur un jour et cinq jours. Ces précipitations intenses ont augmenté dans le nord de l'Europe, en Asie, dans le nord-est de l'Amérique et dans le sud-ouest de l'Afrique. Les scientifiques ne possédaient pas assez de données pour analyser la majorité des autres régions (Figure 1).

Les épisodes de sécheresse ont augmenté surtout en Afrique de l'Ouest et dans le sud de l'Europe autour de la Méditerranée (Figure 1).

Le GIEC remarque une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes depuis 1850 (GIEC, 2021). En plus des cinq scénarios, quatre niveaux de réchauffement global sont présentés : un réchauffement moyen de l'atmosphère de 1°C, de 1,5°C, de 2°C ou de 4°C. En fonction de cette différence de températures, les variations de la fréquence et de l'intensité de ces événements évoluent. Pendant la période de 1850 à 1900, il y avait en moyenne un seul épisode avec des températures extrêmes. Si nous prenons, par exemple, le scénario qui ajoute 4°C à la température moyenne de 1850-1900, nous aurons 39,2 fois plus fréquemment des températures extrêmes.

Climate change is already affecting every inhabited region across the globe, with human influence contributing to many observed changes in weather and climate extremes

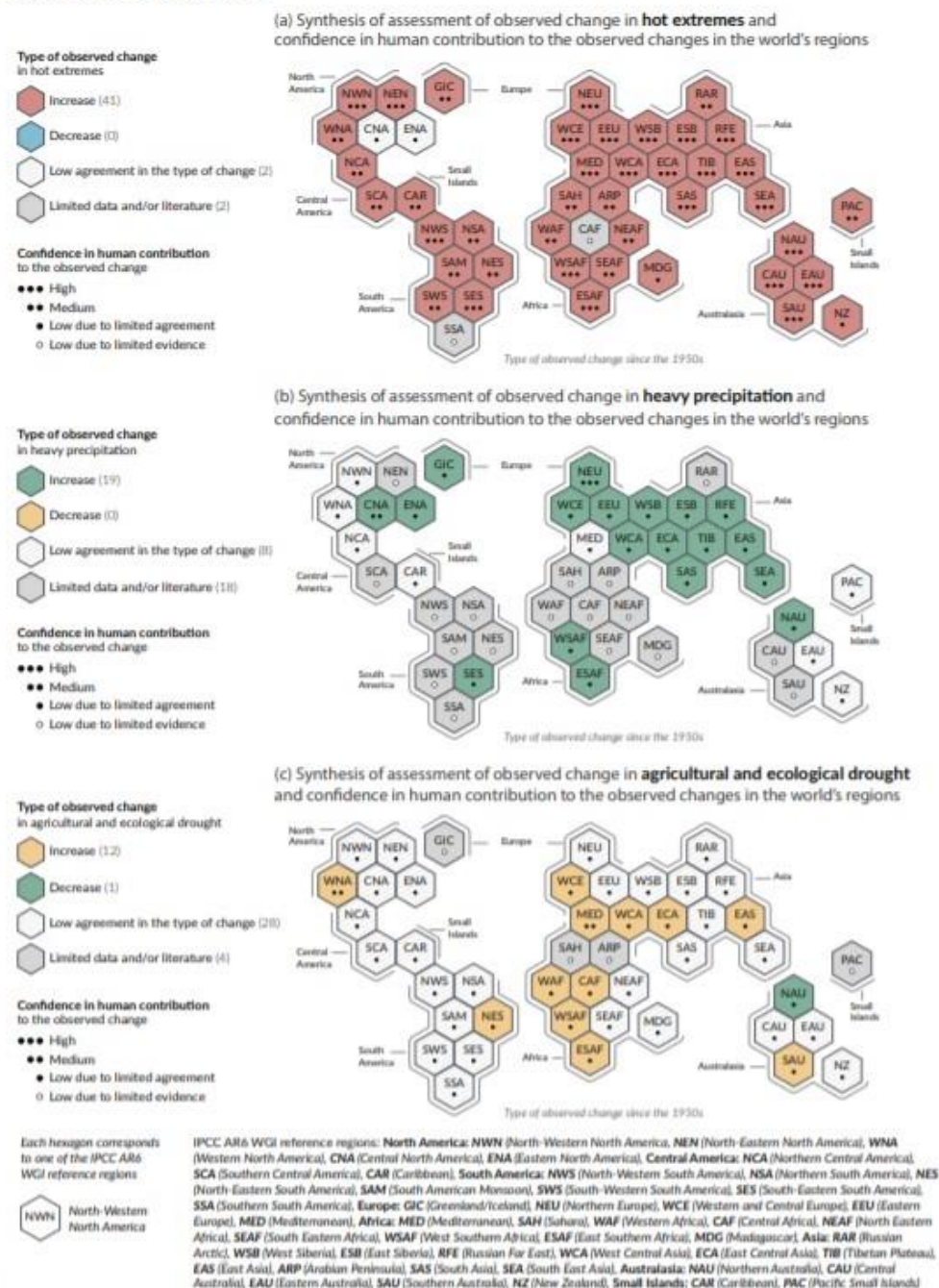


Figure 1 : Répartition et évolution des évènements climatiques extrêmes dans le monde depuis 1950 (GIEC, 2021)

2. Changements climatiques en Belgique

2.1. Changements climatiques belges déjà observés

Les changements climatiques touchent aussi la Belgique. Différents paramètres ont été perturbés depuis l'ère industrielle.

La température moyenne belge a augmenté de 1,9°C depuis 1890 selon l'Institut royal météorologique de Belgique (IRM) et nous observons un réchauffement par décennie compris entre 0,27°C et 0,33°C. Les vingt années les plus chaudes à Uccle ont été recensées après 1988 ; ce qui confirme cette tendance. Ce phénomène s'observe particulièrement en hiver même si l'IRM remarque qu'il y a deux nouveaux jours d'été (>25°C) accompagnés d'un jour de chaleur (>30°C) en plus par décennie. Les vagues de chaleurs sont de plus en plus présentes ces dernières années. Leur fréquence est plus élevée, leur durée est plus longue et leur intensité plus forte. Il y a au moins une vague de chaleur chaque année depuis 2015 et celle-ci s'allonge de deux jours avec une augmentation de 1°C par décennie (SPF, 2021).

Les précipitations sont également perturbées depuis les années 1990. La quantité de précipitations a augmenté de 9 % et leur fréquence a augmenté légèrement. Mais en 2020, nous avons assisté à une année particulièrement sèche avec seulement 731,9 mm de précipitations à Uccle à la place d'une moyenne de 852,4 mm ces cinquante dernières années. L'année 2021 a été très humide avec des inondations estivales (SPF, 2021).

2.2. Perspectives pour 2100 en Belgique

D'ici 2100, différents scénarios tentent de simuler les conditions climatiques de la Belgique. Tous les modèles s'accordent sur un réchauffement moyen compris entre 0,7°C et 5°C en fonction des efforts liés à la réduction des émissions de GES. Les hivers seraient plus doux et le nombre de vagues de chaleur en été augmenterait ainsi que leur intensité et leur durée. Nous pourrions connaître une homogénéisation des différences de températures entre les régions belges. En moyenne, les précipitations se renforceraient avec des hivers plus pluvieux et des étés semblables aux précédents ou sensiblement plus secs. Il est intéressant de noter que les événements météorologiques plus extrêmes seraient de plus en plus fréquents (tempêtes, inondations, sécheresses et vagues de chaleur) (IRM, 2022).

Il faut maintenant apprendre à vivre avec les changements climatiques et s'adapter au mieux aux nouvelles contraintes. Il faut adapter nos pratiques en agriculture en trouvant, par exemple, des alternatives à la culture du maïs, grande consommatrice d'eau.

3. Le maïs

3.1. Origine et importance économique

Le maïs est une céréale de la famille des graminées (Poacées) et de l'espèce *Zea mays subsp. mays*. Cette plante monocotylée vient à l'origine d'Amérique centrale où le climat est tropical. En 1492, les conquistadors espagnols ont importé le maïs en Europe et sa culture s'est répandue un peu partout dans le monde (FAO, 1993). A partir de 1950, la production européenne est devenue importante grâce à la sélection variétale et grâce aux meilleures connaissances sur le maïs. Les producteurs ont augmenté les surfaces cultivées en même temps que leurs rendements (Renoux, 2014). En 2020, 50.1 % de la production se situait en Amérique, 31.4 % en Asie, 10.7 % en Europe et 7.8 % en Afrique. La production mondiale s'évaluait à 1 162 352 997 tonnes de maïs grain selon la FAO. Au fur et à mesure des années, cette production a dépassé celle du riz et du blé pour devenir la première céréale produite et consommée au monde (FAOSTAT, 2020). En Wallonie, 60 000 ha sont dédiés aux cultures de maïs fourrager et de maïs grain ce qui équivaut à 8 % de la surface utile agricole (CIPF, 2021a; SPW, 2017).

3.2. Besoins environnementaux

Etant à l'origine une plante tropicale, son implantation en Europe a dû tenir compte de certaines exigences. La somme des températures accumulées pendant la période de culture est plus faible que celle en Amérique (continent d'origine) ; ce qui implique que le maïs ne parvient pas à terminer son cycle dans nos régions. L'idéal serait de semer tôt et de récolter tard mais la sensibilité du maïs aux basses températures printanières et les risques de moisissure en automne réduisent la période de développement. Le maïs est intolérant au gel et des dégâts peuvent déjà s'observer en dessous de 10°C (chlorose, stérilité pollinique, avortement des épillets) (Bertin, 2020; Bureau de la biosécurité végétale, 1994). Il est également exigeant en eau. Sa culture suscite différentes interrogations face aux changements climatiques et aux possibles pénuries d'eau liées aux sécheresses estivales. Cependant, le maïs reste une céréale intéressante. De fait, sa culture nécessite peu de traitements phytosanitaires, ses rendements sont élevés, elle a une bonne réponse à la fertilisation, et elle contient une énergie hautement digestible pour le bétail (Renoux, 2014). De plus, étant en tête de rotation, le maïs reçoit de grandes quantités d'azote pour sa fertilisation. Il est important de mesurer ses besoins réels afin d'éviter la perte des nitrates par lessivage et de favoriser les apports organiques (CIPF, 2021a).

3.3. Semis

En Belgique, les semis sont tardifs (15 avril – 15 mai) afin d'obtenir des températures suffisantes pour la germination. La graine est placée à une profondeur de +/- 5 cm en fonction de sa qualité et de la date du semis. Il faut optimiser la régularité de la profondeur pour que

le développement des plantes soit similaire sur toute la parcelle. On estime en moyenne une perte de rendement de 100 kg de matière sèche (MS) par hectare et par jour de retard après la date optimale car on réduit la période de croissance. Cependant, un retard est préféré à un semis trop précoce avec des températures trop fraîches (CIPF, 1989). La densité de semis varie entre 90 000 et 100 000 graines/ha pour le maïs ensilage et 80 000-90 000 graines/ha pour le maïs grain (CIPF, 2021a). En cas de pertes à la levée, l'impact sur le rendement est direct car les plantes restantes n'ont pas l'habitude de taller pour combler l'espace libéré. Il est important d'optimiser la levée. L'écartement de 75-80 cm entre les rangs laisse le sol à découvert et implique des risques d'érosion tant que le feuillage ne ferme pas les rangs.

3.4. Croissance

Dès le début du développement, la croissance est explosive grâce aux nombreuses réserves dans la graine. Son taux de croissance peut atteindre jusqu'à 520 kg/(ha*j) pour le système aérien dans nos régions (Meister, 2019). Les réserves accumulées dans la tige vont ensuite être transloquées dans la graine pour former un épi par plante en moyenne. La plante peut atteindre jusqu'à 3 m dans nos régions et ses racines peuvent s'enfoncer jusqu'à 1,2 m de profondeur.

3.5. Problèmes rencontrés et sélection variétale

Bien que le maïs nécessite peu de produits phytosanitaires et que l'application d'un seul herbicide est généralement suffisante, il rencontre tout de même des attaques de ravageurs. Dans nos régions, des attaques de chrysomèles, oscinies, corvidés, noctuelles, limaces, pucerons, taupins, pyrales, mouches des semis, blaireaux et sangliers sont possibles. Cette céréale peut également être atteinte par quelques maladies : le charbon commun, la fusariose, l'helminthosporiose, la kabatiellose et la rouille (Bureau de la biosécurité végétale, 1994; CIPF, 2021a).

Les sélectionneurs tentent de choisir des variétés tolérantes à la fusariose et au charbon pour limiter les pertes de rendements et améliorer l'appétence du bétail. La valeur nutritive du fourrage doit également être optimisée. Ainsi, les chercheurs sélectionnent les variétés possédant une bonne digestibilité, une valeur énergétique suffisante et une bonne teneur en amidon pour satisfaire les besoins de l'animal. La bonne tenue de la plante est aussi un critère dont on doit tenir compte. En cas de verse, la récolte est plus compliquée, on risque de ramener de la terre dans le silo et d'augmenter le risque de contamination avec des spores butyriques (CIPF, 2022). Comme expliqué plus haut, un semis précoce, dans de bonnes conditions, augmente la période de croissance et favorise un bon rendement. Le sélectionneur va chercher des variétés précoces afin d'être sûr d'atteindre au moins 32 % de MS (Bureau de la biosécurité végétale, 1994). La sélection nous a amené à des variétés ayant la capacité de rester photosynthétiquement actives tard dans la saison pour allonger le cycle au maximum et augmenter le rendement (CIPF, 2022).

En vue de l'augmentation de la fréquence des sécheresses estivales, les agriculteurs s'inquiètent de l'avenir du maïs dans nos régions. L'augmentation des températures moyennes impose une plus forte évapotranspiration et par conséquent une plus grande demande en eau. Il sera nécessaire d'irriguer dans des régions auparavant dépourvues de système d'irrigation. Cependant, l'irrigation est de plus en plus difficile dans un contexte de changement climatique. Une expansion des systèmes d'irrigation est limitée par la réduction de la disponibilité en eau et par la hausse de la demande des autres secteurs comme l'industrie, par exemple (Serra-Wittling et al., 2020). L'intérêt des agriculteurs se tourne alors vers des cultures moins exigeantes car le maïs a une demande élevée en eau. En effet, avec des températures de plus en plus élevées et des périodes de sécheresse plus fréquentes, le déficit hydrique que subira la culture de maïs s'amplifiera ou se réduira en fonction des régions d'Europe (Figure 2) (Serra-Wittling et al., 2020). Dans les régions avec une augmentation du déficit hydrique, les rendements de maïs peuvent baisser plus ou moins fortement en fonction de l'importance des conditions (Gabriel & Quemada, 2010). Selon une étude réalisée en Drôme, les pertes de rendements des cultures de maïs peuvent atteindre 20 % dans des conditions de stress hydriques sévères alors que d'autres régions ont rencontré des pertes de plus de 50 % (Beillouin et al., 2020; Gonzalez et al., 2008).

❶ Déficit hydrique du maïs grain pendant la saison culturale en Europe.

a. Tendence pour la période 1995-2015. La couleur rouge indique une augmentation de l'écart entre les besoins en eau des cultures et l'eau disponible, la couleur bleue indique une réduction du déficit.

b. Taux de changement annuel projeté pour la période 2015-2045 avec le modèle MIROC (Model for Interdisciplinary Research On Climate). (Agence européenne pour l'environnement, 2016).

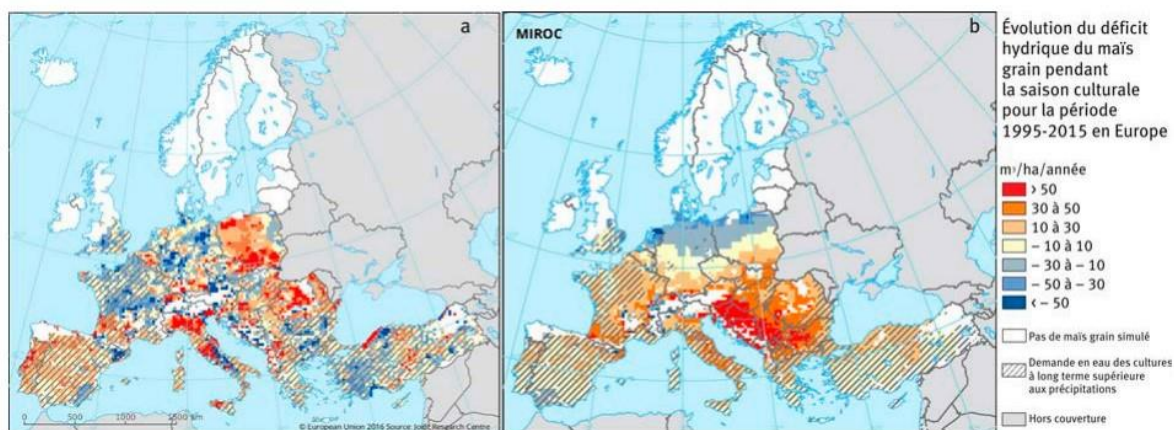


Figure 2 : Déficit hydrique du maïs grain pendant la saison culturale en Europe (Serra-Wittling et al., 2020)

3.6. Récolte

La récolte a lieu entre mi-octobre et début novembre lorsque le grain est pâteux ou pâteux dur en fonction de l'objectif de la récolte (CIPF, 2021a). Le choix de la date influence le rendement, la qualité et la conservation. La plante peut être broyée entièrement pour préparer un ensilage ou séparée des tiges pour une récolte des grains. Afin d'optimiser la qualité de l'ensilage, la plante doit atteindre entre 32 et 35 % de MS. Dans ce cas, l'agriculteur diminue les risques de fusariose liés à l'humidité lors d'une récolte tardive et il optimise la

digestion et l'appétence du bétail. De plus, il favorise une bonne conservation de l'ensilage grâce à un bon tassement. Plus la plante accumule de la matière sèche, plus elle sera élastique et résistante à la compression. Des poches d'air peuvent apparaître et favoriser la respiration à la place de la fermentation. Nous pourrions avoir l'apparition de moisissures entraînant des pertes de rendement. Un bon ensilage en anaérobie transforme les glucides en acides lactiques et acétiques qui vont permettre de diminuer le pH pour inhiber la fermentation butyrique et ainsi conserver l'ensilage. Si au contraire, la récolte avait été effectuée avant d'atteindre 32 % de MS, l'agriculteur risquerait d'avoir des pertes de rendements par des écoulements de jus (Amerlynck et al., 2014; CIPF, 1989).

3.7. Usages multiples

Le maïs peut être rentabilisé de différentes façons. Il peut être utilisé pour l'alimentation animale (aussi bien sous forme de grain humide pour les porcs ou les volailles que sous forme d'ensilage pour les bovins). L'homme, quant à lui, se nourrit de farine et de semoule de maïs utilisées dans de nombreuses recettes. L'industrie a cherché par la suite à développer d'autres filières dérivées du maïs. Nous retrouvons la production d'amidon, d'huile, de protéines, de boissons alcoolisées, d'édulcorants alimentaires, la fabrication de textiles, de plastiques biodégradables et de produits pharmaceutiques (Anzala, 2006). Le maïs est également utilisé à des fins énergétiques surtout dans un contexte de raréfaction des énergies fossiles. Nous retrouvons le maïs utilisé comme matière première dans le cadre de production de bioéthanol et de biogaz (FAO, 1993).

Nous allons à présent étudier le sorgho, une alternative potentielle à la culture de maïs dans nos régions. Cette plante est plus résistante à la sécheresse et mieux adaptée aux hautes températures.

4. Le sorgho

4.1. Caractéristiques et origine

Le sorgho est une plante monocotylée du genre *Sorghum*. Elle appartient à la famille des Poacées, anciennement appelée Graminées. Il existe trois sous-espèces : *bicolor*, *drummondii* et *verticilliflorum*. Nous allons nous concentrer sur *Sorghum bicolor*. C'est une plante herbacée annuelle ou vivace. Cette plante est originaire d'Afrique. Le sorgho a d'abord été domestiqué vers 5000-6000 AC dans la zone de la savane soudano-sahélienne puis s'est répandu vers l'Afrique de l'Ouest et du Sud (Bertin, 2022; Chantereau et al., 2013). La diffusion a, ensuite, atteint l'Asie puis l'Europe et enfin l'Amérique. Le sorgho peut facilement s'adapter aux régions tropicales semi-arides grâce à sa rusticité et à sa résistance à la sécheresse. Il peut également être cultivé dans les régions subtropicales ou tempérées (Nyabyenda, 2006).

4.2. Besoins environnementaux

4.2.1. La température

Certaines conditions sont requises pour la croissance de cette espèce. La première est la température. La plante étant d'origine tropicale, la température optimale avoisine les 30°C pendant la période de croissance. Une température minimale (12°C) et une température maximale (48°C) limitent l'activité de la plante (Bertin, 2022; Chantereau et al., 2013). La germination n'a pas lieu lorsque les températures extérieures sont inférieures à ce seuil minimal. Le sorgho est plus exigeant que le maïs au début de sa croissance même si les contraintes varient en fonction des variétés. En Belgique, les semis doivent se faire à partir du 15-20 mai, une fois que les températures sont plus douces. Il faut éviter une plantation au-delà de 250 m d'altitude dans nos régions (CIPF, 2021b). Le seuil des températures maximales est élevé car la plante a une photosynthèse de type C4 elle est efficiente malgré les chaleurs.

4.2.2. La longueur du jour

Etant d'origine tropicale, le sorgho est par nature une plante photopériodique de jours courts. Les sélectionneurs ont dû l'adapter pour que la culture puisse s'appliquer à d'autres régions du monde. Les variétés tempérées ont été sélectionnées afin d'avoir un seuil photopériodique plus élevé pour ne pas retarder leur transition florale (Bertin, 2022).

4.2.3. L'eau

Le sorgho est connu pour sa résistance à la sécheresse. Ses besoins en eau sont 20 % plus faibles que ceux du maïs (CIPF, 2021b). Il peut tout à fait vivre un épisode de sécheresse sans en subir de graves conséquences même s'il reste tout de même un peu plus sensible en début de floraison. Nous distinguons les sécheresses pré florales et post florales qui n'impliquent pas les mêmes mécanismes de défense et n'impactent pas la production de la même manière. Il existe trois mécanismes que la plante peut mettre en œuvre contre le stress hydrique (Maisonneuve & Larose, 1991) :

- **Mécanisme 1 = l'échappement:** permet à la plante d'éviter les périodes critiques de sécheresse grâce à son cycle.
- **Mécanisme 2 = l'évitement:** met en place un maintien correct de la plante lors d'un stress hydrique grâce à un système racinaire profond bien développé et grâce à une bonne gestion de la fermeture des stomates.
- **Mécanisme 3 = la tolérance:** se base sur une basse consommation en eau qui implique une faible teneur en eau dans les tissus grâce à une stabilité membranaire élevée.

Bien que cette espèce soit mieux adaptée pour des environnements secs (300 mm de précipitations), elle sait tout de même se développer dans des zones plus humides comme en Guinée Conakry (1500 mm de précipitations) (Nyabyenda, 2006).

4.2.4. Les éléments minéraux

Le sorgho n'est pas exigeant vis-à-vis de la fertilité du sol. Les reliquats d'azote laissés par la fertilisation de la culture de rente précédente peuvent suffire mais un apport d'azote peut être préventif. Cette faible demande en engrais s'explique par son système racinaire capable de puiser des éléments minéraux jusqu'à deux mètres de profondeur (CIPF, 2021b). Une culture de sorgho est deux fois moins exigeante en azote qu'une culture de maïs (Blondel, 1971; Foucart & Nihoul, 2022). Il y a cependant des réponses différentes en fonction du type de plante. Dans nos régions, une fertilisation est tout de même appliquée sur la culture de sorgho mais est 25 % plus faible que celle sur une culture de maïs (CIPF, 2021b).

4.3. L'importance économique

Sorghum bicolor est une céréale essentielle dans l'alimentation pour des centaines de millions de personnes en Afrique, principalement des populations rurales (CIRAD, 2021). Dans les régions tropicales semi-arides trop sèches pour des cultures exigeantes, le sorgho et le mil sont les aliments les plus importants (FAO, 1995). Le sorgho est une source importante d'énergie, de protéines et de vitamines pour ces populations. Elle est la cinquième céréale mondiale par rapport à sa production et sa superficie. Devant elle, se trouvent le maïs, le riz, le blé et l'orge. En 2020, la FAO a estimé à 58 millions de tonnes la production mondiale de sorgho (FAO, 2020). Bien que la production soit importante, elle est relativement peu commercialisée à l'échelle internationale et reste une culture vivrière de subsistance pour les populations locales en Afrique et en Asie (Boy & Guillaumin, 2021). Seuls 16 % de la production mondiale seraient exportés (FAO, 2020; ITC, 2020). Bien que le sorgho soit originaire d'Afrique, ce n'est pas l'endroit avec la plus grande productivité (t/ha) (Figure 3). En effet, les Etats-Unis ont surpassé les autres pays avec une production de plus de 9 millions de tonnes grâce à leurs excellents rendements à l'hectare (FAO, 2020). Cependant, cette production n'est pas vouée à la même finalité. Alors que l'Afrique cultive le sorgho surtout pour l'alimentation humaine, les pays industrialisés comme les Etats-Unis l'utilisent pour l'alimentation animale. La production devient intensive et peut entrer sur le marché. Les Etats-Unis sont le plus gros exportateur alors que le plus gros importateur est la Chine (FAO, 2020; ITC, 2020). Ce type d'agriculture utilise des variétés hybrides accompagnées d'intrants sur de grandes surfaces pour augmenter les rendements qui peuvent dépasser les 8t/ha (Chantereau et al., 2013). Tout est mécanisé et l'échelle de production est bien plus élevée. La production en Afrique et en Asie n'est pas intensive et elle utilise plutôt des variétés locales avec de faibles rendements pour l'alimentation humaine.

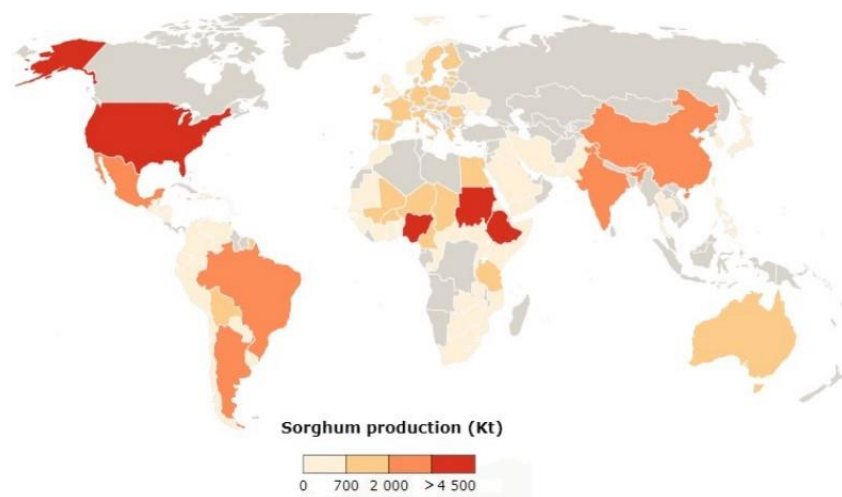


Figure 3 : Carte mondiale de la production moyenne de sorgho de 2016 à 2020 (USDA, 2021)

Ces vingt dernières années, les surfaces de production des Etats Unis, de l'Inde et de la Chine ont chuté pour différentes raisons (Chantereau et al., 2013). Avec certaines subventions visant à développer l'économie des villes, les agriculteurs ont préféré se tourner vers le blé, les légumineuses, le riz ou les oléagineux à la place du sorgho. D'autres producteurs ont changé leur culture pour du maïs. Les recherches sur les OGM de maïs sont beaucoup plus avancées que celles sur le sorgho ; ce qui poussent certains producteurs en dehors de l'Union Européenne à se diriger vers des maïs possédant de nombreuses résistances (herbicides, insectes, ...). De plus, la vente de maïs rapporte pour l'instant mieux que le sorgho et des hybrides de maïs résistant à la sécheresse arrivent sur le marché. On observe une diminution de la production de sorgho en Asie et en Amérique du Nord alors que l'Afrique, l'Europe et l'Amérique du Sud augmentent leur production. En effet, une augmentation de la production est visible au Brésil en Ethiopie ainsi qu'en France même si la culture de sorgho y est assez marginale (Boy & Guillaumin, 2021; Chantereau et al., 2013). Cet engouement pour le sorgho va prendre de plus en plus d'ampleur avec le développement des filières utilisant la plante à des fins énergétiques (biomasse, biocarburant) (FAO, 1995). On remarque une augmentation de 50 % de la production de sorgho en Europe de 2007 à 2021 (Figure 4).

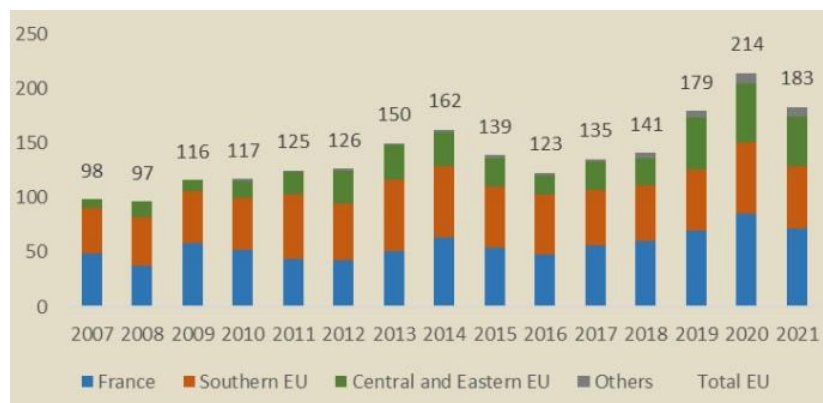


Figure 4 : Augmentation de la production de sorgho en Europe de 2007 à 2021 (Sorghum-ID, 2021)

4.4. Les variétés

Le sorgho cultivé possède une grande diversité de formes et peut s'adapter à différents environnements. La classification de Harlan et Wet a distingué cinq races principales (bicolor, guinea, caudatum, durra, kafir) en fonction des caractéristiques des épillets et des panicules (Chantereau et al., 2013). Au fur et à mesure de la domestication, des combinaisons ont amené de nouvelles variétés aux multiples caractéristiques. La variété la plus rustique est la bicolor. Ses grains sont de petite taille avec des glumes rigides et riches en tannins peu digestibles (FAO, 1995).

Nous distinguons trois types de sorgho en fonction de son utilisation:

- **Sorgho grain** : Il est cultivé principalement pour le rendement en grains de la panicule mais n'est pas cultivé dans nos régions car il n'arrive pas à maturité. La somme de degrés-jours est trop faible.
- **Sorgho multicoque** : Il y a en général deux coupes sur une année avec la première qui est plus conséquente que la deuxième. Ce type de plante ne contient pas d'amidon et possède des teneurs en matière sèche et des valeurs énergétiques plus faibles.
- **Sorgho sucrier** : Comme son nom l'indique, il contient une teneur élevée en sucres solubles dans les tiges ce qui en fait une plante intéressante pour ses valeurs énergétiques. Il peut être utilisé pour l'alimentation animale directement en fourrage ou sous forme d'ensilage. L'agriculteur recherche un tallage élevé pour avoir un maximum de tiges et de feuilles tout en évitant une teneur élevée en durrhine, toxique pour l'animal. Pour l'ensilage, il faut atteindre une teneur en matière sèche supérieure à 26 % pour éviter des écoulements et des pertes en énergie.

La culture de sorgho en région wallonne a quelques exigences pour être rentable. Les sorghos sélectionnés pour cette étude sont sucriers. Ils possèdent une bonne teneur en matière sèche supérieure à 26 %. En général, ils peuvent être utilisés pour de l'ensilage mais peuvent aussi être valorisés dans l'industrie avec la méthanisation grâce à leur biomasse. Pour respecter les besoins alimentaires du bétail, l'ensilage doit correspondre à des valeurs alimentaires correctes et contenir une énergie nette suffisante. Les sorghos retenus sont des variétés BMR (Brown Mid Rib). Elles possèdent un gène qui détermine une teneur plus faible en lignine améliorant ainsi la digestibilité. Cependant, il y a un juste milieu à trouver entre la teneur en lignine et le risque de verse car une teneur plus faible en lignine entraîne également une sensibilité à la verse. Une résistance à la verse élevée évite les complications lors des récoltes. Les variétés choisies présentent également une bonne vigueur en début de cycle, ce qui favorise la levée et améliore la compétition. Les sorghos repris sont des variétés très précoces pour éviter une trop grande teneur en eau dans la plante lors de la récolte et ainsi éviter un silo humide. Si la récolte n'a pas une teneur en matière sèche suffisante, une partie de l'ensilage est perdue par l'écoulement de jus (CIPF, 2021b).

