

Faculté des bioingénieurs

Comparaison au champ et multiplication variétale du sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum* Moench)

Auteur : Merlin Van den Bossche

Promoteurs : Pr. Quinet Muriel (SST/ELI/ELIA)

Dr. Jacquemin Guillaume (CRA-W)

Lecteur(s) : Pr. Draye Xavier (SST/ELI/ELIA)

Pr. Lambert Richard (SST/ELI/ELIA)

Année académique 2024-2025

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

Remerciements

Le mémoire est un travail collaboratif...

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Madame Muriel Quinet, promotrice de ce mémoire, pour son accompagnement bienveillant, constant et plus précieux encore que je n'aurais pu l'imaginer. Par ses relectures attentives, ses conseils avisés, ses mails toujours clairs et ses réunions régulières, elle a largement contribué à faire de ce travail ce qu'il est aujourd'hui.

Je remercie également Monsieur Guillaume Jacquemin, co-promoteur, pour son soutien logistique, ses conseils techniques et l'accès au matériel du CRA-W, ainsi que pour la mise à disposition d'une parcelle privée pour la réalisation des essais.

Un immense merci à Corentin Defalque, doctorant, pour son engagement sur le terrain. Il n'a pas hésité à consacrer de nombreuses journées aux mesures, avec un enthousiasme désintéressé. Son aide m'a été précieuse et je suis heureux de pouvoir aujourd'hui le compter parmi mes amis. Je tiens également à remercier Igor de le Vingne, doctorant, pour son soutien méthodologique dans l'analyse des résultats et la rédaction. Son aide rigoureuse m'a permis de mieux structurer mes idées et d'en affiner la formulation scientifique.

Mes remerciements vont aussi à Alice Nysten et Justine Gruntowy pour leur appui dans la gestion et l'organisation des essais, ainsi qu'à l'ensemble du CRA-W pour la mise à disposition de parcelles, de serres perméables et de matériel d'isolement nécessaire à la multiplication des variétés. Je remercie chaleureusement l'équipe du CePiCOP, notamment Rémy Blanchard, Olivier Decelle et Patrick Gustin, ainsi que Gembloux Agro-Bio Tech (ULiège) avec Laurent Quertinmont, pour leurs conseils techniques, leur aide à la prise de mesures et le suivi des cultures. Merci également aux Fermes universitaires de l'UCLouvain pour l'accès à la zone expérimentale de Louvain-la-Neuve.

De manière plus générale, je remercie tous les membres du laboratoire GRPV (professeurs, doctorants, techniciens et autres mémorants) pour leur expertise, leur soutien et leurs conseils judicieux.

Je souhaite remercier mon père pour sa relecture attentive de ce document conséquent, ma mère pour le prêt de sa voiture pour me rendre au champ, ainsi que ma copine, pour sa présence constante, ses encouragements et son soutien autant dans les moments de doute que dans les étapes les plus sereines de ce travail.

Enfin, je dédie ce travail à ma grand-mère malheureusement décédée peu après l'obtention du sujet de ce mémoire. Elle m'aura toujours soutenue dans tout ce que j'ai entrepris, notamment mes études et ce mémoire, et a toujours cru en moi et a su m'encourager avec une bienveillance sans faille.

1 Table des matières

1	Table des matières	3
2	Liste des figures	5
3	Liste des tableaux	7
4	Liste des abréviations	9
5	Introduction.....	10
6	Etat de l’art.....	11
6.1	Changement climatique et changement agricole	11
6.1.1	Le changement climatique, ses causes et conséquences.....	11
6.1.2	Conséquences sur le monde agricole	12
6.1.3	Lien complexe entre agriculture et changement climatique	13
6.1.4	Diversification des cultures pour répondre au changement climatique	14
6.1.5	Sarrasin, voie de diversification	14
6.2	Sarrasin commun (<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench)	15
6.2.1	Histoire et production	15
6.2.1.1	Origine	15
6.2.1.2	Production de sarrasin en Belgique au cours du temps	17
6.2.1.3	Production de sarrasin mondiale actuelle	17
6.2.2	Biologie et écologie du sarrasin	19
6.2.2.1	Morphologie du sarrasin.....	19
6.2.2.2	Caractéristiques de croissance et cycle de vie.....	20
6.2.2.3	Détermination.....	21
6.2.2.4	Adaptabilité aux sols et conditions environnementales.....	21
6.3	Bénéfices et utilisations	22
6.3.1	Contribution à une agriculture durable.....	22
6.3.2	Nutrition et santé	22
6.3.2.1	Composition nutritionnelle.....	22
6.3.2.2	Propriétés nutraceutiques et bienfaits pour la santé	24
6.3.3	Usages alimentaires diversifiés	24
6.4	Sélection génétique, amélioration et multiplication du sarrasin commun (<i>Fagopyrum esculentum</i>).....	25
6.4.1	Sélection et amélioration du sarrasin	25
6.4.2	Multiplication du sarrasin	25
7	Objectifs du mémoire.....	26
8	Matériel et méthodes	27
8.1	Matériel végétal	27
8.2	Étude comparative des variétés au champ	27
8.2.1	Sites et gestion de la culture	27
8.2.1.1	Louvain-la-Neuve	30
8.2.1.2	Gembloux	31
8.2.1.3	Grand-Leez.....	31

8.2.2	Météo durant les essais	33
8.2.3	Paramètres mesurés	34
8.2.3.1	Mesures phénologiques	34
8.2.3.2	Mesures morphologiques	35
8.2.3.3	Paramètres de rendement.....	37
8.3	Mise au point d'une méthode de multiplication des graines	37
8.3.1	Conditions de culture et arrosages	37
8.4	Analyses statistiques	38
8.4.1	Tests de normalité et d'homogénéité des variances et tests statistiques	39
8.4.2	Modèles linéaires généralisés (GLM)	39
8.4.3	Autres analyses : ACP et ACM	39
9	Résultats	40
9.1	Comparaison variétale	40
9.1.1	Comparaison variétale à Louvain-la-Neuve	40
9.1.1.1	Développement général et cycle de vie des variétés de Louvain-la-Neuve	40
9.1.1.2	Paramètres morphologiques des variétés de Louvain-la-Neuve	41
9.1.1.3	Analyse des paramètres de rendements	45
9.1.2	Comparaison variétale à Gembloux	50
9.1.2.1	Développement général et cycle de vie.....	50
9.1.2.2	Paramètres morphologiques des variétés de Gembloux.....	51
9.1.2.3	Analyse des paramètres de rendements des variétés de Gembloux	54
9.1.3	Comparaison entre sites pour les variétés communes	55
9.1.3.1	Récapitulatif des paramètres importants.....	55
9.1.3.2	ACM communes aux résultats des sites	56
9.1.3.3	Analyse par ANOVA 2 de l'effet site et variété	58
9.2	Multiplication variétale	59
10	Discussion	60
10.1	Impact du génotype sur la croissance et le rendement chez le sarrasin	60
10.1.1	Durée du cycle de vie et stades de développement.....	60
10.1.2	Performance de rendement et lien avec les paramètres morphologiques.....	60
10.1.3	Comparaison entre variétés déterminées et indéterminées	62
10.2	Perte de la parcelle de Grand-Leez	63
10.3	Impact de l'environnement sur la croissance et le rendement chez le sarrasin.....	63
10.3.1	Cycle de vie et paramètres morphologiques importants	64
10.3.2	Paramètres de rendements.....	66
10.4	Choix de variétés et suite du Sarrasin en Belgique	70
10.4.1	Pertinence du sarrasin commun en Belgique et sa sélection	70
10.4.2	Choix des variétés les plus performantes.....	71
11	Conclusion.....	72
12	Bibliographie	73

13	Annexes.....	81
13.1	Compléments d’informations sélection du sarrasin	81
13.2	Tableau de provenance des variétés étudiées.....	83
13.3	Autre méthode de multiplication par élevage de syrphes.....	84
13.4	Tableau degrés jour complet pour atteindre les différents stades par variétés et par site.....	84
13.5	Données de Grand-Leez	86
13.6	Test Hypothèse ANOVA sur les données	87
13.7	Suppléments d’informations modèles GLM	89
13.7.1	GLM complet RDT.....	89
13.7.2	GLM complet PMG	91
13.8	Supplément d’informations ACP.....	93
13.9	Clustering CAH et K-means	95
13.9.1	Clustering	95
13.9.1.1	Clustering méthode ascendante hiérarchique (CAH)	95
13.9.1.2	Clustering méthode des K-means	98
13.10	Supplément d’informations ACM	99
13.11	Accès à toutes les données	100

2 Liste des figures

Figure 1 Scénarios possibles du changement climatique en fonction des émissions futures de gaz à effet de serre ²	11
Figure 2 Évolution depuis 1950 des sécheresses autour du monde et leur lien avec les activités humaines ⁵	12
Figure 3 Évolution de l’intérêt croissant du sarrasin dans la recherche scientifique ⁴⁴	16
Figure 4 Evolution de la production et la superficie mondiale de culture du sarrasin (en million de tonnes et millions d'hectares)	18
Figure 5 Evolution de la production et la superficie de culture du sarrasin d’Europe occidentale (en million de tonnes et millions d'hectares) ¹³	18
Figure 7 Morphologie générale du sarrasin ²⁴	20
Figure 7 Hétérostylie avec (a) brévistyle et (b) longistyle ²¹	20
Figure 8 Répartition géographique en Belgique des essais de sarrasin réalisés.....	28
Figure 9 Moissonneuse WINTERSTEIGER série Delta lors de la récolte de l’essai de Louvain-La-Neuve	29
Figure 10 Machine de triage de grain de CEPICOP.....	30
Figure 11 Situation géographique de la parcelle d'essai de LLN appartenant aux Fermes universitaire de l’UCLouvain.....	30
Figure 12 Situation géographique de la parcelle d'essai de Gembloux appartenant au CRA-W	31
Figure 13 Situation géographique de la parcelle d'essai de Grand-Leez appartenant à M. Guillaume Jacquemin.....	32
Figure 14 État de la parcelle (A) après pluie et période fraîche et (B) après envahissement par des adventices sur la parcelle d’essai de Grand-Leez.....	32
Figure 15 Température moyenne et précipitation des stations météo les plus proches des sites d’essais, en rouge la température moyenne (°C) et en bleu les précipitation (mm). Les dates de semis	

sont indiquées par Sowing (Site) et de récolte par Harvest (Site). Avec en haut LLN (A) et en bas Gembloux (B), le site 1 correspond à la parcelle de Gembloux, le site 2 celle de Grand-Leez	33
Figure 16 Stade de développement du sarrasin commun de 1 (en haut à gauche) à 9 (en bas à droite)83	34
Figure 17 Forme des feuilles avec 1 ovale, 2 hastée, 3 sagittée, 4 cordée ⁸³	36
Figure 18 Machine de comptage de grain NUMIGRAL2 et balance	36
Figure 19 Photo de pallox non isolé par filet du site de multiplication du CRA-W, au stade d'émergence	37
Figure 20 Outil aspirateur servant à capturer les pollinisateurs (A) et l'utilisation de l'outil (B) photo pour l'exemple en champ de sarrasin.	38
Figure 21 Évolution du nombre de degrés jours nécessaires pour atteindre les différents stades de développement phénologiques du sarrasin en fonction des variétés pour le site de Louvain-la-Neuve.	40
Figure 22 Taille des plantes par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) aux stades 7-8 (B) aux stades 3-4. Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.	41
Figure 23 Caractéristiques morphologiques de feuilles bien développées par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) nombre de feuilles par plante, (B) longueur et (C) largeur de limbes, (D) longueur de pétioles. Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.	42
Figure 24 Caractéristiques morphologiques de tiges bien développées et verse par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) intensité de verse avec une observation générale par parcelle (1→3), (B) Nombre de ramification/branchement, (C) diamètres des tiges entre les 2 premiers nœuds, (D) longueur entre les 2 premiers entrenœuds. Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	43
Figure 25 Caractéristiques des racèmes bien développés par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) nombre de racèmes par plante, (B) longueur d'un racème, (C) intensité de la densité de racème avec une observation par variété, (D) intensité du taux d'avortement des fleurs avec une observation par variété (1→3). Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.	44
Figure 26 Paramètres agronomiques de rendements par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) poids par hectolitre, (B) humidité relative, (C) rendement, (D) poids de milles grains. Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	46
Figure 27 Cartes des individus dans les 2 premières dimensions de l'ACP en fonction des variétés ...	49
Figure 28 Cercle des corrélations pour les 2 premières dimensions de l'ACP avec représentation des variables continues pour le site d'essai de LLN	49
Figure 29 Évolution du nombre de degrés jours nécessaires pour atteindre les différents stades de développement phénologiques du sarrasin en fonction des variétés pour le site de Gembloux.	51
Figure 30 Taille des plantes par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) aux stades 7-8 (B) aux stades 3-4.....	52
Figure 31 Caractéristiques morphologiques de tiges bien développées et verse par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) intensité de verse (1→3), (B) Nombre de ramification/branchement, (C) diamètres des tiges et (D) longueur entre les 2 premiers nœuds.	53
Figure 32 Caractéristiques morphologiques de feuilles bien développées par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) nombre de feuilles par plante, (B) longueur (C) et largeur de limbes, (D) longueur de pétioles.....	53
Figure 33 Caractéristiques reproductives de racèmes bien développés par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) nombre de racèmes par plante, (B) longueur de racèmes, (C) intensité de la densité de racème par plante et intensité du taux d'avortement des fleurs (1→3).	54
Figure 34 Paramètres agronomiques de rendements par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) poids par hectolitre, (B) humidité relative, (C) rendement, (D) poids de milles grains.	55

Figure 35 (A) Cercle des corrélations des variables continues (B) représentation des variables catégorielles dans les 2 premières dimensions de l'ACM rassemblant les deux sites d'essais (Louvain-la-Neuve, Gembloux).....	57
Figure 36 Cartes des individus dans les 2 premières dimensions de l'ACP en fonction des variétés avec (A) ellipses manuelles en fonction des sites, (B) ellipses manuelles en fonction des variétés pour l'ACM rassemblant les deux sites d'essais (Louvain-la-Neuve, Gembloux).....	58
Figure 37 Résultats de la multiplication des variétés avec (A) poids total des graines produites par variété pour l'essai de multiplication et (B) estimation du nombre de graines obtenues par variété sur base des mesures de PMG.	59
Figure 38 Schéma de sélection sarrasin avec brévistyle (pin) et longistyle (thrum) ⁷⁸	82
Figure 39 Évolution du nombre de degrés jours nécessaires pour atteindre les différents stades de développement phénologiques du sarrasin en fonction des variétés pour le site de Grand-Leez.....	86
Figure 40 Vérification graphique des hypothèses de l'ANOVA et des points influents pour le modèle du rendement complet.....	90
Figure 41 Vérification graphique des hypothèses de l'ANOVA et des points influents pour le modèle du rendement restreint.....	90
Figure 42 Vérification graphique des hypothèses de l'ANOVA et des points influents pour le modèle du PMG complet.....	92
Figure 43 Vérification graphique des hypothèses de l'ANOVA et des points influents pour le modèle du PMG restreint.....	92
Figure 44 Scree plot représentant la part de la variance expliquée en fonction du nombre de dimensions	94
Figure 46 Graphiques utilisés pour déterminer le nombre optimal de clusters dans le cadre du CAH : de gauche à droite, la méthode des Within Sum of Squares (A), la silhouette moyenne (B), et la Gap Statistic (C) pour la méthode du CAH.....	96
Figure 45 CAH des variétés dans les 2 premières dimensions représenté sous forme de carte des clusters	96
Figure 47 Dendrogramme de segmentation des groupes du CAH à gauche et table comparative des vraies variétés et des cluster formés par le CAH à droite.....	97
Figure 48 Graphiques utilisés pour déterminer le nombre optimal de clusters dans le cadre du CAH : de gauche à droite, la méthode des Within Sum of Squares (A), la silhouette moyenne (B), et la Gap Statistic (C) pour la méthode des K-means.	98
Figure 49 Clustering par la méthode des K-means des données dans les 2 premières dimensions représenté sous forme de carte des clusters (A) et table comparative des vraies variétés et des cluster formés par la méthode des K-means (B).....	98
Figure 50 Scree plot représentant la part de la variance expliquée en fonction du nombre de dimensions	99
Figure 51 Cartes des individus dans les 2 premières dimensions de l'ACP en fonction des variétés avec (A) ellipses statistiques en fonction des sites, (B) ellipses statistiques en fonction des variétés pour l'ACM rassemblant les deux sites d'essais (Louvain-la-Neuve, Gembloux).	100

3 Liste des tableaux

Tableau 1 Répartition des cultures (groupe des céréales et farineux, détaillé (en %) ⁴⁷	17
Tableau 2 Compositions nutritionnelles du sarrasin en comparaison à d'autres cultures répandue ⁵⁷	23
Tableau 3 Informations générales (parcelles, sol, semoir, variétés, ...) des 3 différents sites d'essais.	28
Tableau 4 Informations d'itinéraires culturels des 3 différents sites d'essais.....	29
Tableau 5 Répartition des variétés dans les micro-parcelles sur la zone d'étude de Louvain-La-Neuve, les cellules grisées à gauche représentent les parcelles des mesures destructives	30

Tableau 6 Répartition des variétés dans les micro-parcelles sur la zone d'étude Gembloux, les nombres suivant le nom d'une variété indiquent une densité de semis différentes de celle de base (200 graines/m ²)	31
Tableau 7 Répartition des variétés dans les micro-parcelles sur la zone d'étude de Grand-Leez avec également les bandes extérieures comme bordures (en gris) composées également de sarrasin commun ou de tartarie	32
Tableau 8 Descriptions des mesures morphologiques effectuée sur les 3 sites d'essais (LLN, Gembloux et Grand-Leez).	35
Tableau 9 Mesures destructives réalisées sur les variétés de LLN.....	36
Tableau 10 Répartition des variétés multipliées dans les pallox sous serre perméable avec Siva, Lileja, La Harpe, Drushina, Devyatka, Darja, Korona, Hruzowska, BGZ, Nojai, les 2 pallox restant ont servi à une tentative d'élevage de syrpe infructueuse.....	37
Tableau 11 Caractérisation morphologiques de 10 plantes par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve	45
Tableau 12 Résultats de la modélisation GLM du modèle restreint avec comme variable dépendante le rendement (A) et le tableau d'analyse de la variance de ce modèle (B)	47
Tableau 13 Résultats de la modélisation GLM du modèle restreint avec comme variable dépendante le PMG (A) et le tableau d'analyse de la variance de ce modèle (B)	48
Tableau 14 Récapitulatif des paramètres agronomiques importants des variétés communes aux deux sites d'essais étudiés (Louvain-la-Neuve, Gembloux).	56
Tableau 15 Résultats des test ANOVA 2 pour chacune des variables mesurées continues	58
Tableau 16 Rendements trouvés dans la littérature pour les variétés de sarrasin étudiées dans ce mémoire	67
Tableau 17 PMG trouvés dans la littérature pour les variétés de sarrasin étudiées dans ce mémoire	69
Tableau 18 Informations sur les 16 variétés utilisées en champs et/ou multiplication	83
Tableau 19 Tableau degrés-jour pour atteindre les différents stades de développement phénologique du sarrasin par variétés sur le site de Louvain-la-Neuve	84
Tableau 20 Tableau degrés-jour pour atteindre les différents stades de développement phénologique du sarrasin par variétés sur le site de Louvain-la-Neuve	85
Tableau 21 Tableau degrés-jour pour atteindre les différents stades de développement phénologique du sarrasin par variétés sur le site de Grand-Leez.	85
Tableau 22 Tableau de vérification des hypothèses de l'ANOVA par test de Shapiro-Wilk et Levene test pour les données de LLN	87
Tableau 23 Tableau de vérification des hypothèses de l'ANOVA par test de Shapiro-Wilk et Levene test pour les données destructives de LLN.....	87
Tableau 24 Tableau de vérification des hypothèses de l'ANOVA par test de Shapiro-Wilk et Levene test pour les données de Gembloux.....	88
Tableau 25 Résultats de la modélisation GLM du modèle complet avec comme variable dépendante le rendement (A) et le tableau d'analyse de la variance de ce modèle (B)	89
Tableau 26 Résultats de la modélisation GLM du modèle complet avec comme variable dépendante le PMG (A) et le tableau d'analyse de la variance de ce modèle (B)	91
Tableau 27 Table de corrélations des variables continues mesurées sur le site d'essais de LLN. Plus la couleur est verte, plus les variables sont positivement corrélées ; à l'inverse, plus elle est rouge, plus les variables sont négativement corrélées.....	93
Tableau 28 et composition des composantes principales selon les variables continues (B).	94

4 Liste des abréviations

°C/J	Degrés/jour	GBX	Gembloux
ACP	Analyse en composante principale	GES	Gaz à effet de serre
ACM	Analyse en correspondance multiple	GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat
ACS	Agriculture de conservation	GLM	Modèle linéaire généralisé
BGZ	Brabantse grijze zandboekweit	INRA	Institut national de la recherche agronomique
CAH	Clustering Ascendant Hiérarchique	LLN	Louvain-la-Neuve
CC	Changement climatique	PMG	Poids de mille grains
CO ₂	Dioxyde de carbone	QTL	Quantitative trait locus
CRA-W	Centre de Recerche Agronomique Wallon	RCBD	randomized complete block design
CRD	Completly Randomized Design	SC	Auto-compatible
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture	SI	Auto-incompatible

5 Introduction

L'agriculture moderne fait face à des défis croissants liés au changement climatique. L'évolution des températures, des précipitations et la fréquence accrue d'évènements extrêmes affectent directement le développement des cultures. Ces perturbations induisent des stress abiotiques qui fragilisent les plantes et menacent la sécurité alimentaire. Pour garantir la résilience des systèmes agricoles, il devient essentiel d'envisager des stratégies d'adaptation. Celles-ci incluent notamment la diversification des espèces cultivées et l'exploration de cultures encore peu répandues mais prometteuses.

Le présent mémoire porte sur l'étude du sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*), une pseudo-céréale dont les caractéristiques biologiques en font un candidat crédible dans une optique de diversification et donc vers une agriculture plus durable et résiliente. Actuellement plutôt marginale, cette culture nécessite une évaluation rigoureuse de son potentiel agronomique.

Trois axes structurent ce travail. Le premier vise à caractériser dix variétés de sarrasin (Siva, Lileja, La Harpe, Drushina, Devyatka, Darja, Smuga, Korona, Kora, Panda) issues de diverses origines géographiques, à travers des critères mesurés en conditions réelles : paramètres morphologiques, temps jusqu'à maturité, rendement, poids de mille grains. Cette analyse a pour but d'identifier les variétés les mieux adaptées aux conditions locales du site étudié.

Le second objectif explore l'influence de l'environnement sur les performances observées, via des essais sur deux sites contrastés et des variétés communes (Lileja, La Harpe, Smuga et Kora). Il s'appuie également sur des données bibliographiques pour élargir la comparaison à d'autres contextes.

Enfin, un volet technique secondaire vise à développer un protocole de multiplication des variétés sur un même site en évitant les croisements non voulus des variétés au vu de l'allogamie du sarrasin.

Cette triple approche vise à mieux comprendre le comportement de cette culture, à orienter la sélection variétale et à soutenir une agriculture plus résiliente. Premièrement, une revue bibliographique posera les bases sur les changements climatiques, les stress qui en découlent, ainsi que sur la biologie du sarrasin commun, ses bénéfices, ses utilisations et la multiplication de celui-ci. Ensuite, les différentes expériences seront décrites dans la section "Matériel et Méthodes", et les données récoltées seront traitées dans la partie "Résultats". Enfin, la discussion permettra de conclure ce mémoire avec une comparaison variétale du sarrasin commun sur ses qualités agronomiques, une analyse de l'impact de l'environnement et le choix de variétés les plus prometteuses.

6 Etat de l'art

6.1 Changement climatique et changement agricole

6.1.1 Le changement climatique, ses causes et conséquences

Le changement climatique est défini comme « des changements significatifs dans les valeurs moyennes des éléments météorologiques, tels que les précipitations et la température, dont les moyennes ont été calculées sur une longue période. »¹.

Depuis 1850-1900, les activités humaines ont provoqué un réchauffement climatique de 1,1°C¹⁻³. Les risques et dangers liés à ce phénomène s'avèrent encore plus importants qu'estimé auparavant dans les précédentes études et rapports du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat)².

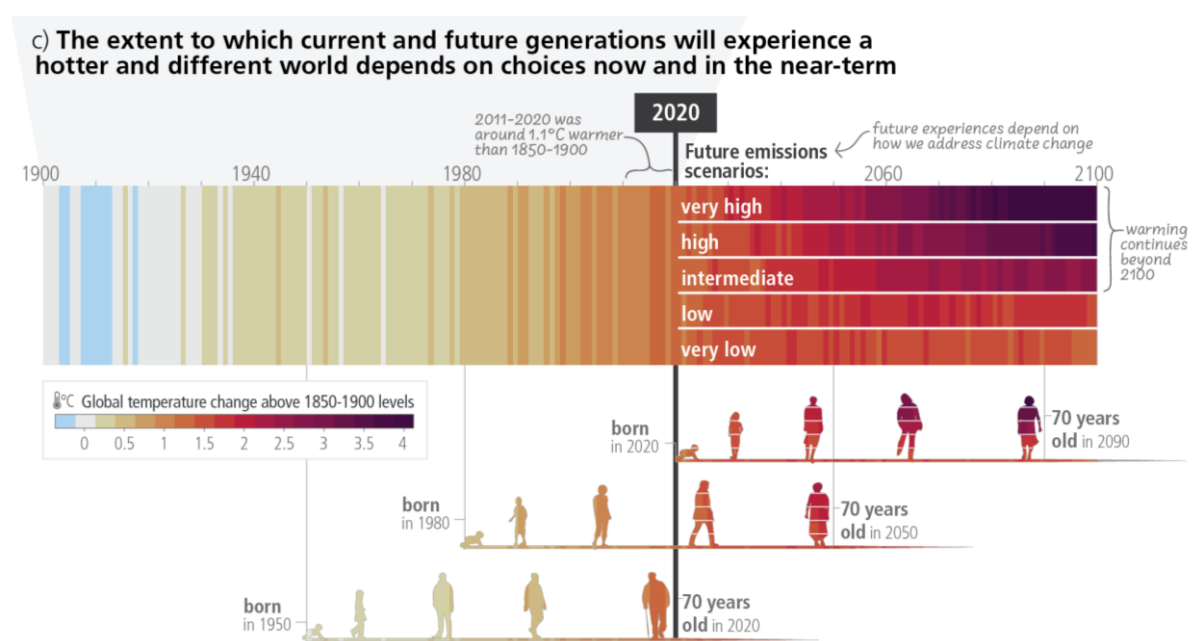


Figure 1 Scénarios possibles du changement climatique en fonction des émissions futures de gaz à effet de serre²

Sur la Figure 1, différents scénarios futurs sont émis en fonction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique provoquant le CC (changement climatique)¹⁻⁴. Le degré et la nature des impacts du changement climatique varient selon les régions du monde¹⁻⁴. Par exemple, les modifications des sécheresses depuis 1950 varient entre une augmentation et une stagnation due au CC (Figure 2)⁵. Avec le temps, la probabilité que des événements extrêmes aient lieu comme conséquence du changement climatique induit par l'homme augmente peu importe la région dans le monde⁵.

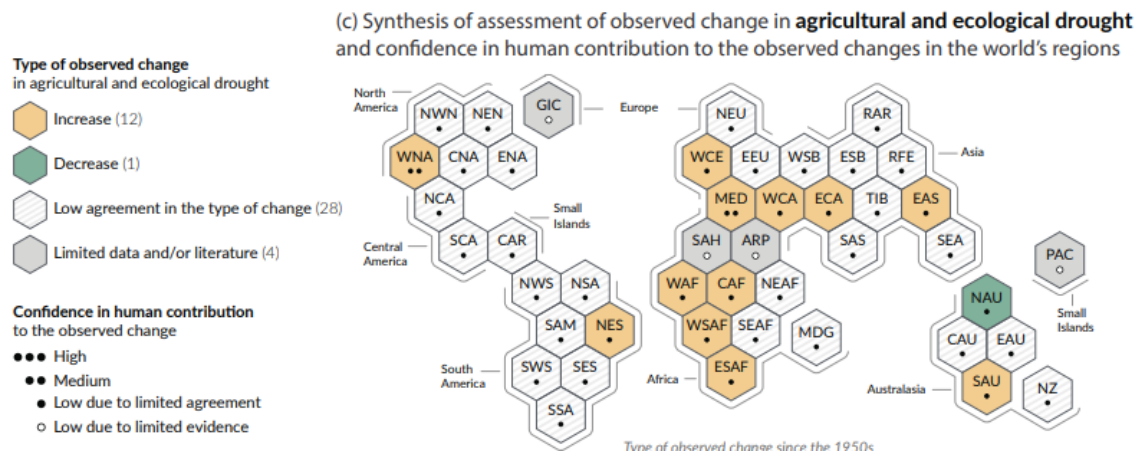


Figure 2 Évolution depuis 1950 des sécheresses autour du monde et leur lien avec les activités humaines⁵

Les impacts du CC sont difficiles à appréhender. Ses effets sont souvent indirects, et il est difficile de discerner s'il est la cause d'un événement climatique ou non. De plus certains effets sont positifs et d'autres négatifs^{2,5}. Certains effets négatifs sont déjà clairement identifiés, comme la fonte des glaciers et l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes, la réduction de la biodiversité, la réduction des rendements agricoles, les problèmes de santé humaine, ...^{2,5}

6.1.2 Conséquences sur le monde agricole

Le CC a un impact sur les productions et les rendements agricoles^{2,5}. Au départ, l'augmentation de la concentration du CO₂ atmosphérique favorise l'échange H₂O-CO₂ des plantes nécessaires à la photosynthèse, induisant un effet positif sur les rendements agricoles¹⁻⁴. Cependant, les événements extrêmes renforcés tels que les vagues de chaleur, les sécheresses et les pluies torrentielles sont prédominantes sur les bénéfices de l'augmentation de la concentration en CO₂. En plus de diminuer les rendements, ces stress abiotiques vont diminuer la période favorable aux cultures ainsi que la surface totale de terre cultivable disponible¹⁻⁵. Les stress hydriques et thermiques sont les stress ayant le plus d'impacts négatifs sur le développement des cultures⁶.

Ces stress abiotiques ne sont pas les seuls facteurs limitants des cultures. Le stress salin, les stress biotiques et une présence trop importante d'éléments traces peuvent avoir un impact négatif renforcé indirectement par les différentes modifications climatiques^{1,3,4}.

Les stress individuels peuvent interagir et se renforcer mutuellement, entraînant des effets combinés souvent supérieurs à la simple addition des effets de chaque stress pris séparément^{7,8}. La sécheresse et les hautes températures, en particulier, sont souvent des stress combinés dont la combinaison s'avère généralement plus intense que les effets séparés³.

6.1.3 Lien complexe entre agriculture et changement climatique

L'agriculture joue un rôle ambivalent face au changement climatique. D'une part, elle constitue une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et donc une source du CC, représentant plus de 25 % des équivalents CO₂ en incluant l'ensemble de la chaîne alimentaire⁹.

D'un autre côté, elle possède un potentiel de mitigation et d'adaptation important grâce notamment au stockage de carbone dans les sols¹⁻⁴. Les adaptations agronomiques les plus courantes pour mitiger les effets du CC sont : changement/diversification des variétés de culture, ajout/rallongement de rotation culturale, changement des périodes de culture, changements des pratiques agricoles/gestion du bétail^{1,3}. Certains mouvements regroupent ces stratégies comme par exemple l'agriculture de conservation des sols (ACS) via ses 4 piliers : le minimum de travail du sol (pas de labour), l'allongement des rotations, la diversification des espèces et la couverture du sol permanente^{1,10}. Ces pratiques sont bénéfiques car elles réduisent les émissions de gaz à effet de serre (GES) en diminuant l'usage de fertilisants et en augmentant la séquestration de carbone dans les sols¹.

L'ACS n'est en revanche ni une solution unique ni incompatible avec d'autres approches. L'agriculture biologique et l'agriculture de précision peuvent aussi augmenter le stockage du carbone et optimiser la gestion des intrants⁴. L'expérience de l'agriculteur est également un facteur diminuant les pertes due à des catastrophes naturelles par leur connaissance du climat local⁴. Ces approches peuvent être regroupées entre autres sous le terme d'agroécologie¹¹.

Néanmoins, il ne faut pas rejeter complètement la faute sur les pratiques agricoles plus classiques dites « conventionnelles » car celles-ci ont permis une amélioration conséquente en terme de sécurité alimentaire³. Les perturbations liées au CC pourraient à l'avenir compromettre cette sécurité alimentaire⁴. Entre 2005 et 2050, la production agricole devrait encore augmenter de 60% pour garantir cette sécurité alimentaire¹². Cependant, cette hausse sera inégale selon les régions : elle devra atteindre 77 % dans les pays en développement, contre 24 % dans les pays développés, ceci afin de répondre aux besoins alimentaires et nutritionnels de la population d'ici à 2050^{1,3}. En 2023, 50% des productions agricoles étaient de la canne à sucre, du maïs, du riz et du blé¹³. Une plus grande diversification des cultures serait pertinente pour obtenir une agriculture plus résiliente face au CC¹³.

Cependant, ces chiffres hypothétiques d'augmentation de production ne considèrent pas de changement majeur dans la chaîne de valeur alimentaire. L'agriculture actuelle ne saura probablement pas soutenir ces augmentations et d'autres stratégies seront nécessaires¹⁴. Une augmentation des rendements a encore du sens dans certaines régions du monde mais un changement de consommation et surtout une réduction des pertes et du gaspillage sont parmi les enjeux majeurs⁴. Le gaspillage et les pertes représentent entre 25 et 30% de la nourriture

globalement produite et sont donc une voie d'amélioration importante pour augmenter la nourriture réellement consommée^{3,14}.

6.1.4 Diversification des cultures pour répondre au changement climatique

Face au CC, la diversification des cultures s'impose comme une stratégie agricole cruciale. Elle permet aux agriculteurs de renforcer la résilience de leurs exploitations face à la variabilité des précipitations, aux ravageurs, à la dégradation des sols et aux changements de marché^{15,16}. D'un point de vue socio-économique, elle offre des gains notables : les systèmes agricoles diversifiés ont vu leur rentabilité financière augmenter en 20 ans tout en maintenant des rendements stables¹⁷. Cette stabilité est particulièrement bénéfique aux petits agriculteurs, qui peuvent ainsi sécuriser leurs revenus face aux CC^{15,16}.

La diversification a aussi des effets positifs sur les services écosystémiques : elle favorise la pollinisation et la biodiversité, tout en réduisant les pressions des ravageurs, et améliore la qualité des sols et la séquestration du carbone^{15,17}. La préservation et la redondance de ces services sont essentielles pour faire face aux défis actuels et futurs et sont bien trop souvent négligées. Ces services ont été estimés à 33000 milliards de dollars par an¹⁸.

Des études de terrain en Afrique, en Asie et en Méditerranée ont montré que les bénéfices de la diversification des cultures sont particulièrement marqués dans les systèmes de petite échelle, où l'interculture et la rotation des cultures améliorent à la fois la productivité et la diversité alimentaire^{15,16}. De plus, la diversification contribue à la sécurité alimentaire mondiale en préservant la diversité génétique et en valorisant les savoirs locaux souvent négligés dans les politiques agricoles^{15,16}.

6.1.5 Sarrasin, voie de diversification

La diversification des cultures est aujourd'hui reconnue comme un levier stratégique pour renforcer la durabilité des systèmes agricoles. Dans ce contexte, le sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*), en tant que culture secondaire, présente un potentiel important. Sa capacité d'adaptation à des sols pauvres, acides, conjuguée à de faibles besoins en intrants, en fait une option sérieuse pour l'exploitation durable des terres difficiles^{19,20}. Grâce à son cycle court, il permet une utilisation efficace des périodes culturales dans les zones à forte contrainte hydrique ou climatique, tout en contribuant à la gestion intégrée des ressources¹⁹. En tant que culture rustique, le sarrasin améliore également la santé des sols, il peut rompre les cycles de maladies, limiter la pression des mauvaises herbes, et favoriser la biodiversité fonctionnelle, notamment par son attractivité pour les pollinisateurs^{19,21}. Ces propriétés agronomiques renforcent la résilience des agroécosystèmes et réduisent la dépendance aux intrants chimiques.

Le sarrasin offre une alternative économiquement viable aux monocultures dominantes, fragilisées par les pressions environnementales et la volatilité des marchés. Des modélisations

menées en Italie montrent que, dans un cadre de soutien politique et économique adapté, son intégration dans les rotations agricoles est rentable, bien que des freins persistent, notamment liés à l'accès au marché, aux coûts d'adoption et à la perception du risque²¹. Ces barrières peuvent toutefois être diminuées lorsque des dynamiques collectives et des effets de voisinage favorisent la diffusion de l'innovation agricole²¹. Les avancées en sélection variétale et biotechnologie visant à améliorer la stabilité des rendements, renforcent encore le potentiel de cette culture²⁰. En outre, le sarrasin s'inscrit pleinement dans les objectifs de durabilité des politiques agricoles européennes et internationales, à travers ses contributions à la lutte contre l'érosion des sols, à la fertilité, et à la diversification des systèmes alimentaires^{19,20,22}. En somme, il représente une option réaliste et prometteuse pour répondre aux enjeux d'intensification écologique, de résilience économique et de sécurité alimentaire globale ^{19–22}.

6.2 Sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum* Moench)

Le sarrasin (*Fagopyrum esculentum* Moench), souvent appelé blé noir en France, est une pseudo-céréale (comme l'amarante et le quinoa) appartenant à la famille des Polygonacées, comme l'oseille (*Rumex arifolius*), la renouée du Japon (*Reynoutria japonica*) et la rhubarbe (*Rheum rhabarbarum*)^{23,24}. Contrairement aux céréales classiques monocotylédones, le sarrasin est une plante dicotylédone.

Il se distingue des autres céréales et pseudo-céréales par sa teneur élevée en lysine, un acide aminé souvent déficient dans ces groupes^{24–26}. Cette particularité en fait une source unique de protéines de haute qualité, avec un score d'acides aminés excellent mais il est aussi riche en fibres et anti-oxydants notamment des flavonoïdes^{27–29}.

Historiquement sous-utilisée dans de nombreuses régions, cette culture entomophile suscite aujourd'hui un regain d'intérêt dans le cadre des modèles d'agriculture durable, en réponse aux défis posés par les changements climatiques. Le sarrasin reste une ressource importante pour la sécurité alimentaire dans des régions comme l'Asie de l'Est, l'Europe de l'Est et l'Himalaya³⁰.

6.2.1 Histoire et production

6.2.1.1 Origine

Le sarrasin commun est apparu comme culture il y a près de 4000 à 6000 ans à Yonghseng dans la province de Yunnan dans le sud-ouest de la Chine actuelle^{31–33}. Le genre *Fagopyrum* regroupe une quinzaine d'espèces, principalement originaires des zones tempérées de l'Asie. Parmi ces espèces, on trouve^{31,34,35} :

- *Fagopyrum dibotrys* (syn. *F. cymosum*), également connu sous le nom d'épinard d'Asie.

- *Fagopyrum esculentum* Moench, communément appelé sarrasin ou blé noir.
- *Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn., appelé sarrasin de Tartarie.
- *Fagopyrum emarginatum* (Roth) Meisner, ou sarrasin du Népal.

Ce mémoire se concentrera uniquement sur *Fagopyrum esculentum*. Il s'agit de l'espèce *Fagopyrum* la plus répandue et la plus cultivée dans le monde. Il possède un ancêtre potentiel sauvage qu'est le *Fagopyrum esculentum* spp *ancestralis*^{36–38}. Le lien de paternité entre *ancestralis* et le sarrasin commun n'est pas encore complètement établi et est même remis en question³⁹. Certaines caractéristiques sont partagées comme la diploïdie (2n=16 chromosomes), l'hétérostylie, l'auto-incompatibilité, la morphologie du port des feuilles, le type d'inflorescence et la couleur de l'akène. D'autres caractères morphologiques sont bel et bien différents comme la taille des feuilles et des akènes, une forte dormance ainsi qu'une couleur blanche unique pour les inflorescences^{37,39}.

L'introduction du sarrasin dans d'autres pays s'est principalement faite via l'Himalaya, le Tibet, le nord de la Chine et le Japon et ensuite par les colons aux Amériques et en Afrique^{32,33,36,40}. Au fil du temps une diversité génétique s'est installée grâce à l'expansion géographique et des programmes de sélection^{40,41}. En Europe, le sarrasin est arrivé aux alentours du XIV^{ème} siècle et il fut populaire jusqu'au XVIII^{ème}-XIX^{ème} siècles où sa disparition y fut progressive^{42,43}. Les principales raisons de cette disparition sont liées à une moins bonne réponse aux engrais non organiques apparus à cette époque et des rendements globalement moins bons, notamment par rapport aux autres céréales^{32,40}.

De nos jours, le sarrasin reprend beaucoup d'intérêt, surtout en agriculture biologique grâce à ses qualités nutritionnelles et sa résilience au champ. Ceci est marqué par un nombre de publications en grande augmentation concernant le sarrasin, comme visible sur la Figure 3.

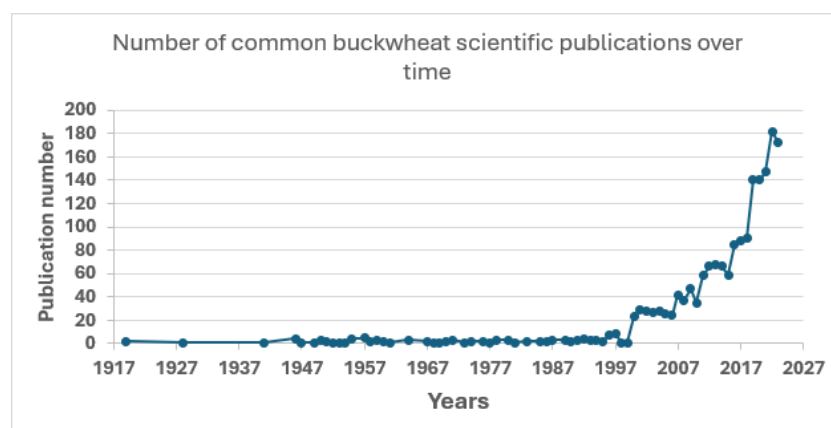


Figure 3 Évolution de l'intérêt croissant du sarrasin dans la recherche scientifique⁴⁴

6.2.1.2 Production de sarrasin en Belgique au cours du temps

Le sarrasin en Belgique est apparu entre le XIV^{ème}-XVI^{ème} siècles en Flandre, dans le Nord du pays, près de la ville de Gand⁴⁵. Au XVIII^{ème} siècle, le sarrasin était surtout présent dans les régions de Flandre où le seigle était également répandu. Cultivé surtout sur sol sablonneux pour environ 1500-2000ha au milieu de XVIII^{ème} siècle, période correspondant à son apogée de production en terme de surface dans nos contrées⁴⁶. L'évolution en pourcentage de la répartition des cultures de céréales et farineux est présentée dans le Tableau 1. En l'espace de 83 ans, le sarrasin cultivé en Belgique suit la chute globale de l'Europe baissant de 94% passant de 3,38% en 1846 à 0,2% en 1929⁴⁷. Cette chute est également observable pour l'épeautre et est expliquée par un remplacement par de l'avoine (Tableau 1). Le sarrasin était consommé surtout en bouillie, galettes et crêpes par les classes les plus défavorisées au vu de son relativement faible prix. Or, la pomme de terre se démocratisant (en moyenne 2-3 fois moins chère que le sarrasin), le sarrasin fut progressivement remplacé par celle-ci comme nourriture des classes populaires tandis que le blé attirait ceux gagnant plus d'argent qu'auparavant^{45,47,48}.

