

---

## Les effets du choix variétal et du schéma de fertilisation azotée de la culture de lin oléagineux d'hiver sur les composants de rendement et la teneur en oméga 3.

**Auteur :** Vannoppen, Noémie

**Promoteur(s) :** Dumont, Benjamin

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

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

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/18055>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

**LES EFFETS DU CHOIX VARIÉTAL ET DU SCHÉMA  
DE FERTILISATION AZOTÉE DE LA CULTURE DE  
LIN OLÉAGINEUX D'HIVER SUR LES  
COMPOSANTES DE RENDEMENT ET LA TENEUR  
EN OMÉGA 3**

**NOÉMIE VANNOPPEN**

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023**

**PROMOTEUR : BENJAMIN DUMONT**



Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique<sup>1</sup> de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

---

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

**LES EFFETS DU CHOIX VARIÉTAL ET DU SCHÉMA  
DE FERTILISATION AZOTÉE DE LA CULTURE DE  
LIN OLÉAGINEUX D'HIVER SUR LES  
COMPOSANTES DE RENDEMENT ET LA TENEUR  
EN OMÉGA 3**

**NOÉMIE VANNOPPEN**

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023**

**PROMOTEUR : BENJAMIN DUMONT**

## Remerciements

Je tiens à remercier mon promoteur, le professeur Benjamin Dumont, de m'avoir permis de réaliser ce travail en répondant à mes attentes et en mettant à ma disposition les moyens nécessaires au bon déroulement de ce dernier.

Je remercie également Alice Nysten, du CePiCOP, qui m'a encadrée tout au long de ce travail et toute l'équipe du CePiCOP, pour leurs investissements techniques et financiers.

Je remercie le professeur Marie-Laure Fauconnier, pour l'accueil dans son laboratoire, ainsi que Franck Michels pour son aide durant les manips.

Merci au professeur Yves Beckers, pour l'accueil dans son laboratoire, ainsi qu'à Sylvie Mabilie pour son aide et sa réactivité.

Merci aux doctorants et aux étudiants de l'OpenSpace pour leur accueil et la bonne humeur.

Merci à mes amis de Gembloux pour ces belles années passées ensemble. Un merci particulier à Alice, pour son soutien et tous ces magnifiques moments tout au long de ces cinq belles années.

Merci à mes acolytes de tous les jours, Marine et Lucie.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leur soutien sans faille, particulièrement mes parents sans qui ces études n'auraient pas été possibles, ainsi que ma sœur et mon copain.

## Résumé

Le lin oléagineux d'hiver, *Linum usitatissimum L.*, est peu cultivé en Belgique. Pourtant, cette culture présente de nombreux atouts nutritionnels en alimentation humaine et animale.

Les objectifs de cette étude sont d'évaluer quelles sont les variétés les plus adaptées aux conditions pédoclimatiques de la région limoneuse et d'identifier quel est le meilleur schéma de fertilisation azotée à appliquer. De plus, l'étude vise à étudier l'effet de la variété et de la fertilisation sur la qualité de l'huile et sa teneur en oméga 3.

Pour cela, des essais en micro-parcelles ont été implantés à Lonzée (Belgique). Douze variétés et six modalités de fumure ont été étudiées lors de la saison culturale 2022-2023. Les analyses de la qualité étaient basées sur les graines de la récolte de 2022, ayant suivi le même protocole. Les composantes de rendement, la teneur en huile et en acide gras de type oméga 3 ont été évaluées.

L'essai variétal a mis en avant l'effet significatif de la variété sur toutes les composantes de rendement et sur la qualité de l'huile. Toutes les variétés se sont montrées adaptées aux conditions culturales et ont dépassé le potentiel attendu de rendement en graines. Les teneurs en huile et en acide alpha-linolénique étaient également élevées.

L'essai sur la fertilisation montre que celle-ci a un effet significatif uniquement sur certaines composantes telles que le nombre de graines par capsule, le PMG et le rendement en graines. La teneur en huile n'est pas influencée par la dose d'azote apportée. Au contraire, la teneur en acide alpha-linolénique diminue avec l'augmentation de la fertilisation. Les apports de 80 kgN/ha en un apport et en deux fractionnements (50-30 kgN/ha) semblent être les plus adaptés.

D'autres essais doivent être réalisés dans d'autres contextes pédoclimatiques afin de généraliser les résultats pour toute la Belgique.

Mots clés : lin oléagineux, variété, fertilisation, rendement, qualité, huile, acide alpha-linolénique.

## Abstract

Winter oilseed flax, *Linum usitatissimum* L., is not widely cultivated in Belgium. However, this crop offers numerous nutritional advantages for both human and animal consumption.

The objectives of this study are to assess which varieties are best suited to the pedoclimatic conditions of the loamy region and to determine the optimal nitrogen fertilization scheme to apply. Furthermore, the study aims to investigate the effect of variety and fertilization on oil quality and its omega-3 content.

To achieve this, micro-plot trials were established in Lonzée (Belgium). Twelve varieties and six fertilization modalities were studied during the 2022-2023 growing season. Quality analyses were based on the seeds harvested in 2022, following the same protocol. Yield components, oil content, and omega-3 fatty acid levels were evaluated.

The variety trial highlighted the significant effect of variety on all yield components and oil quality. All varieties proved suitable for the cultivation conditions and exceeded the expected seeds yield potential. Oil and alpha-linolenic acid contents were also high.

The fertilization trial shows that fertilization has a significant effect only on certain components such as the number of seeds per capsule, the thousand seed weight (TSW), and seed yield. Oil content is not influenced by the nitrogen dose applied. On the contrary, alpha-linolenic acid content decreases with increasing fertilization. Application of 80 kgN/ha in a single dose and in two splits (50-30 kgN/ha) appears to be the most suitable.

Further trials should be conducted in different pedoclimatic contexts to generalize the results for the entire Belgium.

Key words: linseed, variety, fertilization, yield, quality, oil, alpha-linolenic acid.



## Table des matières

<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Etat de l'art : le lin oléagineux d'hiver .....</b>	<b>2</b>
2.1 Origines .....	2
2.2 Classification .....	2
2.3 Caractérisation .....	2
2.3.1 Morphologique.....	2
2.3.2 Environnement culturel .....	3
A. Conditions pédoclimatiques .....	3
B. Bioagresseurs potentiels .....	4
2.3.3 Conduite culturale .....	5
A. Cycle de croissance .....	5
B. Fertilisation .....	6
C. Régulateur .....	7
D. Rendement .....	7
2.3.4 Aspect qualitatif .....	8
2.4 Sélection .....	8
2.5 Utilisation .....	9
2.5.1 Industrielle .....	9
2.5.2 Alimentation .....	9
<b>3. Objectifs.....</b>	<b>11</b>
<b>4. Matériel et méthodes.....</b>	<b>12</b>
4.1 Partie phytotechnie : essais 2022-2023 .....	12
4.1.1 Site des essais.....	12
4.1.2 Analyse de sol.....	12
4.1.3 Conditions climatiques.....	12
4.1.4 Dispositif expérimental .....	13
a. Facteur variétal.....	13
b. Facteur fertilisation .....	13
4.1.5 Opérations culturales.....	14
4.1.6 Observations et variables mesurées .....	15
4.2 Partie analyses de la qualité : récolte essais 2022-2023.....	18
4.2.1 Matériel végétal .....	18
4.2.2 Protocoles.....	19

4.2.2.1 Extraction de l'huile par Soxhlet .....	19
4.2.2.2 Dosage des acides gras totaux par transestérification au BF <sub>3</sub> et analyse par chromatographie en phase gazeuse .....	19
4.3 Analyse des données .....	20
<b><u>5. Résultats et discussion .....</u></b>	<b><u>22</u></b>
5.1 Partie phytotechnie : essais 2022-2023 .....	22
5.1.1 Essai variétal .....	22
A. Stades de croissance .....	22
B. Caractérisation variétale .....	24
a) Couverture du sol .....	24
b) Hauteur à la maturité .....	25
c) Tolérance à la verse .....	25
d) Composantes de rendement .....	27
e) Corrélations entre les variables .....	30
C. Classification des variétés par groupe .....	32
5.1.2 Essai fertilisation .....	33
A. Biomasse .....	33
B. Teneur en azote .....	33
C. Hauteur à maturité .....	35
D. Tolérance à la verse .....	35
E. Composantes de rendement .....	36
F. Corrélations entre les variables .....	38
5.2 Analyses de la qualité – récolte essais 2022-2023 .....	40
5.2.1 Effet variétal .....	40
A. Teneur en huile .....	40
B. Rendement en huile .....	41
C. Profil en acide gras .....	42
D. Corrélations entre les variables .....	44
E. Classification des variétés par groupe .....	44
5.2.2 Effet de la fertilisation .....	45
A. Teneur en huile .....	45
B. Rendement en huile .....	46
C. Profil en acide gras .....	46
D. Corrélations entre les variables .....	47
<b><u>6. Contribution personnelle .....</u></b>	<b><u>48</u></b>

<b><u>7. Conclusion et perspectives.....</u></b>	<b><u>49</u></b>
<b><u>8. Bibliographie.....</u></b>	<b><u>51</u></b>
<b><u>9. Annexes.....</u></b>	<b><u>55</u></b>

## **Table des figures**

<b>Figure 1</b> : Morphologie de <i>Linum usitatissimum</i> L.. Source : (Thomé, 1885). .....	3
<b>Figure 2</b> : Maladies du lin oléagineux. Photo 1 : Septoriose, photo 2 : Oïdium, photo 3 : Fusariose, photo 4 : Kabatiellose. Source : (Berard et al., 2022).....	4
<b>Figure 3</b> : Altises adultes. Source : (Berard et al., 2022). .....	4
<b>Figure 4</b> : Thrips du lin et les dégâts occasionnés. Source : (Arvalis, March-15-2023).....	4
<b>Figure 5</b> : Cycle du lin oléagineux d'hiver. Source : (Berard et al., 2022). .....	5
<b>Figure 6</b> : Photographie aérienne annotée du dispositif expérimental. Source personnelle. ....	14
<b>Figure 7</b> : Photographies avant (à gauche) et après (à droite) traitement par l'application Canopeo. Source personnelle. ....	15
<b>Figure 8</b> : Photographie annotée de l'extraction par Soxhlet. Source personnelle. ....	19
<b>Figure 9</b> : Graphique de l'évolution des stades de croissance BBCH en fonction des degrés-jours cumulés par les variétés. ....	22
<b>Figure 10</b> : Boxplot de la précocité à la floraison pour chaque variété. ....	23
<b>Figure 11</b> : Boxplot de la durée de floraison pour chaque variété. ....	23
<b>Figure 12</b> : Boxplot de la couverture du sol en fonction des variétés. ....	24
<b>Figure 13</b> : Boxplot de la hauteur pour chaque variété. ....	25
<b>Figure 14</b> : Graphique de la régression linéaire entre la cotation de la verse et la hauteur à maturité des différentes variétés. ....	26
<b>Figure 15</b> : Boxplot de la hauteur de chaque variété en fonction du traitement fongicide. ....	27
<b>Figure 16</b> : Boxplot de la densité de plantes pour chaque variété. ....	27
<b>Figure 17</b> : Boxplot du nombre de branches par plante pour chaque variété. ....	28
<b>Figure 18</b> : Boxplot du nombre de capsules par branche pour chaque variété. ....	28
<b>Figure 19</b> : Boxplot du nombre de graines par capsule pour chaque variété. ....	28
<b>Figure 20</b> : Boxplot du PMG pour chaque variété. ....	29
<b>Figure 21</b> : Boxplot du nombre de graines par m <sup>2</sup> pour chaque variété. ....	29
<b>Figure 22</b> : Boxplot du rendement en graines pour chaque variété. ....	29
<b>Figure 23</b> : Boxplot du rendement en graines pour chaque variété en fonction de l'année de production. ....	30
<b>Figure 24</b> : Matrice de corrélations entre les variables numériques de l'essai variétal. ....	30
<b>Figure 25</b> : Graphique de l'évolution de la biomasse pour chaque modalité. ....	33
<b>Figure 26</b> : Boxplot des teneurs en azote à chaque prélèvement pour chaque modalité. ....	34
<b>Figure 27</b> : Courbe critique de dilution de l'azote.....	34
<b>Figure 28</b> : Boxplot de la hauteur à maturité pour chaque modalité. ....	35
<b>Figure 29</b> : Boxplot de la densité de plantes pour chaque modalité.....	36
<b>Figure 30</b> : Boxplot du nombre de branches par plante pour chaque modalité. ....	36
<b>Figure 31</b> : Boxplot du nombre de capsules par branche pour chaque modalité. ....	37
<b>Figure 32</b> : Boxplot du nombre de graines par capsule pour chaque modalité. ....	37
<b>Figure 33</b> : Boxplot du PMG pour chaque modalité.....	38
<b>Figure 34</b> : Boxplot du rendement en graines pour chaque modalité.....	38
<b>Figure 35</b> : Matrice de corrélations entre les variables numériques de l'essai fumure.....	39
<b>Figure 36</b> : Boxplot de la teneur en huile pour chaque variété. ....	40
<b>Figure 37</b> : Boxplot du rendement en huile pour chaque variété. ....	41
<b>Figure 38</b> : Graphique de la régression linéaire entre le rendement en huile et le rendement en grain en fonction des variétés. ....	42

<b>Figure 39</b> : Profil en acide gras des 10 variétés. ....	42
<b>Figure 40</b> : Matrice de corrélations entre les variables numériques de l'essai variétal de 2022. ....	44
<b>Figure 41</b> : Boxplot de la teneur en huile pour chaque modalité. ....	45
<b>Figure 42</b> : Boxplot du rendement en huile pour chaque modalité. ....	46
<b>Figure 43</b> : Matrice de corrélations entre les variables numériques de l'essai fumure de 2022. ....	47

## **Table des tableaux**

<b>Tableau 1</b> : Classification de <i>Linum usitatissimum L.</i> . Source : (VASCAN, February-16-2023).....	2
<b>Tableau 2</b> : Analyse du reliquat azoté par le CRAW. ....	12
<b>Tableau 3</b> : Données climatiques. À gauche, les normales climatiques mensuelles de la station d'Uccle. Source : données provenant de (IRM, March-8-2023). À droite, les conditions climatiques reçues proche du site d'expérimentation du semis à la récolte. Source : (CRA-W – Données Pameseb Station Ernage). .....	12
<b>Tableau 4</b> : Informations sur les douze variétés étudiées. Source : (site MyVar, March-15-2023). ...	13
<b>Tableau 5</b> : Modalités de l'essai fertilisation.....	13
<b>Tableau 6</b> : Opérations culturales de la saison 2022-2023. ....	14
<b>Tableau 7</b> : Dates des prélèvements de la biomasse. ....	16
<b>Tableau 8</b> : Variables mesurées dans l'essai variétal et fumure. ....	18
<b>Tableau 9</b> : Variétés présentes dans l'essai variétal de la saison 2021-2022. Source : (Hubaux, 2022). .....	19
<b>Tableau 10</b> : Valeurs moyennes du nombre de degrés-jours pour arriver à floraison et à maturité, durée de floraison $\pm$ std pour chaque variété et groupes du test SNK. ....	24
<b>Tableau 11</b> : Valeurs moyennes de cotation de la verse $\pm$ std pour chaque variété et groupes du test SNK. ....	25
<b>Tableau 12</b> : Valeurs moyennes des hauteurs et de la cotation de la verse pour le facteur variété et traitement $\pm$ std pour chaque variété (traitée et non traitée) et groupes du test SNK. ....	26
<b>Tableau 13</b> : Moyennes de chaque variable explicative en fonction des groupes de classification. ...	32
<b>Tableau 14</b> : Valeurs moyennes de cotation de la verse $\pm$ std pour chaque modalité et groupes du test SNK. ....	35
<b>Tableau 15</b> : Relation entre le rendement en huile et le rendement en graines exprimée en pourcentage du rendement en graines. ....	41
<b>Tableau 16</b> : Valeurs moyennes des acides gras $\pm$ std pour chaque variété et groupes du test SNK. .	43
<b>Tableau 17</b> : Moyennes des variables en fonction des groupes de classification.....	45
<b>Tableau 18</b> : Valeurs moyennes des acides gras $\pm$ std pour chaque modalité et groupes du test SNK. .....	46

## **Table des équations**

<b>Équation 1</b> : Somme des degrés-jours de croissance. Source : (D'Antuono et al., 1995; McMaster et al., 1997; Rokade et al., 2015). .....	15
<b>Équation 2</b> : Courbe critique de dilution de l'azote. Source : (Flénet et al., 2006).....	21
<b>Équation 3</b> : Teneur en huile (%). Source : AOCS, 2011.....	21
<b>Équation 4</b> : Teneur en huile d'une graine (%). .....	21
<b>Équation 5</b> : Rendement en huile (T/ha). .....	21