4.5. Morphologie

Le sorgho est une plante à croissance déterminée. Elle se compose d'une succession de phytomères composés d'une feuille, d'un bourgeon axillaire, d'un nœud et d'un entre-nœud (Figure 5). Ses racines sont son atout majeur. A la germination, les racines séminales s'enfoncent puis laissent place aux racines nodales (adventives) qui vont explorer efficacement un volume important de sol grâce à leurs nombreuses ramifications. Plus le travail du sol rend la terre facilement pénétrable, plus le sorgho mettra à profit les fonctions de ses racines : puiser l'eau et les éléments minéraux. La plante pourra croître correctement et atteindre sa taille, entre 50 cm et plus de 4 m dans nos régions en

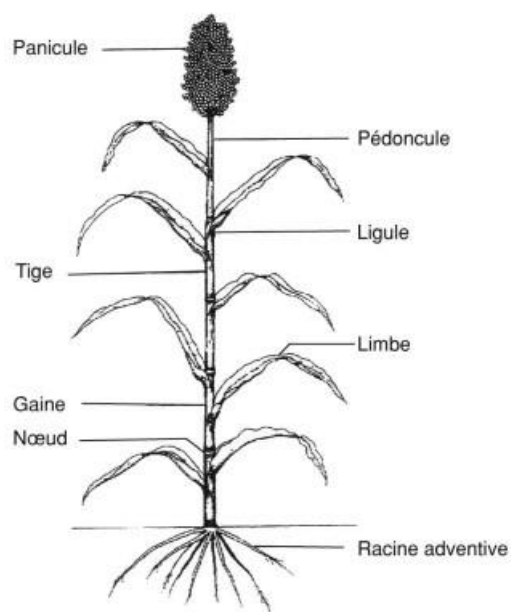


Figure 5 : Morphologie du sorgho (Lafarge, 1988)

fonction des variétés. Quatre gènes de nanisme jouent sur la taille des entrenœuds (Chantereau et al., 2013). Plus il y aura d'allèles de nanisme (récessifs), plus la plante sera de petite taille. Cependant, le déterminisme génétique n'est pas le seul facteur pouvant influencer cela. Les facteurs environnementaux comme la fertilisation azotée, affectent également ce critère mais avec moins d'influence. Le diamètre de la tige peut aussi varier de 5 mm à 5 cm en fonction de la moelle. Celle-ci va s'enrichir petit à petit en sucres simples pour être juteuse à maturité. Avec la dominance apicale, les bourgeons des phytomères ne se développent qu'en cas de détérioration du sommet de la tige qui laissera place à une talle axillaire sous la zone abimée. Les talles basales, elles, sont des tiges additionnelles partant de la base de la tige principale, mais elles ne portent pas forcément de fructification. Une plante peut en avoir plusieurs (généralement 1 ou 2) ou en être dépourvue. Le nombre de talles est influencé par l'environnement, par la densité de semis et par la variété (CIPF, 2021b). Le nombre de feuilles par tige dépend de la durée de la phase de végétation et du type de variété (précoce ou tardive). Certaines variétés s'arrêtent à 6 feuilles alors que d'autres vont jusqu'à 30 feuilles. Les feuilles sont lancéolées, leur taille augmente en fonction du rang et diminue pour les derniers rangs. La taille évolue également en fonction de l'environnement et de la variété. Dans certains cas, des trichomes parsèment la surface de la feuille et repoussent les ravageurs comme les mouches des pousses. La couleur des nervures informe sur la composition de la plante. Ainsi, des nervures blanches indiquent une moelle sèche, des nervures vertes indiquent une tige juteuse remplie de sucres, des nervures jaunes montrent une forte concentration en caroténoïdes et les nervures brunes témoignent d'une faible teneur en lignine et d'une bonne digestibilité (Chantereau et al., 2013). Au sommet de la plante se trouve une panicule qui peut être de différentes formes. Cette panicule porte entre 2000 et 4000 graines composées d'une enveloppe, d'un albumen et d'un germe. Avant

consommation, une phase de décortilage doit être effectuée. Sous cette enveloppe, certaines variétés possèdent une couche tannique appelée le testa. Cette couche n'est généralement pas appréciée à cause de ses facteurs antinutritionnels et de la difficulté lors de son décortilage (FAO, 1995). Cependant, sa présence peut être valorisée grâce à ses quelques avantages. L'amertume repousse les oiseaux et peut être utilisée dans la fabrication de bières. Les tannins protègent aussi contre les moisissures des grains (fontes de semis) ce qui favorise une bonne germination. La couleur du grain varie tout comme son poids (6 à 85 g pour 1000 graines) et sa taille. En cas de stress hydrique ou trophique, la taille diminue, alors que lorsqu'il y a des températures nocturnes fraîches lors de la phase de remplissage, la taille augmente. L'albumen est composé de 70 à 80 % d'amylopectine et de 20 à 30 % d'amylose (Chantereau et al., 2013).

4.6. Physiologie

4.6.1. Phase végétative

Cette phase démarre lors de la germination et dure jusqu'à l'initiation de la panicule (Figure 6). Elle est assez variable en fonction de la variété, de la date de semis et de la latitude ce qui influence le nombre de feuilles. La graine de sorgho n'est pas dormante mais demande certaines températures (12°C) afin d'entamer la germination. Plus les températures seront faibles, plus la germination prendra du temps. Son taux de perte à la levée est d'ailleurs assez élevé (15-20 %) (CIPF, 2021b). Lorsque les températures augmentent, le sorgho tout comme le maïs, sont efficaces grâce à leur photosynthèse de type C4. Cependant, le sorgho produit plus de matière sèche par rapport à sa consommation en eau que le maïs.

Durant la phase végétative, la plante investit une grande partie de son énergie dans son système racinaire ce qui lui permet une bonne résistance à la sécheresse (Chantereau et al., 2013). Le système aérien peut développer des talles pour compenser une faible levée (CIPF, 2021b). La plante allonge d'abord ses entre-nœuds puis commence l'accumulation du saccharose une fois l'élongation terminée. Dès que la panicule commence à se développer, la production de feuilles cesse. La période séparant la fin de l'élongation des entre-nœuds et le début de l'élaboration de la panicule détermine l'importance de l'accumulation des sucres dans la tige. Ce sucre pourra, ensuite, être redistribué dans la panicule pour alimenter les graines. Cette allocation varie en fonction des variétés (Chantereau et al., 2013).

4.6.2. Phase de formation des organes reproducteurs

La phase de formation des organes reproducteurs démarre avec l'initiation de la panicule et se termine avec la floraison (Figure 6). C'est la phase la plus consommatrice d'eau, de minéraux et la plus exigeante en énergie solaire. Il faut noter que les variétés photopériodiques ne sont pas avantagées face à la production d'organes fructifères. Si le phyllochrone (la durée entre l'apparition de deux feuilles) augmente, l'accumulation des

sucres ralentit et impacte le rendement ; c'est pourquoi les variétés dans nos régions possèdent un seuil photopériodique plus élevé pour ne pas impacter le rendement (Chantereau et al., 2013). Le sorgho a une reproduction autogame préférentielle avec 5 à 6 % de fécondations croisées (Nyabyenda, 2006). La durée de vie du pollen ne dépasse pas 2 à 3 heures alors que les stigmates peuvent rester réceptifs plusieurs jours. Sous terre, le développement racinaire continue et sa vitesse de croissance peut atteindre 2 à 3 cm par jour. Les 40 premiers centimètres restent les plus fournis en racines même si celles-ci peuvent atteindre 2 mètres de profondeur (Chantereau et al., 2013). Cette caractéristique lui confère une résistance à la sécheresse non négligeable par rapport aux autres plantes.

4.6.3. Phase de remplissage et de maturation

Cette phase démarre à la floraison jusqu'à la maturité des grains (Figure 6). Les hydrates de carbones produits lors de la photosynthèse vont être transloqués dans les grains. Les grains vont ensuite évoluer du stade laiteux au stade pâteux et terminer avec une consistance dure. Une fois mature, un point noir est visible dans le grain. Le grain atteint une humidité de 30 % et possède une teneur en protéines allant de 7 à 26 % dont certaines sont peu digestes (ex: kafirines) (Chantereau et al., 2013). La teneur en sucre finale de la tige diminue et peut mener à des risques de verse liée à une mauvaise tenue de la plante. Une sénescence anticipée des feuilles liée aux variétés ou à l'environnement influence également négativement le taux de sucre dans la tige. Dans les tropiques, la masse racinaire du sorgho compte pour 20 % de la biomasse totale de la plante (Chantereau et al., 2013). Une fois à maturité, les variétés sont fortement différentes entre elles par rapport à la répartition de la matière sèche car cela dépend de différents facteurs génétiques et environnementaux.

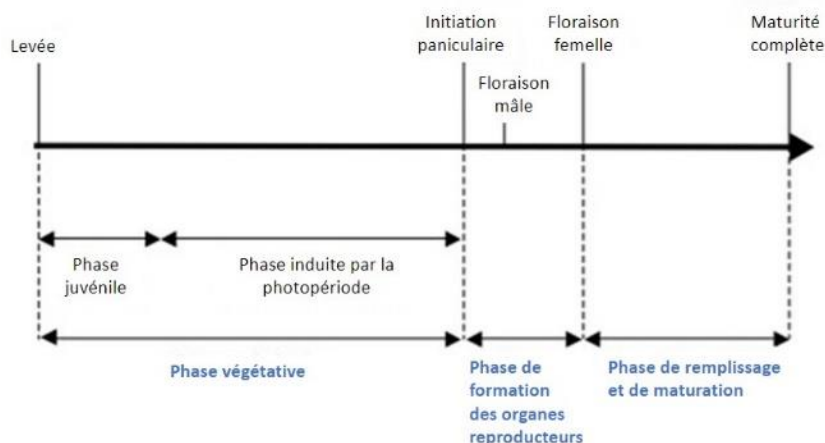


Figure 6 : Le cycle du sorgho

4.7. Techniques culturales en zone tempérée

4.7.1. Préparation du sol

Dans les régions tempérées, le sorgho se sème une fois par an en tête de rotation sous forme de monoculture. La culture nécessite une terre en bon état. Un simple labour de 5-6 cm suffit ; mais si la terre est en moins bon état, un labour profond peut être nécessaire (15 cm ou plus) (CIPF, 2021b; Nyabyenda, 2006).

4.7.2. Semis

Comme le pourcentage de levée est assez faible (80-85 %), il faut optimiser le semis (CIPF, 2021b). Il est conseillé d'avoir une terre fine pour favoriser un bon contact sol-graine et une bonne préparation du lit de semence. Dans nos régions, les graines sont enterrées à 2-3 cm de profondeur avec une densité de 150-200000 graines/ha et un écartement entre les rangs semblable au maïs (75 cm) (CIPF, 2021b).

4.7.3. Fertilisation

Le sorgho n'est pas une plante exigeante en fertilisation grâce à la performance de son système racinaire capable de puiser profondément de l'azote minéral (Nyabyenda, 2006). De plus, il valorise bien les reliquats d'azote des cultures précédentes et les apports de matière organique. Sans apport de fumier, il est conseillé d'apporter 70 à 80 unit d'azote par ha (UN/ha) de culture de sorgho alors que pour le maïs, l'apport est de 110 UN/ha (CIPF, 2021b).

4.7.4. Désherbage

Le désherbage est une phase importante dans la culture de sorgho car celle-ci est assez sensible à la concurrence des adventives (CIPF, 2021b). Le désherbage peut être effectué à la main, mécaniquement (sarclage, buttage) ou chimiquement. En Belgique, peu de produits sont autorisés sur le sorgho et peu d'entre eux éliminent correctement les graminées et les dicotylées. Un mélange de deux matières actives (S-métolachlore 312,5 g/l + terbuthylazine 187,5 g/l) se retrouvent dans plusieurs produits autorisés dans nos régions (Gardo Gold, Gardoprim, Primagram gold) (Phytoweb, 2015a). Ces produits sont des herbicides de post-émergence pour les cultures de sorgho, maïs et millet et s'associent bien avec des produits foliaires. Stomp Aqua est un autre produit à base de pendiméthaline, applicable à pré-émergence et utile contre les dicotylées (BASF, s. d.).

4.7.5. Récolte

Dans nos régions, le sorgho n'a pas le temps d'arriver totalement à maturité. Nous le récoltons en octobre afin d'éviter les moisissures dues à l'humidité et aux basses températures (CIPF, 2021b).

4.8. Maladies et ravageurs

Dans nos régions, les maladies et ravageurs ne sont pas problématiques (CIPF, 2021b).

Les corvidés peuvent faire des dégâts sur les plantations. Le plus souvent, les attaques ont lieu au stade plantule ou au stade graine après la floraison pour le sorgho grain (Nyabyenda, 2006). Il est conseillé d'installer un épouvantail pour les éloigner afin de limiter la perte de rendement.

Afin de lutter contre ces maladies et ces ravageurs, certaines variétés ont été améliorées pour atteindre une résistance limitant l'usage de produits phytosanitaires (Charrier et al., 1997).

4.9. Usages multiples

Il y a trois utilisations majeures du sorgho : l'alimentation humaine, l'alimentation animale et la production d'énergie (Figure 7) (CIRAD, 2021). Elles n'ont pas toutes une part égale et ne se pratiquent pas dans les mêmes régions du monde. En Afrique et en Asie, plus de 95 % de la production sert à l'alimentation de la population locale alors que dans les pays développés produisant du sorgho, 97 % de la production est destinée à l'alimentation animale (FAO, 1995). De plus, avec la raréfaction des énergies fossiles, une valorisation de la biomasse en bioéthanol et en énergie attire l'attention des industries.

4.9.1. L'alimentation humaine

Le sorgho est une culture de subsistance pour des centaines de millions de personnes vivant dans le milieu rural (CIRAD, 2021). Cette céréale, capable de pousser là où d'autres céréales sont trop exigeantes, fait partie de l'alimentation de base de nombreuses populations à faibles revenus (Ethiopie, Somalie, Botswana, ...). Le sorgho reste un ingrédient indispensable pour certaines populations dans la fabrication de farines, de pains, de semoules, de boissons fermentées, de sirop... (Chantereau et al., 2013).

4.9.2. L'alimentation animale

Avec le développement du sorgho pour l'alimentation animale, la production mondiale a vu ses chiffres augmenter tout comme ceux des échanges internationaux depuis 1960. Les pays industrialisés du Nord sont les principaux producteurs de sorgho pour l'alimentation animale (FAO, 2020). En tenant compte des changements climatiques, les éleveurs se dirigent vers des cultures moins exigeantes en eau pour remplacer le maïs, principal fourrage (CIPF, 2021b). Nous trouvons le sorgho sous différentes formes : le sorgho grain, le sorgho pour l'ensilage avec la plante entière ou pour le fourrage directement (Chantereau et al., 2013).

Sorgho grain

Le sorgho grain est cultivé pour sa panicule. Il ne dépasse pas 1,5m pour pouvoir facilement passer dans la moissonneuse-batteuse. Ces grains sont principalement donnés aux

monogastriques comme les porcs ou les volailles après avoir été écrasés et broyés pour améliorer digestibilité (Chantereau et al., 2013). Cette dernière est cependant altérée par la présence de tannins, des facteurs antinutritionnels. Des chercheurs ont tenté de sélectionner des variétés contenant peu de tannins pour que la digestibilité des glucides et des protéines ne soient pas impactée (Charrier et al., 1997). Certaines variétés sont dépourvues de tannins, comme le sorgho Argence (Chantereau et al., 2013).

Sorgho ensilage

Il y a quatre types de sorgho ensilage (Chantereau et al., 2013).

- **Sorgho grain de haute taille** : Il possède un rapport grain/paille optimal (0,4) pour le bétail. Ce sorgho ne va pas jusqu'à sa maturité. La plante entière est récoltée et broyée une fois qu'elle atteint 30 % de MS et que les grains sont laiteux pour améliorer la digestibilité par le bétail.
- **Sorgho sucré de grande taille** : Il possède beaucoup de biomasse, ses tiges sont riches en sucres et pauvres en amidon. Ces sucres solubles seront bénéfiques pour une bonne fermentation dans l'ensilage.
- **Sorgho à nervure brune** : Il a été sélectionné pour avoir un faible taux de lignine et ainsi augmenter la digestibilité pour l'animal au détriment de sa résistance à la verse. Ces variétés sont appelées Brown Mid Rib (BMR).
- **Sorgho photopériodique** : En cas de jours longs, la plante va maximiser sa production de biomasse verte, faible en lignine, et il n'y aura pas d'épis. L'éleveur obtiendra un fourrage digeste pour ses animaux.

Sorgho fourrager

Le sorgho fourrager peut être consommé frais ou via un ensilage. Cependant, il contient de la durrhine qui produit de l'acide cyanhydrique toxique pour le bétail (Chantereau et al., 2013). Cette substance se trouve dans les jeunes pousses de sorgho ou dans les plantes stressées, mais disparaît par après. Un champ peut être pâturé une fois que les plantes ont atteint une certaine taille (60 cm), afin d'éviter la consommation de ce composé.

4.9.3. L'agro-énergie

Les énergies fossiles se raréfient et leurs prix augmentent. Il devient intéressant de se tourner vers les biocarburants pour générer de l'énergie verte. Ces carburants sont issus de la biomasse et émettent autant de CO₂ que ce que la plante a absorbé. Pour que cette alternative soit vraiment envisageable, il faut tout de même respecter une série de conditions à savoir (Khawaja, 2014) :

- Respecter l'environnement
- Avoir un intérêt économique

- Avoir une quantité suffisante de biomasse pour impacter la demande et concurrencer les autres carburants fossiles
- Avoir une balance énergétique positive
- Ne pas impacter négativement la sécurité alimentaire.

Le sorgho peut être rentabilisé en énergie soit au départ de ses grains, soit de sa tige ou soit de la plante entière (Figure 7). Les grains sont intéressants pour l'alimentation humaine et animale mais peuvent aussi être utilisés pour créer de l'énergie car ils contiennent de l'amidon. Ils sont hydrolysés par des enzymes pour subir ensuite une fermentation alcoolique en anaérobiose grâce aux levures, et ainsi produire de l'agroéthanol de première génération (1G). Un coproduit, la drèche de distillerie, est associée à ce biocarburant et peut être ajoutée à la ration du bétail (Chantereau et al., 2013).

Certaines variétés de sorgho ont été sélectionnées pour une teneur élevée en jus sucré et pour une bonne biomasse (RAGT Semences, 2018a). L'objectif est d'extraire un maximum de sucres simples de la tige (fructose, glucose, saccharose) pour en faire trois produits différents après transformation : soit du sucre cristallisé, soit un sirop, soit de l'éthanol de première génération avec la même fermentation qu'auparavant mais, cette fois-ci, au départ de sucre simple. Le sorgho est connu pour son efficacité dans l'utilisation de la lumière. Il arrive même qu'il soit plus efficace que la canne à sucre ou le maïs (Khawaja, 2014).

Les résidus cellulosiques de la transformation non utilisés jusqu'ici (nommé bagasse) peuvent également être valorisés de différentes manières. La première est la biométhanisation (RAGT Semences, 2018a). Ces résidus de sucres complexes vont être transformés lors d'une digestion anaérobie et ainsi produire du biogaz. Ce processus émet de la chaleur et le biogaz peut être utilisé pour produire de l'énergie. Le sorgho est performant à ce niveau. Les rendements en gaz arrivent à 14 000 à 16 000 m³/ha (Chantereau et al., 2013). La deuxième transformation est la combustion, dégageant de la chaleur et ainsi de l'énergie. La troisième transforme le substrat en éthanol mais cette fois-ci de seconde génération (2G). La matière première est de la biomasse lignocellulosique composée de polysaccharides ce qui rend la fermentation alcoolique plus ardue et plus coûteuse. Les enzymes et les levures ont plus de mal à fonctionner correctement à cause de la structure cristalline de la cellulose, difficile à hydrolyser, et à cause de la liaison lignine-cellulose obstruant l'accès aux fibres cellulosiques. Pour éviter ces contraintes, un prétraitement séparant les différents constituants de la biomasse peut faciliter la tâche (Khawaja, 2014). Des variétés BMR contenant moins de lignine favorisent une bonne dégradation et facilitent la fermentation (Charrier et al., 1997). Les résidus cellulosiques peuvent aussi être utilisés pour du fourrage, pour la fabrication d'agromatériaux, de papier, ou même comme fertilisant organique lorsque le résidu est sous la forme de digestat, coproduit des biogaz.

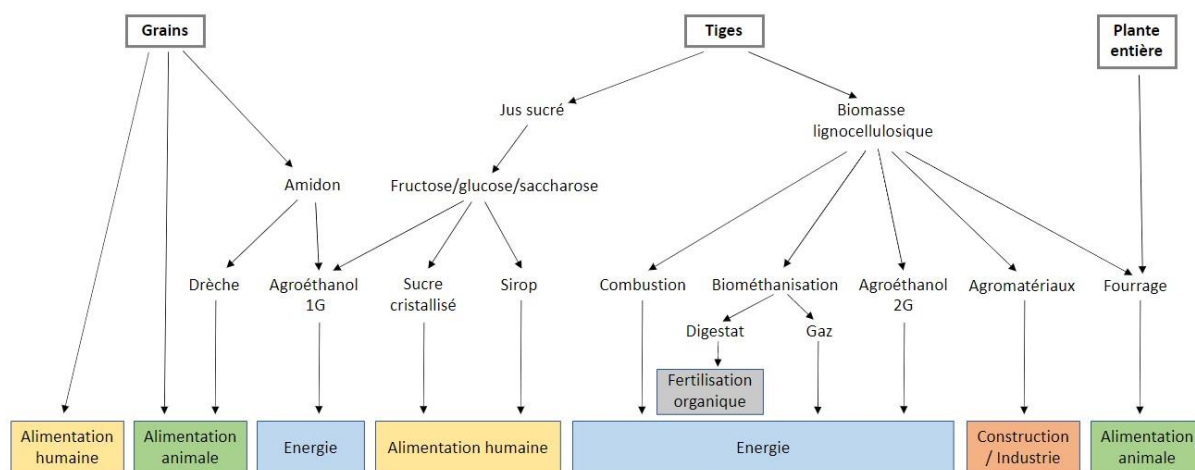


Figure 7 : Schéma des multiples usages du sorgho

4.10. Les enjeux d'amélioration

Par rapport au maïs, la culture de sorgho a encore un vaste potentiel d'amélioration. Les programmes de recherche travaillent à deux niveaux : sur la sélection variétale et sur l'optimisation des techniques culturales (Nyabyenda, 2006). En fonction de la localisation et du type de culture, les objectifs seront différents.

Dans les régions tropicales semi-arides, mis à part le rendement, les chercheurs tentent d'améliorer la stabilité, la qualité et la régularité de la production pour que le sorgho puisse être concurrent sur le marché. En plus d'être une culture de subsistance, les améliorateurs développent des variétés pour des usages plus variés afin de diversifier les produits, augmenter les revenus des agriculteurs, et générer de l'emploi (Charrier et al., 1997).

Le sorgho peut également être considéré comme une plante aux multiples services écosystémiques. Utilisé comme précédent cultural, il peut jouer le rôle de couverture de sol pour limiter l'érosion grâce à son système racinaire développé. Cette couverture fait office de barrière contre les adventices et favorise la structure et la fertilité du sol grâce à un apport de matière organique. La culture de sorgho peut également être utilisée contre les bioagresseurs. La plante a des effets allélopathiques contre certaines adventices, elle produit des exsudats racinaires contre des champignons pathogènes (*Fusarium*, *Rhizoctonia*) et peut être utilisée comme plante piège pour certains insectes aériens (*Chilo partellus*). De plus, cette plante peut être utilisée pour de la phytoremédiation dans des sols pollués par des métaux lourds ou du pétrole. (Chantereau et al., 2013; Perlein et al., 2021).

Dans les pays industrialisés (Europe, Brésil, Argentine et Etats-Unis), les trajectoires d'amélioration se tournent plutôt vers la sélection liée aux variétés destinées à l'alimentation animale (Charrier et al., 1997). Les sorgho-grains étant différents des sorghos fourragers, ils ne demandent pas les mêmes critères d'optimisation. Ils cherchent avant tout à augmenter leurs rendements en grain tout en intensifiant la mécanisation. La plante ne doit pas dépasser

1,5 m pour passer dans la moissonneuse ; elle doit être résistante à la verse et avoir un bon rendement en grains. La sélection cherche à repérer des variétés résistantes à un maximum de facteurs biotiques et abiotiques. Les plantes résistantes aux maladies bactériennes, virales et fongiques intéressent les agriculteurs tout comme celles tolérantes à la sécheresse, aux fortes chaleurs ou aux températures plus fraîches en début de saison (Charrier et al., 1997). Dans nos régions, la précocité des plantes est recherchée afin d'augmenter la teneur en matière sèche à la récolte (CIPF, 2021b). La qualité alimentaire est aussi un point important pour augmenter la digestibilité pour les animaux. Ainsi, les variétés possédant une faible teneur en tannins sont préférées (Sorghum ID, 2020). Les sorghos fourragers n'ont pas les mêmes exigences. Ici, ce n'est plus le grain qui est important mais plutôt le développement végétatif avec un maximum de tiges et de feuilles (Charrier et al., 1997). Les sélectionneurs cherchent des variétés qui ont tendance à taller davantage et pour lesquelles la coupe mécanique est facile. Les résistances évoquées plus haut sont toujours d'actualité pour le sorgho fourrager, avec une attention particulière aux maladies foliaires. Etant donné que l'animal va se nourrir des feuilles et des tiges de la plante, il faut faire attention à leurs compositions pour ne pas altérer la qualité alimentaire du fourrage. Ainsi, les améliorateurs sélectionnent des variétés possédant des tiges fines avec une faible teneur en lignine, une faible teneur en durrhine et une teneur élevée en sucre pour atteindre un potentiel digestif élevé (Sorghum ID, 2020). En dehors de la sélection, l'itinéraire technique a aussi de l'importance.

Ces enjeux d'améliorations sont aussi à rapprocher des changements climatiques. Le maïs et le sorgho sont de type C4 et sont déjà efficaces avec des températures élevées mais il faut également faire attention à la résistance à la sécheresse. Comme nous l'avons vu avec le sorgho, un bon développement racinaire avantager le sorgho face au maïs dans des conditions limitantes en eau. Des études cherchent à améliorer davantage ce système racinaire pour être le plus adapté possible lorsque l'intensité et la fréquence des sécheresses augmenteront (Paeßens et al., 2019).

5. Comparaison entre le maïs et le sorgho

Le maïs est connu pour sa diversité génétique qui a donné lieu à une sélection de variétés avec des bons rendements. Alors qu'il est sensible à la sécheresse, on constate que le maïs peut être jusqu'à trois fois plus efficace en condition d'irrigation que lorsqu'il ne reçoit que l'eau de pluie (Renoux, 2014). L'irrigation représente 20 % des surfaces agricoles mondiales mais cela représente 40 % de la production mondiale car sa productivité est supérieure aux cultures non irriguées. Bien que l'irrigation permette des croissances de rendement, les cultures en Wallonie ne sont presque pas irriguées (CIPF, 2021a; Sorghum ID, 2019). Dans une optique de transition écologique, sachant que les changements climatiques dérèglent les précipitations et les températures, il ne faut pas penser que l'irrigation pourra être la solution car la ressource en eau deviendra de plus en plus rare dans les années à venir. Il est plus

intéressant d'améliorer l'efficacité de l'utilisation en eau dans l'agriculture que d'augmenter les quantités d'eau apportées.

Le maïs est une plante en C4 compétente à des températures élevées et il a développé des stratégies pour éviter le stress hydrique (Renoux, 2014). Pour limiter sa sensibilité au stress hydrique, la plante enroule ses feuilles, les laisse flétrir, ferme ses stomates et limite sa croissance. Le choix de variétés résistantes peut limiter les dégâts en maintenant la croissance malgré le déficit hydrique. Cependant, le maïs ne peut pas toujours supporter ce stress. Par exemple, des températures supérieures à 35°C, pendant plusieurs semaines au moment de la floraison, conduisent à l'avortement des grains et à une baisse de rendement (Renoux, 2014). Si ces conditions perdurent, le maïs ne devient plus rentable. La biomasse obtenue est affectée et le rendement en grains peut ainsi diminuer de 15 à 60 % par rapport à un apport optimal en fonction du stade de la plante (Khodarahmpour & Hamidi, 2012).

Il est temps de reconsidérer le choix de la culture. Le sorgho peut représenter une bonne alternative, cette céréale est très résistante à la sécheresse et supporte bien les hautes températures. Ses besoins en eau sont 20 % plus faibles que ceux du maïs grâce à la profondeur de ses racines (CIPF, 2021b). La culture de sorgho ne nécessite pas d'irrigation. De plus, elle est appréciée pour sa rusticité. De fait, le sorgho est peu exposé aux maladies, aux ravageurs et consomme peu d'intrants. Ses racines sont capables de puiser des minéraux profondément et il n'est pas nécessaire d'appliquer des produits phytosanitaires (Tableau 1). Dans une optique agroécologique, cette plante permet de diversifier les cultures et d'allonger les rotations dans le but de casser les cycles des adventices. Son itinéraire phytotechnique est assez simple car il ne nécessite pas de machine particulière (Sorghum ID, 2019). Pour terminer, le sorgho peut être utilisé pour équilibrer la ration du bétail. En résumé, le maïs a un potentiel de rendement plus intéressant si les ressources en eaux sont suffisantes mais le sorgho possède un meilleur WUE, surtout en cas de stress hydrique.

Tableau 1 : Comparaison entre le sorgho et le maïs

Critères	Sorgho	Maïs
Origine de la plante	Afrique (climat tropical semi-aride) Dans la savane soudano-sahélienne	Amérique (climat tropical) Mexique
Importance économique	5 ^{ème} céréale produite au monde ➔ 58 millions de tonnes Peu de commerce international	1 ^{ère} céréale produite au monde ➔ 1,1 milliard de tonnes Beaucoup de commerce international
Semis dans nos régions	A partir du 15-20 mai 150 000-200 000 graines/ha Profondeur : 2-3 cm Ecartement entre les rangs : 75-80 cm	Entre le 15 avril et le 15 mai 80 000-100 000 graines/ha Profondeur : 3-5 cm Ecartement entre les rangs : 75-80 cm
Récolte dans nos régions	En octobre Ensilage : au moins 26 % de MS Meilleurs rendements en conditions de sécheresse	De mi-octobre à début novembre Ensilage : de 32 à 35 % MS Meilleurs rendements en conditions normales
Valeur alimentaire	Entre 700 et 935 VEM/Kg Lignine, durrhine ➔ peu digestible	Maximum 900 VEM/Kg Bonne digestibilité
Morphologie	Tallage Hauteur en Belgique : 1,5 m à 4 m Profondeur des racines : jusqu'à 2 m	Pas de tallage Hauteur en Belgique : maximum 3 m Profondeur des racines : jusqu'à 1,2 m
Besoins en températures	Minimum 12°C	Minimum 10°C
Besoins en eau	Besoins 20 % plus faibles que ceux du maïs WUE MS = 3.3 g/l eau WUE grain = 1.8 g/l eau	Elevé: 280-350 g eau/ gr MS WUE MS = 2.8 - 3.6 g/l eau WUE grain = 1.4 g/l eau
Fertilisation	Peu exigeant Fertilisation en Belgique : 70 à 80 UN/ha	Exigeant Fertilisation en Belgique : 110 UN/ha
Maladies	Très rustique	Rustique
Usages	Alimentation humaine Alimentation animale Energie Agromatériaux	Alimentation humaine Alimentation animale Energie Industrie
Amélioration	Encore peu amélioré	Déjà fortement amélioré

6. CIPF

Le CIPF (Centre Indépendant de Promotion Fourragère) est une ASBL créée en 1959 par des agriculteurs. Le CIPF a pour but principal de vulgariser les connaissances autour du maïs pour encourager et faciliter sa culture car cette dernière n'était pas encore bien maîtrisée. L'ASBL met en place différents essais de maïs dans plusieurs régions agricoles de Wallonie pour tester

des environnements variés, divers types de sols et ainsi mieux pouvoir conseiller les agriculteurs wallons. Le CIPF expérimente différentes pratiques culturales (fertilisation, désherbage), plusieurs variétés, des méthodes de conservation, des méthodes de lutte et des pratiques respectueuses de l'environnement. Des publications dans la presse agricole informent les agriculteurs. De plus, le CIPF organise des réunions d'information, des conférences et des visites d'essais. Le centre, subventionné par le Service public de Wallonie (SPW), fait partie du Centre Pilote Maïs et est basé dans les locaux de l'UCLouvain. Après avoir commencé l'étude du maïs, le centre s'est ensuite intéressé au miscanthus et maintenant il compare depuis 10 ans les rendements de différentes variétés de sorgho. Son objectif est d'obtenir des variétés précoces avec une bonne tenue de la tige et une qualité acceptable, tout en étant résistantes à la sécheresse (CIPF, 2017). Vu l'augmentation de la production en France et l'arrivée des vagues de chaleur dans nos régions, l'intérêt pour cette nouvelle céréale a du sens. Il est important de l'expérimenter avant de proposer le sorgho aux agriculteurs wallons. Pour toutes ces raisons, la Région wallonne porte de l'intérêt pour cette culture et subventionne des recherches, comme ce mémoire, par exemple.