Tableau 1 Répartition des cultures (groupe des céréales et farineux, détaillé (en %) ⁴⁷

	1846	1856	1866	1880	1895	1910	1929
Froment	28.20	30.06	31.40	31.28	23.24	21.82	25.67
Epeautre	4.30	4.65	3.95	2.95	2.38	1.55	0.46
Seigle	34.30	32.85	32.00	31.47	36.55	36.35	30.95
Orge	4.80	5.04	4.84	4.55	5.18	4.68	4.17
Avoine	24.52	24.65	25.44	28.28	32.05	35.10	38.55
Sarrasin	3.38	2.75	2.37	1.49	0.60	0.50	0.20
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Cette pseudo céréale est donc petit à petit passée du paysage classique de la nourriture à une nourriture traditionnelle de fête (comme à Nivelles ou Liège) ou à sa disparition complète dans le panier de consommation^{49,50}.

6.2.1.3 Production de sarrasin mondiale actuelle

Le sarrasin, est aujourd'hui cultivé sur pratiquement tous les continents^{34,35}. Depuis 1961, la production mondiale de sarrasin est recensée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), offrant une vue globale sur son évolution¹³. À ses débuts, la production mondiale a suivi une tendance ascendante, passant de 2,5 millions de tonnes dans les années 1960 à un pic de 5 millions de tonnes en 1992. Cependant, elle a connu un déclin progressif pour atteindre environ 2 millions de tonnes en 2023¹³.

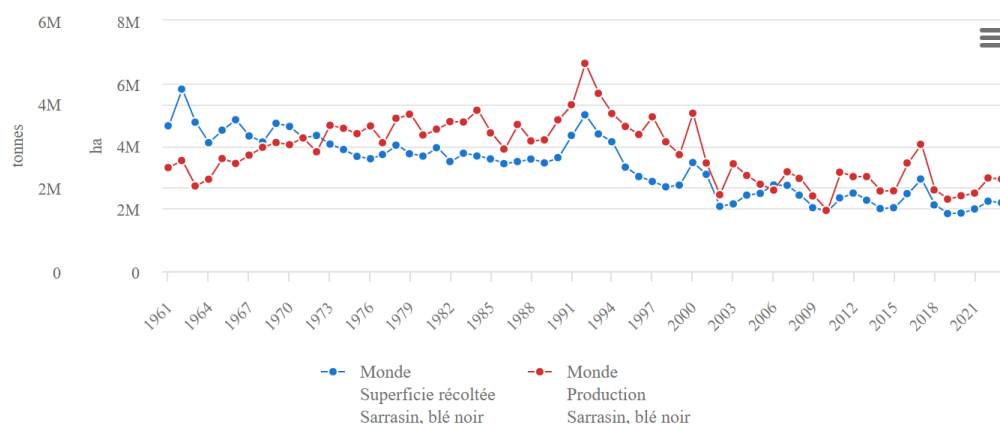


Figure 4 Evolution de la production et la superficie mondiale de culture du sarrasin (en million de tonnes et millions d'hectares)

En 1961, la Chine dominait le marché avec une production de 1,5 million de tonnes, suivie de l'URSS à 745 000 tonnes. D'autres pays tels que la Pologne, la France et le Japon produisaient environ 50 000 tonnes par an¹³. La production chinoise a atteint son apogée en 1992 avec 3,1 millions de tonnes, avant de chuter à 500 000 tonnes par an, niveau où elle s'est stabilisée depuis deux décennies. En revanche, la Russie a maintenu une production relativement stable et est actuellement le premier producteur mondial avec 1 150 000 tonnes en 2023, suivie de la Chine et ses 504 000 tonnes. À cela s'ajoutent l'Ukraine, les États-Unis, le Kazakhstan et le Brésil, dont les productions sont respectivement de 210 000, 87 000, 84 000 et 65 000 tonnes¹³.

L'Europe est devenue la principale région productrice avec 62,5 % de la production mondiale, suivie par l'Asie avec 29,1 %.¹³ Cette tendance reflète un regain d'intérêt de l'Europe pour le sarrasin, après un déclin à la fin du XX^e siècle. Ce regain d'intérêt est particulièrement notable en Europe occidentale, comme visible sur la Figure 5 avec une augmentation significative depuis 2015. Les rendements européens oscillent entre 1,5 et 2 t/ha depuis 2010, dépassant la moyenne mondiale qui est passée de 0,5 t/ha en 1961 à 1 t/ha en 2021¹³.

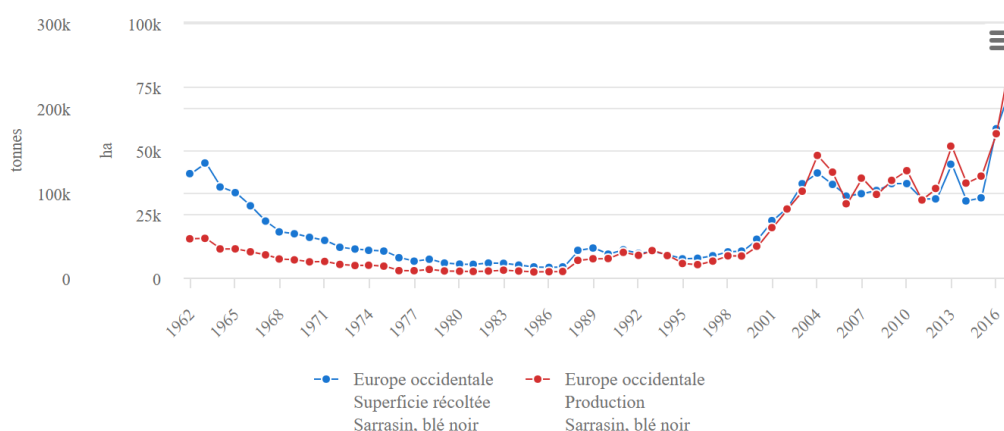


Figure 5 Evolution de la production et la superficie de culture du sarrasin d'Europe occidentale (en million de tonnes et millions d'hectares)¹³

Malgré ce regain d'intérêt, le rendement du sarrasin reste faible comparé à celui des céréales en général et présente de plus une variation importante de son rendement suite au caractère indéterminé de cette plante. Le rendement de *Fagopyrum esculentum* varie généralement de 0,5 à 1 t/ha, avec un maximum aux alentours de 2 t/ha^{13,34,35}. Ceci reste bien en dessous des rendements céréaliers moyens mondiaux : 4,18 t/ha, ce qui rend le sarrasin difficilement compétitif⁵¹.

6.2.2 Biologie et écologie du sarrasin

6.2.2.1 Morphologie du sarrasin

Le sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) est une plante herbacée annuelle appartenant à la famille des Polygonaceae²³. Sa taille varie généralement entre 40 et 150 cm selon les variétés et les conditions environnementales^{52,53}. Cultivé en serre, il lui est arrivé d'atteindre jusqu'à 250 cm, soutenu par un tuteur^{34,35}. La tige principale est dressée, lisse, glabre, creuse, et évolue du vert au rouge à maturité^{34,35,41}. Elle est sujette à des cassures sous stress mécanique, mais la plante peut se régénérer à partir de tiges secondaires si elle est encore immature⁴¹.

Les feuilles alternes, de couleur verte, sont larges et pétiolées à la base de la tige, avec un pétiole de 1,5 à 5 cm (Figure 7). Leur limbe triangulaire mesure de 2,5 à 8 cm de long et de 2 à 5 cm de large, avec une base cordée et un apex acuminé^{34,35,41}. Plus haut, les feuilles deviennent sessiles et plus petites. Les ochréas, stipules membraneuses typiques des Polygonacées, mesurent environ 5 mm et tombent avec le temps^{34,35,41}.

Le système racinaire est pivotant, peu profond avec des racines latérales fines, atteignant une profondeur de 30 à 50 cm³¹. Ce système représente environ 3 à 4 % du poids total de la plante (Figure 7)³¹.

Les inflorescences du sarrasin, composées et avec une détermination dépendante de la variété, se présentent en racème de cymes hélicoïdales, situées à l'aisselle des feuilles^{42,54}. Chaque pédoncule peut porter un nombre variable d'inflorescences⁵⁴. Les fleurs sont hermaphrodites et hétérostyles (voir Figure 7) surtout blanches mais parfois avec des teintes de roses ou rouges, avec une symétrie radiaire et un diamètre de 6 à 7 mm en anthèse⁴².

Deux morphes florales sont possibles (hétérostylie) : les fleurs longistyles, avec un style dépassant les étamines, et les fleurs brévistyles, où les étamines sont plus longues que le style^{34,35,55}. Ces caractéristiques favorisent la pollinisation croisée, car le sarrasin est incapable d'autopollinisation et dépend des insectes pour sa reproduction³⁴. Les nectaires situés à la base des fleurs produisent du nectar, attirant les pollinisateurs⁴¹. Les principaux pollinisateurs du sarrasin sont les insectes, notamment les Hyménoptères et les Diptères³². Parmi les Hyménoptères, on trouve les abeilles domestiques, les bourdons, les abeilles solitaires et les

guêpes tandis que chez les Diptères sont principalement représentés par les Syrphidés (*Eristalis spp.*)³². Chaque fleur ne contient qu'un seul ovule.^{41,42} Les fruits du sarrasin sont des akènes trigones, mesurant entre 5 et 8 mm, et passent du vert au brun à maturité. Chaque fruit contient une unique graine enveloppée d'un péricarpe mince³⁶. La maturation des fruits est hétérogène : fleurs, graines vertes et graines mûres peuvent coexister sur une même plante, compliquant la récolte^{34,56}. Par ailleurs, les fleurs ne peuvent généralement être en anthèse qu'une journée⁵⁴.



Figure 7 Morphologie générale du sarrasin²⁴

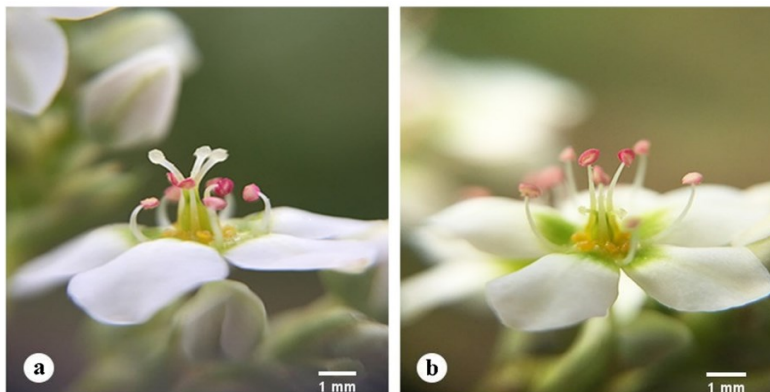


Figure 7 Hétérostylie avec (a) brévistyle et (b) longistyle²¹

Le sarrasin est une culture robuste mais sensible aux conditions climatiques et au stress hydrique, qui retardent sa maturité⁴¹. Cette plante mellifère joue un rôle important en agriculture durable grâce à sa dépendance à la pollinisation croisée et son adaptation à divers environnements, tout en étant robuste principalement face à la sécheresse et la présence de sols pauvres et acides^{34,42}.

6.2.2.2 Caractéristiques de croissance et cycle de vie

La germination du sarrasin a lieu en 3 à 7 jours, suivie d'une phase végétative de 4 à 7 semaines^{20,54}. La phase reproductive commence ensuite et dure jusqu'à la récolte. Chaque plante peut produire plusieurs centaines de fleurs, cependant seule une fraction des fleurs donne des graines, avec un taux de mise à graine moyen de 20 à 30%⁵⁷. Comme présenté dans la section 6.2.2.3, les graines arrivent à maturité de manière échelonnée, ce qui complique la récolte, surtout pour les variétés indéterminées. Usuellement, le sarrasin est récolté vers 75% des graines arrivés à maturité²⁰. Dans nos contrées celui-ci est planté vers mai-juin et récolté vers septembre-octobre.

La sélection de variétés déterminées rentables facilitant la récolte est un enjeu majeur dans l'amélioration et le développement du sarrasin commun⁵⁸. Un autre problème de la culture est un avortement conséquent de fleurs⁵⁸.

6.2.2.3 Détermination

Le sarrasin commun présente des caractéristiques de croissance qui varient. Selon les variétés, la croissance peut être de type déterminée ou indéterminée, bien que les variétés indéterminées soient les plus communes^{40,54}.

Les variétés indéterminées se caractérisent par une croissance continue de la tige principale tant que les conditions environnementales restent favorables. L'inflorescence apicale est souvent complexe, composée de grappes dont certaines continuent à se développer sur une longue période. Cependant, lorsque les dernières inflorescences avortent, la croissance de la tige principale s'interrompt⁵⁴.

En revanche, les variétés déterminées se distinguent par une croissance limitée. La tige principale termine sa croissance par la formation d'une grappe apicale simple, de taille similaire aux autres inflorescences. Cette caractéristique confère à ces plantes une maturation rapide, un avantage dans certaines conditions écologiques spécifiques⁵⁹.

Les différences entre ces deux types de croissance sont en partie liées à leurs origines géographiques différentes mais également à de la sélection humaine⁵⁹. La maturation des plantes indéterminées étant hétérogène impliquant deux inefficiences de rendement, la première étant la détermination d'une date de récolte optimale^{20,42,54,56,58}. Définir la date où le plus de graines matures seront récoltées, tout cela sans attendre que les plantes ne s'égrainent sur le champ (ce qui provoquerait alors une perte de récolte et une repousse pour les cultures suivantes) est un véritable enjeu⁵⁸. Des graines avec des stades différents sont observables sur la même inflorescence^{42,54}. La seconde inefficience est d'ordre physiologique : la plante continue à produire et utiliser de l'énergie pour développer des parties végétatives qui n'auront pas le temps d'être rentabilisé ou de jeunes reproductives qui ne seront jamais valorisées dans le rendement en grain⁵⁶.

6.2.2.4 Adaptabilité aux sols et conditions environnementales

Le sarrasin commun, constitue une culture importante pour les systèmes agricoles durables en raison de ses nombreuses qualités agronomiques. Sa durée de vie varie entre 60 et 140 jours (parfois appelé la « culture de 100 jours »), selon les variétés et les conditions climatiques^{34,35,54}. Le sarrasin montre une adaptabilité remarquable à différents environnements, en particulier grâce à sa capacité à initier la floraison rapidement sous certaines photopériodes (environ 4-7 semaines)^{20,42}.

Le sarrasin présente une grande plasticité écologique. Il se développe bien sur sols pauvres en nutriments, légèrement acides, bien drainés, sableux ou limoneux^{20,32,36,60}. En revanche, il peine à se développer sur des sols compacts ou calcaires, qui limitent la croissance de ses

racines³². Cette pseudo-céréale s'adapte également à des altitudes élevées, cultivé au niveau de la mer jusqu'à 4200 m dans certaines régions³¹.

Les températures optimales pour sa croissance se situent entre 18°C et 23°C⁴². En deçà de 15°C il y a un retard d'initiation florale et une réduction du nombre de fleurs et en dessous de 10°C, les fleurs fanent⁴². La plante est sensible aux extrêmes climatiques : sous les -1,3°C à -2,9°C, les jeunes plantules peuvent subir des dommages significatifs, voire être détruites⁶¹. Les stades de la plante les plus sensibles au froid se présentent aux périodes 1 à 2 feuilles. Au-delà de 25°C et avec vents secs, le développement reproductif est réduit. Les températures élevées, supérieures à 35°C, inhibent le développement floral et induisent une baisse significative de rendement⁶².

6.3 Bénéfices et utilisations

6.3.1 Contribution à une agriculture durable

Le sarrasin est un allié précieux pour les pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, ceci est notamment dû au faible besoin en intrants⁶³. Sa croissance rapide et sa biomasse dense étouffent les mauvaises herbes, réduisant ainsi la nécessité d'herbicides⁴⁰. Ses propriétés allélopathiques permettent de contrôler la croissance des adventices par des interactions biochimiques avec d'autres espèces végétales^{40,64}. Un passage à la herse étrille est possible à partir du stade 2 feuilles au besoin. De plus, la plante est naturellement résistante aux maladies et ravageurs, ce qui limite l'usage de pesticides^{32,60}. Le sarrasin ne demande également que peu d'engrais et n'y réponds pas forcément bien (surtout en excès) car cela augmente la taille de ses parties végétatives et la rend plus sensible à la verse⁶⁰.

Le sarrasin contribue à la santé des sols en tant qu'engrais vert. Sa capacité à solubiliser le phosphore à l'aide de ses racines améliore la disponibilité de cet élément pour les cultures suivantes⁶⁵. Il enrichit également la structure du sol en augmentant sa porosité et en facilitant l'activité des vers de terres⁶⁰. En outre, sa capacité à accumuler des éléments traces tels que le plomb (Pb) et le cadmium (Cd) en fait une excellente candidate pour la phytoremédiation⁶⁶.

6.3.2 Nutrition et santé

Le sarrasin est reconnu pour ses qualités nutritionnelles et ses propriétés nutraceutiques remarquables. Ses différentes parties, telles que les graines, feuilles, fleurs, tiges et pousses, sont largement utilisées dans l'alimentation humaine et animale, mais aussi dans les industries pharmaceutiques et cosmétiques^{32,67}.

6.3.2.1 Composition nutritionnelle

Les graines de sarrasin sont une source remarquable de protéines, représentant entre 5 % et 17 % de leur poids sec⁶⁸. Ces protéines contiennent des acides aminés essentiels, notamment la lysine et l'arginine, bien plus limité dans de nombreuses céréales comme le blé ou le riz

(Tableau 2)^{26,69,70}. La lysine joue un rôle crucial dans la synthèse des protéines, tandis que l'arginine est impliquée dans la réponse immunitaire et la régulation de la croissance⁷¹. Les protéines du sarrasin sont majoritairement constituées de globulines et d'albumines, ce qui leur confère une haute valeur biologique, bien qu'elles soient peu digestibles en raison de facteurs antinutritionnels comme les tanins et les phytates, facteurs limitables par préparation culinaire^{26,68}.

Les glucides représentent entre 68 % et 82 % du poids sec des graines, principalement composé d'amidon^{68,72}. Non digéré dans l'intestin grêle, il est fermenté par des micro-organismes dans le gros intestin, favorisant ainsi la production d'acides gras à chaîne courte, bénéfiques pour la santé métabolique⁷³. Le sarrasin présente également une teneur élevée en fibres alimentaires. Comme visible sur le Tableau 2 il est la pseudo-céréale en contenant le plus, toutes céréales comprises⁶⁸.

Tableau 2 Compositions nutritionnelles du sarrasin en comparaison à d'autres cultures répandue⁵⁷.

Nutrient Composition	Buckwheat	Rice	Wheat	Maize	Amaranth	Quinoa	Finger millet	Oat
Carbohydrate (g/100g)	67.8–81.4	78.2	71.2–83.17	63.6	57.3–65.5	53.7–57.2	66.82–72.60	66.2
Protein (g/100g)	5.7–16.4	6.8	9.0–18.0	9.4	13.0–18.0	13.1–14.1	7.2–7.70	17.3
Fat (g/100g)	3.4–7.4	3.6	1.4–3.3	4.7	2.5–8.0	4.7–5.5	1.50–7.16	7.03
Fibre (g/100g)	10.0–21.5	4.1	2.1–12.2	7.3	6.5–12.5	7–14.7	3.60–11.2	15.4
Essential amino acids (g/100 g protein)								
Lysine(Lys)	5.9–6.1	3.9	2.3	2.7	5.2–5.5	5.4–5.6	2.8	0.379 ± 0.068
Methionine(Met)	2.5–3.7	1.7	1.2	1.9	1.86–2.17	2.2	2.7	0.173 ± 0.020
Tryptophan(Trp)	1.4–2.0	1.3	2.4	0.5	1.1–1.3	1.2–1.3	0.9	–
Leucine(Leu)	6.4–6.7	8.1	6.3	12.4	4.8–5.2	5.9–6.1	8.9	0.917 ± 0.011
Vitamins (mg/100g)								
Thiamine(Vit.B1)	0.4–3.3	0.4	0.5	0.3	0.1–0.5	0.5–0.8	0.4	1.17
Riboflavin(Vit.B2)	0.2–10.6	0.1	0.1	0.1	0.1–0.2	0.2–0.3	0.2	–
Niacin(Vit.B3)	6.2–18.0	1.9	3.7	1.9	0.5–5.5	1.6–1.7	1.3	–
Pantothenic acid(Vit.B5)	0.4	–	–	–	0.2	0.6	0.3	1.5
Pyridoxine(Vit.B6)	0.6	–	–	–	0.5	0.2	0.1	0.1
Folate(Vit.B9)	0.054–0.1	0.02	~0.05	~0.003	0.022–0.027	0.001–0.054	0.034	0.052
α-Tocopherol(Vit.E)	0.3	–	–	–	1.9	2.1	0.2	0.45–1.23
Phylloquinones(Vit.K1)	0.007	–	–	–	–	0.002	0.003	–
Carotenoids (μg/100 g)								
Lutein	220.0	–	1.2–23.9	0.1	3.6–4.4	53	–	–
Minerals (mg/100g)								
Calcium(Ca)	110	10	30	48.3	162	54	344.0	58
Iron(Fe)	2.2–4	0.7	3.5	4.8	9.3–10.0	5.3–7.5	4.6–6.30	5.41
Magnesium(Mg)	231.0–390.0	64.0	138.0	107.9	138.0–325.0	119.0–227.0	130.0–146.0	235
Phosphorus(P)	330.0–347.0	160.0	298.0	210.0	374.0–455.0	212.0–527.0	210.0–250.0	734
Manganese(Mn)	1.3–3.4	0.5	2.3	1.0	2.3–5.3	1.8	3.2	5.63
Zinc(Zn)	0.8–2.4	1.3	2.7	2.2	2.7	3.3–3.6	2.30–2.50	3.11
Potassium(K)	450.0–460.0	–	376.0	324.8	284.0–433.0	474.0–649.0	443.0	566
Sodium(Na)	1.0–11.0	–	17.1	35.0	2.7–6.0	4.5–7.0	4.8	–
Copper(Cu)	0.5–1.1	–	0.5	1.3	0.1–0.8	0.2–0.5	0.7	0.403
Flavonoids								
Rutin (mg/100g)	8100	–	–	–	–	0.0061	–	0–3.20
Quercetin (mg/100g)	857.62	–	–	–	0.0060	0.0068	–	8.90
Emodin(mg/kg)	1.72–2.71	–	–	–	–	–	–	–
Catechin(mg/kg)	6–66	–	–	–	–	–	–	–
Epicatechin mg/kg)	23–110	–	–	–	–	–	–	–
Procyanidin B2(mg/kg)	118.6	–	–	–	–	–	–	–
Procyanidin B5(mg/kg)	4–11	–	–	–	–	–	–	–
Fagopyrin (mg/100g)	19–32	–	–	–	–	–	–	–

Du côté des lipides, les graines de sarrasin possèdent une composition riche en acides gras polyinsaturés, tels que les acides oléique, linoléique et α-linolénique. Ces composés augmentent la valeur nutritionnelle et présentent des bienfaits pour la santé cardiovasculaire^{26,41}. Via le Tableau 2 le sarrasin montre une présence élevée en

microéléments et est de manière générale quasi systématiquement plus riche que les cultures les plus répandues (riz, blé, maïs). Il est également riche en vitamines, surtout B1, B2, B3, B6 et vitamine E. Il est par contre déficient en vitamine A (voir Tableau 2)^{26,68}.

6.3.2.2 *Propriétés nutraceutiques et bienfaits pour la santé*

Les propriétés nutraceutiques du sarrasin sont attribuées à ses composés bioactifs, notamment les flavonoïdes (composés phénoliques) particulièrement la rutine qui y est présente en grande abondance (voir Tableau 2)^{36,68,74}. La rutine est présente dans toutes les parties de la plante. Elle prévient l'oxydation des lipoprotéines de basse densité (LDL), réduit l'inflammation et prévient les maladies cardiovasculaires^{20,24,32,69}.

Le sarrasin est également associé à des effets hypoglycémiants, grâce à la présence de D-chiro-inositol et de fagopyrines, qui régulent les taux de glucose sanguin⁷⁵. Son faible indice glycémique est renforcé par les fibres alimentaires, qui ralentissent l'absorption des glucides, et par l'amidon résistant favorisant une digestion lente induisant des effets hypoglycémiants^{24,73}. Ces propriétés le rendent idéal pour les personnes à haut risques diabétiques ou souhaitant prévenir l'obésité⁷². En revanche les fagopyrines ne doivent pas être ingérées en trop grande quantité au risque d'une certaine toxicité^{24,36}.

Les composés phénoliques présents dans les graines sont des facteurs anti-tumeurs, anti-inflammatoires et hépatoprotecteurs⁶⁸. En outre, les protéines et les fibres du sarrasin agissent en synergie pour réduire les niveaux de cholestérol sanguin, notamment grâce à des rapports lysine/arginine et méthionine/glycine très favorables²⁰.

6.3.3 Usages alimentaires diversifiés

La farine de sarrasin, naturellement sans gluten, est utilisée dans la production de nombreux produits alimentaires tels que des galettes, nouilles soba, blinis, chapattis et pains multigrains répondant ainsi aux besoins des personnes intolérantes au gluten^{34,68,73}. Les graines décortiquées sont consommées sous forme de gruaux, de kasha ou encore soufflées pour des snacks⁶⁹. En Russie et en Europe de l'Est, le kasha est un aliment de base préparé à partir de graines cuites et moulues grossièrement^{20,68}.

Les jeunes pousses, quant à elles, sont riches en lysine et vitamine C, offrant un profil nutritionnel exceptionnel. Elles sont souvent utilisées dans les jus ou comme compléments alimentaires⁷⁶. Enfin, le miel produit à partir des fleurs de sarrasin est un sous-produit nutritif aux vertus antioxydantes⁷⁷.

Le sarrasin se prête également à la production de snacks soufflés, légers et croquants, et de thés préparés à partir de graines ou d'enveloppes, appréciés pour leurs propriétés antioxydantes^{68,69}. Les fleurs de sarrasin produisent un miel au goût distinctif et riche en antioxydants, tandis que les germes riches en nutriments sont utilisés dans des compléments

alimentaires^{68,76,77}. La farine de sarrasin sert aussi à créer des glaces sans gluten et des boissons alcoolisées locales comme des bières⁶⁸.

En dehors de l'alimentation, les composants bioactifs du sarrasin, tels que les flavonoïdes, trouvent leur place dans les cosmétiques pour leurs propriétés antioxydantes et apaisantes⁶⁸.

6.4 Sélection génétique, amélioration et multiplication du sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*)

6.4.1 Sélection et amélioration du sarrasin

La sélection génétique du sarrasin est confrontée à de nombreuses contraintes en raison de la biologie de la plante, notamment l'hétérostylie et l'auto-incompatibilité^{41,78}. Ces deux caractéristiques rendent difficile la reproduction en gênant les croisements entre plantes de même type ou l'autofécondation. Traditionnellement, la sélection se faisait en regroupant les plantes présentant des caractères communs en familles, ou en utilisant des mutants présentant des traits d'intérêt⁴¹. Une explication plus détaillée de la sélection du sarrasin est disponible en annexe (cfr 13.1).

6.4.2 Multiplication du sarrasin

La multiplication des variétés de sarrasin requiert une attention particulière en raison de l'auto-incompatibilité des plantes⁷⁸. Cette caractéristique empêche une plante de se féconder elle-même et nécessite que ses fleurs soient pollinisées par une autre plante^{42,54}. Cela rend essentiel le maintien de la pureté variétale, car une pollinisation croisée avec une variété différente peut entraîner la formation de populations mixtes, compromettant ainsi les caractéristiques spécifiques des variétés cultivées et leurs reconnaissances.

Pour garantir une multiplication efficace et fidèle aux variétés d'origine, plusieurs mesures doivent être respectées. Par exemple en France⁷⁹, un isolement strict des cultures est indispensable. Une distance minimale de 1 000 mètres entre les parcelles de différentes variétés est recommandée pour limiter les risques de pollinisation croisée. Ce critère est fondamental pour préserver l'intégrité génétique des variétés. De plus, la rotation des cultures est fortement conseillée : il est préférable de ne pas cultiver de sarrasin sur la même parcelle pendant deux années consécutives. Cela permet d'éviter les repousses non contrôlées et de prévenir les mélanges variétaux tout en réduisant la pression des maladies et des ravageurs⁷⁹.

Par ailleurs, une surveillance régulière des cultures est nécessaire pour vérifier l'identité variétale et l'état sanitaire des plants. Les champs doivent être inspectés fréquemment afin d'éliminer toute plante non conforme, pouvant résulter d'un mélange accidentel ou d'une pollinisation indésirable. Ces inspections permettent également de garantir que les exigences de pureté variétale soient respectées⁷⁹.

7 Objectifs du mémoire

Pour répondre aux difficultés induites par le changement climatique, les systèmes agraires doivent se renouveler. Des pistes d'amélioration sont le changement et la diversification des variétés de cultures, l'ajout et le rallongement de rotation culturale, le changement des périodes de culture, les changements des pratiques agricoles et la gestion du bétail.

Ce mémoire se concentre sur la diversification des cultures en étudiant au champ la culture secondaire qu'est le sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*). Ce mémoire poursuit 2 grands objectifs principaux. Le premier est de faire un état des lieux de variétés de sarrasin et leurs potentiels. Observer leurs différences morphologiques et agronomiques, reconnaître les caractéristiques intéressantes liées à de bons rendements. Tout ceci dans le but d'essayer de trouver les variétés les plus intéressantes à la production ou l'amélioration par sélection à plus grande échelle au sein de la Belgique.

Le second objectif explore l'influence de l'environnement sur les performances observées, via des essais sur deux sites contrastés et des variétés communes (Lileja, La Harpe, Smuga et Kora). Il s'appuie également sur des données bibliographiques pour élargir la comparaison à d'autres contextes.

Un objectif secondaire de ce mémoire est la multiplication de variétés de sarrasin pour en comprendre les rudiments et augmenter le stock de graines de certaines variétés.

Ce mémoire porte sur des essais réalisés en Belgique (Louvain-La-Neuve, Gembloux, Grand-Leez). Certains essais liés à ce mémoire comprenaient du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tartaricum*), ou du sarrasin à différentes densité de semis, n'étant pas dans l'objectif de ce mémoire, ils ont été ignorés lors de la prise de résultats et de leur analyse.

8 Matériel et méthodes

8.1 Matériel végétal

Pour la réalisation de ce mémoire, seize variétés de sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) ont été utilisées. Treize ont servi pour les essais en champ (Siva, Lileja, La Harpe, Drushina, Devyatka, Darja, Smuga, Korona, Kora, Panda, Lifago, Spacinka, Aiva) tandis que dix ont servi pour les essais de multiplication (Siva, Lileja, La Harpe, Drushina, Devyatka, Darja, Korona, Hruzowska, BGZ, Nojai). Les informations de provenance des différentes variétés et de leur utilisation dans le cadre de ce mémoire sont présentées dans le Tableau 18 (cfr 13.2). Les pays d'origine sont la France, la Slovénie, la Russie, la Pologne, la Slovaquie, l'Allemagne et les Pays-Bas. La variété Brabantse Grijze Zandboekweit sera systématiquement abrégée par BGZ. Toutes les variétés testées sont des variétés dites indéterminées (voir 6.2.2.3) à l'exception de Siva, Drushina et Devyatka qui sont déterminées.

8.2 Étude comparative des variétés au champ

8.2.1 Sites et gestion de la culture

Les essais ont été menés sur 3 sites distincts :

- Louvain-la-Neuve (LLN), terrain des fermes universitaires de l'UCLouvain de Marbais, (coordonnées GPS : 50.669719 N, 4.636273 O), itinéraire technique pré-semis géré par le personnel des fermes de l'UCLouvain et post-semis par CEPICOP
- Gembloux, terrain du Centre de Recherche Agronomique Wallon (coordonnées GPS : 50.565086 N, 4.710509 O), itinéraire technique géré par CEPICOP
- Grand-Leez, terrain privé de M. Guillaume Jacquemin, (coordonnées GPS : 50.586594 N, 4.762046 O), itinéraire technique géré par M. Guillaume Jacquemin

L'itinéraire technique concerne la gestion de la culture dans son ensemble, incluant la préparation du sol, les semis et la récolte. Le Centre Pilote wallon des Céréales et des Oléo-Protéagineux (CePiCOP) a participé à la gestion des cultures et au design expérimental des essais de LLN et Gembloux en concertation avec les promoteurs M.Quinet et G. Jacquemin. Concernant l'essai mené à Grand-Leez, le design expérimental a été établi en concertation entre les promoteurs et le CePiCOP et la gestion de la culture a été menée par G. Jacquemin.

La répartition géographique des sites au sein de la Belgique est disponible sur la Figure 8.

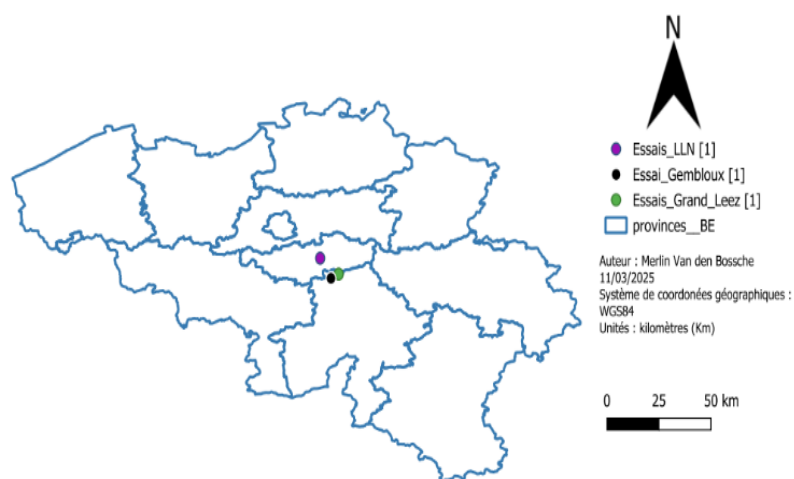


Figure 8 Répartition géographique en Belgique des essais de sarrasin réalisés

Les sites d'essais possédaient entre 40 et 50 micro-parcelles pour une surface totale par site entre 510 et 820m². La répartition des variétés au sein des micro-parcelles des sites d'essais s'est faite par un design aléatoire complet (CRD). Celui-ci consiste en une répartition complètement aléatoire des variétés dans les micro-parcelles. Les types de sols des sites de Gembloux et LLN sont limoneux à drainage naturel favorable, tandis que le site de Grand-Leez possède un sol limoneux à drainage favorable et modéré ou imparfait. Les caractéristiques générales détaillées des parcelles sont disponibles dans le

Tableau 3.

Tableau 3 Informations générales (parcelles, sol, semoir, variétés, ...) des 3 différents sites d'essais.

Site	LLN	Gembloux	Grand-Leez
Longueur micro-parcelle (m)	8	8	8.5
Largeur micro-parcelle (m)	2.05	2.05	1.5
Nombre de micro-parcelles	50	40	40
Surface totale (m ²)	820	656	510
Bordure	Blé	Blé	Blé et sarrasin
Semoir	Expérimental WINTER-STEIGER	Expérimental WINTER-STEIGER	Hege 80
Type de sol	Limoneux à drainage naturel favorable*	Limoneux à drainage naturel favorable*	Limoneux à drainage naturel favorable et modéré ou imparfait*
Variétés présentes	Siva, Lileja, La Harpe, Drushina, Devyatka, Darja, Smuga, Korona, Kora, Panda	Lileja, La Harpe, Smuga, Kora, Lifago, Spacinka, Aiva	Lileja, La Harpe, Drushina, Devyatka, Darja, Smuga, Korona, Kora, Panda, Lifago, Spacinka, Aiva
Répartition des variétés	DAC	DAC	DAC

*80

Les trois sites ont été soumis à des itinéraires culturels différents, dont les détails sont donnés dans le Tableau 4. Les semis ont eu lieu entre le 14 mai et le 6 juin 2024. Aucun engrais n'a été apporté durant la culture et seuls des désherbages mécaniques ont été effectués, dont certains infructueux. Les récoltes ont eu lieu respectivement le 19 septembre 2024 pour Gembloux et le 5 octobre 2024 pour LLN. L'essai sur le site de Grand-Leez a dû

être abandonné à la suite de l’envahissement important des micro-parcelles par des plantes adventices.

Tableau 4 Informations d’itinéraires culturaux des 3 différents sites d’essais.

Site	LLN	Gembloux	Grand-Leez
Semis	06-juin-24	14-mai-24	20-mai-24
Densité de semis (graines/m ²)	200	200+150+250	200
Précédent cultural	Prairie	Froment/pois	2020 : lentilles, 2021 : tournesol, 2022 : froment de printemps, 2023 : lentille et blé dur
Travail du sol avant semis	Labour, passage rotative, passage rotative puis semis et roulé	Labour, traitement au round-up, décompacteur la veille, rotative le matin, semis et roulé	Labour, herse rotative
Désherbage mécanique : 28 mai	—	1 passage herse étrille	—
Désherbage mécanique : 04 juin	—	Testé mais arrêté car jugé trop destructeur pour la culture	—
Désherbage mécanique : mi-juin	—	Testé mais arrêté car jugé trop destructeur pour la culture	—
Désherbage mécanique : 25/06	1 passage herse étrille	—	—
Désherbage mécanique : 05/07	1 passage herse étrille	—	—
Anti-limace	13-juin-24	17-mai-24	—
Anti-limace (2)	25-juin-24	—	—
Désherbage manuel	—	05-juil	—
Récolte	05-oct	19-sept	—
Matériel de récolte	Moissonneuse : marque WINTERSTEIGER série Delta*	Moissonneuse : marque WINTERSTEIGER série Delta*	Destruction

*Figure 9



Figure 9 Moissonneuse WINTERSTEIGER série Delta lors de la récolte de l’essai de Louvain-La-Neuve

Après les récoltes sur les sites de LLN et Gembloux, les graines ont été triées et séchées chez CEPICOP (voir Figure 10). Le triage permet d’éliminer les graines vides et les impuretés de la récolte, suivant un mécanisme de tamisage. Après mesure des paramètres de rendement, une partie des graines a été stockée dans le laboratoire GRPV de L’UCLouvain.



Figure 10 Machine de triage de grain de CEPICOP

8.2.1.1 Louvain-la-Neuve

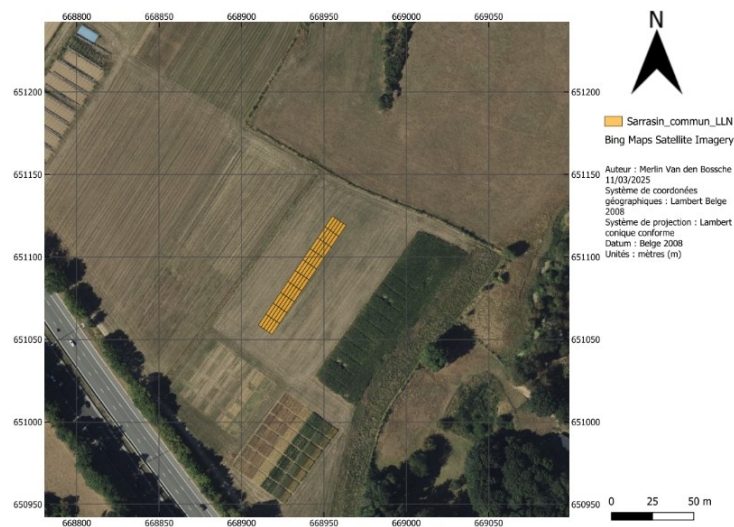


Figure 11 Situation géographique de la parcelle d'essai de LLN appartenant aux Fermes universitaires de l'UCLouvain

La situation géographique de la parcelle d'essais de LLN est visible sur la Figure 11. Le Tableau 5 indique la répartition précise des variétés au sein des micro-parcelles. Les 10 micro-parcelles situées à l'extrémité gauche du site, colorées en gris dans le Tableau 5, n'ont pas été finement suivies ni analysées. Elles ont servi de zone de prélèvement pour des mesures destructives et ont donc été écartées pour ne pas impacter les rendements calculés des variétés. Chaque variété a été semée au sein des quatre parcelles distinctes, suivant une randomisation totale (CRD). Les variétés présentes étaient Siva, Lileja, La Harpe, Drushina, Devyatka, Darja, Smuga, Korona, Kora, Panda.

Tableau 5 Répartition des variétés dans les micro-parcelles sur la zone d'étude de Louvain-La-Neuve, les cellules grisées à gauche représentent les parcelles des mesures destructives

Panda	Siva	Smuga	La Harpe	Devyatka
Kora	Darja	Lileja	Panda	Kora
Korona	Panda	Devyatka	Drushina	Korona
Smuga	Smuga	La Harpe	Siva	Kora
Darja	Lileja	Korona	Darja	Drushina
Devyatka	Panda	Kora	Smuga	La Harpe
Drushina	Drushina	Siva	Korona	Darja
La Harpe	Kora	Panda	Devyatka	Lileja
Lileja	Devyatka	Darja	Smuga	Korona
Siva	Siva	Lileja	La Harpe	Drushina

8.2.1.2 Gembloux

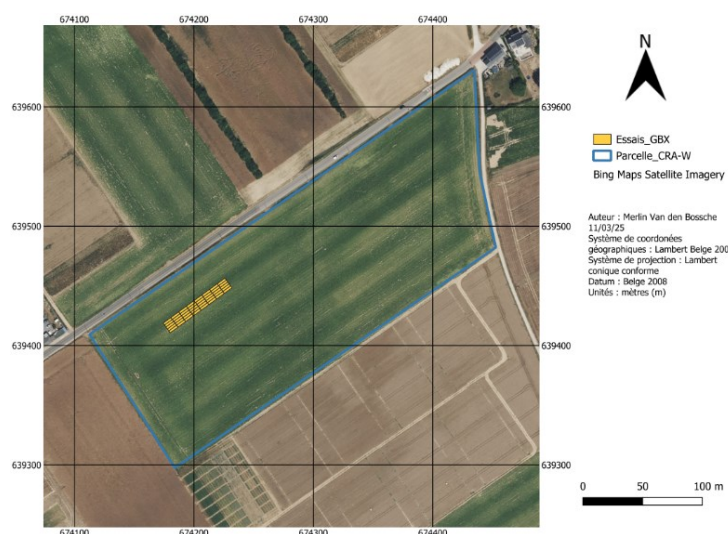


Figure 12 Situation géographique de la parcelle d'essai de Gembloux appartenant au CRA-W

La situation géographique de la parcelle d'essais de Gembloux est visible sur la Figure 12. Le Tableau 6 reprend la répartition précise des variétés au sein des micro-parcelles. Les variétés présentes étaient Lileja, La Harpe, Smuga, Kora, Lifago, Spacinka, et Aiva. L'ensemble de ces variétés ont été semées à une densité de 200 graines/m². Des essais de densité de semis supplémentaires ont été menés pour les variétés La Harpe (150 et 250 graines/m²) et Lifago (150 graines/m²). Les variétés étaient en 4 répétitions par densité de semis.

Tableau 6 Répartition des variétés dans les micro-parcelles sur la zone d'étude Gembloux, les nombres suivant le nom d'une variété indiquent une densité de semis différentes de celle de base (200 graines/m²)

La_Harpe250	Lifago	Spacinka	Kora	Lifago150
Aiva	Lileja	Smuga	La_Harpe	Lifago150
Lifago	La_Harpe	Aiva	La_Harpe250	La_Harpe150
Kora	Smuga	Lileja	Spacinka	Lifago150
Smuga	Spacinka	Kora	Aiva	La_Harpe150
Lileja	La_Harpe250	La_Harpe	Lifago	La_Harpe150
Kora	Aiva	Smuga	La_Harpe250	Lifago150
La_Harpe	Lileja	Spacinka	Lifago	La_Harpe150

8.2.1.3 Grand-Leez

La situation géographique de la parcelle d'essais de Grand-Leez est visible sur la Figure 13. La répartition précise des variétés au sein des micro-parcelles est disponible sur le Tableau 7.