## **Table des annexes**

<b>Annexe 1</b> : Echelle BBCH adaptée au lin oléagineux. Source : (Smith et al., 1998). .....	55
<b>Annexe 2</b> : Valeurs moyennes des stades BBCH pour chacune des variétés et groupes SNK (Test Newman & Keuls). .....	56
<b>Annexe 3</b> : Valeurs moyennes de couverture du sol $\pm$ std pour chaque variété et groupes SNK. ....	56
<b>Annexe 4</b> : Valeurs moyennes de hauteur à maturité $\pm$ std pour chaque variété et groupes SNK. ....	57
<b>Annexe 5</b> : Valeurs moyennes des composantes de rendement $\pm$ std pour chaque variété et groupes SNK. ....	57
<b>Annexe 6</b> : Boxplot et valeurs moyennes du rendement en graines $\pm$ std pour chaque variété traitée et groupes SNK. ....	57
<b>Annexe 7</b> : Résultats de l'ACP pour les variables numériques de l'essai variétal. ....	58
<b>Annexe 8</b> : Graphe ACP des individus avec les centroïdes des groupes et constitution des groupes. .	59
<b>Annexe 9</b> : Valeurs moyennes de la biomasse aérienne sèche $\pm$ std pour chaque modalité de fumure et groupes SNK. ....	59
<b>Annexe 10</b> : Valeurs moyennes de teneur en azote $\pm$ std pour chaque modalité de fumure et groupes SNK. ....	59
<b>Annexe 11</b> : Valeurs moyennes de hauteur $\pm$ std pour chaque modalité et groupes SNK. ....	59
<b>Annexe 12</b> : Valeurs moyennes des composantes de rendement $\pm$ std pour chaque modalité et groupes SNK (ou LSD). ....	60
<b>Annexe 13</b> : Valeurs moyennes des composantes de rendement $\pm$ std pour chaque modalité et groupes SNK de l'essai variétal de 2022. ....	60
<b>Annexe 14</b> : Boxplots des teneurs en acide gras pour chaque variété de 2022. ....	60
<b>Annexe 15</b> : Résultats de l'ACP pour les variables numériques de l'essai variétal 2022. ....	61
<b>Annexe 16</b> : Graphe ACP des individus de l'essai variétal de 2022 avec les centroïdes des groupes et constitution des groupes. ....	62
<b>Annexe 17</b> : Valeurs moyennes des composantes de rendement $\pm$ std pour chaque modalité et groupes SNK. ....	62
<b>Annexe 18</b> : Boxplots des teneurs en acide gras en fonction des modalités de fumure de 2022. ....	63



## **Table des abréviations**

AG : Acide gras

ALA : Acide alpha-linolénique

CePiCOP : Centre pilote céréales et oléo-protéagineux

CRAW : Centre de recherches agronomiques Wallon

FAME : Esters méthyliques d'acide gras

INRA : Institut national de la recherche agronomique

LA : acide linoléique

PMG : poids de mille grains

SAU : superficie agricole utilisée

## 1. Introduction

Le lin, *Linum usitatissimum* L., est utilisé par l'homme depuis plus de 30 000 ans. Appelé lin de tous les usages, il fournit des fibres textiles, des matériaux d'isolation, de l'huile pour peinture et vernis, en plus de ses graines aux vertus nutritionnelles intéressantes (Weill et al., 2010). Suite à la domestication et à la sélection, le lin a été distingué en deux types principaux : le lin textile et le lin oléagineux. Ils possèdent des finalités différentes avec respectivement la production de fibres et la production de graines (Ataï et al., 2021; Zuk et al., 2015).

Depuis 2010, le lin oléagineux connaît une expansion de sa production mondiale. En 2021, celle-ci a atteint plus de 3 millions de tonnes (T), pour une superficie de plus de 4 millions d'hectares (ha) de cultures. Le Canada est un des plus gros producteurs de cette graine oléagineuse (FAO, February-10-2023). En Belgique, la SAU<sup>1</sup> totale est de 740 000 ha et en 2021, seuls 130 ha étaient occupés par la culture de lin oléagineux. En 2022, ce chiffre a diminué et est passé à seulement 72 ha. Au contraire, le lin textile en représentait plus de 15 000 (SPW, March-1-2023; STATBEL, July-27-2023).

Le rendement potentiel en graines de cette culture varie en fonction de la variété utilisée, de l'année de production et de la localisation (Čeh et al., 2020). Il peut atteindre 2 à 2,5 T/ha en France (Berard et al., 2022). Néanmoins, des rendements supérieurs ont déjà été obtenus en Belgique dans des parcelles d'essais (Hubaux, 2022). La fertilisation azotée influence également le rendement en graines et a un impact sur les composantes de rendement (Herzog et al., 2017 ; Zhang et al., 2020).

Le rendement en huile est en moyenne de 35 à 50% du poids des graines (Zuk et al., 2015) et varie considérablement en fonction des variétés, de la fertilisation et des conditions agronomiques appliquées à la culture (Čeh et al., 2020).

D'un point de vue de la composition de la graine, elle contient 35 à 46% d'huile (Zuk et al., 2015). La teneur en huile varie selon la variété, mais ne serait pas impactée par la fertilisation azotée. Toutefois, la composition de l'huile varie selon la variété, la fertilisation azotée et l'année de production (Čeh et al., 2020 ; Herzog et al., 2017). Elle contient 55% d'acide alpha-linolénique (ALA) (type oméga 3) et 15% d'acide linoléique (LA) (type oméga 6) (Zuk et al., 2015). Ces acides gras sont essentiels et indispensables dans l'alimentation humaine et animale (Weill et al., 2010). De plus, plusieurs études démontrent les bénéfices d'une alimentation riche en oméga 3 pour le bétail (Charrier et al., 2013; Cui et al., 2022; Doreau et al., 2017; Morice, 2018).

Compte tenu de ces différentes variables dépendant de la variété utilisée et de la fertilisation azotée, il est important d'étudier plusieurs variétés sur les sols wallons ainsi que différentes doses d'azote.

---

<sup>1</sup> Superficie agricole utilisée.

## 2. Etat de l'art : le lin oléagineux d'hiver

### 2.1 Origines

Le lin est probablement originaire d'une zone s'étendant du Moyen-Orient (Zuk et al., 2015) jusqu'au bassin méditerranéen en passant par l'Inde et l'Éthiopie (Ataï et al., 2021). L'Asie centrale apparaît comme le centre d'origine principal alors que la région méditerranéenne est le centre d'origine secondaire (Singh, 2016).

La domestication du lin cultivé, à partir de son ancêtre sauvage *Linum bienne* (lin pâle), s'est déroulée il y a plus de 8 000 ans au Proche-Orient (Čeh et al., 2020). Il a ensuite été propagé en Europe, dans la vallée du Nil et dans d'autres régions du monde (Ataï et al., 2021; Singh, 2016).

### 2.2 Classification

Le lin, *Linum usitatissimum* L., le lin de tous les usages, est une plante diploïde ( $2n=30$ ), fibreuse, dicotylédone, appartenant à la famille des *Linaceae* (Tableau 1) (Cui et al., 2022). Cette famille compte 14 genres et plus de 200 espèces (Tadesse et al., 2006). Le lin appartient au genre *Linum*, subdivisé en cinq sections : *Linum*, *Linastrum*, *Cathartolinum*, *Dasylinum* et *Syllinum* (Singh, 2016). Celui-ci appartenant à la première section (VASCAN, February-16-2023).

**Tableau 1** : Classification de *Linum usitatissimum* L.. Source : (VASCAN, February-16-2023).

Classification	
Classe	<i>Equisetopsida</i>
Sous classe	<i>Magnoliidae</i>
Super ordre	<i>Rosanae</i>
Ordre	<i>Malpighiales</i>
Famille	<i>Linaceae</i>
Sous famille	<i>Linoideae</i>
Genre	<i>Linum</i>
Section	<i>Linum sect. Linum</i>
Espèce	<i>Linum usitatissimum</i> L.

### 2.3 Caractérisation

#### 2.3.1 Morphologique

Le lin oléagineux est une plante annuelle herbacée avec un port dressé (Parmentier, 2007).

Les feuilles sont simples, sessiles, allongées et tri nervurées. Elles mesurent 25 à 35 mm de long et 3 à 5 mm de large (Parmentier, 2007).

La tige est cylindrique et droite et atteint 40 à 120 cm de hauteur en fonction de la variété utilisée. Des ramifications sont présentes au nombre de 4 à 5 et sont plus nombreuses qu'en lin de printemps, principalement à la sortie de l'hiver (Parmentier, 2007).

La racine principale est pivotante (Berard et al., 2022).

La tige est surmontée par une inflorescence en cyme. Chaque ramification donne une fleur qui formera une capsule et des graines. La fleur est composée de cinq sépales, cinq pétales, cinq étamines et un pistil formé de cinq carpelles. Les fleurs sont éphémères et généralement de couleur bleu-violet. Certaines variétés ont des fleurs blanches ou légèrement rosées (Parmentier, 2007).

Après autopollinisation, l'ovaire se transforme en capsule non déhiscente et contient cinq loges avec au maximum dix graines (Parmentier, 2007). Les capsules se développent alors que certains pédicules portent encore des fleurs (Smith et al., 1998). La fécondation croisée est possible, mais reste négligeable (Tadesse et al., 2006).

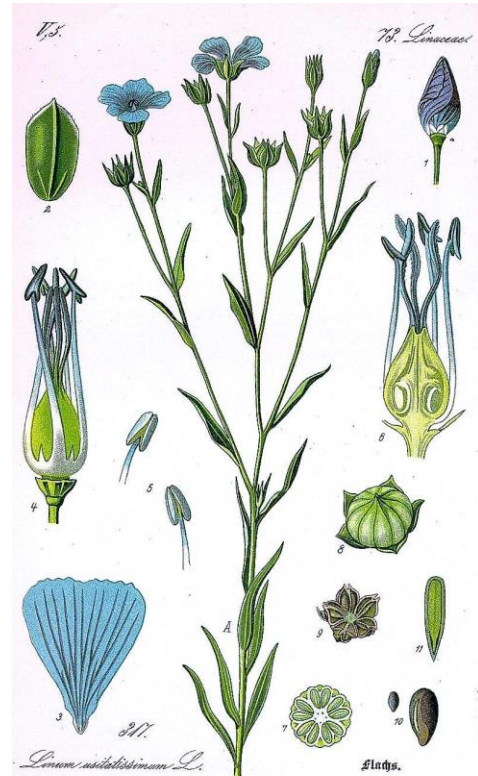


Figure 1 : Morphologie de *Linum usitatissimum* L.. Source : (Thomé, 1885).

La graine de lin est ovale et longue de 4 à 6 mm. Sa surface est lisse et luisante. Elle est de couleur brune ou jaune en fonction des variétés et est riche en huile (Parmentier, 2007, Zuk et al., 2015; Weill et al., 2010).

### 2.3.2 Environnement culturel

#### A. Conditions pédoclimatiques

Les paramètres de croissance sont affectés par le type de sol, la région de culture, les stress hydriques et les températures élevées (Zuk et al., 2015).

Le lin tolère une large gamme de sols, mais se développe mieux sur des sols drainés, de texture moyenne à lourde, avec un pH d'environ 6 (Casa et al., 1999). Les sols profonds sont à privilégier et au contraire, les sols très sableux et argilo-calcaires superficiels sont à éviter (Berard et al., 2022).

Les cultivars de lin oléagineux sont plutôt cultivés dans les régions à climat continental, alors que le lin textile est plutôt cultivé dans des conditions fraîches et humides (Zuk et al., 2015).

Le lin est sensible aux gelées tardives lors de la reprise de végétation et est très sensible aux stress hydriques et aux fortes températures au cours de sa floraison. Toutefois, son cycle étant plus précoce que le lin de printemps, le lin d'hiver est moins soumis aux stress hydriques, en plus d'être plus tolérant au froid (Berard et al., 2022).

## B. Bioagresseurs potentiels

### Les maladies :

Les principales maladies cryptogamiques rencontrées sont les suivantes : (Berard et al., 2022; Parmentier, 2007)

1. Septoriose : *Septoria linicola*
2. Oïdium : *Oïdium lini*
3. Fusariose : *Fusarium oxysporum f. sp. lini*
4. Kabatiellose : *Kabatiella lini*

La lutte peut être prophylactique et/ ou curative. Cependant, aucun produit phytopharmaceutique n'existe pour lutter contre la fusariose. Les seuls moyens de lutte reposent sur le choix variétal ainsi que le respect du délai de retour de minimum 7 ans entre deux cultures de lin oléagineux (Berard et al., 2022).



**Figure 2 :** Maladies du lin oléagineux. Photo 1 : Septoriose, photo 2 : Oïdium, photo 3 : Fusariose, photo 4 : Kabatiellose. Source : (Berard et al., 2022).

### Les ravageurs :

Les deux ravageurs principaux sont les suivants : (Berard et al., 2022; Parmentier, 2007)

1. Altises adultes : *Longitarsus parvulus* et *Aphthona euphorbiae*
2. Thrips : *Thrips angusticeps* et *Thrips linarius*



**Figure 3 :** Altises adultes. Source : (Berard et al., 2022).

Les périodes de risques sont complémentaires. La présence d'altises représente un risque principal depuis la levée jusqu'au stade 5 cm, alors que les thrips présentent un risque à la reprise de végétation jusqu'au début, voire la fin, de la floraison. Toutefois, le lin oléagineux d'hiver est moins sensible que le lin de printemps (Berard et al., 2022).



**Figure 4 :** Thrips du lin et les dégâts occasionnés. Source : (Arvalis, March-15-2023).

### Les adventices :

La concurrence des adventices peut affecter le rendement en fonction de l'importance de leur présence. Le lin oléagineux n'étant pas une plante étouffante de par sa morphologie, les adventices bénéficient de bonnes conditions pour se développer. De plus, les densités de semis sont plus faibles que pour le lin

textile, ce qui favorise également la flore adventice. Toutefois, cela n'impactera pas la qualité du lin oléagineux, mais il reste préférable de limiter leur présence afin de respecter les normes d'impuretés et faciliter la récolte (Parmentier, 2007).

Plusieurs leviers agronomiques permettent de limiter cette flore. Le désherbage mécanique, la lutte chimique et/ou mixte sont utilisables dans cette culture (Berard et al., 2022).

### 2.3.3 Conduite culturale

#### A. Cycle de croissance

Afin d'identifier les stades principaux de la culture, subdivisés en stades secondaires, Smith et al. (1998) ont mis en place une clé de croissance sur base de l'échelle BBCH<sup>2</sup>. Cette clé adaptée se trouve en annexe (Annexe 1).

Le cycle de croissance du lin est illustré ci-dessous :

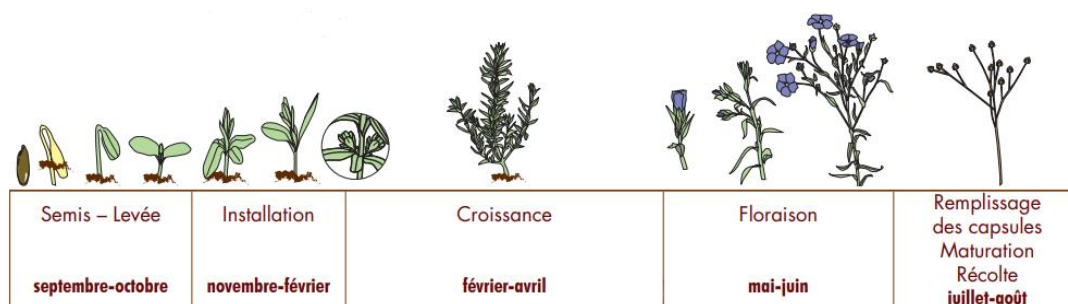


Figure 5 : Cycle du lin oléagineux d'hiver. Source : (Berard et al., 2022).

#### Semis - Levée

Le semis s'effectue de septembre à octobre à l'aide d'un semoir à céréales à 1-2 cm de profondeur. La densité de semis est comprise entre 350 et 450 graines/m<sup>2</sup>. L'objectif à l'implantation est d'obtenir une bonne structure en profondeur afin de favoriser le bon développement de la racine principale pivotante et une structure superficielle fine et rappuyée pour assurer une levée rapide et homogène (Berard et al., 2022).

#### Installation

L'objectif de peuplement est de 300 à 350 plantes/m<sup>2</sup> (Berard et al., 2022). Le lin est capable de compenser les faibles densités en augmentant le nombre de branches fertiles et de capsules (Casa et al., 1999). Les risques d'érosion sont réduits grâce à la couverture du sol dès l'automne (Berard et al., 2022). Toutefois, cela dépend de la variété. La variété Merinos est plus couvrante que les variétés Angora et Attila (Semences de France, 2023d).

L'objectif est d'obtenir des plantules de 5 à 10 cm de hauteur maximum avant les premiers froids afin de garantir une meilleure résistance à l'hiver (Berard et al., 2022).

<sup>2</sup> Officiellement, l'abréviation BBCH dérive de l'expression allemande « Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie » (Meier et al., 2009).

### Croissance végétative

La croissance végétative comprend plusieurs stades tels que le développement des feuilles, la ramification basale et l'extension de la tige. Le lin va développer un nombre variable de branches basales pendant l'automne et l'hiver. Ensuite, il passera d'un port rampant à un port dressé grâce à l'extension de la tige au début du printemps (Smith et al., 1998).

### Floraison

Le lin oléagineux d'hiver possède une floraison plus précoce que le lin de printemps. La période de floraison est d'environ 30 jours (Berard et al., 2022). Toutefois, les fleurs ont seulement une durée de vie d'un jour (Smith et al., 1998).

### Remplissage des capsules et maturation

Certains pédicules portent encore des fleurs lorsque d'autres commencent à développer les capsules. Les capsules et les graines changent progressivement de couleur en passant du vert au brun au cours de la maturation jusqu'à la sénescence de la capsule (Smith et al., 1998).