7. Conditions météorologiques belges pour la saison 2021

Le rapport du GIEC annonçait une tendance vers un climat belge de plus en plus chaud et sec. Cependant, le GIEC parlait également d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements exceptionnels tels que des fortes pluies, des sécheresses ou des fortes chaleurs. L'été belge 2021 en a été la preuve avec ses précipitations records.

Afin de mesurer les conditions météorologiques, à savoir les précipitations et les températures, la Belgique dispose de multiples stations météorologiques. Celle la plus proche de notre expérimentation se situe à Ernage, à côté de Gembloux et fait partie du réseau IRM. Le Centre de Recherche Agronomique de Wallonie (CRA-W) suit son évolution depuis de nombreuses années (CRA-W, 2022). Dans le but de comprendre la réaction de la culture vis-à-vis de son environnement, il est important d'analyser les conditions météorologiques durant la saison de culture.

L'année 2021 a commencé avec un hiver plus doux (+0,4°C) et plus humide (entre +32 mm et +42 mm) que d'ordinaire.

Le printemps, par contre, s'est trouvé plus frais et plus sec que la normale. On retrouvait un déficit pluviométrique de 23 mm en région limoneuse avec une différence de température par rapport à la moyenne de -1,9°C ce qui a entraîné un retard dans le développement des céréales. Ce retard n'était pas souhaité car il ne pourra pas être rattrapé par la suite. Les semis de sorgho, nécessitant des températures plus clémentes, ont été décalés.

L'été qui a suivi a connu des précipitations exceptionnelles entre le 13 et le 15 juillet et un excès général de précipitations sur tout l'été (CRA-W, 2022). En sommant les précipitations de l'été, la ville de Uccle a compté 410,7 mm de précipitations alors que la normale est de

234,2 mm (IRM, 2021). Rien que sur les trois jours extrêmes, le pluviomètre comptait dans certaines régions plus de 100 mm (Figure 8) (CRA-W, 2022). Mise à part les précipitations, les températures durant l'été étaient inférieures à la moyenne. On a recensé à peine 14 jours d'été (températures maximales $\geq 25^{\circ}\text{C}$) à la place des 23,9 jours habituels et aucun jour tropical ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) alors que la moyenne est de 5 jours (IRM, 2021).

Une fois l'été passé, l'automne 2021 a été un peu plus sec que la normale avec un déficit de 68 mm en région limoneuse mais avec des températures correctes pour accompagner la fin de la saison de la culture du maïs et du sorgho dans nos régions (CRA-W, 2022).



Figure 8 : Bilan (Précipitations - ETP) 2020-2021 et bilan (Précipitations - ETP) normal en mm, par décade du 1er mars au 31 août 2021 au poste climatologique d'Ernage-Gembloux (IRM).

Au début de ce mémoire, nous ne nous attendions pas à rencontrer des précipitations pareilles durant l'été 2021. Cependant, même si nous n'avons pas pu observer une situation de sécheresse comme espérée de prime abord, il est tout de même intéressant d'observer le comportement de la culture de sorgho dans des conditions extrêmement humides. Les précipitations d'une telle intensité n'avaient pas été observées depuis 100 ans (IRM, 2022). Dans le rapport du premier groupe de travail du GIEC, les scientifiques annonçaient, en effet, l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes, comme nous avons pu le voir durant l'été 2021 (GIEC et al., 2021).

8. Objectifs

Au vu des enjeux climatiques actuels, il est primordial d'adapter notre agriculture. Les changements climatiques engendrent des périodes de sécheresse, des températures extrêmes et des intempéries d'une intensité et d'une fréquence plus élevées mettant à mal certaines cultures. Etant donné que le maïs a une demande élevée en eau, une période trop chaude et trop sèche peut fortement impacter ses performances. Nous nous demandons donc s'il ne serait pas plus judicieux de changer de culture et de nous tourner vers une espèce mieux adaptée à ces extrêmes. C'est pourquoi nous avons étudié le sorgho, une plante tropicale d'origine africaine. Le sorgho nécessite moins d'eau et moins d'intrants que le maïs fourrager et pourrait être utilisé en complément dans la ration de la vache ou valorisé en industrie grâce à la biométhanisation.

Notre objectif est d'expérimenter la culture du sorgho en Région wallonne et d'étudier son potentiel agronomique afin de proposer cette céréale aux agriculteurs comme une alternative rentable au maïs fourrager. Pour arriver à cet objectif, il est indispensable d'évaluer le rendement et la qualité de la plante afin d'assurer une rentabilité économique.

Cet objectif généralise l'objectif initial qui était de comparer le maïs et le sorgho sur deux sols, dont un sol sablonneux susceptible de subir une sécheresse estivale. Les conditions climatiques de l'été 2021 n'ont pas permis de rencontrer ces conditions.

Ainsi, trois variétés de sorgho et trois de maïs ont été sélectionnées. Ces génotypes sont valorisés dans l'alimentation animale ou dans la biométhanisation et sont intéressants pour l'agriculteur. L'expérience a eu lieu pendant la saison 2021 sur deux sites représentatifs de la région, l'un à Vieusart, composé d'un sol sablo-limoneux, l'autre à Chaumont (Dion) sur un sol sablonneux. Au début de l'expérimentation, des analyses de sols ont pu déterminer la granulométrie et la composition de ces sols. Nous avons pu comparer l'effet de l'espèce, l'effet de la variété et l'effet du site sur différentes mesures. Nous avons mesuré le pourcentage de levée, la surface foliaire totale, un indice lié à la teneur en chlorophylle, la hauteur des plantes à la récolte, le nombre de talles, le pourcentage de verse, le rendement en matière sèche, le pourcentage de matière sèche, la teneur en amidon, la teneur en cellulose, la teneur en matières protéiques totales, la valeur énergétique, le nombre et le poids sec des racines dans un certain volume de sol à différentes profondeurs. De cette manière, nous avons pu évaluer la qualité de la plante et le rendement pouvant être atteint dans nos régions, malgré un climat tempéré froid. Un bilan d'azote a également été effectué dans le but d'évaluer la capacité de la plante à prélever l'azote.

Deuxième partie : Matériels et méthodes

1. Matériel végétal

Pour cette expérience, nous avons choisi des variétés rentables pour les agriculteurs. Elles font montre d'un bon développement, d'une bonne qualité et d'un bon rendement. (Tableau 2).

Tableau 2 : Les caractéristiques des variétés de sorgho et de maïs retenues pour cette étude

	Sorgho	Maïs
Caractéristiques générales	- Variétés rentables économiquement - Bon développement, bon rendement - Bonne valeur alimentaire, excellente qualité fourragère - Bonne teneur en MS	
Caractéristiques particulières	- Sorghos sucriers - Variétés BMR ⇒ Faibles en lignine • Résistance à la verse • Bonne vigueur à la levée • Variétés précoces	• Bon ensilage • Variétés demi-précoces

1.1. Variétés de sorgho

Trois variétés de sorgho ont été utilisées (Figure 9) : RGT SWINGG, RGT BIGGBEN et RGT AMIGGO.

RGT SWINGG et RGT BIGGBEN mesurent entre 180 cm et 230 cm de haut, possèdent une teneur correcte en amidon et d'excellentes qualités fourragères (RAGT Semences, 2020). La variété SWINGG est la plus précoce du marché et les données énergétiques sont proches de celles du maïs (RAGT Semences, 2018b). La variété BIGGBEN possède un excellent équilibre productivité/précocité. La variété AMIGGO peut atteindre 4,5 m de haut ce qui la rend intéressante pour l'industrie grâce à sa grande production de biomasse (RAGT Semences, 2016). En 2018, ses rendements atteignaient entre 16,7 et 18,3 t/ha à Vieusart, ce qui confirmait sa productivité fourragère maximale. En contrepartie, elle n'atteint que 700 VEM avec une faible digestibilité et une faible teneur en amidon.

1.2. Variétés de maïs

Deux variétés de maïs ont été semées (Figure 9): MAS 232 et LG 31 238. Comme décrit plus haut, ces variétés ont été choisies en fonction de leurs performances. La première sécurise le

rendement et est utilisée surtout pour l'ensilage et la production de biogaz (MAS Seeds, 2020). La matière sèche de la plante entière s'approche des 36 % alors que la deuxième variété s'approche des 30 % de MS, avec un excellent rendement ensilage (Limagrain, 2022).

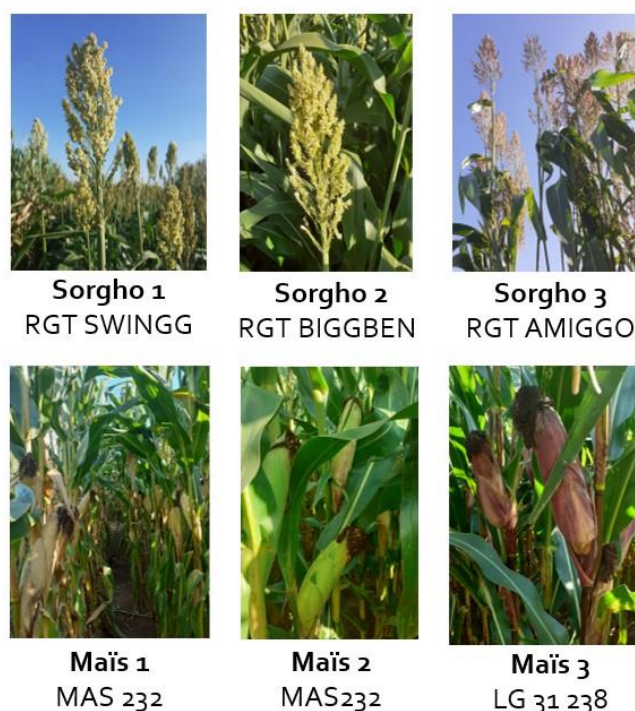


Figure 9 : Panicules et épis des variétés de sorgho et de maïs utilisées dans nos essais

2. Dates de semis

Les maïs et sorghos présentent des durées de cycle et des exigences thermiques différentes. Afin de les comparer correctement, il est nécessaire de mettre en place deux dates de semis différentes (Figure 10). La variété de maïs MAS 232 a été semée le 17 mai et toutes les variétés de sorgho et maïs (en ce compris la variété MAS 232) ont été semées le 1^{er} juin.

Le sorgho est une plante qui nécessite un minimum de 12°C dans le sol pour pouvoir germer. Cette température ne s'atteint généralement que vers le 20 mai dans nos régions. La croissance est assez lente au démarrage mais elle devient explosive durant les mois de juillet, août et se poursuit jusqu'au mois de septembre. Sous nos conditions climatiques, il est important de ne pas tarder à semer dès que les exigences thermiques sont atteintes et d'utiliser des variétés suffisamment précoces pour maximiser les chances d'atteindre une maturité et une teneur en matière sèche suffisantes lors de la récolte.

La situation est différente en ce qui concerne le maïs. La plante germe plus tôt que le sorgho, vers le 20 avril car elle demande moins de chaleur pour se développer. Des températures douces, supérieures à 10°C sont suffisantes. Le développement est assez rapide au départ mais le sorgho peut rattraper cet écart en été grâce à ses performances sous un climat plus chaud et plus sec.

Les deux dates de semis permettent deux types de comparaison (Figure 10).

2.1. Comparaison 1

Toutes les variétés peuvent être comparées entre elles, en ayant été semées à leur date optimale (17 mai pour MAS 232, 1er juin pour toutes les variétés).

2.2. Comparaison 2

Toutes les variétés peuvent être comparées entre elles en ayant été semées à la même date (1er juin), donc en ayant rencontré les mêmes conditions environnementales.

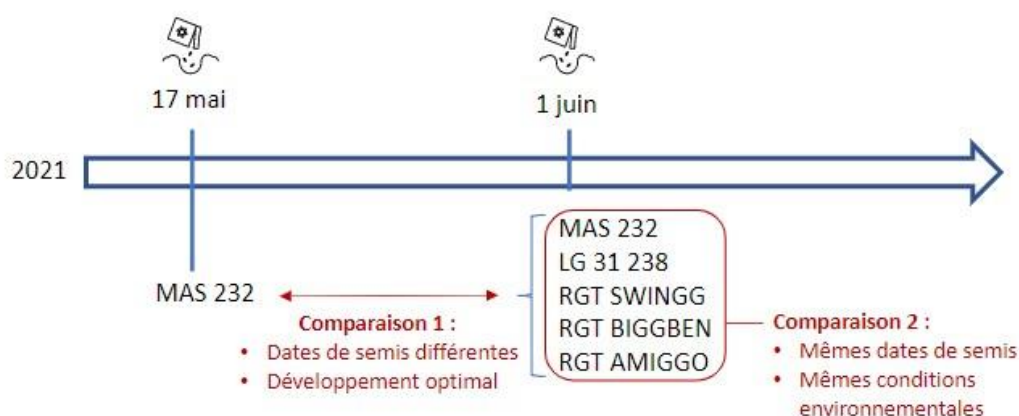


Figure 10 : Dates de semis des différentes variétés et comparaisons réalisées

Par la suite, pour faciliter nos analyses, nous considérerons que le maïs MAS 232, semé le 17 mai, et le maïs 232, semé le 1er juin, sont deux variétés différentes (respectivement Maïs 1 et Maïs 2), pour faciliter nos analyses.

3. Les sites

L'expérimentation a eu lieu sur deux sites différents afin de tester des conditions environnementales variées et représentatives de la région. Les sites sont relativement plats et homogènes.

3.1. Vieusart

Le premier site se trouve à Vieusart en Belgique sur les terres appartenant à la ferme de l'UCLouvain, centre Alphonse De Marbaix (50°40'45.7"N 4°38'07.3"E) (Figure 11). Le centre provincial de l'agriculture et de la ruralité à la Hulpe qualifie la texture du sol de limon fin argileux (Figure 12). Les analyses chimiques révèlent un pH eau de 7,6 ce qui traduit un sol neutre. Le sol contient 11 g/kg de carbone organique et la teneur en humus est de 2,2 %. Le sol de Vieusart est considéré comme très battant (indice de battance 2,18). Les teneurs en éléments dans 100 g de terre sèche sont de : 16,9 mg de phosphore, 24 mg de potassium, 14 mg de magnésium et 243 mg de calcium. Ces valeurs sont au-dessus de celles de la zone de référence wallonne de terre sèche. La teneur en azote totale est faible (0,12 %) mais le sol a un bon rapport carbone/azote (9). Le sol est filtrant et possède une bonne réserve en eau.

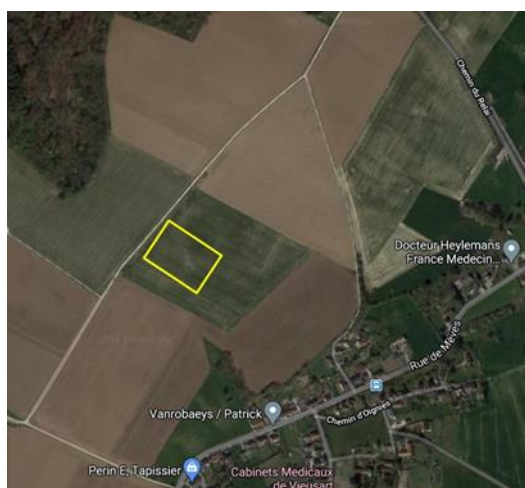


Figure 11 : Image satellite, localisation du site de Vieusart

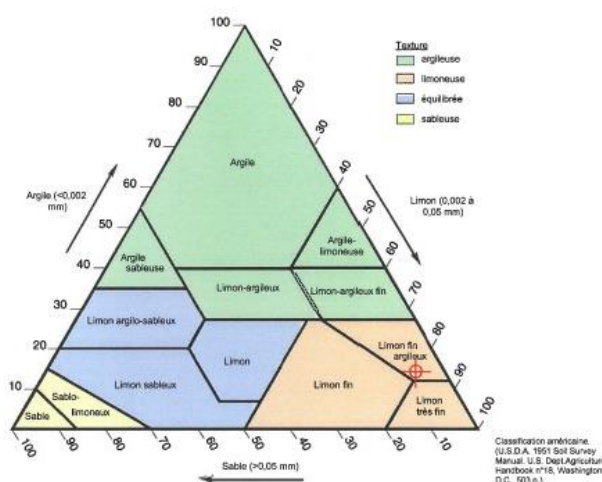


Figure 12 : Analyse de la texture du sol de Vieusart, triangle granulométrique

3.2. Chaumont

Le deuxième site se trouve à Chaumont entre Dion-le-Val et Dion-le-Mont en Belgique, (50°42'31.2"N 4°40'09.9"E) (Figure 14). Le centre provincial de l'agriculture et de la ruralité qualifie la texture du sol de limon-sableux (Figure 13). Le sol est acide car le pH eau est de 6,6. La teneur en carbone organique est faible (8 g/kg) et la teneur en humus est de 1,7 %. Le sol n'est pas battant (indice de battance 1,37). Les teneurs en éléments dans 100 g de terre sèche sont de : 10,1 mg de phosphore, 12 mg de potassium, 6 mg de magnésium et 95 mg de calcium. Ces teneurs sont dans les normes. Cependant, l'azote total est très faible (0,08 %). Le rapport carbone/azote, quant à lui, reste bon. Précédemment, le sol était couvert d'un froment d'hiver.



Figure 14 : Image satellite, localisation du site de Chaumont

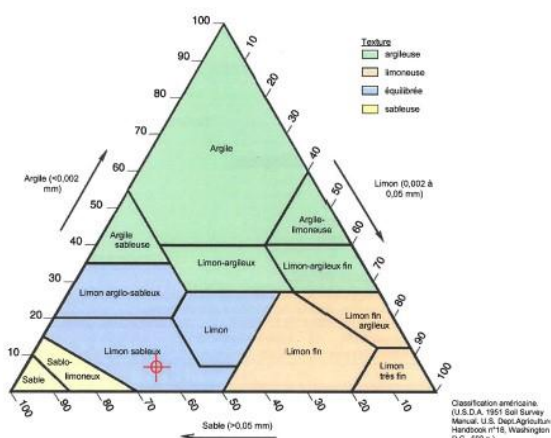


Figure 13 : Analyse de la texture du sol de Chaumont, triangle granulométrique

Bien que les deux sites soient dans la commune de Chaumont, seul celui-ci sera nommé « Chaumont ». Le premier site sera nommé « Vieusart ».

4. Plan expérimental

Le plan expérimental est le même pour les deux sites et correspond à un dispositif en blocs aléatoires complets avec quatre répétitions. Sur chaque site, la parcelle fait 20 ares : 40 m de large sur 50 m de profondeur (Figure 15). Elle est divisée en 4 blocs de répétition pour tenir compte de l'hétérogénéité éventuelle du terrain. Dans chaque bloc, se trouvent 6 parcelles pour les 5 variétés dont l'une d'elle est semée à deux dates. La distribution des variétés dans les parcelles est randomisée. Chaque parcelle mesure 3 m de large et 14 m de long. Chaque parcelle comprend quatre rangs de maïs ou de sorgho sur la largeur et est divisée en deux parties séparées par un couloir de 1 m de large. La première partie de 6 m sur 3 m, est utilisée pour les prélèvements en cours de saison alors que la deuxième, de 7 m sur 3m, doit rester intacte pour mesurer le rendement final. Les manœuvres agricoles nécessitent un couloir de 9 m au travers de la parcelle, avec deux blocs disposés de chaque côté du couloir. Cette

surface a été ensemencée en maïs pour maximiser la production finale de la terre et mieux lutter contre l'érosion et le développement d'adventices. Afin d'isoler l'expérimentation des variations environnementales liées aux effets de bord, la parcelle est également entourée de maïs. Des machines agricoles adaptées à cette taille sont utilisées pour les pratiques phytotechniques.

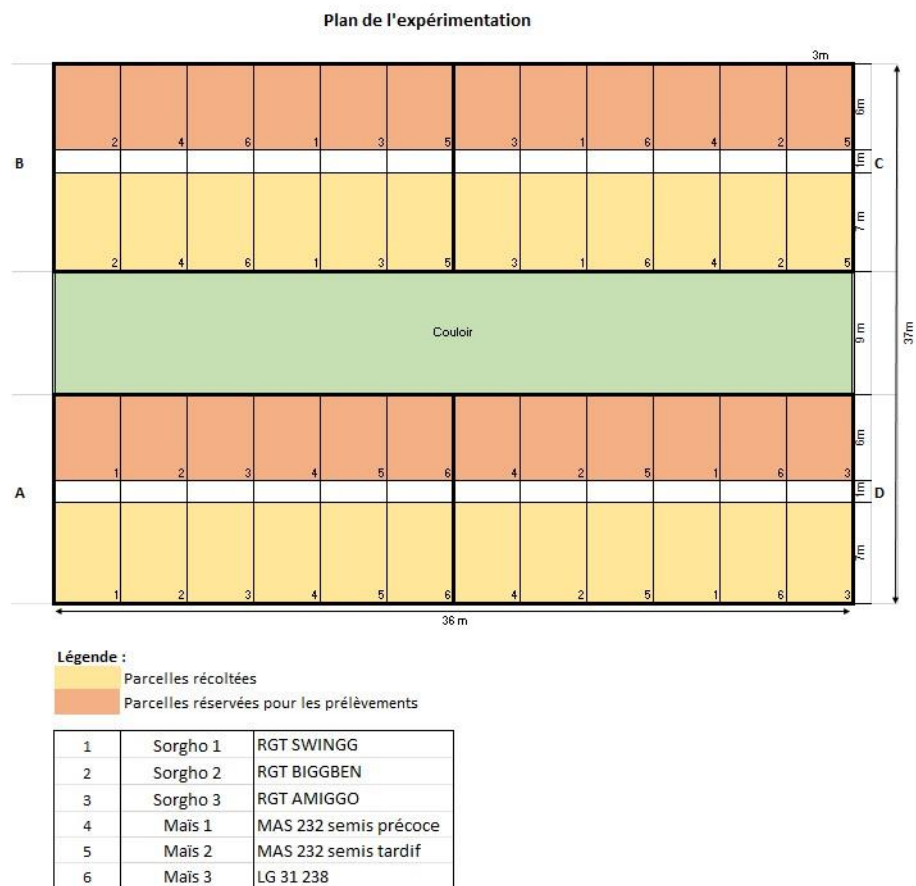


Figure 15 : Plan expérimental d'un site de 36m sur 37m avec 4 répétitions (A,B,C,D), 6 géotypes (1,2,3,4,5,6), une zone de récolte (jaune) et une zone de prélèvement (orange)

5. Itinéraire phytotechnique

5.1. Travail du sol

A Chaumont, un labour d'hiver a été effectué avec une préparation superficielle du sol (5-6 cm), juste avant le semis. La terre précédente était nue.

A Vieusart, il n'y a pas eu de labour mais plutôt une préparation du sol en profondeur (15 cm) avant le semis. Un couvert a été détruit sans récolte entre la culture de froment et l'essai sorgho/maïs.

5.2. Fertilisation

En fonction des analyses de sol préliminaires, différentes doses d'azote ont été apportées en fonction du site. Etant donné que le maïs demande plus d'azote que le sorgho, la dose minimale a été appliquée sur l'ensemble de l'essai mécaniquement et le complément a été ajouté à la main sur les parcelles de maïs.

A Chaumont, 100 UN ont été ajoutées aux parcelles de sorgho et 125 UN, aux parcelles de maïs. A Vieusart, 73 UN ont été ajoutées aux parcelles de sorgho alors que 98 UN ont été nécessaires pour les parcelles de maïs. Ces deux applications ont eu lieu le 7 juin 2021.

5.3. Semis

Comme expliqué précédemment, un premier semis a été effectué le 17 mai pour la variété de maïs MAS 232. Un deuxième semis a eu lieu le 1^{er} juin pour l'ensemble des variétés. Les semis ont été décalés par rapport à la normale, en raison des températures trop fraîches.

La densité de semis était de 95 200 semences/ha pour le maïs et de 205 100 semences/ha pour le sorgho pour pallier son faible taux de germination.

5.4. Désherbage

Deux désherbages ont été effectués.

Le premier désherbage est chimique et a été appliqué le 3 juin 2021. Le premier semis de maïs était déjà au stade 3 feuilles lors de ce traitement, alors que les autres parcelles étaient au stade pré-émergence pour les sorghos comme pour les maïs. Le produit appliqué est un mélange de Callisto (0,7 l/ha) et de Gardo Gold (2 l/ha). Callisto est un herbicide sous forme de suspension concentrée contenant 100 g/l de mésotrione (Phytoweb, 2015b). Gardo Gold est également un herbicide sous forme de suspension concentrée mais à base de s-métolachlore (312.5 g/l) et de terbuthylazine (187.5 g/l) (Syngenta, s. d.).

Le deuxième désherbage a été réalisé, plus tard, le 10 juillet, à la main, pour retirer les chénopodes et mours restants.

5.5. Récolte

La récolte à Chaumont a eu lieu le 5 octobre 2021 et à Vieusart, elle s'est déroulée le 22 octobre 2021, à l'aide d'une ensileuse SF 2000 Baural, adaptée aux petites parcelles. L'ensileuse a récolté les rangées 2 et 3 en excluant les rangées extérieures pour ne pas biaiser les résultats avec des effets de bords. La récolte était directement broyée et un échantillon était prélevé dans la cabine. Une partie de cet échantillon était destinée aux contrôles liés à la qualité (VEM, teneur en amidon...), l'autre, à la pesée pour estimer le rendement. Ces échantillons ont été placés dans des sacs microperforés. Un échantillon frais pèse environ 800 g pour être le plus représentatif possible de la parcelle.

6. Mesures

6.1. Mesures du sol

Les mesures en laboratoire concernant le sol ont été effectuées au Centre provincial de l'Agriculture et de la Ruralité à la Hulpe. Il y a eu deux périodes d'analyses :

- Avant le semis, le 30/03/21
- Après la récolte, à Chaumont le 12/10/21, à Vieusart le 27/10/21

6.1.1. Analyse granulométrique et chimique de sol

Un échantillon par site a été effectué le 30/03/21. Il contient de la terre prélevée à 25 cm de profondeur, à plusieurs endroits du site. Le volume est estimé à 400 cm³ de terre. Le pourcentage d'argile/limon/sable a été déterminé avec précision ainsi que l'acidité, l'indice de battance, le carbone organique et l'humus. La composition en élément (P, K, Mg, Ca, N) a également été déterminée afin de conseiller le type et la quantité de fumure à appliquer.

6.1.2. Analyse de l'azote

L'analyse de l'azote a eu lieu avant et après la culture. L'azote total dans le sol, le pourcentage de matière sèche, l'azote nitrique (mg N-NO₃/l) et (kg N-NO₃/ha) ont été déterminés pour trois profondeurs (0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm). De la même manière que pour l'analyse ci-dessus, des prélèvements ont été effectués le 30/03/21 de manière aléatoire sur le site, à différentes profondeurs, pour obtenir un volume de +/- 400 cm³ de terre par profondeur.

La deuxième période d'analyse a eu lieu après la récolte. Comme les cultures étaient différentes en fonction de la parcelle, chacune des 24 parcelles a été analysée séparément. Toutes ces informations seront nécessaires pour établir le bilan azote. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une tarière de 2 cm de diamètre et de 90 cm de profondeur. Trois sachets plastiques pour chaque parcelle permettaient de séparer les trois profondeurs. Chaque échantillon contenait +/- 94 cm³ de terre. Nous avons 72 échantillons.

6.2. Mesures sur la plante

6.2.1. Pourcentage de levée

Le comptage des plantes levées permet de déterminer la vigueur de la semence lors de la germination (Figure 16). Afin de déterminer cette capacité, il a été nécessaire de compter la deuxième et troisième rangée de chaque partie de parcelle prévue pour la récolte. La première et quatrième rangée ne sont pas comptées pour éviter un effet de bordure pouvant modifier le résultat. Le comptage a été effectué le 19 juin.



Figure 16 : Parcelle à Chaumont
le 19 juin 2021

6.2.2. Teneur en chlorophylle

La teneur en chlorophylle de la plante renseigne l'agriculteur sur l'état de la culture par rapport à l'eau et l'azote. Si un déficit est détecté, il peut être dû à un manque en éléments nutritifs, à la présence de stress environnementaux (lumineux, hydrique...) ou à l'application d'un herbicide. Une fois cela détecté, l'agriculteur peut alors agir avec un complément en éléments nutritifs ou azotés.



Figure 17 : Chlorophyllomètre CCM200plus (ADC BioScientific Ltd, 2017)

L'appareil utilisé est le chlorophyllomètre CCM200plus de ADC BioScientific Ltd (Figure 17). Cet outil donne un indice lié à la teneur en chlorophylle, en quelques secondes. Ce type d'instrument est non destructif, contrairement au spectrophotomètre qui nécessite de broyer l'échantillon afin de mesurer l'absorbance (ADC BioScientific Ltd., 2017). Il fonctionne en mesurant l'absorbance à deux longueurs d'onde différentes : 653 nm (le rouge) et 931 nm (l'infra-rouge) (Equation 2).

$$\text{Index lié à la teneur en chlorophylle} = \frac{\% \text{ transmission } 931 \text{ nm}}{\% \text{ transmission } 653 \text{ nm}}$$

Equation 1 : Ratio de l'indice lié à la teneur en chlorophylle

La chlorophylle a une grande capacité d'absorption dans le bleu et dans le rouge mais l'absorbance dans le vert et dans l'infra-rouge est très faible. La mesure relative à

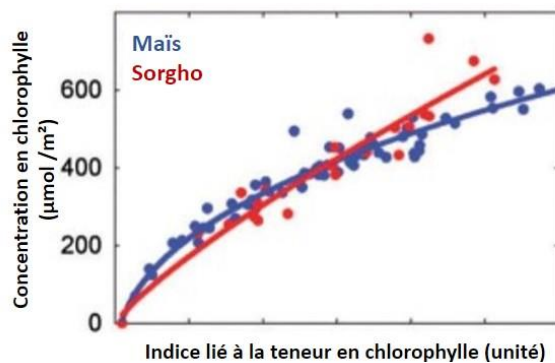


Figure 18 : Relation entre l'indice lié à la teneur en chlorophylle et la concentration en chlorophylle dans les feuilles des sorghos et maïs (Parry et al., 2014)

l'absorbance dans le rouge donne des informations liées la quantité de chlorophylle présente dans la feuille alors que la mesure dans l'infra-rouge informe sur la structure des cellules. Après avoir maintenu le capteur de 1 cm de diamètre sur le limbe, une mesure avec une résolution de 0,01 unité s'affiche sur l'écran et s'enregistre. Cette mesure l'indice lié à la teneur en chlorophylle et traduit l'intensité des

pigments verts présents dans la feuille. Cependant, la relation qu'il existe entre cet indice et la concentration en chlorophylle de la feuille n'est pas linéaire (Parry et al., 2014). Cette

relation varie d'une espèce à une autre et même parfois à l'intérieur de l'espèce, c'est pourquoi nous gardons l'unité de l'indice lié à la chlorophylle (Figure 18) (Parry et al., 2014).