Le nombre de micro-parcelles par variété était de 5 pour les variétés Kora et Korona, de 4 pour les variétés Lifago, Aiva, La Harpe, Lileja, Panda, Smuga, Spacinka, de 2 pour la variété Darja et de 1 parcelle pour les variétés Drushina et Devyatka ; le nombre de micro-parcelles a dû être revu à la baisse pour certaines variétés en fonction d'un manque de graines. Ce plan n'est donc pas équilibré. Certaines bordures étaient constituées de sarrasin, comme illustré à

gauche et à droite du Tableau 7, mais n'ont pas été prises en compte dans les mesures. Les autres bordures en haut et en bas étaient constituées de blé.

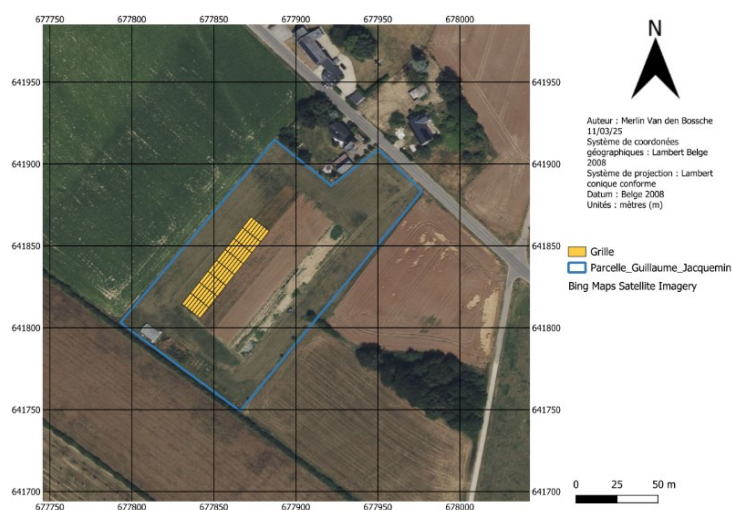


Figure 13 Situation géographique de la parcelle d'essai de Grand-Leez appartenant à M. Guillaume Jacquemin

Tableau 7 Répartition des variétés dans les micro-parcelles sur la zone d'étude de Grand-Leez avec également les bandes extérieures comme bordures (en gris) composées également de sarrasin commun ou de tartarie

Kora	Aiva	Drushina	Kora	Korona	La Harpe	Lifago
Kora	Lifago	lileja	Panda	Smuga	Spacinka	Lifago
Kora	Kora	Korona	Lifago	Smuga	lileja	Lifago
Kora	Spacinka	La Harpe	Darja	Aiva	Panda	Lifago
Kora	Darja	Lifago	Korona	Panda	Aiva	Darja
Kora	La Harpe	Kora	Spacinka	lileja	Smuga	Kora
Kora	Smuga	Aiva	Spacinka	La Harpe	devyatka	Kora
Kora	lileja	Panda	Kora	Lifago	Korona	Kora



Figure 14 État de la parcelle (A) après pluie et période fraîche et (B) après envahissement par des adventices sur la parcelle d'essai de Grand-Leez

Au vu des conditions météorologiques humide au semis (Figure 15), aucun désherbage mécanique post semis n'a pu être réalisé sur ce site. Ceci, combiné à une période fraîche et humide peu après le semis, a conduit à un envahissement de la parcelle par des plantes adventices résultant en l'abandon de l'expérience (Figure 14).

8.2.2 Météo durant les essais

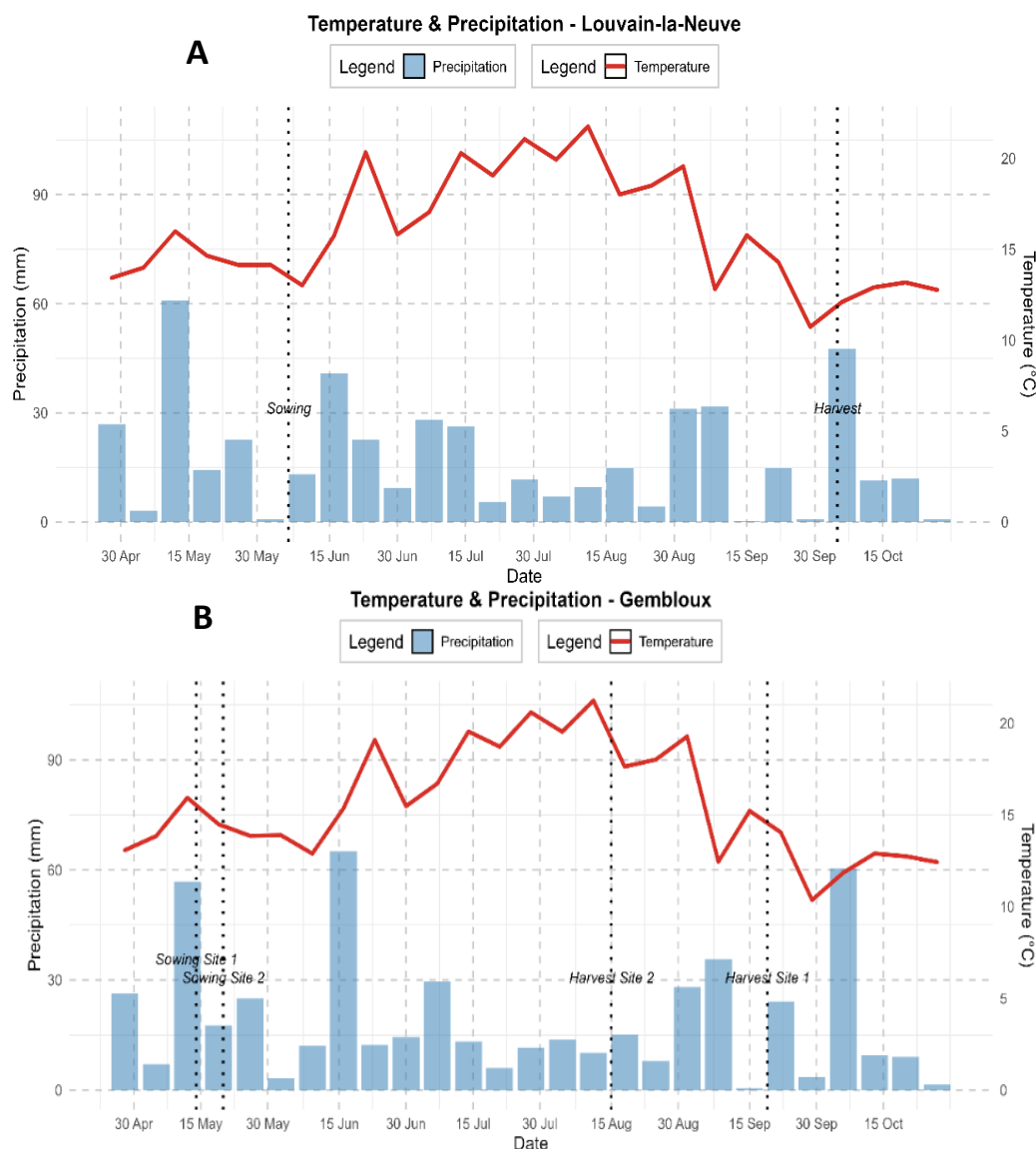


Figure 15 Température moyenne et précipitation des stations météo les plus proches des sites d'essais, en rouge la température moyenne (°C) et en bleu les précipitation (mm). Les dates de semis sont indiquées par Sowing (Site) et de récolte par Harvest (Site). Avec en haut LLN (A) et en bas Gembloux (B), le site 1 correspond à la parcelle de Gembloux, le site 2 celle de Grand-Leez

Les données météorologiques proviennent de la base de données Agromet⁸¹. Celles-ci sont illustrées sur la Figure 15 pour LLN, Gembloux et Grand-Leez. La station météo de LLN a été utilisée pour caractériser les conditions climatiques de l'essai de LLN. La distance séparant la station météo de l'essai était de moins d'un kilomètre. La station météo de Gembloux a servi pour les essais de Gembloux et de Grand-Leez. La distance entre la station météo de Gembloux et la parcelle d'essais de Gembloux était également de moins d'un kilomètre, tandis que la distance entre la station météo et la parcelle d'essai de Grand-Leez était de 3,5kms.

La température moyenne enregistrée à LLN sur la période d'essais était de 16,04 °C. La température moyenne de Gembloux était légèrement plus faible, s'élevant à 15,67 °C (Figure 15). En ce qui concerne les précipitations moyennes journalières, LLN a enregistré 2,56 mm, tandis que Gembloux a connu une valeur un peu plus élevée, avec 2,82 mm (Figure 15). Cette tendance est également confirmée par le total des précipitations durant la période d'essais, avec 471,2 mm à LLN contre 519,2 mm à Gembloux. Du côté de l'ensoleillement, la moyenne journalière à LLN était de 1512,55 J/cm², contre 1514,13 J/cm² à Gembloux, ce qui représente une différence minime. Sur l'ensemble de la période, l'ensoleillement total a atteint 278 309,8 J/cm² à LLN, et 278 600,6 J/cm² à Gembloux.

8.2.3 Paramètres mesurés

Des paramètres phénologiques, morphologiques et de rendement ont été analysés au cours de la culture. Les stades phénologiques ont été suivis tout au long de la culture selon l'échelle BBCH du sarrasin⁸². Des observations morphologiques plus précises ont été réalisées à deux stades de développement du sarrasin, à 25% et 75% de maturité des graines, suivant les recommandations des descripteurs du sarrasin de l'IPGRI⁸³. En fin de culture, les paramètres de rendement (rendement par ha et poids de 1000 grains) ont été mesurés.

8.2.3.1 Mesures phénologiques

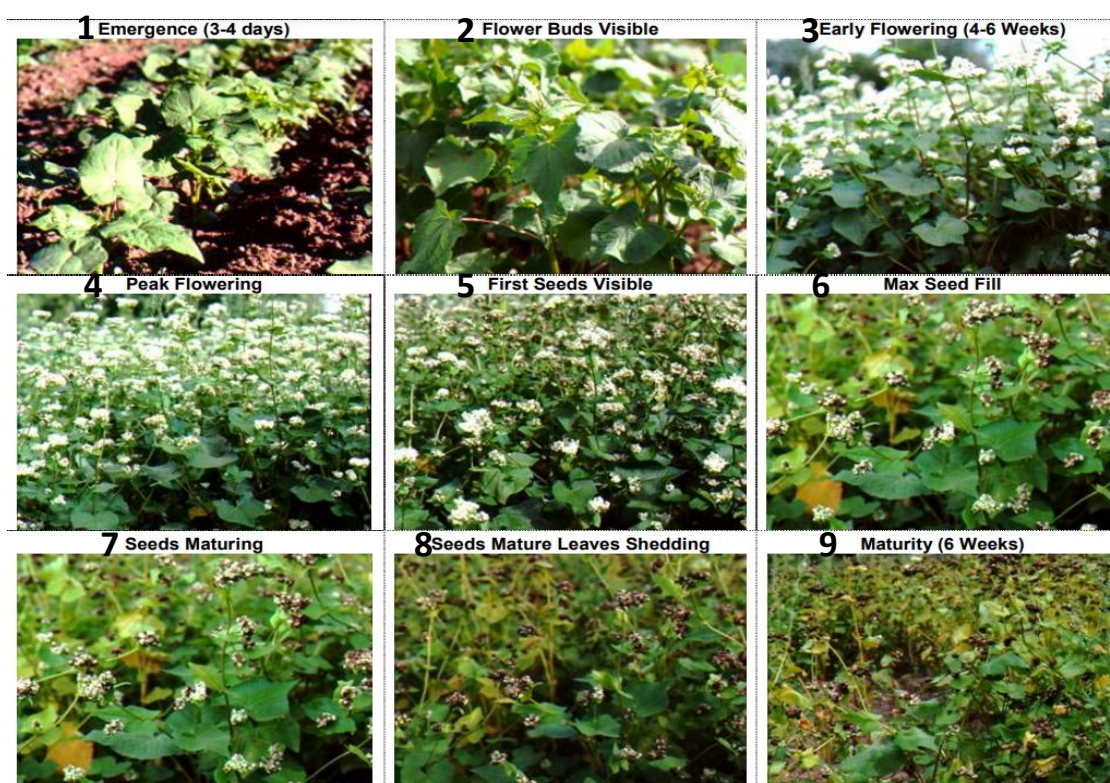


Figure 16 Stade de développement du sarrasin commun de 1 (en haut à gauche) à 9 (en bas à droite)⁸³

La phénologie de la culture a été suivie environ une fois par semaine depuis la levée des plantules jusqu'à la récolte. Les dates précises dépendaient principalement de la météo et des

disponibilités des expérimentateurs. Les observations ont été faites sur chaque site et pour chaque parcelle pour les différentes variétés.

Les stades de développement ont été jugés à l'œil selon une échelle allant de 1 (la levée/émergence) jusqu'à 8 (maturité) (Figure 16). Les stades 8 et 9 ont été agrégés en un seul stade de maturité car ils étaient trop difficiles à différencier. Chaque observation a été associée à un stade de développement (allant de 1 à 8) et au nombre de degrés-jours (°C/J) accumulés depuis le semis, en utilisant une base de 7 °C^{84,85}, selon les données fournies par Agromet⁸¹.

8.2.3.2 Mesures morphologiques

Tableau 8 Descriptions des mesures morphologiques effectuée sur les 3 sites d'essais (LLN, Gembloux et Grand-Leez).

Paramètre	Type de données	Stade	Description
Hauteur ¹	Quantitative	3-4	Taille des plantes depuis le sol à 25% de maturité (cm)
Couleur des tiges	Qualitative	3-4	Couleur des tiges (vert, rose, rouge)
Couleur des feuilles	Qualitative	3-4	Couleur des feuilles (vert, rose, rouge)
Couleur du pétiole	Qualitative	3-4	Couleur des pétioles (vert, rose, rouge)
Densité d'inflorescence	Qualitative	3-4	Densité de présence de racèmes sur la plante (faible, intermédiaire, élevé)
Couleur des fleurs	Qualitative	3-4	Couleur des fleurs (blanc, vert-jaune, rose, rouge)
Morphologie des fleurs	Qualitative	3-4	Caractère brévistyle ou longistyle des fleurs des plantes
Nombre de feuilles	Quantitative	3-4	Nombre de feuilles
Nombre de racèmes	Quantitative	3-4	Nombre de cymes
Hauteur ²	Quantitative	7-8	Taille des plantes depuis le sol à 75% de maturité (cm)
Embranchement	Quantitative	7-8	Nombre de tiges secondaires
Diamètre des tiges	Quantitative	7-8	Diamètre de la tige entre le 1 ^{er} et le 2 ^e nœud (mm)
Longueur de l'entrenœud	Quantitative	7-8	Distance entre les 2 premiers nœuds (mm)
Verse	Qualitative	7-8	Sensibilité à la verse (faible, intermédiaire, élevé)
Longueur du pétiole	Quantitative	7-8	Longueur du pétiole (mm)
Longueur des limbes	Quantitative	7-8	Longueur du limbe des feuilles (mm)
Largeur des limbes	Quantitative	7-8	Largeur du limbe des feuilles (mm)
Forme des feuilles	Qualitative	7-8	Forme des feuilles (ovale, hastée, sagittée, cordée, etc.)
Inflorescence sur tige secondaire	Qualitative	7-8	Présence d'inflorescence sur les ramifications
Longueur des racèmes	Quantitative	7-8	Longueur des racèmes (mm)
Taux d'avortement des fleurs	Qualitative	7-8	Proportion de fleurs avortées (faible, intermédiaire, élevé)

*Figure 17

Les mesures morphologiques ont été prises à 25% (stade 3-4 floraison) et 75% (stade 7-8 maturation/maturité) de maturité, respectivement le 5 et 6 août 2024 et le 18 et 19

septembre 2024. Les mesures morphologiques ont été prise aléatoirement sur des morphes longistyles ou brévistyles. Les paramètres mesurés sont décrits au Tableau 8 et sont les descripteurs recommandés pour la caractérisation du sarrasin⁸³. La description des mesures réalisées au champ est disponible dans le Tableau 8. Ces mesures ont été prises sur 10 plantes par micro-parcelle (pour LLN) et 10 plantes par variété (pour Gembloux et Grand-Leez).

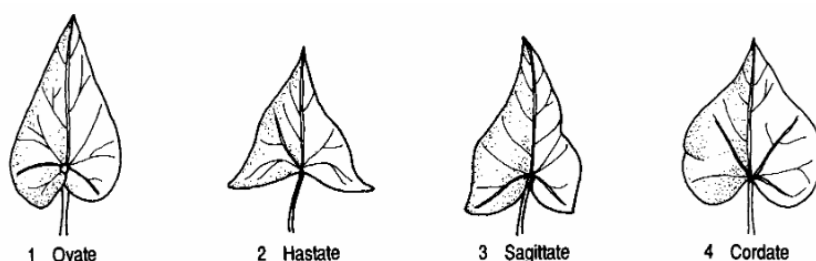


Figure 17 Forme des feuilles avec 1 ovale, 2 hastée, 3 sagittée, 4 cordée⁸³.

Les caractères qualitatifs incluent la morphologie des fleurs (avec 10 répétitions par parcelle sur 4 parcelles), ainsi que la verse, l'avortement des fleurs, l'embranchement des tiges et la densité des fleurs (avec une répétition par parcelle, soit 4 au total). Lorsque ces caractères sont mesurés par niveau d'intensité, le niveau 1 correspond à une intensité faible, le niveau 2 à une intensité intermédiaire et le niveau 3 à une intensité élevée. Par exemple, pour la verse, le niveau 1 indique une absence ou une quasi-absence de plantes couchées, tandis que le niveau 3 indique au moins un carré de 30 × 30 cm de plantes versées sur la parcelle.

En plus de ces mesures, des mesures destructives ont été réalisées sur les variétés de LLN (Tableau 9). Dix plantes par variété ont été récoltées sur les micro-parcelles (les 10 parcelles de gauche du Tableau 5, non analysées pour d'autres mesures).

Tableau 9 Mesures destructives réalisées sur les variétés de LLN

Nombre de feuilles sur la tige principale
Nombre de feuilles sur les ramifications
Nombre d'inflorescences sur la tige principale
Nombre d'inflorescences sur les ramifications
Nombre de ramifications
Numéro du nœud où apparaissent les premières inflorescences
Poids frais des feuilles
Poids frais des inflorescences
Poids frais des tiges
Poids sec des feuilles
Poids sec des inflorescences
Poids sec des tiges

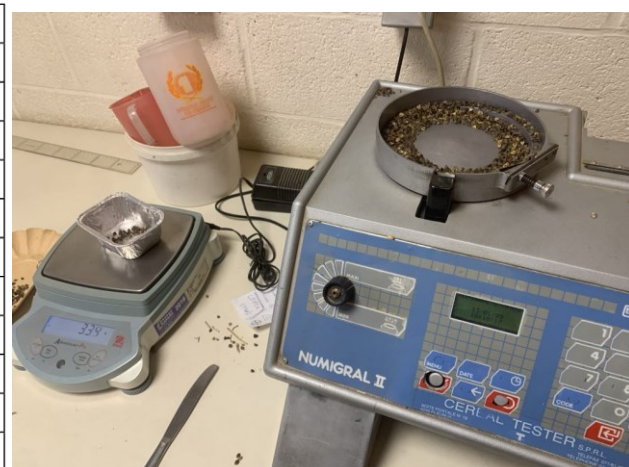


Figure 18 Machine de comptage de grain NUMIGRAL2 et balance

8.2.3.3 Paramètres de rendement

Après la récolte, les graines ont été triées à l'aide d'un système de tamis (voir Figure 10), puis séchées dans une étuve chauffée à 60 °C pendant au minimum 1 semaine. Les mesures de rendement (exprimées en Kg/ha) ont été réalisées par le CEPICOP, tandis que le poids de mille grains (PMG) a été mesuré par l'auteur et CEPICOP, en utilisant une machine de comptage de grain NUMIGRAL2 et une balance, mis à disposition par le CEPICOP (Figure 18).

Le rendement correspond au poids des grains récoltés après les étapes de triage et de séchage. Le PMG est obtenu en comptant 100 grains, puis en mesurant leur poids. Cette opération a été répétée quatre fois par micro-parcelle sur le site de LLN, et quatre fois par variété sur le site de Gembloux. Ainsi, pour l'essai de Gembloux, les résultats sont obtenus par variété, tandis qu'ils sont exprimés par micro-parcelle pour l'essai de LLN. D'autres données ont été prise par CePiCOP comme l'humidité relative (en %) et le poids par hectolitres (Kg/hL) utilisée dans ce rapport.

8.3 Mise au point d'une méthode de multiplication des graines

8.3.1 Conditions de culture et arrosages

Tableau 10 Répartition des variétés multipliées dans les pallox sous serre perméable avec Siva, Lileja, La Harpe, Drushina, Devyatka, Darja, Korona, Hruzowska, BGZ, Nojaï, les 2 pallox restant ont servi à une tentative d'élevage de syrphe infructueuse

Hruzowska	La Harpe
Siva	Lileja
Drushina	Darja
Korona	Devyatka
BGZ	Syrphe
Nojaï	Syrphe



Figure 19 Photo de pallox non isolé par filet du site de multiplication du CRA-W, au stade d'émergence

Afin de multiplier les graines de chaque variété sans croisements manuels, il fallait assurer une pollinisation par les insectes sans que ceux-ci passent d'une variété à l'autre. Pour ce faire, des graines de chaque variété ont été semées dans des pallox de 120 cm sur 80 cm remplis de terre (un pallox par variété, Tableau 10) et ils ont été recouverts d'un filet au début de la floraison (le 12 juillet 2024) pour éviter toute pollinisation non désirée. Les différents pallox ont été installés dans une serre extérieure perméable du CRA-W. Un exemple de pallox non isolé par filet est visible sur la Figure 19. Le semis a eu lieu le 19 juin et la récolte (manuelle) le 11 septembre 2024. Après la récolte, le poids des graines obtenues pour chaque variété a été

mesuré. À partir des mesures de PMG obtenues au champ, il a été possible d'estimer le nombre de graines produites à partir du poids de graines. Cette estimation se base sur la formule suivante : le poids total récolté est divisé par le PMG (exprimé en poids pour 100 graines), puis multiplié par 100 afin d'obtenir le nombre total de graines (puisque $\text{PMG} / 100 = \text{poids moyen d'une graine}$).

La préparation du semis ainsi que le semis et le désherbage ont été complètement manuel au vu des petites surfaces impliquées. Dans chaque pallox entre 30 et 50 graines ont été plantées. La serre perméable à l'eau a permis de limiter l'arrosage seulement aux périodes chaudes de l'été avec 1 arrosage par semaine s'il n'y avait pas eu de pluie sur cette même semaine. La situation géographique très proche entre la zone d'étude de Gembloux et le site de multiplication a permis un passage régulier pour suivre le développement de la multiplication.

Chaque pallox était complètement isolé des autres par des filets empêchant le passage de pollinisateurs et donc le mélange des variétés. Le sarrasin étant auto-incompatible et afin de tout de même permettre la production de graines, une dizaine d'insectes pollinisateurs (essentiellement des syrphes) ont été attrapés (voir Figure 20) et relâchés directement sous les filets dans chacun des pallox. Ces introductions ont eu lieu 2 fois : le 13 août et le 22 août 2024. De cette manière le mélange des variétés a été grandement limité tout en permettant la production de graines.

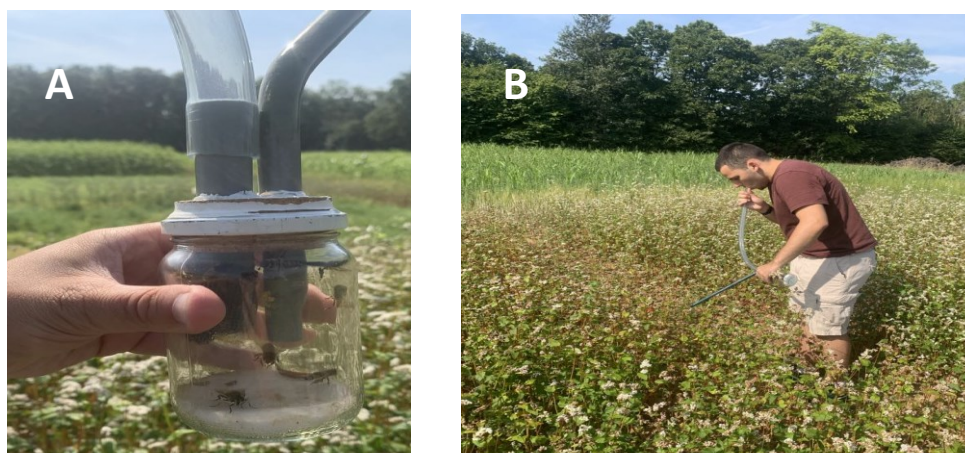


Figure 20 Outil aspirateur servant à capturer les pollinisateurs (A) et l'utilisation de l'outil (B) photo pour l'exemple en champ de sarrasin.

8.4 Analyses statistiques

L'ensemble des analyses et graphiques présentés dans ce travail ont été réalisés à l'aide du logiciel R (version 4.3.1), via des scripts personnalisés développés spécifiquement pour ce mémoire. Les tableaux ont été réalisés avec LaTeX via Overleaf. Les données quantitatives continues sont systématiquement présentées sous la forme moyenne $\pm$ écart type, lorsque cela est pertinent et possible.

8.4.1 Tests de normalité et d'homogénéité des variances et tests statistiques

Avant toute comparaison statistique, les hypothèses de validité de l'ANOVA ont été systématiquement évaluées. La normalité des résidus a été testée à l'aide du test de Shapiro-Wilk, tandis que l'homogénéité des variances a été vérifiée par le test de Levene. Les résultats de ces tests sont détaillés en annexe (cfr 13.6). Des ANOVA à un facteur ont été réalisées pour comparer les effets des variétés sur les différentes variables (statistique F). Si l'une ou les deux conditions n'étaient pas remplies, une alternative non paramétrique a été employée : le test de Kruskal-Wallis, dont la statistique H joue un rôle similaire à celui de la F-statistic dans l'ANOVA. Une ANOVA à deux facteurs a été réalisée pour évaluer les effets croisés des variétés et sites sur certains paramètres mesurés. Par ailleurs, les variables qualitatives ont été analysées à l'aide de tests du chi-carré (χ^2). Le seuil de significativité a été fixé à 5 % ($p < 0,05$), sauf mention contraire et . ($p < 0,01$), * ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$) et *** ($p < 0,001$).

Pour les comparaison multiples 2 test ont été utilisés ; Le test de Tukey HSD pour les données en respectant les hypothèses et Le test de Dunn pour des analyses non paramétriques dans le cas contraire.

8.4.2 Modèles linéaires généralisés (GLM)

Des modèles linéaires généralisés (GLM) ont été employés pour étudier l'effet de variables explicatives (ici les mesures morphologiques) sur certaines variables de réponse (ici le PMG et rendement). Les GLM sont une extension des modèles de régression linéaire, permettant d'intégrer différents types de distributions (normale, binomiale, Poisson, etc.) et fonctions de lien. Ils permettent l'intégration simultanée de variables qualitatives et quantitatives. Les tableaux d'ANOVA associés aux GLM fournissent des tests F individuels pour chaque variable explicative, testant leur contribution à la variance totale.

8.4.3 Autres analyses : ACP et ACM

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été utilisée sur les données quantitatives continues de LLN pour réduire la dimensionnalité, identifier les structures latentes et faciliter la visualisation des relations entre variables et observations. L'ACP génère de nouvelles variables (composantes principales) non corrélées, permettant une représentation synthétique de l'information dans un espace réduit (2D ou 3D).

Une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) a été réalisée sur les données communes aux sites pour explorer les relations entre individus et variables à la fois qualitatives et quantitatives (après codage adapté). Méthode multivariée proche de l'ACP, l'ACM permet de représenter graphiquement les modalités et observations dans un espace factoriel, facilitant l'identification de regroupements et la compréhension des structures sous-jacentes dans des jeux de données complexes et mixtes.

9 Résultats

9.1 Comparaison variétale

9.1.1 Comparaison variétale à Louvain-la-Neuve

Dix variétés ont été comparées à LLN sur 4 parcelles par variété et un suivi fin de ces parcelles a été réalisé afin de permettre une bonne comparaison entre variétés.

9.1.1.1 Développement général et cycle de vie des variétés de Louvain-la-Neuve

Les stades de développement des parcelles de sarrasin ont été suivis à intervalles réguliers et sont détaillés en annexe (cfr 13.4). La Figure 21 illustre, pour le site de LLN, le nombre de °C/J nécessaire à chaque variété pour atteindre les différents stades de développement. Toutes les variétés testées à Louvain-la-Neuve (LLN) ont eu besoin d'environ 1200 °C/J cumulés pour atteindre le stade final de maturité (Figure 21). Une exception notable est la variété Lileja, qui, avec seulement 914 °C/J en moyenne, s'est distinguée par sa précocité. Cependant, malgré cette homogénéité apparente au stade final, les premières phases de développement ont montré des différences. Les variétés Panda, Kora, Smuga, Devyatka, Drushina et Lileja ont atteint rapidement le stade 3 (début de floraison), avec seulement 251 °C/J, soit près de 100 °C/J de moins que la variété la plus tardive à ce stade, Darja, qui a nécessité 343 °C/J. Cette différence équivaut à environ 10 jours supplémentaires au champ pour atteindre le début de la floraison. Globalement, Darja et La Harpe étaient les variétés les plus tardives, ayant nécessité le plus grand nombre de °C/J pour atteindre non seulement la maturité (1238 °C/J), mais aussi les stades intermédiaires.

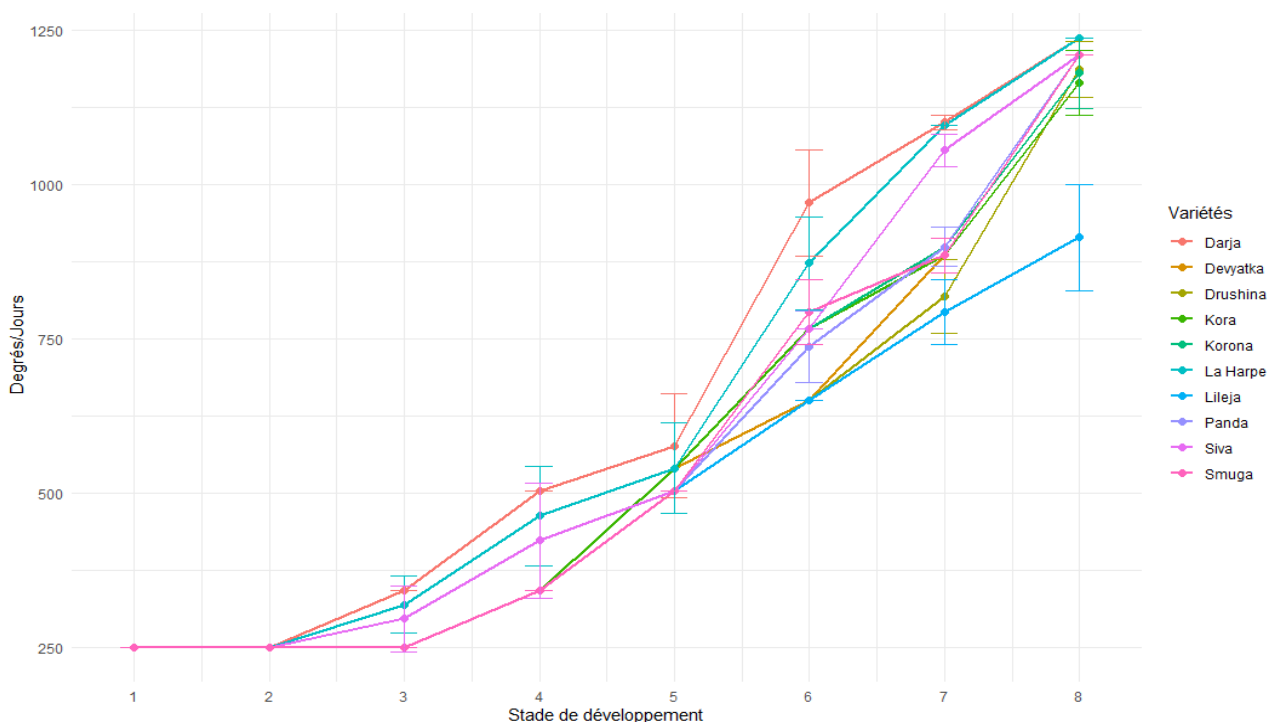


Figure 21 Évolution du nombre de degrés jours nécessaires pour atteindre les différents stades de développement phénologiques du sarrasin en fonction des variétés pour le site de Louvain-la-Neuve.

9.1.1.2 Paramètres morphologiques des variétés de Louvain-la-Neuve

9.1.1.2.1 Paramètres végétatifs mesurés au champ

La hauteur des plantes à 75 % de maturité variait selon les variétés ($F = 18,519$, $p = 5,99 \times 10^{-10}$, Figure 22A), avec Darja ($138,25 \pm 8,49$ cm) et La Harpe ($130 \pm 3,60$ cm) étant plus grandes que les autres variétés ($91,37 \pm 11,74$ cm). La hauteur des plantes à 25 % de croissance variait également selon les variétés ($F = 8,737$, $p = 2,65 \times 10^{-6}$, Figure 22B). Darja, La Harpe et Panda figuraient parmi les plus hautes avec une moyenne de $115,86 \pm 13,49$ cm de haut depuis le sol, tandis que Devyatka était la plus petite avec $78,55 \pm 6,90$ cm.

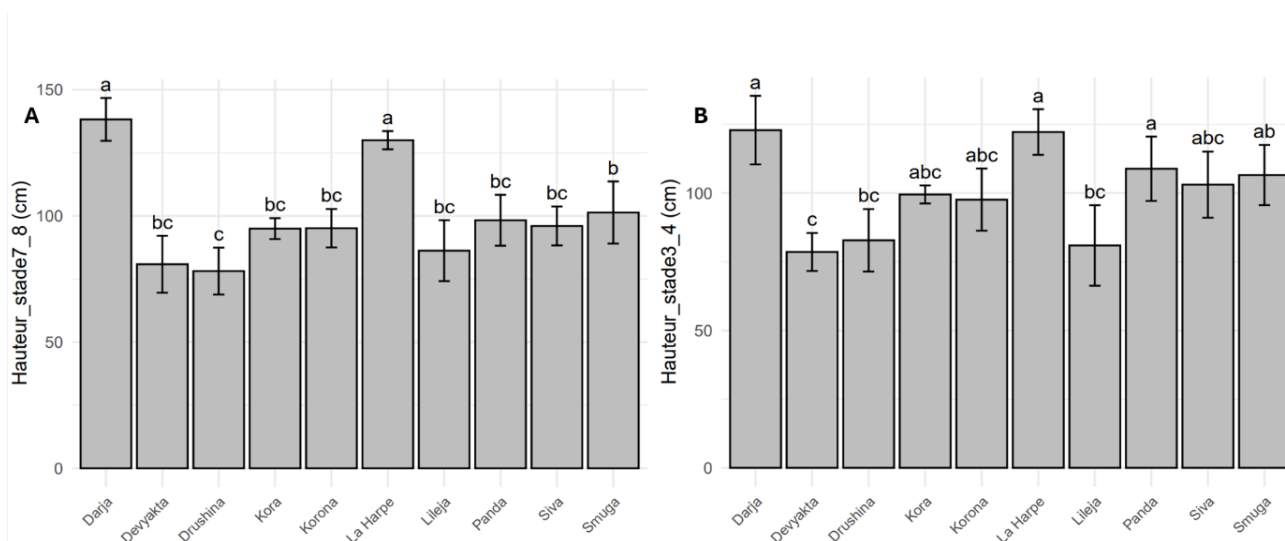


Figure 22 Taille des plantes par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) aux stades 7-8 (B) aux stades 3-4. Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.

Pour le nombre de feuilles lors de la première prise de données ($F = 9,326$, $p = 1,37 \times 10^{-6}$, Figure 23A), Darja était en tête avec en moyenne $23,8 \pm 3,66$ feuilles, une valeur différente d'autres variétés comme Lileja, Devyatka, Drushina et Korona avec une moyenne de $15,6 \pm 2,98$ feuilles. Aucune différence n'a été observée entre les variétés concernant la longueur et la largeur des limbes ainsi que la longueur des pétioles (Figure 23B, C, D).

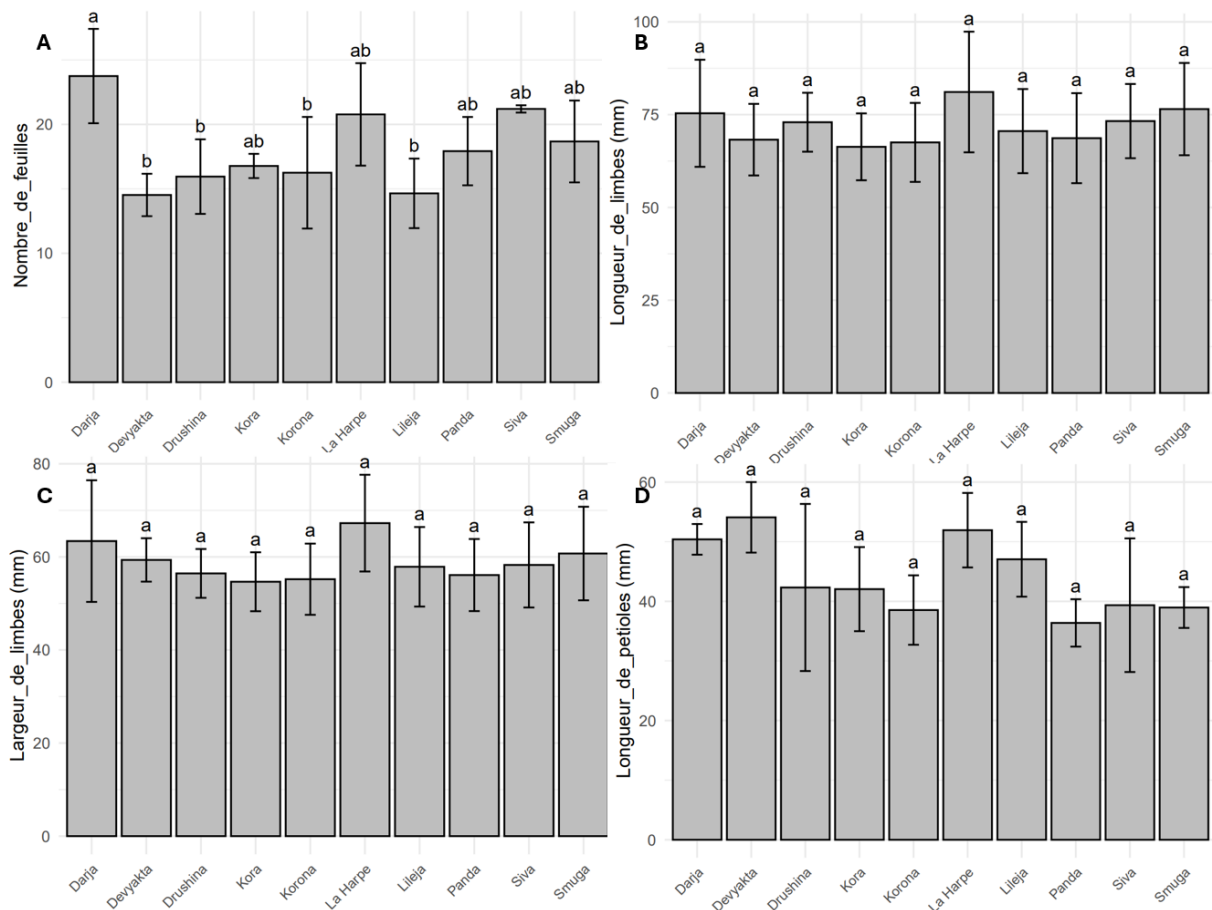


Figure 23 Caractéristiques morphologiques de feuilles bien développées par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) nombre de feuilles par plante, (B) longueur et (C) largeur de limbes, (D) longueur de pétioles. Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.

Le paramètre d'intensité de verse présentait des différences entre les variétés ($X^2 = 302,92$, $p < 2,2 \times 10^{-16}$, $df = 18$, Figure 24A). Avec La Harpe étant la plus sensible avec toutes ses parcelles au niveau le plus élevé. A l'inverse de Siva considéré comme la moins sensible dans cet essai. Le nombre de tiges secondaires ne présentait pas de différences inter-variétales (Figure 24B). Le diamètre de la tige variait de $5,16 \pm 0,76$ mm au plus élevé chez Siva à $2,85 \pm 0,50$ mm au plus faible chez Devyatka, avec une moyenne de $4,09 \pm 1,02$ mm ($F = 1,994$, $p = 0,0757$, Figure 24C). Concernant la longueur entre les deux premiers entrenœuds, Siva se distinguait par une valeur inférieure aux autres variétés ($47,6 \pm 7,85$ mm, $F = 1,994$, $p = 0,0757$, Figure 24D) contre une moyenne de $76,26 \pm 9,99$ mm pour les variétés les plus grandes (Devyatka, Kora, La Harpe, Panda et Smuga).

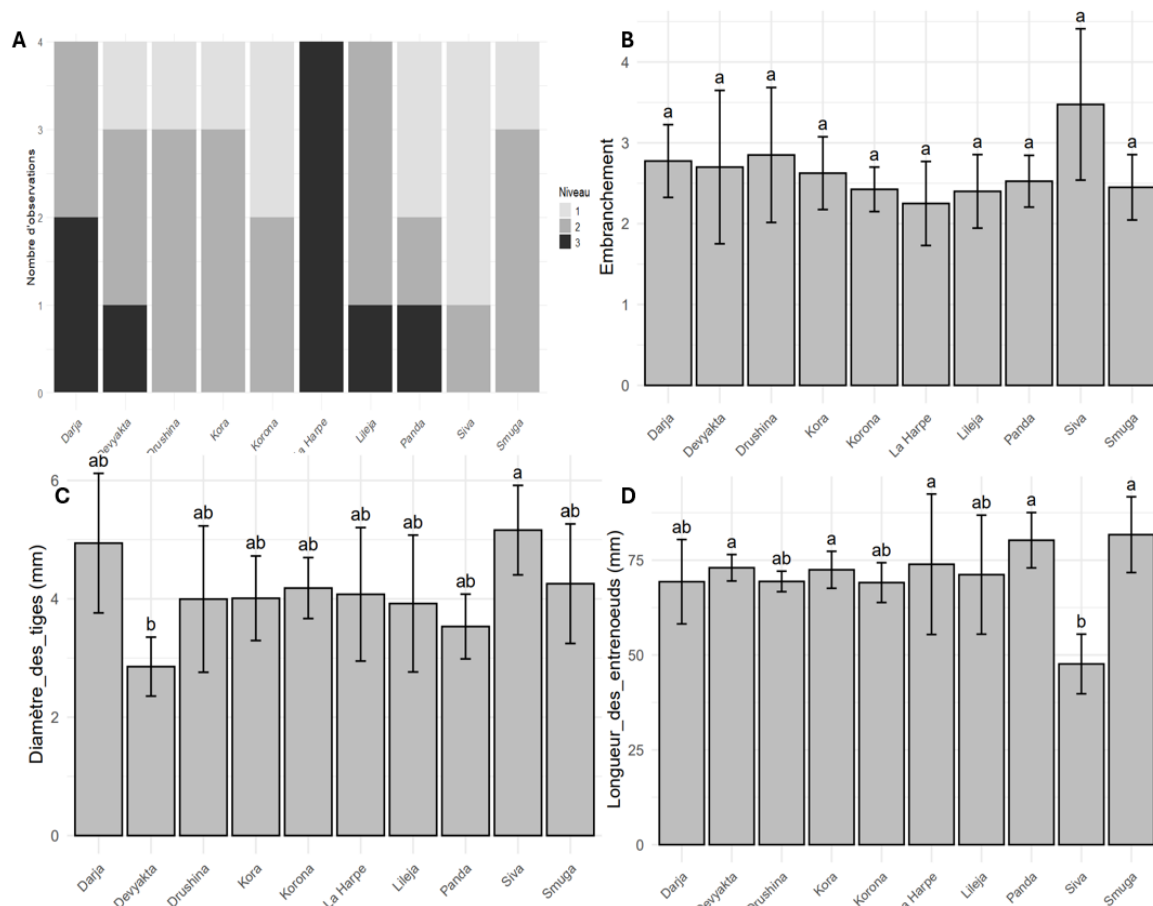


Figure 24 Caractéristiques morphologiques de tiges bien développées et verse par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) intensité de verse avec une observation générale par parcelle (1→3), (B) Nombre de ramification/branchement, (C) diamètres des tiges entre les 2 premiers nœuds, (D) longueur entre les 2 premiers entrenœuds. Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.