Les différents stades de croissance peuvent être mis en lien avec la somme de degrés-jours cumulée par la culture. Pour cela, une température de base physiologique est à prendre en compte et est définie comme la température sous laquelle le développement de la culture s'arrête (Yang et al., 1995). Cette température est d'environ 3°C pour le lin oléagineux d'hiver (D'Antuono et al., 1995). En effet, celle-ci varie en fonction des variétés, des stades de développement et de l'année culturale (Casa et al., 1999 ; Yang et al., 1995).

## B. Fertilisation

La culture de lin est peu demandeuse en intrants. Ses besoins en azote sont de 4,5 kg d'azote par quintal de graines produites. Selon l'objectif de rendement, la dose recommandée est de 50 à 100 kg d'azote par hectare (kgN/ha) au maximum (Berard et al., 2022). Cette culture a une réponse positive à la fertilisation azotée (Cui et al., 2022), mais la surfertilisation n'apporte aucun avantage (Berard et al., 2022).

Concernant le phosphore et le potassium, les besoins du lin sont faibles. Les apports sont à raisonner en fonction de la teneur du sol et de l'historique des apports (Berard et al., 2022). La réponse du lin peut tout de même être positive à cette fertilisation. Néanmoins, l'efficacité d'utilisation reste assez faible pour le phosphore et peut entraîner des dommages environnementaux (Cui et al., 2022).

Cette culture est par contre exigeante en zinc. En effet, le lin exporte environ 300 à 350 g/ha de zinc (Parmentier, 2007). Une carence en cet élément entraîne un ralentissement voire un arrêt de la croissance. La culture n'est pas capable de rattraper le retard en cas de déficit, il faut donc anticiper les carences. Cependant, le lin oléagineux d'hiver y est moins sensible que le lin de printemps (Berard et al., 2022).



## C. Régulateur

Lors de la conduite culturale, le recours aux régulateurs de croissance est souvent indispensable en lin oléagineux d'hiver (Parmentier, 2007).

En effet, la verse peut entraîner une chute de rendement en freinant la translocation des produits de la photosynthèse vers la graine. De plus, cela peut favoriser l'apparition de maladies fongiques dues à l'humidité des plantes contenues au sol. Une autre problématique liée à la verse est la difficulté mécanique de la récolte des plantes maintenues au sol (Parmentier, 2007).

La sélection variétale tend à améliorer la tolérance à la verse des variétés, étant un critère de sélection très important, afin d'assurer le rendement et de diminuer les coûts d'apports de régulateur de croissance (Berard et al., 2022).

En fonction du choix variétal et du potentiel du sol, il est possible d'analyser le risque de verse et de réduire les doses de régulateur ou même d'en faire l'impasse dans certaines conditions (Berard et al., 2022).

## D. Rendement

La récolte s'effectue en juillet-août et ne nécessite pas de matériel spécifique. Toutefois, la barre de coupe doit être affûtée et quelques réglages sont nécessaires tels que l'ajustement des contre-lames et l'utilisation de plaques d'ébarbage sur le contre-batteur. Elle a lieu lorsque 95% des capsules sont mûres et que les graines sont libres à l'intérieur de celles-ci. Les normes de réception des graines sont de 9% d'humidité et 2% d'impuretés (Berard et al., 2022 ; Parmentier, 2007).

Le potentiel de rendement en graines en France est d'environ 2 à 2,5 T/ha en terre profonde (Berard et al., 2022). Au Canada, un des plus gros producteurs de graines de lin oléagineux, ce potentiel est de 1,8 à 2,4 T/ha (Ayitre, 2017). Cependant, celui-ci s'est avéré supérieur, dans des parcelles d'essais en Belgique en sols profonds, lors de la récolte de 2022. En effet, des rendements moyens de 3,5 T/ha ont été obtenus (Hubaux, 2022). Le rendement varie en fonction des conditions pédoclimatiques (Berard et al., 2022), de l'année de production, de la localisation et de la variété. Certains facteurs environnementaux affectent négativement ce rendement tels que les températures élevées en été, le manque d'eau et les sols humides et froids au printemps (Čeh et al., 2020). De plus, même si le lin est peu demandeur en intrants, la fertilisation azotée influence tout de même le rendement en graines, étant donné que l'azote reste un facteur limitant. Un apport azoté plus élevé pourrait augmenter le rendement en graines. Toutefois, un apport excédentaire pourrait affecter la résistance à la verse (Herzog et al., 2017).

Le rendement en huile est en moyenne de 35 à 50% du poids des graines (Zuk et al., 2015). Le rendement en huile varie en fonction de la variété et des conditions agronomiques telles que le lieu de production, le type de sol, l'approvisionnement en eau, la fertilisation, la date de semis et les conditions météorologiques (Čeh et al., 2020). Il varie également selon la méthode d'extraction de l'huile (Yang et al., 2021).



Les composantes de rendement sont le nombre de graines par capsule, le nombre de capsules par branche, le nombre de branches par plante, la densité de plantes par unité de surface et le PMG<sup>3</sup> (Parmentier, 2007 ; Zhang et al., 2020). Le PMG varie en fonction des variétés et est en moyenne compris entre 5 et 8 g (Berard et al., 2022).

#### 2.3.4 Aspect qualitatif

Cette graine oléagineuse contient 23 à 30% de glucides, 18 à 25% de protéines et 35 à 46% de matières grasses (Zuk et al., 2015).

L'huile est composée de 9 à 11 % d'acides gras (AG) saturés (acide palmitique (6%) et acide stéarique (3%)) et 75 à 90 % d'AG insaturés (acide oléique (19%), acide linoléique (13%) et acide alpha-linolénique (55%)). Contrairement aux autres graines oléagineuses, le lin contient moins d'oméga 6 que d'oméga 3 (Čeh et al., 2020 ; Labalette et al., 2011 ; Zuk et al., 2015).

Les oméga 3 et 6, qualifiés d'essentiels et indispensables, participent à la régulation de grandes fonctions physiologiques, à la constitution des membranes cellulaires et à l'expression de certains gènes. De plus, aucun organisme animal ne sait les fabriquer (Weill et al., 2010).

Cette graine est également riche en lignanes et en vitamine E. Les lignanes sont une source de protéines et de fibres solubles de haute qualité en plus d'être une source de composés phénoliques (Čeh et al., 2020; Cui et al., 2022). Elle contient également du mucilage qui est riche en polysaccharides et a une capacité de gonflement en milieu humide (Weill et al., 2010).

La teneur en huile et le profil en acide gras varient en fonction de la variété utilisée, mais également selon l'année de production due aux conditions météorologiques et aux effets environnementaux. En effet, les températures et le régime pluviométrique peuvent avoir un effet important sur la production d'huile, mais également sur la qualité de l'huile ou la composition en acide gras (Čeh et al., 2020 ; Zuk et al., 2015). De plus, la fertilisation azotée influence le profil en acide gras. Une intensité de fumure trop importante impacte négativement la teneur en acide alpha-linolénique mais n'influencerait pas la teneur en huile (Herzog et al., 2017).

## 2.4 Sélection

La sélection artificielle au cours de la domestication du lin a entraîné une diversification du type de plantes menant à des utilisations plus spécifiques : le lin oléagineux et le lin textile. Ces deux types de plantes possèdent des finalités différentes avec respectivement l'utilisation de la graine et de l'huile pour la première, et de la fibre pour la deuxième. De plus, elles diffèrent d'un point de vue de leurs traits morphologiques, leur phénotype, leur physiologie et leur schéma de croissance (Ataï et al., 2021 ; Zuk et al., 2015).

La sélection variétale du lin reste relativement récente (1960) et connaît des progrès continus (UFS, March-14-2023). Elle repose sur des obtenteurs spécialisés dans cette sélection. En France, la première

---

<sup>3</sup> Poids de mille grains.

variété de lin oléagineux d'hiver, Oliver, a été sélectionnée par la recherche publique via l'INRA<sup>4</sup> en 1995. En 2013, les sélectionneurs connus étaient au nombre de dix dans l'Union européenne dont trois en France (Labalette et al., 2013). Cependant, il n'existe pas d'obteneur en Belgique. Actuellement, le sélectionneur privé GIE Linéa représente 80% des variétés du marché français (Semences de France, February-24-2023).

Les méthodes de sélection sont restées assez classiques avant la découverte de la séquence du génome nucléaire. En effet, ceci a permis de stimuler la recherche génomique et a permis la sélection de phénotypes améliorés, de lignées et la création de nouvelles variétés (Labalette et al., 2013; Zuk et al., 2015). Plusieurs programmes de sélection existent et ciblent le lin d'hiver ou de printemps ainsi que des variétés à graines brunes ou jaunes (Pleinchamp, 2021). Ces programmes reposent sur des critères de sélection principaux tels que le rendement en graines, la teneur en huile, la teneur en acide alpha-linolénique, la précocité à la floraison et à la maturité, la tolérance au froid, la résistance à la verse et à la fusariose (Labalette et al., 2013; Myvar, March-15-2023). De nouvelles variétés sont régulièrement inscrites dans "Le Catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées en France" (GEVES, March-14-2023). Depuis 2020, six nouvelles variétés ont été inscrites telles que Attila (2020), Merinos (2021), Montdor (2022) et Lumina (2023) (Myvar, March-15-2023). Les performances de rendement en graines ont augmenté de 0,77 quintal par ha/an pour le lin oléagineux d'hiver grâce aux progrès rapides de la sélection (UFS, March-14-2023).

## 2.5 Utilisation

### 2.5.1 Industrielle

L'huile de lin étant sensible à l'oxydation due à sa haute teneur en acide alpha-linolénique, l'industrie l'utilise principalement comme composant de peintures, d'encres, de vernis et de savons (Zuk et al., 2015). Elle est également utilisée en agro-alimentaire et dans les industries de cosmétiques et d'éco-matériaux (Čeh et al., 2020).

Les pailles de lin peuvent être exportées et valorisées en isolants, en litières ou en paillage. Elles peuvent également être broyées et laissées ou enfouies dans le sol afin d'améliorer la structure de celui-ci. Cependant, les utilisations industrielles et la valorisation de ces pailles sont assez rares et pas faciles en pratique (Berard et al., 2022). Or, des résultats montrent l'intérêt et la valeur ajoutée potentielle de la récolte des tiges et de l'extraction des différentes fractions végétales du lin oléagineux pour des applications techniques des fibres (Grégoire et al., 2019).

### 2.5.2 Alimentation

Le lin est largement utilisé par les industries, mais en raison de sa teneur élevée en acides gras essentiels, la graine de lin est en pleine expansion dans l'alimentation humaine et animale (Ataï et al., 2021).

Le lin peut être utilisé sous forme de graines entières, extrudées ou cuites, sous forme d'huile ou de tourteaux (Berard et al., 2022; Parmentier, 2007). Certains traitements de cuisson sont nécessaires afin

---

<sup>4</sup> Institut national de la recherche agronomique.

d'éliminer les facteurs antinutritionnels et d'augmenter la digestibilité de la graine (Charrier et al., 2013).

### Alimentation humaine

Les graines de lin sont utilisées en boulangerie, mais cela reste un débouché mineur avec 5 à 6% de la production française utilisée pour ce débouché (Berard et al., 2022). De plus, due aux difficultés de stockage, l'huile de lin est autorisée, uniquement sous forme de mélange, seulement depuis 2006 dans les huiles alimentaires et les matières grasses à tartiner (Weill et al., 2010).

Néanmoins, compte tenu de la haute valeur ajoutée et des bienfaits sur la santé humaine tels que la diminution du cholestérol, la prévention des maladies cardiaques, des accidents vasculaires cérébraux et du diabète, l'utilisation de la graine de lin connaît un regain d'intérêt depuis quelques années (Cui et al., 2022).

### Alimentation animale

Le lin oléagineux est également utilisé pour l'alimentation des oiseaux et du bétail (Parmentier, 2007). En effet, 75 à 95% des graines produites en France sont destinées à l'alimentation animale après extrusion ou sous forme de graines entières (Berard et al., 2022).

L'utilisation du lin en alimentation animale améliore la santé, les performances laitières et de reproduction du bétail (Cui et al., 2022; Morice, 2018). De plus, il s'agit d'une solution nutritionnelle reconnue comme étant la plus efficace afin de réduire les émissions de méthane chez les bovins. Pour cela, une partie de la ration des glucides est remplacée par des lipides qui vont réduire l'activité des bactéries cellulolytiques et des méthanogènes (Doreau et al., 2017).

Cette utilisation pour le bétail a également un effet positif sur la qualité des produits laitiers et de la viande. L'amélioration du profil lipidique de ces produits, avec une augmentation des acides gras oméga 3 et une diminution des acides gras saturés, participe à celle de l'homme et a un rôle dans la prévention des maladies cardiovasculaires (Charrier et al., 2013; Doreau et al., 2017). Dans cette optique, des filières labellisées, telles que "Bleu-Blanc-Cœur" en France, se sont développées et regroupent des élevages respectant une alimentation animale riche en oméga 3 (Charrier et al., 2013; Parmentier, 2007).

### 3. Objectifs

Compte tenu des nombreux atouts du lin oléagineux d'hiver et du manque d'études réalisées en Belgique sur cette culture, ce présent travail se penche sur l'analyse de plusieurs variétés ainsi que différentes modalités de fumure azotée au cours de la saison culturale 2022-2023. Ceci permettra de trouver quelles sont les variétés les plus adaptées au sol et au climat en région limoneuse ainsi que la dose optimale d'azote nécessaire au bon développement de la culture. Pour cela, les composantes de rendement seront étudiées et l'état nutritif de la culture sera évalué.

De plus, des analyses de la qualité, sur la récolte des essais de l'année précédente (2021-2022), donneront des informations sur la teneur en huile et le profil en acide gras des variétés et des modalités de fumure testées. Ceci permettra de comparer les teneurs des variétés ainsi que d'étudier l'effet de la fertilisation sur ces variables.

## 4. Matériel et méthodes

### 4.1 Partie phytotechnie : essais 2022-2023

#### 4.1.1 Site des essais

Les parcelles d'essais de la saison culturale 2022-2023 se situaient à Loncée (50°55'06.6"N, 4°75'05.4"E, Gembloux, Belgique) et ont été implantées par le CePiCOP (Centre Pilote Céréales et Oléo-protéagineux), en partenariat avec l'Unité de Phytotechnie tempérée de la faculté des Sciences agronomiques Gembloux Agro-Bio Tech – Université de Liège. Elles se trouvaient en région limoneuse avec un sol de type limoneux à drainage naturel favorable (SPW, March-28-2023).

#### 4.1.2 Analyse de sol

Le reliquat azoté a été quantifié fin janvier par le Centre de Recherches Agronomiques Wallon (CRA-W). Le précédent cultural était des pommes de terre. L'azote minéral total dans les trois premiers horizons du sol était de 34,1 kgN/ha.

Tableau 2 : Analyse du reliquat azoté par le CRAW.

Horizon	NH4 (kg/ha)	NO3 (kg/ha)	N minéral Tot (kg/ha)
0-30	0,66	13,79	14,45
30-60	0,72	9,81	10,53
60-90	0,72	8,41	9,13
<b>Total</b>	<b>2,1</b>	<b>32,01</b>	<b>34,11</b>

#### 4.1.3 Conditions climatiques

Les conditions climatiques reçues par la culture sont illustrées ci-dessous en termes de températures (minimales moyennes, moyennes, maximales moyennes) et de précipitations. Ces données sont comparées aux normales climatiques mensuelles de la station d'Uccle.

Tableau 3 : Données climatiques. À gauche, les normales climatiques mensuelles de la station d'Uccle. Source : données provenant de (IRM, March-8-2023). À droite, les conditions climatiques reçues proche du site d'expérimentation du semis à la récolte. Source : (CRA-W – Données Pameseb Station Ernage).

	Normales climatiques mensuelles d'Uccle				Conditions climatiques reçues par la culture en 2022-2023				
	T° min moy (°C)	T° moy (°C)	T° max moy (°C)	Précipitations totales (mm)	T° min moy (°C)	T° moy (°C)	T° max moy (°C)	Précipitations totales (mm)	Somme des degrés-jours (>3°C)(°CJ)
Septembre	11,3	<b>15,2</b>	19,5	<b>65,3</b>	7,0	<b>10,8</b>	14,6	26,2	62,5 *
Octobre	8,1	<b>11,3</b>	14,9	<b>67,8</b>	10,0	<b>14,0</b>	18,1	<b>34,2</b>	341,4
Novembre	4,6	<b>7,2</b>	9,9	<b>76,2</b>	5,8	<b>8,6</b>	11,3	<b>56,3</b>	167,3
Décembre	2,1	<b>4,3</b>	6,6	<b>87,4</b>	1,5	<b>3,8</b>	6,0	<b>83,9</b>	85,0
Janvier	1,4	<b>3,7</b>	6,1	<b>75,5</b>	2,7	<b>4,6</b>	6,6	<b>91,4</b>	86,1
Février	1,5	<b>4,2</b>	7,1	<b>65,1</b>	1,9	<b>5,0</b>	8,2	<b>12,5</b>	70,0
Mars	3,5	<b>7,1</b>	10,9	<b>59,3</b>	3,5	<b>7,0</b>	10,4	<b>120,6</b>	129,4
Avril	6,0	<b>10,4</b>	15,0	<b>46,7</b>	4,1	<b>8,2</b>	12,4	<b>59,9</b>	157,0
Mai	9,2	<b>13,9</b>	18,4	<b>59,7</b>	8,0	<b>13,1</b>	18,2	<b>76,5</b>	313,9
Juin	12,0	<b>16,7</b>	21,2	<b>70,8</b>	13,7	<b>19,7</b>	25,0	<b>36,1</b>	502,1
Juillet	14,1	<b>18,7</b>	23,2	<b>76,9</b>	13,3	<b>18,7</b>	23,7	<b>26,1</b>	313,3 **
Août	13,9	<b>18,4</b>	23,0	<b>86,5</b>					
<b>Total</b>				<b>837,1</b>				<b>623,7</b>	<b>2228</b>

Légende : Pour les températures moyennes (exceptés septembre et juillet) : rouge = valeur supérieure aux normales mensuelles ; bleu = valeur inférieure ; blanc = valeur comprise dans les normales. Pour les précipitations (exceptés septembre et juillet) : rouge = valeur inférieure aux normales mensuelles ; bleu = valeur supérieure. \* Les données du mois de septembre ont été prises en compte à partir du semis (23/09/22). \*\* Les données du mois de juillet ont été comptabilisées jusqu'à la récolte (20/07/23).