Afin de sélectionner la méthode de mesure la plus intéressante, deux périodes de mesures ont eu lieu. La première a été réalisée le 13/08/21 sur une seule parcelle afin d'optimiser le protocole. Différents tests comprenant différentes positions sur la plante ont été réalisés sur les deux sites (Figure 20). Avec ces résultats, une position standardisée a été définie pour l'appliquer à l'ensemble des parcelles, lors des mesures du 9/10/21.

La première série de mesures expérimentales n'a pas repris toutes les parcelles par manque de ressource temps. Elle a donc concerné la variété de maïs semée aux deux dates (MAS 232) et deux variétés de sorgho (RGT BIGGBEN et RGT AMIGGO) sur le bloc A, des deux sites. Pour chacune des positions (Figure 19), dix répétitions ont été effectuées par variété et par site. Au total, nous avons fait 480 mesures. Les deux sorghos choisis se distinguent l'un de l'autre par leur taille. Trois hypothèses ont été testées.

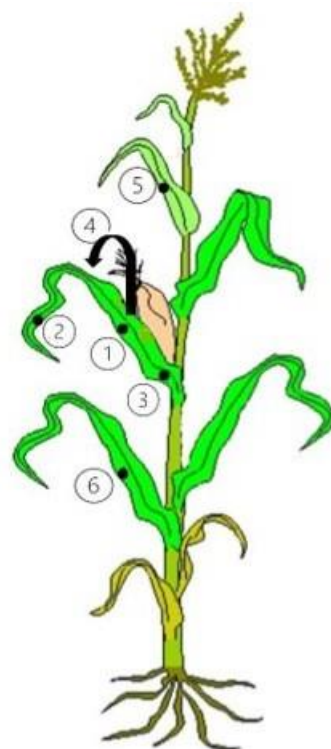


Figure 19 : Les différentes positions des mesures préliminaires liées à la chlorophylle

6.2.2.1. Test d'hypothèse 1

La première hypothèse teste l'effet de la position de la mesure sur la face supérieure de la feuille la plus développée. Nous avons sélectionné trois positions. La position 1 se trouve au milieu de la longueur de la feuille, entre la nervure centrale et le bord du limbe. La position 2 se situe à son extrémité supérieure et la position 3 se trouve à sa base, toujours à mi-distance entre la nervure centrale et le bord du limbe (Figure 19). Pour le maïs, la feuille la plus développée est systématiquement accolée à l'épi. Pour le sorgho, cette feuille est différente en fonction de la variété. Elle correspond à la huitième feuille apparente pour la variété RGT BIGGBEN et à la sixième ou septième feuille apparente pour la variété RGT AMIGGO.

6.2.2.2. Test d'hypothèse 2

La deuxième hypothèse teste l'effet de la face – supérieure ou inférieure – de la feuille la plus développée sur la mesure. La position 1 du test précédent est donc réutilisée et comparée à la position 4 qui se trouve au même endroit que la position 1 mais sur la face inférieure (Figure 19).

6.2.2.3. Test d'hypothèse 3

La troisième hypothèse s'intéresse au numéro d'ordre des feuilles. La feuille la plus développée sera prise comme référence. La deuxième feuille au-dessus (position 5) et la

deuxième feuille en dessous (position 6) de celle-ci sont également mesurées au milieu de la feuille dans sa longueur et au milieu du limbe sur la face supérieure.

Après analyse des résultats (détaillés dans la partie suivante), la position 1 a été choisie pour la deuxième série de mesures sur toutes variétés, parcelles et blocs. C'est la position qui répondait le mieux aux critères requis. Elle est représentative de la plante, sensible aux variétés et aux sites, et possède une variabilité correcte.

La deuxième série de mesures n'a pu être effectuée que sur le site de Vieusart car le site de Chaumont a dû être récolté plus tôt. Nous avons pris 10 mesures pour chaque variété dans chaque bloc du site de Vieusart. En tout, nous avons fait 240 mesures.

6.2.3. Surface foliaire

La surface foliaire a été mesurée grâce à un scanner LI-3100c Area Meter de la marque LI-COR (Figure 20). Cet instrument est muni de deux tapis roulants transparents actionnés par un moteur facilitant la mesure de nombreuses feuilles à la chaîne. L'appareil est capable de sommer toutes les feuilles pour donner la surface foliaire totale de la plante.



Figure 20 : Scanneur LI-3100c Area Meter (LI-COR)

Le scanneur est capable d'aplatir les feuilles afin de mesurer également les feuilles enroulées qui n'ont pas terminé leur développement. Bien que les mesures aient été prises en fin de saison, certaines feuilles n'avaient pas atteint leur stade final. Ce stade est visible grâce à l'apparition de la ligule délimitant le limbe et la gaine. Un autre problème concerne les feuilles en sénescence. La surface étant endommagée, le résultat manque de précision et est sous-estimé.

Toutes ces mesures ont été effectuées sur les deux sites, sur toutes les variétés, sur 3 blocs et avec à chaque fois 3 répétitions. Le bloc A bénéficie de mesures pour chaque feuille individuellement. Etant donné le temps de travail conséquent, seule la somme totale des feuilles a été mesurée.

6.2.4. Nombre de talles

Contrairement à nos variétés de maïs, nos variétés de sorgho tallent (Figure 21). Une talle est une tige adventice partant du collet de la plante. Au début de la croissance, plusieurs talles



Figure 21 : Pied de sorgho à 4 talles (la tige principale + 4 talles)

peuvent se développer chez le sorgho. Par la suite, une tige principale va se démarquer, certaines talles continueront leur croissance et les autres plus chétives perdront de leur biomasse. Différents facteurs génétiques et environnementaux influencent le nombre de talles : variété, densité de semis, fertilisation, température, lumière ...

Nous avons compté le nombre de talles de chaque plante dans les rangées 2 et 3 pour éviter l'effet couloir. Les mesures ont été effectuées le 27/09/2021 une fois que la plante était assez développée et le nombre de talles stabilisé. Cependant, lorsque la densité des plantes est élevée, il est parfois difficile de différencier une talle d'une nouvelle plante.

6.2.5. Hauteur des plantes

La hauteur des plantes a été mesurée sur dix plantes par variété et uniquement sur le bloc A, juste avant la récolte, le 9/10/2021. Nous avons utilisé un mètre pour mesurer du collet jusqu'à l'extrémité de l'inflorescence terminale. En raison de la récolte précipitée du site de Chaumont, ces mesures n'ont pas pu être effectuées sur ce site.

6.2.6. Pourcentage de verse

La verse est un phénomène qui plie les tiges et peut coucher les plantes au sol. Il peut y avoir différentes raisons à cela : des précipitations importantes, du vent violent, un excès d'azote, une variété sensible à la verse, des mauvaises pratiques culturales, un semis trop dense... Le choix de nos variétés tenait compte de la résistance à la verse mais cela n'a pas toujours suffi. Par convention, nous avons considéré que la plante avait versé quand celle-ci était inclinée à 45° ou plus. Un simple comptage du nombre de plantes versées dans les rangées 2 et 3 était suffisant pour déterminer le pourcentage de verse. Cela a été effectué le 9/10/2021 avant la récolte à



Figure 22 : Verse de la variété de sorgho RGT AMIGGO à Vieusart le 9/10/2021

plus. Un simple comptage du nombre de plantes versées dans les rangées 2 et 3 était suffisant pour déterminer le pourcentage de verse. Cela a été effectué le 9/10/2021 avant la récolte à

Vieusart mais nous n'avons pas pu le faire à Chaumont en raison des récoltes anticipées (Figure 22).

6.2.7. Mesures sur les racines des plantes

Le système racinaire du sorgho est fort différent de celui du maïs. Il peut aller jusqu'à 2 m de profondeur pour puiser l'eau et les nutriments alors que les racines du maïs ne vont jusqu'à 0,9 m de profondeur. L'étude du nombre et du poids des racines dans un volume de sol peuvent donner de nombreuses explications sur l'état de la plante (Figure 23).



Figure 23 : Echantillon d'une carotte de terre avec une racine de maïs

6.2.7.1. Carottage

Nous avons prélevé des carottes de terre à trois profondeurs différentes :



Figure 24 : Echantillonnage des carottes de terre sur le terrain, tarière à l'horizontale.

- 0-30 cm
- 30-60 cm
- 60-90 cm

Ce travail a été effectué avec une tarière de 2 cm de diamètre actionnée par un tracteur à 10-15 cm des résidus de plante dans l'inter-rang (Figure 24). Les nombreuses pierres présentes à Chaumont ont rendu la tâche difficile. La tarière se bloquait et il fallait recommencer la mesure. Un contrepoids était souvent souhaitable pour aider la machine. Une fois que la tarière était enfoncée, nous retirions la terre 30 cm par 30 cm en la vidant dans trois seaux différents avant de vider ces derniers dans des sachets. Chaque sachet étiqueté contenait deux volumes de terre de la même profondeur pour obtenir $188,49 \text{ cm}^3$ de terre.

6.2.7.2. Nombre de racines

Afin de mesurer le nombre de racines présentes dans une carotte à différentes profondeurs, nous avons initialement envisagé d'utiliser la méthode de "core-break". Celle-ci consiste à casser perpendiculairement la carotte à la main sur différents niveaux et compter ainsi les racines sortant de la section de la carotte. Cependant, cette méthode n'a pas pu être utilisée par manque de temps et à cause de la texture du sol. Nous avons imaginé d'enrouler les carottes avec du papier cellophane pour avoir le temps d'effectuer les mesures au laboratoire

mais le sol étant composé de sable, les carottes ne tenaient pas en place. La méthode “core-break” est plutôt applicable sur un sol à teneur en argile suffisamment élevée.

Nous en sommes donc venue à compter le nombre de racines présentes dans un certain volume de sol ($\pi * R^2 * l * 2 = \pi * 1^2 \text{ cm} * 30 \text{ cm} = 188,49 \text{ cm}^3$).

Les échantillons de terres contenant les racines ont été stockés 24 h dans la chambre froide avant de procéder au comptage à la main.

6.2.7.3. Poids des racines

Une fois les racines comptées, un lavage est nécessaire avant la mise en étuve. Nous avons sélectionné à la main les racines avant de les immerger dans une bassine d’eau afin d’éliminer la terre qui fausserait leur poids. Toutes les racines d’un même échantillon sont mises ensemble dans un sachet microperforé et étiqueté. Les sachets sont conservés, au besoin, en chambre froide le temps de libérer l’espace dans l’étuve, où ils sont placés 3 jours à 70°C pour sécher les échantillons. Une fois secs, ils sont pesés avec une balance de précision allant jusqu’au milligramme.

A Chaumont, les échantillons ont été prélevés le 11/10/21, comptés le 14/10/21 et pesés le 20/10/21. A Vieusart, les échantillons ont été prélevés le 27/10/21, comptés le 28-29/10/21 et pesés le 2/11/21.

6.2.8. Contrôle qualité

Afin d’analyser la qualité des échantillons de plantes, ceux-ci sont mis à l’étuve pendant 3 jours à 70°C puis sont broyés trois fois avec des tamis de calibres différents pour assurer un mélange le plus homogène possible. Le broyeur, Cyclotec type 1093, possède des mailles de 1 mm. La machine Retsch PK1000 à tubes rotatifs prélève un sous-échantillon représentatif de l’échantillon. La rotation du tube récoltant les résidus de plantes à intervalles réguliers favorise un test de qualité.

6.2.8.1. Spectroscopie

Les échantillons sont ensuite envoyés au laboratoire du CRA-W pour effectuer une spectroscopie en proche infra-rouge. Cette méthode est rapide, non destructive et mesure qualitativement et quantitativement les principaux paramètres du produit récolté : valeur énergétique, matières protéiques totales, cellulose, amidon...

L’échantillon séché et broyé (1 mm) est analysé sous spectromètre pour en sortir son profil spectral. Nous obtenons un graphe d’absorbance en fonction des différentes longueurs d’onde. Cette méthode de dosage est indirecte car elle se réfère ensuite à des droites d’étalonnage, par produit et par constituant, mises au point par des méthodes de référence utilisant la chimie. En fonction de l’absorbance mesurée, nous pouvons déterminer le pourcentage des constituants majeurs.

6.2.8.2. Valeur énergétique

La valeur énergétique est donnée en VEM (Voeder eenheid voor melk) par kg de matière sèche. Un VEM contient autant d'énergie que celle contenue dans 1 g d'orge (1,65 kcal). En obtenant la teneur en amidon de la céréale avec la spectroscopie, nous pouvons connaître ainsi la valeur énergétique par kg de matière sèche.

6.2.8.3. Rendement en matière sèche

Dans le but de comparer les variétés, entre elles, il est intéressant de mesurer le rendement pour estimer la rentabilité de la récolte. Le rendement se calcule via l'équation suivante :

$$\text{Rendement frais (t/ha)} = \frac{\text{Poids frais} * 13333}{\text{Longueur récoltées} * 1000}$$

Avec : *Equation 2 : Le rendement frais (t/ha)*

- Poids frais de l'échantillon des plantes entières (kg)
- 13333 = Coefficient correspondant à la densité des rangées (m/ha)
- Longueurs récoltées (m)
- 1000 = facteur pour convertir les kg en tonnes

Le rendement est également donné en poids sec. Il suffit de multiplier le taux de matière sèche par le rendement frais pour obtenir le rendement en poids sec (t/ha).

7. Bilan d'azote et efficience de l'utilisation de l'azote

Avec toutes les données récoltées, nous pouvons établir l'efficience de l'utilisation de l'azote par les plantes et le bilan d'azote avant et après la culture.

$$NUE [MS/N] = \frac{\text{Matière sèche de la plante [kg MS/ha]}}{(\text{Azote du sol avant la culture} + \text{fertilisant azoté}) [kg N/ha]}$$

Equation 3 : Efficience agronomique d'utilisation de l'azote - Nitrogen Use Efficiency (NUE)

$$\text{Bilan azote} = N_{\text{initial}} - N_{\text{final}} + N_{\text{ferti}} - N_{\text{exporté}} - N_{\text{racine}} + N_{\text{min}} + N_{\text{perdu}} + N_{\text{fixé}}$$

Equation 4 : Bilan d'azote [kg N/ha]

Avec :

- N_{initial} = l'azote du sol avant la culture [kg N/ha]
- N_{final} = l'azote du sol après la culture [kg N/ha]
- N_{ferti} = l'azote minéral apporté avec la fertilisation [kg N/ha]
- $N_{\text{exporté}}$ = l'azote exporté par la plante [kg N/ha]
- N_{racine} = l'azote présent dans les racines [kg N/ha]
- N_{min} = l'azote minéralisé à partir de l'humus du sol [kg N/ha]
- N_{perdu} = l'azote perdu par ruissèlement, lixiviation et volatilisation [kg N/ha]
- $N_{\text{fixé}}$ = l'azote apporté par les retombées atmosphériques [kg N/ha]

En partant de l'équation ci-dessus, nous avons établis des estimations pour arriver à une nouvelle équation simplifiée et critiquable. L'azote ruisselé est négligé car nos deux sites sont plats et homogènes. L'azote volatilisé est également négligé car nous estimons qu'il est égal aux retombées atmosphériques et que la fertilisation avec de l'ammonitrate est la forme qui entraîne le moins de pertes sous cette forme (Arvalis et al., 2022). L'azote lessivé n'est pas calculé car il est impossible de faire des estimations sur cette valeur qui varie en fonction de l'azote présent dans le profil. Cette donnée n'est certainement pas négligeable vu la quantité de précipitations de l'été 2021. Des mesures de l'azote lessivé pendant la saison 2021 sur des sols nus similaires aux nôtres ont été tentées mais il est tellement descendu dans l'horizon à cause des précipitations, qu'il était trop profond pour être mesuré. Pour éviter des estimations erronées, nous avons préféré ne pas l'intégrer au bilan et critiquer nos résultats (De Toffoli, 2022). L'azote minéralisé a été calculé en faisant l'hypothèse que 1% d'humus présent dans le sol libérait 40 UN entre le 1 mai et le 30 septembre. L'azote du sol avant la culture ne tient compte que des deux premières couches de sol car nous supposons que l'azote présent dans la dernière couche de sol sera lessivé avant que la plante ne développe des racines capables de l'atteindre. Pour terminer, l'azote présent dans les racines représente 20% de la biomasse de la plante (Thomas & Archambeaud, 2013). L'équation simplifiée du bilan d'azote est la suivante :

$$Bilan\ azote = N_{initial} - N_{final} + N_{ferti} - N_{exporté} - N_{racine} + N_{min}$$

Equation 5 : Bilan d'azote simplifié [kg N/ha]

8. Analyses statistiques

Les traitements statistiques des multiples données sont analysés sur le logiciel R studio via les méthodes du cours « Biométrie » LBIRA2101 et du cours « Complément de biométrie et plan expérimentaux » LBRAI2222 donnés par les professeurs B. Govaerts et X. Draye.

8.1. Moyenne, écart-types et erreur standard

Pour chaque mesure effectuée, nous mesurons les moyennes, les écarts types et les erreurs standards des variétés, des espèces et/ou des sites. Les formules ci-dessous ont été utilisées :

Où

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - \mu)^2}{n}} \quad SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

- μ = la valeur moyenne des résultats
- n = le nombre de mesures effectuées pour l'analyse
- xi = le résultat obtenu pour la mesure i
- σ = l'écart-type lié à la moyenne
- SE = l'erreur standard

8.2. Analyse de la variance

Si nous avons un facteur quantitatif et un facteur catégoriel, nous allons utiliser une analyse de la variance à un critère de classification (ANOVA I) dont le modèle peut s'écrire de la sorte :

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \text{ avec } \sum \alpha_i = 0 \text{ et } i = 1, \dots, m \text{ et } j = 1, \dots, n_i$$

Où

- Y_{ij} = la réponse quantitative du traitement i et de l'observation j
- μ_i = le résultat moyen attendu pour le traitement i
- ε_{ij} = l'erreur résiduel entre l'observation j avec le traitement i et la moyenne μ ($\varepsilon_{ij} \sim iN(0, \sigma^2)$)
- μ = la moyenne générale de la population des échantillons
- α_i = l'effet du traitement i , exprimé en différence de la moyenne générale

Une analyse de la variance (ANOVA) est nécessaire pour chaque type de mesure afin de vérifier si les moyennes peuvent être considérées comme égales avec l'hypothèse nulle. Si les variances entre moyennes des traitements différents sont trop élevées, alors l'hypothèse nulle est rejetée par le test de Fisher :

$$\begin{aligned} H_0 &= \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \\ H_1 &= \text{non } H_0 \end{aligned}$$

Si le test de Fisher obtient une p.valeur inférieure à 0.05, alors l'hypothèse nulle est rejetée. A l'inverse, nous acceptons H_0 .

Le test d'ANOVA peut être réalisé si il respecte au moins trois conditions. Premièrement, les observations doivent être indépendantes. Deuxièmement, les résidus doivent respecter la normalité. Pour ce faire, un QQplot est réalisé. Troisièmement, les variances doivent être homogènes. Un test de Levene peut vérifier ce dernier critère.

Etant donné que nous avons des données continues et des données catégorielles, nous allons souvent utiliser une ANOVA I, une ANOVA II ou une ANOVA III en fonction du nombre de facteurs catégoriels. Ces données catégorielles peuvent être : la profondeur (0-30cm, 30-60cm, 60-90cm), le génotype des plantes (6 génotypes), l'espèce des plantes (maïs ou sorgho) ou le bloc de répétition (A, B, C, D).

8.3. Modèle RCBD mixte hiérarchisé

Le modèle utilisé pour analyser les données de nos essais est le suivant :

$$y_{ijm} = \mu + \alpha_i + b_j + c_{m(j)} + \epsilon_{ijm}$$

Avec :

- y_{ijm} : la réponse quantitative du génotype i du site j et du bloc m
 - μ : la moyenne générale de la population des échantillons (fixe)
 - α_i : l'effet du génotype i , exprimé en différence de la moyenne générale (fixe)
 - b_j : l'effet du site j , exprimé en différence de la moyenne générale (aléatoire), $b_j \sim iN(0, \sigma_b^2)$
 - $c_{m(j)}$: l'effet du bloc m hiérarchisé au site j (aléatoire), $c_m \sim iN(0, \sigma_c^2)$
 - ϵ_{ijm} : l'erreur résiduelle (aléatoire) entre la valeur observée y_{ijm} et la valeur attendue, $\mu + \alpha_i + b_j + c_{m(j)}$ du génotype i , du site j et du bloc m , $\epsilon_{ijm} \sim iN(0, \sigma^2)$
- $i = 1 \dots 6$
 $j = 1 \text{ ou } 2$

Nous faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas d'interaction ni entre le facteur « bloc » et le facteur « génotype », ni entre le facteur « site » et « génotype », ni entre les facteurs « bloc », « génotype » et « site ». Nous avons choisi de mettre les facteurs « Site » et « Bloc hiérarchisé au site » en aléatoire car nous nous intéressons à la moyenne μ de l'ensemble des niveaux possibles des facteurs et à l'amplitude de variation entre les niveaux des facteurs. Pour calculer la moyenne des sites, il est nécessaire de refaire tourner le modèle avec le facteur « Site » considéré comme fixe.

Pour chaque type de mesure, la significativité des paramètres est testée en comparant le modèle complet, avec ce paramètre, au modèle restreint, sans ce paramètre. Si le modèle explique mieux la réponse sans ce paramètre, alors il n'est pas significatif. Cependant le paramètre non significatif n'est pas forcément retiré du modèle car une part de la variabilité liée à ce paramètre ira alors gonfler la variabilité résiduelle, ce qui n'est pas notre but. C'est, en effet, ce qui était constaté pour le facteur « Bloc hiérarchisé à site ». Comme les sites étaient homogènes, il n'y avait pas de différence significative entre blocs.

Le test de Tukey nous permet de comparer deux à deux les traitements. Ce test réalise des tests multiples et procède donc à une correction de la p-valeur pour tenir compte de la multiplicité. Les p-valeurs sont plus grandes qu'un test simple et nous rejetons moins facilement l'égalité des moyennes. D'autres contrastes nous ont permis de mesurer la moyenne des maïs et la moyenne des sorghos ou de comparer d'autres mesures entre elles. Tous les graphes représentés sont des boxplots. Plus le boxplot est grand, plus la variance est importante entre les mesures. Il est donc préférable d'obtenir de petits boxplots.

Troisième partie : Résultats

Afin de ne pas alourdir le texte et les légendes des figures, nous parlerons de six génotypes alors qu'en réalité cinq génotypes sont étudiés, dont l'un est semé à deux dates différentes.

1. Effet du génotype et du site sur le pourcentage de levée des plantes

Le test de l'ANOVA III montre que les facteurs « génotype » et « site » sont significatifs mais le facteur « bloc hiérarchisé au site » n'est pas significatif. Le pourcentage moyen de levée est significativement plus élevé ($p.valeur = 0,008$) pour le site de Chaumont ($87,2 \pm 1,41\%$) que pour le site de Vieusart ($81,9 \pm 1,41\%$) (Figure 25). Nous remarquons surtout que le pourcentage moyen de levée pour les maïs ($99,2 \pm 1,24\%$) est significativement supérieur ($p.valeur < 0,0001$) à celui des sorghos ($69,9 \pm 1,24\%$). Les pourcentages moyens de levée pour le sorgho 1 et pour le sorgho 3 sont respectivement de $76,8 \pm 1,93\%$ et de $63,6 \pm 1,93\%$, et la différence est significative ($p.valeur = 0,0059$). Il n'y a pas de différence significative entre les variétés de maïs.

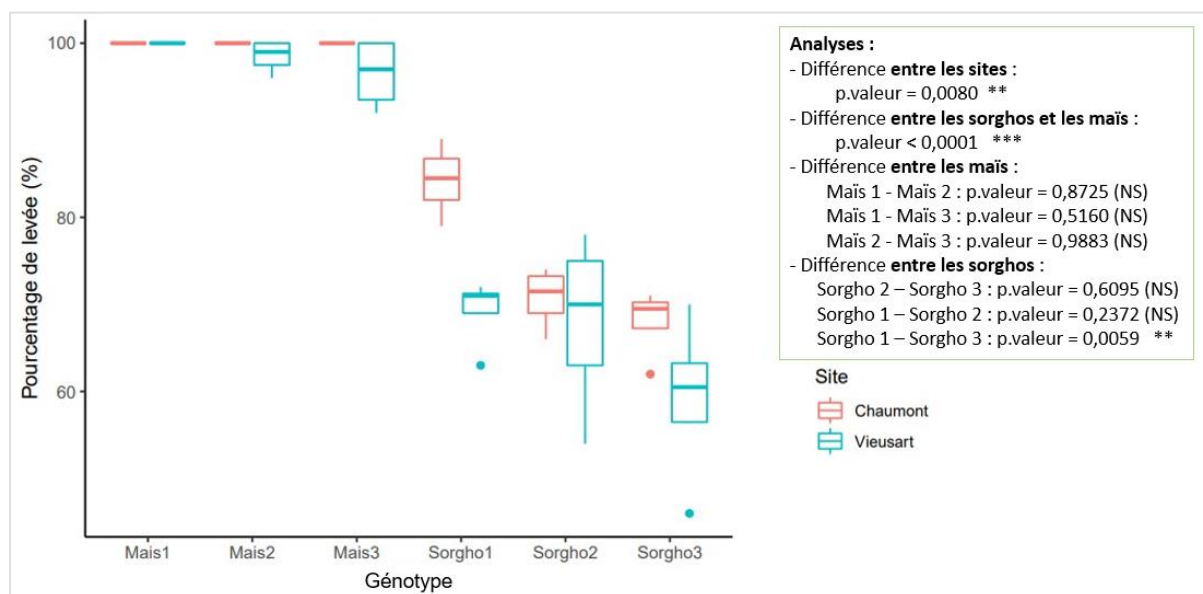


Figure 25 : Pourcentage de levée en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, 19/06/2021

2. Effet de la position de la mesure sur la plante par rapport à la teneur en chlorophylle

Pour rappel, une première série de mesures de l'indice de teneur en chlorophylle a été effectuée sur un seul site et quatre génotypes afin de déterminer la position idéale de prise de mesure. La position retenue a été ensuite appliquée à l'ensemble des génotypes ; elle devait l'être sur les deux sites mais la récolte prématurée à Chaumont y a rendu cette mesure impossible.

Comme expliqué auparavant, la position 1 se situe au centre du limbe de la feuille la plus développée, au milieu de sa longueur (Figure 19). Les positions 2 et 3 se situent sur cette même feuille mais respectivement au sommet et à la base de celle-ci. Les positions 5 et 6 sont similaires à la position 1 mais sont prises respectivement deux feuilles au-dessus et deux feuilles en dessous de la feuille la plus développée. La position 4 se trouve au même endroit que la position 1 mais sur la face inférieure de la feuille.

Après l'analyse des résultats liés aux trois hypothèses, nous avons eu des conclusions différentes :

- Pour le maïs, c'est la position sur une même feuille qui fait fortement varier l'indice lié à la teneur en chlorophylle. Le choix de la feuille importe peu. Nous pouvons le voir grâce aux positions 1, 2 et 3 (Figure 26).
- Pour le sorgho, au contraire, c'est le choix de la feuille qui fait le plus varier l'indice lié à la teneur en chlorophylle. La position sur une même feuille influence peu la valeur. Nous l'observons grâce aux positions 1, 5 et 6 (Figure 26).
- Les mesures prises sur la face supérieure et inférieure de la feuille sont semblables. En effet, les résultats sur les positions 1 et 4 sont fort similaires (Figure 26).

Afin de pouvoir comparer les plantes entre elles, il faut cependant choisir la même position pour les deux espèces. Cette position doit répondre à certains critères :

- Elle doit être représentative de la plante
- Elle doit être sensible aux différences entre variétés, entre espèces et entre sites.
- Elle doit avoir une variance la plus faible et la plus constante possible.

Plusieurs suggestions ont été imaginées en fonction des caractéristiques souhaitées :

➤ **Première suggestion : la position 5**

C'est la position qui possède les variances les plus faibles et les plus constantes (Figure 26). Cependant, elle n'est pas du tout représentative de la plante de sorgho : les valeurs de l'indice lié à la chlorophylle sont très basses pour le sorgho, pour cette position. De plus, cette position ne reflète pas la différence entre les sites. Elle ne pourra pas être utilisée pour la deuxième série de mesures.

➤ **Deuxième suggestion : la position 1 ou 2**

Les positions 1 et 2 attirent l'attention grâce à leur sensibilité aux variétés et aux sites (Figure 26). Un changement de la variété ou du site impacte significativement l'indice lié à la teneur en chlorophylle mais cet impact est plus faible pour le sorgho. Nous allons écarter la position 2 car elle n'est pas représentative de la plante de maïs. En effet, ses valeurs sont systématiquement supérieures à la tendance générale du maïs. La position 1 reste en jeu.

➤ **Troisième suggestion : la position 1 ou 6**

La position 6 a le même effet sur le site que la position 1 mais elle ne fait pas apparaître de différence entre variétés (Figure 26). La position 6 est écartée.

➤ **Quatrième suggestion : la position 1 ou 4**

La position 4 est fort semblable à la position 1 car elles se situent toutes les deux de part et d'autre de la feuille, à une même distance du pétiole. Cependant, la position 1 est préférée à la position 4 car il est plus facile de mesurer la plante sur sa face supérieure.

La position 1, au milieu du limbe de la feuille la plus développée, a été retenue pour effectuer la deuxième série de mesure sur l'ensemble de la parcelle de Vieusart.

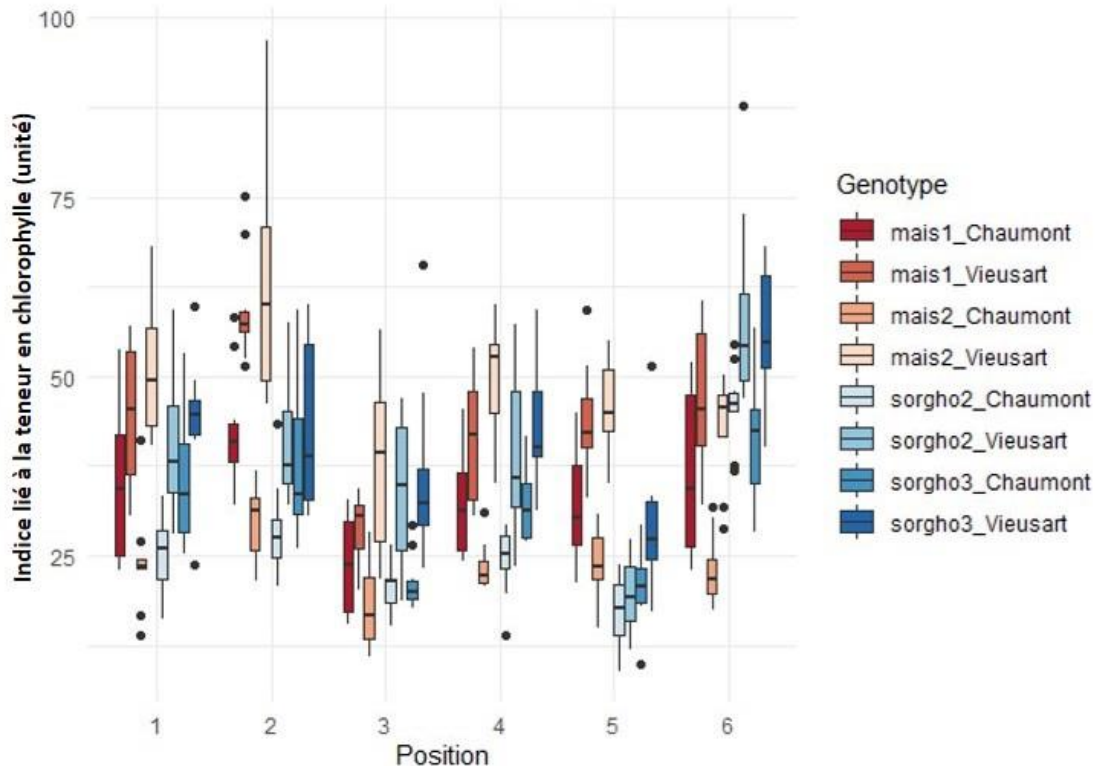


Figure 26 : Indice lié à la teneur en chlorophylle en fonction de la position de la mesure (de 1 à 6), du site et du génotype de sorgho ou de maïs, 13/08/2021

3. Effet du génotype sur l'indice lié à la teneur en chlorophylle de la plante sur la position 1, au centre du limbe du milieu de la feuille la plus développée

Le test ANOVA montre que ni l'effet « bloc » ni l'effet « bloc hiérarchisé à site » ne sont significatifs mais l'effet du génotype l'est. L'indice lié à la teneur moyenne en chlorophylle chez les maïs est de $40 \pm 1,16$ unités et de $44,8 \pm 1,16$ unités pour les sorghos et cette différence entre ces deux espèces est significative (p.valeur = 0,0095) (Figure 27). Les différences entre les génotypes visibles sur la figure se confirment avec les tests de Tukey. L'indice lié à la teneur en chlorophylle est significativement plus élevé (p.valeur < 0,0001) pour le maïs 3 ($49,9 \pm 2,02$ unités) que pour les maïs 1 ($36,7 \pm 2,02$ unités) et 2 ($33,4 \pm 2,02$ unités). De même, le sorgho 1 ($46,9 \pm 2,02$ unités) et le sorgho 2 ($50,1 \pm 2,02$ unités) ont des valeurs significativement plus élevées (p.valeur = 0,0003) que celles du sorgho 3 ($37,4 \pm 2,02$ unités).