9.1.1.2.2 Paramètres reproductifs mesurés au champ

Le nombre de racèmes par plante à 25 % de croissance variait en fonction de la variété ($F = 2,479$, $p = 0,0299$, Figure 25A) entre $9,2 \pm 1,62$ chez Devyatka et $19,5 \pm 5,58$ chez Smuga, avec une moyenne de $16,0 \pm 3,81$ pour les autres variétés. La longueur des racèmes variait également selon les variétés ($F = 9,326$, $p = 1,37 \times 10^{-10}$, Figure 25B), avec $30,59 \pm 1,10$ mm pour Drushina en tête, contre une moyenne pour les variétés aux plus petits racèmes de $18,32 \pm 2,81$ mm (La Harpe et Kora). La densité des inflorescences présentait également des différences entre variétés (Figure 25C), avec Drushina la plus dense contre Darja et La Harpe avec les densités les plus faibles. Le taux d'avortement des fleurs variait aussi entre variétés ($\chi^2 = 212,64$, $p < 2,2 \times 10^{-16}$, $df = 18$, Figure 25D). La Harpe présentait la plus haute intensité d'avortement et Devyatka la plus faible.

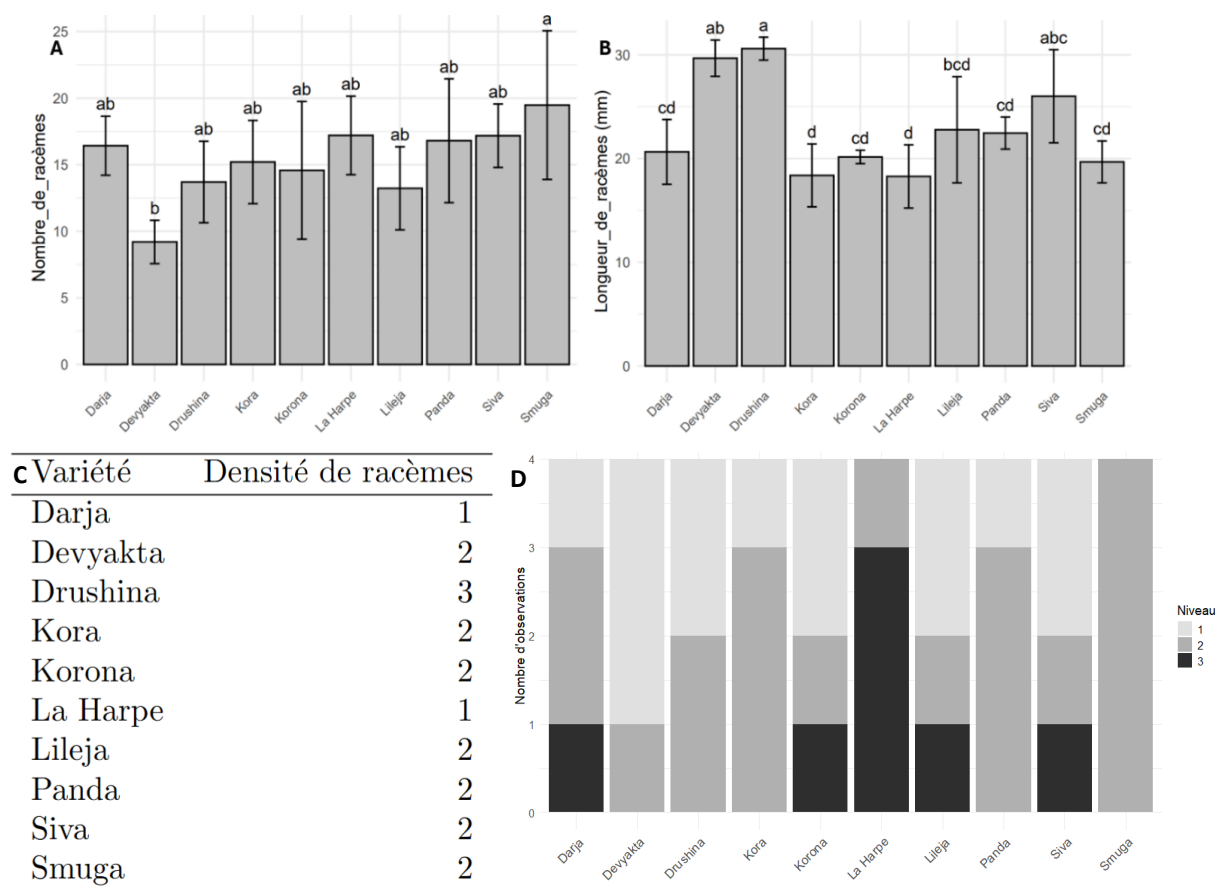


Figure 25 Caractéristiques des racèmes bien développés par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) nombre de racèmes par plante, (B) longueur d'un racème, (C) intensité de la densité de racème avec une observation par variété, (D) intensité du taux d'avortement des fleurs avec une observation par variété (1 → 3). Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.

9.1.1.2.3 Description morphologique de plantes échantillonnées à 75% de maturité

En plus du suivi morphologique réalisé au champ, cinq de plantes ont été récoltées par variété à 75% de maturité pour réaliser une description morphologique plus fine. Le Tableau 11 présente les comptages de nombre de feuilles et de racèmes sur la tige principale et sur les ramifications ainsi que les poids secs des différentes parties de plante. Le nombre de ramifications sur la tige principale variait d'environ 2 pour Smuga et Drushina à 4-5 pour Korona, Panda et Siva. Le nombre de feuilles sur la tige principale variait de $2,8 \pm 1,5$ pour Devyatka à $9,8 \pm 1,6$ pour Darja. Les autres variétés étaient relativement homogènes avec entre 4 et 7 feuilles sur la tige principale. Le maximum de feuilles sur les ramifications a été observé chez Siva ($12,8 \pm 9,3$) et le plus faible chez Devyatka ($4 \pm 3,1$). La variété présentant le plus d'inflorescences sur la tige principale était Siva ($13,4 \pm 3,4$) et celles en présentant le moins étaient Drushina et Devyatka avec respectivement seulement 5 ± 4 et $5,6 \pm 5,6$ inflorescences. Concernant le nombre d'inflorescences sur les ramifications, il variait entre 28,2 chez Korona et 5 chez Drushina.

Seul le nombre de feuilles sur la tige principale ($F = 4,79$, $p = 0,00024$) et le nœud de la première inflorescence ($F = 2,87$, $p = 0,0103$) respectaient les conditions de l'anova et se révèle différentes par variétés. Il a su être prouvé ($p < 0.05$) que Panda et Siva avaient des

nœuds de premières inflorescences plus basse que La Harpe et Darja. Il a également su être prouvé que Darja avait un plus grand nombre de feuille ($p < 0.05$) que Devyatka, Drushina, Korona, Lileja, Siva, Smuga. Le nombre d'inflorescence sur la tige principale ne respectaient pas les conditions de l'anova mais s'est révélée différentes par variétés par Kruskal-Wallis ($H = 36,37$, $p = 0,00003$). Pour les autres mesures, il n'a pas été possible de prouver de différence par variétés.

Sur base de ces observations, les variétés peuvent être séparées en plusieurs morphotypes. Le premier groupe reprend les variétés Siva, Korona, Panda qui ont un développement plus ramifié. A l'opposé, on retrouve les variétés Darja, La Harpe et Smuga chez qui la tige principale est la plus développée. Entre les deux viennent les variétés équilibrées avec un développement intermédiaire aux deux autres groupes précédents avec Kora, Lileja, Drushina et Devyatka. A noter que Drushina et particulièrement Devyatka ont été les variétés les moins développée autant végétativement que reproductivement par rapport aux autres variétés.

Tableau 11 Caractérisation morphologiques de 10 plantes par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve

	Siva	Lileja	La Harpe	Drushina	Devyatka	Darja	Smuga	Korona	Kora	Panda
Nombre de feuilles tige principale	4,6 ± 1,82	5,2 ± 2,17	7,2 ± 2,77	3,8 ± 1,30	2,8 ± 1,48	9,8 ± 1,64	4,2 ± 2,05	5,6 ± 1,95	6,2 ± 2,17	6,0 ± 2,35
Nombre de feuilles ramifications	12,8 ± 9,34	8,0 ± 7,18	8,8 ± 6,83	6,6 ± 6,77	4,0 ± 3,08	10,6 ± 10,78	7,2 ± 5,76	28,0 ± 32,03	10,6 ± 7,09	14,0 ± 12,23
Nombre inflorescences tige principale	4,8 ± 1,64	5,4 ± 1,67	8,8 ± 2,77	3,2 ± 1,30	3,8 ± 1,30	13,8 ± 2,59	10,8 ± 2,17	9,2 ± 4,44	9,0 ± 0,71	8,2 ± 2,59
Nombre inflorescences ramifications	13,4 ± 3,36	6,6 ± 5,18	10,4 ± 7,20	5,0 ± 4,00	5,6 ± 5,59	9,6 ± 13,76	11,4 ± 5,94	28,2 ± 39,81	9,8 ± 8,23	21,2 ± 23,70
Nombre de ramifications	4,4 ± 2,07	2,4 ± 1,67	2,4 ± 1,67	2,2 ± 1,30	2,8 ± 1,92	2,4 ± 1,67	2,0 ± 0,00	5,4 ± 5,98	3,0 ± 1,87	4,4 ± 4,93
Nœud de la première inflorescence	3,8 ± 0,45	4,8 ± 1,30	6,6 ± 1,52	4,8 ± 1,48	5,4 ± 0,55	6,8 ± 1,79	5,4 ± 0,55	5,2 ± 1,30	4,4 ± 1,82	4,0 ± 1,41
Poids sec feuilles (g)	0,4 ± 0,33	0,5 ± 0,25	0,3 ± 0,14	0,3 ± 0,29	0,4 ± 0,67	0,5 ± 0,33	0,2 ± 0,26	1,3 ± 1,69	0,6 ± 0,36	0,6 ± 0,52
Poids sec inflorescences (g)	2,0 ± 1,45	3,4 ± 1,83	1,3 ± 0,51	1,9 ± 1,25	2,6 ± 2,62	1,6 ± 0,86	2,3 ± 1,75	4,7 ± 5,96	2,0 ± 1,15	4,5 ± 4,94
Poids sec tiges (g)	4,6 ± 1,76	2,8 ± 1,72	2,3 ± 0,98	1,8 ± 1,11	1,9 ± 1,68	3,8 ± 2,78	2,6 ± 2,37	5,9 ± 6,63	3,1 ± 1,90	4,5 ± 3,51

9.1.1.3 Analyse des paramètres de rendements

9.1.1.3.1 Paramètres de rendements des variétés de Louvain-la-Neuve

Après la récolte, les paramètres suivants ont été mesurés : poids des grains par ha et par hectolitre, poids de 1000 grains (PMG) et humidité relative des grains. Le poids des grains par hectolitre ne présentait pas de différences entre variétés (Figure 26A) avec une valeur moyenne proche de 600 Kg/hL. L'humidité relative des grains était également similaire entre variétés (Figure 26B). En revanche, le rendement en grains par ha variait entre variétés ($F = 17,09$, $p = 3,68 \times 10^{-9}$, Figure 26C), permettant de séparer les variétés en quatre groupes. Le premier groupe est composé uniquement de Siva qui avait le rendement le plus faible avec seulement 608 ± 82 Kg/ha. Le deuxième groupe est composé de variétés à production relativement faible mais meilleure que Siva et comprend les variétés La Harpe et Lileja avec des rendements de respectivement 1242 ± 229 et 1560 ± 286 Kg /ha. Ensuite les variétés à bon rendement comme Darja, Devyatka, Kora, Korona, Smuga forment le 3^e groupe avec un rendement moyen de 1887 ± 209 kg/ha. Enfin, le 4^e groupe reprend les variétés les plus productives avec Drushina et Panda ayant un rendement respectivement de $2223,7 \pm 398$ et $2221,2 \pm 276$ kg/ha. Le rendement moyen de toutes les variétés était de 1729 ± 518 Kg/ha. Le PMG montre aussi des différences importantes ($F = 27,7$, $p = 3,68 \times 10^{-12}$, Figure 26D) entre variétés. Plusieurs groupes se distinguent : 1) la variété ayant produit les plus petites graines

(La Harpe, $18,67 \pm 2,57$ g), 2) celles produisant les plus grosses graines (Drushina, Lileja, $32,97 \pm 1,49$ g), 3) le reste des variétés ayant eu des PMG intermédiaires.

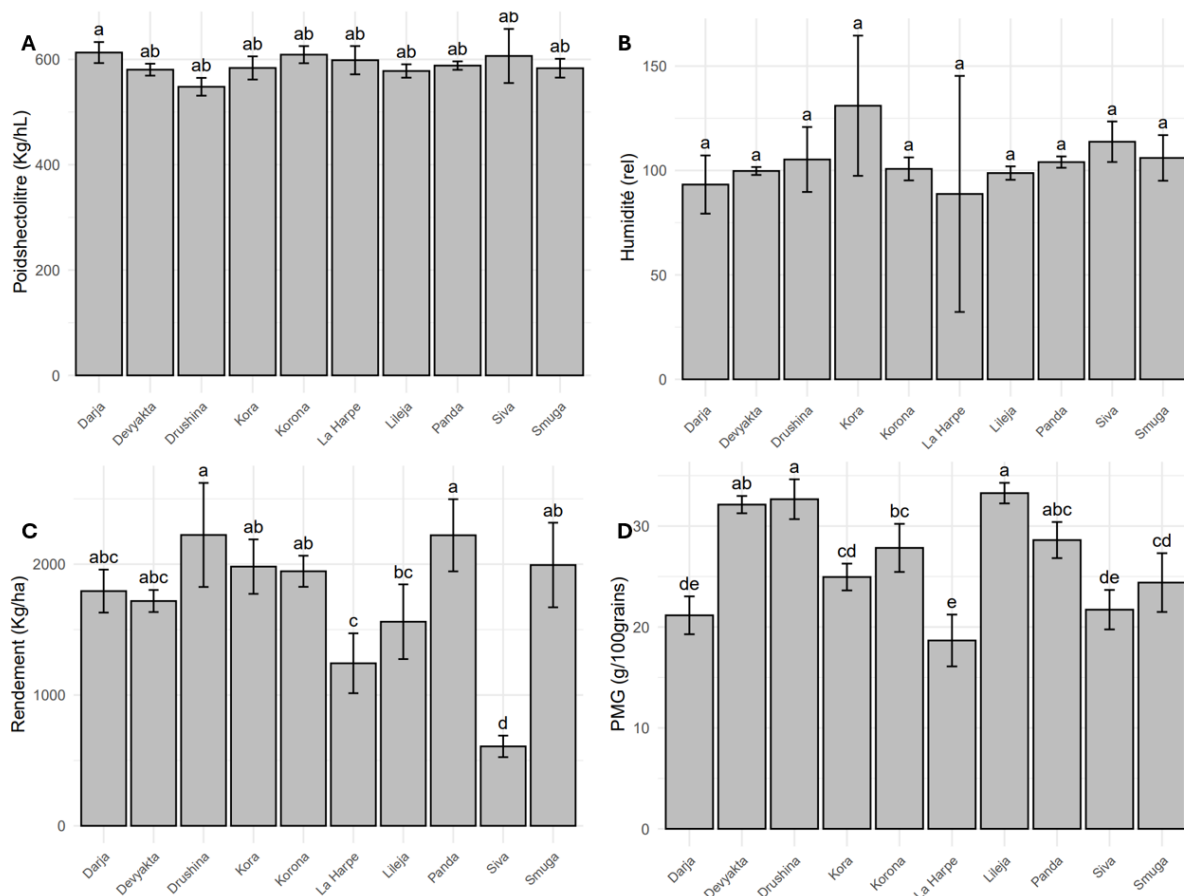


Figure 26 Paramètres agronomiques de rendements par variétés au champ sur le site de Louvain-la-Neuve avec (A) poids par hectolitre, (B) humidité relative, (C) rendement, (D) poids de milles grains. Les variétés partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% pour un même paramètre.

9.1.1.3.2 Analyse des paramètres de rendements des variétés de Louvain-la-Neuve par GLM

9.1.1.3.2.1 GLM restreint rendement

Afin de comprendre les paramètres expliquant le plus les différences de rendement, des modèles GLM ont été réalisés. À partir du modèle GLM comprenant tous les paramètres mesurés présenté en annexe (cfr 13.7.1), un modèle restreint a été élaboré en ne conservant que les variables les plus explicatives. Ont ainsi été retenus les paramètres variétés, nombre de feuilles, hauteur stade 7-8 (ici appelé hauteur2).

Les résultats de ce modèle restreint (Tableau 12) montrent que toutes les variétés sauf Lileja montrent des rendements significativement différents de la variété de référence Darja (prise arbitrairement), La Harpe et Siva produisant significativement moins que la référence, les autres variétés en produisant plus. Effectivement les variétés Drushina et Panda sont celles produisant le plus avec respectivement $+1110,9 \pm 297,1$ et $+897,1 \pm 228,0$ Kg/ha par rapport à Darja. Ces deux variétés et surtout Drushina sont donc particulièrement intéressante dans un objectif de maximisation de rendement. Le nombre de feuilles est une variable significative

dans ce modèle, avec une contribution moyenne estimée à $+26,9 \pm 14,2$ kg/ha par feuille supplémentaire. Enfin la hauteur au stade 7-8 s'est révélée importante et apporte $7,9 \pm 4,5$ Kg/ha par cm de hauteur supplémentaire. Ces deux caractères ne sont en revanche significatif qu'à un seuil de 10%.

Le R^2 ajusté du modèle atteint 83 %, soit une amélioration notable par rapport au modèle complet car le R^2 brut et ajusté se sont rapprochés malgré une légère chute des deux expliquée par le retrait de paramètres. Le test global F quant à lui est cette fois significatif ($F= 18,6$ $p = 4.8 \times 10^{-10}$), indiquant que ce modèle restreint permet d'expliquer une part significative de la variance du rendement. Les hypothèses du modèles GLM sont respectées et montrées en annexe (cfr 13.7.1).

Tableau 12 Résultats de la modélisation GLM du modèle restreint avec comme variable dépendante le rendement (A) et le tableau d'analyse de la variance de ce modèle (B)

RdtR	A	estimate	std.error	statistic	p.value	Signif.	Effet	B	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
(Intercept)		70.65	611.03	0.12	0.9088		—		—	—	—	—	—
VariétésDevyakta		622.70	290.01	2.15	0.0406	*	Variétés	9	8779923.16	975547.02	21.61	2.38e-10	
VariétésDrushina		1110.64	297.13	3.74	0.0008	***	—	—	—	—	—	—	—
VariétésKora		714.23	239.92	2.98	0.0059	**	—	—	—	—	—	—	—
VariétésKorona		691.73	240.63	2.87	0.0076	**	—	—	—	—	—	—	—
VariétésLa Harpe		-406.97	157.10	-2.59	0.0150	*	—	—	—	—	—	—	—
VariétésLileja		418.84	272.15	1.54	0.1350		—	—	—	—	—	—	—
VariétésPanda		897.11	227.95	3.94	0.0005	***	—	—	—	—	—	—	—
VariétésSiva		-787.06	235.72	-3.34	0.0024	**	—	—	—	—	—	—	—
VariétésSmuga		625.41	217.84	2.87	0.0077	**	—	—	—	—	—	—	—
Hauteur2		7.85	4.51	1.74	0.0930	.	Hauteur2	1	286116.89	286116.89	6.34	0.0178	
Nombre_de_feuilles		26.92	14.17	1.90	0.0678	.	Nombre_de_feuilles	1	162917.99	162917.99	3.61	0.0678	
—		—	—	—	—		Residuals	28	1263747.68	45133.85	—	—	—

9.1.1.3.2.2 GLM restreint PMG

Une analyse similaire a été fait pour expliquer les facteurs contribuant au PMG. À partir du modèle complet également présenté en annexe (cfr 13.7.2), un modèle restreint a été élaboré pour l'analyse du PMG, en ne conservant que les variables les plus pertinentes selon leur impact sur le modèle complet : les variétés, le diamètre des tiges, la longueur des limbes, le taux d'avortement des fleurs, la densité de racèmes et le nombre de racèmes.

Les résultats de ce modèle restreint, présentés dans le Tableau 13, mettent en évidence que le facteur « variété » reste de loin le plus explicatif du PMG. Les variétés Siva, La Harpe et Kora présentent un PMG comparable à celui de la variété de référence Darja, tandis que toutes les autres variétés affichent un PMG supérieur avec des niveaux de confiance de 0,01 % pour Drushina, 0,1 % pour Devyatka et Lileja, 1 % pour Panda, et 10 % pour Korona. Pour toutes ces variétés, le PMG est supérieur, confirmant ainsi l'importance du fond génétique dans la performance pondérale des grains.

Deux autres variables morphologiques se sont révélées également significatives et corrélées négativement au PMG : le nombre d'inflorescences observé lors de la première prise de données, et la taille des feuilles mesurée lors de la seconde prise. Autrement dit, une

augmentation de ces paramètres est associée à une diminution du PMG et doivent donc être minimiser lors de sélection. Attention qu'une réduction de ces caractères doit rester agronomiquement intéressant, peu importe les soutiens statistiques, une plante de sarrasin avec 0 ou trop peu d'inflorescences ne sera pas compétitive pour le rendement et le PMG.

Pour la solidité du modèle, les coefficients de détermination du modèle restreint sont très élevés et similaire à ceux du modèle complet : R^2 brut de 96,04 % et R^2 ajusté de 93,56 %, ce qui témoigne qu'une très grande partie de la variance est effectivement expliquée par le modèle, même après réduction du nombre de variables. Le test global du modèle est encore plus significatif qu'avec le modèle complet, avec une p-valeur atteignant $5,725 \times 10^{-15}$, confirmant l'intérêt et la pertinence de ce modèle.

Tableau 13 Résultats de la modélisation GLM du modèle restreint avec comme variable dépendante le PMG (A) et le tableau d'analyse de la variance de ce modèle (B)

PR	A	estimate	std.error	statistic	p.value	Signif.	Effet	B	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
(Intercept)		30.49	1.94	15.68	4.11e-14	***	—	—	—	—	—	—	—
VariétésDevyakta		7.92	1.72	4.61	0.0001	***	Variétés	9	965.23	107.25	60.09	2.81e-14	—
VariétésDrushina		10.06	0.99	10.13	3.82e-10	***	—	—	—	—	—	—	—
VariétésKora		2.51	1.93	1.30	0.2057		—	—	—	—	—	—	—
VariétésKorona		5.69	1.92	2.97	0.0067	**	—	—	—	—	—	—	—
VariétésLa Harpe		-1.20	1.18	-1.02	0.3186		—	—	—	—	—	—	—
VariétésLileja		10.87	1.93	5.64	8.29e-06	***	—	—	—	—	—	—	—
VariétésPanda		6.65	2.06	3.22	0.0036	**	—	—	—	—	—	—	—
VariétésSiva		0.67	1.86	0.36	0.7235		—	—	—	—	—	—	—
VariétésSmuga		3.69	2.05	1.80	0.0839	.	—	—	—	—	—	—	—
Diamètre_des_tiges		-0.12	0.44	-0.28	0.7824		Diamètre_des_tiges	1	41.73	41.73	23.38	6.32e-05	—
Longueur_de_limbes		-0.05	0.02	-2.04	0.0522	.	Longueur_de_limbes	1	16.35	16.35	9.16	0.0058	—
Taux_avortement_des_fleurs2		-0.21	0.58	-0.36	0.7204		Taux_avortement_des_fleurs	2	5.81	2.91	1.63	0.2172	—
Taux_avortement_des_fleurs3		-1.93	0.85	-2.28	0.0319	*	—	—	—	—	—	—	—
Densité_de_racèmes2		-0.04	1.60	-0.02	0.9827		Densité_de_racèmes	1	0.17	0.17	0.10	0.7579	—
Densité_de_racèmes3		—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
Nombre_de_racèmes		-0.27	0.12	-2.28	0.0320	*	Nombre_de_racèmes	1	9.26	9.26	5.19	0.0320	—
Residuals		—	—	—	—		—	24	42.84	1.78	—	—	—

9.1.1.3.3 ACP des paramètres de rendements des variétés de Louvain-la-Neuve

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée afin d'explorer les relations entre les variables mesurées et de visualiser d'éventuels regroupements entre les variétés. Les détails méthodologiques, ainsi que les choix de sélection des variables, sont présentés en annexe (cfr 13.8).

Le cercle des corrélations de l'ACP est présenté graphiquement dans la Figure 28. Seules les deux premières dimensions y sont représentées car celle-ci contiennent 49,5% de la variance total comme détaillé en annexe (cfr 13.8). Le PMG a un impact très faiblement négatif sur la dimension 2, mais un impact fortement négatif sur la dimension 1. Toujours pour la dimension 1, la hauteur des plantes à 75 % de maturité (ici appelé Hauteur2) et le nombre de feuille est fortement associée positivement à cette dimension. La deuxième dimension quant à elle est dominée négativement par la longueur des entrenœuds, le rendement et dans une moindre mesure l'humidité relative. En revanche elle est positivement modérément influencée par le poids par hectolitre et la longueur de pétiole. De manière générale les flèche en direction de

la deuxième dimension sont moins grande indiquant un moins bon lien entre les variables mesurées et les nouvelles dimensions. Ceci est logique au vu de la répartition de la variance expliquée entre les dimensions disponibles en annexe.

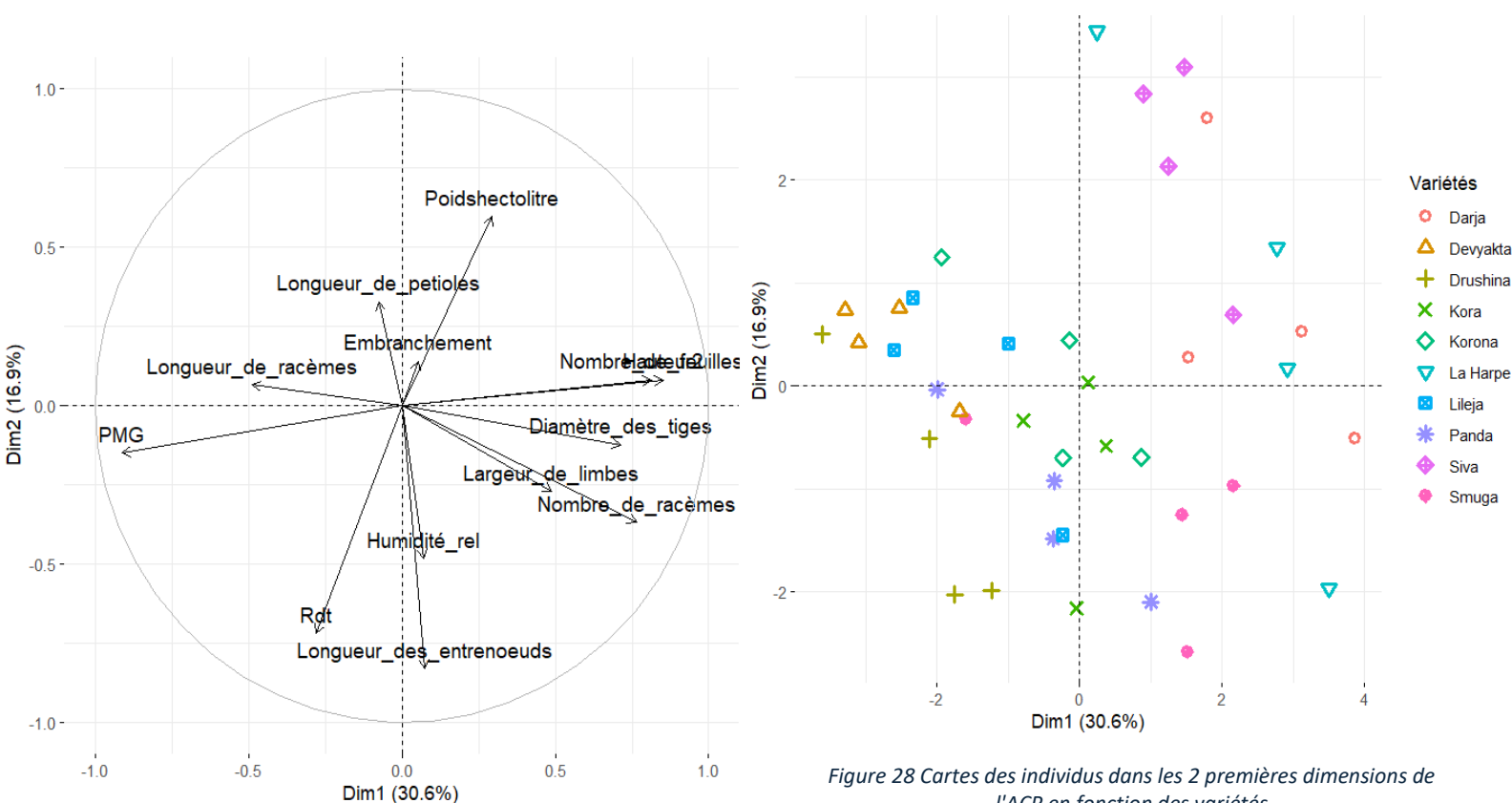


Figure 28 Cercle des corrélations pour les 2 premières dimensions de l'ACP avec représentation des variables continues pour le site d'essai de LLN

La position des variables dans ce cercle permet également d'observer leurs relations : le PMG et la hauteur (ou le nombre de feuille) apparaissent presque en opposition parfaite (180°), traduisant une corrélation négative forte dans ces dimensions. Une valeur élevée de PMG induit donc des plantes de petites tailles dans ces dimensions. À l'inverse, l'humidité des grains, le rendement et la longueur des entrenœuds ou le duo hauteur à 75% de maturité et nombre de feuilles, sont positivement fortement corrélés. Certains liens ont des logiques biologiques parfois facilement compréhensibles comme la hauteur et le nombre de feuilles. Une grande hauteur indique un développement végétatif important allant de pair avec un développement de feuilles et inversement. Deux variables formant un angle proche de 90°, comme la longueur des entrenœuds et le PMG n'ont pas d'impact les uns sur les autres dans ces dimensions. Le rendement et le PMG sont corrélés positivement entre eux. Le fait que ces deux paramètres soient liés (même faiblement) positivement entre eux pour nos données est appréciable car ce sont les paramètres agronomiques de rendement et donc les plus importants. La maximisation de l'un tend à augmenter l'autre dans ces dimensions. Néanmoins des liens mis en avant par les modèles GLM comme entre le PMG et le nombre de racèmes ou entre le rendement et la hauteur (ou nombre de feuille) ne sont pas mis en évidence dans ces dimensions de l'ACP.

La carte des individus, visible en Figure 28, permet de visualiser les caractéristiques des individus mesurés dans l'espace défini par les deux premières dimensions. Certains regroupements visuels émergent : les variétés La Harpe, Darja et dans une moindre mesure Siva forment un îlot positionné à droite du graphique, tandis que Drushina, Devyatka et Lileja apparaissent proches l'une de l'autre sur la gauche. Au centre se regroupent toutes les autres variétés. La première dimension permet bien de différencier ces 3 regroupements. Celle-ci étant expliquée principalement par le PMG, la longueur et le nombre de racèmes, la hauteur des plantes, le nombre de feuilles et le diamètre des tiges, ces caractéristiques sont donc bel et bien différentes entre les groupes et similaires au sein des groupes. Chacun de ces paramètres a effectivement au moins une différence entre variétés prouvée comme vu dans les barcharts (9.1.1.2 et 9.1.1.3). La dimension 2 permet une différenciation visuelle au sein même des groupes. Par exemple, Devyatka et Drushina se distinguent le long de la dimension 2 qui est principalement expliquée par les paramètres comme le rendement, la longueur des entrenœuds et l'humidité relative des graines, suggérant des différences pour ces paramètres entre ces deux variétés. Seul le paramètre d'embranchement tenant compte du nombre de ramification n'a que très peu d'impact dans les dimensions créées. Globalement la position des variétés sur les dimensions est logique au vu des barcharts (9.1.1.2 et 9.1.1.3).

En revanche les regroupements n'ont pas pu être prouvés par des ellipses statistiques dans l'ACP ni par de plus fins clusterings détaillés en annexe (cfr 13.9.1.1 et 13.9.1.2). A nouveau, certaines variétés se séparent relativement bien du reste mais aucune distinction claire et évidente n'est possible.

9.1.2 Comparaison variétale à Gembloux

Sept variétés ont été cultivées sur le site de Gembloux avec 4 parcelles par variété. Les 4 parcelles ont été suivies pour les stades de développement mais seule une parcelle par variété a été suivie pour les comparaisons morphologiques ne permettant pas une comparaison variétale aussi complète qu'à LLN. Le suivi réalisé à Gembloux avait surtout pour objectif de permettre une comparaison entre sites et non une comparaison entre variétés. Les résultats obtenus à Gembloux sont tout de même brièvement présentés pour les différentes variétés avant de réaliser la comparaison entre sites.

9.1.2.1 Développement général et cycle de vie

Pour l'essai de Gembloux, les stades de développement ont également été mesurés en fonction des °C/J (Figure 29). Une hétérogénéité a été observée concernant le nombre de degrés jours mis pour atteindre le stade de maturité qui variait entre 846 et 1239°C/J selon les variétés. En raison d'une date de récolte non optimale, les variétés La Harpe et Spacinka, n'ont pas pu atteindre le stade final de développement et ont été récoltées au stade 7. Les variétés à durée de culture intermédiaires ayant atteint le stade final étaient Aiva, Smuga et Kora, stade qu'elles ont respectivement atteint après 1239, 1234 et 1153 °C/J. Enfin Lileja et Lifago étaient les variétés les plus précoces et ont atteint le stade de maturité après

respectivement 846 et 902 °C/J. En début de culture, toutes les variétés ont atteint les stades 1 et 2 en un même nombre de degré jour. En revanche, le nombre de degré jours mis pour atteindre les autres stades de développement différait entre variétés. Par exemple, le début de floraison (stade 3) a été atteint après 321 °C/J pour les variétés Aiva, Kora et Lileja tandis que Spacinka et La Harpe ont mis respectivement 342 et 405 °C/J pour atteindre ce stade.

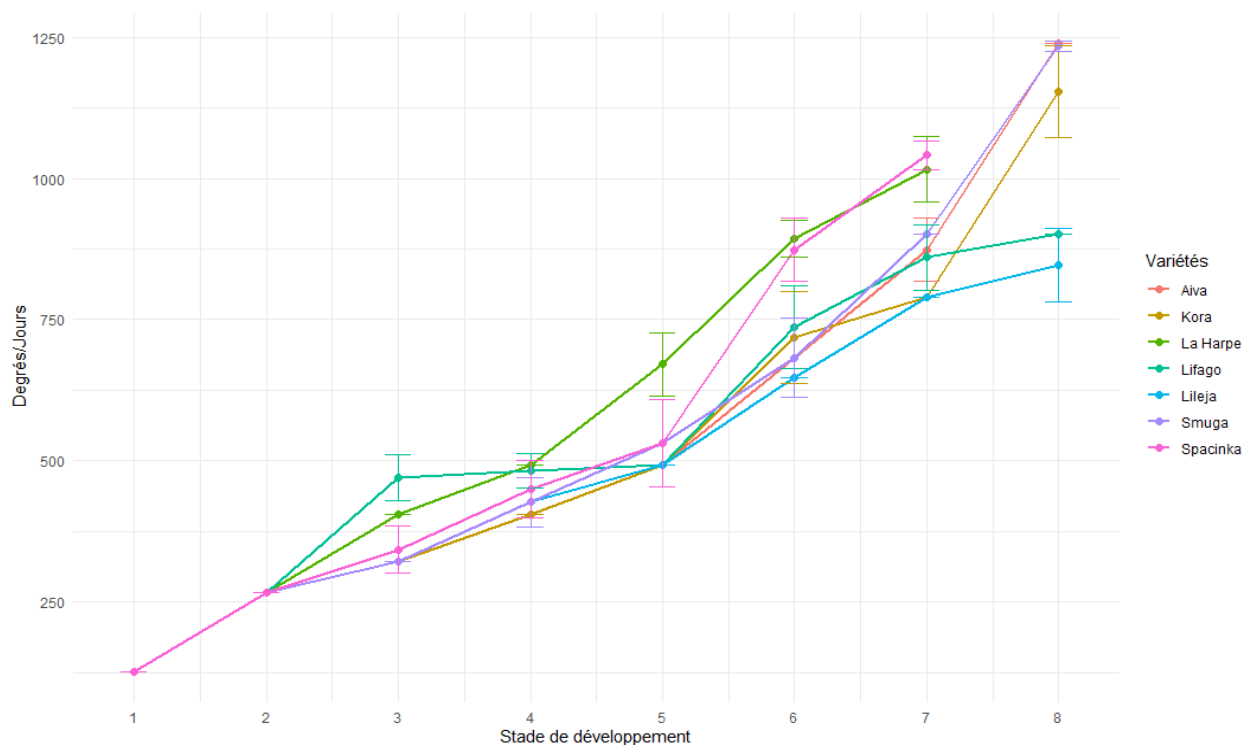


Figure 29 Évolution du nombre de degrés jours nécessaires pour atteindre les différents stades de développement phénologiques du sarrasin en fonction des variétés pour le site de Gembloux.

9.1.2.2 Paramètres morphologiques des variétés de Gembloux

9.1.2.2.1 Paramètres végétatifs

Pour rappel, les tests statistiques ont été réalisés sur les répétitions de mesures sur une parcelle par variétés pour les données morphologiques de Gembloux. La hauteur des plantes au stade 7-8 n'était pas égale entre les variétés ($F = 38,8$, $p = < 2 \times 10^{-16}$; Figure 30A) sur le site de Gembloux. Les plus grandes hauteurs ont été observées chez La Harpe et Spacinka, avec respectivement 124 ± 17 cm et 110 ± 8 cm, tandis que la variété la plus courte (Lileja) restait autour de 60 ± 4 cm. Une tendance similaire était visible à 25 % de croissance ($H = 49,9$, $p = 5,02 \times 10^{-9}$; Figure 30B), avec également Spacinka et La Harpe en tête (plus de 110 ± 14 cm), et Lileja toujours nettement plus basses avec 68 ± 8 cm. Smuga apparaissait plus grande lors de la première prise de mesure que la seconde. Ceci est dû à un biais d'échantillonnage, seules 10 plantes testées par variété ne suffisent pas à obtenir une moyenne assez fiable.

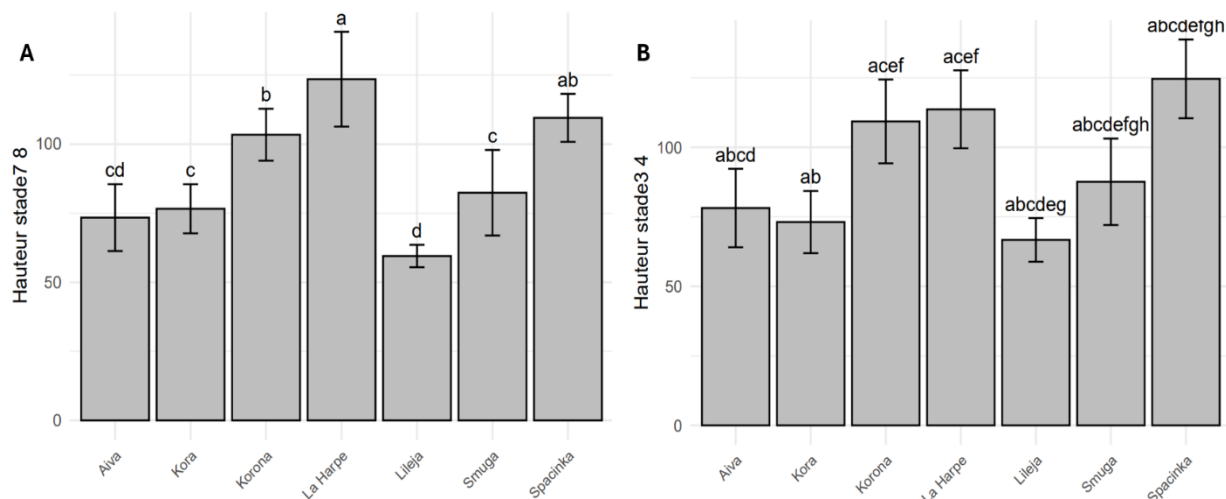


Figure 30 Taille des plantes par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) aux stades 7-8 (B) aux stades 3-4.

Le nombre de feuilles lors de la première prise de données variait également entre les variétés ($H = 36,9$, $p = 1,85 \times 10^{-6}$; Figure 32A). La Harpe se distinguait nettement avec $40,3 \pm 16,7$ feuilles en moyenne, tandis que Lileja, Kora et Smuga en présentaient respectivement $12,9 \pm 8,3$, $22 \pm 3,6$ et $17,8 \pm 3,9$. La longueur et la largeur des limbes sont également différentes en fonction des variétés avec La Harpe étant toujours avec les plus grandes feuilles avec respectivement $70,1 \pm 7,8$ et $63,7 \pm 10,5$ mm de longueur et largeur ($F = 5,82$, $p = 7,17 \times 10^{-5}$; $F = 11,2$, $p = 1,82 \times 10^{-8}$; Figure 32B, C). Les autres variétés avaient des valeurs proches pour ces paramètres, autour de 50 à 70 mm pour la longueur des limbes, 40 à 60 mm pour leur largeur. Concernant la longueur des pétioles, ils étaient deux fois plus courts chez Aiva et Smuga que chez les autres variétés et variait entre variétés ($H = 25,6$, $p = 0,00027$; Figure 32D).

Les différences d'intensité de verse étaient perceptibles selon les variétés (Figure 31A). La Harpe et Spacinka présentait une sensibilité raisonnable mais tout de même plus marquée que les autres variétés. Concernant le nombre de tiges secondaires, les différences étaient peu marquées entre variétés avec une moyenne générale de $3,1 \pm 1,44$ sauf chez Kora qui avait $2 \pm 0,8$ tiges secondaires ($H = 13,4$, $p = 0,037$; Figure 31B). Concernant le diamètre des tiges, les plantes de La Harpe et Smuga avaient des tiges plus épaisses (de respectivement $6,7 \pm 1,3$ et $6,4 \pm 1,3$ mm de diamètre) que celles de Aiva qui présentaient les tiges les plus fines de $4,3 \pm 0,8$ cm de diamètre ($F = 5,438$, $p = 0,00014$; Figure 31C). Lileja avait la plus grande longueur entre ses 2 premiers entrenœuds avec une moyenne de $54,1 \pm 20$ mm tandis Korona avait la plus faible, de $27,1 \pm 10,3$ mm ($F = 5,65$, $p = 9,55 \times 10^{-5}$; Figure 31D).