#### 4.1.4 Dispositif expérimental

Dans le cadre de ce travail, deux facteurs ont été étudiés séparément sur les parcelles d'essais : l'aspect variétal et la fertilisation azotée.

##### a. Facteur variétal

Douze variétés de lin oléagineux d'hiver ont été étudiées lors de la saison culturale 2022-2023. Quatre de celles-ci ont pu être testées pour la première fois (6, 7, 8 et 12). Ces quatre variétés, en plus de LSL 1133, ne sont pas encore inscrites à un catalogue et sont dès lors nommées par un code (Tableau 4).

**Tableau 4** : Informations sur les douze variétés étudiées. Source : (site MyVar, March-15-2023).

N°	Variété	Obtenteur	Représentant(s)	Année et pays d'inscription		Couleur des graines	Année de présence dans les essais			
							2019-2020	2020-2021	2021-2022	2022-2023
1	ANGORA	GIE Linéa - Semences de lin	SCA LIN 2000/ Semences de France	2013	France	Brune				
2	ATTILA	GIE Linéa - Semences de lin	SCA LIN 2000/ Semences de France	2020	France	Brune				
3	MERINOS	GIE Linéa - Semences de lin	SCA LIN 2000 / Linéa	2021	France	Brune				
4	MONTDOR	GIE Linéa - Semences de lin	SCA LIN 2000/ Linéa / Semences de France	2022	France	Jaune				
5	LUMINA	GIE Linéa - Semences de lin	SCA LIN 2000 / Linéa	2023	France	Brune				
6	GOH23	GIE Linéa - Semences de lin	SCA LIN 2000			Brune				
7	GOH24	GIE Linéa - Semences de lin	SCA LIN 2000			Brune				
8	GOH25	GIE Linéa - Semences de lin	SCA LIN 2000			Brune				
9	LS APALACHE		Laboulet Semences	2019	Italie	Brune				
10	SIDERAL		Laboulet Semences	2009	Italie	Brune				
11	LSL 1133		Laboulet Semences			Brune				
12	LSL1283		Laboulet Semences			Brune				

##### b. Facteur fertilisation

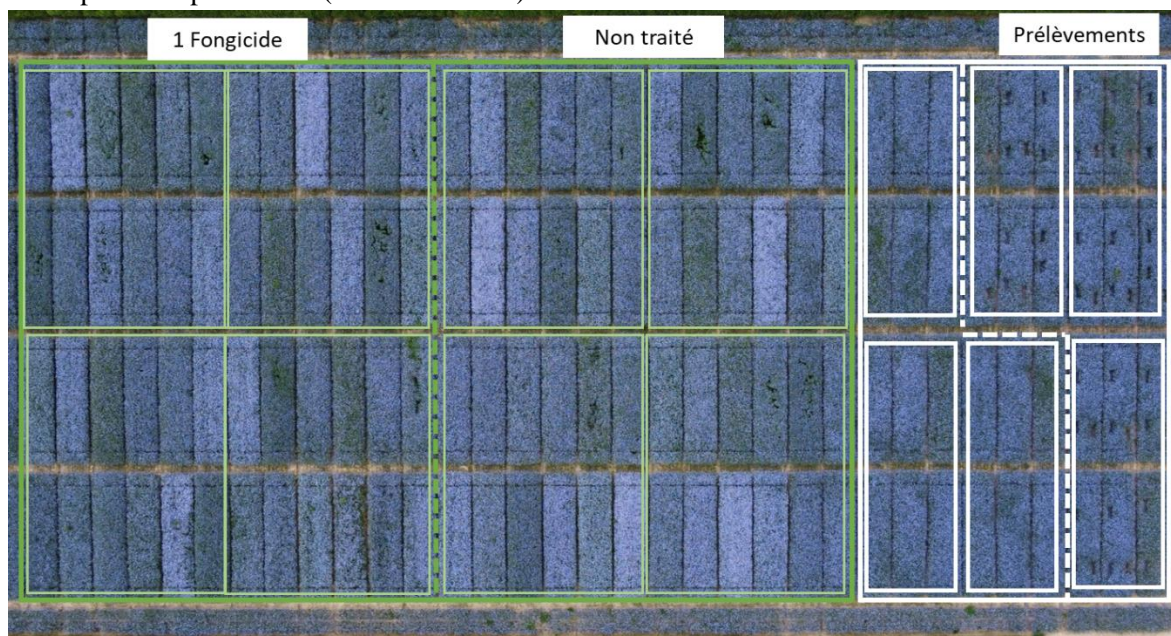
Six modalités de fumure, allant de 0 à 110 kgN/ha, ont été testées en 2022-2023 sur la variété Angora. Ces mêmes modalités ont également été testées en 2021-2022. Selon l'objectif de rendement, en France, la dose recommandée est située entre 50 et 100 kgN/ha au maximum. À partir de 80 kgN/ha, il est conseillé de fractionner la dose en deux apports : 30 à 50 kgN/ha à la reprise de la végétation et le complément 4 à 5 semaines plus tard (Berard et al., 2022). Ces modalités ont donc été testées en plus de la présence d'un témoin et d'une dose supérieure à la dose recommandée. L'engrais utilisé est un ammonitrate solide 27%.

**Tableau 5** : Modalités de l'essai fertilisation.

N°	1ère fraction (kgN/ha)	2ème fraction (kgN/ha)	Total (kgN/ha)
1	0	0	<b>0</b>
2	50	0	<b>50</b>
3	80	0	<b>80</b>
4	30	50	<b>80</b>
5	50	30	<b>80</b>
6	80	30	<b>110</b>



Le dispositif expérimental (en vue aérienne) des essais est le suivant :



**Figure 6** : Photographie aérienne annotée du dispositif expérimental. Source personnelle.  
Légende : Encadré vert = essai variétal ; encadré blanc = essai fumure.

Les douze variétés ont été semées aléatoirement en quatre répétitions non traitées (sans fongicide) et quatre répétitions traitées (avec un fongicide) pour un total de 96 parcelles dans deux dispositifs en blocs aléatoires complets. Le bloc traité n'a pas été suivi temporellement et faisait juste l'objet de mesures de hauteurs et de cotation à la verse en plus de l'étude du rendement en grain.

L'essai fumure est composé de trois répétitions restant intactes jusqu'à la récolte et trois autres faisant l'objet de prélèvements de biomasse afin d'analyser la teneur en azote. Il s'agit de deux dispositifs en blocs aléatoires complets contenant 36 parcelles au total.

#### 4.1.5 Opérations culturales

L'ensemble des opérations culturales ayant eu lieu lors de la saison 2022-2023 sont reprises dans le tableau ci-contre (Tableau 6).

**Tableau 6** : Opérations culturales de la saison 2022-2023.

Date	Opérations culturales	
	Essai variétal	Essai fumure
sept-22	Préparation du sol : labour + herse rotative	
23-sept-22	Semis : densité de 450 gr/m <sup>2</sup>	
26-oct-22	Traitement fongicide : RIZA EC 1,25l/ha	
17-mars-23		Fertilisation : selon les modalités (Ammonitrate 27%)
20-mars-23	Désherbage chimique : Gratil 20g/ha + Allie 10g/ha	
21-mars-23	Fertilisation : 80 kgN/ha (Ammonitrate 27%)	
17-avr-23		Fertilisation : selon les modalités (Ammonitrate 27%)
17-avr-23	Régulateur : Caryx 1L/ha	
20-juil-23	Récolte	

Le traitement fongicide a uniquement été appliqué sur la moitié de l'essai variétal comme mentionné plus haut.

#### 4.1.6 Observations et variables mesurées

##### A. Stade BBCH

Les stades de croissance ont été relevés à l'aide de l'échelle BBCH adaptée au lin oléagineux (Annexe 1). Cette valeur a été attribuée suite à l'observation de la parcelle dans son ensemble.

Les stades de croissance ont pu être mis en lien avec la somme de degrés-jours cumulée par la culture.

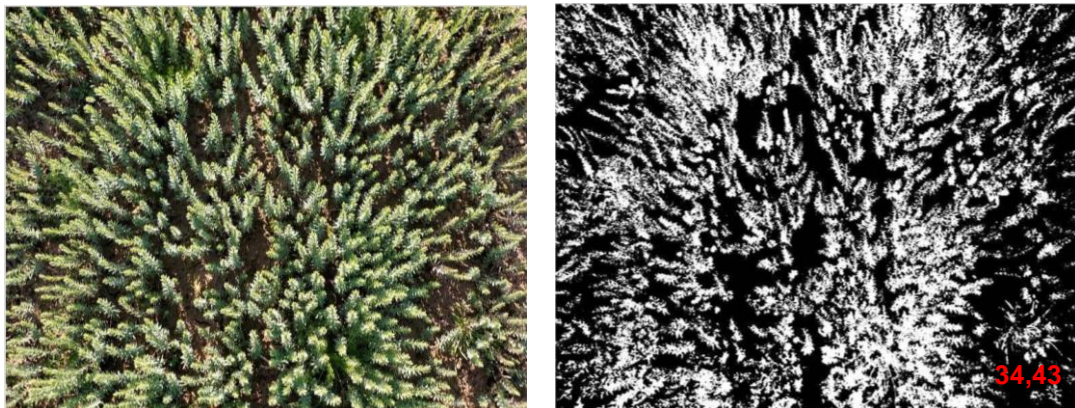
**Équation 1** : Somme des degrés-jours de croissance. Source : (D'Antuono et al., 1995; McMaster et al., 1997; Rokade et al., 2015).

$$DJC = \sum_{ds}^{dr} \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_{base}$$

Légende : DJC = degrés-jours de croissance (°CJ), ds = date de semis, dr = date de récolte, Tmax = température journalière maximale (°C), Tmin = température journalière minimale (°C), Tbase = température de base = 3°C.

##### B. Couverture du sol

Le degré de couverture du sol à la sortie de l'hiver a pu être quantifié à l'aide de l'application « Canopeo » © sur smartphone. Cet outil permet d'analyser la couverture verte fractionnée à partir d'une photo. Il a été développé à l'aide de Matlab et est basé sur des rapports de couleur rouge sur vert (R/V) et bleu sur vert (B/V) ainsi qu'un excès d'indice de vert (2V-R-B) (Patrignani et al., 2015). Après traitement, la végétation apparaît en pixels blancs. Au contraire, tout autre élément en fond apparaît en pixels noirs. Certains réglages manuels sont possibles afin d'être plus ou moins inclusif dans le degré de couverture ("Canopeo," March-29-2023). La valeur de réglage par défaut a été maintenue tout au long de l'analyse.



**Figure 7** : Photographies avant (à gauche) et après (à droite) traitement par l'application Canopeo. Source personnelle.



### C. Densité

Les densités de plantes ont été déterminées en comptabilisant le nombre de plantes sur un mètre linéaire dans le sens du semis après la reprise de végétation. Deux mesures ont été réalisées par parcelle (Lafond et al., 2008). Ces données ont ensuite été transformées en nombre de plantes par mètre carré.

### D. Biomasse aérienne

Les prélèvements de biomasse aérienne ont eu lieu à 4 stades prédéfinis : 10 cm (avant la 1<sup>ère</sup> fertilisation), 30 cm (après la 1<sup>ère</sup> fertilisation), bourgeonnement et remplissage des capsules (Flénet et al., 2006) (Tableau 7).

La biomasse aérienne a été prélevée dans des quadrats d'un mètre de long sur une hauteur de 4 lignes de semis, soit une surface de 0,5 m<sup>2</sup>. Les plantes ont été arrachées manuellement sur toute la surface.

Les échantillons ont été identifiés et placés dans des sacs microperforés. Après la pesée de la biomasse fraîche, ils ont ensuite été placés à l'étuve pendant 72h à une température de 65°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La température de séchage peut toutefois aller jusqu'à 80°C pendant 48h (Flénet et al., 2006). Le protocole habituellement réalisé dans l'unité de phytotechnie tempérée a été préférentiellement choisi. La biomasse sèche a ensuite été pesée et transformée en tonnes par hectare.

**Tableau 7** : Dates des prélèvements de la biomasse.

Stade	Date	Jour après semis
10 cm	17-mars-23	175
30 cm	19-avr-23	208
Bourgeonnement	03-mai-23	222
Remplissage des capsules	29-juin-23	279

### E. Teneur en azote

La teneur en azote de chaque échantillon a été quantifiée par le laboratoire du Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (CPAR) de La Hulpe. Un prétraitement est nécessaire et consiste en un broyage de la matière à 1 mm à l'aide d'un broyeur à couteaux. L'azote total est ensuite déterminé par une combustion sèche avec la méthode de Dumas (norme ISO 16634-1) (CPAR, April-20-2023).

### F. Précocité à la floraison

La précocité à la floraison a été déterminée comme étant le nombre de jours (ou degrés-jours) nécessaire depuis le semis jusqu'à l'apparition de la première fleur (Casa et al., 1999).

#### G. Durée de la floraison

La durée de la floraison est la différence entre le nombre de jours où seulement 10% des plantes restent en fleur et le premier jour de la floraison (Lafond et al., 2008).

#### H. Précocité à la maturité

La précocité à la maturité a été déterminée comme étant le nombre de jours (ou degrés-jours) entre le semis et la maturité de 75% des capsules de la parcelle (Lafond et al., 2008). La maturité correspondant au stade 89 de l'échelle BBCH (Smith et al., 1998).

#### I. Hauteur à maturité

La hauteur a été relevée lorsque la maturité était atteinte. Cette mesure a été réalisée sur 5 poignées de plantes par parcelle du sol jusqu'en haut des capsules (Ataï et al., 2021).

#### J. Tolérance à la verse

Une cotation de la verse, allant de 1 à 9 a été réalisée à maturité : 1 = absence de verse, 9 = verse complète de la parcelle (Pageau et al., 2011).

#### K. Composantes de rendement

Plusieurs composantes du rendement ont été mesurées (Ataï et al., 2021; Zhang et al., 2020) :

##### Nombre effectif de branches

Le nombre de branches par plante a été relevé pendant le remplissage des capsules sur 5 plantes par parcelle.

##### Nombre de capsules

Le nombre de capsules par plante a été comptabilisé pendant le remplissage des capsules sur les 5 mêmes plantes que le nombre de branches. Le nombre de capsules par branche a ensuite été calculé.

##### Nombre de graines

Le nombre de graines par capsule a été relevé pour 10 capsules prises aléatoirement par parcelle à la maturité.

##### Rendement

Le rendement en graines de chaque parcelle a été obtenu à la suite de la récolte le 20 juillet 2023. Celle-ci a été réalisée à l'aide d'une moissonneuse batteuse d'expérimentation Wintersteiger®. La récolte de

chaque parcelle a ensuite été tamisée afin de retirer les impuretés et a été pesée. Le taux d'humidité des graines a été évalué à l'aide d'une machine GAC®2500-INTL. Le rendement a ensuite pu être corrigé à 9% d'humidité.

### PMG

Le poids de mille grains a été comptabilisé manuellement après la récolte. Pour cela, 4x 100 graines ont été comptées par échantillon et pesées. La moyenne a été calculée et transformée en PMG.

### Graines par unité de surface

Le nombre de graines/m<sup>2</sup> a été calculé en divisant le rendement par le PMG en adaptant les unités.

Ces différentes variables ont été mesurées dans les essais suivants (Tableau 8) :

**Tableau 8** : Variables mesurées dans l'essai variétal et fumure.

Variables	Essai variétal	Essai fumure
Stade BBCH	x	
Couverture du sol	x	
Densité plantes/m <sup>2</sup>	x	x
Biomasse aérienne		x
Teneur en azote		x
Précocité à la floraison	x	
Durée floraison	x	
Précocité à la maturité	x	
Hauteur à maturité	x	x
Cotation verse à maturité	x	x
Nombre de branches/plante	x	x
Nombre de capsules/branche	x	x
Nombre de graines/capsule	x	x
Rendement en graines	x	x
PMG	x	x
Graines/m <sup>2</sup>	x	

## 4.2 Partie analyse de la qualité : récolte essais 2022-2023

### 4.2.1 Matériel végétal

Les graines de lin oléagineux d'hiver récoltées en 2022 dans les parcelles d'essais du CePiCOP ont été utilisées afin d'analyser la teneur en huile, le rendement en huile et le profil en acide gras.