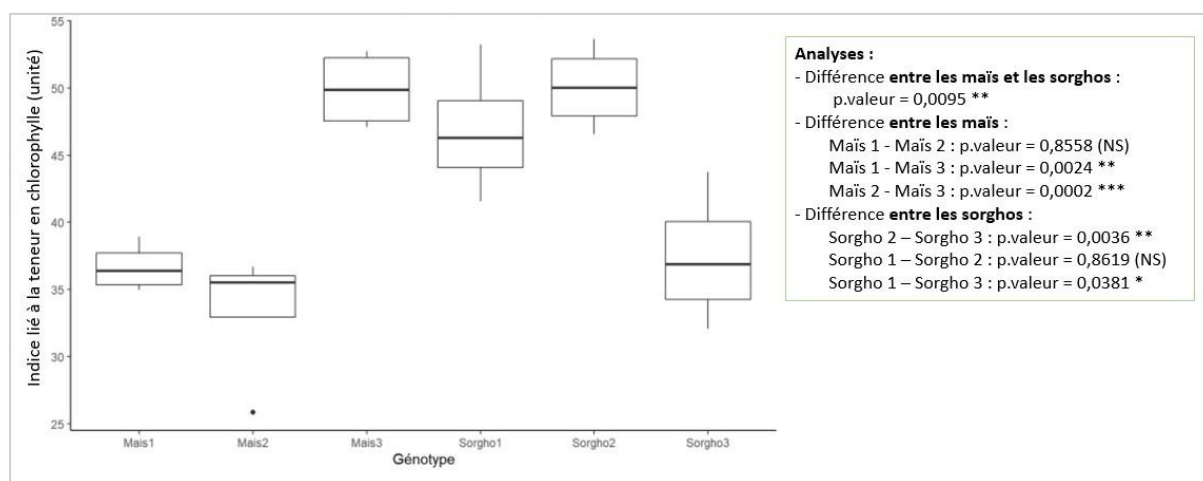


Figure 27 : Indice sur la teneur en chlorophylle en fonction du génotype de sorgho ou de maïs à Vieusart, 9/19/2021

4. Effet du génotype et du site sur la surface foliaire totale de la plante

L'ANOVA III indique que les effets du génotype et du site ont un effet significatif sur la surface foliaire totale à l'inverse du facteur « bloc hiérarchisé à site ». Selon le test de Tukey, la surface foliaire totale moyenne de la plante est significativement plus élevée (p.valeur = 0,0068) pour le site de Chaumont (3855 ± 179 cm²/plante) que pour le site de Vieusart (5156 ± 179 cm²/plante) (Figure 28). Pour la même mesure, la moyenne des maïs et la moyenne des sorghos valent respectivement 5010 ± 167 cm²/plante et 4002 ± 167 cm²/plante, et la différence entre ces deux espèces est également significative (p.valeur <0,0001). Il n'y a pas de différence significative entre les variétés de maïs. Les variétés de sorgho 2 (3360 ± 274 cm²/plante) et sorgho 3 (4715 ± 274 cm²/plante) se distinguent l'une de l'autre significativement (p.valeur = 0,0151) avec des valeurs plus élevées pour le sorgho 3.

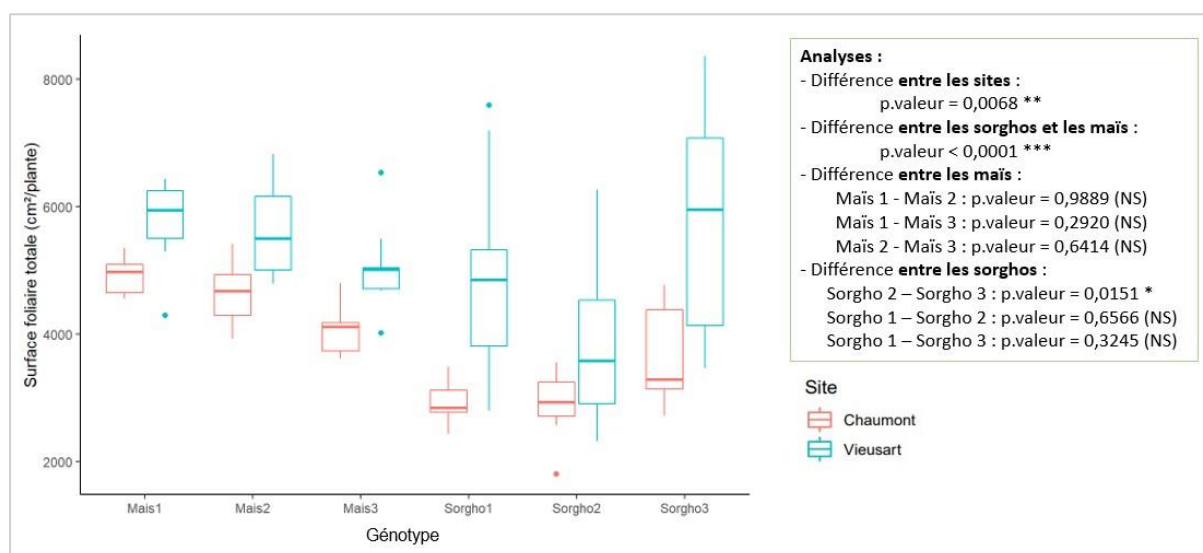


Figure 28 : Surface foliaire totale de la plante en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, 2/09/2021

5. Effet du génotype et du site sur la hauteur des plantes

Le test d'ANOVA I indique que les génotypes influencent de manière significative la hauteur des plantes à Vieusart. Le test de Tukey nous indique que la hauteur moyenne des plantes pour les maïs ($2,85 \pm 0,0528$ m) est significativement supérieure ($p.valeur < 0,0001$) à la hauteur moyenne des sorghos ($2,55 \pm 0,0343$ m) (Figure 29). Nous remarquons surtout que la hauteur des variétés de maïs est assez constante alors qu'il y a de grandes différences chez les sorghos. Le sorgho 1 ($1,9 \pm 0,0665$ m) et le sorgho 2 ($1,89 \pm 0,0665$ m) sont significativement différents ($p.valeur < 0,0001$) du sorgho 3 ($3,88 \pm 0,0421$ m).

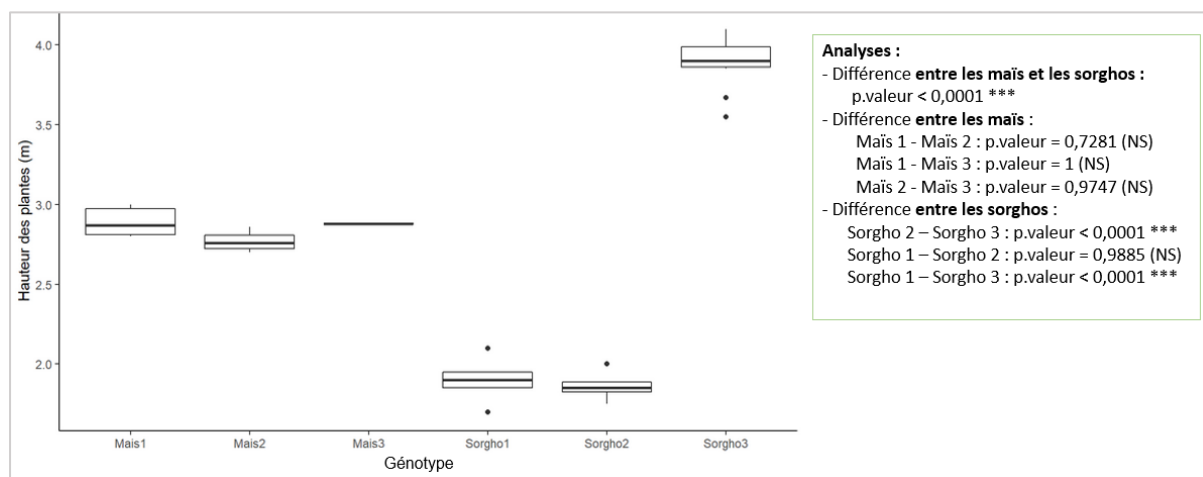


Figure 29 : Hauteur des plantes à la récolte en fonction du génotype de sorgho ou de maïs à Vieusart, 9/10/2021

6. Effet du génotype et du site sur le nombre de talles moyen de sorgho

Pour cette mesure, la tige principale a été considérée comme une talle. Le test d'ANOVA III nous indique que le facteur « génotype » et le facteur « bloc hiérarchisé à site » n'influencent pas significativement le nombre de talles moyen alors que le facteur « site » est significatif dans le modèle. Selon le test de Tukey, il est incontestable que la moyenne du nombre de talles par génotype de sorgho est significativement supérieure (p.valeur < 0,0001) sur le site de Vieusart ($2,4 \pm 0,0439$ talles) par rapport au site de Chaumont ($1,65 \pm 0,0439$ talles) (Figure 30). Il y a également significativement plus de talles (p.valeur = 0,0629) pour le sorgho 1 ($2,09 \pm 0,0466$ talles) que pour le sorgho 3 ($1,94 \pm 0,0466$ talles).

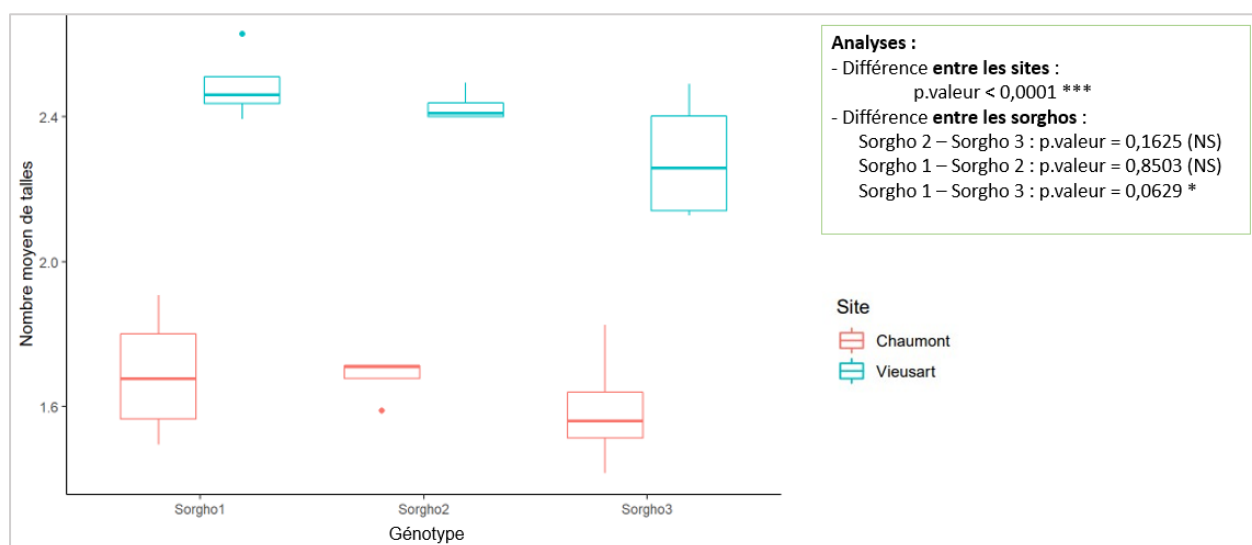


Figure 30 : Nombre moyen de talles en fonction du site et du génotype de sorgho, 27/09/2021

7. Effet du génotype sur le pourcentage de verse à la récolte

Le test d'ANOVA I nous indique que le facteur « génotype » influence significativement le pourcentage de verse à la récolte. Le pourcentage de verse est en fait très élevé pour le sorgho 3, alors qu'il est nul ou presque nul pour les deux autres sorghos et faible pour les maïs (Figure 31). La différence entre le pourcentage de verse moyen pour chaque espèce est significative (p.valeur = 0,0046). Le pourcentage moyen de verse pour les variétés de maïs varie de $8,648 \pm 3,99$ % pour le maïs 1, à $13,977 \pm 3,99$ % pour le maïs 2 et le test de Tukey nous montre qu'il n'y a pas de différence entre les variétés de maïs. Le résultat le plus intéressant, est le fait que le sorgho 1 ($0 \pm 3,99$ %) et le sorgho 2 ($0,862 \pm 3,99$ %) ont un pourcentage de verse moyen significativement plus faible (p.valeur < 0,0001) que celui du sorgho 3 ($97,985 \pm 3,99$ %).

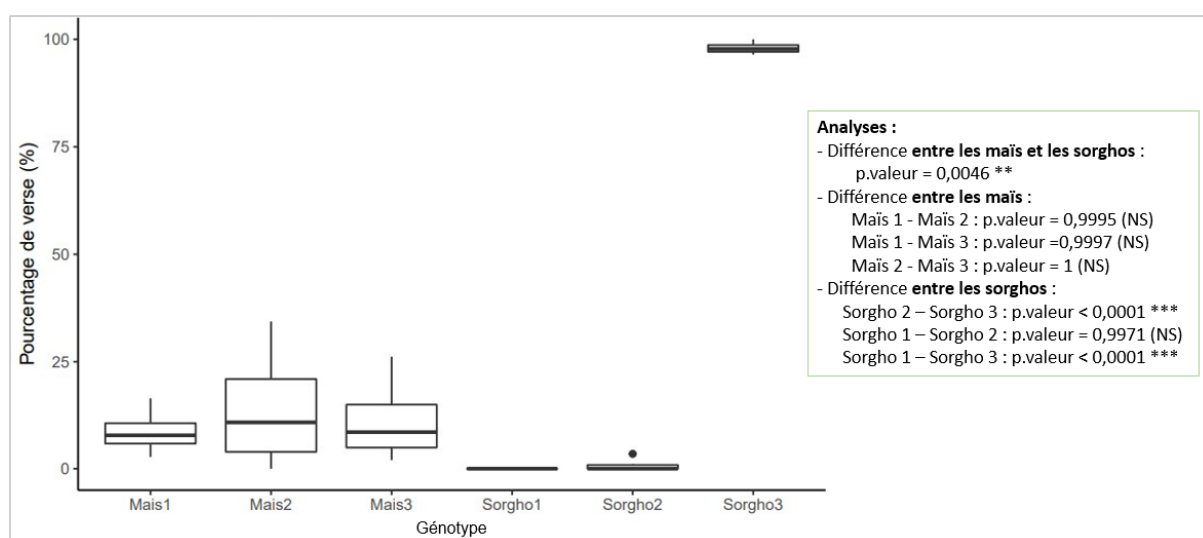


Figure 31 : Pourcentage de verse en fonction du génotype de sorgho ou de maïs à Vieusart, 9/10/2021

8. Effet du génotype et du site sur les performances fourragères des plantes

8.1. Effet du génotype et du site sur le rendement en matière sèche

L'ANOVA III nous confirme la significativité des facteurs « génotype » et « site ». Le rendement moyen en matière sèche à Vieusart ($17,3 \pm 0,376$ t MS/ha) est significativement plus élevé (p.valeur = 0,0032) que celui de Chaumont ($14,8 \pm 0,376$ t MS/ha) (Figure 32). La moyenne des variétés de maïs ($20,2 \pm 0,367$ t MS/ha) est plus élevée que celle des sorghos ($11,9 \pm 0,367$ t MS/ha) et la différence entre ces moyennes est significative (p.valeur < 0,0001). Des différences sont également observées à l'intérieur des espèces. Le maïs 1 ($22 \pm 0,651$ t MS/ha), semé à la première date de semis, a significativement plus de rendement en MS que les variétés de maïs 2 ($19,1 \pm 0,651$ t MS/ha) et maïs 3 ($19,4 \pm 0,651$) semées 15 jours plus tard (p.valeur = 0,0016). De même, il est important de remarquer que le sorgho 3 ($14,9 \pm 0,651$ t MS/ha) a un rendement significativement plus élevé (p.valeur < 0,0001) que le sorgho 1 ($10,7 \pm 0,51$ t MS/ha) et le sorgho 2 ($10,2 \pm 0,651$ t MS/ha).

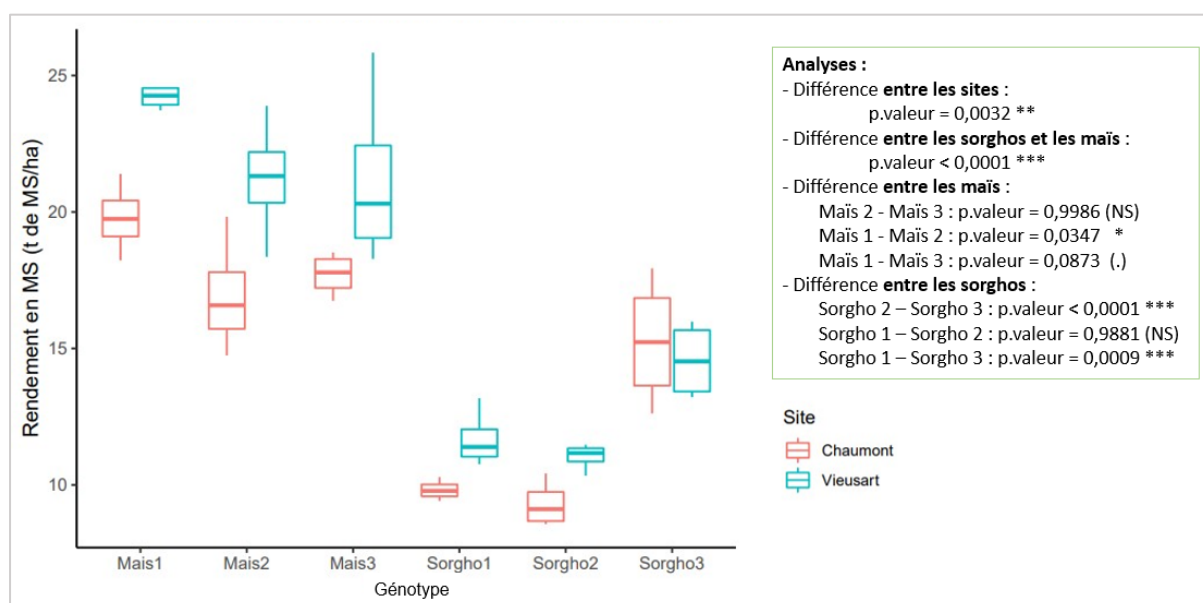


Figure 32 : Rendement en matière sèche à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs

8.2. Effet du génotype et du site sur le pourcentage de matière sèche de la plante

Le facteur génotype est significatif mais pas les facteurs « site » et « bloc hiérarchisé à site ». Le pourcentage moyen de matière sèche pour les maïs est de $37,2 \pm 0,6$ % et est significativement supérieur ($p.valeur < 0,0001$) à la moyenne des sorghos ($26,5 \pm 0,6$ %) (Figure 33). Il y a également des différences au sein des variétés de maïs. La variété de maïs semée à la première date de semis, le maïs 1 ($39,9 \pm 0,947$ %), a une teneur moyenne en matière sèche significativement plus élevée ($p.valeur = 0,0097$) que le maïs 2 ($36,4 \pm 0,947$). Le maïs 2 est la même variété que le maïs 1 mais il est semé à la deuxième date de semis, le 1^{er} juin. Ce qui nous intéresse, c'est que le sorgho 3 a une teneur en matière sèche de $29,2 \pm 0,947$ %, ce qui est significativement plus élevé ($p.valeur = 0,0009$) que les sorghos 1 et 2 qui ont respectivement une teneur de $25,9 \pm 0,947$ % et de $24,4 \pm 0,947$ %.

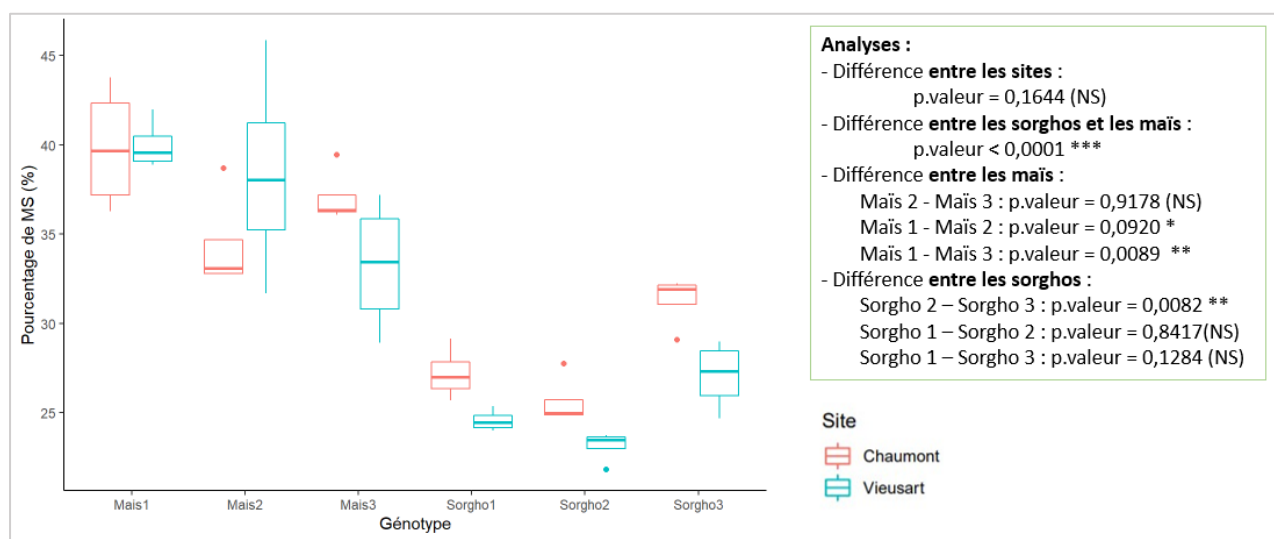


Figure 33 : Pourcentage de matière sèche de la plante entière à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs

8.3. Effet du génotype et du site sur la teneur en amidon dans la plante

L'ANOVA III nous informe que le facteur « génotype » est significatif par rapport à la teneur en amidon mais le facteur « site » et « bloc hiérarchisé à site » n'influencent pas la réponse. La teneur moyenne en amidon des maïs vaut $26,4 \pm 0,684$ %, ce qui est nettement supérieur (p.valeur < 0,0001) à la teneur moyenne en amidon des sorghos qui vaut $0,795 \pm 0,684$ % (Figure 34). Ce résultat très marqué vient du fait que les sorghos sont de type sucrier et n'ont pas pour but de valoriser leur production d'amidon. Autrement, il n'y a aucune différence significative entre les sites, au sein des variétés de maïs et au sein des variétés de sorgho.

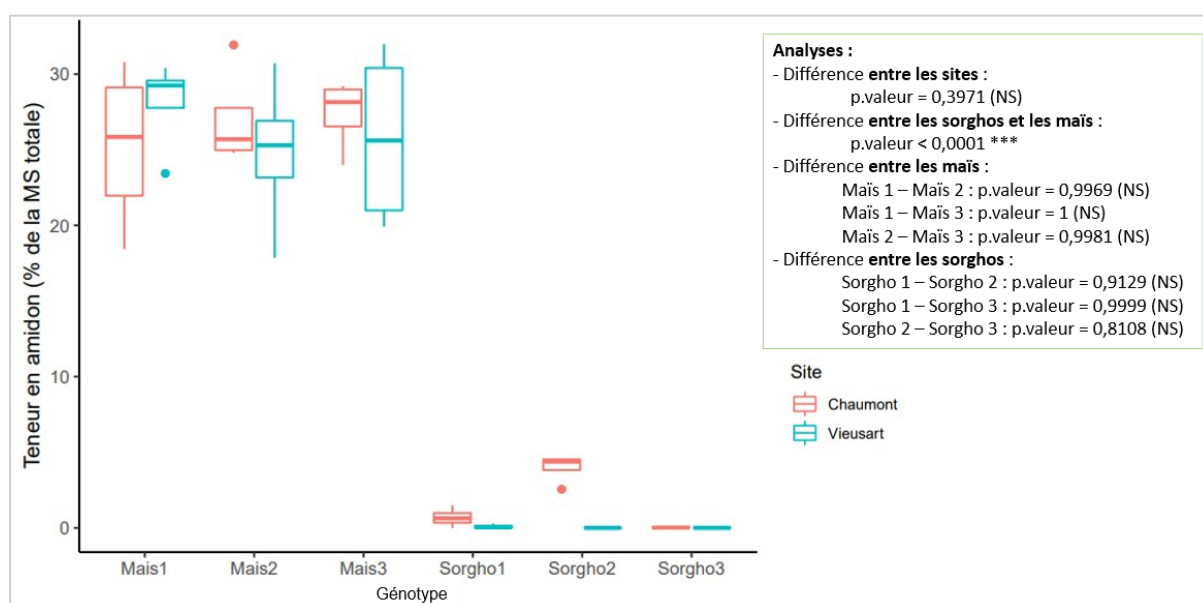


Figure 34 : Teneur en amidon de la plante entière à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs

8.4. Effet du génotype et du site sur la teneur en cellulose dans la plante

L'ANOVA III estime que seul le facteur « génotype » influence le teneur en cellulose de la plante. Il est intéressant de mettre en avant que selon le test de Tukey, la teneur en cellulose moyenne de la plante est significativement plus élevée (p.valeur < 0,0001) pour les sorghos ($30,3 \pm 0,421$ %) que pour les maïs ($22,4 \pm 0,421$ %) (Figure 35). Les variétés de maïs ne se distinguent pas les uns des autres significativement. Les variétés de sorgho 1 ($29,8 \pm 0,677$ %) et sorgho 2 ($27,2 \pm 0,677$ %) ont une teneur en cellulose significativement différente (p.valeur < 0,0001) de la variété de sorgho 3 ($33,7 \pm 0,677$ %).

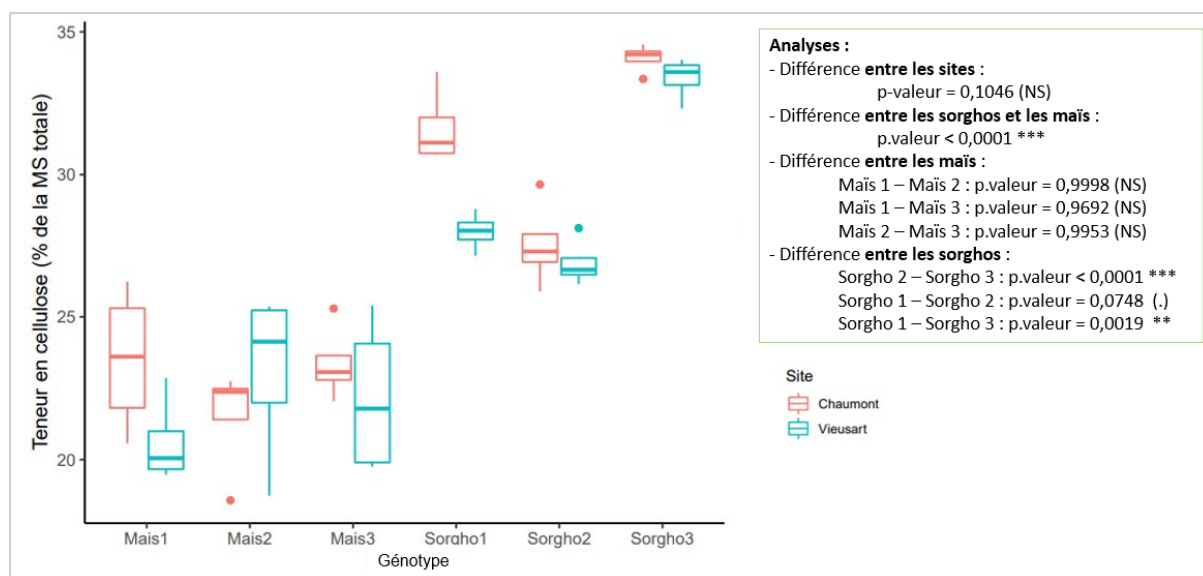


Figure 35 : Teneur en cellulose de la plante entière à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs

8.5. Effet du génotype et du site sur la teneur en matières totales protéiques de la plante

L'ANOVA III montre que le génotype et le site sont deux facteurs explicatifs de la teneur en matières protéiques totales dans la plante. Selon le test de Tukey, la teneur moyenne en matières protéiques totales pour le site de Vieusart ($7,86 \pm 0,214$ %) est plus élevée de celle du site de Chaumont ($4,77 \pm 0,214$ %) et la différence entre ces deux sites est significative (p.valeur < 0,0001) (Figure 36). Les teneurs moyennes pour les maïs sont significativement plus élevées (p.valeur < 0,0001) que celles pour les sorghos avec respectivement $5,77 \pm 0,195$ % et de $6,86 \pm 0,195$ % de MTP. Nous remarquons particulièrement que le sorgho 1 ($8,41 \pm 0,315$ %) et le sorgho 2 ($7,85 \pm 0,315$ %) ont des valeurs significativement plus élevées (p.valeur < 0,0001) que celles du sorgho 3 ($4,33 \pm 0,315$ %). Il n'y a pas de différence significative (p.valeur = 0,9993) entre le maïs 1 ($5,58 \pm 0,315$ %) et le maïs 2 ($5,73 \pm 0,315$ %).