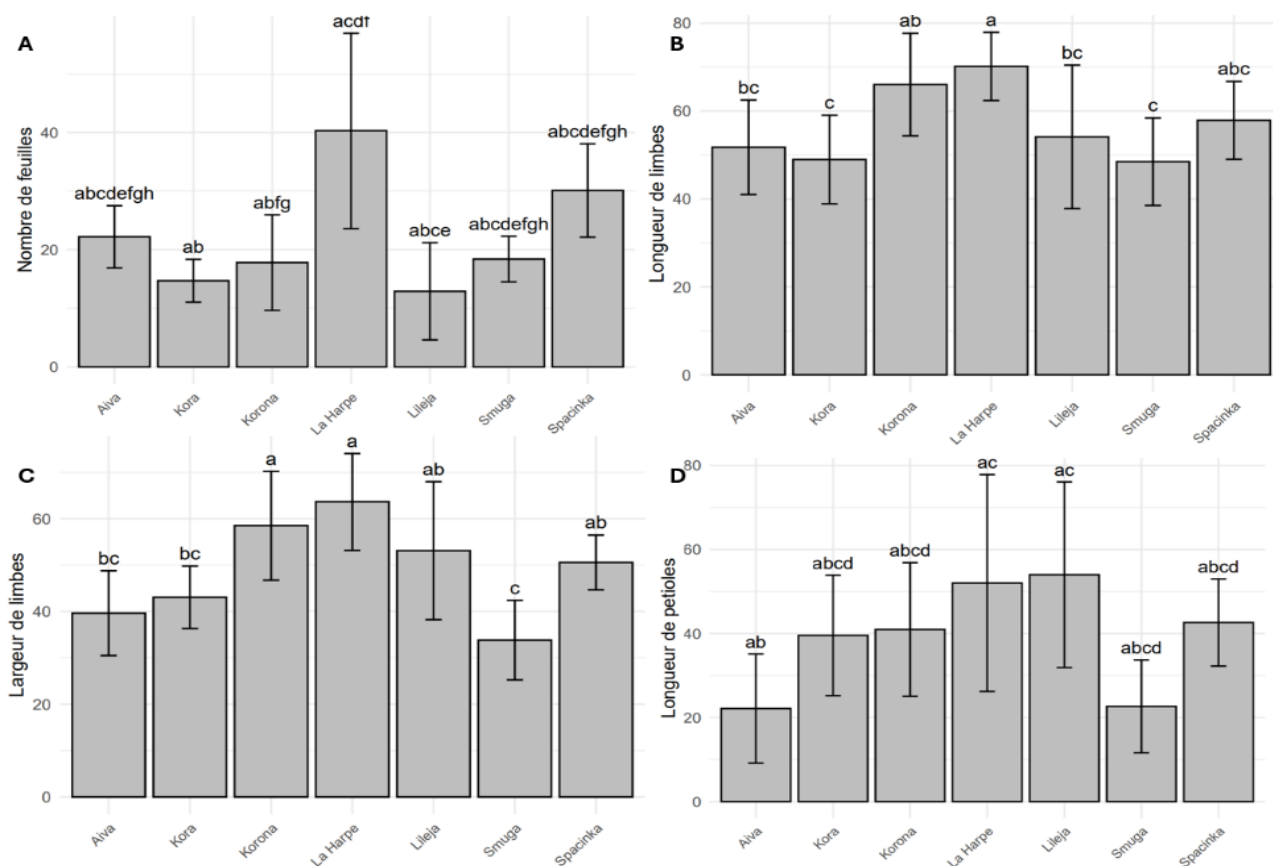


Figure 32 Caractéristiques morphologiques de feuilles bien développées par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) nombre de feuilles par plante, (B) longueur (C) et largeur de limbes, (D) longueur de pétioles.

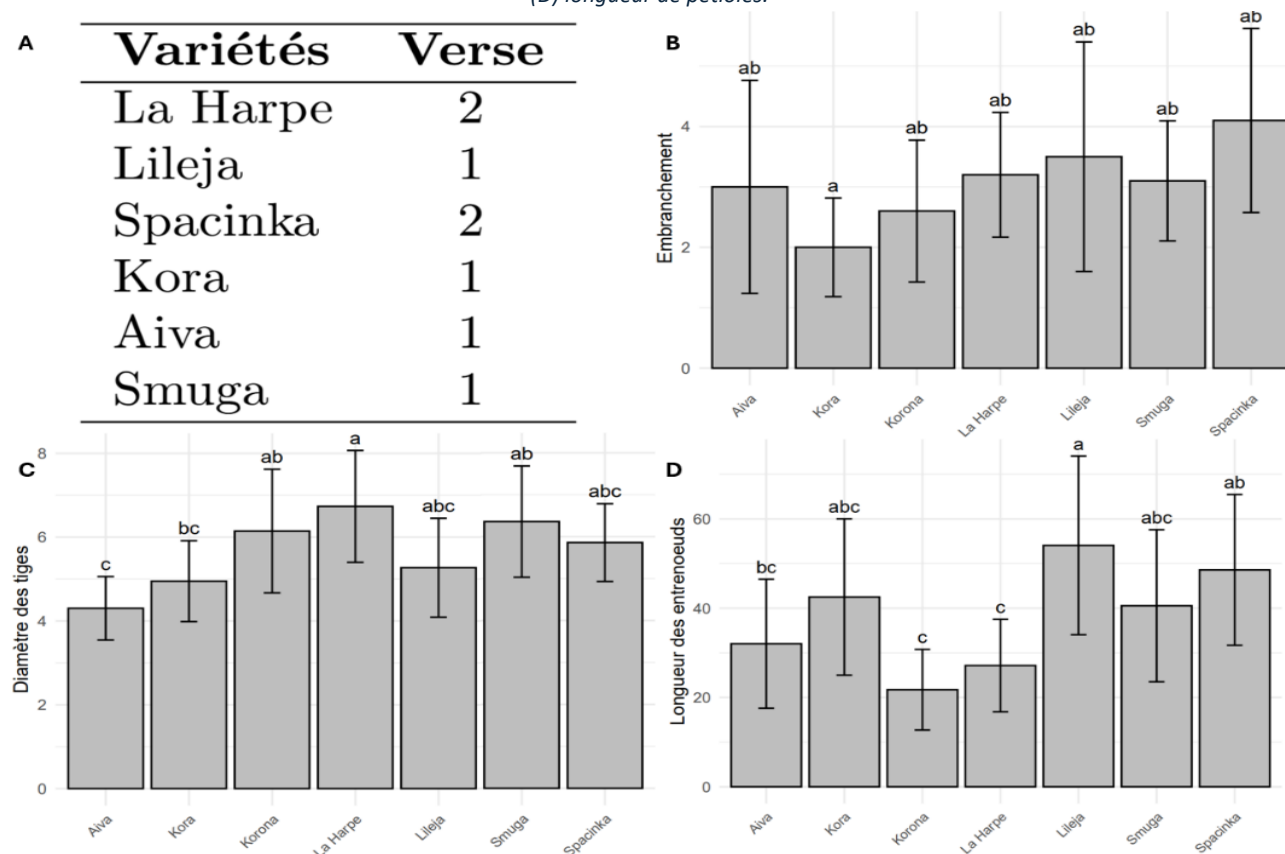


Figure 31 Caractéristiques morphologiques de tiges bien développées et verse par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) intensité de verse (1 → 3), (B) Nombre de ramification/branchement, (C) diamètres des tiges et (D) longueur entre les 2 premiers nœuds.

9.1.2.2.2 Paramètres reproductifs

Le nombre de racèmes par plante variait entre $43,1 \pm 7,7$ chez La Harpe et $12,4 \pm 3,5$ et $13,8 \pm 5,5$ chez Lileja et Kora ($H= 39,0$, $p = 6,88 \times 10^{-7}$; Figure 33A) ; le nombre de racèmes chez les autres variétés ne dépassait pas 30. La longueur des racèmes était presque similaire entre variétés, de l'ordre de 20 - 25 mm ($H= 13,9$, $p = 0,03$; Figure 33B). La densité de racèmes, mesurée sur une échelle de 1 à 3, montrait également des différences entre variétés (Figure 33C), avec Spacinka, La Harpe et Smuga présentant une densité plus importante que les autres variétés. Concernant l'avortement des fleurs, Seul Smuga s'est révélée avoir un taux d'avortement élevé à l'inverse de La Harpe et Lileja. Les autres variétés étaient d'un niveau intermédiaire (Figure 33C).

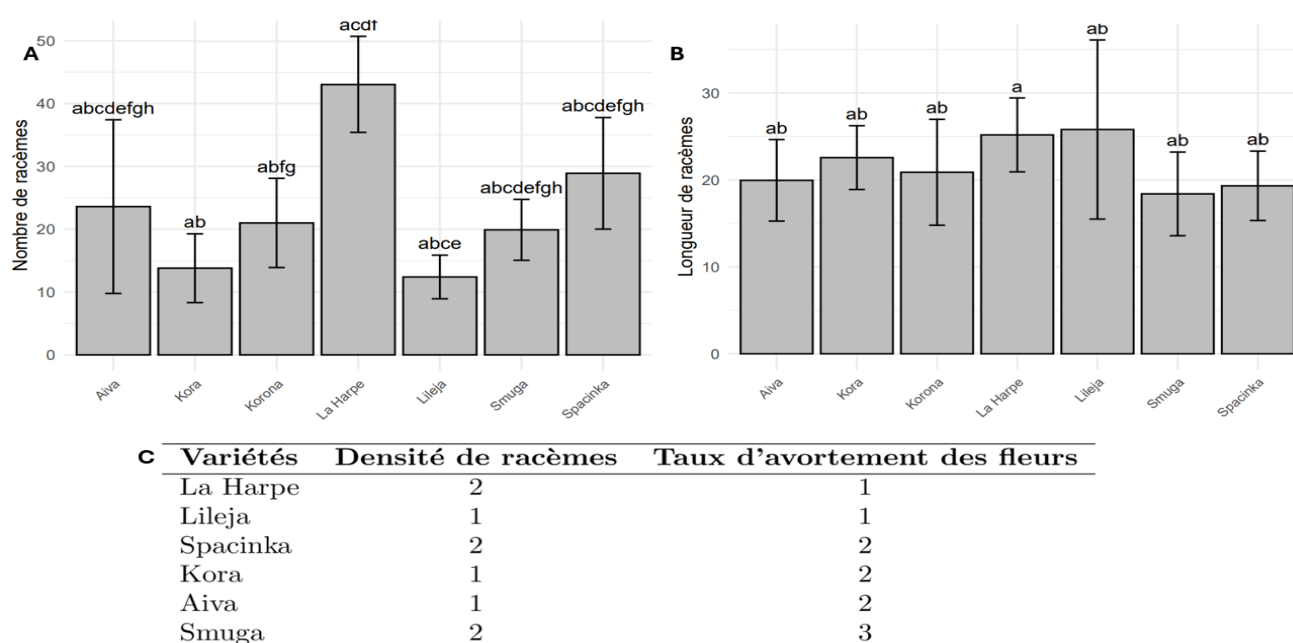


Figure 33 Caractéristiques reproductives de racèmes bien développés par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) nombre de racèmes par plante, (B) longueur de racèmes, (C) intensité de la densité de racème par plante et intensité du taux d'avortement des fleurs (1 → 3).

9.1.2.3 Analyse des paramètres de rendements des variétés de Gembloux

9.1.2.3.1 Paramètres de rendements des variétés de Gembloux

Le poids de grains par hectolitre présentait des différences entre variétés avec une moyenne générale de $614 \pm 44,3$ Kg/hL ($F= 12,7$, $p = 2,28 \times 10^{-5}$; Figure 34A). L'humidité relative des grains présentait également des différences entre les variétés ($F= 3,77$, $p = 0,016$; Figure 34B). Le rendement total variait faiblement entre les variétés ($F= 2,62$, $p = 0,06$; Figure 34C). Le meilleur rendement a été obtenu chez Smuga avec 2090 ± 642 Kg/ha et le plus bas chez Lileja avec seulement 1098 ± 221 Kg/ha. Toutes les autres variétés ont produit entre 1600 et 1900 Kg de grains/ha avec une moyenne générale de 1751 ± 490 Kg/ha. Le PMG était majoritairement stable entre variétés (Figure 34D) avec des valeurs allant de 22,6 g chez La Harpe à 32,6 g chez Lileja, toutes les autres variétés avaient un PMG entre 27 et 28 g.

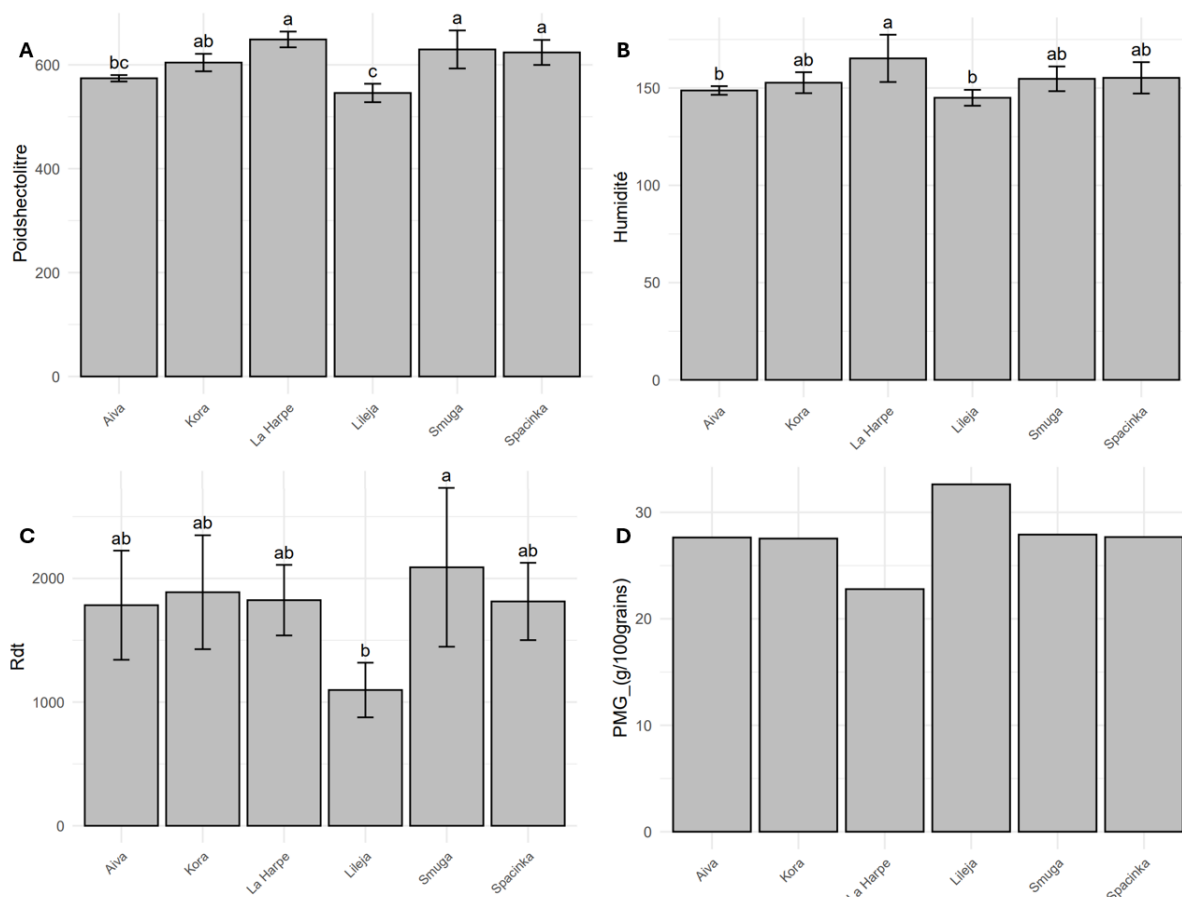


Figure 34 Paramètres agronomiques de rendements par variétés au champ sur le site de Gembloux avec (A) poids par hectolitre, (B) humidité relative, (C) rendement, (D) poids de milles grains.

9.1.3 Comparaison entre sites pour les variétés communes

9.1.3.1 Récapitulatif des paramètres importants

Les paramètres agronomiques les plus importants sont résumés par site et variété dans le Tableau 14. Les rendements et PMG n'ont pas pu être prouvés différents (à un seuil de 5%) entre les sites en comparant les variétés communes uniquement (RDT : $F = 0,023$, $p = 0,88$; PMG : $F = 4,1$, $p = 0,0655$). Seul Lileja présentait une différence notable de rendement de 460 Kg/ha entre site. La Harpe avait un meilleur rendement à Gembloux qu'à LLN avec une différence de 368 Kg/ha. La différence de rendement entre les deux sites était inférieure 100 Kg/ha pour Kora et Smuga. Pour une meilleure comparaison, les rendements ont été divisé par le nombre de °C/J nécessaires pour atteindre le stade de maturité maximal sauf pour La Harpe de Gembloux qui ne l'avait pas atteint. Pour celle-ci le stade précédent a été utilisé indiquant le résultat maximum théorique. Le résultat exprimé en Kg.J/(ha.°C) tient compte du temps nécessaire à la culture et de la température moyenne journalière pour atteindre la maturité. Smuga (LLN : 1,648 Kg.J/(ha.°C) ; GBX : 2,073 Kg.J/(ha.°C)) s'est révélée la variété la plus efficace par °C/J suivie de près par Kora (LLN : 1,669 Kg.J/(ha.°C) ; GBX : 1,799 Kg.J/(ha.°C)). Les autres variétés étaient moins efficaces et présentaient des valeurs entre 1 et 1,289 Kg.J/(ha.°C) (avec un maximum théorique pour La Harpe à Gembloux à 1,585 Kg.J/(ha.°C)).

D'autres variétés non présentes sur les deux sites se sont également démarquées comme Devyatka, Drushina, Panda et Spacinka avec au minimum 1,750 Kg/(ha.°C/J).

Pour le PMG, une légère différence entre sites a été observée ($p = 0,0655$). La Harpe qui avait en moyenne un PMG plus léger de 4g à LLN qu'à GBX. La différence de PMG entre LLN et GBX était de 3,3 g pour Smuga avec des graines plus lourdes sur GBX. Le PMG des deux autres variétés était plus stable avec une différence maximale de 2,5 g entre sites.

Finalement la verse a été plus intense à LLN qu'à Gembloux pour les mêmes variétés ($X^2 = 6,88$, $p = 0,032$). Tout de même La Harpe reste la plus sensible, Lileja a été seulement sensible à LLN, les deux dernières n'ont été que peu impactées par la verse.

Tableau 14 Récapitulatif des paramètres agronomiques importants des variétés communes aux deux sites d'essais étudiés (Louvain-la-Neuve, Gembloux).

Site	Variétés	Rdt±SD (kg/ha)	Kg/(ha.°C/J)	PMG±SD (g)	Verse	°C/J stade 7	°C/J stade 8
LLN	La Harpe	1242,7 ± 228,8	1,003	18,7 ± 2,6	3	1095,9	1238,6
LLN	Kora	1981,5 ± 208,2	1,669	25,0 ± 1,3	1,75	885,8	1164,6
LLN	Lileja	1560,3 ± 285,5	1,289	33,3 ± 1,0	2,75	793,6	914,8
LLN	Smuga	1993,8 ± 323,2	1,648	24,4 ± 2,9	1,75	885,8	1210
GBX	La Harpe	1611,0 ± 285,3	<1,585	22,6	2	1016,3	—
GBX	Kora	1889,0 ± 460,7	1,799	27,5	1	789,4	1153,8
GBX	Lileja	1098,0 ± 221,0	1,233	32,6	1	789,4	845,8
GBX	Smuga	2090,0 ± 642,2	2,073	27,9	1	902,1	1234,5

*Les Kg/(ha.°C/J) sont le rendement (Kg/ha) divisé par le nombre de jour nécessaire pour atteindre le stade de récolte du sarrasin. Il permet donc une mesure de rendement en ne pénalisant pas les variétés précoces.

9.1.3.2 ACM communes aux résultats des sites

Une Analyse en Composantes multiples (ACM) a été réalisée afin d'explorer les relations entre les variables mesurées et de visualiser d'éventuels regroupements entre les variétés et sites. Des détails et compléments d'informations sont présentés en annexe (cfr 13.10).

Le cercle des corrélations de l'ACM est présenté graphiquement dans la Figure 35. Seules les deux premières dimensions y sont représentées car celles-ci expliquent 44,1% de la variance totale comme détaillé en annexe (cfr 13.10).

La première dimension est principalement expliquée positivement par la hauteur des plantes, la longueur des pétioles et la largeur des limbes ainsi que négativement pas le PMG et le rendement. Au niveau de la deuxième dimension, tous les autres paramètres y ont une contribution positive notable avec les plus importants étant le diamètre des tiges et le nombre de racèmes. Seule la longueur des entrenœuds a une influence négative importante sur la deuxième dimension.

La position des variables dans ce cercle permet également d'observer leurs relations : le PMG et le rendement sont ici positivement fortement liés. Ceux si sont négativement fortement liés avec la hauteur, la longueur de pétioles et la largeur des limbes. Les paramètres influençant fort la première dimension se retrouvent presque tous à un angle proche de

90° avec les paramètres influant la deuxième dimension indiquant une relative indépendance de ces paramètres dans ces dimensions. Le lien positif entre rendement et PMG est à nouveau encourageant pour la sélection, l'augmentation d'un des critères augmentera l'autre dans ces dimensions. A l'inverse de l'ACP précédente, le nombre de feuilles et la hauteur semblent moins liés. Certains liens mis en avant par les modèles GLM comme celui entre le PMG et le nombre de racèmes ou entre le rendement et la hauteur (ou nombre de feuille) n'ont pas été observés dans ces dimensions sur l'ACM.

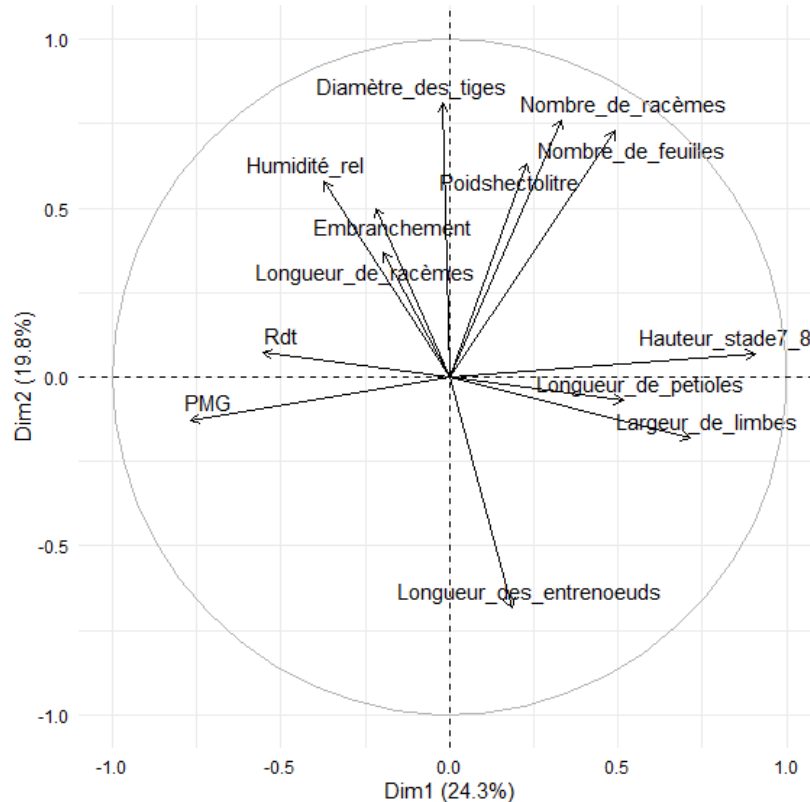


Figure 35 (A) Cercle des corrélations des variables continues (B) représentation des variables catégorielles dans les 2 premières dimensions de l'ACM rassemblant les deux sites d'essais (Louvain-la-Neuve, Gembloux).

Les cartes des individus sont visibles en Figure 36A pour les sites et Figure 39B pour les variétés. En plus de visualiser les individus mesurés, elles rajoutent les niveaux des variables catégorielles. Les ellipses visibles ont été rajoutées manuellement, les vraies ellipses statistiques sont disponibles en annexe (cfr 13.10).

Concernant les sites, deux regroupements sont visibles avec vers le haut du graphe les données de Gembloux et dans le bas du graphe les données de LLN (Figure 39A). La dimension 2 est donc la plus efficace pour discriminer les sites, ceux-ci comportent donc des différences dans les caractères expliquant cette dimension comme le diamètre des tiges ou la longueur des 2 premiers entrenœuds.

Concernant les variétés, une première séparation est visible le long de la première dimension entre La Harpe et les autres variétés. Indiquant que ces variétés possèdent des

caractéristiques différentes en termes par exemple de hauteur ou de paramètres de rendements (PMG, rendement) dominant cette dimension. Les autres variétés n'étaient pas distinguables dans ces dimensions.

Les paramètres de la dimension 2 semblent donc bien pertinents pour une comparaison de sites avec les mêmes variétés. Les paramètres de la dimension 1 semblent aider à discriminer certaines variétés (ici La Harpe) mais ne sont pas suffisants pour toutes.

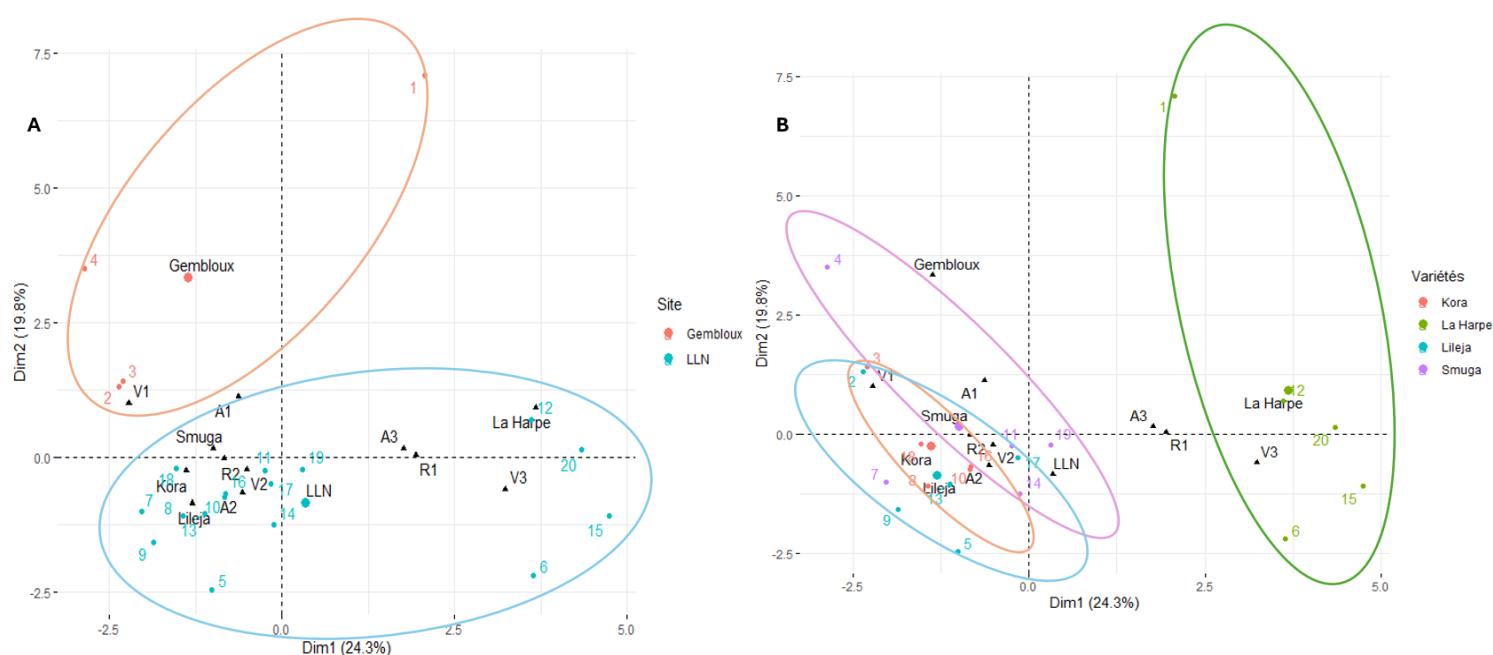


Figure 36 Cartes des individus dans les 2 premières dimensions de l'ACP en fonction des variétés avec (A) ellipses manuelles en fonction des sites, (B) ellipses manuelles en fonction des variétés pour l'ACM rassemblant les deux sites d'essais (Louvain-la-Neuve, Gembloux).

9.1.3.3 Analyse par ANOVA 2 de l'effet site et variété

Pour rappel seules les variétés communes aux deux sites, à savoir La Harpe, Lileja, Kora et Smuga, ont été prises en compte. Pour chaque variable, un test ANOVA 2 est disponible dans le Tableau 15.

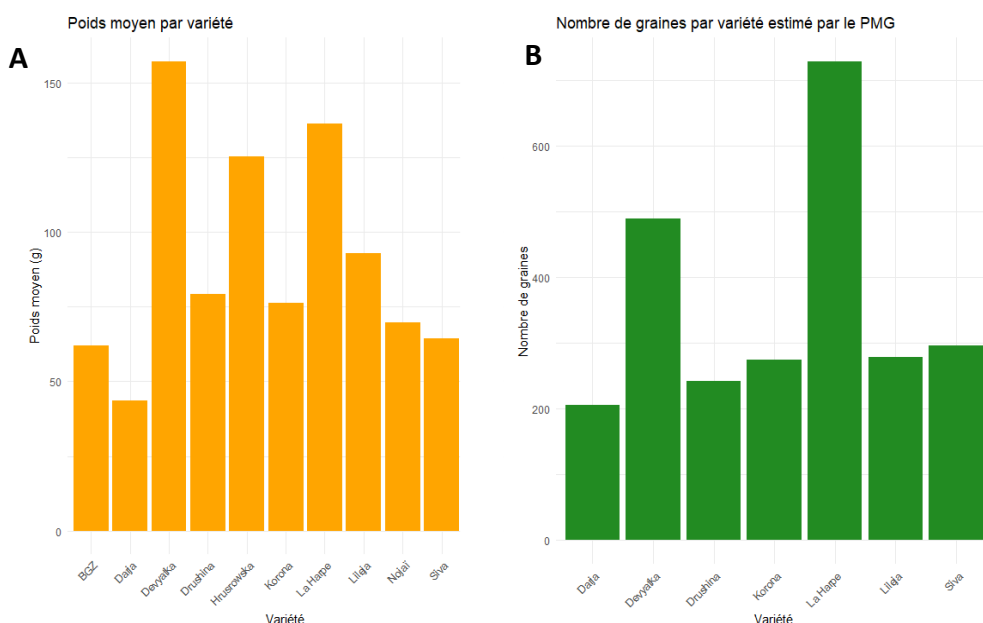
Tableau 15 Résultats des test ANOVA 2 pour chacune des variables mesurées continues

Variable	Site <i>p</i>	Signif.	Variétés <i>p</i>	Signif.	Interaction <i>p</i>	Signif.
Hauteur_stade7_8	0.004	**	1.59e-05	***	0.581	
Embranchement	0.066	.	0.925		0.125	
Diamètre_des_tiges	0.009	**	0.806		0.719	
Longueur_des_entrenoeds	0.001	***	0.746		0.531	
Longueur_de_petioles	0.391		0.004	**	0.144	
Longueur_de_limbes	0.023	*	0.272		0.854	
Largeur_de_limbes	0.038	*	0.125		0.372	
Longueur_de_racèmes	0.125		0.238		0.537	
Nombre_de_feuilles	0.036	*	0.001	***	0.001	**
Nombre_de_racèmes	0.016	*	0.009	**	0.002	**
Hauteur_stade3_4	0.011	*	0.0002	***	0.729	
Humidité_rel	0.027	*	0.466		0.829	
Poidshectolitre	0.039	*	0.050	.	0.040	*
Rdt	0.882		0.002	**	0.296	
PMG	0.066	.	3.17e-06	***	0.515	
Poids_brut	0.460		0.004	**	0.144	

L'effet Site indique des différences dans 11 des 16 paramètres mesurés. L'effet Variétés quant à lui implique des différences dans 10 des 16 paramètres mesurés. Une interaction entre site et variétés est même observée pour le nombre de feuilles, le nombre de racèmes et le poids par hectolitre. Chaque paramètre est au moins influencé significativement soit par l'effet site soit par l'effet variétés sauf pour la longueur des racèmes. Les Hauteurs, le nombre de feuilles et racèmes, le poids par hectolitre et le PMG sont impactés significativement par les deux effets. Excepté la longueur de racèmes, tous les paramètres mesurés sont donc intéressants pour une comparaison variétale et de sites. Les paramètres agronomiques les plus importants que sont le rendement et le PMG n'ont pas pu être prouvés dépendants à un seuil de 5% du site mais bel et bien de la variété à des seuils de moins d'un pourcent.

9.2 Multiplication variétale

Le sarrasin commun étant une plante hétérostyle auto-incompatible, une pollinisation croisée entre plante brévistyle et longistyle assurée par les insectes est nécessaire pour la formation de graines. Lors des multiplications variétales, il faut donc s'assurer de permettre la pollinisation au sein d'une variété mais d'empêcher la pollinisation entre variétés. Un test de multiplication en pallox bâchés par un voilage avec captures et relâchement de pollinisateurs a donc été mis en place. La multiplication a permis de récolter une quantité de graines variant de minimum 43,6 g pour Darja et maximum 157,2 g pour Devyatka (Figure 37A). La moyenne globale était de $88,7 \pm 35,56$ g. Comme chaque traitement ne dispose pas de répétition, il n'a pas été possible de réaliser d'analyses statistiques approfondies ni de modèles robustes. Les poids récoltés sont présentés dans Figure 37A. Pour les variétés dont le PMG est connu (cfr analyse en champ), une estimation du nombre de graines obtenues a été réalisée à partir des poids obtenus (Figure 37B).



La variété La Harpe se distingue clairement par une production bien supérieure en nombre de graines. Bien que Devyatka a produit la plus grande masse de graines, ses graines étant plus grosses, celles-ci sont moins nombreuses. Les autres variétés présentaient une production en nombre de graines similaire, comprise entre 200 et 300 graines maximum.

Figure 37 Résultats de la multiplication des variétés avec (A) poids total des graines produites par variété pour l'essai de multiplication et (B) estimation du nombre de graines obtenues par variété sur base des mesures de PMG.

10 Discussion

10.1 Impact du génotype sur la croissance et le rendement chez le sarrasin

10.1.1 Durée du cycle de vie et stades de développement

La comparaison variétale menée à LLN mais aussi celle menée à Gembloux ont montré que les variétés étudiées ont atteint leur stade de maturité après environ 1200°C/J, ce qui a permis de les récolter en même temps sauf Lileja qui s'est révélée être une variété précoce qui était mature après seulement 900 °C/J. Cette précocité pourrait être avantageuse et permettre de commencer la culture plus tardivement tout en gardant la même date de récolte pour ne pas impacter le calendrier cultural. Retarder le semis pourrait être intéressant par exemple si les conditions météorologiques ne permettent pas le semis début ou mi-mai car le sarrasin est sensible au gel^{42,61}, ou alors pour l'utiliser en culture dérobée après une céréale d'hiver ou encore en utilisation comme couvert gélif⁸⁶. Une autre possibilité se présente après la récolte des céréales d'hiver en semant durant l'été et en récoltant courant octobre, ceci est principalement réalisé en Slovénie⁸⁷⁻⁸⁹.

Le sarrasin est une plante mellifère^{34,42}. Dans une optique de mise à disposition de fleurs pour les pollinisateurs, les variétés Lileja, Drushina, Devyatka, Smuga, Kora et Panda ont fleuri précocement après seulement 250 °C/J. La durée de floraison du sarrasin est assez longue car elle produit sans cesse de nouvelles fleurs, usuellement de 4 à 15 semaines⁴². Dans le cadre de notre étude, les variétés Siva, Darja, La Harpe et Spacinka ont eu les périodes de floraisons les plus longues. Cette culture peut donc aussi être intéressante de ce point de vue dans le contexte d'un déclin de la biodiversité et des pollinisateurs en particulier⁹⁰.

10.1.2 Performance de rendement et lien avec les paramètres morphologiques

Dans cette étude, seule la hauteur des plantes au stade 7-8, le nombre de feuilles et les variétés ont eu un impact positif prouvé par le modèle GLM sur le rendement. Ce lien entre paramètres végétatifs et rendement a également été trouvé par Dutta et al. (2008), bien que dans leur étude, d'autres paramètres comme le nombre de ramifications, d'entre-nœuds, de racèmes et la surface foliaire ont aussi contribué à l'augmentation du rendement⁹¹. Ceci suggère qu'un développement végétatif important serait nécessaire pour maximiser le rendement. Cependant, les variétés à forte croissance végétative comme La Harpe et Darja (dans notre étude) étaient loin d'être les plus productives comme il sera vu plus loin. Une maximisation de la hauteur des plantes entraîne également souvent des problèmes de verse impactant négativement le rendement. Ceci est vérifié pour le maïs et pour beaucoup de céréales avec des baisses de rendements dues à la verse allant jusqu'à 61% pour le blé^{92,93}, la même logique s'applique pour le sarrasin^{32,94}. Pour le rendement en lui-même, les variétés Drushina et Panda se sont révélées les plus intéressantes. A l'inverse, La Harpe, Lileja mais

surtout Siva était moins productives et ne semblent donc pas de bons choix de variétés pour une culture dans nos régions. Les variétés La Harpe et Darja y ont déjà été cultivées à plusieurs reprises en Belgique dans d'autres essais et les rendements obtenus étaient très proches^{57,95}. La variété La Harpe est une variété française qui a été sélectionnée en 1960 par l'INRA⁹⁶ et qui est la variété de sarrasin de référence dans nos régions car elle a été très longtemps la seule commercialisée⁹⁷ et a servi dans la plupart des essais de terrain en Belgique^{57,95,98}. Cependant, il n'est pas surprenant que des variétés sélectionnées plus récemment donnent de meilleurs résultats.

Le PMG est également un paramètre central dans l'évaluation du rendement, car il reflète directement la capacité d'une plante à produire des graines bien remplies et donc plus de farine pour un même nombre de grains s'il est élevé. Au-delà de son lien avec la productivité, le PMG est aussi associé à la qualité nutritionnelle : des composés bénéfiques comme la rutine et la quercétine y sont positivement corrélés, soulignant l'intérêt de ce critère pour concilier performance agronomique et valeur ajoutée des cultures⁹⁹.

Le PMG du sarrasin présentait une forte variabilité dans notre étude, influencée par une combinaison de facteurs génétiques, environnementaux et agronomiques. Au niveau variétal, Drushina et Lileja présentait les PMG les plus élevés et La Harpe le plus faible. Le modèle GLM montrait également que certains caractères morphologiques, tels que le nombre de racèmes au stade 3–4 influençaient négativement le PMG. Ce phénomène de limitation des inflorescences bénéfique pour le PMG est expliqué par exemple pour le blé par compensation et meilleur remplissage des grains¹⁰⁰. De même, dans ce mémoire, de grandes feuilles et un taux d'avortement floral élevés sont associés à une diminution du PMG. Deux de ces caractères pourraient être liés : une plante développant un nombre trop élevé d'inflorescences en début de cycle floral pourrait induire un avortement floral important, par excès de structures reproductrices que la plante ne parvient pas à soutenir. Cette double pression, trop d'inflorescences et un taux d'avortement conséquent, limiterait la capacité de remplissage des graines et abaisserait ainsi leur poids moyen. Il est en effet connu chez le sarrasin que la profusion de fleurs va de pair avec le développement de fleurs mal formées et que ce sont souvent les premières fleurs formées qui ont le plus de chances de produire une graine^{32,101}. Cependant, une étude a pourtant prouvé un lien positif entre le nombre de racèmes et PMG pour diverses variétés de sarrasin commun (variétés non communes à ce mémoire) et de Tartarie⁹¹. La différence pourrait être due à l'utilisation dans cette étude de variétés différentes, de conditions de culture différentes et même d'une autre espèce, le sarrasin de Tartarie qui est, lui, autogame¹⁰². Dans la littérature, d'autres traits comme la circonférence basale ou la durée de culture sont également corrélés positivement au PMG sur le sarrasin commun^{91,99} (variétés non communes à ce mémoire) et de Tartarie⁹¹. Ces constats suggèrent que les variétés à croissance reproductive modérée en début de culture, avec un bon équilibre entre structures végétatives et reproductives, sont plus à même d'optimiser le PMG. Une corrélation positive entre le rendement et le PMG a aussi été mise en évidence par

l'ACP dans notre étude, suggérant que les deux paramètres ne sont pas complètement indépendants.

Les autres paramètres morphologiques étudiés dans ce mémoire ne se sont soit pas révélés différents entre les variétés, soit ils n'ont pas eu d'impact sur le rendement ou PMG. Des études antérieures ont montré que tous les paramètres étudiés dans ce mémoire étaient significativement différents entre variétés^{103,104}. Globalement, dans notre étude, les variétés étudiées ont eu des comportements morphologiques similaires par rapport à d'autres comparaisons variétales trouvées dans la littérature^{48,95,98,103,105-109}. En effet, l'ACP ne montrait pas une distinction claire des variétés dans cette étude. Notre étude concernait uniquement des variétés européennes et la variabilité génétique entre celles-ci est plus faible qu'entre variétés et cultivars traditionnels d'Asie suite à l'histoire de la domestication et de la propagation du sarrasin¹¹⁰. Néanmoins certains regroupements cohérents ont été observés via l'ACP : le regroupement des variétés Smuga, Kora et Korona qui proviennent toutes de la même entreprise de sélection MHR¹¹¹ ; Devyatka et Drushina qui ont une origine commune russe ; les variétés La Harpe et Darja qui ont un fort développement végétatif et enfin les variétés Drushina, Panda et Smuga qui ont présenté les meilleurs rendements. Il faut cependant mentionner que les données de l'ACP ne portaient que sur les 4 répétitions des parcelles par variété et qu'un plus grand nombre de répétitions aurait peut-être permis d'augmenter la part de variance comprise dans les dimensions et de mieux séparer les variétés lors de l'ACP, voire d'atteindre un clustering intéressant.

10.1.3 Comparaison entre variétés déterminées et indéterminées

Dans le cadre de cette étude, nous avons comparé 3 variétés déterminées (Drushina, Devyatka et Siva) et des variétés indéterminées. La sélection de variétés déterminées rentables facilitant la récolte est un enjeu majeur dans l'amélioration et le développement du sarrasin commun⁵⁸. Cette caractéristique confère à ces plantes une maturation rapide mais surtout synchronisée, un avantage dans certaines conditions écologiques spécifiques⁵⁹. Les variétés déterminées permettent de réduire les deux inefficiences de rendement que sont la détermination d'une date de récolte optimale^{20,42,54,56,58} et l'allocation d'énergie de la plante au développement végétatif qui n'aura pas le temps d'être rentabilisé ou des parties reproductrices jeunes qui n'auront pas le temps de murer avant la récolte^{42,54,56,58}.

Retrouver certaines variétés déterminées (Drushina et Devyatka) parmi les plus productrices et avec le plus haut PMG est encourageant pour la suite de la sélection du sarrasin et est un argument de poids pour favoriser l'adoption du sarrasin auprès des agriculteurs en facilitant son utilisation.

Chez le sarrasin, la détermination résulte d'une mutation récessive (allèle *det*)¹¹². En raison de la nature allogame de l'espèce, les populations issues de semences non stabilisées tendent à présenter une ségrégation de ce caractère. Le caractère déterminé n'est donc pas toujours

complètement observable au sein d'une population et est facilement non exprimé si des mélanges de variétés non voulus ont lieu. Dans ce cas-ci au champ, les variétés déterminées n'étaient pas clairement différenciables sans un œil aguerri. Les variétés déterminées sont habituellement plus petites et ramifiées, ceci est dû à l'arrêt du développement de leur apex caulinaire sous la forme d'une grappe d'inflorescence terminale¹¹³. Siva a été classée parmi les variétés ramifiées suite à son caractère effectivement buissonnant. Pour Devyatka et Drushina, leur développement était encore faible lors de la prise de mesure, elles ont donc été classées parmi les variétés à développement équilibré. Avec plus de temps pour se développer, ces variétés auraient peut-être été plus ramifiées. Un nouvel essai pour tester le caractère ramifié de ces variétés et si celui-ci est effectivement pertinent pour discerner les variétés déterminées et indéterminées serait utile.