Pour cela, 54 échantillons étaient disponibles :

- 30 échantillons de l'essai variétal,
- 24 échantillons de l'essai fumure.

L'essai variétal était constitué de dix variétés reprises ci-contre. Ces variétés étaient présentes en trois répétitions et ont toutes reçues un traitement fongicide. Deux de ces variétés (N°3 et 9) n'ont pas été reprises dans l'essai cette année (Tableau 4).

L'essai fumure était identiquement le même avec six modalités allant de 0 à 110 kgN/ha (Tableau 5). Les différentes modalités étaient répétées quatre fois.

#### 4.2.2 Protocoles

Les protocoles des manipulations proviennent du laboratoire de chimie des molécules naturelles de Gembloux Agro-Bio Tech (Laboratoire de chimie des molécules naturelles, 2023).

##### 4.2.2.1 Extraction de l'huile par Soxhlet

Le principe de l'extraction par solvant d'échantillons solides repose sur le processus de lixiviation afin d'extraire des composés d'intérêt d'un solide insoluble dans un solvant (Luque de Castro et al., 1998). L'échantillon solide est placé dans une cartouche en cellulose qui sera progressivement remplie de solvant à partir d'un ballon de distillation suite à l'effet du chauffage à reflux. Lorsque le solvant liquide atteint le niveau de débordement, celui-ci est aspiré par un siphon et est refoulé dans le ballon en entraînant des analytes. Cette opération est répétée en boucle jusqu'à l'extraction complète de l'huile (López-Bascón et al., 2020).

Le dispositif utilisé était muni de six extracteurs et a permis une extraction en chaîne de six échantillons différents. L'extraction complète de l'huile nécessitait un chauffage à reflux durant une période de 6 heures.

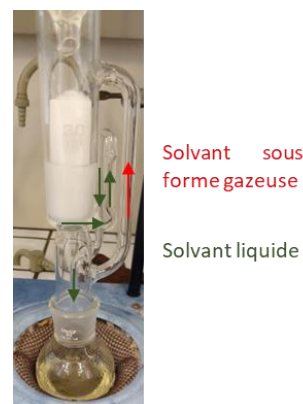
Suite à l'extraction, une solution huileuse est obtenue. L'hexane contenu dans celle-ci doit être évaporé afin de récupérer l'huile. Un évaporateur rotatif est utilisé et consiste en une distillation simple sous pression réduite permettant de séparer le solvant de l'huile. La pression étant diminuée, la température d'ébullition du solvant à évaporer se voit diminuée également, passant de 69°C à 40°C (CultureSciences-Chimie, April-3-2023; PubChem, April-3-2023).

##### 4.2.2.2 Dosage des acides gras totaux par transestérification au BF<sub>3</sub> et analyse par chromatographie en phase gazeuse

Deux échantillons d'huile ont été prélevés pour chaque extraction. Les acides gras totaux ont été estérifiés afin de les transformer en esters méthyliques d'acides gras libres (FAME). Cette estérification a été réalisée à l'aide d'un mélange de méthanol et de BF<sub>3</sub>. Ces FAME ainsi obtenus sont plus volatils et permettent un dosage des acides gras par analyse en chromatographie à phase gazeuse.

**Tableau 9** : Variétés présentes dans l'essai variétal de la saison 2021-2022. Source : (Hubaux, 2022).

N°	Variété
1	ANGORA
2	ATTILA
3	CLEDOR
4	LS APALACHE
5	LSL 1133
6	LUMINA
7	MERINOS
8	MONTDOR
9	ORIVAL
10	SIDERAL



**Figure 8** : Photographie annotée de l'extraction par Soxhlet. Source personnelle.

La phase hexanique de chaque échantillon a été injectée dans un appareil à chromatographie en phase gazeuse muni d'une détection à ionisation de flamme (GC-FID). Un témoin a également été injecté. Le profil en acide gras et le pourcentage de chacun de ces acides ont pu être obtenus grâce à la séparation des FAME en fonction de la longueur de leur chaîne carbonée et du nombre d'insaturation des liaisons, en comparaison avec le temps de rétention du témoin. De plus, une chromatographie gazeuse à spectromètre de masse a été réalisée sur un échantillon afin de confirmer les résultats et d'identifier les acides gras sur base de leur rapport masse sur charge.

## 4.3 Analyse des données

L'ensemble des analyses ont été réalisées avec le logiciel R via l'interface RStudio (version 4.2.3).

### 4.3.1 Graphique

Les graphiques ont été réalisés à l'aide du package ggplot2.

### 4.3.2 ANOVA

Des analyses de la variance (ANOVA) ont été effectuées. Le niveau de signification des hypothèses est fixé à  $p$ -valeur  $< 0,05$ . Les conditions d'application ont été testées sur les résidus à l'aide du test de Shapiro et de Bartlett. Des tests supplémentaires de structuration des moyennes ont été réalisés avec le test Student-Newman&Keuls (test SNK). Des tests de différence la moins significative de Fisher (test LSD) ont également été utilisés lorsque la  $p$ -valeur était proche de la non-significativité et que le test SNK ne permettait pas de mettre en avant la différence significative observée.

### 4.3.3 Corrélation

Les packages « Ggally » et « Corrplot » ont été utilisés afin de calculer et visualiser les corrélations entre les variables.

### 4.3.4 ACP

L'analyse en composantes principales a été réalisée avec la fonction PCA. La méthode de Ward a ensuite été utilisée via la fonction hclust pour effectuer la classification numérique.

### 4.3.5 Courbe critique de dilution de l'azote

La courbe critique de dilution de l'azote, qui est caractérisée comme étant la concentration minimale d'azote total dans la plante nécessaire à la production maximale de la matière sèche, a été élaborée (Justes et al., 1994).

La formule permettant de la réaliser a été adaptée par Flénet et al. (2006) en se basant sur la méthodologie de Justes et al. (1994) et est la suivante :

**Équation 2** : Courbe critique de dilution de l'azote. Source : (Flénet et al., 2006).

$$\begin{aligned} \log \text{NSC} &= \log a - b \log \text{WSC} \\ a &= 4,69 \\ b &= 0,53 \end{aligned}$$

Légende : NSC = concentration critique d'azote dans les pousses (%), WSC = Biomasse sèche (t/ha).

Cette courbe met en relation la teneur en azote total et l'évolution de la biomasse aérienne au cours de la croissance de la culture (Flénet et al., 2006).

Les données de biomasses sèches (T/ha) et de teneurs en azote (%) de l'essai fertilisation ont pu être ajoutées afin d'identifier l'état nutritif azoté de la culture.

#### 4.3.6 Teneur en huile

La teneur en huile des graines récoltées en 2022 a pu être calculée suite à l'extraction de l'huile. La formule a été adaptée afin d'inclure le PMG et d'obtenir la teneur en huile d'une graine.

**Équation 3** : Teneur en huile (%). Source : AOCS, 2011.

$$\text{Teneur en huile (\%)} = \frac{\text{Masse d'huile extraite (g)}}{\text{Masse de l'échantillon (g)}} \times 100$$

**Équation 4** : Teneur en huile d'une graine (%).

$$\text{Teneur en huile 1G(\%)} = \frac{\frac{\text{Masse d'huile extraite (g)}}{\text{Masse de l'échantillon (g)}} \times 1000}{\text{PMG}}$$

#### 4.3.7 Rendement en huile

Le rendement en huile des parcelles de 2022 a été calculé grâce à la formule suivante :

**Équation 5** : Rendement en huile (T/ha).

$$\text{Rendement en huile (T/ha)} = \frac{\text{Rendement en graines (T/ha)} \times \text{Teneur en huile 1G (\%)}}{100}$$

Le rendement en graines provient des données de Hubaux (2022).

## 5. Résultats et discussion

### 5.1 Partie phytotechnie : essais 2022-2023

#### 5.1.1 Essai variétal

##### A. Stades de croissance

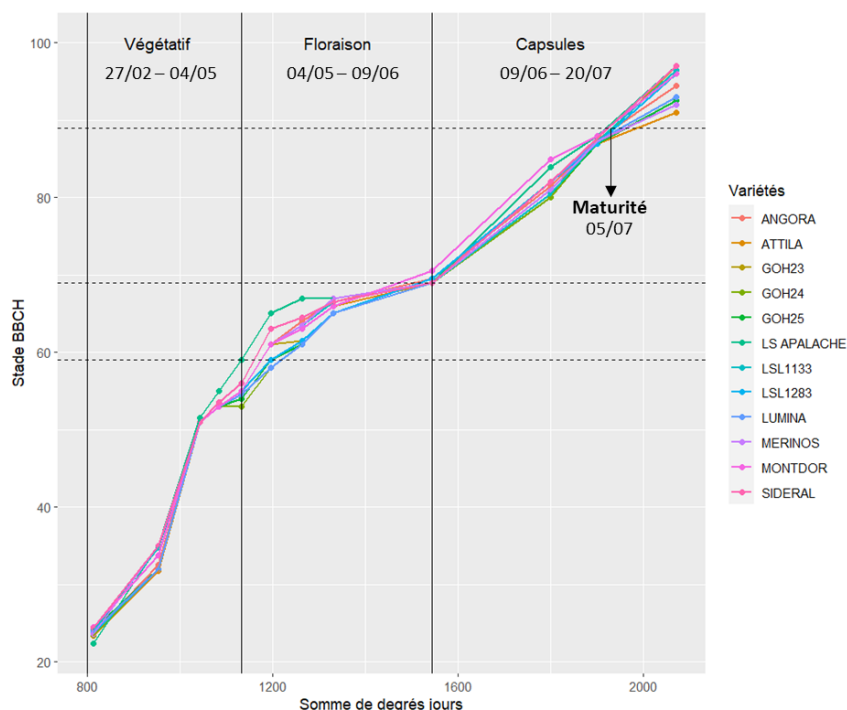


Figure 9 : Graphique de l'évolution des stades de croissance BBCH en fonction des degrés-jours cumulés par les variétés.

Des différences significatives apparaissent entre les variétés pour chaque relevé de stade BBCH, hormis au stade 51. Les tableaux de résultats des ANOVA sont repris en Annexe 2.

Il existe une corrélation très hautement significative entre les stades BBCH et les degrés-jours (0,956).

##### Période végétative

À la sortie de l'hiver, au stade de ramification basale (20), les variétés ont des stades BBCH assez proches. Les variétés Attila et LS Apalache sont significativement les moins avancées dans leur développement.

Le stade d'extension de la tige (30) est observé à la reprise de la végétation. LS Apalache est la plus développée avec Merinos, Sideral, GOH23 et LSL1133.

Au début de l'émergence de l'inflorescence (51), aucune différence n'apparaît.

LS Apalache se différencie ensuite significativement des autres variétés jusqu'au début de la floraison, avec l'apparition du corymbe pendant que les autres sont au stade d'extension du bourgeon.

## Floraison

### a. Précocité

La précocité à la floraison, en nombre de degrés-jours nécessaire pour atteindre la floraison, montre une différence très hautement significative entre les variétés ( $p$ -valeur =  $5,3 \cdot 10^{-10}$ ) (Tableau 10).

LS Apalache se distingue des autres par sa précocité. La variété Lumina est la plus tardive, mais n'est pas significativement différente de GOH24, GOH25 et LSL1283.

LS Apalache a nécessité 1136 °CJ pour fleurir, ce qui correspond à 223 jours après le semis. De fait, cette variété est caractérisée comme très précoce à la floraison (Laboulet, n.d.). Au contraire, Lumina est caractérisée comme mi-précoce et a eu besoin de 1207 °CJ, équivalent à 230 jours après le semis (Semences de France, 2023c).

### b. Durée

La durée de la floraison présente une différence très hautement significative entre les variétés ( $p$ -valeur =  $2,51 \cdot 10^{-8}$ ).

La durée de floraison est en moyenne de 29 à 36 jours.

LS Apalache se caractérise par la floraison la plus longue et Lumina, la plus courte. De même, les variétés LSL1283, GOH24, et GOH25 montrent le même comportement que Lumina. Montdor était relativement précoce et a une courte durée de floraison.

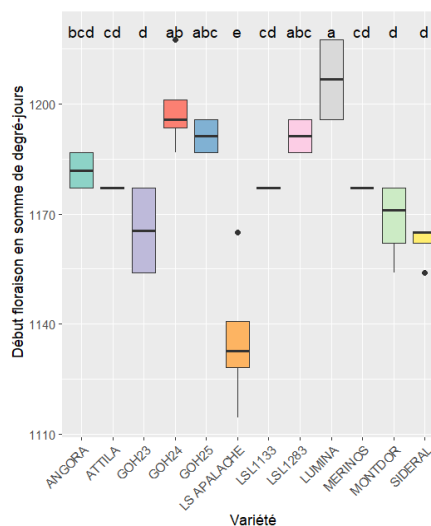
## Remplissage des graines

La variété Montdor se distingue significativement des autres, en étant au stade de développement des graines, lorsque les autres sont en fin de floraison. Cette différence se maintient pendant le remplissage des graines. La variété LS Apalache est également plus avancée (Figure 9).

## Maturité

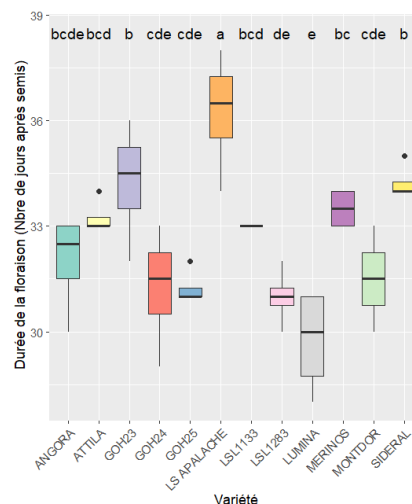
La précocité à la maturité, en nombre de degrés-jours nécessaire pour atteindre ce stade, montre une différence très hautement significative entre les variétés ( $p$ -valeur =  $8,21 \cdot 10^{-6}$ ).

LS Apalache et Sideral ont nécessité 1982 °CJ, correspondant à 285 jours après le semis. Ces variétés sont caractérisées comme précoces à la maturité (Laboulet, nd). GOH23 semble être précoce également.



**Figure 10** : Boxplot de la précocité à la floraison pour chaque variété.

Légende : lettres = groupes du test SNK.



**Figure 11** : Boxplot de la durée de floraison pour chaque variété.

Légende : lettres = groupes du test SNK.



Au contraire, les variétés Merinos et Attila ont eu besoin de 2056 à 2070 °CJ et sont définies comme mi-précoces (Semences de France, 2023b, 2023d).

La maturité du lin pourrait être retardée en raison de conditions froides et humides durant l'été, ce qui prolongerait la période végétative (Pageau et al., 2011). Ces conditions n'ont pas été observées cette année.

**Tableau 10** : Valeurs moyennes du nombre de degrés-jours pour arriver à floraison et à maturité, durée de floraison ± std pour chaque variété et groupes du test SNK.

Variété	Somme de degrés-jours moyenne pour arriver à floraison (°CJ) ± std	Groupe SNK	Durée moyenne de la floraison (J) ± std	Groupe SNK	Somme de degrés-jours moyenne pour arriver à maturité (°CJ) ± std	Groupe SNK
ANGORA	1181,90 ± 5,54	bcd	32,00 ± 1,41	bcde	2019,57 ± 36,94	abcd
ATTILA	1177,10 ± 0,00	cd	33,25 ± 0,50	bcd	2070,50 ± 0,00	a
GOH23	1165,55 ± 13,34	d	34,25 ± 1,71	b	1982,00 ± 0,00	d
GOH24	1198,97 ± 13,14	ab	31,25 ± 1,71	cde	2041,70 ± 33,25	abc
GOH25	1191,25 ± 5,25	abc	31,25 ± 0,50	cde	2048,37 ± 44,25	ab
LS APALACHE	1136,12 ± 21,01	e	36,25 ± 1,71	a	1982,00 ± 0,00	d
LSL1133	1177,10 ± 0,00	cd	33,00 ± 0,00	bcd	1989,72 ± 15,45	bcd
LSL1283	1191,25 ± 5,25	abc	31,00 ± 0,82	de	1997,45 ± 17,84	bcd
LUMINA	1206,70 ± 12,58	a	29,75 ± 1,50	e	2041,70 ± 33,25	abc
MERINOS	1177,10 ± 0,00	cd	33,50 ± 0,58	bc	2056,10 ± 28,80	a
MONTDOR	1168,27 ± 11,12	d	31,50 ± 1,30	cde	1997,45 ± 17,84	bcd
SIDERAL	1162,17 ± 5,45	d	34,25 ± 0,50	b	1982,00 ± 0,00	d
p-valeur	5,3.10 <sup>-10</sup> (***)		2,51.10 <sup>-8</sup> (***)		8,21.10 <sup>-6</sup> (***)	

Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

La floraison et la maturité précoces du lin oléagineux d'hiver sont des critères de sélection souhaitables qui permettent d'éviter les stress hydriques et les fortes températures au cours de la floraison (Berard et al., 2022; Saroha et al., 2022).