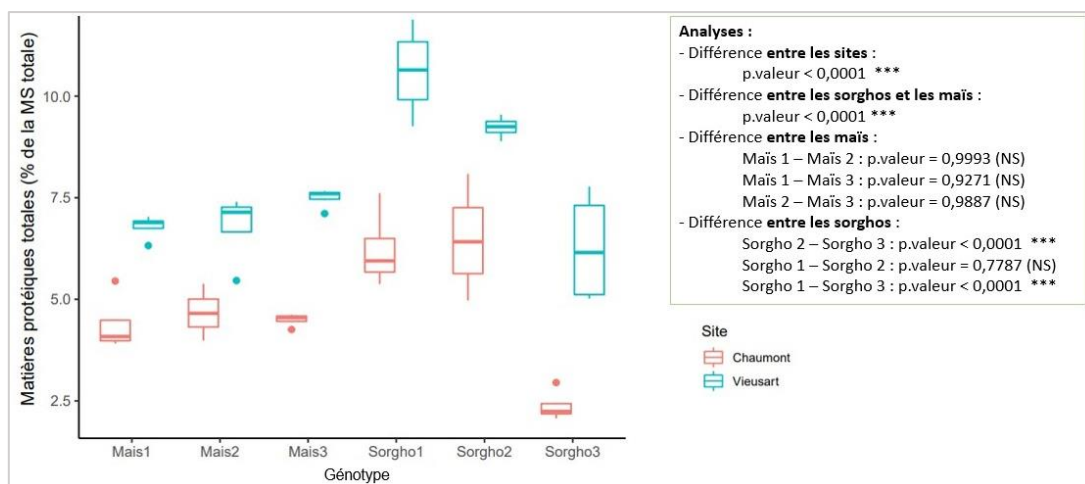


Figure 36 : Teneur en matières protéiques totales de la plante entière à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs

8.6. Effet du génotype et du site sur la valeur énergétique de la plante

Le test d'ANOVA III montre que seul le facteur « génotype » influence la réponse. La valeur énergétique moyenne des maïs est de $846 \pm 7,05$ VEM/kg MS et est significativement plus élevée (p.valeur < 0,0001) que celle des sorghos atteignant $747 \pm 7,05$ VEM/kg MS (Figure 37). La valeur énergétique moyenne des variétés de maïs varie significativement (p.valeur < 0,0001) entre $840 \pm 12,2$ VEM/kg MS pour la variété 3 et $851 \pm 12,2$ VEM/kg MS pour la variété 1. Cependant, il est intéressant de remarquer que les variétés 1 et 2 de sorghos possèdent des valeurs énergétiques correctes alors que celle du sorgho 3 sont très faibles. En effet, la variété 1 de sorgho ($772 \pm 12,2$ VEM/kg MS) et la variété 2 de sorgho ($800 \pm 12,2$ VEM/kg MS) contiennent significativement (p.valeur < 0,0001) plus d'énergie que la variété 3 de sorgho ($669 \pm 12,2$ VEM/kg MS). Un second test a alors vérifié la différence entre la moyenne des maïs et le sorgho avec la plus haute valeur énergétique, à savoir le sorgho 2. Il en résulte que cette différence est significative avec une p.valeur de 0,0021.

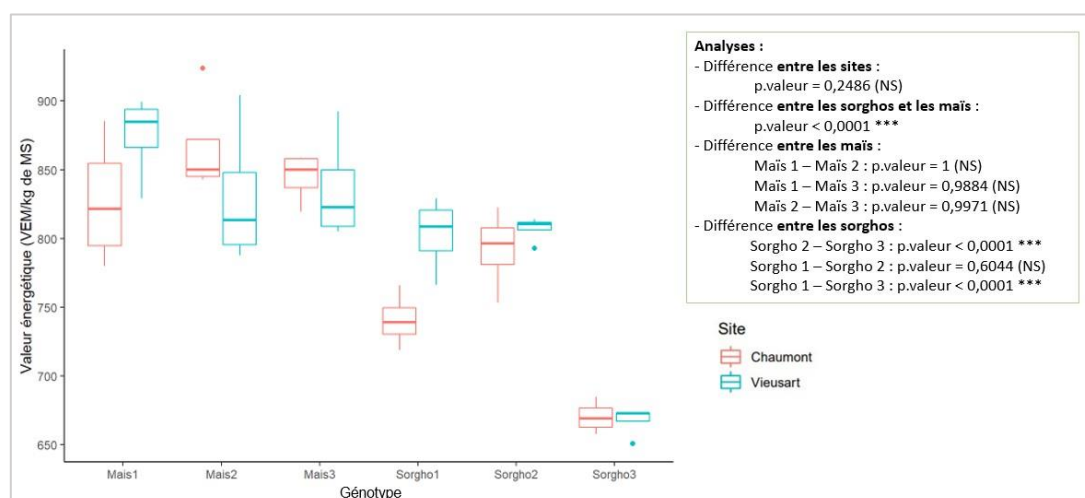


Figure 37 : Valeur énergétique de la plante à la récolte en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs

9. Effet du génotype et du site sur le système racinaire

9.1. Effet du génotype et du site sur le nombre de racines à différentes profondeurs

Un graphe représente le nombre de racines par couche de sol (0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm). Plus nous allons chercher les racines profondément, moins il y en a.

9.1.1. De 0 à 30 cm de profondeur

Le test d'ANOVA III indique que le facteur « génotype » a un effet sur le nombre de racines mais ce n'est pas le cas des facteurs « site » et « bloc «hiérarchisé à site » ». Selon le test de Tukey, nous remarquons principalement que le nombre moyen de racines dans un volume de 188,49 cm³ entre 0 et 30 cm de profondeur est significativement plus élevé (p.valeur < 0,0001) pour les sorghos ($27 \pm 2,26$ racines) que pour les maïs ($12 \pm 2,26$ racines) (Figure 38). Il n'y a pas de différence significative entre les deux sites malgré la différence de type de sol. Il n'y a pas de différence significative ni au sein des variétés de maïs ni au sein des variétés de sorgho, à part pour les variétés de sorgho 2 ($19,9 \pm 3,54$ racines) et sorgho 3 ($35 \pm 3,54$ racines). Le sorgho 3 possède significativement plus de racines (p.valeur = 0,0315) à cette profondeur que le sorgho 2.

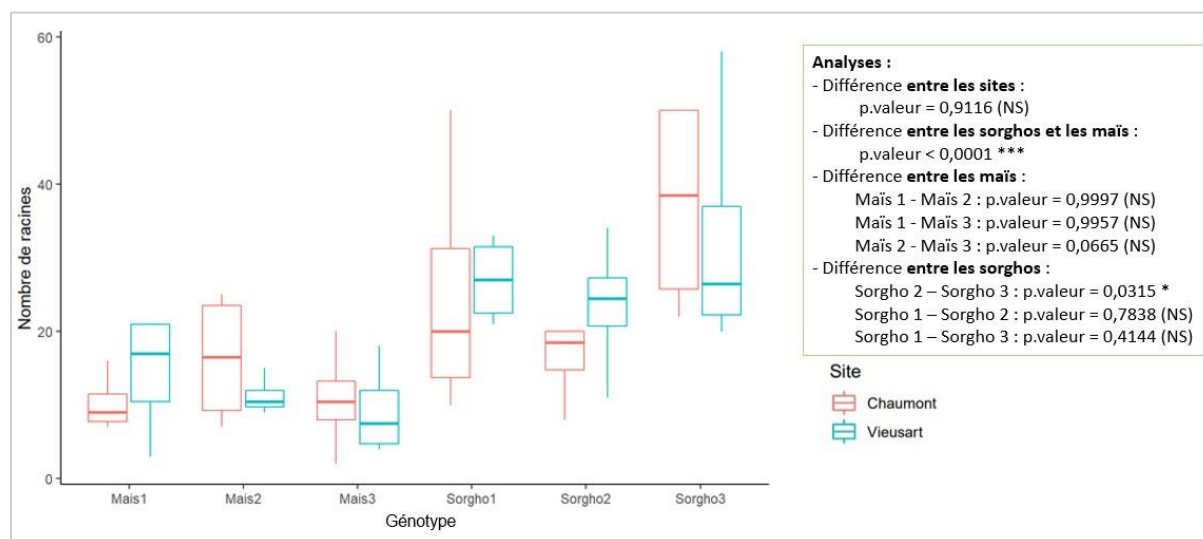


Figure 38 : Nombre de racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 0-30 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante)

9.1.2. De 30 à 60 cm de profondeur

Contrairement à la couche supérieure, le test d'ANOVA III montre qu'il n'y a que le facteur « site » qui influence la réponse. La moyenne du nombre de racines dans un volume de 188,49 cm³ est significativement plus élevée (p.valeur = 0,0051 **) à Vieusart (6,21 ± 0,787 racines) que à Chaumont (1,42 ± 0,787 racines) (Figure 39). Pour cette même mesure, la moyenne chez les sorghos et les maïs est respectivement de 5,42 ± 0,761 et de 2,21 ± 0,761 racines et la différence entre ces espèces est significative (p.valeur = 0,0039). A cette profondeur, il n'y a plus de différence significative au sein des variétés de maïs et au sein des variétés de sorgho.

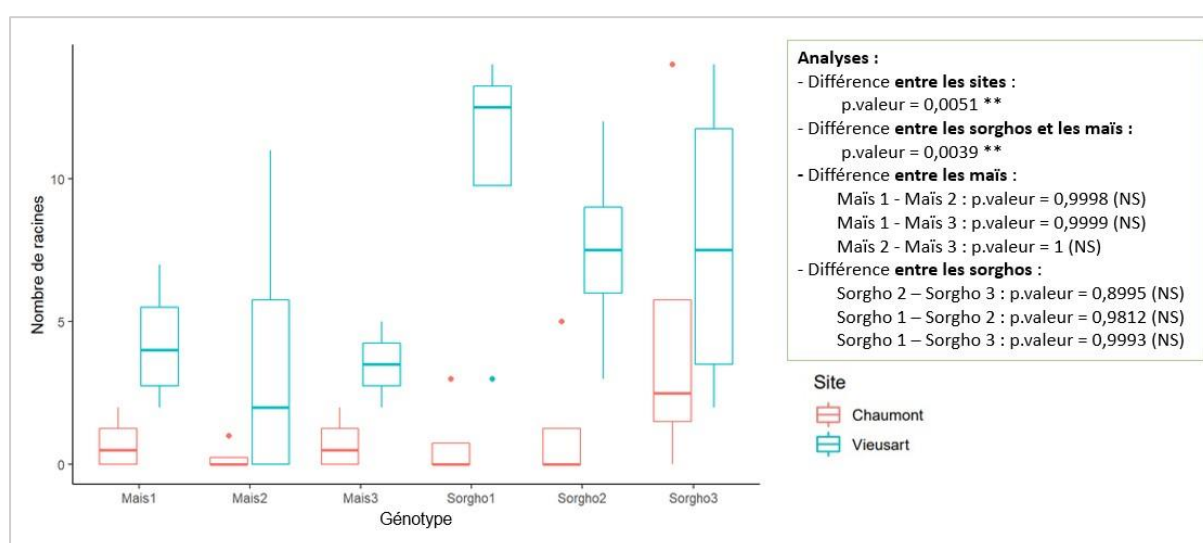


Figure 39 : Nombre de racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 30-60 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante)

9.1.3. De 60 à 90 cm de profondeur

Pour cette analyse, il faut garder en tête que le test d'ANOVA III indique qu'aucun des facteurs n'est significatif, il faut donc rester vigilant. Le nombre moyen de racines dans un volume de 188,49 cm³ à une profondeur de 60-90 cm est significativement plus élevé (p.valeur = 0,0057) à Vieusart (6,37 ± 0,921 racines) par rapport au site de Chaumont qui ne contient que 0,917 ± 0,921 racines (Figure 40). De même, le nombre moyen de racines pour les sorghos (5,62 ± 0,921 racines) est significativement plus élevé (p.valeur = 0,0045) que celui pour les maïs (1,67 ± 0,921 racines). Mise à part ces différences entre sites et entre espèces, il n'y a pas de différence significative au sein des espèces à cette profondeur.

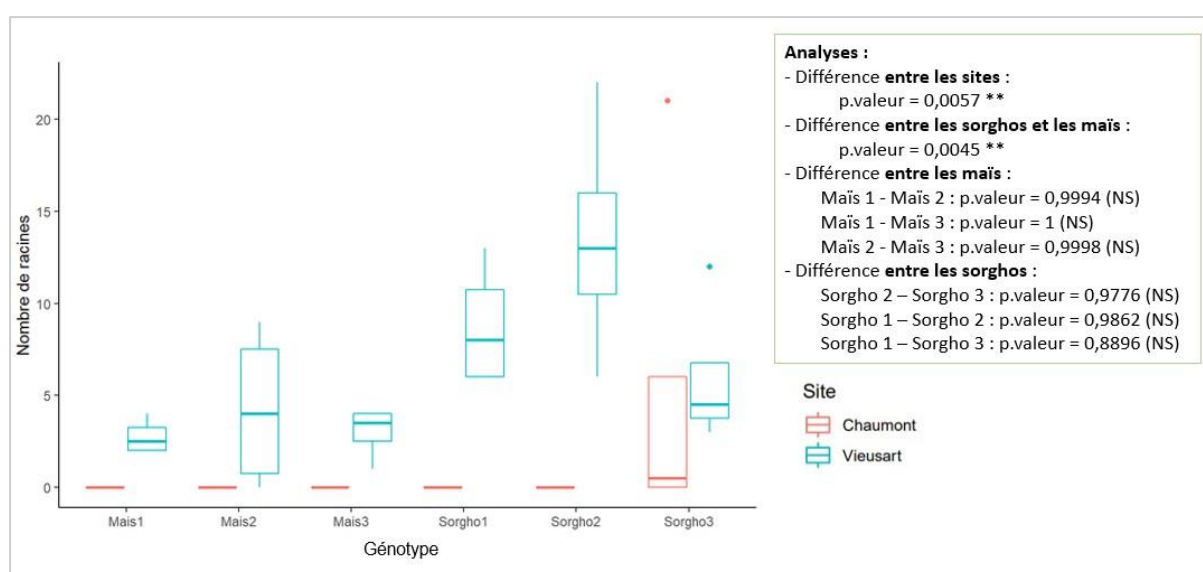


Figure 40 : Nombre de racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 60-90 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante)

En résumé : dans la couche supérieure, nous remarquons surtout un effet espèce avec un léger effet variété au sein des sorghos alors que dans les deux couches inférieures, nous pouvons observer un effet site et un effet espèce.

9.2. Effet du génotype et du site sur le poids sec des racines à différentes profondeurs

Les résultats liés au poids sec des racines dans un volume de 188,49 cm³ au trois profondeurs ne sont pas significatifs selon le test d'ANOVA. Aucun des facteurs n'est significatif pour aucune des trois couches de sol. Cela vient du fait de la difficulté de la technique de mesure.

Nous pouvons résumer les résultats des trois profondeurs en disant qu'il n'y a aucune différence significative entre les sites, entre les variétés d'une même espèce et entre les espèces sauf pour la première couche de sol. La moyenne du poids sec des racines dans un volume de 188,49 cm³ à une profondeur de 0-30 cm est significativement plus élevée (p.valeur = 0,0165) pour la moyenne des sorghos (0,0441 ± 0,00678 g) que pour la moyenne des maïs (0,025 ± 0,0068 g) (Figure 41). Les résultats des couches plus profondes se trouvent en annexe.

9.2.1. De 0 à 30 cm de profondeur

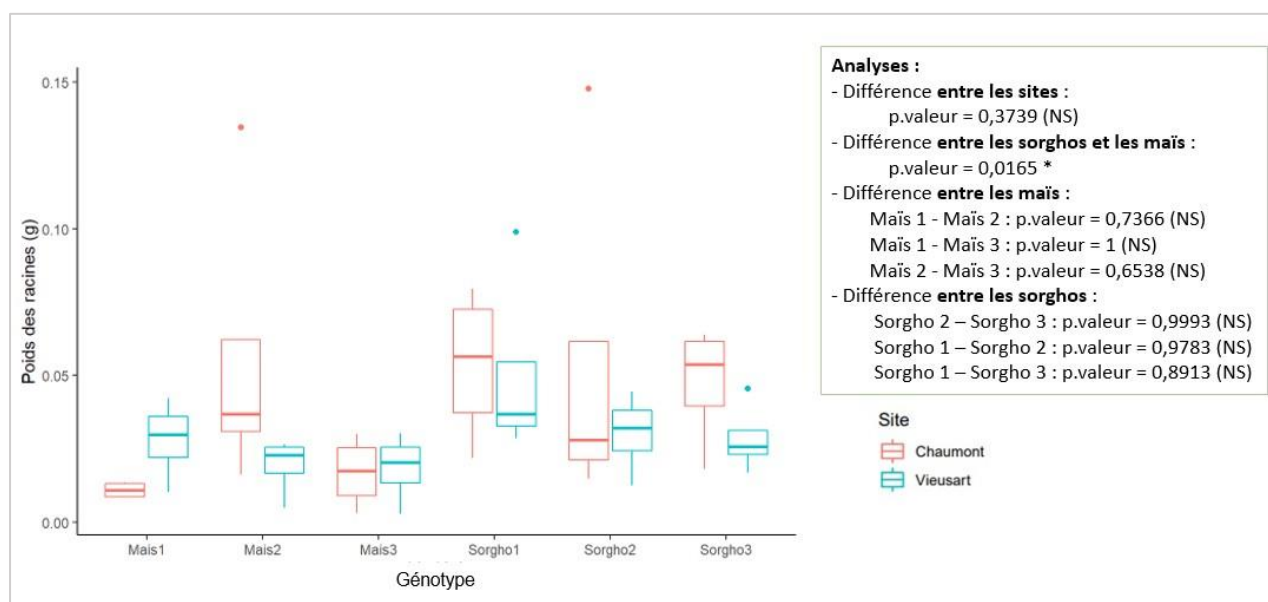


Figure 41 : Poids des racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 0-30 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante)

10. Efficience de l'utilisation de l'azote

Le test d'ANOVA nous indique que les facteurs « génotype » et « site » influencent l'efficience des plantes liée à l'utilisation de l'azote (NUE) contrairement au facteur « bloc hiérarchisé à site ». La moyenne du NUE du site de Vieusart (128 kg MS/ kg N) est significativement plus élevée (p.valeur = 0,0131) de celle de Chaumont (115 kg MS/ kg N) (Figure 42). Nous remarquons principalement que la moyenne des maïs (141 kg MS/kg N) est significativement plus élevée (p.valeur < 0,0001) que la moyenne des sorghos (102 kg MS/kg N). Il n'y a pas de différence significative entre les variétés de maïs. Le sorgho 3 (127 kg MS/kg N) est significativement plus efficient pour l'utilisation de l'azote (p.valeur < 0,0001) que le sorgho 1 (91,4 kg MS/kg N) et le sorgho 2 (86,6 kg MS/kg N). Enfin, il est intéressant de remarquer que le sorgho 3 n'est pas significativement différent (p.valeur = 0,1817) des maïs 2 (133 kg MS/kg N) et 3 (136,2 kg MS/kg N) ce qui traduit une efficience équivalente.

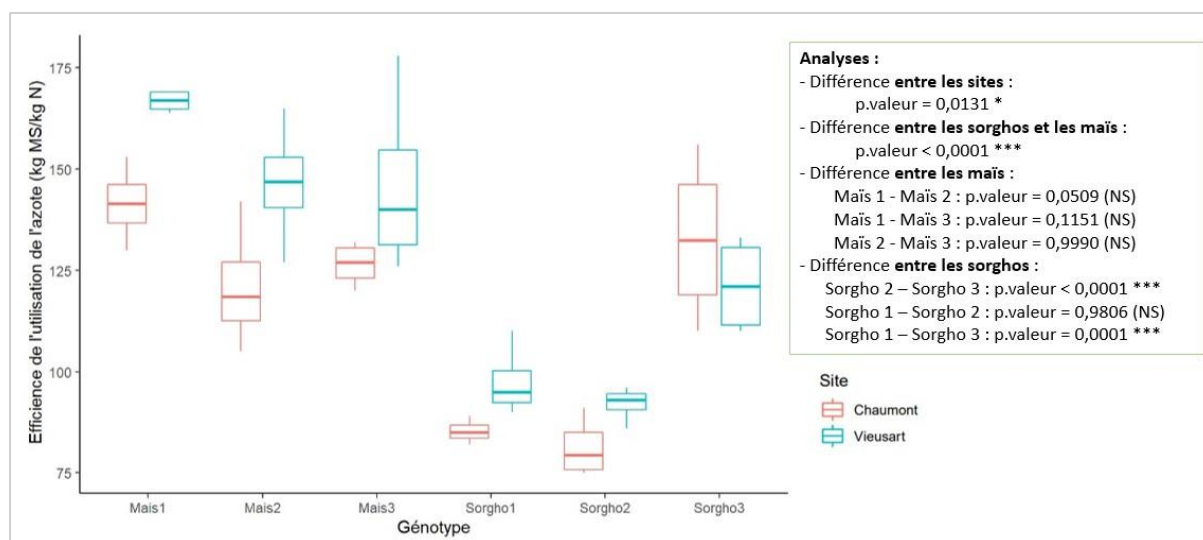


Figure 42 : Efficience de l'utilisation de l'azote (NUE) en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs

11. Azote exporté par la plante

Le test d'ANOVA nous montre que les facteurs « génotype » et « site » sont significatifs contrairement au facteur « bloc hiérarchisé à site ». Nous remarquons principalement que le site de Vieusart (209 kg N/ha) exporte significativement plus d'azote par les plantes (p.valeur < 0,0001) que le site de Chaumont (108 kg N/ha) (Figure 43). De plus, l'analyse nous montre que la moyenne des maïs (190 kg N/ha) exporte significativement plus d'azote (p.valeur < 0,0001) par les plantes que la moyenne des sorghos (126 kg N/ha). Il n'y a pas de différence au sein des variétés de chaque espèce à part entre le sorgho 1 (147 kg N/ha) et le sorgho 3 (102 kg N/ha) (p.valeur = 0,0264).

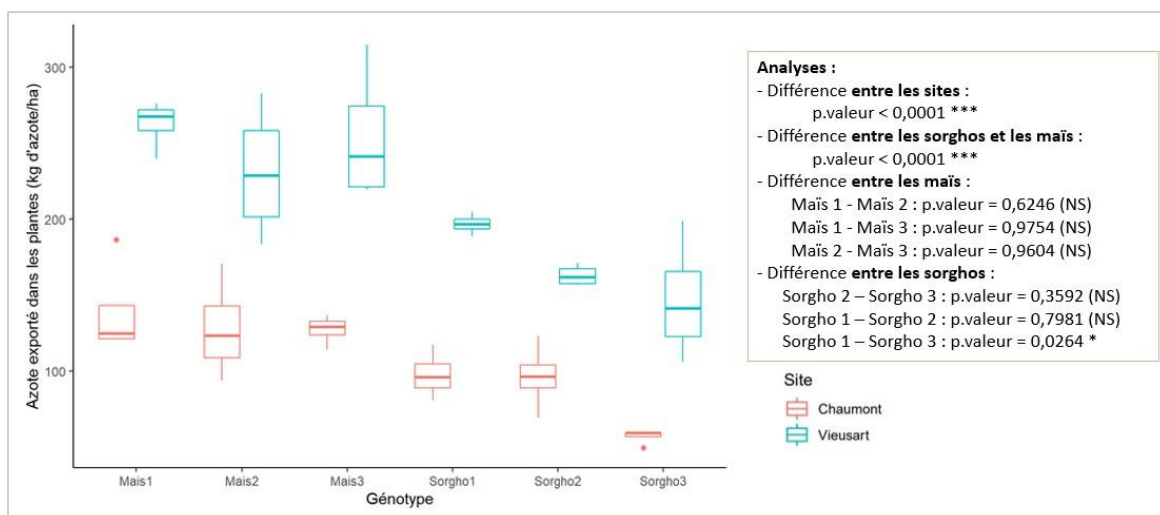


Figure 43 : Azote exporté par la plante en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs

12. Bilan d'azote

Comme le montrent les précédentes analyses liées à l'azote, seuls les facteurs « génotype » et « site » sont significatifs. Ce bilan d'azote n'est pas tout à fait correct car il prend en compte certaines estimations évoquées précédemment ce qui explique les données négatives, il faut donc rester critique face à ces résultats (Figure 44). Lorsque le bilan est positif, il témoigne des pertes par lixiviation non prises en compte dans le bilan. Lorsque le bilan est négatif, il signifie que la minéralisation a été sous-estimée dans le bilan. Nous remarquons qu'il y a une nette différence (p.valeur = 0,0002) entre les bilans du site de Vieuxart (-64 kg N/ha), principalement négatifs, et ceux de Chaumont (24,2 kg N/ha), principalement positifs. Le site de Chaumont a donc subi plus de lixiviation que le site de Vieuxart. La moyenne des sorghos (8,17 kg N/ha) a un bilan d'azote significativement supérieur (p.valeur < 0,0001) à celui de la moyenne des maïs (-47,9 kg N/ha). Pour finir, il n'y a pas de différence significative au sein de chaque espèce sauf pour le sorgho 1 (-18,125 kg N/ha) et le sorgho 3 (42 kg N/ha).

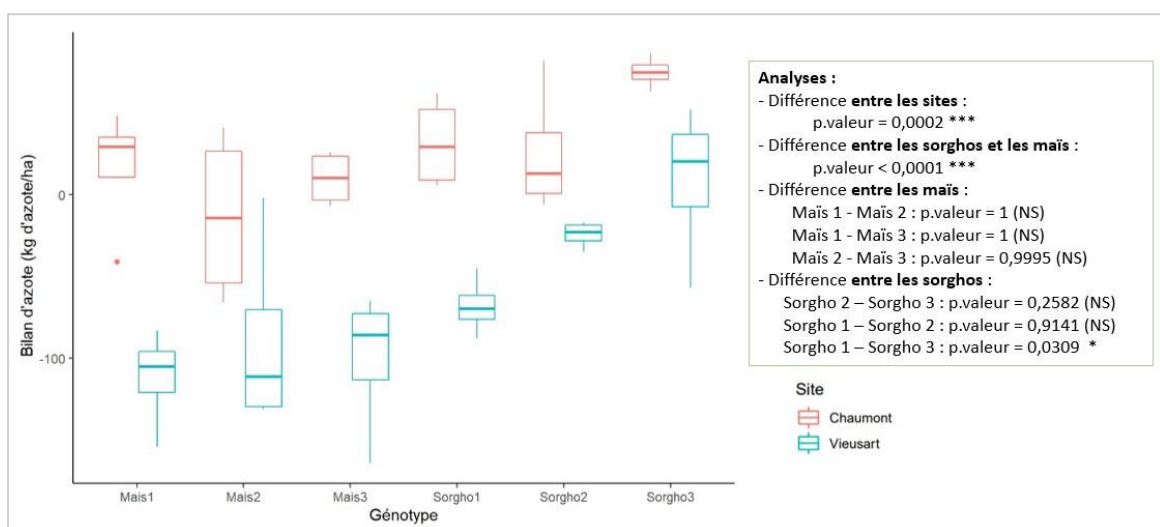


Figure 44 : Bilan d'azote avant et après la culture en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs

Quatrième partie : Discussion

La culture du sorgho peut-elle aujourd'hui être intéressante pour les agriculteurs en Belgique, en particulier dans le Brabant Wallon ? Avant de tirer des conclusions générales, il faut être conscient que les résultats changent d'une année à l'autre et d'une région à l'autre. En effet, les résultats de la saison 2021 sont particuliers suite aux intempéries rencontrées durant l'été. De plus, ils sont également liés au type de sol, à savoir, un sol sablo-limoneux et un sol sableux.

1. Effet du génotype et du site sur le pourcentage de levée des plantes

Pour rappel, la variété de maïs MAS 232 a été semée à deux dates différentes référencées maïs 1 et maïs 2. Le maïs 1, a été le seul semé le 17 mai et une seconde période de semis a eu lieu le 1 juin pour cette fois toutes les variétés de maïs et sorgho. Les densités de semis étaient différentes pour les deux espèces. Le semoir était réglé sur 95 200 graines/ ha pour le maïs alors que pour le sorgho, 205 100 graines/ha ont été semées. Comme nous avons pu le constater dans la partie résultat, le pourcentage de germination est significativement différent entre les deux espèces. Les moyennes du pourcentage de germination pour le maïs et pour le sorgho étaient respectivement de 99,2 % et de 69,9 %. Le maïs rencontre un bon taux de germination, proche du maximum. Le faible taux de germination du sorgho peut s'expliquer en partie par la taille de sa semence. Celle-ci est beaucoup plus petite que celle du maïs et contient moins de réserve d'énergie pour germer. Pour 1 g de semences, nous avons 3 graines de maïs ou l'équivalent de 8 à 10 graines de sorgho. Pour pallier cette différence, la densité de semis du sorgho est plus élevée et la profondeur du semis n'excède pas 2-3 cm alors que la graine de maïs peut émerger sous 5 cm de profondeur (CIPF, 2021b). D'autres résultats ont été observés avec une levée de 76 % dans le sud-est de la France en 2003 et une levée de 72 % dans le Nord de la France en 2021 (Khaledian et al., 2011; Perleir et al., 2021). La variété de sorgho 1 se rapproche de ces valeurs car son pourcentage de levée est de 76,8 %. Selon Arvalis, un bon taux de levée est atteint à partir de 80-85 % (Arvalis et al., 2022). Nos variétés de sorgho n'ont donc pas un taux optimal de levée, ce qui peut être dû aux températures assez fraîches lors du semis. En effet, le sorgho est une plante tropicale et nécessite donc un minimum de 12 °C pour germer. Les températures du printemps 2021 étaient plus fraîches que la normale avec une différence de -1,9 °C par rapport à la normale. Le semis a d'ailleurs dû être retardé par rapport à ce qui était prévu. De plus, la région limoneuse a rencontré un déficit pluviométrique de 23 mm par rapport à la moyenne printanière.

Le CIPF a également fait un essai sorgho au même moment que nous sur la parcelle de Vieusart avec différentes variétés dont celles utilisées pour ce mémoire. Nos pourcentages de levée à Vieusart sont entre 4 et 6 % plus faibles que les leurs. Etant donné que les cultures

ont rencontré les mêmes conditions environnementales, cette différence peut être due à la variation liée à l'expérimentateur, lors de la prise de mesure.

De manière générale, la densité de semis est estimée en fonction du type de sol, de la variété et du mode de culture. Dans la littérature, un guide sur la culture de sorgho en Europe centrale recommande une densité de semis de 240 000 graines/ha pour des sorghos cultivés pour leur biomasse (Khawaja et al., 2014). Cette différence de densité de semis avec notre essai voudrait peut-être anticiper et compenser une moindre germination pour les variétés productives en biomasse. Nous obtenons seulement un pourcentage moyen de levée de 63,6 % pour le sorgho 3 par rapport au sorgho 1 qui atteint 76,8 % et cette différence est significative. Comme le montre le test d'ANOVA, une différence entre variétés est tout à fait possible car le facteur génotype impacte la réponse. D'autres facteurs comme l'état des semences lors de la récolte ou la conservation des semences peuvent également influencer la réponse.

L'ANOVA montre également que le facteur site est significatif. En effet, le site de Chaumont a systématiquement des moyennes plus élevées (87,2 %) que celles de Vieusart (81,9 %). Pour rappel, les sites sont tous les deux homogènes et filtrants. La différence peut venir d'autres caractéristiques du sol. Cependant, nous aurions eu tendance à dire que le sol sablo-limoneux de Vieusart aurait été mieux adapté pour le contact sol/graine (Arvalis et al., 2022). Une des pistes est l'attaque des corvidés, majoritaire à Vieusart. Par contre, le test d'ANOVA nous montre que le facteur « bloc hiérarchisé au site » n'est pas significatif alors que l'attaque était surtout localisée dans un des blocs. Nous devons donc écarter cette piste. Cette différence est peut-être due aux variations environnementales.