10.2 Perte de la parcelle de Grand-Leez

Lors de l'essai cultural à Grand-Leez, les conditions météorologiques défavorables, caractérisées par un temps humide et frais après le semis, ont entravé le développement initial du sarrasin. Cette situation a favorisé une invasion importante d'adventices. Le sol détrempé a rendu impossible le passage d'outils de désherbage mécanique. Bien qu'un traitement chimique aurait pu être envisagé pour maîtriser les adventices, cette option est généralement exclue dans les systèmes de culture biologique, où le sarrasin est souvent cultivé. Ce site d'expériences a donc été abandonné pour ce mémoire.

Pourtant, le sarrasin est reconnu pour son pouvoir étouffant et ses propriétés allélopathiques qui lui permettent de limiter la croissance des adventices une fois bien implanté^{40,64}. Cependant, ces avantages ne se manifestent pleinement qu'après le stade de deux feuilles vraies^{114,115}. Avant ce stade, la culture est vulnérable à la concurrence des mauvaises herbes. Malgré sa réputation rustique et étouffante, cette perte a prouvé qu'il est essentiel d'assurer un sol propre au moment du semis et de favoriser une levée rapide et homogène pour que le sarrasin puisse exprimer son potentiel compétitif.

10.3 Impact de l'environnement sur la croissance et le rendement chez le sarrasin

Dans le cadre de ce mémoire, deux sites ont été comparés, sites qui, bien que se trouvant dans la même région, peuvent présenter des qualités de sols et des conditions météorologiques différentes (Figure 15). Il est cependant à noter que suite aux conditions météorologiques, les deux sites n'ont pas pu être semés en même temps. La comparaison entre sites ne permet donc pas de distinguer l'effet de l'environnement de celui de la date de semis. Il est en effet connu que la date de semis a un effet significatif sur de nombreux caractères chez le sarrasin^{116,117}.

10.3.1 Cycle de vie et paramètres morphologiques importants

Nos résultats ont montré que le nombre de degré-jour pour atteindre la maturité était similaire entre sites d'études, avec une différence maximale de 70 °C/J pour la variété Lileja, c'est-à-dire moins d'une semaine de différence. Une étude réalisée sur plusieurs années par Strahm et al (2019) sur 3 sites en Suisse et en Allemagne a montré également de très faibles différences en nombre de °C/J (base 8°C contre base 7°C pour ce travail) au sein d'une même année pour les mêmes variétés étudiées (maximum 60°C/J toutes variétés confondues)⁴⁸. En revanche, ce nombre a varié en fonction des années avec, pour les variétés précoces de 1897 à 2220 °C/J (dont Devyatka et Drushina), pour les variétés moyennes de 1924 à 2466 °C/J (dont Lileja) et pour les variétés tardives de 2113 à 2466 °C/J (dont Darja) entre 2015 et 2017⁴⁸. Les différences atteignant jusqu'à 500 °C/J. L'année et les conditions météorologiques qui y sont liées semblent donc bien plus importantes que les différences entre sites pour le nombre de °C/J nécessaires pour atteindre la maturité. Il est tout de même intéressant de noter que toutes les variétés étudiées dans l'étude de Strahm et al. ⁴⁸ ont nécessité bien plus de degré-jour que les variétés étudiées dans ce travail pour atteindre le stade de maturité. Ceci peut être dû à l'effet de la date de semis, aux conditions de cultures, au climat mais surtout à une météo différente et des années différentes. Tout de même, le sarrasin semble se développer bien plus rapidement en Belgique comparé à cette étude avec une moyenne autour des 1200 °C/J contre de 1900 à 2500 °C/J dans cette étude⁴⁸.

Dans un screening de variétés (différentes de nos variétés) réalisé entre 2000 et 2001 dans le Nord de l'Inde (Uttarakhand), le nombre de jours pour atteindre le début de floraison variait entre 23 et 47 avec une héritabilité de 99%⁹¹. La même héritabilité a été observée pour le nombre de jours jusqu'à maturité qui variait entre 105 à 128 dans cette même étude⁹¹. Pour vérifier l'héritabilité de ce caractère pour nos variétés, une étude multi-annuelle serait nécessaire sur les mêmes variétés.

Concernant les paramètres morphologiques et agronomiques, la verse était plus élevée à LLN qu'à Gembloux. Cette différence peut être expliquée par les conditions des terrains. A LLN les parcelles étaient situées sur un terrain légèrement en surplomb par rapport aux alentours. Du côté de Gembloux, les parcelles étaient situées en léger contrebas, cette pente a pu protéger les parcelles des vents les plus violents qui auraient pu provoquer de la verse comme à LLN. La verse a surtout commencé à être observée à LLN après un orage ayant eu lieu mi-août. Une sensibilité à la verse (importante) a déjà été rapportée pour La Harpe et (modérée) pour Lileja dans la littérature^{48,118}. Les variétés Panda, Kora, Devyatka, Drushina, Darja s'étant déjà révélées moins sensibles que La Harpe et Lileja dans ces mêmes études^{48,118}. La sensibilité à la verse est aussi liée à la taille des plantes et à leur robustesse.

Dans notre étude, des différences entre sites ont aussi été observées pour des paramètres comme la hauteur des plantes, le diamètre des tiges, le nombre de feuilles, la longueur des entrenœuds, la longueur et la largeur des limbes. Au niveau reproducteur, des différences

entre sites ont été observées dans notre étude pour le nombre de racèmes, l'humidité des graines et le poids des graines à l'hectolitre. Globalement les plantes sur le site de Gembloux étaient plus trapues, avec une plus faible hauteur et longueur d'entrenœuds ainsi qu'un plus grand diamètre de tiges, tandis que les plantes de LLN avaient un développement végétatif plus important. Ceci peut aussi expliquer que moins de verse a été observée à Gembloux qu'à LLN. Le PMG a différé mais seulement à un seuil statistique de 10% (légèrement plus élevé à Gembloux). Cette différence pourrait survenir à la suite de feuilles plus grande à LLN ayant un impact légèrement négatif sur le PMG comme prouvé à un seuil de 10% par le modèle GLM.

Cette variabilité générale inter-dates de semis et inter-sites peut être expliquée par différents facteurs. Premièrement, le site de LLN a pu comporter une plus grande quantité de reliquats azotés, surtout au vu du précédent cultural de prairie. Ces reliquats peuvent être particulièrement importants si la prairie était permanente ou plus modéré si elle était temporaire ou encore s'expliquer en fonction de la quantité d'azote utilisé en fertilisation précédemment^{119–121}. Une plus grande teneur en azote peut expliquer un développement végétatif plus important. Une autre raison réside dans les conditions météorologiques entre les sites qui étaient certes similaires mais pas identiques, avec des épisodes de pluie à des moments différents ou des températures légèrement différentes comme visible sur la Figure 15. Il est en effet connu que les besoins en eau et température varient en fonction du stade de développement. Chez le sarrasin, le stade 1 jusque 2 (jeune plantule) est sensible particulièrement aux faibles températures^{61,101}. Le moment critique pour les ressources en eau se situe autour du stade 2 jusque 4 durant le développement végétatif intense et le début de la floraison^{115,122,123}. Enfin les types de sols, bien que répertoriés comme identiques par WalOnMap, possèdent probablement des différences de structure, de composition minérale, d'éléments traces et autres. Cependant n'ayant pas fait d'analyse de sol précises nous ne pouvons pas spécifiquement mettre en évidence des différences à ce niveau. Il est connu que le sarrasin s'adapte bien à tout type de sol mais qu'il est plus performant dans un sol sablonneux ou limoneux bien drainé³². Les différences peuvent également être dues à un stress abiotique ou biotique non reconnu impliquant des plantes plus trapues et chétives¹²⁴. Il n'a cependant pas été observé de stress majeur particulier sur les sites de LLN et GBX lors de notre étude autre que de la verse. Mais bien un surplus d'eau en surface clairement visible sur les Figure 14 et Figure 15 ainsi qu'une période relativement fraîche sur le site de Grand-Leez dû à un semis plus précoce ayant conduit à l'abandon de la parcelle. Il est également fort probable que les raisons citées plus haut aient toutes eu un impact ensemble, avec une synergie possible. Néanmoins, ces différences n'ont pas impacté significativement les paramètres de rendement, montrant par là une certaine résilience du rendement et PMG du sarrasin. Globalement, pour les mesures morphologiques, les variétés ont eu des comportements similaires à ce qui a été trouvé dans la littérature^{48,95,98,103,105–109}.

10.3.2 Paramètres de rendements

Nos résultats ont montré peu de différences entre sites pour les paramètres de rendements. Les variétés testées au champ dans ce mémoire ont eu des rendements compris entre 607,5-2341,6 Kg/ha avec une moyenne générale de 1792,2 Kg/ha. Le rendement ainsi que le rendement divisé par le nombre de degré-jour nécessaires pour atteindre le stade de maturité (Tableau 14) indiquent que la variété Smuga a été la plus productrice durant nos essais en fonction du temps. Drushina, Spacinka, Panda, Devyatka se classent également parmi les meilleures variétés mais seulement sur un seul site. Les valeurs de production observées sont assez hautes au vu de la moyenne mondiale d'environ 1000 Kg/ha en 2023 mais restent en dessous de la France avec 3518 Kg/ha en 2018¹³. Les rendements par continent sont de l'ordre de 1146, 781, 1128 et 1030 Kg/ha respectivement pour l'Europe, l'Asie, l'Amérique et l'Afrique et les plus grands producteurs (en quantité) que sont la Chine et la Russie sont à respectivement 808 et 1108 Kg/ha¹³. Cependant, les rendements obtenus dans cette étude sont cohérents avec les études précédentes menées en Belgique. Par exemple, pour La Harpe, le rendement était de 1976 Kg/ha pour notre étude alors qu'Aubert et al. ont obtenu 2778 en 2019 et 2037 Kg/ha en 2020⁹⁵. Toujours pour La Harpe, Halbrech et al. ont obtenu des rendements entre 2000 et 2500 Kg/ha⁵⁷. Tandis qu'un récent mémoire a estimé la production à 2983⁹⁸ Kg/ha pour La Harpe⁹⁸. La variété Darja avec les expériences de ce mémoire a eu un rendement moyen de 1795 Kg/ha, les résultats d'autres études belges pour cette variété étaient de 2370⁹⁵, 2371⁹⁵ et 5348⁹⁸ Kg/ha. Comme ces différentes études ont toutes été faites dans la région de LLN-Gembloux et donc sur des terrains similaires à ceux utilisés dans notre étude, les différences observées entre années sont fort probablement liées aux conditions climatiques. Des variabilités interannuelles parfois fortes pouvant aller jusqu'à 700 Kg/ha⁹⁵ ont déjà été rapportées pour le sarrasin. Cette variabilité sur le sarrasin a principalement été causée par les aléas météorologiques¹²⁵. La météo durant l'essai de ce mémoire n'a pas été particulièrement difficile (humidité, température) par rapport aux années précédentes⁸¹. Il est connu que les rendements peuvent être instables chez le sarrasin³² et il est donc primordial de développer des variétés ayant des rendements stables quelques soient les conditions environnementales.

Notre étude est la première comparaison d'une dizaine de variétés en champ en Belgique à l'exception du récent mémoire de Grenier en 2023⁹⁸. L'étude de Grenier comparait plusieurs des variétés utilisées dans ce mémoire et les rendements étaient systématiquement bien supérieurs aux données de ce travail avec respectivement 3378, 3814 et 4052 Kg/ha⁹⁸ pour Panda, Siva et Kora contre 2221, 608 et 1982 Kg/ha. Ces fortes différences entre mémoires sont partiellement expliquées par une différence dans la technique de récolte. Lors du mémoire de Grenier, la récolte a été faite à la main et a permis de récupérer l'ensemble des graines. Les plantes ont été fauchées à la main et puis séchées sur une bâche, permettant la récupération des graines tombées⁹⁸. Lors du présent mémoire, la récolte était mécanique avec une moissonneuse WINTERSTEIGER (Figure 9) utile pour de bien plus grandes surfaces et avec

un fonctionnement semblable aux vrais outils agricoles utilisés. Lors de la récolte mécanique, une partie des graines tombent surtout que les équipements utilisés ne sont pas spécifiques pour le sarrasin et on observe donc une diminution de rendements par rapport à une récolte manuelle. Il est important de développer des variétés où les graines restent sur la plante même à maturité pour limiter la chute des graines lors de la récolte et maximiser les rendements.

Par ailleurs, les variétés les plus intéressantes du point de vue du rendement n'étaient pas les mêmes dans notre étude et celle de Grenier⁹⁸. La variété la plus productive présente dans les deux travaux était Darja. À l'inverse des résultats de ce travail, Siva avait obtenu de très bons rendements. Il serait donc intéressant de réaliser à nouveau des essais sur ces variétés afin de comparer si les variétés les plus productrices restent les mêmes ou continue de changer en fonction des années afin de mesurer l'impact de la variabilité interannuelle. Il serait également intéressant de comparer les mêmes variétés sur différents sites dans des conditions pédoclimatiques différentes et sur plusieurs années également pour mieux cerner l'adaptabilité des variétés ainsi que leur stabilité ainsi que l'impact des conditions environnementales sur le rendement.

La comparaison des rendements est également possible avec d'autres études ayant pris place en Europe (Italie^{103,108}, Pologne¹²⁶, Serbie¹⁰⁹, Suède¹⁰⁵, Suisse⁴⁸ et Allemagne⁴⁸ et le producteur MHR de certaines variétés¹¹¹) et une étude en Dakota du Nord¹⁰⁷ (Tableau 16).

Tableau 16 Rendements trouvés dans la littérature pour les variétés de sarrasin étudiées dans ce mémoire

	Rendements trouvés dans la littérature (Kg/ha)							Rendements de ce mémoire (Kg/ha)
	Belge			Non Belge				
Devyatka				1635 ¹⁰⁷	798 ¹⁰⁷	1883 ⁴⁸		1719
Spacinka				1030 ¹⁰⁸	1760 ¹⁰³			1814
Lileja				1500 ¹⁰⁸	1990 ¹⁰³	1915 ⁴⁸		1329
Kora	4052 ⁹⁸			2648 ¹⁰⁵				1982
Panda	3378 ⁹⁸			3188 ¹⁰⁵	3700 ¹¹¹			2221
Smuga				2938 ¹⁰⁵				1994
Drushina				Jusque 2700 ¹¹¹	1883 ⁴⁸			2224
La Harpe	2000-2800 ⁹⁵	2000-2500 ⁵⁷	2983 ⁹⁸	1287 ⁴⁸				1427
Korona				Jusque 2700 ¹¹¹				1976
Darja	2370 ⁹⁵	5348 ⁹⁸		724 ⁴⁸	1090 ⁴⁸			1795
Siva	3814 ⁹⁸							608
Moyen				2316 ¹⁰⁷	1580 ¹⁰⁸	1838 ¹⁰³	1484 ¹⁰⁹	1792

Les rendements obtenus dans ces études sont similaires à ceux obtenus en Belgique pour toutes les variétés sauf le mémoire de Grenier 2023. Ceci montre le caractère résilient du sarrasin. Le caractère étalé de la floraison du sarrasin permet à la plante de refleurir après un épisode de stress et ainsi de limiter les pertes de production mais aussi de compenser

l'avortement des fleurs produites lors des conditions moins favorables²⁵. Seule l'étude de Knicky et al. (2024) a obtenu des résultats de près d'une tonne à l'hectare supplémentaire pour chacune des variétés comparées. Ces différences peuvent également être expliquées par la variabilité interannuelle mais aussi par les différences de climat, de météo et de sol de la Suède par rapport à la Belgique. En Suède le climat est boréal à l'inverse de la Belgique ou celui-ci est majoritairement maritime nord¹²⁷. Au niveau des sols, la Suède est principalement composée de podzols alors que la Belgique est majoritairement constituée de podzols au nord, luvisol dans le centre et cambisol dans le sud et plus particulièrement les sols des expériences de ce mémoire limoneux à drainage naturel favorable^{80,128}. Une autre piste possible est dans la technique de récolte, comme avec le mémoire précédemment cité, qui pourrait ne pas être identique entre les expériences mais qui reste trop peu détaillée dans l'étude pour le prouver.

En revanche les rendements d'essais scientifiques sont systématiquement plus élevés que les rendements réels des agriculteurs, la moyenne mondiale étant d'une tonne à l'hectare et la moyenne européenne de 1,1 t/ha¹³. Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs. D'une part, les essais sont souvent menés sur de petites parcelles idéalement situées, généralement au centre de champs uniformes, évitant ainsi les bordures, les zones compactées par le passage des machines ou les re-doublages, qui sont courants en conditions réelles et nuisent au rendement global. D'autre part, la récolte dans ces essais est généralement plus soignée, parfois même manuelle. À l'inverse, une récolte mécanisée en champ à grande échelle peut entraîner davantage de pertes. Le choix du moment de récolte est aussi particulièrement délicat pour le sarrasin en raison de son caractère indéterminé³². Il sera plus aisé de déterminer le moment optimal de récolte avec une petite parcelle d'étude avec un suivi scientifique régulier qu'à l'échelle d'un champ entier avec un développement des plantes potentiellement hétérogènes. Aussi, les expérimentations belges disponibles ont été réalisées sur des sols limoneux très fertiles, ce qui n'est pas représentatif de l'ensemble du pays, notamment des régions à sols sablonneux ou pauvres où le sarrasin y est historiquement cultivé^{20,32,36,60}. Enfin, certains pays européens à hauts rendements comme la France, n'ont plus de données à jour dans les bases comme la FAO, ce qui abaisse les rendements moyens européens¹³. Pour terminer, ces différentes explications agissent certainement en synergie pour expliquer les différences de rendements entre les études et les agriculteurs. Il faut aussi mentionner que les pays où ces essais ont été menés ne sont pas spécialement des pays où le sarrasin est communément cultivé, ce qui biaise aussi la comparaison.

Le PMG du sarrasin est généralement compris entre 15 et 40g et varie en fonction des variétés^{84,86,91,99}. Le PMG des variétés de ce mémoire se situait entre 19 et 33g. Les études belges de terrain antérieures montraient des données similaires avec 26,8, 25,7, 23 à 30, 30 à 40 et 24 à 30g respectivement pour Kora, Panda, Darja, La Harpe et Siva^{95,98}. Seule La Harpe présentait une différence de PMG de 4g entre notre étude et les précédentes. Deux des trois

variétés déterminées (Devyatka et Drushina) se sont classées parmi les meilleurs PMG obtenus dans notre étude, le caractère déterminé ne semble donc pas un obstacle pour un bon PMG.

Tableau 17 PMG trouvés dans la littérature pour les variétés de sarrasin étudiées dans ce mémoire

	PMG trouvés dans la littérature (g)					PMG de ce mémoire (g)
	Belge		Non Belge			
Devyatka			27,7 ¹⁰⁷	28,8 ⁴⁸		32,1
Spacinka			23,1 ¹⁰⁸	22,32 ¹⁰³		27,7
Lileja			24,2 ¹⁰⁸	23,69 ¹⁰³	24,5 ⁴⁸	33,4
Kora	26,8 ⁹⁸		25-30 ¹¹¹	25,91 ¹²⁶	30,5 ¹⁰⁵	26,2
Panda	25,7 ⁹⁸		28,9 ¹⁰⁵	26,9 ¹²⁶		28,6
Smuga			27-30 ¹¹¹	26,0 ¹²⁶		26,1
Drushina			30 ⁴⁸			32,7
La Harpe	31-40 ⁹⁸	36,1 ⁹⁵	18,5 ⁴⁸			20,7
Korona			26,3 ¹¹¹			27,8
Darja	23-30 ⁹⁸	27,5 ⁹⁵	19,7 ⁴⁸			21,2
Siva	24-30 ⁹⁸					21,7

La comparaison avec les autres études européennes et américaines mentionnées précédemment montre que certaines variétés comme Kora, Smuga, Darja et Korona présentent des PMG très similaires entre les données de la littérature et celles observées dans ce mémoire. En revanche, des différences de PMG entre études ont été observées pour Devyatka et Spacinka et Lileja où le PMG était supérieur dans notre étude. Cela peut être attribué aux conditions météorologiques plutôt clémentes (pas d'épisode de sécheresse ni de chaleur intense) lors de notre étude et à des sols riches, moins typiques des milieux traditionnellement associés à la culture du sarrasin^{20,32,36,60}. Il n'est pas exclu que la température affecte significativement le PMG du sarrasin commun comme observé pour le sarrasin de Tartarie^{104,117}. En effet, chez cette espèce, des températures élevées durant la floraison et le remplissage des grains tendent à en diminuer le poids, tandis qu'un rayonnement solaire suffisant et une bonne pluviométrie favorisent leur développement^{104,117}. En outre, plusieurs études sur le sarrasin de Tartarie indiquent que les performances variétales, y compris le PMG, peuvent parfois davantage être influencé par l'environnement que par le génotype¹⁰⁴. Ces observations rejoignent celles faites sur d'autres céréales comme le blé où la température, le stress hydrique et la position des grains sur l'épi influencent également le poids final des grains¹²⁹⁻¹³¹.

Les tests réalisés dans ce mémoire n'ont pas permis d'établir de différences claires des PMG entre les deux sites, malgré ce que suggère la littérature, notamment en lien avec les conditions météorologiques. Le seuil de significativité atteint n'était que de 10 %. Cette significativité modérée peut être due à un manque de répétitions entre sites (seulement 4 par variétés sur LLN et pas de répétition pour Gembloux) et des conditions météorologiques et climatiques similaires au vu de la faible distance entre les sites (seulement 12 Km). Comme

pour les mesures de rendement, il serait intéressant de répéter la comparaison variétale menée dans cette étude mais aussi de mener des comparaisons sur des sites ayant des conditions pédoclimatiques différentes pour mieux cerner l'adaptabilité des variétés et l'impact des conditions environnementales sur le PMG.

10.4 Choix de variétés et suite du Sarrasin en Belgique

10.4.1 Pertinence du sarrasin commun en Belgique et sa sélection

Les résultats obtenus pour les paramètres de rendement dans ce mémoire confirment que le sarrasin est globalement bien adapté aux conditions pédoclimatiques belges, tant en termes de production de grains que de qualité de ceux-ci, mesurée par le poids de mille grains (PMG). Le rendement moyen observé s'élevait à 1792 kg/ha, un niveau supérieur à la moyenne mondiale, et comparable à celui rapporté dans de nombreuses études européennes. Les PMG atteignaient voire excédaient les valeurs couramment mentionnées dans la littérature. Cette bonne performance peut s'expliquer par des conditions de culture favorables et une fertilité du sol généralement élevée.

Ces résultats laissent supposer qu'il existe encore des marges de progression, notamment par l'amélioration de la sélection variétale et des pratiques agronomiques, comme le montrent les écarts de rendement observés entre différents pays³². Les caractères principaux à améliorer sont : une forte sensibilité aux conditions climatiques (gel, chaleur, sécheresse), une reproduction complexe liée à l'auto-incompatibilité et à la distylie, une floraison majoritairement indéterminée rendant la récolte difficile, ainsi qu'une stérilité fréquente des fleurs femelles³². Par ailleurs, le sarrasin est souvent associé à l'agriculture biologique du fait de ses exigences culturelles modestes. Il est également prouvé que, dans un système de culture conventionnel, le sarrasin peut effectivement produire significativement plus de biomasse sèche ($p < 0.05$), mais que les rendements en grains n'ont pas montré de différences significatives entre les cultivars dans les deux systèmes¹³².

En 2022, le sarrasin représentait 0,6 % des surfaces cultivées en oléoprotéagineux (85 ha) et 3,5 % (75 ha) pour l'agriculture biologique en Wallonie. Ces surfaces sont en augmentation d'année en année. Il est également notable que près de 50 % de la culture est conduite en bio, un ratio relativement élevé. La rentabilité moyenne du sarrasin en agriculture biologique est estimée à 257 €/ha, selon l'État des lieux protéique wallon¹²². Cependant, cette rentabilité reste modeste comparée à d'autres cultures majeures telles que le froment d'hiver, l'escourgeon ou d'autres oléoprotéagineux, qui atteignent des marges brutes de 600 à 1000 €/ha, voire 3500 €/ha pour la pomme de terre^{133–137}.

Malgré cette rentabilité modérée, le sarrasin présente plusieurs avantages agronomiques non négligeables : une durée de culture courte, une faible demande en intrants, une tolérance

correcte aux stress hydrique et thermique, et une tendance à peu salir les parcelles. Grâce à cette brièveté de cycle, il peut être envisagé en tant que culture dérobée entre deux cultures principales, ou encore comme culture de rattrapage lorsque le semis précédent a échoué, à condition d'éviter les périodes de gel. Il peut également jouer un rôle dans des systèmes d'engrais verts gélifs ou pour assurer une couverture végétale du sol.

10.4.2 Choix des variétés les plus performantes

Dans l'optique de la comparaison variétale et de l'objectif de ce mémoire, un choix de variétés ressortant comme les plus prometteuses est important. Ce choix portera exclusivement sur les variétés de l'essai de LLN au vu de la plus grande quantité de données et répétitions.

Pour le cycle de vie, aucune variété ne s'est démarquée particulièrement à l'exception de Lileja pour sa précocité et elle pourrait donc être appréciée pour une utilisation en culture dérobée au vu de son rendement acceptable.

Les variétés Drushina et Devyatka se sont avérées intéressantes pour leurs performances dans le rendement ainsi que le PMG. De plus ces variétés sont parmi les plus petites, limitant les problèmes de verse et facilitant la récolte¹¹⁸. Devyatka possède une plus faible quantité de racèmes ayant un impact positif sur le PMG et pour ces deux variétés, leurs racèmes sont significativement plus grands que ceux des autres variétés. Ces variétés possèdent de plus le caractère déterminé facilitant le choix de date de récolte et d'adaptabilité aux conditions météorologiques de l'année. Ces variétés sont déjà ressorties lors d'essais par des agriculteurs parmi les meilleurs rendements et surtout PMG mais avec un problème de verse pour Drushina^{118,138}.

Du point de vue strict du rendement, Panda et Smuga pourraient également être de bons choix au vu de leurs productions mais n'étant pas des variétés déterminées, cela rend la récolte plus difficile. Leurs floraisons plus étalées permettent une meilleure résilience de production en cas de stress ponctuel²⁵ et permettent également des fleurs disponibles plus longtemps pour les pollinisateurs.

Enfin Darja a un bon potentiel comme culture de couverture ou d'engrais vert, avec une floraison plus tardive évitant des graines sur le champ, une biomasse importante et gélive. La Harpe malgré son utilisation répandue se classe parmi les variétés les moins intéressantes en rendement comme en PMG avec des problèmes de verse et de taux d'avortement élevés.

Ces choix mériteraient d'être comparés dans les années à venir afin d'évaluer l'influence des conditions météorologiques et pédologiques, ainsi que de les confronter à de nouvelles variétés issues des programmes de sélection en cours.

11 Conclusion

Dans un contexte de bouleversements climatiques croissants, l'agriculture doit se réinventer. Ce mémoire propose une piste concrète : redonner une place au sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*), une culture anciennement présente en Belgique mais peu exploitée aujourd'hui par son manque de rentabilité, malgré des qualités agronomiques et nutritionnelles notables. Explorer des espèces alternatives comme le sarrasin s'inscrit dans une logique de diversification des systèmes agricoles, face aux stress liés au climat. Cette exploration passe par l'étude du potentiel du sarrasin en Belgique comme ses paramètres agronomiques mais aussi les usages et variétés à encourager.

Dans cette optique dix variétés ont été mises en culture sur le site de Louvain-la-Neuve et analysées par leur morphologies et agronomies. Les résultats confirment la pertinence de cette culture en Belgique : les rendements obtenus se situent au-dessus des moyennes européenne et mondiale, rapprochant la Belgique des pays les plus performants à ce niveau, comme la France.

Certains profils variétaux se sont démarqués. Drushina et Devyatka, à croissance déterminée, montrent un bon potentiel pour la production de graines destinées à l'alimentation. Panda et Smuga, malgré leurs caractères indéterminés, offrent des rendements intéressants tout en assurant une floraison étalée, bénéfique pour les pollinisateurs et pour faire face à des stress ponctuels. Lileja combine rendement acceptable et précocité remarquable, pouvant servir en rattrapage de semis raté ou en culture intercalaire. Enfin, Darja, grâce à sa biomasse, son caractère gélif et sa floraison tardive, apparaît comme un bon candidat comme couvert végétal ou engrais vert.

Concernant l'influence de l'environnement, peu d'effets ont été observés sur les paramètres de rendements entre sites étudiés, probablement en raison de la proximité pédoclimatique des deux sites d'essai. En revanche, les caractères morphologiques se sont montrés plus sensibles. Les données issues de la littérature confortent l'idée que les conditions environnementales ont un impact prépondérant sur cette culture surtout à l'échelle internationale.

Pour approfondir ces résultats, il serait pertinent de prolonger l'étude sur plusieurs années, en conservant les mêmes variétés ou en intégrant de nouvelles issues de programmes de sélection. Une approche multicritère, croisant types de sols, conditions climatiques, date de semis et diversité génétique, permettrait de mieux cerner les interactions entre génotypes et environnement. Le recours à un plan expérimental renforcé, avec davantage de répétitions, offrirait une robustesse supplémentaire aux résultats.

12 Bibliographie

1. Malhi, G. S., Kaur, M. & Kaushik, P. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability* **13**, 1318 (2021).
2. Calvin, K. et al. *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (2023) doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
3. Anderson, R., Bayer, P. E. & Edwards, D. Climate change and the need for agricultural adaptation. *Curr. Opin. Plant Biol.* **56**, 197–202 (2020).
4. Praveen, B. & Sharma, P. A review of literature on climate change and its impacts on agriculture productivity. *J. Public Aff.* **19**, e1960 (2019).
5. Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (Cambridge University Press, 2023). doi:10.1017/9781009157896.
6. Jeyasri, R. et al. An Overview of Abiotic Stress in Cereal Crops: Negative Impacts, Regulation, Biotechnology and Integrated Omics. *Plants* **10**, 1472 (2021).
7. Cohen, I., Rapaport, T., Chalifa-Caspi, V. & Rachmilevitch, S. Synergistic effects of abiotic stresses in plants: a case study of nitrogen limitation and saturating light intensity in *Arabidopsis thaliana*. *Physiol. Plant.* **165**, 755–767 (2018).
8. Jiang, Z., van Zanten, M. & Sasidharan, R. Mechanisms of plant acclimation to multiple abiotic stresses. *Commun. Biol.* **8**, 1–15 (2025).
9. Ritchie, H. & Roser, M. Food production is responsible for one-quarter of the world’s greenhouse gas emissions. *Our World Data* (2019).
10. FAO. Principes de l’agriculture de conservation | L’agriculture de conservation | Organisation des Nations Unies pour l’alimentation et l’agriculture. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/conservation-agriculture-principles/fr/>.
11. Agroecology Fund. What is Agroecology? *Agroecology Fund* <https://agroecologyfund.org/what-is-agroecology/>.
12. Nations, U. Feeding the World Sustainably. *United Nations* <https://www.un.org/en/chronicle/article/feeding-world-sustainably>.
13. FAO. FAOSTAT. *Organisation des Nations Unies pour l’alimentation et l’agriculture* <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL/visualize> (2023).
14. Ranganathan, J., Waite, R., Searchinger, T. & Hanson, C. How to Sustainably Feed 10 Billion People by 2050, in 21 Charts. *World Resour. Inst.* (2018).
15. Vernooij, R. Does crop diversification lead to climate-related resilience? Improving the theory through insights on practice. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* **46**, 877–901 (2022).
16. Labeyrie, V. et al. The role of crop diversity in climate change adaptation: insights from local observations to inform decision making in agriculture. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **51**, 15–23 (2021).
17. Raveloaritiana, E. & Cherico Wanger, T. Decades matter: Agricultural diversification increases financial profitability, biodiversity, and ecosystem services over time.
18. Costanza, R. et al. Value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature* **387**, (1997).

19. Rangappa, K. *et al.* Buckwheat: Potential Stress-Tolerant Crop for Mid-Hills of Eastern Himalaya under Changing Climate. in *Agricultural Sciences* (ed. Y. Waisundara, V.) vol. 5 (IntechOpen, 2024).
20. Chrungoo, N. K. & Chettry, U. Buckwheat: A critical approach towards assessment of its potential as a super crop. *Indian J. Genet. Plant Breed.* **81**, 1–23 (2021).
21. Verza, M. *et al.* Underutilized crops for diversified agri-food systems: spatial modeling and farmer adoption of buckwheat in Italy. *Front. Sustain. Food Syst.* **9**, 1534246 (2025).
22. Singh, M., Malhotra, N. & Sharma, K. Buckwheat (*Fagopyrum* sp.) genetic resources: What can they contribute towards nutritional security of changing world? *Genet. Resour. Crop Evol.* **67**, 1639–1658 (2020).
23. *Polygonaceae*. *Wikipédia* (2024).
24. Sofi, S. A. *et al.* Nutritional and bioactive characteristics of buckwheat, and its potential for developing gluten-free products: An updated overview. *Food Sci. Nutr.* **11**, 2256–2276 (2022).
25. Aubert, L., Konrádová, D., Kebbas, S., Barris, S. & Quinet, M. Comparison of high temperature resistance in two buckwheat species *Fagopyrum esculentum* and *Fagopyrum tataricum*. *J. Plant Physiol.* **251**, 153222 (2020).
26. Govindhaswamy Krishnaswamy, G. & Parameshwari, S. A concise review on buckwheat materials based ready to serve and ready to eat food products. *Mater. Today Proc.* **66**, 783–788 (2022).
27. Rout, M. K. & Chrungoo, N. K. Partial characterization of the lysine rich 280KD globulin from common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench): Its antigenic homology with seed proteins of some other crops - Rout - 1996 - IUBMB Life - Wiley Online Library. **40**, 587–595 (1996).
28. Dziedzic, K. *et al.* The Content of Dietary Fibre and Polyphenols in Morphological Parts of Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *Plant Foods Hum. Nutr.* **73**, 82–88 (2018).
29. Bonafaccia, G., Marocchini, M. & Kreft, I. Composition and technological properties of the flour and bran from common and tartary buckwheat. *Food Chem.* **80**, 9–15 (2003).
30. Mahata, D. Importance of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Int. J. Chem. Stud.* Department of Agronomy, Uttar Banga Krishi Viswavidyalaya, Pundibari, Cooch Behar, West Bengal, India, 177–192 (2018).
31. Gondola, I. & Papp, P. P. Origin, Geographical Distribution and Phylogenic Relationships of Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.). *Eur. J. Plant Sci. Biotechnol.* **16** (2010).
32. Jacquemart, A.-L., Cawoy, V., Kinet, J.-M., Ledent, J.-F. & Quinet, M. Is Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) Still a Valuable Crop Today? **10** (2012).
33. Mashahiko, M. & Ohmi, O. Population genetics of cultivated common buckwheat, *Fagopyrum esculentum* Moench. X. Diffusion routes revealed by RAPD markers. *Genes & Genetic Systems*, in *Population genetics of cultivated common buckwheat, Fagopyrum esculentum Moench. X. Diffusion routes revealed by RAPD markers. Genes & Genetic Systems*, vol. 71 211–218 (Genev Genet. Syst., 1996).
34. Zhou, M. *et al.* Description of Cultivated Common Buckwheat. in *Buckwheat Germplasm in the World* 53–60 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811006-5.00006-9.
35. Zhou, M. *et al.* Classification and Nomenclature of Buckwheat Plants. in *Buckwheat Germplasm in the World* 9–20 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811006-5.00002-1.
36. Small, E. 54. Buckwheat – the world’s most biodiversity-friendly crop? *Biodiversity* **18**, 108–123 (2017).

37. Hunt, H. V., Shang, X. & Jones, M. K. Buckwheat: a crop from outside the major Chinese domestication centres? A review of the archaeobotanical, palynological and genetic evidence. *Veg. Hist. Archaeobotany* **27**, 493–506 (2017).
38. Maksimovic, V. *et al.* *Advances in Buckwheat Research Organised by the Research Institute of Crop Production Prague -Ruzyně under the Auspices of the International Buckwheat Research Association and Ministry of Agriculture of the Czech Republic*. (Research Institute of Crop Production Prague - Ruzyně under the Auspices of the International Buckwheat Research Association and Ministry of Agriculture of the Czech Republic, 2004).
39. Cheng, C. *et al.* *Fagopyrum esculentum* ssp. *ancestrale*-A Hybrid Species Between Diploid *F. cymosum* and *F. esculentum*. *Front. Plant Sci.* **11**, 1073 (2020).
40. Cawoy, V. Etude des facteurs de contrôle de la floraison et de la fructification chez le sarrasin commun, *Fagopyrum esculentum* Moench (cv. La Harpe). (UCL - Université Catholique de Louvain, 2007).
41. Campbell, C. G. *Buckwheat: Fagopyrum Esculentum Moench*. (IPGRI, Rome, 1997).
42. Cawoy, V., Ledent, J.-F., Kinet, J.-M. & Jacquemart, A.-L. Floral Biology of Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench).
43. Janovská, D. & Hlásná Čepková, P. Nutritional Aspects of Buckwheat in the Czech Republic. in *Molecular Breeding and Nutritional Aspects of Buckwheat* 177–192 (Elsevier, 2016). doi:10.1016/B978-0-12-803692-1.00014-6.
44. PubMed. *PubMed* <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>.
45. Verhulst, A. L'histoire rurale de la Belgique jusqu'à la fin de l'Ancien Régime (Aperçu bibliographique 1968-1983). *Rev. Hist.* **271**, 419–437 (1984).
46. Jean-Jacques, H. Vandenbroeke (C). Agriculture et alimentation. L'agriculture et l'alimentation dans les Pays-Bas autrichiens. Contribution à l'histoire économique et sociale à la fin de l'Ancien Régime. in *Vandenbroeke (C). Agriculture et alimentation. L'agriculture et l'alimentation dans les Pays-Bas autrichiens. Contribution à l'histoire économique et sociale à la fin de l'Ancien Régime* vol. 56 143–151 (1978).
47. Peeters, M. Les prix et les rendements de l'agriculture belge de 1791 à 1935. *Bull. Inst. Rech. Économiques Soc.* **7**, 343–365 (1936).
48. Strahm, S. *et al.* Culture de sarrasin en Suisse: de nouvelles variétés pour une ancienne culture de niche. (2019).
49. Wese, V. Tour d'horizon des crêpes de nos régions. *RTBF* <https://www.rtf.be/article/tour-d-horizon-des-crepes-de-nos-regions-10921707> (2024).
50. Jack, M. L. Top 14 des spécialités typiques de Wallonie. *Topito* <https://www.topito.com/top-specialites-culinaires-wallonie-annee-prochaine-echarpe-standard-champion> (2016).
51. World Bank Open Data. Rendements céréaliers mondiaux. *World Bank Open Data* <https://data.worldbank.org>.
52. Strahm, S., Ruef, S. & Hiltbrunner, J. Agroscope Fiche technique du sarrasin. 28 p. (2020) doi:10.22014/97839524176-E8.
53. Woo, S.-H. *et al.* Concepts, Prospects, and Potentiality in Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench): A Research Perspective. in *Molecular Breeding and Nutritional Aspects of Buckwheat* 21–49 (Elsevier, 2016). doi:10.1016/B978-0-12-803692-1.00003-1.
54. Quinet, M. *et al.* Inflorescence structure and control of flowering time and duration by light in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *J. Exp. Bot.* **55**, 1509–1517 (2004).

55. Liu, R. *et al.* Quantifying pollination efficiency of flower-visiting insects and its application in estimating pollination services for common buckwheat. *Agric. Ecosyst. Environ.* **301**, 107011 (2020).
56. Taylor, D. P. & Obendorf, R. L. Quantitative Assessment of Some Factors Limiting Seed Set in Buckwheat. *Crop Sci.* **41**, 1792–1799 (2001).
57. Halbrech, B., Romedenne, P. & Ledent, J. F. Evolution of flowering, ripening and seed set in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench): quantitative analysis. *Eur. J. Agron.* **23**, 209–224 (2005).
58. Funatsuki, H., Maruyama-Funatsuki, W., Fujino, K. & Agatsuma, M. Ripening Habit of Buckwheat. *Crop Sci.* **40**, 1103–1108 (2000).
59. Клыкков А. Г., Муругова Г. А., Кузьменко Н. В. & Парская Н. С. Сравнительное морфологическое и биохимическое изучение сортов гречихи съедобной (*Fagopyrum esculentum* Moench) различного происхождения. (2018) doi:10.24411/1999-6837-2018-14083.
60. Farooq, S. Chapter twenty three - Cultivation, Agronomic Practices, and Growth Performance of Buckwheat. in *Molecular Breeding and Nutritional Aspects of Buckwheat*. vol. 23 299–319 (2016).
61. Kalinová, J. & Moudrý, J. Evaluation of frost resistance in varieties of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Plant Soil Environ.* **49**, 410–413 (2003).
62. Płazek, A. *et al.* Effects of High Temperature on Embryological Development and Hormone Profile in Flowers and Leaves of Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Int. J. Mol. Sci.* **20**, 18 (2019).
63. Guyomard, S. Le sarrasin, une culture au pouvoir nettoyant. *Terre-net* <https://www.terre-net.fr/agriculture-biologique/article/169293/le-sarrasin-une-culture-au-pouvoir-nettoyant>.
64. Iqbal, Z., Hiradate, S., Noda, A., Isojima, S. & Fujii, Y. Allelopathic activity of buckwheat: isolation and characterization of phenolics. *Weed Sci.* **51**, 657–662 (2003).
65. Babu, S. *et al.* Production technology and multifarious uses of buckwheat (*Fagopyrum* spp.): A review. *Indian J. Agron.* **63**, 415–427 (2018).
66. Domańska, J., Leszczyńska, D. & Badora, A. The Possibilities of Using Common Buckwheat in Phytoremediation of Mineral and Organic Soils Contaminated with Cd or Pb. *Agriculture* **11**, 562 (2021).
67. Huda, Md. N. *et al.* Treasure from garden: Bioactive compounds of buckwheat. *Food Chem.* **335**, 127653 (2021).
68. Jha, R. *et al.* Global nutritional challenges and opportunities: Buckwheat, a potential bridge between nutrient deficiency and food security. *Trends Food Sci. Technol.* **145**, 104365 (2024).
69. Ahmed, A. *et al.* Phytochemicals and biofunctional properties of buckwheat: a review. *J. Agric. Sci.* **152**, 349–369 (2013).
70. Joshi, D. C. *et al.* Revisiting the versatile buckwheat: reinvigorating genetic gains through integrated breeding and genomics approach. *Planta* **250**, 783–801 (2019).
71. Tapiero, H., Mathé, G., Couvreur, P. & Tew, K. D. I. Arginine. *Biomed. Pharmacother.* **56**, 439–445 (2002).
72. Martínez-Villaluenga, C., Peñas, E. & Hernández-Ledesma, B. Pseudocereal grains: Nutritional value, health benefits and current applications for the development of gluten-free foods. *Food Chem. Toxicol.* **137**, 111178 (2020).
73. Krkošková, B. & Mrázová, Z. Prophylactic components of buckwheat. *Food Res. Int.* **38**, 561–568 (2005).
74. Brunori, A., Nobili, C. & Procacci, S. Chapter seventeen - Toward the Use of Buckwheat as an Ingredient for the Preparation of Functional Food. in *Molecular Breeding and Nutritional Aspects of*

- Buckwheat* (eds. Zhou, M., Kreft, I., Woo, S.-H., Chrungoo, N. & Wieslander, G.) 219–227 (Academic Press, 2016). doi:10.1016/B978-0-12-803692-1.00017-1.
75. Steadman, K. J. *et al.* Fagopyritols, D - *chiro* -Inositol, and Other Soluble Carbohydrates in Buckwheat Seed Milling Fractions. *J. Agric. Food Chem.* **48**, 2843–2847 (2000).
 76. Kim, S.-L., Kim, S.-K. & Park, C.-H. Introduction and nutritional evaluation of buckwheat sprouts as a new vegetable. *Food Res. Int.* **37**, 319–327 (2004).
 77. Hornyák, M. *et al.* Reducing Flower Competition for Assimilates by Half Results in Higher Yield of *Fagopyrum esculentum*. *Int. J. Mol. Sci.* **21**, 8953 (2020).
 78. Matsui, K. & Yasui, Y. Genetic and genomic research for the development of an efficient breeding system in heterostylous self-incompatible common buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Theor. Appl. Genet.* **133**, 1641–1653 (2020).
 79. Arrêté Du 22 Février 2012 Homologuant Le Règlement Technique Annexe Des Semences Certifiées de Sarrasin et Le Règlement Technique Annexe Des Semences Certifiées de Céréales Autogames.
 80. WalOnMap | Géoportail de la Wallonie. <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=177050.28120034028,179172.24377759875,141350.49666316295,142382.37372691708>.
 81. Agromet.be. <https://agromet.be/fr/pages/home/>.
 82. Earth Observation Research Branch Team Agriculture and Agri-Food Canada. Crop Identification and BBCH Staging Manual: SMAP-12 Field Campaign. (2011).
 83. IPGRI. Descriptors for Buckwheat International plant genetic resource institute. <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/05a8a4ee-0699-48be-80a8-3e9c2f16c3c3/content>.
 84. opaba & Chambre de l'agriculture d'alsace. Fiche technique culture sarrasin. (2020).
 85. Omafra. agronomy guide for field crops chapter-7 : Sarrasin. in (2022).
 86. Semae & FNAMS. Semence de céréales, Le sarrasin porte graine. (2022).
 87. Junker-Frohn, L. A Comeback for Buckwheat – A Crop with a lot of Potential. https://www.fz-juelich.de/en/news/archive/press-release/2025/a-comeback-for-buckwheat-2013-a-crop-with-a-lot-of-potential?utm_source=chatgpt.com (2025).
 88. Kreft, I. Locally grown buckwheat grain for production of high-quality food products. *NUTRIS* <https://www.nutris.org/en/projects/locally-grown-buckwheat-grain-for-production-of-high-quality-food-products> (2021).
 89. Owell, P. How to grow buckwheat. *Sbenny's Blog* <https://blog.sbenny.com/gardening/how-to-grow-buckwheat/> (2022).
 90. Neumüller, U. *et al.* Prolonged blooming season of flower plantings increases wild bee abundance and richness in agricultural landscapes. *Biodivers. Conserv.* **30**, 3003–3021 (2021).
 91. Dutta, M., Yadav, V. K., Bandyopadhyay, B. B., Pratap, T. & Prasad, R. Genetic variability and path analysis in buckwheat. (2008).
 92. Stubbs, C. J. *et al.* Moving toward short stature maize: The effect of plant height on maize stalk lodging resistance. *Field Crops Res.* **300**, 109008 (2023).
 93. Berry, P. M. & Spink, J. Predicting yield losses caused by lodging in wheat. *Field Crops Res.* **137**, 19–26 (2012).
 94. Lei, X. *et al.* Effects of planting density and NPK-fertilization level on lodging resistance and grain yield of common buckwheat. *Field Crops Res.* **322**, (2025).