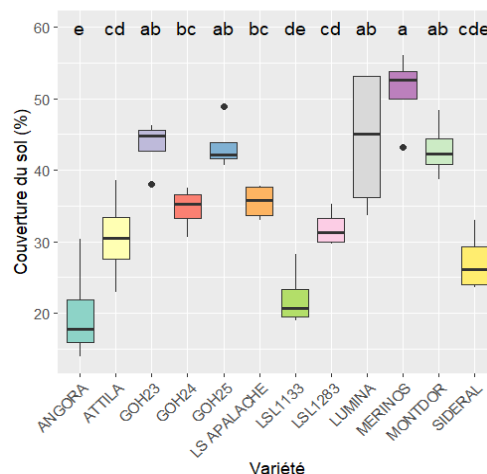
## B. Caractérisation variétale

### a) Couverture du sol

Une différence très hautement significative de couverture du sol en sortie d'hiver a été observée entre les variétés (p-valeur = 6,17.10<sup>-9</sup>) (Annexe 3).

La variété Merinos possède un pourcentage de couverture élevé (51%). Les variétés Montdor, GOH25, GOH23 et Lumina sont également assez couvrantes, avec des pourcentages allant de 43 à 44% de couverture. Au contraire, les variétés Angora, LSL1133 et Sideral, ont des pourcentages de couverture compris entre 20 et 27%.

La couverture du sol importante de la variété Merinos était attendue au vu de ses caractéristiques d'installation rapide et de pouvoir couvrant important dès l'automne (Semences de France, 2023d).



**Figure 12** : Boxplot de la couverture du sol en fonction des variétés.

Légende : lettres = groupes du test SNK.

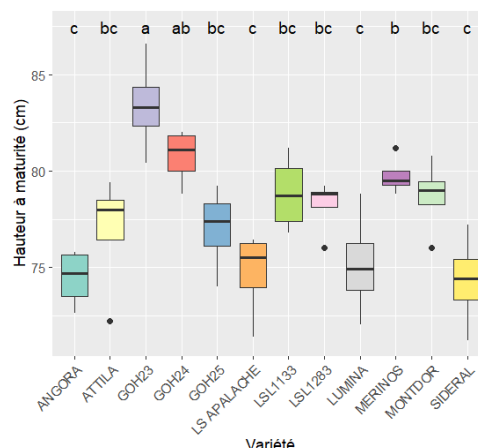
Cette couverture du sol permet de réduire les risques d'érosion (Berard et al., 2022) et de limiter le développement des adventices (Prieur, 2009).

### b) Hauteur à la maturité

La hauteur à la maturité possède une différence très hautement significative entre les variétés ( $p$ -valeur =  $1,53 \cdot 10^{-6}$ ) (Annexe 4).

La variété GOH23 est significativement plus haute que les autres (83,4 cm), hormis GOH24. Les autres sont comprises entre 74,3 et 80,7 cm.

La hauteur est un critère de sélection et dépend de la variété. Attila, Merinos et Lumina sont décrites comme des variétés courtes. Angora est définie comme une variété à hauteur moyenne. Au contraire, les variétés Montdor, Sideral et LS Apalache sont caractérisées comme hautes (Laboulet, nd ; Semences de France, 2023a, 2023b, 2023c, 2023d, 2023e).



**Figure 13** : Boxplot de la hauteur pour chaque variété.

Légende : lettres = groupes du test SNK.

Dans cette étude, ces caractéristiques théoriques ne sont pas toujours vérifiées. En effet, d'après Smith et al. (1998), la hauteur maximale de la culture dépend considérablement du site cultural et de la saison.

### c) Tolérance à la verse

Une différence très hautement significative a été observée entre les variétés à maturité.

Les variétés Angora, Attila, GOH24 et Montdor n'ont montré aucun signe de verse mécanique. La variété GOH23 est significativement la plus touchée, avec une cotation de la verse moyenne de 6. GOH25 est également impactée par la verse avec une note moyenne de 4,5.

Les variétés, hormis celles dénommées par un code, sont théoriquement toutes tolérantes à la verse. Cependant, la verse peut être favorisée par un apport excédentaire d'azote (Herzog et al., 2017) et par de fortes précipitations (Pageau et al., 2011). La densité de semis est également liée à la verse et à la quantité de biomasse (Parmentier, 2007).

Ces trois facteurs ont pu impacter la tolérance à la verse dans cet essai.

En effet, le reliquat azoté, laissé par le précédent cultural, était de 34,1 kgN/ha. La densité de semis a été augmentée par rapport aux essais de l'année précédente, passant de 350 gr/m<sup>2</sup> à 450 gr/m<sup>2</sup>. Enfin, la verse a été observée après les précipitations qui ont suivi la période de sécheresse du mois de juin.

Toutefois, le lin est très flexible et s'est montré très résilient. La plupart des parcelles se sont redressées. Les autres sont restées plus ou moins affectées par la verse jusqu'à la maturité.

**Tableau 11** : Valeurs moyennes de cotation de la verse  $\pm$  std pour chaque variété et groupes du test SNK.

Variété	Cotation moyenne de la verse $\pm$ std	Groupe SNK
ANGORA	1,00 $\pm$ 0,0	c
ATTILA	1,00 $\pm$ 0,0	c
GOH23	6,00 $\pm$ 0,0	a
GOH24	1,00 $\pm$ 0,0	c
GOH25	4,50 $\pm$ 1,7	ab
LS APALACHE	1,50 $\pm$ 1,0	c
LSL1133	3,25 $\pm$ 2,1	bc
LSL1283	1,50 $\pm$ 1,0	c
LUMINA	1,50 $\pm$ 1,0	c
MERINOS	2,75 $\pm$ 2,4	bc
MONTDOR	1,00 $\pm$ 0,0	c
SIDERAL	2,25 $\pm$ 2,5	bc
p-valeur	1,02.10 <sup>-4</sup> (***)	

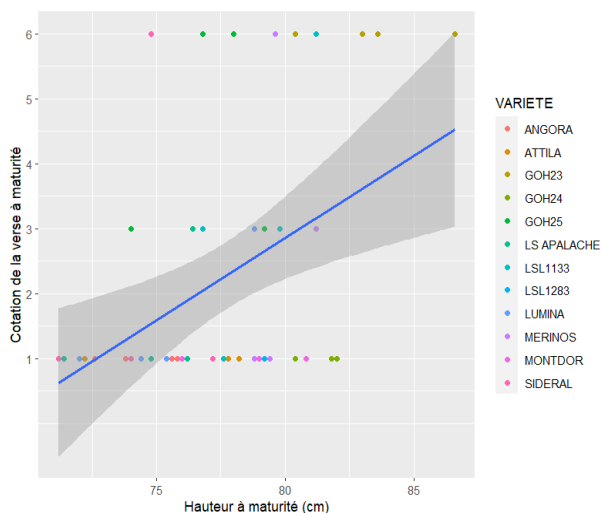
Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \*\*\* = ( $p$ -valeur < 0,001).

### Corrélation entre hauteur et verse à maturité

Il existe une corrélation hautement significative (0,43) entre la hauteur à la maturité et la cotation de la verse, illustrée à la figure ci-contre.

Le modèle de régression est hautement significatif dans son ensemble (p-valeur =  $2,25 \cdot 10^{-3}$ ). La hauteur a un effet significatif sur la cotation de la verse.

Le régulateur de croissance s'applique entre les stades "plantules 10 cm" et "boutons floraux visibles", à une dose de 1,4 l/ha (Phytoweb, July-13-2023). La période d'application a une influence sur l'effet du régulateur. Une application précoce, pendant l'élongation des tiges, est plus efficace et permet de réduire de manière significative la taille du lin en freinant l'élongation de la tige (Parmentier, 2007). Or, celui-ci a été apporté assez tardivement lorsque les boutons floraux étaient déjà visibles. De plus, la dose complète n'a pas été apportée.



**Figure 14 :** Graphique de la régression linéaire entre la cotation de la verse et la hauteur à maturité des différentes variétés. Légende : point = observation de hauteur et de verse pour chaque parcelle, 1 couleur = 1 variété, zone ombrée = intervalle de confiance.

### Effet du fongicide sur la hauteur et la verse

Les données de l'ensemble des parcelles, traitées et non traitées, ont été utilisées afin d'étudier l'effet du fongicide sur la hauteur et la verse pour chaque variété.

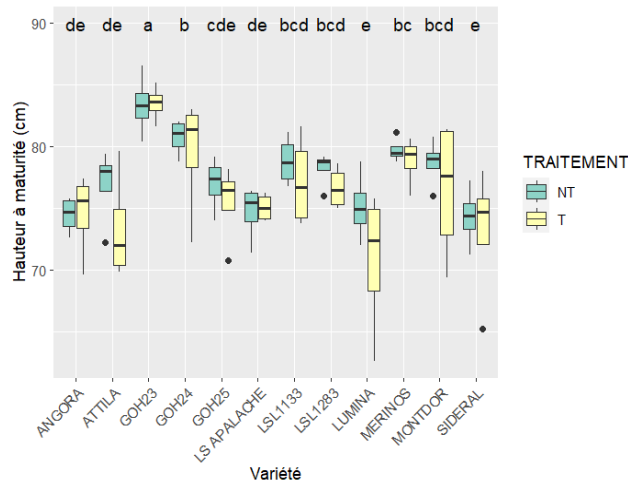
Il n'existe pas d'interaction entre ces facteurs (Tableau 12). L'effet du traitement sur la hauteur ou sur la cotation de la verse ne dépend pas de la variété. Des différences significatives apparaissent pour les deux facteurs pris individuellement.

La variété influence la hauteur et la tolérance à la verse, comme vue précédemment. Le traitement diminue significativement la hauteur des plantes (Figure 15), mais présente une cotation de la verse supérieure. Toutefois, le facteur bloc a un effet sur les variables dans cet essai, probablement dû à des variations environnementales.

**Tableau 12 :** Valeurs moyennes des hauteurs et de la cotation de la verse pour le facteur variété et traitement  $\pm$  std pour chaque variété (traitée et non traitée) et groupes du test SNK.

Variété	Hauteur moyenne $\pm$ std	Groupe SNK	Cotation de la verse $\pm$ std	Groupe SNK
ANGORA	74,50 $\pm$ 2,50	de	1,50 $\pm$ 0,92	c
ATTILA	75,12 $\pm$ 4,06	de	1,00 $\pm$ 0,00	c
GOH23	83,45 $\pm$ 1,93	a	5,37 $\pm$ 1,77	a
GOH24	80,12 $\pm$ 3,47	b	2,25 $\pm$ 2,31	bc
GOH25	76,25 $\pm$ 2,70	cde	4,50 $\pm$ 2,67	ab
LS APALACHE	74,87 $\pm$ 1,69	de	1,62 $\pm$ 0,92	c
LSL1133	78,02 $\pm$ 2,92	bcd	4,62 $\pm$ 2,56	ab
LSL1283	77,42 $\pm$ 1,70	bcd	3,25 $\pm$ 2,37	abc
LUMINA	72,97 $\pm$ 4,91	e	1,87 $\pm$ 1,81	c
MERINOS	79,30 $\pm$ 1,55	bc	2,87 $\pm$ 2,10	bc
MONTDOR	77,60 $\pm$ 4,21	bcd	1,25 $\pm$ 0,71	c
SIDERAL	73,72 $\pm$ 4,01	e	2,37 $\pm$ 2,26	bc
Traitement	Hauteur moyenne $\pm$ std	Groupe SNK	Cotation de la verse $\pm$ std	Groupe SNK
NT	77,68 $\pm$ 3,33	a	2,27 $\pm$ 1,95	b
T	76,22 $\pm$ 4,77	b	3,14 $\pm$ 2,47	a
p-valeur	VARIETE	3,16.10 <sup>-12</sup> (***)	VARIETE	1,95.10 <sup>-6</sup> (***)
	TRAITEMENT	4,35.10 <sup>-3</sup> (**)	TRAITEMENT	1,43.10 <sup>-2</sup> (*)
	BLOC	5,93.10 <sup>-8</sup> (***)	BLOC	1,73.10 <sup>-2</sup> (*)
	V x T	0,755	V x T	0,256

Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \* = (p-valeur < 0,05), \*\* = (p-valeur < 0,01), \*\*\* = (p-valeur < 0,001).



**Figure 15** : Boxplot de la hauteur de chaque variété en fonction du traitement fongicide.  
Légende : lettres = groupes test SNK pour la hauteur des variétés.

#### d) Composantes de rendement

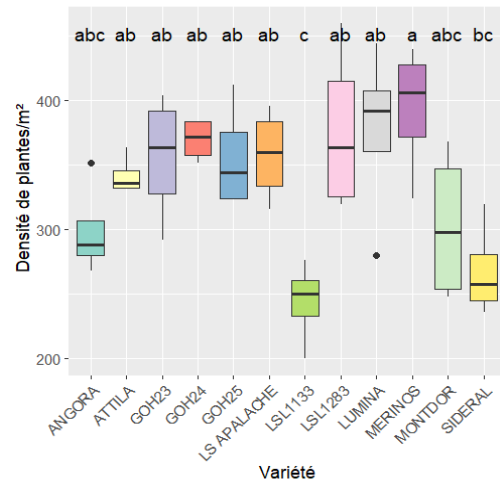
Les résultats des ANOVA se trouvent en Annexe 5.

##### 1) Densité de plantes

Pour une densité de semis de 450 graines/m<sup>2</sup>, une différence très hautement significative de densité de plantes/m<sup>2</sup> a été relevée entre les variétés, à la reprise de la végétation (p-valeur = 8,69.10<sup>-4</sup>).

Merinos possède le plus de plantes/m<sup>2</sup> (394), en plus d'être la variété la plus couvrante. Elle n'est toutefois pas significativement différente des autres, hormis Sideral et LSL1133.

L'objectif de peuplement à la sortie d'hiver est de 300 à 350 plantes/m<sup>2</sup> (Berard et al., 2022). Cet objectif est atteint pour la majorité des variétés et est même dépassé. Les variétés Angora et Montdor en sont à la limite. LSL1133 et Sideral ne l'atteignent pas.



**Figure 16** : Boxplot de la densité de plantes pour chaque variété.  
Légende : lettres = groupes du test SNK.

Les conditions climatiques, notamment la température au moment du semis, peuvent affecter le développement du lin et influencer son émergence. La date de semis affecte donc la densité de plantes (Pageau et al., 2011). Au moment du semis, les conditions idéales étaient rassemblées et ont permis une bonne implantation et une levée homogène. De plus, l'automne très chaud a permis une minéralisation de l'azote importante ce qui a été favorable au bon développement de la culture avant l'hiver.

## 2) Nombre de branches

Le nombre de branches par plante montre une différence hautement significative entre les variétés ( $p$ -valeur =  $7,36.10^{-3}$ ).

Toutes les variétés comptent au moins deux ramifications en moyenne par plante. Les variétés Merinos et Attila disposent respectivement de 2,05 et 2,15 branches par plante et sont donc les variétés avec le moins de ramifications. Au contraire, Angora se distingue des autres avec une moyenne de 3,05 ramifications.

Le lin possède une capacité de ramification allant de 2 à 4 ramifications en moyenne par plante (Berard et al., 2022).

## 3) Nombre de capsules

Une différence très hautement significative a été observée pour le nombre de capsules par branche entre les variétés ( $p$ -valeur =  $2,98.10^{-7}$ ).

Les moyennes vont de 10,6 à 19,3 capsules par branche, respectivement pour les variétés GOH24 et LSL1133. Merinos et Sideral possèdent des moyennes relativement élevées.

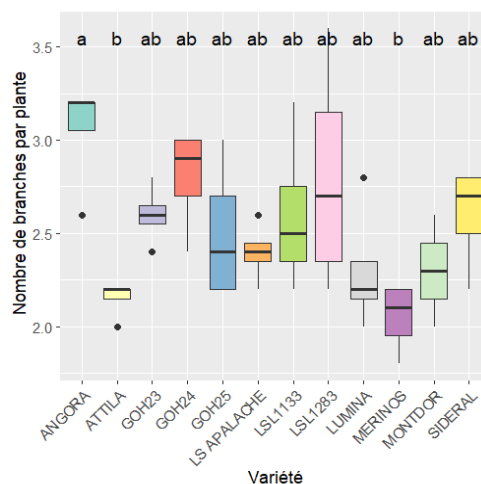
En réponse à des faibles densités de peuplement, le lin est capable de compenser cela en augmentant le nombre de capsules (Casa et al., 1999). Ce phénomène a été observé pour LSL1133 et Sideral. D'autres comme Merinos, possède une densité et un nombre de capsules élevés.

## 4) Nombre de graines par capsule

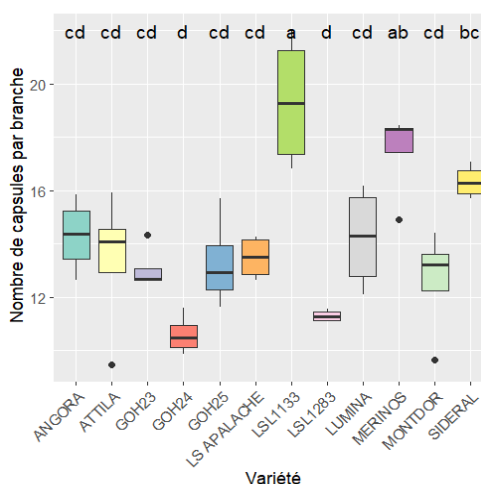
Le nombre de graines par capsule présente une différence très hautement significative entre les variétés ( $p$ -valeur =  $9,73.10^{-5}$ ).