2. Effet du génotype, du site et de la position de mesure sur l'indice lié à la teneur en chlorophylle de la plante

La première série de mesures de la teneur en chlorophylle n'a été prise que sur quatre variétés du bloc A venant des deux sites le 13/08/2021. Ces mesures permettaient de sélectionner la position sur la plante la plus judicieuse pour comparer au mieux les sites, les espèces et les variétés. Les feuilles les plus basses mesurées contenaient plus de chlorophylle que celles au sommet car elles étaient plus anciennes, quoique non sénescentes et elles avaient eu davantage de temps pour accumuler de la chlorophylle. Les mesures prises proches de la ligule, au centre de la longueur de la feuille et au bout de celle-ci avaient de plus en plus de chlorophylle quand nous nous approchions de l'extrémité de la feuille. La face supérieure de la feuille contenait autant de chlorophylle que la face inférieure. Pour les raisons expliquées dans la partie résultat, la position au centre de la feuille la plus développée (position 1) a été sélectionnée afin d'appliquer les mesures à toute la parcelle le 9/10/2021. Cependant, la récolte sur le site de Chaumont a été anticipée (5/10/2021) et nous n'avons pas eu le temps d'y faire la deuxième série de mesure. Seul le site sablo-limoneux de Vieusart

a pu être analysé. Comme le mentionne une analyse des sols belges, un sol sablo-limoneux est mieux adapté aux cultures qu'un sol sablonneux (Louis, 1960). Le sol sablo-limoneux de Vieusart est plus riche, plus productif et ce type de sol retient mieux l'eau. Il contient des microporosités qui possèdent une meilleure rétention en eau que des macroporosités retrouvées dans un sol sableux (Halilat & Tessier, 2006). Il est donc normal que le développement de la plante soit meilleur dans ces conditions. Sur un sol sablonneux comme rencontré à Chaumont, moins propice aux cultures, la plante a pu se sentir en conditions inconfortables, accélérer sa maturité et ainsi provoquer une récolte plus précoce. Nous n'avons plus eu l'occasion de mesurer la différence entre sites en fin de cycle mais celle-ci était significative le 13/08/2021. Le site de Vieusart avait des valeurs systématiquement plus élevées que celles de Chaumont. Selon la littérature, la teneur en chlorophylle est un indicateur relatif de l'état de la plante (Xu et al., 2000). Plus il y a de pigments, plus la plante est photosynthétiquement active (Radhouane & Aissa, 2014). Lorsque la plante rencontre un stress hydrique pendant ou après la floraison, la chlorophylle a tendance à se dégrader, la plante entre plus vite en sénescence et le rendement diminue. Une étude a montré une diminution de 38% de la teneur en chlorophylle en fortes conditions de stress hydrique (Radhouane & Aissa, 2014). Certaines variétés, Stay-Green, sont sélectionnées pour éviter cette dégénérescence qui amène plus facilement aux risques de verse et de maladies (Xu et al., 2000). Cependant, le cas d'une diminution du taux de chlorophylle due à un stress hydrique n'est certainement pas le cas de la saison 2021, extrêmement humide. Même si le sol de Chaumont retient moins l'eau que celui de Vieusart, les plantes n'ont pas été en situation de stress hydrique. Une autre piste pouvant expliquer la différence entre les sites est l'azote foliaire. En effet, le taux de chlorophylle est également lié à la nutrition azotée (Radhouane & Aissa, 2014). Néanmoins, avec les nombreuses précipitations durant l'été 2021, il y a eu beaucoup de minéralisation. L'hypothèse d'un déficit en azote serait alors réfutée.

La deuxième série de mesures a mis en évidence une différence significative entre les maïs et les sorghos. Les sorghos avaient un indice moyen lié à la teneur en chlorophylle à la position 1 de 44,8 % alors que les maïs atteignaient 40 %. Etant donné que la chlorophylle est liée à l'azote, et donc aux acides aminés et aux protéines, il pourrait peut-être y avoir un lien avec la mesure des matières protéiques totales. Cela coïnciderait avec les sorghos qui ont également une teneur en matières protéiques totales plus élevées que les maïs. Une étude montre que certaines protéines sont étroitement régulées en fonction de la source d'azote disponible (Mérigout, 2006). Il est cependant difficile de savoir dans quelle mesure cela influence la plante.

Le test d'ANOVA nous montre que le facteur génotype est significatif ; ce qui explique la différence de résultats par rapport à l'indice lié à la teneur en chlorophylle au sein des variétés de maïs et au sein des variétés de sorgho. Le test de Tukey qui compare ces variétés nous

montre ces différences significatives. Il est possible que le sorgho 3 ait moins de chlorophylle que le sorgho 2 à cause de son investissement préférentiel pour la production de tiges liées à la biomasse plutôt que la production de feuilles. Il est toutefois difficile de comparer nos résultats avec d'autres études car aucune étude n'a repris nos variétés dans des conditions similaires. Etant donné que la variété influence fortement la teneur en chlorophylle, les données ne sont pas comparables. Au sein des variétés de maïs, nous avons remarqué que la variété 3 possédait une coloration plus foncée que les autres. Nous émettons l'hypothèse que la teneur en chlorophylle est principalement liée au génotype, étant donné que les plantes n'ont ni manqué d'azote, ni manqué d'eau, et ont toutes bénéficié des mêmes conditions au sein du même site.

Lors de ces mesures, la position 1 était celle au centre de la longueur de la feuille la plus développée, au milieu du limbe. La sélection de cette feuille est aisée pour le maïs car cette feuille est celle de l'épi mais elle est moins évidente pour le sorgho. Etant donné que le sorgho n'a pas d'épis, il fallait mesurer la feuille en longueur et en largeur afin d'estimer celle qui était la plus développée. Il est possible que la feuille sélectionnée ne soit pas toujours la plus développée pour le sorgho et que cela augmente la variabilité du paramètre mesuré. Comme montré lors de la première série de mesures, la position de la mesure influence la réponse.

3. Effet du génotype et du site sur la surface foliaire totale de la plante

Comme nous avons pu le constater dans les résultats, la moyenne de la surface foliaire totale de la plante à Vieusart (5156 cm²) est significativement plus élevée de celle de Chaumont (3955 cm²) pour les deux espèces. Elles peuvent s'expliquer par le type de sol : un sol sablo-limoneux est mieux adapté aux cultures qu'un sol sablonneux. Le développement de la plante est donc meilleur dans ces conditions. La surface foliaire totale peut être mise en relation avec le rendement en matière sèche que nous verrons plus tard. Nous pourrions y faire la même conclusion. Le test d'ANOVA nous montre d'ailleurs que le facteur « site » est significatif dans le modèle. Le facteur « génotype » l'est aussi et explique la différence significative (p.valeur < 0,0001) entre les maïs (5010 cm²) et les sorghos (4002 cm²). Cette différence est intrinsèque à la physiologie de l'espèce. Au sein des variétés de sorgho, le sorgho 3 (4715 cm²), connu pour sa production de biomasse, se distingue du sorgho 2 (3360 cm²) par sa surface foliaire totale plus élevée (p.valeur 0,0151). Etant donné que le sorgho 3 a pour but de développer au maximum sa biomasse pour son utilisation en industrie, sa surface foliaire totale est plus élevée que les sorghos dédiés à une meilleure qualité alimentaire.

4. Effet du génotype et du site sur la hauteur des plantes

La différence de hauteur des plantes matures entre les maïs et les sorghos montre que l'espèce a un impact sur cette mesure. La hauteur moyenne des maïs est assez constante et est de +/- à 2,85 m. Le contraste est bien plus marqué au sein des variétés de sorgho. Nous

distinguons deux groupes : les sorghos proches des 1,9 m et les sorghos de +/- 3,9 m. Arvalis fait la même distinction et classe les sorghos en fonction de leur taille (Arvalis et al., 2022). Les sorghos de taille élevée sont utilisés dans le but de rentabiliser leur biomasse en industrie, ce qui explique leur développement végétatif plus important. Une étude de 2009 montre que le type d'utilisation du sorgho est fortement corrélé à sa hauteur à maturité (Trouche et al., 2014). Suivant l'usage pour l'alimentation animale ou l'industrie, la taille pouvait varier de 0,78 à 3,52 m à Lavalette en 2009 (Trouche et al., 2014). Grâce au travail de synthèse d'Arvalis pour la saison 2021-2022, nous avons la chance de pouvoir comparer nos résultats avec la moyenne française car ce travail a étudié les mêmes variétés que les nôtres (Arvalis et al., 2022). Dans nos essais, la hauteur moyenne du sorgho 1, la variété SWINGG, était de 1,9 m alors qu'elle est de 2,1 m en moyenne en France. De même, la hauteur moyenne du sorgho 2, la variété BIGGBEN, était de 1,89 m dans nos régions alors qu'elle était de 2,3 m en moyenne en France. Pour finir, la variété de sorgho 3, la variété AMIGGO, atteignait une hauteur de 3,88 m sur nos essais en moyenne alors qu'elle avait une hauteur moyenne de 4,03 m en France. Nous pouvons remarquer systématiquement des hauteurs plus élevées en France. Cependant, la France regroupe des régions fortement différentes qui n'ont pas toutes les mêmes conditions environnementales. L'environnement du Sud de la France est plus chaud et plus propice au développement du sorgho que le Nord de la France qui se rapproche de nos conditions climatiques. Nous remarquons d'ailleurs que les variétés semblables aux sorgho 1 et 2 sont hautes de 1,92 m à Villampuy, au sud-ouest de Paris, et sont inférieures à la moyenne française (Arvalis et al., 2022). Les hauteurs de plantes sont donc de plus en plus basses à mesure que nous allons vers le nord. La synthèse nationale française sur le sorgho met en avant les différences Nord / Sud par rapport à la hauteur de cette culture. Dans le Nord de la France, le semis est assez tardif pour favoriser une température suffisante pour la germination. A cause des conditions climatiques moins favorables, il y a un risque d'un retard à maturité et d'une récolte plus tardive par rapport à la culture du Sud. Le Sud de la France possède des meilleures conditions de semis et de croissance pour atteindre la maturité de la plante en fin de cycle (Arvalis et al., 2022; GERA Scarpe-Hainaut & Chambre d'Agriculture Nord-Pas de Calais, 2020).

5. Effet du génotype et du site sur le nombre de talles moyen de sorgho

Dans notre essai, aucun maïs n'a tallé contrairement aux sorghos qui pouvaient avoir jusqu'à 7 talles par plante. Nos analyses statistiques nous indiquent qu'il y a une différence significative ($p.valeur < 0,0001$) entre le site de Vieusart (2,4 talles) et le site de Chaumont (1,65 talles). En général, le tallage est favorisé quand les conditions environnementales sont optimales et incitent la plante à se développer (Hugues, 1964). Des températures élevées, une meilleure exposition à la lumière et un apport élevé en azote peuvent déclencher le tallage. C'est le cas par exemple des plantes semées à une faible densité ou en bordure de champ (Hugues, 1964). Cependant, nos deux sites n'ont eu ni des densités de semis

différentes, ni des températures différentes, ni des quantités d'azote différentes. Par contre, lors de la première analyse, nous avons remarqué que le pourcentage de levée était plus élevé pour le site de Chaumont. Le faible pourcentage de levée induit une faible densité de plantes et inciterait donc au tallage. Autrement, le tallage est aussi influencé positivement par un sol de bonne qualité. Ceci est en accord avec nos données car le sol de Vieusart est un sol sablo-limoneux plus productif qu'un sol sablonneux à Chaumont. Pour terminer, les analyses statistiques indiquent qu'il y a une différence significative (p -valeur = 0,0629) entre le sorgho 1 (2,09 talles) et le sorgho 3 (1,94 talles). Comme l'indique une étude dans le Nord de l'Italie, les variétés ne possèdent pas le même nombre de talles en fonction de ce pour quoi elles sont cultivées (Dolciotti et al., 1996). Par exemple, des variétés fibres, pour la biomasse, produisent plus de talles qu'une variété sucrière, pour le fourrage, qui en produira plus qu'un sorgho grain. De fait, le but du sorgho grain est de produire le plus de graines possible dans sa panicule. Si la plante dépense de l'énergie pour produire des talles, elle en aura moins à consacrer pour les graines. Au contraire, plus un sorgho fourrager ou à biomasse développera des talles, plus nous pourrions valoriser sa biomasse. A l'inverse du maïs muni d'un épi, le sorgho sucrier n'a pas de contraste de qualité entre ses différents organes. L'énergie de la plante est bien répartie dans toute sa biomasse. C'est donc la raison pour laquelle un sorgho sucrier talle contrairement à un maïs ou sorgho grain (Hugues, 1964). Le test d'ANOVA nous indique que le facteur « génotype » n'influence pas le nombre moyen de talles alors qu'il le devrait selon la littérature. Ces résultats peuvent être supportés par l'hypothèse d'une faible diversité des variétés : les sorghos observés sont tous sucriers.

6. Effet du génotype sur le pourcentage de verse à la récolte.

Mise à part le sorgho 3, AMIGGO, la moyenne du pourcentage de verse est faible dans nos essais. La moyenne du sorgho 3, atteignant un pourcentage de verse de 97,985 %, tire la moyenne des sorghos vers le haut ; ce qui influence le test de Tukey. La moyenne des maïs (11,3 %) est donc significativement différente (p -valeur = 0,0046) de la moyenne des sorghos (32,9 %). La si grande différence entre la moyenne des sorghos 1 et 2 avec le sorgho 3 (p -valeur < 0,0001) explique pourquoi le facteur « génotype » est significatif dans le modèle. Nos résultats sont assez différents de la moyenne française de 2021 (Arvalis et al., 2022). En effet, le pourcentage de verse pour les sorghos 1 et 2 sont proches de 0 sur nos essais alors qu'il est de 12% en moyenne en France. A l'inverse, le sorgho 3 est proche des 98 % dans nos régions alors qu'il n'est que de 28 % en France (Arvalis et al., 2022). Les conditions météorologiques de l'année en Belgique n'ont pas été optimales pour la tenue de la variété AMIGGO car la fiche descriptive de la firme RAGT Semences indique que cette variété est résistante à la verse (RAGT Semences, 2016). Une semaine avant la récolte, il n'y avait, en effet, que très peu de verse ; mais des précipitations ont alourdi par la suite la panicule et ont impacté la tenue de la plante. La différence entre les résultats de nos essais et la moyenne française par rapport au sorgho 1 et 2 est peut-être due à la différence de hauteur obtenue. Dans l'analyse liée à la

hauteur des plantes ci-dessus, nous avons relaté que ces deux variétés étaient entre 20 et 40 cm plus hautes en France que dans notre essai. Une tige plus longue tend à augmenter le risque de verse. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle une application trop élevée de fumure augmente le risque de verse. Certaines variétés – BMR – sont sélectionnées afin d'obtenir des fourrages plus digestes pour le bétail. Ces variétés contiennent moins de lignine ce qui influence alors la tenue de la plante et augmente le risque de verse. Il y a un juste équilibre à trouver entre ces deux critères. La verse rend la récolte plus compliquée car il est nécessaire de relever les plantes à la main avant de les faire entrer dans l'ensileuse. La verse peut être problématique si la récolte, déjà ardue, ramène de la terre et des spores butyriques dans le silo, cela dégrade la qualité de l'ensilage (CIPF, 2021a).

7. Effet du génotype sur les performances fourragères des plantes

7.1. Effet du génotype et du site sur le rendement en matière sèche

Selon nos résultats, le site de Vieusart a des rendements en matière sèche significativement supérieurs au site de Chaumont (p.valeur < 0,001). Comme expliqué plus haut, cette différence est une conséquence du type de sol. Un sol sablonneux est moins productif et moins riche qu'un sol sablo-limoneux présent à Vieusart.

L'analyse statistique met en avant une différence significative entre les espèces. La moyenne des maïs vaut 20,0 t MS/ha alors que la moyenne des sorghos est de 11,9 t MS/ha. Comme le mentionne une étude comparative récente entre ces deux espèces, un maïs reste, en général, plus avantageux qu'un sorgho par rapport au rendement en MS (Foucart & Nihoul, 2022). Cette étude a comparé les rendements de plusieurs variétés de sorgho et de plusieurs variétés de maïs sur différentes années. A aucun moment, la moyenne des sorghos n'a surpassé celle des maïs. Par contre, les écarts de rendement varient fortement d'une année à l'autre. Par exemple, en 2020, la moyenne des sorghos (11,4 t MS/ha) était assez proche de la moyenne des maïs (15,3 t MS/ha) car il y avait de fortes chaleurs durant cet été. Au contraire, la saison 2021, caractérisée par des précipitations extrêmes, a fortement impacté la différence de rendement: la moyenne des sorghos était de 12,8 t MS/ha alors que la moyenne des maïs était de 23,2 t MS/ha. Les conditions environnementales influencent donc fortement le rendement. D'ailleurs, en 2020, les périodes estivales chaudes et sèches ont donné des résultats intéressants : la variété AMIGGO a eu des rendements qui ont surpassé ceux des deux variétés de maïs utilisées comme témoins (Foucart & Nihoul, 2022). Cette variété est connue pour sa productivité avec un rendement moyen entre 2019 et 2021 de 17,6 t MS/ha. A l'inverse, la variété de petite taille SWINGG atteint une moyenne de 14,2 t MS/ha sur cette même période (Foucart & Nihoul, 2022). Dans notre essai, nous remarquons le même contraste significatif au sein des variétés de sorgho (p.valeur < 0,0001). La moyenne du rendement de la variété SWINGG (sorgho 1), est de 10,7 t MS/ha ; celle de la variété BIGGBEN (sorgho 2), est de 10,2 t MS/ha et celle de la variété AMIGGO (sorgho 3), est nettement plus

élevée avec 14,9 t MS/ha. Les rendements de la saison 2021, dans nos régions, sont tous plus faibles que ceux obtenus entre 2018 et 2020 par le CIPF (CIPF asbl, 2021). Ils dépendent des conditions météorologiques. Une étude du Nord de la France en Picardie considère que les rendements de sorgho sont intéressants et rentables pour l'agriculteur à partir de 13 t MS/ha et défavorables en dessous de 8 t MS/ha (Dufossé et al., 2016). Cette étude considérait donc que des rendements en dessous de cette limite étaient trop bas à cause du plus faible rayonnement solaire et des températures plus basses par rapport au reste de la France. En effet, les rendements moyens de la France pendant la saison 2021 dans le rapport d'Arvalis étaient plus élevés: AMIGGO (19,8 t MS/ha) ; SWINGG (15,7 t MS/ha) ; BIGGBEN (15,1 t MS/ha) (Arvalis et al., 2022). Les conditions environnementales en France étaient plus favorables à la culture de sorgho que dans nos régions. En moyenne, ces conditions sont favorables pour ces deux espèces d'origine tropicale mais à partir d'un certain niveau, les périodes de sécheresse et de températures extrêmes peuvent nuire au rendement de ces cultures (Gonzalez et al., 2008).

Une comparaison peut être faite entre le maïs 1 (22 t MS/ha) et le maïs 2 (19,1 t MS/ha) qui ont été semés à 15 jours d'intervalle et la différence est significative (p.valeur = 0,0347). Le maïs semé le 17 mai a donc pu bénéficier des 15 jours supplémentaires de croissance pour augmenter son rendement en MS.

7.2. Effet du génotype et du site sur le pourcentage de matière sèche

Contrairement au rendement en MS, il n'y a pas de différence entre les deux sites concernant le pourcentage de MS. Le pourcentage de MS est en grande partie lié à la somme des températures et à la durée du cycle. Comme ces conditions étaient similaires d'un site à l'autre, les résultats sont équivalents. Par contre, il y a une différence significative (p.valeur < 0,0001) entre le pourcentage moyen de MS du maïs (37,2 %) et celui du sorgho (26,5 %). Le CIPF fait la même constatation depuis quelques années dans nos régions. La moyenne entre 2014 et 2021 montre un pourcentage de MS pour différentes variétés de maïs de 38% MS/kg MS alors que le sorgho n'est qu'à 25 % de MS/kg MS (Foucart & Nihoul, 2022). Cette année, nous sommes à +/- 1% de MS de la moyenne des années précédentes. Le maïs 1 semé à sa date optimale (17 mai) a un pourcentage de MS supérieur à la moyenne entre 2014 et 2021 alors que les deux autres maïs semés en même temps que la date optimale du sorgho, ont une teneur inférieure à la moyenne. Le maïs 1 atteint 39,9 % de MS ; le maïs 2, 36,4 % de MS, et le maïs 3, 35,2 % de MS. En général, nous considérons que la plante est favorable pour l'ensilage entre 32 et 35 % de MS pour le maïs et entre 26 et 35 % de MS pour le sorgho (Amerlynck et al., 2014; CIPF, 2021a, 2021b). Une maturité inférieure à ce seuil signifie qu'il y aura une teneur en eau trop élevée à la récolte. Lors de l'ensilage, nous rencontrerions alors des pertes de rendements suite aux écoulements de jus. Il faut également limiter une sur-maturité de la plante car une teneur trop importante en MS induit des problèmes de tassement dans le silo. La rigidité de la plante résiste à la compression et laisse apparaître des

poches d'air qui entraînent alors de la moisissure dans l'ensilage. De plus, une teneur élevée en MS influence négativement l'appétence du bétail, la ration peut devenir trop riche en amidon, et le risque de fusariose augmente (CIPF, 1989).

Les résultats obtenus pour les sorghos sont corrects mais ils auraient pu être plus élevés avec plus d'ensoleillement et une somme des températures plus élevée. En 2021, nous étions à 80 % des besoins du sorgho par rapport à la somme des températures nécessaires. Le sorgho récolté n'a pas pu terminer son cycle et n'était pas à maturité à l'inverse du maïs qui a atteint son stade de maturité. Des conditions plus favorables et une durée de cycle plus longue auraient été intéressantes pour le sorgho. Avec une récolte plus tardive, le maïs aurait augmenté légèrement sa teneur en amidon mais la qualité de sa tige aurait été amoindrie. Nos résultats sont relatifs à des maïs ensilages mais il en est autrement pour des maïs grains qui arrivent difficilement à terminer leur cycle dans nos régions (Bertin, 2020). Les faibles températures et l'humidité rencontrées en octobre limitent la croissance et le remplissage. Il est donc important de choisir judicieusement une bonne date de semis. Plus la date de semis est tardive, plus la plante atteindra difficilement son stade de maturité. Nous pouvons d'ailleurs le voir dans nos résultats. Le maïs 1 a une teneur en matière sèche significativement plus élevée que le maïs 2, semé 15 jours plus tard (p -valeur = 0,0920). Ce constat était le même pour le rendement en MS : le maïs 1 possède un pourcentage de MS de 39,9 % alors que le maïs 2 a une teneur de 36,4 %. La date de semis influence le rendement, la qualité de la plante et la qualité de la conservation (CIPF, 2021a).

Des différences sont également observées entre les variétés de sorgho. Le sorgho 3 (AMIGGO) atteint 29,2 % de MS alors que le sorgho 1 (SWINGG) et le sorgho 2 (BIGGBEN) ont respectivement une teneur en MS de 25,9 % et 24,4 %. Le sorgho 3 a un pourcentage plus élevé en MS car cette variété est rentabilisée dans l'industrie pour sa biomasse. Il est intéressant de comparer les résultats de cette année avec la moyenne sur cinq années calculée par le CIPF dans nos régions. Nous remarquons que nos résultats sont plus bas que la moyenne pour les variétés AMIGGO (moyenne = 31,5 % MS) et SWINGG (moyenne = 27,7 % MS) alors qu'ils sont plus élevés pour BIGGBEN (moyenne = 23,3 % MS) (CIPF asbl, 2021). Si la teneur en MS est assez faible, il est courant de mettre l'ensilage de sorgho au-dessus de l'ensilage de maïs pour que le maïs récupère les écoulements de jus. Cette différence entre les saisons vient des conditions climatiques. Les résultats moyens en France sont d'ailleurs plus élevés pour l'année 2021 que ceux de nos essais. La moyenne française de la variété SWINGG vaut 36,7% MS, la variété BIGGBEN vaut 31,4 % MS et la variété AMIGGO vaut 36,8 % MS (Arvalis et al., 2022). Cette étude rappelle, en effet, qu'il y a des différences entre le Nord et le Sud de la France lors de la maturité à la récolte et qu'il y a des différences entre variétés. Certaines sont par nature plus précoces que d'autres. Le test d'ANOVA nous le confirme car le facteur « génotype » est significatif.

7.3. Effet du génotype et du site sur la teneur en amidon dans la plante entière

Suite à l'analyse des résultats de la teneur en amidon des plantes entières, nous pouvons dire que le site n'impacte pas la réponse. Par contre, la différence entre les maïs et les sorghos est significative ($p.valeur < 0,0001$). La moyenne des maïs atteint 26,4 % d'amidon alors que la moyenne des sorghos atteint 0,795 % d'amidon. Ceci s'explique en partie par la physiologie de la plante. De fait, le maïs possède un ou deux épis remplis d'amidon alors que le sorgho n'en a pas. Dans nos régions, une teneur en amidon supérieure à 27,5% est considérée comme suffisante pour un bon maïs fourrage (Amerlynck et al., 2014). Le sorgho est surmonté d'une panicule avec des grains contenant également de l'amidon mais les variétés que nous avons sélectionnées sont des variétés sucrières en possédant peu. Leur valeur énergétique est principalement liée aux sucres solubles présents dans leur tige. A l'intérieur de cette tige, se trouve la moelle qui accumule petit à petit des sucres simples solubles pour arriver à une tige juteuse à maturité. En fonction du type de sorgho recherché, la teneur en amidon varie. Par exemple, le sorgho fourrager ne contient pas d'amidon alors que le sorgho grain atteint des taux élevés. Il est important de maîtriser le stade de récolte pour le sorgho grain afin d'éviter des teneurs trop élevées en amidon pouvant provoquer des acidoses chez le bovin (Arvalis et al., 2022). Les données de la littérature sont souvent fournies en % d'amidon dans le grain, ce qui complique la comparaison avec nos résultats.

7.4. Effet du génotype et du site sur la teneur en cellulose de la plante entière

Comme pour l'analyse de la teneur en amidon, le site n'influence pas la teneur en cellulose de la plante. Par contre, la moyenne des sorghos est plus élevée que la moyenne des maïs, avec respectivement 30,0 % et 22,4 % de cellulose. Une étude menée par le CRA-W et l'UCLouvain sur les cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération, indique que le sorgho fibre est plus performant que le maïs fibre en partie grâce à sa teneur en cellulose plus élevée que celle des maïs (Godin et al., 2010). Pour que la valorisation de la culture soit efficiente, la plante doit atteindre des teneurs élevées en cellulose et hémicellulose mais des teneurs faibles en lignine et en cendres. De plus, une plante capable de produire de la biomasse à moindres intrants sera préférée à une plante exigeante en intrants. En effet, les sols fertiles sont généralement dédiés au système alimentaire. Il reste alors des sols marginaux sur lesquels les cultures lignocellulosiques peuvent se développer malgré la plus faible fertilité. Le sorgho est donc intéressant pour sa teneur élevée en cellulose et son efficacité énergétique sur des sols moins fertiles (Godin et al., 2010). Nous pouvons faire un rapprochement entre les sorghos fibres et les sorghos sucriers de haute taille, comme le sorgho 3. En effet, l'objectif de cette culture est également l'obtention de biomasse. Nous ne sommes donc pas étonnée de voir le sorgho 3 avec des teneurs en cellulose plus élevées que celles des sorghos dédiés à l'alimentation animale. Le

sorgho 3 atteint 33,7 % de cellulose alors que les sorgho 1 et 2 atteignent respectivement 29,8 % et 27,2 % de cellulose. Une étude dans le Nord de la France en 2020 concernant les mêmes variétés, également sur un sol sableux, a montré que la variété AMIGGO était légèrement supérieure (35,4 %) à la nôtre mais les variétés SWINGG et BIGGBEN atteignaient des valeurs plus faibles que nos essais (respectivement 26,9 % et 20,9 %) (GERA Scarpe-Hainaut & Chambre d'Agriculture Nord-Pas de Calais, 2020).

7.5. Effet du génotype et du site sur la teneur en matières protéiques totales de la plante entière

Selon les analyses statistiques de la teneur en matières protéiques totales (MPT) des plantes, il y a une différence significative entre les résultats de Vieusart et ceux de Chaumont. Les teneurs moyennes en MPT à Vieusart sont de 7,86 % de la MS alors que le site de Chaumont atteint 4,77 % de la MS pour cette même mesure. La différence entre le type de sol a sûrement dû influencer les teneurs en MPT des deux sites. De plus, la différence entre les espèces est également significative. Les moyennes des maïs et des sorghos valent respectivement 5,77 % de la MS et 6,86 % de la MS pour la teneur en MPT. Ce constat n'est pas nouveau car de nombreuses études mettent en avant la faible teneur en protéines du maïs (CIPF, 1989; Meister, 2019; Vilarino & Skiba, 2010). En conséquence, la ration des vaches laitières doit être équilibrée avec un apport de légumineuses, par exemple. Le sorgho peut être une alternative (GERA Scarpe-Hainaut & Chambre d'Agriculture Nord-Pas de Calais, 2020). En effet, il comporte de meilleures teneurs en protéines et évite à l'agriculteur de devoir s'approvisionner en soja importé pour compléter les rations. En France, une étude montrait que les pourcentages variaient de 2,5 à 12,3 % de MPT entre les différentes variétés de sorgho en 2009 (Trouche et al., 2014). Nos variétés ont atteint en 2021 des teneurs en MPT de 8,41 ; 7,85 et 4,33 % de la MS pour respectivement les sorghos 1, 2 et 3. La variété sorgho 3, est significativement différente des deux autres (p.valeur < 0,0001).

7.6. Effet du génotype et du site sur la valeur énergétique de la plante

La moyenne des valeurs énergétiques des maïs est supérieure à celle des sorghos (p.valeur < 0,0001). Les maïs arrivent à 846 VEM/kg MS alors que les sorghos atteignent 747 VEM/kg MS. La physiologie de la plante est à l'origine de cette différence. Le maïs atteint généralement plus de 900 VEM/kg MS car il contient beaucoup d'amidon dans son épi, ce qui le rend intéressant pour le fourrage (Amerlynck et al., 2014; Foucart & Nihoul, 2022). La source d'énergie du sorgho est différente. Il est constitué d'une tige remplie de sucres solubles au sein de sa moelle. Les variétés BMR que nous avons sélectionnées ont des valeurs énergétiques plus élevées que les autres variétés et sont plus digestibles (Arvalis et al., 2022). Cependant, aucune de nos variétés de sorgho n'a surpassé le maïs, cette année. Avec les conditions très humides de la saison 2021, le sorgho n'a pas pu exprimer ses capacités en la matière. La moyenne de nos variétés de sorgho sur les cinq années de culture dans la région

ne surpasse pas non plus les maïs (CIPF asbl, 2021). Nous pouvons voir, par contre, une grande variabilité entre les variétés de sorgho. Nos résultats montrent que la variété de sorgho 3 est significativement différente des deux variétés plus petites, le sorgho 1 et 2 (p -valeur = 0,0021) car elle n'a pas pour but d'être valorisée en fourrage. Les valeurs moyennes énergétiques sont de 772, 800 et 669 VEM/kg MS pour respectivement les variétés de sorgho 1, sorgho 2 et sorgho 3. Les variétés 1 et 2 (SWINGG et BIGGBEN) sont habituellement valorisées sous forme de fourrage ce qui explique leur composition plus intéressante pour le bétail. Les valeurs énergétiques attendues du sorgho se situent entre 800 et 900 VEM/kg MS. Lorsqu'une saison a des conditions environnementales favorables aux sorghos, il est possible que certaines variétés surpassent les valeurs énergétiques des maïs témoins. Selon une étude du CIPF, les variétés BMR333 et Tonga ont d'ailleurs atteint entre 850 et 1000 VEM/kg MS pendant des années favorables (Foucart & Nihoul, 2022). Malheureusement, ces variétés sont considérées comme trop tardives pour nos régions. Nous devons alors nous tourner vers des variétés un peu moins énergétiques mais plus précoces. Le choix du génotype influence donc significativement la valeur énergétique de la plante et le test d'ANOVA nous le confirme car c'est le seul facteur qui est significatif.

8. Effet du génotype et du site sur le système racinaire

Les mesures relatives aux racines n'ont pas été faciles à effectuer et la méthode de mesure est critiquable. Comme expliqué dans la partie « matériels et méthodes », il n'était pas possible de compter, sur le champ, les racines qui sortaient de la section de la carotte à cause du manque du temps et de la trop faible surface de mesure (2 cm de diamètre). Nous avons compté le nombre de racines présentes dans un volume de sol au laboratoire. Le comptage des racines était impacté par les racines qui se cassaient. La mesure est potentiellement affectée d'une erreur. De plus il se peut que la distance où a été prise la mesure change. Les manœuvres en tracteur ne sont pas évidentes et il est arrivé que la distance séparant la prise de mesure des résidus de cultures, change. Les résultats sont donc influencés par ce biais. Cependant, les expérimentateurs sont restés les mêmes durant l'expérience, ce qui a limité d'autres variations.