95. Aubert, L., Decamps, C., Jacquemin, G. & Quinet, M. Comparison of Plant Morphology, Yield and Nutritional Quality of *Fagopyrum esculentum* and *Fagopyrum tataricum* Grown under Field Conditions in Belgium. *Plants* **10**, 258 (2021).
96. Meyruey, S., Chable, V., Fievet, J. & AgroParisTech. *Analyse de La Diversité Génétique Du Sarrasin Pour l'élaboration d'une Stratégie de Sélection Paysanne*. vol. 1 (2014).
97. Farine de blé noir de Bretagne. *Wikipédia* (2024).
98. Grenier, O. Comparaison variétale de sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) en champ et évaluation de ses réponses aux basses températures. (2023).
99. Rauf, M. *et al.* Evaluation of *Fagopyrum esculentum* Moench germplasm based on agromorphological traits and the rutin and quercetin content of seeds under spring cultivation. *Genet. Resour. Crop Evol.* **67**, 1385–1403 (2020).
100. Megherbi, A., Mehdadi, Zoheir, Toumi, Fawzia, Moueddene, Kada & Bouadjra, S. E. B. Tolérance à la sécheresse du blé dur (*Triticum durum* Desf.) et identification des paramètres morpho-physiologiques d'adaptation dans la région de Sidi Bel-Abbès (Algérie occidentale). *Acta Bot. Gallica* **159**, 137–143 (2012).
101. Cawoy, V., Ledent, J.-F., Kinet, J.-M. & Jacquemart, A.-L. Floral Biology of Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Eur. J. Plant Sci. Biotechnol.* **3**, 1–9 (2009).
102. Fesenko, I. N. Inheritance of flower homostyly of autogamous species *Fagopyrum tataricum* Gaertn. in interspecific crosses with heterostylous cross-pollinator *F. cymosum* Meisn | Request PDF. *ResearchGate* (2010) doi:10.3103/S1068367410050022.
103. Ghiselli, L. *et al.* Agronomic and Nutritional Characteristics of Three Buckwheat Cultivars Under Organic Farming in Three Environments of the Garfagnana Mountain District. *Ital. J. Agron.* **11**, 188–194 (2016).
104. Aubert, L. & Quinet, M. Comparison of Heat and Drought Stress Responses among Twelve Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) Varieties. *Plants* **11**, 1517 (2022).
105. Knicky, M., Zamaratskaia, G. & Fogelberg, F. Yield and protein composition in seeds of four buckwheat (*Fagopyrum* sp.) cultivars cropped in Sweden. *Agric. Food Sci.* **33**, (2024).
106. Lepretre, F. Compte-rendu : Projet Sarrasin de Pays. (2016).
107. Zwinger, S., Schaubert, S., Trangsrud, O., Podoll, T. & Kragnes, V. Organic Evaluation and Increase of a Determinate Buckwheat Variety. (2014).
108. Ghiselli, L., Romagnoli, S., Tallarico, R., Concezzi, L. & Benedettelli, S. Comparison of 4 Buckwheat Cultivars and 2 Planting Densities in 2 Mountain Places of Umbria (Central Italy). *Int. J. Environ. Agric. Biotechnol.* **2**, 1025–1031 (2017).
109. Kolarić, L. *et al.* Buckwheat Yield Traits Response as Influenced by Row Spacing, Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Management. *Agronomy* **11**, 2371 (2021).
110. Zhang, K. *et al.* Comparative and population genomics of buckwheat species reveal key determinants of flavor and fertility. *Mol. Plant* **16**, 1427–1444 (2023).
111. MHR. Buckwheat - Agrolitpa. <https://www.agrolitpa.lt/Products/seeds/spring-cereals/buckwheat/>.
112. Amelin, A. V., Fesenko, A. N., Chekalin, E. I., Fesenko, I. N. & Zaikin, V. V. Higher yielding varieties of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) with determinate growth habit (single mutation det) manifest higher photosynthesis rate at stage of grain filling. *Acta Agric. Slov.* **115**, (2020).

113. igarden.decorexpo.com. Variétés de sarrasin: combien de types de sarrasin existe-t-il. <https://igarden.decorexpro.com/posadka/ogorod/drugie-rasteniya/grechka/raznovidnosti-sortov-grechki-ih-opisanie-i-harakteristika.html#i-12>.
114. GAB/FRAB. Fiche technique grande culture n°27 Sarrasin. https://www.agrobio-bretagne.org/voy_content/uploads/2025/02/FICHE_TK_CULTURE-27_WEB.pdf?utm_source=chatgpt.com.
115. Les BIOS du Gers. Fiche technique sarrasin. https://gabb32.org/wp-content/uploads/2022/04/2.5-Fiche-technique-sarrasin-1.pdf?utm_source=chatgpt.com (2020).
116. Salmankhan, R. M., Lalitha, B. S., Murthy, K. N. K., Jayadeva, H. M. & Kumar, T. L. M. Effect of different Dates of Sowing, Spacing and Nutrient Levels on Growth and Yield of Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* L.). (2021).
117. Zhang, J. *et al.* Path Analysis on the Meteorological Factors Impacting Yield of Tartary Buckwheat at Different Sowing Dates. *Agronomy* **15**, 950 (2025).
118. Vogt-Kaute, W. *et al.* ECOBREED FARMERS PARTICIPATORY FIELD TRIALS. https://www.kis.si/f/docs/Druge_publikacije/ecobreed_farmers_participatory_field_trials_2021_CIP_oct_2022.pdf?utm_source=chatgpt.com (2021).
119. Rapport_GRENeRA-EPICgridPIRENE.pdf. https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/77513/1/Rapport_GRENeRA-EPICgridPIRENE.pdf.
120. Toffoli, M. D., Oost, J.-F. & Lambert, R. Impact de la destruction de prairie sur le reliquat d'azote et la gestion de la fertilisation azotée. *Biotechnol Agron Soc Env.* (2013).
121. Protect'eau, Agr'eau & SPW. Impact des successions culturales sur la qualité de l'eau. https://www.protecteau.be/sites/default/files/2021-08/impact_successions_culturelles_sur_eau.pdf?utm_source=chatgpt.com.
122. Agricultures et territoires. Fiche technique sarrasin. https://opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=101932 (2020).
123. Deillon, S. Une plante agréable à cultiver mais difficile à récolter et à commercialiser. *Dossier/Cultures spéciales* 1 (2019).
124. Selwal, N., Bedi, M., Hamid, S. & Pujari, M. Buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) Response and Tolerance to Abiotic Stress. in *Omics Approach to Manage Abiotic Stress in Cereals* (ed. Acharya, K.) 575–597 (Springer Nature Singapore, Singapore, 2022). doi:10.1007/978-981-19-0140-9_24.
125. Gavric, T. *et al.* INFLUENCE OF METEOROLOGICAL PARAMETERS ON THE YIELD AND CHEMICAL COMPOSITION OF COMMON BUCKWHEAT (*Fagopyrum esculentum* Moench). *J. Agric. For.* **64**, (2018).
126. Płazek, A., Kopeć, P., Dziurka, M. & Słomka, A. The yield of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) depends on the genotype but not on the Pin-to-Thrum ratio. *Sci. Rep.* **13**, 16022 (2023).
127. Ceglar, A., Zampieri, M., Toreti, A. & Dentener, F. Observed Northward Migration of Agro-Climate Zones in Europe Will Further Accelerate Under Climate Change. *Earths Future* **7**, 1088–1101 (2019).
128. European environment Agency. The major soil types of Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/the-major-soil-types-of-europe> (2010).
129. Savin, R., Calderini, D. F., Slafer, G. A. & Abeledo, L. G. Final grain weight in wheat as affected by short periods of high temperature during pre- and post-anthesis under field conditions. *Funct. Plant Biol.* **26**, 453 (1999).

130. Ben Mariem, S. *et al.* Climate Change, Crop Yields, and Grain Quality of C3 Cereals: A Meta-Analysis of [CO₂], Temperature, and Drought Effects. *Plants* **10**, 1052 (2021).
131. Altenbach, S. B. *et al.* Temperature, Water and Fertilizer Influence the Timing of Key Events During Grain Development in a US Spring Wheat. *J. Cereal Sci.* **37**, 9–20 (2003).
132. Romanovskaja, D., Razukas, A. & Asakaviciute, R. Influence of Morphostructural Elements for Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) Productivity in Different Agricultural Systems. *Plants* **11**, 2382 (2022).
133. SPW. Protéines végétales en Wallonie, États des lieux et perspectives. <https://federationwallonnedelagriculture.be/wp-content/uploads/2024/08/Rapport-proteines-vegetales-2023.pdf> (2022).
134. SPW. Pomme de terre : produits, charges et marge brute. *Etat de l'Agriculture Wallonne* https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-C_III_b_8.html (2024).
135. SPW. Productions végétales en Wallonie. *Etat de l'Agriculture Wallonne* <https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW2.html> (2024).
136. SPW. Froment d'hiver : produits, charges et marge brute. *Etat de l'Agriculture Wallonne* https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-C_III_b_2.html (2024).
137. SPW. Escourgeon : produits, charges et marge brute. *Etat de l'Agriculture Wallonne* https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-C_III_b_3.html (2024).
138. Strahm, S., Hiltbrunner, J. & Füglistaller, D. Une culture délaissée aux nombreux atouts. *Revue UFA* <https://www.ufarevue.ch/fre/production-vegetale/sarrasin>.
139. Buckwheat Genome DataBase (BGDB). <https://buckwheat.kazusa.or.jp/>.

13 Annexes

13.1 Compléments d'informations sélection du sarrasin

Des récentes avancées ont permis de réduire les limitations de sélections grâce au développement de variétés auto-compatibles, obtenues à partir de variants isolés de populations naturelles ou par croisements interspécifiques entre *Fagopyrum esculentum* et *Fagopyrum homotropicum*⁷⁸. Ces lignées auto-compatibles offrent plusieurs avantages : elles facilitent les analyses génétiques en permettant la production de populations ségrégantes (comme les populations F2) et de lignées recombinantes endogames. Cependant, l'utilisation continue de variétés auto-compatibles présente des défis, tels que la dépression de consanguinité due à l'autofécondation répétée ou leur développement pour des régions du mondes spécifiques qui peut être long et complexe. Ainsi, une méthode de sélection combinant variétés auto-compatibles et auto-incompatibles a été suggérée pour optimiser l'amélioration génétique et est visible sur la Figure 38⁷⁸. Ce schéma illustre un système de sélection génétique pour le sarrasin, combinant des plantes auto-incompatibles (SI) et auto-compatibles (SC). Les valeurs entre parenthèses indiquent le pourcentage de contribution génétique d'une lignée parentale. Les allèles représentés sont : **S**, qui contrôle le phénotype des fleurs longistyle; **s**, qui contrôle le phénotype des fleurs brévistyle ; et **Sh**, qui contrôle le phénotype des fleurs "long-homostyle". La relation de dominance entre ces allèles est la suivante : **S** > **Sh** > **s**. Par ailleurs, **A** désigne un allèle dominant du type sauvage, tandis que **a** représente un allèle mutant aux caractéristiques agronomiques intéressantes.

Dans ce processus, les plantes marquées d'un astérisque sont des plantes "brévistyle" issues de variétés élités SI. Les plantes marquées de deux astérisques sont des plantes "long-homostyle" SC obtenues par mutagenèse ou par croisements entre des variétés locales SI et des plantes SC expérimentales, telles que "Norin-PL1". Enfin, les plantes marquées de trois astérisques sont des plantes "longistyle" provenant de variétés élités SI.

Au niveau de la génération BC₄F₁, il est essentiel d'utiliser un grand nombre de plantes "longistyle" afin de prévenir la dépression consanguine dans les générations suivantes. La sélection assistée par marqueurs (MAS) est utilisée tout au long du processus pour guider la sélection des génotypes souhaités.

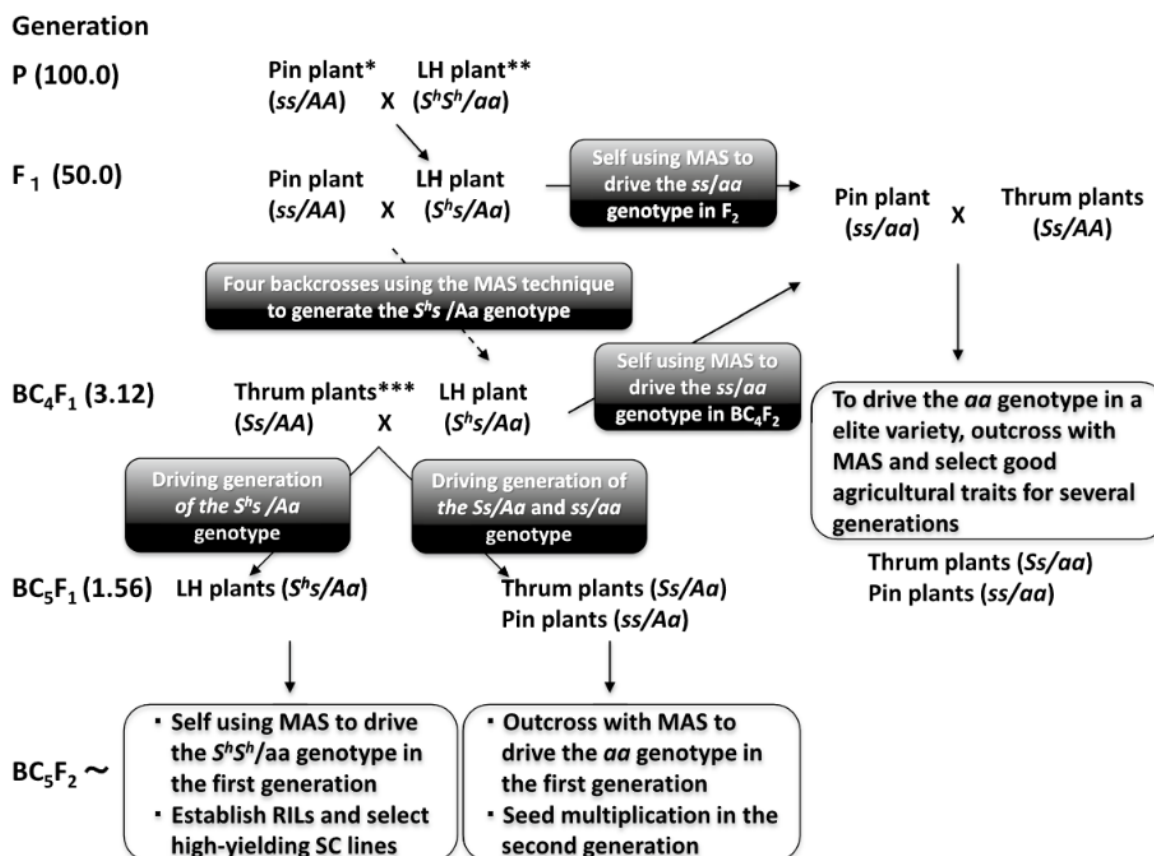


Figure 38 Schéma de sélection sarrasin avec brévistyle (pin) et longistyle (thrum) ⁷⁸

Les traits agronomiques essentiels du sarrasin, tels que le rendement, la résistance à la sécheresse, la résistance à la verse, la germination avant récolte et la sensibilité à la photopériode, sont principalement contrôlés par des « *Quantitative Trait Loci* » (QTL). Une carte génétique pour l'analyse des QTL est désormais disponible, ainsi qu'une base de données du génome du sarrasin¹³⁹.

Enfin, bien que les biotechnologies, comme les modifications génétiques (OGM), puissent théoriquement offrir des solutions, leur acceptation commerciale reste globalement faible. Dans certains pays comme le Japon, les consommateurs optent pour des aliments considérés comme naturels et sains et non OGM⁷⁸.

13.2 Tableau de provenance des variétés étudiées

Tableau 18 Informations sur les 16 variétés utilisées en champs et/ou multiplication

N°	Cultivar	Détermination	Provenance	Pays d'Origine	Essais à LLN	Essais GBX	Essais Grand-leez	Multiplication
1	Siva	Déterminée	CRI, Prague (D. Janovska)	Slovénie	X			X
2	Lileja	Indéterminée	Cepicop *	Allemagne	X	X	X	X
3	La Harpe	Indéterminée	Gired	France	X	X	X	X
4	Drushina	Déterminée	Omya (Schweiz) AG, Suisse (T. Schmid)	/	X		X	X
5	Devyatka	Déterminée	Omya (Schweiz) AG, Suisse (T. Schmid)	Russie	X		X	X
6	Darja	Indéterminée	University of Ljubljana (Kreft)	Slovénie	X		X	X
7	Smuga	Indéterminée	MHR, Poland	/	X	X	X	
8	Korona	Indéterminée	MHR, Poland	/	X		X	X
9	Kora	Indéterminée	CRI, Prague (D. Janovska)	Pologne	X	X	X	
10	Panda	Indéterminée	CRI, Prague (D. Janovska)	Pologne	X		X	
11	Lifago	Indéterminée	Cepicop*	Germany		X	X	
12	Spacinka	Indéterminée	Cepicop*	Slovaquie		X	X	
13	Aiva	Indéterminée	Cepicop*	Lettonie		X	X	
14	Hruzowska	Indéterminée	CRI, Prague (D. Janovska)	Pologne				X
15	BGZ	Indéterminée	Tilburg (Marcel Horck)	Pays-Bas				X
16	Nojaï	Indéterminée	Cepicop*	/				X

* graines achetées par Cepicop, / = origine inconnue

13.3 Autre méthode de multiplication par élevage de syrphes

À l'origine, la solution reposait sur l'élevage de syrphes et leur introduction sous pallox, mais cette méthode s'est révélée trop exigeante en termes de temps et de ressources. Elle nécessitait la culture continue de féverole, utilisée à la fois comme nourriture pour les pucerons et comme support pour la ponte des syrphes. En parallèle, il fallait maintenir un élevage de pucerons pour nourrir les larves de syrphes, tout en assurant un apport régulier de pollen frais pour les adultes. Ce système reposait donc sur un équilibre délicat entre la croissance de la féverole à Gembloux et LLN, la survie des pucerons et le développement des syrphes à différents stades de leur cycle de vie. Face à cette complexité, une solution bien plus simple s'est imposée : capturer directement les pollinisateurs présents dans les environs, à l'aide d'un aspirateur buccal, dans des zones où le sarrasin n'était pas présent (voir Figure 20).

13.4 Tableau degrés jour complet pour atteindre les différents stades par variétés et par site

Tableau 19 Tableau degrés-jour pour atteindre les différents stades de développement phénologique du sarrasin par variétés sur le site de Louvain-la-Neuve

Variétés	Stade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Siva	251,5	251,5	297,5	423,8	504,1	767,5	1056,3	1210,0
Lileja	251,5	251,5	251,5	343,4	504,1	650,5	793,6	914,8
La Harpe	251,5	251,5	320,4	463,9	540,7	873,5	1095,9	1238,6
Drushina	251,5	251,5	251,5	343,4	504,1	650,5	819,8	1187,3
Devyatka	251,5	251,5	251,5	343,4	540,7	650,5	885,8	1210,0
Darja	251,5	251,5	343,4	504,1	577,3	971,4	1101,7	1238,6
Smuga	251,5	251,5	251,5	343,4	504,1	793,6	885,8	1210,0
Korona	251,5	251,5	297,5	423,8	504,1	767,5	899,6	1181,5
Kora	251,5	251,5	251,5	343,4	540,7	767,5	885,8	1164,6
Panda	251,5	251,5	251,5	343,4	504,1	738,3	899,6	1210,0

Tableau 20 Tableau degrés-jour pour atteindre les différents stades de développement phénologique du sarrasin par variétés sur le site de Louvain-la-Neuve

Variétés	Stade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
La Harpe200	127,2	265,7	405,1	492,9	682,8	902,1	1016,3	/
Lileja200	127,2	265,7	321,3	427,1	492,9	647,2	789,4	845,8
Spacinka200	127,2	265,7	342,3	449,0	531,5	873,9	1041,3	/
Lifago200	127,2	265,7	449,0	471,0	492,9	682,8	845,8	902,1
Kora200	127,2	265,7	321,3	405,1	492,9	718,3	789,4	1153,8
Aiva200	127,2	265,7	321,3	427,1	492,9	682,8	873,9	1239,4
Smuga150	127,2	265,7	321,3	427,1	531,5	682,8	902,1	1234,5
La Harpe250	127,2	265,7	405,1	492,9	647,2	873,9	1003,2	/
La Harpe150	127,2	265,7	405,1	492,9	682,8	902,1	1028,3	/
Lileja150	127,2	265,7	492,9	492,9	492,9	789,4	873,9	902,1

Tableau 21 Tableau degrés-jour pour atteindre les différents stades de développement phénologique du sarrasin par variétés sur le site de Grand-Leez.

Variétés	Stade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Aiva	104,9	242,0	447,0	447,0	534,8	650,5	689,1	831,3
Darja	104,9	242,0	242,0	447,0	612,0	/	/	/
Kora	104,9	242,0	447,0	447,0	534,8	612,0	783,9	831,3
Korona	104,9	242,0	447,0	447,0	534,8	689,1	736,5	831,3
La Harpe	104,9	242,0	242,0	447,0	612,0	831,3	/	/
Lifago	104,9	242,0	395,8	447,0	534,8	689,1	760,2	887,7
Lileja	104,9	242,0	447,0	447,0	534,8	573,4	689,1	831,3
Panda	104,9	242,0	447,0	447,0	534,8	689,1	689,1	831,3
Smuga	104,9	242,0	447,0	447,0	534,8	689,1	831,3	994,1
Spacinka	104,9	242,0	447,0	447,0	573,4	683,1	944,0	1044,1
Drushina	104,9	242,0	447,0	447,0	534,8	689,1	689,1	831,3
Devyakta	104,9	242,0	447,0	447,0	534,8	689,1	689,1	/

13.5 Données de Grand-Leez

Le nombre de °C/J atteints en fonction des stades de développement pour le site de Grand-Leez est également présenté dans le même format à la Figure 39. Certaines variétés, comme La Harpe, n'ont même pas atteint le stade 7. Le nombre de répétitions par variété étant plus limité, il est plus difficile de faire ressortir des groupes distincts.

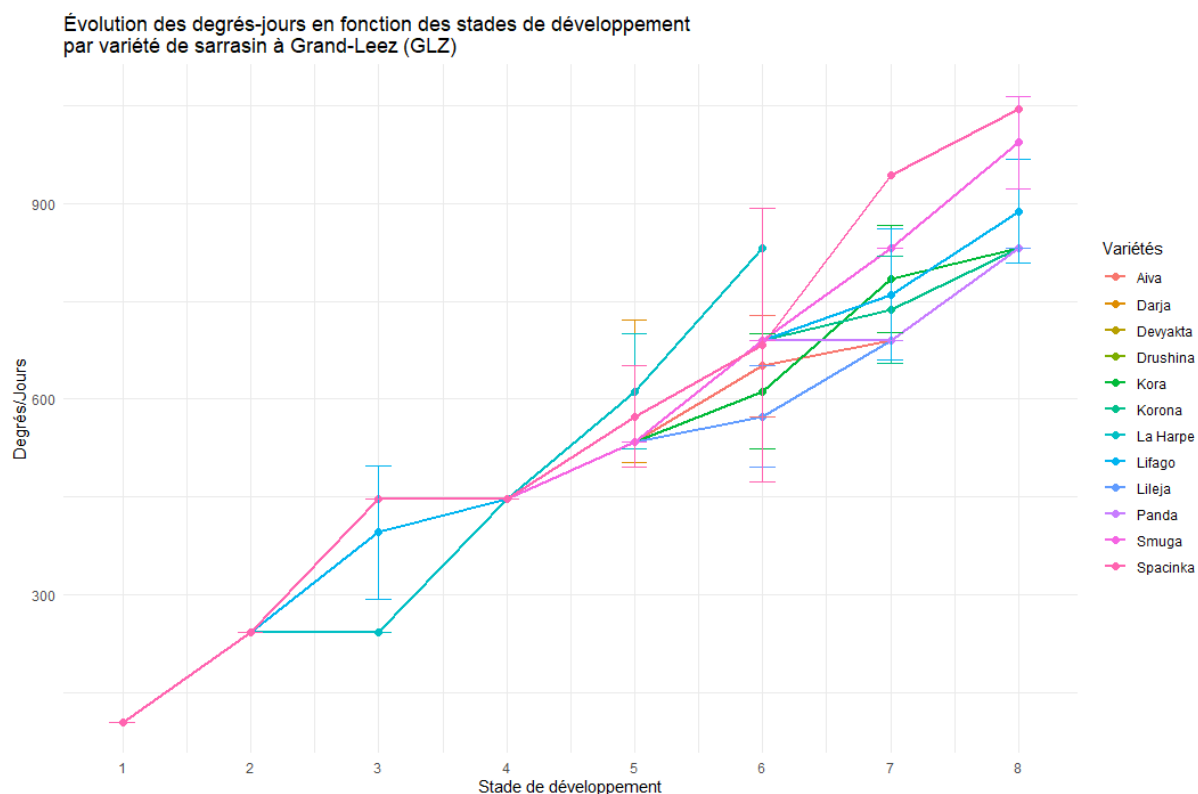


Figure 39 Évolution du nombre de degrés jours nécessaires pour atteindre les différents stades de développement phénologiques du sarrasin en fonction des variétés pour le site de Grand-Leez

13.6 Test Hypothèse ANOVA sur les données

Les paramètres avec au moins une étoile (*) ne respectent pas les hypothèses de l'anova et ont donc été traité avec des test non paramétriques comme kruskal-wallis ou Dunn.

Tableau 22 Tableau de vérification des hypothèses de l'ANOVA par test de Shapiro-Wilk et Levene test pour les données de LLN

Paramètre	Shapiro-Wilk	Levene Test
Hauteur_stade7_8_(cm)	—	—
Embranchement	**	—
Diamètre_des_tiges_(mm)	—	—
Longueur_des_entrenoeuds_(mm)	—	.
Longueur_de_petioles_(mm)	—	—
Longueur_de_limbes_(mm)	—	—
Largeur_de_limbes_(mm)	—	—
Longueur_de_racèmes_(mm)	.	—
Nombre_de_feuilles	—	.
Nombre_de_racèmes	—	—
Hauteur_stade3_4_(cm)	—	—
Poids_brut_(Kg/ha)	—	—
Humidité_(rel)	***	**
Poidshectolitre_(Kg/hL)	—	***
poids_brut_corrhumid	—	—
Rendement_(Kg/ha)	—	—
PMG_(g/100grains)	—	—

Tableau 23 Tableau de vérification des hypothèses de l'ANOVA par test de Shapiro-Wilk et Levene test pour les données destructives de LLN

Variable	Shapiro-Wilk	Levene Test
Feuille_princi	—	—
Feuille_ramif	***	—
Inflo_princi	*	—
Inflo_ramif	***	—
Ramification	***	—
Nœud_inflo	—	—
Poids_frais_feuille	***	—
Poids_sec_inflo	***	—

Tableau 24 Tableau de vérification des hypothèses de l'ANOVA par test de Shapiro-Wilk et Levene test pour les données de Gembloux

Variable	Shapiro-Wilk	Levene Test
Hauteur_stade7_8	—	—
Embranchement	*	—
Diamètre_des_tiges	—	—
Longueur_des_entrenoeuds	—	—
Longueur_de_petioles	—	*
Longueur_de_limbes	—	—
Largeur_de_limbes	—	—
Longueur_de_racèmes	***	—
Nombre_de_feuilles	**	*
Nombre_de_racèmes	—	***
Hauteur_stade3_4	—	—
Humidité	—	—
Poidshectolitre	—	—
Rdt	—	—

13.7 Suppléments d'informations modèles GLM

Dans le but de mieux comprendre les facteurs influant les rendements des variétés de sarrasin cultivées à LLN, une analyse par modèle linéaire généralisé (GLM) a été menée. Les variables dépendantes étudiées sont le rendement (kg/ha) et le poids de mille grains (PMG), tandis que les autres paramètres morphologiques et agronomiques ont été utilisés comme variables explicatives. Des modèles préalables intégrant les effets de la disposition spatiale (effets colonne et ligne) ont d'abord été testés, mais ceux-ci n'ont révélé aucun effet significatif.

13.7.1 GLM complet RDT

Un premier modèle complet a été construit afin d'évaluer l'impact de l'ensemble des variables observées sur le rendement. Pour les variables catégorielles, les niveaux de référence ont été définis de manière cohérente : les niveaux les plus faibles pour les échelles d'intensité (comme la verse), et la variété Darja comme référence arbitraire pour la variable « variété ». Les résultats de ce modèle (Tableau 25) indiquent que Drushina et avait un rendement significativement supérieur à celui de Darja, avec un seuil de confiance de 5 %. Les variétés Kora, Korona, Panda et Smuga sont également significativement différentes mais seulement à un seul de 10%. Le nombre de feuilles relevé au stade 3-4 apparaît également comme un facteur influençant positivement le rendement, avec un effet estimé à $+36 \pm 20,4$ kg/ha par feuille supplémentaire, significatif au seuil de 10 %.

Tableau 25 Résultats de la modélisation GLM du modèle complet avec comme variable dépendante le rendement (A) et le tableau d'analyse de la variance de ce modèle (B)

RdtC	A	estimate	std.error	statistic	p.value	Signif.	Effet	B	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
(Intercept)		-747.37	1054.46	-0.71	0.4901		—		—	—	—	—	—
VariétésDevyakta		1008.57	617.18	1.63	0.1245		Variétés		9	8779923.16	975547.02	22.68	7.44e-07
VariétésDrushina		1334.33	566.06	2.36	0.0335	*	—		—	—	—	—	—
VariétésKora		1217.65	605.77	2.01	0.0641	.	—		—	—	—	—	—
VariétésKorona		1243.59	597.36	2.08	0.0562	.	—		—	—	—	—	—
VariétésLa Harpe		-353.20	225.35	-1.57	0.1394		—		—	—	—	—	—
VariétésLileja		1123.23	640.71	1.75	0.1014		—		—	—	—	—	—
VariétésPanda		1193.68	594.86	2.01	0.0645	.	—		—	—	—	—	—
VariétésSiva		47.63	730.15	0.07	0.9489		—		—	—	—	—	—
VariétésSmuga		1075.82	610.42	1.76	0.0998	.	—		—	—	—	—	—
Hauteur2		9.22	7.32	1.26	0.2289		Hauteur2		1	286116.89	286116.89	6.65	0.0218
Embranchement		-65.66	103.08	-0.64	0.5344		Embranchement		1	21850.54	21850.54	0.51	0.4877
Diamètre_des_tiges		-28.78	93.01	-0.31	0.7615		Diamètre_des_tiges		1	224.65	224.65	0.01	0.9434
Longueur_des_entrenoeds		11.30	7.47	1.51	0.1527		Longueur_des_entrenoeds		1	117386.37	117386.37	2.73	0.1208
Verse2		-188.52	147.38	-1.28	0.2216		Verse		2	114638.85	57319.42	1.33	0.2953
Verse3		-105.22	201.59	-0.52	0.6099		—		—	—	—	—	—
Longueur_de_petioles		0.36	6.73	0.05	0.9586		Longueur_de_petioles		1	530.68	530.68	0.01	0.9131
Longueur_de_limbes		1.28	11.60	0.11	0.9140		Longueur_de_limbes		1	11.78	11.78	0.00	0.9870
Largeur_de_limbes		-5.52	16.78	-0.33	0.7473		Largeur_de_limbes		1	112492.93	112492.93	2.62	0.1281
Longueur_de_racemes		-0.06	23.29	0.00	0.9979		Longueur_de_racemes		1	929.27	929.27	0.02	0.8852
Taux_avortement_des_fleurs2		-13.20	108.97	-0.12	0.9053		Taux_avortement_des_fleurs		2	168945.40	84472.70	1.96	0.1771
Taux_avortement_des_fleurs3		-270.07	165.42	-1.63	0.1248		—		—	—	—	—	—
Densité_de_racemes2		-431.74	352.32	-1.23	0.2406		Densité_de_racemes		1	45939.34	45939.34	1.07	0.3189
Densité_de_racemes3		—	—	—	—		—		—	—	—	—	—
Nombre_de_feuilles		36.00	20.40	1.76	0.0995	.	Nombre_de_feuilles		1	162427.52	162427.52	3.78	0.0724
Nombre_de_racemes		-24.23	21.56	-1.12	0.2800		Nombre_de_racemes		1	43751.60	43751.60	1.02	0.3303
Hauteur1		6.59	7.27	0.91	0.3801		Hauteur1		1	35335.83	35335.83	0.82	0.3801
Residuals		—	—	—	—		—		14	602200.89	43014.35	—	—

Le coefficient de détermination brut (R^2) du modèle s'élève à 94,3 %, traduisant une bonne part de variance expliquée par les variables. Toutefois, le R^2 ajusté chute à 84 %, ce qui reflète une probable surabondance de variables peu pertinentes par rapport au nombre

d'observations au vu de l'écart des deux R^2 . Toutefois le test global du modèle est fortement significatif ($F=9,2$ $p=4.571 \times 10^{-5}$) indiquant que le modèle explique une part significative de la variance. Ces résultats ont conduit à la construction d'un second modèle, restreint, fondé uniquement sur les variables présentant une influence marquée dans le modèle complet. Ce modèle restreint est détaillé dans le corps du texte principal. Les graphes de vérification des hypothèses et des points influents ne remettent pas en cause la pertinence des modèles

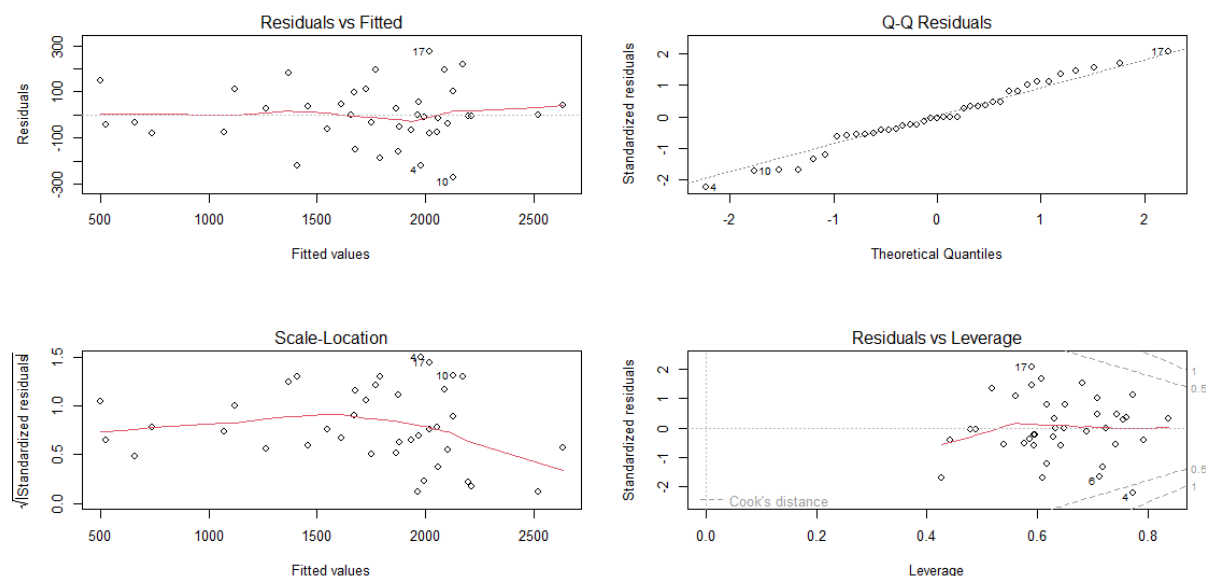


Figure 40 Vérification graphique des hypothèses de l'ANOVA et des points influents pour le modèle du rendement complet

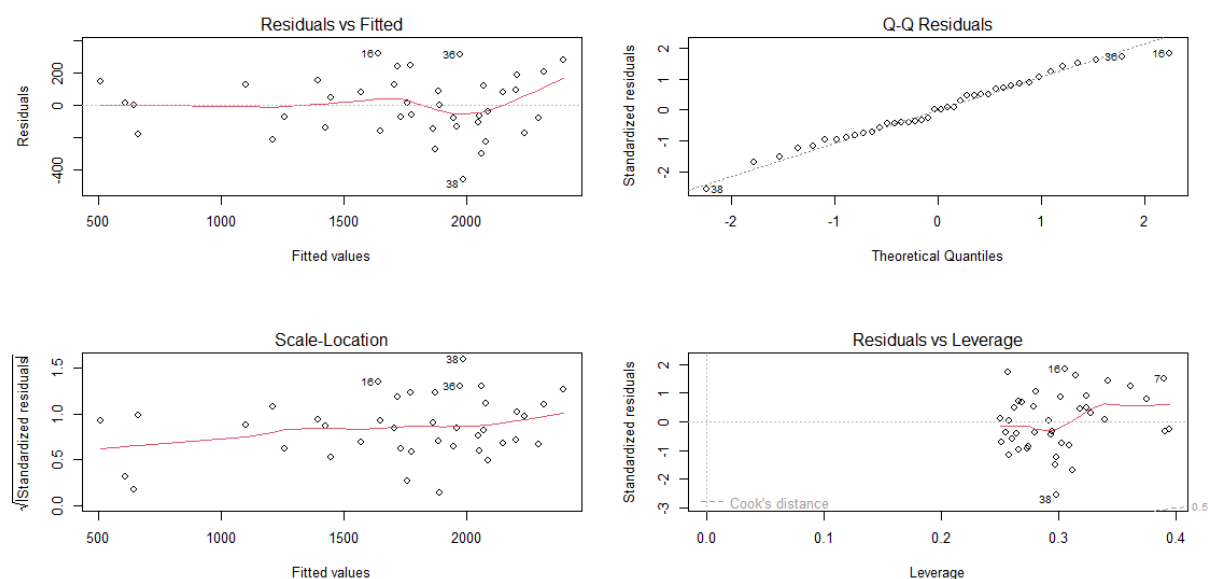


Figure 41 Vérification graphique des hypothèses de l'ANOVA et des points influents pour le modèle du rendement restreint

13.7.2 GLM complet PMG

Une analyse par modèle linéaire généralisé (GLM) a également été menée sur le poids de mille grains (PMG), en utilisant une approche similaire à celle employée pour le rendement. Toutes les variables morphologiques et agronomiques ont été intégrées dans un premier modèle complet, afin d'identifier les facteurs influençant significativement cette composante essentielle du rendement. Comme pour le modèle précédent, les niveaux de référence ont été fixés en prenant les niveaux les plus faibles pour les variables catégorielles (par exemple, pour l'intensité de la verse) et la variété Darja comme référence arbitraire pour la variable « variété ».

Les résultats de ce modèle complet, présentés dans le Tableau 26, indiquent que plusieurs variétés présentent un PMG significativement supérieur à celui de Darja : Devyatka et Lileja (niveau de confiance de 0,1 %), Drushina (0,01 %), Panda (1 %) et Korona (10 %). Par ailleurs, deux facteurs ont un effet négatif sur le PMG : le degré d'avortement des fleurs lors de la deuxième prise de mesure (avec le niveau faible comme référence) et le nombre d'inflorescences relevé lors de la première prise de mesure (référence à 0 inflorescence). Une augmentation de ces deux paramètres est donc associée à une diminution du PMG.