Les variétés possédant le plus de graines sont LS Apalache, Angora, GOH23, LSL1133, Attila et GOH24 avec des moyennes comprises entre 6,4 et 7,5 graines par capsule.

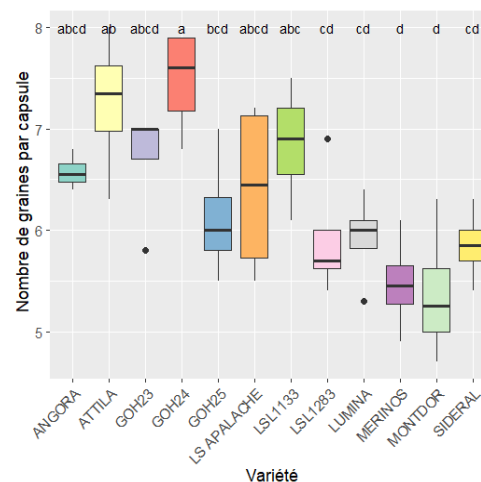
Les variétés ne faisant pas partie du groupe "a" possèdent un nombre significativement inférieur de graines par



**Figure 17** : Boxplot du nombre de branches par plante pour chaque variété. Légende : lettres = groupes du test SNK.



**Figure 18** : Boxplot du nombre de capsules par branche pour chaque variété. Légende : lettres = groupes du test SNK.



**Figure 19** : Boxplot du nombre de graines par capsule pour chaque variété. Légende : lettres = groupes du test SNK.

capsule. Elles ont en moyenne entre 5,4 et 6,1 graines par capsule, respectivement pour Montdor et GOH25.

Le nombre maximum de graines est de dix graines par capsule (Parmentier, 2007). Aucune variété ne contient ce maximum au moment du remplissage des graines lors de cette expérimentation en 2022-2023.

### 5) PMG

Une différence très hautement significative du PMG est observée entre les variétés ( $p\text{-valeur} = < 2.10^{-16}$ ).

LS Apalache possède le PMG le plus haut (6,8). Au contraire, Merinos a le PMG le plus bas (5,4).

Le PMG varie selon la variété et est compris entre 5 et 8 g pour les variétés françaises (Berard et al., 2022). Les variétés testées dans cet essai se situent dans les moyennes.

### 6) Nombre de graines/m<sup>2</sup>

Le nombre de graines/m<sup>2</sup> montre une différence très hautement significative entre les variétés ( $p\text{-valeur} = 1,79.10^{-7}$ ).

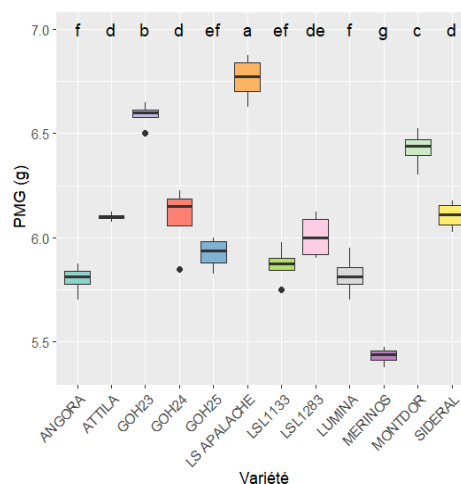
La variété Merinos a le plus haut nombre de graines/m<sup>2</sup>, avec une moyenne de 63 383. À l'inverse, Montdor ne possède qu'en moyenne 50 177 graines/m<sup>2</sup>. Cette dernière n'est pas statistiquement différente des autres variétés appartenant au groupe "d".

### 7) Rendement en graines

Le rendement en graines a été corrigé à 9% d'humidité.

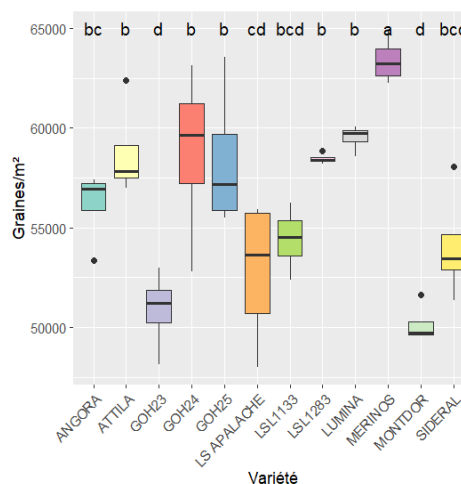
Il présente une différence hautement significative entre les variétés ( $p\text{-valeur} = 1,91.10^{-3}$ ). Les résultats concernant les variétés traitées avec un fongicide se trouvent en Annexe 6.

Les variétés Attila, GOH24 et LS Apalache ont les rendements les plus hauts (3,6 T/ha). Les variétés appartenant au groupe "ab" sont intermédiaires. LSL1133 a le rendement le plus bas (3,2 T/ha).



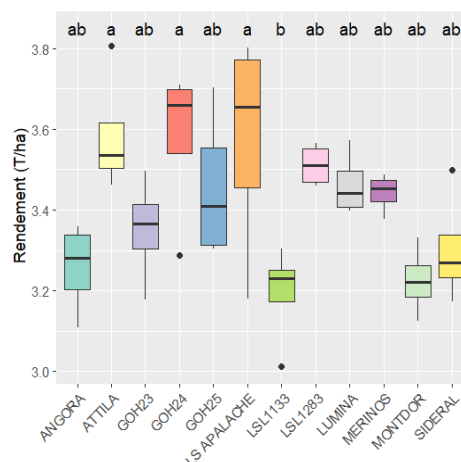
**Figure 20** : Boxplot du PMG pour chaque variété.

Légende : lettres = groupes du test SNK.



**Figure 21** : Boxplot du nombre de graines par m<sup>2</sup> pour chaque variété.

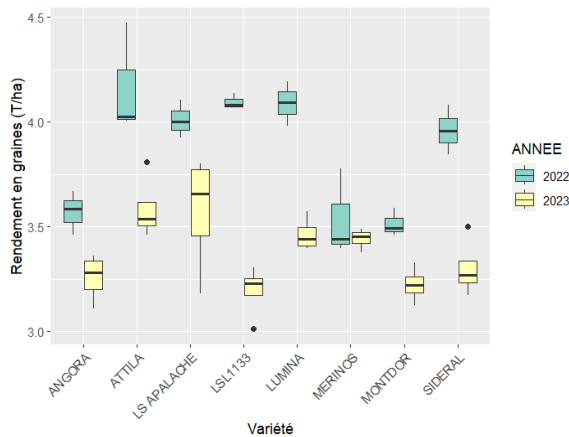
Légende : lettres = groupes du test SNK.



**Figure 22** : Boxplot du rendement en graines pour chaque variété.

Légende : lettres = groupes du test SNK.

D'après Čeh et al. (2020), le rendement varie en fonction de la variété et cela est vérifié statistiquement dans cette étude.



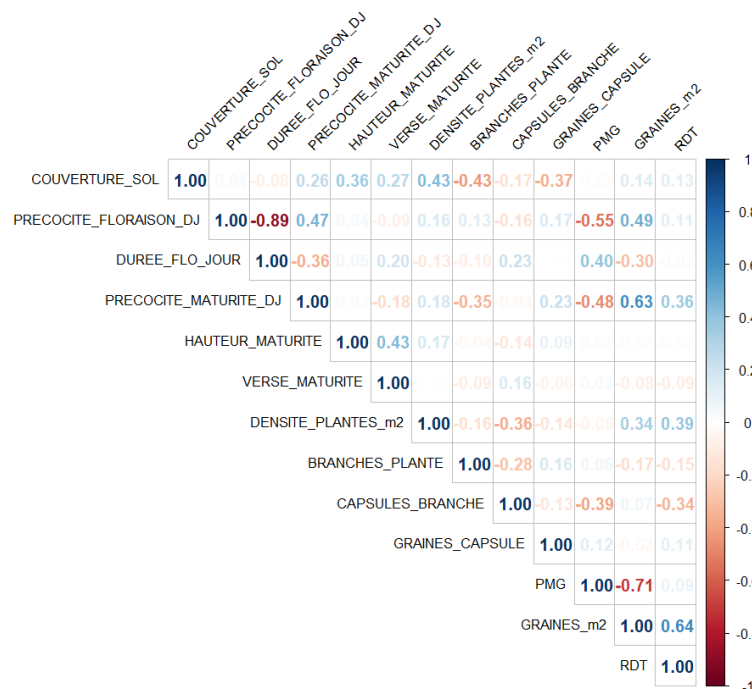
**Figure 23** : Boxplot du rendement en graines pour chaque variété en fonction de l'année de production.

Le rendement varie également en fonction de l'année de production (Čeh et al., 2020). Les rendements de 2022 et 2023 des variétés non traitées, présentent dans les essais des deux années, ont été comparés. Une interaction entre les facteurs indique que l'effet de l'année, sur le rendement, dépend de la variété. Les facteurs ont été étudiés séparément et une différence très hautement significative apparaît entre les années de production ( $p$ -valeur =  $6,42 \cdot 10^{-10}$ ). Le rendement moyen en 2022 était de 3,9 T/ha alors qu'il n'est que de 3,4 T/ha en 2023.

Cette diminution du rendement peut s'expliquer par les températures élevées et le manque d'eau pendant la floraison. Cela a eu un impact négatif sur la germination du pollen et a entraîné une réduction de la formation des graines. Le rendement est alors influencé négativement. Toutefois, toutes les variétés ne répondent pas toutes de la même manière face aux stress environnementaux (Pageau et al., 2011).

De plus, le rendement varie en fonction des conditions pédoclimatiques. En effet, les rendements obtenus dépassent le potentiel de rendement français, qui est de 2 à 2,5 T/ha en terre profonde (Berard et al., 2022). Les essais de Semences de France montrent tout de même des rendements plus hauts que le potentiel théorique en fonction des régions culturales (Semences de France, 2022).

#### e) Corrélations entre les variables



**Figure 24** : Matrice de corrélations entre les variables numériques de l'essai variétal. Légende : corrélation entre +1 (bleu) et -1 (rouge).



De nombreuses corrélations entre les variables sont illustrées à la Figure 24 ci-dessus. Les corrélations significatives sont décrites ci-dessous :

- La **couverture du sol** est positivement corrélée de manière significative à la hauteur à maturité et, hautement significative à la densité de plantes/m<sup>2</sup>. Elle est négativement corrélée de manière significative au nombre de graines/capsule et, hautement significative au nombre de branches/plante.
- La **précocité à la floraison** présente une corrélation positive, très hautement significative, avec la précocité à la maturité et le nombre de graines/m<sup>2</sup>. Elle présente une corrélation négative, très hautement significative, avec la durée de la floraison et le PMG.
- La **durée de la floraison** est positivement corrélée, de manière hautement significative, au PMG. Elle est négativement corrélée, de manière significative, à la précocité à la maturité et au nombre de graines/m<sup>2</sup>.
- La **précocité à la maturité** présente une corrélation positive, significative, avec le rendement et très hautement significative, avec le nombre de graines/m<sup>2</sup>. Elle présente une corrélation négative, significative, avec le nombre de branches/plante et très hautement significative, avec le PMG.
- La **hauteur à maturité** est hautement corrélée, positivement, à la verse à la maturité.
- La **densité de plantes** est positivement corrélée, de manière significative, au nombre de graines/m<sup>2</sup> et hautement significative, au rendement en graines. Elle présente une corrélation négative, significative, avec le nombre de capsules/branche.
- Le **nombre de capsules/branche** présente une corrélation négative, significative, avec le rendement en graines et hautement significative avec le PMG.
- Le **PMG** présente une corrélation négative, très hautement significative, avec le nombre de graines/m<sup>2</sup>.
- Le **nombre de graines/m<sup>2</sup>** est très hautement corrélée au rendement en graines.

Certaines corrélations ont déjà été observées dans d'autres études.

La corrélation négative entre la densité de plantes et le nombre de branches et de capsules montre la capacité du lin à compenser les faibles densités en augmentant ces composantes (Casa et al., 1999).

Le PMG est un critère de rendement important. Les corrélations négatives entre le PMG et les précocités à la floraison et à la maturité ont également été observées par Kaur et al. (2018). La corrélation positive entre la durée de la floraison et le PMG explique qu'une courte durée de floraison entraînera la formation de graines plus petites.

D'après Soto-Cerda et al. (2014), le rendement est positivement corrélé aux composantes du rendement et négativement corrélé avec la hauteur des plantes, la résistance à la verse, les précocités à la floraison et à la maturité. Or, Casa et al. (1999) dit qu'il existe une corrélation positive entre la hauteur et le rendement.

Cela est partiellement vérifié dans cette étude. Les composantes de rendement sont positivement corrélées au rendement hormis le nombre de branches/plante et le nombre de capsules/branche. La hauteur et la résistance à la verse sont bien négativement corrélées. Cependant, les précocités à la floraison et à la maturité sont positivement corrélées.



## C. Classification des variétés par groupe

Les résultats de l'ACP se trouvent en Annexe 7. Suite à la classification numérique (Annexe 8), quatre groupes de productivité sont ressortis de l'analyse (Tableau 13).

**Tableau 13** : Moyennes de chaque variable explicative en fonction des groupes de classification.

Groupe	Couverture du sol (%)	Densité de plantes/ m <sup>2</sup>	Précocité à la floraison (°CJ)	Durée floraison (jour)	Précocité à la maturité (°CJ)	Verse à maturité	Hauteur à maturité (cm)	Branches/plante	Capsules/branche	Graines/capsule	PMG (g)	Graines/m <sup>2</sup>	Rendement (T/ha)
1	36,94	364,40	1193,05	31,30	2039,94	1,90	77,60	2,51	12,55	6,54	5,99	58 779,37	3,52
2	40,64	339,00	1156,65	34,00	1987,15	2,83	78,93	2,43	13,05	6,16	6,59	51 287,32	3,38
3	23,12	270,33	1173,72	33,08	1997,10	2,17	75,87	2,75	16,65	6,42	5,92	54 887,04	3,25
4	51,11	394,00	1177,10	33,50	2056,10	2,75	79,75	2,05	17,48	5,47	5,43	63 383,20	3,44
Moyenne	35,59	337,00	1178,00	32,60	2017,00	2,27	77,68	2,51	14,11	6,33	6,08	56 217,00	3,41

Légende : rouge = valeur supérieure à la moyenne ; bleu = valeur inférieure à la moyenne.

Le **premier groupe** se caractérise par des variétés à haut rendement avec un nombre élevé de graines par capsule, plus tardives à la floraison et à la maturité. La durée de la floraison est plus courte, les PMG sont donc plus faibles. Les hauteurs sont moyennes et les variétés sont tolérantes à la verse. Il s'agit des variétés : Attila, GOH24, GOH25, Lumina et LSL1283. Toutefois, GOH25 a montré des signes de verse et LSL1283 est plus précoce à la maturité que le reste du groupe.

Le **deuxième groupe** est caractérisé par des variétés à rendement moyen, avec un PMG plus élevé au vu de la durée de la floraison plus importante. Il s'agit de variétés assez précoces, hautes, montrant parfois des signes de verse. Ces variétés sont GOH23, LS Apalache et Montdor. Or, Montdor a une durée de floraison plus courte et est plus tardive à la maturité. LS Apalache a eu un haut rendement en graines. GOH23 est plus haute que les autres et s'est montrée sensible à la verse.

Le **troisième groupe** se caractérise par des variétés à rendement inférieur à la moyenne avec des composantes de rendements assez hautes, hormis le PMG et les densités de plantes faibles qui pénalisent le rendement. Il s'agit de variétés relativement précoces avec une durée de floraison moyenne, moins couvrantes en sortie d'hiver, assez courtes et tolérantes à la verse. Les variétés Angora, LSL1133 et Sideral sont représentées par ce groupe.

Le **quatrième groupe** est caractérisé par une variété à rendement moyen avec un nombre élevé de capsules par branche et une densité de plantes élevée au détriment des autres composantes de rendement. Elle est assez tardive à la maturité et est très couvrante en sortie d'hiver. Elle est haute et est pourtant tolérante à la verse. Il s'agit de la variété Merinos.

Cette classification permet de regrouper les variétés par groupe mais a tout de même ses limites.

### 5.1.2 Essai fertilisation

#### A. Biomasse

Lors du prélèvement au stade 10 cm, aucune fertilisation n'a encore été apportée. Au stade 30 cm, le deuxième apport n'a pas encore été prélevé par la plante. Les modalités 3, 4 et 5 ont reçu une même dose totale au troisième prélèvement.

Il n'existe pas de différence significative entre les modalités pour les trois premiers prélèvements (Annexe 9). La modalité 3, qui a reçu 80 kgN/ha en un apport, présente tout de même les plus hautes valeurs de biomasse à ces stades.

Au stade de remplissage des capsules, une différence hautement significative apparaît entre le témoin et les autres modalités ( $p$ -valeur =  $5,24 \cdot 10^{-3}$ ). Les modalités 6 et 2 produisent le plus de biomasses aériennes (12,7 T/ha). Au contraire, le témoin (non fertilisé) produit seulement la moitié de la biomasse (Figure 25).