Malgré ces remarques, des analyses ont tout de même été faites. Nous remarquons que le nombre et le poids des racines diminuent en fonction de la profondeur. Ce constat ne nous étonne pas étant donné les précipitations accumulées. Dans des conditions de sécheresse, nous aurions pu nous attendre à une densité racinaire un peu plus importante en profondeur permettant d'atteindre l'eau et les nutriments s'y trouvant (Paeßens et al., 2019). Nous pouvons tirer des analyses que les sorghos ont significativement plus de racines que les maïs aux trois profondeurs différentes. Le sorgho est par nature plus résistant à la sécheresse que le maïs grâce à son système racinaire plus dense et plus profond (CIPF, 2021b; Paeßens et al., 2019). Les racines du sorgho peuvent atteindre 2 m de profondeur alors que celles du maïs mesurent entre 0,9 et 1,2 m. Les résultats de nos essais montrent que la moyenne du nombre

de racines de sorgho dans la première couche de sol est de 27 racines dans 188,49 cm³ de terre alors que la moyenne des maïs n'en a que 12. Cette différence est significative (p.valeur < 0,0001). Les racines du sorgho sont plus fines ce qui permet de mieux pénétrer le sol et les besoins en eau du sorgho sont 20 % plus faibles que ceux du maïs (CIPF, 2021b). Dans un optique de changement climatique accompagné de sécheresses et d'une diminution de la disponibilité en eau, l'efficacité des plantes par rapport à l'utilisation de l'eau est importante (Serra-Wittling et al., 2020). Une étude dans le Nord de la France montre que la colonisation racinaire dans l'interligne est plus importante pour le sorgho que pour le maïs qui favorise un enracinement limité au rang (GERA Scarpe-Hainaut & Chambre d'Agriculture Nord-Pas de Calais, 2020).

Aux profondeurs 30-60 et 60-90 cm, nous pouvons mettre en avant une différence significative entre sites qui est sûrement due au type de sol. En effet, il y a plus de racines sur le site de Vieusart, sur sol sablo-limoneux, que sur le site de Chaumont, sur sol sableux. Comme expliqué précédemment, un sol sablo-limoneux est mieux adapté aux cultures et est plus productif par rapport à un sol sableux.

Les analyses liées au poids des racines ne vont pas être approfondies car seule la première couche de sol met en avant une différence entre sorgho et maïs. Les deux autres profondeurs ne mettent en évidence aucun résultat significatif.

9. Analyses liées à l'azote

Nous allons discuter ci-dessous de l'efficacité des plantes liée à l'utilisation de l'azote (NUE), de l'azote exporté par les plantes, et du bilan d'azote. Nous remarquons premièrement que les trois analyses nous indiquent qu'il y a une différence significative entre les sites. Les analyses du NUE et de l'azote exporté nous montrent que le site de Vieusart sur sol sablo-limoneux a de meilleures valeurs que le site de Chaumont sur sol sableux car un sol sablo-limoneux est plus productif, comme déjà expliqué. L'analyse du bilan d'azote nous indique que le site de Chaumont a un bilan d'azote supérieur à celui de Vieusart ; ce qui peut s'expliquer par le drainage du sol. Le site de Chaumont a un bilan positif et témoigne donc de pertes par lixiviation, non prises en compte dans ce bilan simplifié. Ce bilan est d'autant plus positif que le drainage a été élevé, ce qui est justifié sur sol sableux. Le sable laisse plus facilement l'eau s'écouler. L'azote lessivé est influencé en fonction du sol (la granulométrie, la teneur en humus, l'activité biologique) et en fonction de la plante (efficacité du prélèvement, système racinaire). Le site de Vieusart a eu un drainage moins important et a subi moins de lixiviation du nitrate. Cependant, un bilan ne peut pas être négatif. Cela traduit donc une sous-estimation de la minéralisation qui était importante pendant l'été 2021. L'azote minéralisé dépend des précipitations, de la température et de la teneur en humus du sol. Nous remarquons ensuite que les trois analyses présentent des différences significatives entre espèces. Les maïs exportent plus d'azote et ont un meilleur NUE que les sorghos. Une

étude sur le maïs en Belgique met en effet en évidence que le maïs valorise de manière très efficace l'azote (Amerlynck et al., 2014). Nous observons par ailleurs que le sorgho 3 n'est pas significativement différent des maïs 1 et 2 ce qui met en avant son efficience, équivalente à celle des maïs, semés à la même date. L'efficience du sorgho peut être expliquée par son système racinaire bien développé et par sa faible exigence en intrants (Chantereau et al., 2013). Le bilan d'azote des maïs est plus faible que celui des sorghos car le maïs exporte plus d'azote, ce qui tire son bilan vers le bas. Nous notons que seul le bilan du sorgho 3 est positif. Ce résultat est peut-être dû à sa bonne valorisation de l'azote qui laisse peu d'azote après la récolte dans le sol. En effet, l'azote mesuré après la récolte dans le sol occupé par le sorgho 3 est plus faible que les autres génotypes, semés à la même date. Il est important de noter que ce bilan est indicatif mais reste critiquable à cause des nombreuses estimations. De plus, comme le sorgho n'a pas pu terminer son cycle, il n'a pas pu valoriser l'azote comme l'a fait le maïs. C'est également un point auquel il faut faire attention.

10. Limites et améliorations du travail

Tout d'abord, il aurait été judicieux de faire des mesures de l'azote du sol sur une parcelle nue avant la date de semis et après la date de récolte. En effet, cette parcelle témoin aurait pu nous être utile pour mieux estimer le lessivage et la minéralisation de l'azote pendant la saison 2021. Avec les nombreuses précipitations rencontrées, ce facteur n'est pas négligeable et nous devons nous contenter d'une estimation.

De même, un bilan en eau aurait été intéressant. Au fur et à mesure des résultats, nous nous sommes rendue compte qu'il y avait une différence significative entre le site de Chaumont et le site de Vieusart. Par nature, le site de Vieusart est mieux adapté à la culture grâce à son sol sablo-limoneux. Mais avec les fortes précipitations du mois de juillet, le sol sableux à Chaumont aurait pu être plus bénéfique pour la plante grâce à sa bonne capacité de filtration pour éliminer l'excès d'eau. Sa macroporosité a une moins grande capacité à retenir l'eau. C'est pourtant le sol sablo-limoneux qui a primé en majorité. Nous nous demandons donc si un facteur autre que la nature du sol a joué. Peut-être que l'eau a du mal à s'éliminer par le bas du profil. Pour le savoir, il aurait été intéressant de mesurer l'eau présente dans le sol pendant la saison. Un lysimètre est capable de mesurer la profondeur de l'eau. Cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée même après la culture car le sol avait déjà été retravaillé.

Ensuite, les mesures effectuées sur le système racinaire auraient pu être améliorées à l'aide d'une tarière d'un plus grand diamètre. En effet, l'objectif principal était de compter le nombre de racines sortant de la section de la carotte de terre. Notre tarière, ne faisant que 2 cm de diamètre, n'a pas pu rendre cette mesure possible. Nous avons dû alors compter le nombre de racines dans un certain volume de terre mais ces données n'ont pas pu être comparées à la littérature. Cependant, il faut également tenir compte de la puissance nécessaire pour enfoncer la tarière dans le sol. Avec une plus grande surface, la force

nécessaire est d'autant plus importante. Des tests préliminaires doivent être effectués pour s'assurer que le tracteur arrive à enfoncer la tarière.

Il aurait été intéressant de suivre de plus près l'avancement de la maturité des plantes. Si nous l'avions suivi, nous aurions avancé les mesures afin de pouvoir toutes les faire sur les deux sites avant la récolte.

Dans l'optique d'étudier la culture de sorgho en Belgique pour la proposer ensuite aux agriculteurs, il faudrait continuer ce mémoire sur plusieurs années. Les résultats sont variables d'une année à l'autre en fonction des conditions environnementales. Il est donc plus intéressant de tirer des conclusions sur plusieurs années, comme le fait le CIPF qui s'occupe en partie d'étudier cette culture dans nos régions.

Conclusion

A travers des températures et périodes de sécheresse devenues extrêmes et irrégulières, les changements climatiques affectent de plus en plus les rendements du maïs fourrager. Les agriculteurs s'inquiètent de l'avenir de cette culture dans nos régions et s'intéressent à des alternatives. Le sorgho, d'origine africaine, est une possibilité. Cette plante tropicale nécessite moins d'eau et moins d'intrants que le maïs ensilage et peut servir de complément pour la ration du bétail ou être valorisée par de la biométhanisation. Avec le réchauffement climatique, la culture de sorgho devient de plus en plus envisageable dans nos régions.

Notre objectif est d'expérimenter la culture du sorgho en Région wallonne et d'étudier son potentiel agronomique afin de proposer cette céréale aux agriculteurs comme une alternative rentable au maïs fourrager. Pour y arriver, nous avons évalué le rendement et la qualité de la plante afin d'assurer une rentabilité économique.

Avec l'analyse des résultats de la saison 2021, nous avons pu dégager certaines tendances.

Premièrement, le maïs fourrager reste généralement plus avantageux que le sorgho sur plusieurs points. Le maïs obtient de meilleurs rendements en matière sèche, de meilleurs pourcentages en matière sèche et de meilleures valeurs énergétiques. Par contre, à défaut d'obtenir de bonnes teneurs en amidon, le sorgho se défend avec de bonnes teneurs en matières protéiques totales supérieures à celles du maïs. Son système racinaire est également plus développé mais la plante n'a pas pu tirer profit de cet avantage car la saison 2021 a été extrêmement humide par rapport à la moyenne et le sol ne manquait pas d'eau.

Deuxièmement, nous avons délimités deux groupes au sein des variétés de sorgho. Les deux variétés de petite taille (SWINGG et BIGGBEN) obtiennent des valeurs alimentaires proches

de celles du maïs, et sont intéressantes pour le fourrage animalier. A l'inverse, la variété AMIGGO a atteint 4 mètres de haut et a très bien développé sa biomasse. Elle obtient de plus gros rendements que les deux autres sorghos et peut être valorisée dans l'industrie par de la biométhanisation. Il est important de noter que les conditions climatiques de l'été 2021 n'étaient pas propices à la culture du sorgho, d'origine tropicale, sélectionné depuis peu pour nos régions ; pourtant les résultats ne sont pas si mauvais. Même si ses valeurs sont inférieures à celles du maïs cette année, le rendement de la variété AMIGGO et les valeurs énergétiques des variétés SWINGG et BIGGBEN sont correctes et ne peuvent qu'augmenter en cas de conditions environnementales plus chaudes et sèches.

Troisièmement, l'effet du site nous montre que le sol sablo-limoneux de Vieusart est plus propice aux deux cultures malgré l'excès d'eau dû aux fortes précipitations. Ce sol est plus productif, plus riche, et a donné de meilleurs résultats.

Pour conclure, lors de la saison 2021, le sorgho n'a pas pu concurrencer le maïs mais ce n'est pas pour autant qu'il est sans intérêt. Le sorgho est plus résistant à la sécheresse, il est moins exigeant en engrais et peut atteindre des résultats proches de ceux du maïs. Il ne risque pas d'attaque de sanglier car sa graine de petite taille n'est pas attractive et ne rencontre pas de maladie de feuillage. De plus, il peut être intéressant de l'introduire dans un système de rotation de cultures en vue de toujours obtenir les aides financières de la PAC 2023-27. Bien que le sorgho soit intéressant sur plusieurs points, il faut garder à l'esprit qu'il reste sensible aux basses températures et que les sorghos biomasse sont sensibles à la verse.

A l'avenir, il faut préconiser des sorghos sucriers avec une bonne précocité pour s'assurer qu'ils puissent terminer leur cycle et atteindre une teneur en matière sèche suffisante pour éviter les pertes de jus. Une culture de sorgho sera favorisée si le sol est léger et considéré comme trop limitant en eau pour une culture de maïs.

Il est indispensable de continuer l'étude du sorgho dans nos régions pour évaluer au mieux les opportunités que nous offre cette plante. D'une année à l'autre, les résultats changent fortement en fonction des conditions environnementales. La saison 2021 n'était pas particulièrement favorable au sorgho mais d'autres années plus sèches ont permis d'obtenir certains résultats supérieurs à ceux du maïs. Comme l'annonce le GIEC, les périodes de sécheresse et de fortes températures vont s'intensifier et se présenter de plus en plus fréquemment. Il est donc important d'étudier aujourd'hui les cultures de demain.

Bibliographie

- ADC BioScientific Ltd. (2017). *CCM-200 plus Chlorophyll Content Meter*.
<https://www.adc.co.uk/wp-content/uploads/2019/08/CCM200plus.pdf>
- Amerlynck, D., Lambert, R., Foucart, G., Mary, M., Oost, J.-F., Renard, F., Cremer, S., Knoden, D., & Widar, J. (2014). *La culture du maïs en Ardenne, le cas du Parc naturel Haute-Sûre Forêt d'Anlier*.
- Anzala, F. (2006). *Contrôle de la vitesse de germination chez le maïs (Zea mays) : Étude de la voie de biosynthèse des acides aminés issus de l'aspartate et recherche de QTLs*. 149. Archives ouvertes.
- Arvalis, Volan, S., Danel, J., Treguier, A., Thibord, J.-B., Gendre, S., Taulemesse, F., Chauveau, H., Uijttewaalt, A., Moquet, M., & Verdier, J. L. (2022). *Choisir et décider, sorgho, variétés et interventions, synthèse nationale 2021-2022* [Rapport de synthèse nationale 2021-2022].
- BASF. (s. d.). *Stomp® Aqua*. Consulté 31 mars 2022, à l'adresse
<https://www.agro.basf.ch/fr/Products/Overview/Herbicide/Stomp-Aqua.html>
- Beillouin, D., Schauburger, B., Bastos, A., Ciais, P., & Makowki, D. (2020). *Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018*.
<http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>
- Bertin, P. (2020). *Le maïs*. LBRAI2106 - cours de phytotechnie.
- Bertin, P. (2022). *Les céréales tropicales* LBRAI2106 [Diapositives].
- Blondel, D. (1971). *Contribution à l'étude de la croissance-matière sèche et de l'alimentation azotée des céréales de culture sèche au Sénégal*. 3, 707-720.
- Boy, A., & Guillaumin, P. (2021). *3rd European sorghum congress*.
- Bureau de la biosécurité végétale. (1994). *La biologie de Zea mays L.* (N° BIO1994-11). Agence canadienne d'inspection des aliments.
<https://www.yumpu.com/fr/document/read/16987900/la-biologie-de-zea-mays-l-agence-canadienne-dinspection-des->
- Chantereau, J., Cruz, J.-F., Ratnadass, A., Trouche, G., & Fliedel, G. (2013). *Le sorgho*. éditions Quae. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2062-5>

- Charrier, A., Jacquot, M., Hamon, S., & Nicolas, D. (1997). *L'amélioration des plantes tropicales* (Service des éditions du CIRAD).
- CIPF. (1989). *Guide du maïs* (Jean-François Ledent).
- CIPF. (2017). *Présentation CIPF*. Consulté 12 mars 2022, à l'adresse <https://cipf.be/fr/cipf>
- CIPF. (2021a). *CIPF - Le maïs en Wallonie*. Consulté 14 mars 2022, à l'adresse <https://cipf.be/fr/mais/mais-en-wallonie>
- CIPF. (2021b). *Sorgho*. Consulté 16 mars 2022, à l'adresse CIPF. <https://cipf.be/fr/sorgho>
- CIPF. (2022). *Critères de choix variétal*. Consulté 14 mars 2022, à l'adresse <https://cipf.be/fr/mais/varietes-semis/critere-choix-varietal>
- CIPF asbl. (2021). *Mise en place d'un essai sorgho en collaboration avec le SPW-Direction Recherche et Développement*.
- CIRAD. (2021, juin 7). *Contexte et enjeux du sorgho*. CIRAD. <https://www.cirad.fr/nos-activites-notre-impact/filieres-agricoles-tropicales/sorgho/contexte-et-enjeux>
- CRA-W. (2022). *Livre blanc « céréales »—Février 2022*.
- De Toffoli, M. (2022, juin 8). *Réunion sur le bilan azote de la saison 2021* [Communication personnelle].
- Dolciotti, I., Mambelli, S., Grandi, S., & Venturi, G. (1996). *Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fiber production* (N° 7; Industrial Crops and Products, p. 265-272).
- Dufossé, K., Drouet, J.-L., & Gabrielle, B. (2016). *Agro-ecosystem modeling can aid in the optimization of biomass feedstock supply* (N° 85; Environmental Modelling & Software, p. 139-155). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.014>
- FAO. (1993). *Le maïs dans la nutrition humaine*. Rome.
- FAO. (1995). *Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine*. Collection FAO : Alimentation et nutrition. Rome
- FAO. (2020). *sorgho : Cultures et produits animaux*. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL/visualize>
- FAOSTAT. (2020). *Maïs—Cultures et produits animaux*. FAOSTAT. Consulté 20 mars 2022, à l'adresse <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL/visualize>
- Foucart, G., & Nihoul, P. (2022). *Les sorghos pour l'alimentation des bovins : Une alternative au maïs ? Résultats de 8 années d'essais*.

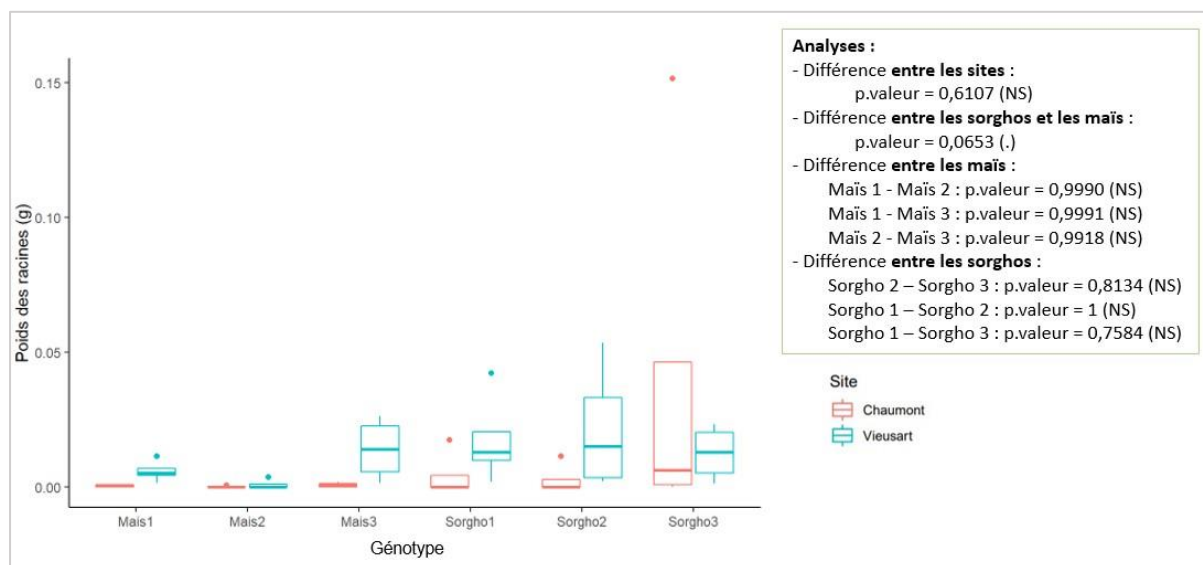
- Gabriel, J. L., & Quemada, M. (2010). *Replacing bar fallow with cover crops in a maize cropping system : Yield, N uptake and fertiliser fate* (European Journal of Agronomy). Madrid. Elsevier. doi:10.1016/j.eja.2010.11.006
- GERA Scarpe-Hainaut & Chambre d'Agriculture Nord-Pas de Calais. (2020). *Essais du GEDA Scarpe-Hainaut, Maïs associé lablab et sorghos monocoupe* (p. 1-4).
- GIEC. (2022a). *Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers IPCC AR6 WG III*
https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf
- GIEC. (2022b). *Reports*. <https://www.ipcc.ch/>
- GIEC, Masson, D., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S., Péan, C., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M., Matthews, J. B. R., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., & Waterfield, T. (2021). *Climate Change 2021, The Physical Science Basis*.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.
- Godin, B., Ghysel, Agneessens, R., Schmit, T., Gofflot, S., Lamaudière, S., Sinnaeve, G., Goffart, J.-P., Gerin, P. A., Stilmant, D., & Delcarte, J. (2010). *Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération* (N° 14; Biotechnol. Agron. Soc. Environ., p. 549-560). <http://hdl.handle.net/2078.1/163752>
- Gonzalez, J.-M., Mailhol, J.-C., & Ruget, F. (2008). *Impacts du changement climatique sur la demande en eau d'irrigation. Exemple du maïs dans la Drôme (France)* (TSM n°3).
- Halilat, M. T., & Tessier, D. (2006). *Amélioration de la rétention en eau de matériau sableux par ajout de bentonite* (N° 4; Cahiers Agricultures, p. 347-353).
- Hugues, P. (1964). *Les sorghos fourragers*.
- IRM. (2021). *Bilan climatique saisonnier été 2021*.
- IRM. (2022). *Le climat à l'horizon 2100*. KMI. Consulté 30 mars 2022, à l'adresse
<https://www.meteo.be/fr/climat/changement-climatique-en-belgique/le-climat-a-lhorizon-2100>
- ITC. (2020). *Trade Map—Liste des importateurs pour le produit sélectionné (Sorgho à grains)*. Trade Map. Consulté 8 avril 2022, à l'adresse
https://www.trademap.org/Country_SelProduct_TS.aspx?nvpm=2%7c%7c%7c%7c%7c1007%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c2%7c4%7c1%7c1

- Khaledian, M. R., Mailhol, J.-C., Ruelle, P., & Mubarak, I. (2011). *Impacts of direct seeding into mulch on the yield, water use efficiency and nitrogen dynamics of corn, sorghum and durum wheat* (p. 402). Wiley. DOI: 10.1002/ird.661
- Khawaja, C., Janssen, R., & Rutz, D. (2014). *Manuel du sorgho-énergie, une culture énergétique alternative* (Sweetfuel project). WIP Renewable Energies.
- Khodarahmpour, Z., & Hamidi, J. (2012). *Study of yield and yield components of corn (Zea mays L.) inbred lines to drought stress* (N° 13; AfricanJournal of Biotechnology Vol. 11).
- Limagrain. (2022). LG 31.238. Consulté 30 avril 2022, à l'adresse <https://www.lgseeds.nl/lg-31-238>
- Louis, A. (1960). *Carte des sols de la Belgique, texte explicatif de la planchette de Feluy 128 E* (p. 52-57).
- Maisonneuve, & Larose. (1991). *Le sorgho*.
- MAS Seeds. (2020). MAS 232.S. Consulté 30 avril 2022, à l'adresse <https://www.masseeds.fr/sites/masseeds.fr/files/seed/MAS%20232.S%20int%C3%A9ractiv.pdf>
- Meister, N. (2019). *Protection des eaux et du sol dans une culture de maïs ensilage à l'aide d'un couvert végétal associé*.
- Mérigout, P. (2006). *Etude du métabolisme de la plante en réponse à l'apport de différents fertilisants et adjuvants culturaux. Influence des phytohormones sur le métabolisme azoté*. (p. 6,10,13). <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002273>
- Nations Unies. (2015). *L'Accord de Paris*. Consulté 8 avril 2022, à l'adresse <https://unfccc.int/fr/processus-et-reunions/l-accord-de-paris/l-accord-de-paris>
- Nyabyenda, P. (2006). *Les plantes cultivées en régions tropicales d'altitude d'Afrique* (Bietlot).
- Paeßens, B., Manderscheid, R., Pacholski, A., Varga, B., Erbs, M., Kage, H., Sieling, K., & Weigel, H.-J. (2019). Effects of free-air CO₂ enrichment and drought on root growth of field grown maize and sorghum. *Journal of Agronomy and Crop Science*. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jac.12339>
- Parry, C., Bugbee, B., & Blonquist, J. M. (2014). *In situ measurement of leaf chlorophyll concentration : Analysis of the optical/absolute relationship* (N° 37; Plant Cell and Environment, p. 2508-2520). ResearchGate. doi: 10.1111/pce.12324

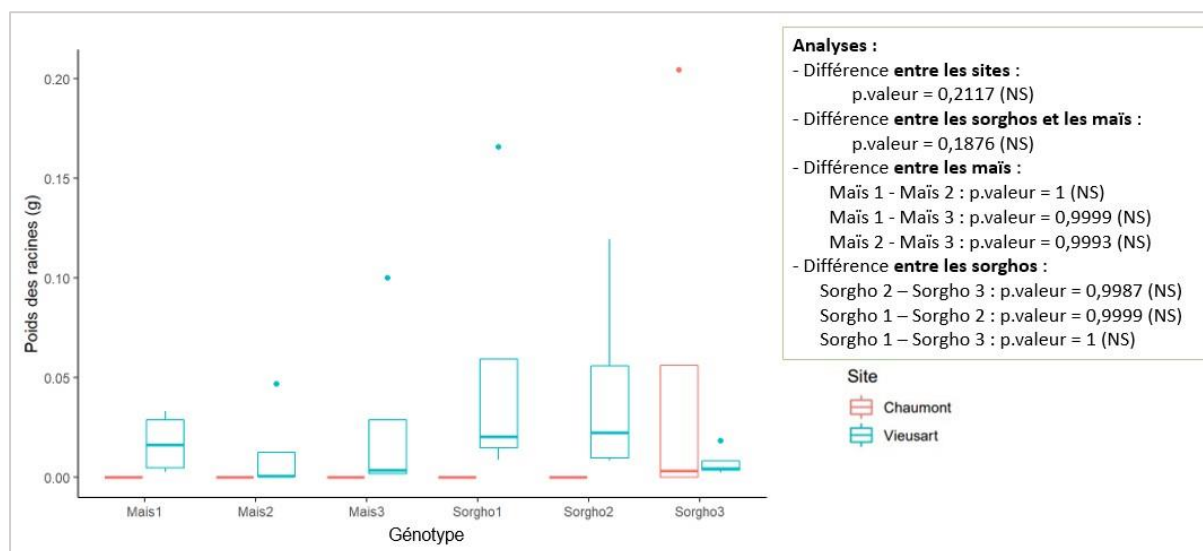
- Perlein, A., Bert, V., Desannaux, O., Fernandes de Souza, M., Papin, A., Gaucher, R., Zdanevitch, I., & Meers, E. (2021). *The Use of Sorghum in a Phytoattenuation Strategy : A Field Experiment on a TE-Contaminated Site* (p. 3,6,7,8). Applied Science. Werther. <https://doi.org/10.3390/app11083471>
- Phytoweb. (2015a, juin 4). *Consulter autorisations de produits phytopharmaceutiques*. Phytoweb. Consulté 30 avril 2022, à l'adresse <https://fytoweb.be/fr/produits-phytopharmaceutiques/consulter-autorisations-de-produits-phytopharmaceutiques>
- Phytoweb. (2015b, juin 4). *Consulter autorisations de produits phytopharmaceutiques—Callisto*. Phytoweb. Consulté 30 avril 2022, à l'adresse <https://fytoweb.be/fr/produits-phytopharmaceutiques/consulter-autorisations-de-produits-phytopharmaceutiques>
- Radhouane, L., & Aissa, N. (2014). *Impact of flag leaf water status and chlorophyll index of Sorghum (Sorghum vulgare L.) on yield components under water salines stresses* (p. 111-117) [International Journal of Innovation and Scientific Research].
- RAGT Semences. (2016). *RGT AMIGGO*.
- RAGT Semences. (2018a). *La méthanisation*.
- RAGT Semences. (2018b). *RGT SWINGG*.
- RAGT Semences. (2020). *RGT BIGGBEN*.
- Renoux, J.-P. (2014). *Le maïs, une plante pour l'intensification écologique* (Editions France Agricole).
- Serra-Wittling, C., Baralla, S., Bravo Dominguez, I., Drastig, K., Ghinassi, G., Guillot, S., Nagy, A., Nagy, V., Popova, Z., & Topçu, S. (2020). *Adaptation de l'irrigation au changement climatique dans l'union européenne : Les actions engagées par les états membres pour économiser l'eau* (N° 34). DOI 10.3917/set.034.0008
- Sorghum ID. (2019). *Les atouts et contraintes du sorgho, vus par les producteurs français*.
- Sorghum ID. (2020, février 13). *Le sorgho-étoilé et le progrès génétique : Axes de recherche et perspectives*. Sorghum ID. <https://www.sorghum-id.com/sorgho-etoile-progres-genetique-axes-de-recherche-perspectives/>
- SPF. (2021). *Observations en Belgique*. Klimaat | Climat. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/changements-observees>
- SPW. (2017). *Rapport sur l'état de l'environnement wallon*. 368.

- Syngenta. (s. d.). *Gardo Gold—SYNGENTA herbicide*. Agrobase. Consulté 14 mars 2022, à l'adresse <https://agrobasesapp.com/belgium-french/pesticide/gardo-gold-3>
- Thomas, F., & Archambeaud, M. (2013). *Les couverts végétaux, gestion pratique de l'interculture* (France Agricole).
- Trouche, G., Bastianelli, D., Cao Hamadou, T. V., Chantereau, J., Rami, J.-F., & Pot, D. (2014). *Exploring the variability of a photoperiod-insensitive sorghum genetic panel for stem composition and related traits in temperate environments* (N° 166; Fiel Crops Research, p. 72,73,76). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.06.008>
- Vailles, C. (2021, septembre 14). D'où viennent les cinq nouveaux scénarios du GIEC ? *I4CE*. <https://www.i4ce.org/dou-viennent-les-cinq-nouveaux-scenarios-du-giec-climat/>
- Vilarino, M., & Skiba, F. (2010). *Alimentation animale, le sorgho grain français a des atouts* (N° 364; Perspectives agricoles, p. 11-13).
- Xu, W., Subudhi, P. K., Crasta, O. R., Rosenow, D. T., Mullet, J. E., & Nguyen, H. T. (2000). *Molecular mapping of QTLs conferring stay-green in grain sorghum (Sorghum bicolor L. Moench)* (p. 461, 462).

Annexes



Annexe 1 : Poids des racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 30-60 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante)



Annexe 2 : Poids des racines juste après la récolte dans un volume de 188,49 cm³ de terre en fonction du site et du génotype de sorgho ou de maïs, à une profondeur de 60-90 cm (somme de deux carottes de 2 cm de diamètre prises à 10-15 cm du pied de la plante)

Potentiel agronomique du sorgho en Région wallonne face aux enjeux des changements climatiques impactant la culture du maïs fourrager

Présenté par Caroline Pierret

Dans un contexte de changements climatiques, il est nécessaire d'étudier des alternatives à la culture du maïs fourrager, affectée par les sécheresses à répétition. Le sorgho, une plante tropicale d'origine africaine, pourrait être une solution grâce à ses nombreux avantages.

L'objectif de ce mémoire est d'expérimenter la culture du sorgho en Région wallonne et d'étudier son potentiel agronomique afin de proposer cette céréale aux agriculteurs comme une alternative rentable au maïs fourrager. Pour ce faire, nous avons étudié trois variétés de sorgho sucrier et trois variétés de maïs, sur deux sites représentatifs de la région, un sol sablo-limoneux, et un sol sableux. Les génotypes sélectionnés sont précoces et rentables pour les agriculteurs. Nous avons analysé des caractéristiques qualitatives et quantitatives de ces deux espèces pour évaluer leur rentabilité. Par la suite, des analyses statistiques ont différencié l'effet du site, l'effet de l'espèce et l'effet du génotype sur les différentes mesures.

La saison 2021 a été marquée par des fortes précipitations inattendues qui ont influencé les résultats. En général, le maïs n'a pas pu être concurrencé par le sorgho. Cependant, les résultats que nous avons obtenus dans des conditions non optimales pour le sorgho, ne sont pas si loin des résultats du maïs. Nous avons remarqué que les variétés de sorgho SWINGG et BIGGBEN ont atteint de bonnes valeurs énergétiques, et que la variété AMIGGO a atteint un rendement correct pour de la valorisation en industrie. Malgré la dominance majeure du maïs, le sorgho n'est pas sans intérêt et possède de nombreux avantages.

L'effet du site était souvent significatif et indique que le sol sablo-limoneux était plus productif que le sol sablonneux.

L'étude du potentiel des cultures alternatives aux maïs est d'actualité et nécessite un travail sur plusieurs années afin de mieux gérer les variations environnementales d'une année à l'autre.