Tableau 26 Résultats de la modélisation GLM du modèle complet avec comme variable dépendante le PMG (A) et le tableau d'analyse de la variance de ce modèle (B)

PC	A	estimate	std.error	statistic	p.value	Signif.	Effet	B	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
(Intercept)		41.36	5.30	7.81	1.81e-06	***	—		—	—	—	—	—
VariétésDevyakta		-1.84	3.10	-0.59	0.5622		Variétés		9	965.23	107.25	98.87	4.14e-11
VariétésDrushina		1.11	2.84	0.39	0.7032		—		—	—	—	—	—
VariétésKora		-6.48	3.04	-2.13	0.0515	.	—		—	—	—	—	—
VariétésKorona		-2.60	3.00	-0.87	0.4000		—		—	—	—	—	—
VariétésLa Harpe		-1.09	1.13	-0.96	0.3510		—		—	—	—	—	—
VariétésLileja		0.94	3.22	0.29	0.7733		—		—	—	—	—	—
VariétésPanda		-2.34	2.99	-0.78	0.4474		—		—	—	—	—	—
VariétésSiva		-7.37	3.67	-2.01	0.0642	.	—		—	—	—	—	—
VariétésSmuga		-5.22	3.07	-1.70	0.1109		—		—	—	—	—	—
Hauteur2		-0.13	0.04	-3.42	0.0042	**	Hauteur2		1	40.87	40.87	37.68	2.57e-05
Embranchement		0.59	0.52	1.14	0.2729		Embranchement		1	0.13	0.13	0.12	0.7296
Diamètre.des.tiges		0.28	0.47	0.61	0.5538		Diamètre.des.tiges		1	12.25	12.25	11.29	0.0047
Longueur.des.entrenoeds		0.06	0.04	1.52	0.1516		Longueur.des.entrenoeds		1	1.95	1.95	1.80	0.2014
Verse2		1.15	0.74	1.55	0.1439		Verse		2	4.35	2.17	2.00	0.1716
Verse3		1.29	1.01	1.28	0.2226		—		—	—	—	—	—
Longueur.de.petioles		-0.03	0.03	-1.02	0.3259		Longueur.de.petioles		1	1.81	1.81	1.67	0.2171
Longueur.de.limbes		0.02	0.06	0.40	0.6928		Longueur.de.limbes		1	10.49	10.49	9.67	0.0077
Largeur.de.limbes		-0.11	0.08	-1.30	0.2137		Largeur.de.limbes		1	0.56	0.56	0.52	0.4839
Longueur.de.racèmes		0.08	0.12	0.73	0.4797		Longueur.de.racèmes		1	0.47	0.47	0.43	0.5220
Taux.avortement.des.fleurs2		0.33	0.55	0.60	0.5596		Taux.avortement.des.fleurs		2	12.60	6.30	5.81	0.0146
Taux.avortement.des.fleurs3		-2.80	0.83	-3.37	0.0046	**	—		—	—	—	—	—
Densité.de.racèmes2		3.29	1.77	1.86	0.0839	.	Densité.de.racèmes		1	4.97	4.97	4.58	0.0504
Densité.de.racèmes3		—	—	—	—		—		—	—	—	—	—
Nombre.de.feilles		-0.02	0.10	-0.18	0.8613		Nombre.de.feilles		1	1.05	1.05	0.96	0.3427
Nombre.de.racèmes		-0.32	0.11	-2.94	0.0108	.	Nombre.de.racèmes		1	9.46	9.46	8.72	0.0105
Hauteur1		0.00	0.04	0.07	0.9419		Hauteur1		1	0.01	0.01	0.01	0.9419
Residuals		—	—	—	—		—		14	15.19	1.08	—	—

Ce modèle s'avère globalement très performant : le R² brut atteint 98,6 %, tandis que le R² ajusté, qui tient compte des degrés de liberté, reste élevé à 96,09 %. Le test global du modèle (F-statistic) est hautement significatif, avec une p-valeur de $1,055 \times 10^{-9}$. Toutefois, l'écart léger entre les deux coefficients de détermination laisse supposer que certaines variables incluses n'apportent que peu ou pas d'information explicative. Cela est corroboré par le fait que plusieurs coefficients estimés apparaissent proches de zéro, suggérant un effet négligeable. En conséquence, un modèle restreint a été construit, en ne conservant que les

variables jugées pertinentes : la variété, le diamètre des tiges, la longueur des limbes, le taux d'avortement des fleurs, la densité et le nombre de racèmes. Ce modèle est présenté dans le corps principal du texte. Les graphes de vérification des hypothèses et des points influents ne remettent pas en cause la pertinence des modèles

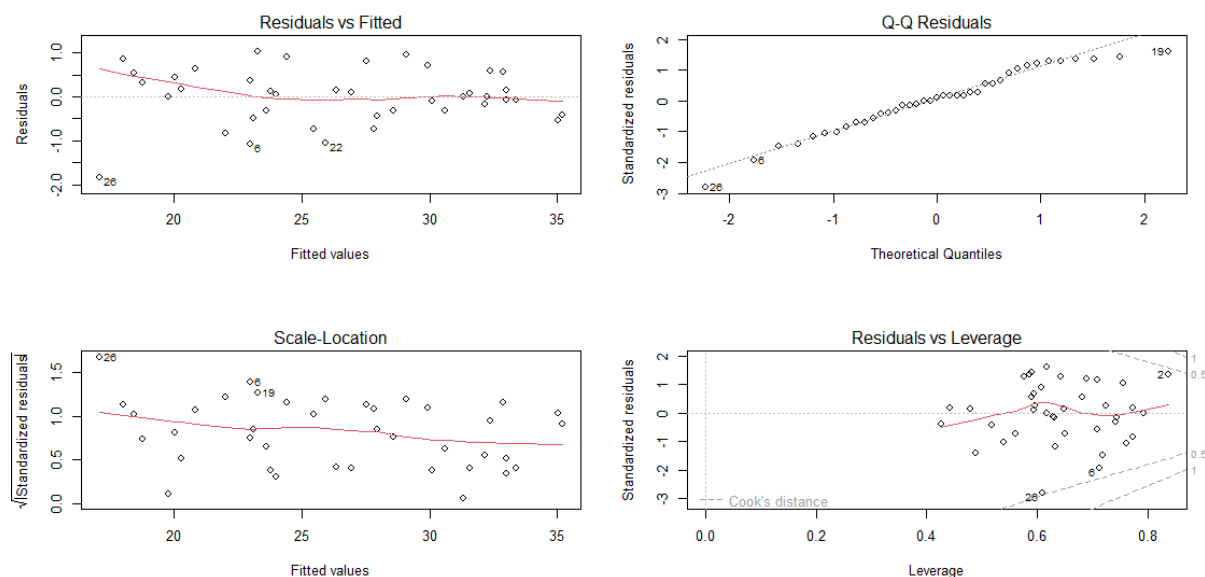


Figure 42 Vérification graphique des hypothèses de l'ANOVA et des points influents pour le modèle du PMG complet

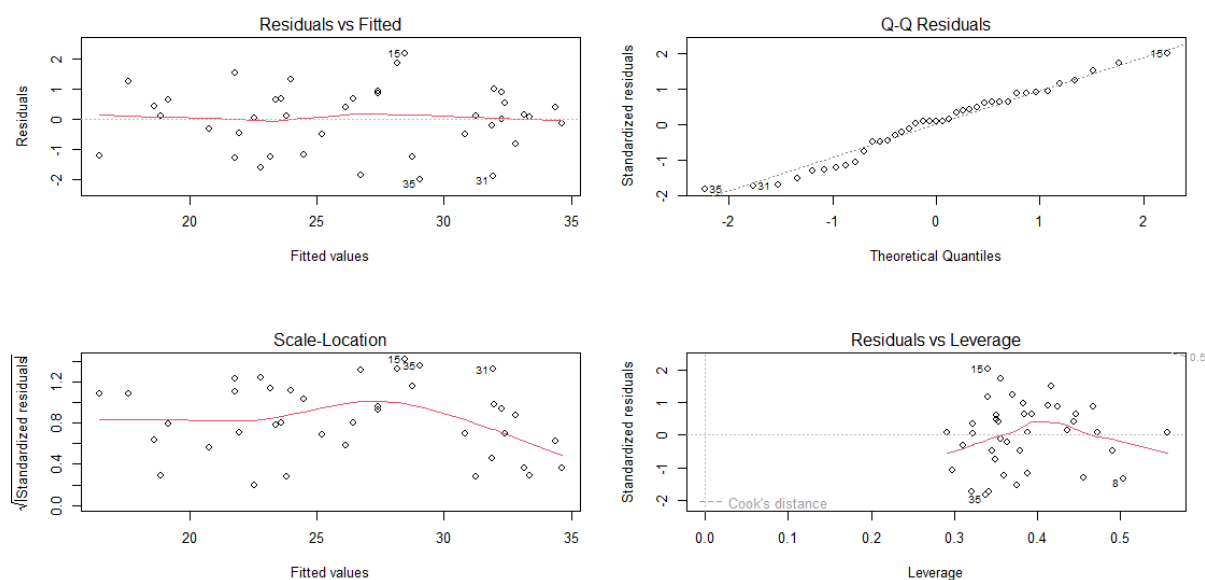


Figure 43 Vérification graphique des hypothèses de l'ANOVA et des points influents pour le modèle du PMG restreint

13.8 Supplément d'informations ACP

Afin d'observer les corrélations, l'influence et le regroupement des différentes variables étudiées, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée.

Les corrélations entre variables continues sont présentées dans le Tableau 18. Certaines variables montrent des corrélations particulièrement fortes, en particulier la hauteur des plantes entre les deux stades de développement, avec un coefficient de corrélation de 0,851, ainsi que le poids brut et le rendement, dont la corrélation atteint 0,997. En raison de cette redondance, certaines variables ont été exclues de l'ACP afin d'éviter les effets de colinéarité : le poids brut, jugé moins informatif que le rendement, ainsi que la hauteur à 25 % de croissance, fortement corrélée au PMG et la deuxième mesure de hauteur.

Tableau 27 Table de corrélations des variables continues mesurées sur le site d'essais de LLN. Plus la couleur est verte, plus les variables sont positivement corrélées ; à l'inverse, plus elle est rouge, plus les variables sont négativement corrélées.

	Hauteur stade 7-8	Embranchement	Diamètre tiges	Longueur entrenoeuds	Longueur petioles	Largeur limbes	Longueur racèmes	Nombre feuilles	Nombre racèmes	Hauteur stade 3-4	Poids brut	Humidité rel	Poidshectolitre	Rdt	PMG
Hauteur stade 7-8	1,000	-0,056	0,458	0,128	0,140	0,448	-0,470	0,684	0,474	0,851	-0,127	-0,192	0,329	-0,116	-0,800
Embranchement	-0,056	1,000	0,116	-0,174	-0,114	0,059	0,337	0,100	0,063	-0,010	-0,251	0,139	-0,076	-0,261	-0,081
Diamètre des tiges	0,458	0,116	1,000	-0,062	-0,246	0,245	-0,075	0,586	0,692	0,559	-0,176	0,227	0,001	-0,191	-0,529
Longueur des entrenoeuds	0,128	-0,174	-0,062	1,000	-0,086	0,373	-0,289	-0,068	0,240	0,222	0,595	0,250	-0,315	0,588	0,056
Longueur de petioles	0,140	-0,114	-0,246	-0,086	1,000	0,153	0,084	-0,012	-0,287	-0,132	-0,167	-0,283	-0,049	-0,156	-0,033
Largeur de limbes	0,448	0,059	0,245	0,373	0,153	1,000	-0,073	0,262	0,348	0,448	-0,107	0,007	-0,172	-0,107	-0,420
Longueur de racèmes	-0,470	0,337	-0,075	-0,289	0,084	-0,073	1,000	-0,186	-0,332	-0,491	-0,026	0,048	-0,436	-0,026	0,469
Nombre de feuilles	0,684	0,100	0,586	-0,068	-0,012	0,262	-0,186	1,000	0,575	0,689	-0,163	0,096	0,277	-0,168	-0,683
Nombre de racèmes	0,474	0,063	0,692	0,240	-0,287	0,348	-0,332	0,575	1,000	0,673	-0,006	0,163	-0,102	-0,016	-0,602
Hauteur stade 3-4	0,851	-0,010	0,559	0,222	-0,132	0,448	-0,491	0,689	0,673	1,000	-0,036	0,033	0,192	-0,039	-0,830
Poids brut	-0,127	-0,251	-0,176	0,595	-0,167	-0,107	-0,026	-0,163	-0,006	-0,036	1,000	0,202	-0,333	0,997	0,384
Humidité relative	-0,192	0,139	0,227	0,250	-0,283	0,007	0,048	0,096	0,163	0,033	0,202	1,000	-0,199	0,129	-0,081
Poidshectolitre	0,329	-0,076	0,001	-0,315	-0,049	-0,172	-0,436	0,277	-0,102	0,192	-0,333	-0,199	1,000	-0,321	-0,292
Rdt	-0,116	-0,261	-0,191	0,588	-0,156	-0,107	-0,026	-0,168	-0,016	-0,039	0,997	0,129	-0,321	1,000	0,399
PMG	-0,800	-0,081	-0,529	0,056	-0,033	-0,420	0,469	-0,683	-0,602	-0,830	0,384	-0,081	-0,292	0,399	1,000

La Figure 44 présente le scree plot, illustrant la part de variance expliquée en fonction du nombre de dimensions retenues dans l'ACP. Étant donné que l'analyse porte sur 12 variables numériques, 12 dimensions sont possibles au maximum. Les deux premières dimensions expliquent respectivement 30,6 % et 16,9 % de la variance totale, pour un total cumulé de 47,5 %.

La position des paramètres mesurés dans les nouvelles dimensions est fournie dans Tableau 28. Ces nouvelles dimensions sont orthogonales entre elles, c'est-à-dire qu'elles sont indépendantes. Chaque variable contribue à toutes les dimensions, bien que certaines contributions soient presque négligeables.

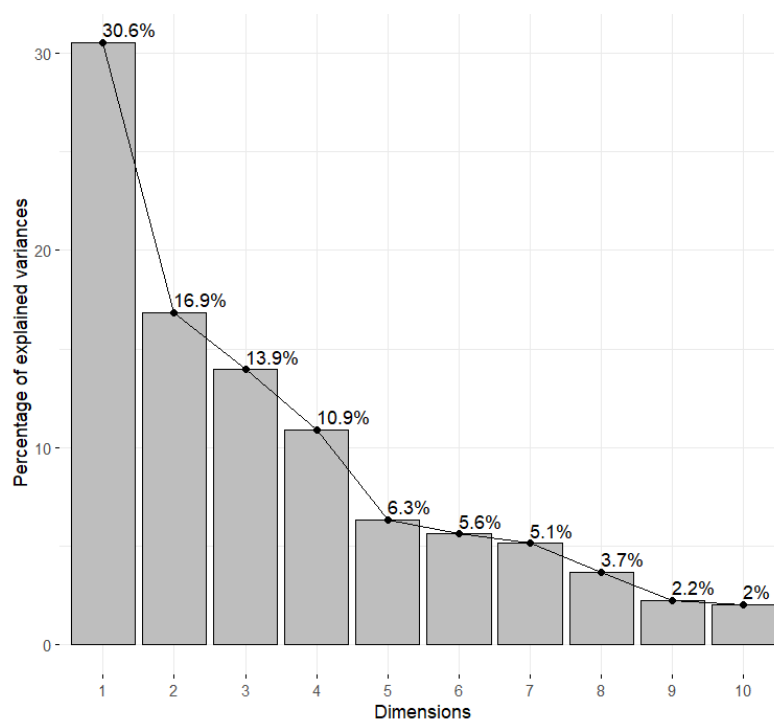


Figure 44 Scree plot représentant la part de la variance expliquée en fonction du nombre de dimensions

Tableau 28 et composition des composantes principales selon les variables continues (B).

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6	Dim.7	Dim.8	Dim.9	Dim.10	Dim.11	Dim.12
Hauteur2	0.846	0.256	0.180	0.251	-0.064	-0.085	-0.060	0.128	0.051	-0.257	0.010	0.152
Embranchement	0.013	-0.183	-0.647	0.141	-0.468	-0.182	-0.512	-0.039	-0.098	0.029	0.045	0.005
Diamètre des tiges	0.717	-0.253	-0.390	0.005	0.223	-0.030	0.248	0.012	-0.363	-0.138	0.059	-0.052
Longueur des entrenœuds	0.105	-0.579	0.654	0.107	0.049	-0.039	-0.292	0.338	-0.074	0.015	-0.030	-0.066
Longueur des pétioles	-0.134	0.458	0.166	0.738	0.042	0.370	-0.075	-0.061	-0.187	0.128	-0.029	0.005
Longueur des racèmes	-0.534	-0.197	-0.590	0.384	-0.056	-0.070	0.270	0.229	0.089	-0.069	-0.188	-0.008
Nombre de feuilles	0.825	0.042	-0.181	0.189	-0.197	0.034	0.241	0.182	0.170	0.246	0.165	-0.034
Nombre de racèmes	0.781	-0.366	-0.088	-0.003	0.305	-0.171	-0.068	-0.121	-0.003	0.268	-0.172	0.075
Humidité relative	0.100	-0.680	-0.124	-0.217	-0.209	0.644	0.028	-0.004	0.012	-0.026	-0.013	0.067
Poids hectolitrique	0.314	0.648	0.069	-0.474	-0.399	0.051	0.067	0.162	-0.172	0.089	-0.151	-0.006
Rendement	0.116	-0.410	0.526	0.242	-0.538	-0.208	0.305	-0.229	-0.041	-0.028	-0.043	-0.018
PMG	-0.885	-0.168	0.086	-0.071	-0.005	-0.183	0.182	0.132	-0.189	0.157	0.114	0.137

13.9 Clustering CAH et K-means

Deux méthodes de classification ont été appliquées pour regrouper les données selon leur similarité : le clustering hiérarchique ascendant (CAH) et la méthode des K-means. Le CAH regroupe progressivement les individus en fonction de leur proximité, sans nécessiter de définir à l'avance le nombre de groupes, en s'appuyant sur une mesure de distance (comme la distance euclidienne) et un critère d'agrégation (comme la moyenne). La méthode des K-means, quant à elle, partitionne les données en k groupes en minimisant la variance intra-cluster, mais exige que ce nombre soit fixé au préalable, cette méthode est itérative et ne donnera pas les mêmes résultats à chaque fois.

Pour estimer le nombre optimal de clusters (k), plusieurs approches sont mobilisées : la méthode du Within Sum of Squares (WSS), qui identifie un point de "coude" au-delà duquel l'ajout de clusters n'améliore plus significativement la compacité ; le Silhouette Score, qui mesure la séparation entre les groupes et se trouve optimal lorsqu'il est maximal ainsi que la Gap Statistic, qui compare la structure des regroupements à celle obtenue par des données aléatoires, le nombre optimal de clusters correspondant à l'écart le plus élevé avant sa diminution.

13.9.1 Clustering

Deux méthodes de clustering ont été testées : le clustering ascendant hiérarchique, qui fournit des résultats fixes et reproductibles, sans aucune part d'aléatoire, et le clustering par K-means, qui intègre un élément d'aléa, produisant ainsi des résultats légèrement différents à chaque itération.

13.9.1.1 Clustering méthode ascendante hiérarchique (CAH)

Pour choisir le nombre de groupe optimal, les trois méthodes de test (Figure 45) permettent d'éviter un choix arbitraire du nombre de clusters et d'optimiser la segmentation des données. Les résultats sont divergents : la méthode du coude reste peu claire mais semble indiquer $K = 7$, le *Silhouette Score* pointe vers $K = 2$, tandis que la *Gap Statistic* suggère $K = 1$, ce qui reviendrait à ne pas effectuer de clustering.

Au vu des résultats, un clustering ne permettra pas de distinguer clairement les variétés entre elles. Néanmoins, il peut mettre en évidence certaines similarités entre variétés et en isoler d'autres, statistiquement distinctes du reste. Étant donné les 10 variétés au total, et qu'aucune méthode ne converge vers un même nombre optimal de groupes, un choix arbitraire de 10 clusters a été retenu afin d'évaluer dans quelle mesure les variétés se ségrèguent entre elles.

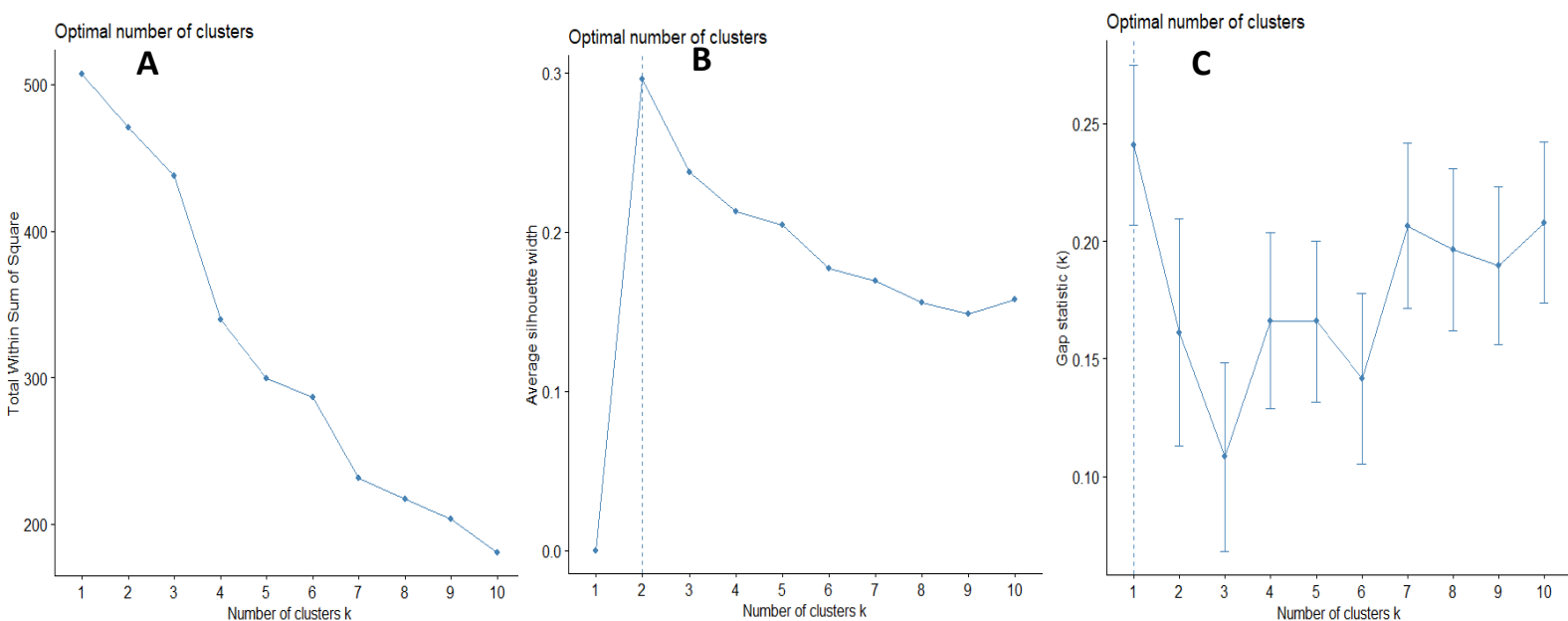


Figure 45 Graphiques utilisés pour déterminer le nombre optimal de clusters dans le cadre du CAH : de gauche à droite, la méthode des Within Sum of Squares (A), la silhouette moyenne (B), et la Gap Statistic (C) pour la méthode du CAH.

Les groupes formés par le CAH sont représentés dans la Figure 46. On remarque que certains groupes ne contiennent qu'un seul individu. Cette représentation peut être comparée à celle de la Figure 28, où la carte des individus montre également des regroupements similaires.

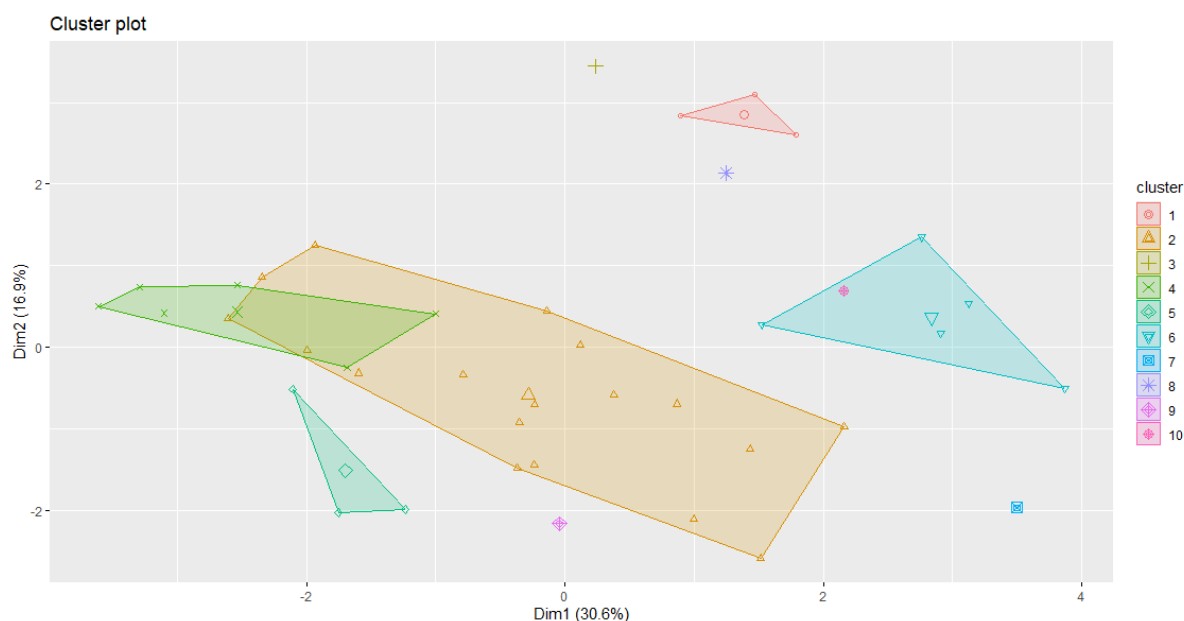


Figure 46 CAH des variétés dans les 2 premières dimensions représenté sous forme de carte des clusters

Pour évaluer dans quelle mesure les variétés ont été correctement regroupées, le dendrogramme ainsi qu'une table comparative entre les vraies variétés et les groupes issus du clustering sont présentés dans la Figure 47. Cinq groupes sont constitués d'individus uniques. Certains regroupements montrent une certaine cohérence. Le groupe 6 est composé presque d'individus appartenant à la variété Darja ou La Harpe, les variétés avec le développement végétatif le plus important. De même, les groupes 4 et 5 rassemblent uniquement des individus des variétés Drushina et Devyatka.

Le dendrogramme, également visible dans la Figure 47A, visualise l'ordre de regroupement des individus au cours du processus hiérarchique. On constate que les 2 premiers branchements concernent des groupes composés chacun d'un seul individu. Cela signifie que si l'on avait choisi de créer 3 clusters, on aurait obtenu deux groupes contenant un seul individu chacun, et un troisième groupe rassemblant tous les autres individus. Ces individus sont donc différents des autres résultats des variétés et différents les uns des autres.

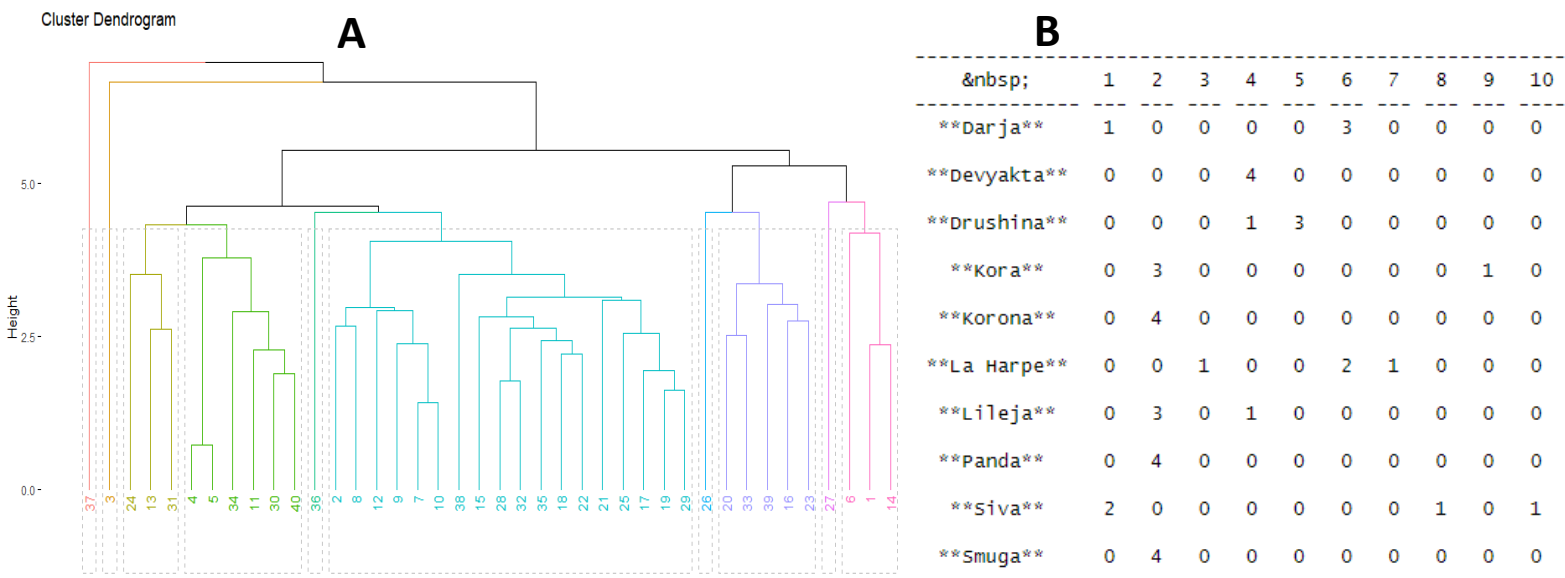


Figure 47 Dendrogramme de segmentation des groupes du CAH à gauche et table comparative des vraies variétés et des cluster formés par le CAH à droite

13.9.1.2 Clustering méthode des K-means

De manière similaire au CAH le nombre optimal de cluster doit être estimé et les 3 techniques déjà décrites plus haut restent d'applications mais sont adaptées à la méthode des K-means (Figure 48). A nouveau il n'y a pas de convergence évidente des techniques et 10 groupes sont choisi pour voir à quel point les variétés se séparent correctement ou non.

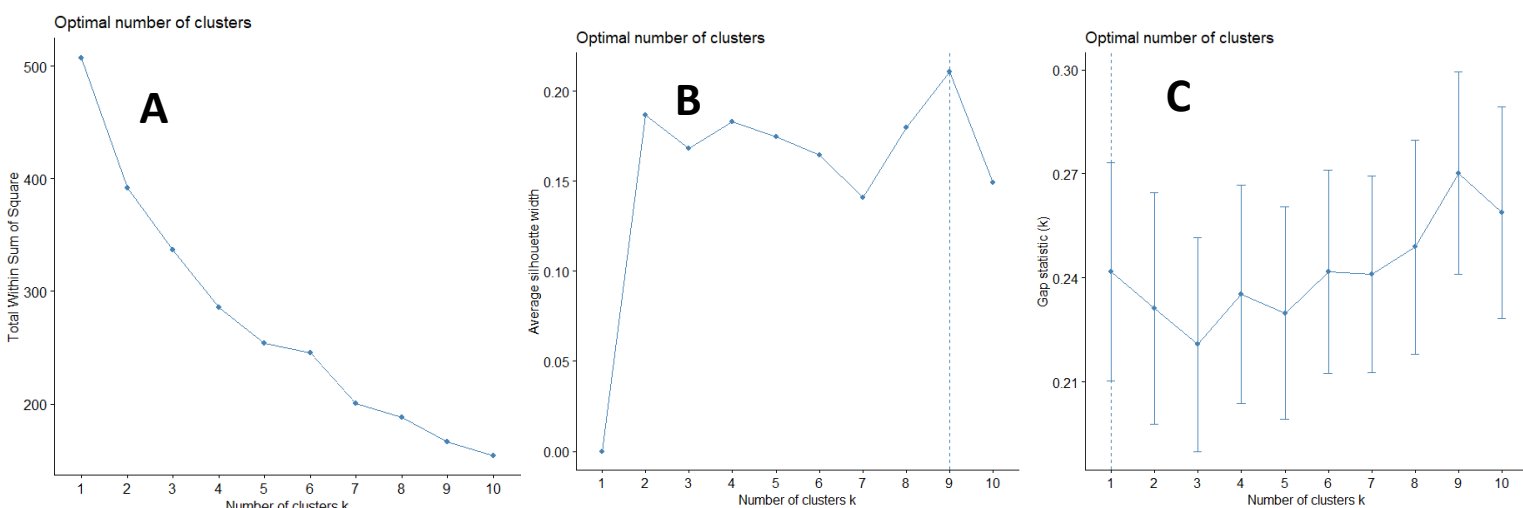


Figure 48 Graphiques utilisés pour déterminer le nombre optimal de clusters dans le cadre du CAH : de gauche à droite, la méthode des Within Sum of Squares (A), la silhouette moyenne (B), et la Gap Statistic (C) pour la méthode des K-means.

Avec la méthode des K-means et l'itération obtenue ici 3 groupes sont composés d'un seul individu comme observé sur la Figure 48. À nouveau Drushina et Devyatka ont beaucoup individus dans les mêmes groupes 4 et 10. Darja et La Harpe sont presque entièrement contenue dans le groupe 2. Les autres groupes sont plus hétérogènes et avec des variétés moins séparées.

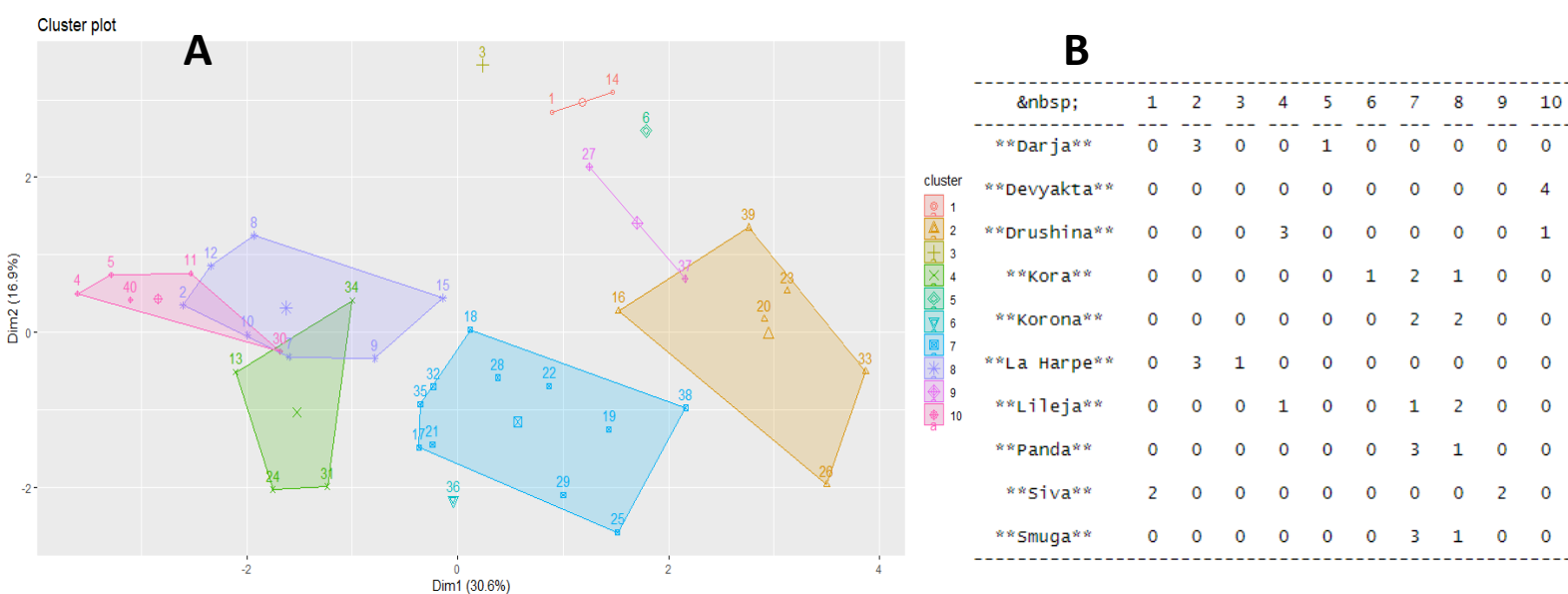


Figure 49 Clustering par la méthode des K-means des données dans les 2 premières dimensions représenté sous forme de carte des clusters (A) et table comparative des vraies variétés et des cluster formés par la méthode des K-means (B)

13.10 Supplément d'informations ACM

La Figure 50 présente le scree plot, illustrant la part de variance expliquée en fonction du nombre de dimensions retenues dans l'ACM. Étant donné que l'analyse porte sur 12 variables numériques, 12 dimensions sont possibles au maximum. Les deux premières dimensions expliquent respectivement 24,3 % et 19,8 % de la variance totale, pour un total cumulé de 44,1 %.

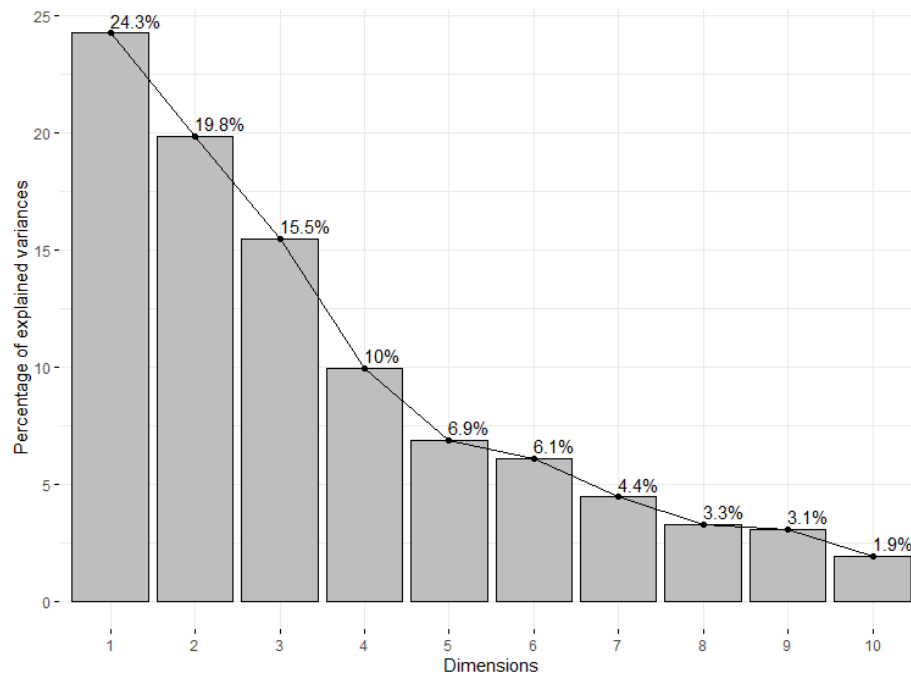


Figure 50 Scree plot représentant la part de la variance expliquée en fonction du nombre de dimensions

La Figure 51 est la même carte des individus que dans l'ACM avec des ellipses statistiques à un seuil de 95%. Les sites présentent un recouvrement modéré. Ceux-ci sont presque statistiquement distinguable et un clustering en fonction des sites pourrait être envisagé. En revanche, les variétés se recouvrent fortement.

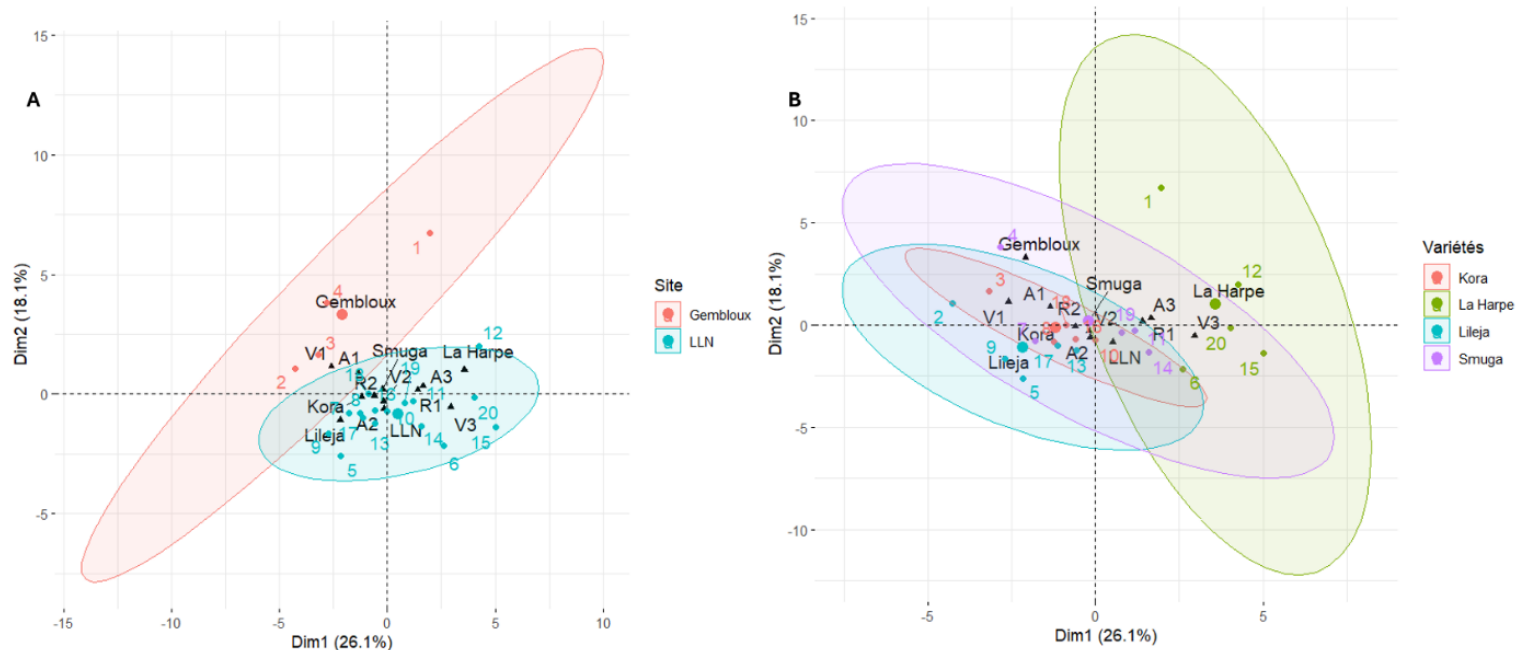


Figure 51 Cartes des individus dans les 2 premières dimensions de l'ACP en fonction des variétés avec (A) ellipses statistiques en fonction des sites, (B) ellipses statistiques en fonction des variétés pour l'ACM rassemblant les deux sites d'essais (Louvain-la-Neuve, Gembloux).

13.11 Accès à toutes les données

Tous les codes créés et données récoltées dans ce mémoire sont disponibles via ce lien :

https://drive.google.com/drive/folders/1BsAFc12qm58WQH4DZub8fYgn_qr8kb5l?usp=sharing

Comparaison au champ et multiplication variétale du sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum* Moench)

Merlin Van den Bossche

Face au changement climatique, la diversification des cultures apparaît comme un levier stratégique pour l'agriculture. Ce travail évalue le potentiel du sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) en Belgique, une culture historiquement présente mais aujourd'hui marginalisée. Dix variétés ont été testées sur le site de Louvain-la-Neuve afin d'analyser leurs performances agronomiques et leurs morphologies. Les résultats montrent des rendements supérieurs aux moyennes européenne et mondiale, rapprochant la Belgique des pays producteurs majeurs comme la France.

Les variétés ressorties de ce travail présentent des profils adaptés à différents usages : Drushina et Devyatka (croissance déterminée) se révèlent intéressantes pour la production de graines alimentaires ; Panda et Smuga (indéterminées) combinent rendement et floraison étalée, favorable aux pollinisateurs ; Lileja offre une précocité et donc une flexibilité utile en culture intercalaire ; Darja, grâce à sa biomasse, convient comme couvert ou engrais vert. La Harpe n'a pas eu de résultats prometteurs, étant pourtant la variété la plus répandue.

Peu de variations de rendement ont été observées entre les sites étudiés, probablement en raison de conditions pédoclimatiques similaires, mais des différences morphologiques suggèrent une sensibilité environnementale, surtout en comparaison avec la littérature trouvée.

Ces résultats confirment l'intérêt du sarrasin dans un contexte de transition agroécologique, tout en soulignant l'importance des interactions génotype-environnement à approfondir.

Mots-clefs : Sarrasin commun, *Fagopyrum esculentum*, Comparaison variétale, Changement climatique