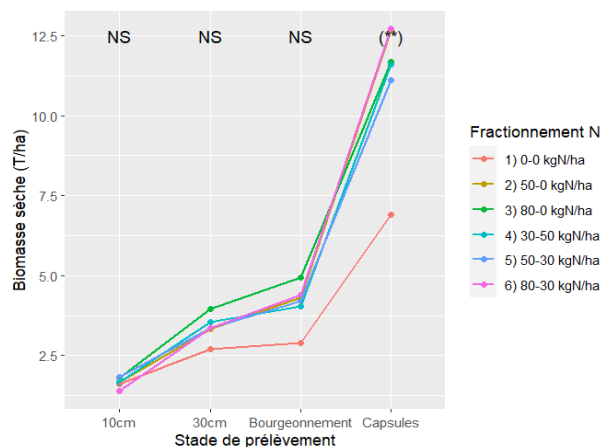


Figure 25 : Graphique de l'évolution de la biomasse pour chaque modalité.

Le lin possède une courbe d'accumulation de la matière sèche en sigmoïde au cours de sa croissance (Zhang et al., 2020). Deux études affirment qu'il n'y a pas de différence significative de biomasse avant l'apparition des boutons floraux. Après ce stade et jusqu'à la fin de la floraison, le poids sec présente une différence significative entre les modalités (Flénet et al., 2006 ; Zhang et al., 2020). Ces affirmations ont été observées dans cette étude.

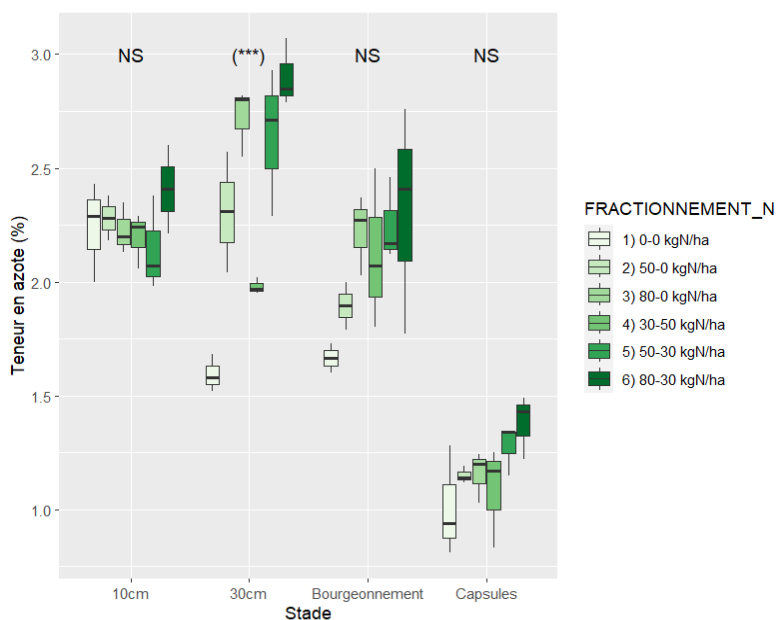
Hocking et al. (1991) confirme qu'un stress constant en azote réduit la matière sèche totale de la plante à maturité de plus de 70%. La réduction de production est de l'ordre de 50% dans cette expérience.

Un stress azoté entre le début et la fin de la floraison peut également avoir un effet néfaste sur la production de biomasse (Hocking et al., 1991). La modalité 4 pourrait présenter un stress dû à la première application à faible dose. Elle présente une biomasse inférieure, mais n'est pas vérifiée statistiquement.

#### B. Teneur en azote

Aucune différence de teneur en azote n'apparaît entre les modalités, hormis lors du deuxième prélèvement ( $p$ -valeur =  $1,41 \cdot 10^{-4}$ ) (Annexe 10). À ce stade, la modalité 4 n'a reçu que 30 kgN/ha, ce qui explique la différence significative avec les autres modalités.

La teneur en azote plus faible de la modalité 4, par rapport aux autres, a pu être corrigée suite à l'application d'engrais avant le stade bourgeons visibles (Hocking et al., 1991) (Figure 26).



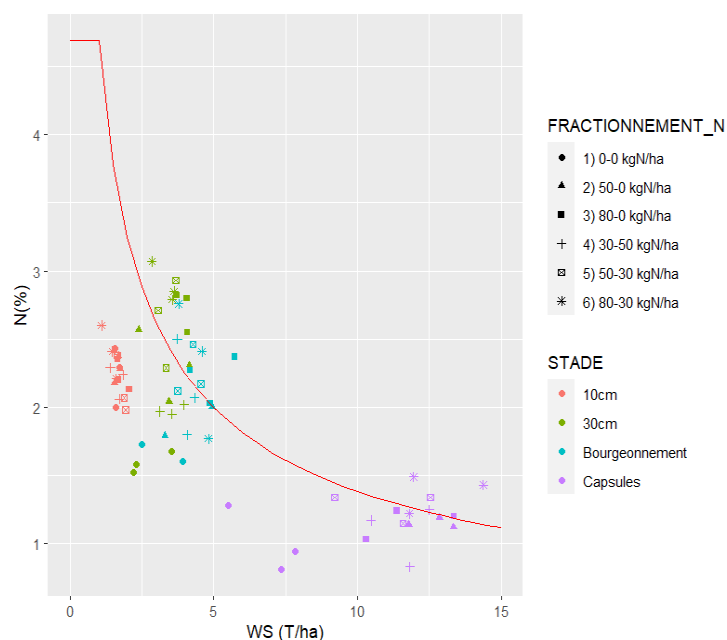
**Figure 26** : Boxplot des teneurs en azote à chaque prélèvement pour chaque modalité.

### Courbe critique de dilution de l'azote

La courbe du lin oléagineux est différente de celle des autres plantes en C3. En effet, elle possède une pente plus raide, ce qui indique une diminution plus importante de la concentration critique d'azote dans la plante au fil de l'augmentation de son poids. Cela est principalement dû à une accélération de la dilution de l'azote lors de l'arrêt de l'émission des feuilles et le début de l'émission des bourgeons floraux. La croissance des feuilles peut donc être à l'origine de la dynamique d'accumulation de l'azote dans les pousses. Avant cela, la courbe est similaire aux autres espèces en C3. De plus, cette différence de courbe provient également de la spécificité de la morphologie du lin, avec un rapport tige/feuilles plus important que chez le froment (Flénet et al., 2006).

Les prélèvements de biomasse inférieurs à 1 T/ha ne peuvent pas être comparés à la courbe de référence (Justes et al., 1994). Cette année, tous les relevés dépassent ce seuil, dès le stade 10 cm.

Au stade 10 cm, toutes les parcelles montrent une carence en azote. Dès le stade 30 cm, les modalités 3 et 6 montrent un état nutritif azoté supérieur à la courbe. Les modalités 2 et 5 sont proches de la courbe. Les modalités 1 et 4 sont inférieures à la courbe et sont en état de stress azoté. Pendant le remplissage des capsules, les observations sont toujours les mêmes à l'exception de la modalité 3 qui n'est plus supérieure à la courbe.



**Figure 27** : Courbe critique de dilution de l'azote.  
Légende : WS = poids sec (T/ha), N = teneur en azote.

Les carences azotées peuvent être corrigées par l'apport d'engrais avant l'apparition des bourgeons, au vu du port indéterminé des graines de lin qui lui permette de réagir au soulagement du stress (Hocking et al., 1991). Toutefois, cela n'a pas suffi dans le cas de la modalité 4 qui est en stress azoté tout le long de la culture. Pourtant, trois jours après la fertilisation, des précipitations ont été enregistrées et ont permis aux plantes d'absorber l'azote. Cette carence n'est donc pas liée aux conditions météorologiques.

Pendant le remplissage des graines, la plante doit avoir un apport adéquat en azote, car elle a des réserves limitées pour la redistribution vers les capsules et les graines (Hocking et al., 1991). La diminution de la teneur observée pour la modalité 3 en fin de cycle provient probablement de ce phénomène au vu de l'apport en une seule dose. La modalité 5 semble être plus adaptée.

### C. Hauteur à maturité

Il n'existe pas de différence significative de hauteur entre les modalités (p-valeur = 0,185) (Annexe 11).

La modalité témoin présente une hauteur plus basse. Les plantes stressées sont plus courtes que les plantes non stressées (Hocking et al., 1991). Or, cela n'est pas statistiquement vérifié dans cette étude.

Les plantes de cette année (moyenne = 78 cm) sont en moyenne plus hautes que celles de l'année précédente (moyenne = 58 cm).

La date de semis a un effet variable sur la hauteur des plantes, en plus de l'effet de l'année culturale (Pageau et al., 2011). Le semis plus précoce de cette année pourrait en être la cause (23 septembre au lieu du 10 octobre).

La hauteur dépend également de la densité de semis, qui est plus importante cette année (450 gr/m<sup>2</sup> au lieu de 350 gr/m<sup>2</sup>) (Parmentier, 2007).

### D. Tolérance à la verse

La cotation de la verse à maturité présente une différence hautement significative entre les modalités de fumure.

La dose de 110 kgN/ha présente une cotation de la verse significativement plus élevée que les autres modalités. Les trois parcelles de cette modalité étaient partiellement touchées.

Un apport excédentaire d'azote peut affecter la résistance à la verse (Herzog et al., 2017) et a été confirmé dans cet essai. La

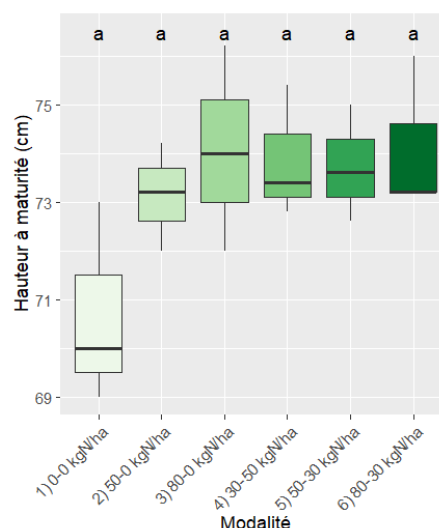


Figure 28 : Boxplot de la hauteur à maturité pour chaque modalité.

Légende : lettres = groupes du test SNK.

Tableau 14 : Valeurs moyennes de cotation de la verse ± std pour chaque modalité et groupes du test SNK.

Modalité		Cotation moyenne de la verse ± std	Groupe SNK
N°	Fractionnement		
1	0-0 kgN/ha	1,00 ± 0,0	b
2	50-0 kgN/ha	1,00 ± 0,0	b
3	80-0 kgN/ha	1,67 ± 1,1	b
4	30-50 kgN/ha	1,00 ± 0,0	b
5	50-30 kgN/ha	1,00 ± 0,0	b
6	80-30 kgN/ha	3,00 ± 0,0	a
p-valeur		1,99.10 <sup>-3</sup> (**)	

Légende : niveau de signification : \*\* = (p-valeur < 0,01).

variété Angora ne présentait pas de signe de verse dans l'essai variétal.

De plus, la verse est liée à la densité de plantes et à la quantité de biomasse. Elle est donc indirectement liée à l'apport d'azote sur la parcelle (Parmentier, 2007).

Enfin, il existe une corrélation entre la hauteur à maturité et la cotation de la verse (0,41) (Figure 35).

## E. Composantes de rendement

Les résultats des ANOVA se trouvent en Annexe 12.

### 1) Densité de plantes

À la reprise de la végétation, la densité de plantes/m<sup>2</sup> ne montre pas de différence significative entre les modalités de fumure (p-valeur = 0,276). Au moment de la mesure, les deux applications de fumure ont déjà été appliquées.

L'objectif de peuplement est atteint pour la modalité 5 avec une moyenne de 335 plantes/m<sup>2</sup>. La modalité témoin atteint en moyenne 307 plantes/m<sup>2</sup> alors que les autres modalités sont en dessous de l'objectif.

### 2) Nombre de branches

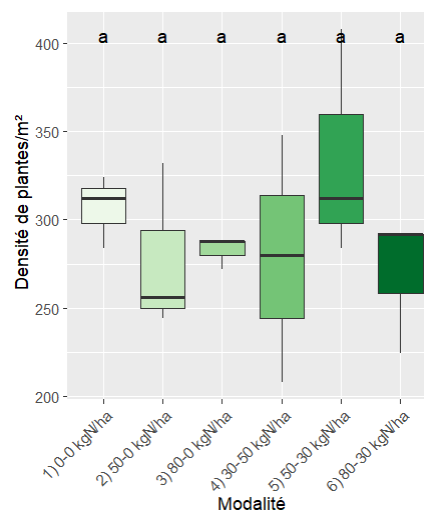
Aucune différence significative n'a été relevée pour le nombre de branches par plante en fonction des modalités (p-valeur = 0,123).

La variété Angora possède en moyenne 3,05 branches/plante dans l'essai variétal. Dans cet essai, les moyennes vont de 2,4 à 3 branches/plante.

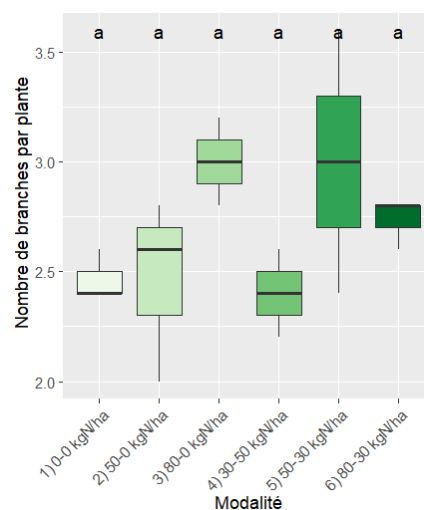
Pour une même dose totale, mais un apport en deux fractions, un constat à la baisse peut être fait lorsque la première dose est plus faible. Cependant, ce résultat n'est pas vérifié statistiquement.

Dans la littérature, le stress azoté réduit le nombre de branches (Hocking et al., 1991). Dans cet essai, le nombre de branches est inférieur, mais n'est pas significativement différent des autres modalités.

Cependant, d'autres résultats ont montré une diminution du nombre de branches lorsque le taux d'application dépassait les 90 kgN/ha (Zhang et al., 2020). Cette observation n'est également pas vérifiée statistiquement dans cet essai.



**Figure 29** : Boxplot de la densité de plantes pour chaque modalité. Légende : lettres = groupes du test SNK.



**Figure 30** : Boxplot du nombre de branches par plante pour chaque modalité. Légende : lettres = groupes du test SNK.

Il existe une corrélation entre cette variable et la densité de plantes/m<sup>2</sup> (0,50). Cela prouve la capacité du lin à se ramifier en cas de densités plus faibles (Casa et al., 1999).

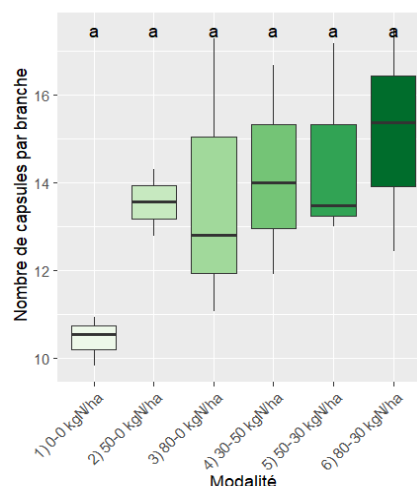
### 3) Nombre de capsules

Il n'existe pas de différence de nombre de capsules par branche entre les modalités (p-valeur = 0,181).

Une tendance à la baisse est constatée pour le témoin (10,5), mais n'est pas vérifiée.

Hocking et al. (1991) a mis en avant que l'effet dominant du stress azoté était une réduction du nombre de capsules par plante. Cet effet est observé, mais est non significatif.

Dans une étude de Zhang et al. (2020), le nombre de capsules diminue à mesure que l'azote augmente au-dessus de 90 kgN/ha. Ce phénomène n'a pas été observé.



**Figure 31** : Boxplot du nombre de capsules par branche pour chaque modalité. Légende : lettres = groupes du test SNK.

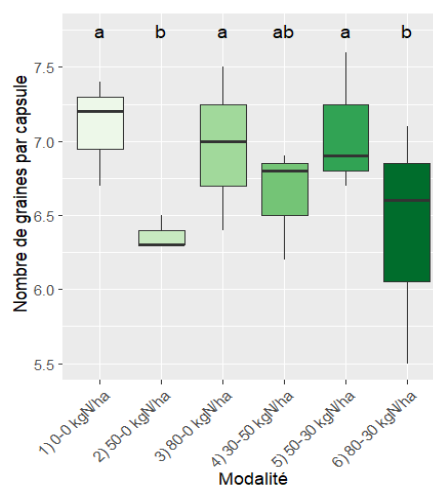
### 4) Nombre de graines par capsule

Le nombre de graines par capsule présente une différence significative entre les modalités (p-valeur =  $3,55 \cdot 10^{-2}$ ).

La modalité témoin possède le nombre le plus élevé de graines par capsule (7,1). Au contraire, les modalités 2 et 6 sont significativement inférieures (6,4).

D'après Zhang et al. (2020), le nombre de graines par capsule diminue également de manière significative lorsque la dose d'azote est supérieure à 90 kgN/ha. Ce phénomène a été observé avec la modalité 6.

Inversement, il a été prouvé que le nombre de graines augmente sous un traitement plus faible en azote (Zhang et al., 2020). Cette différence apparaît entre les modalités 1 et 6.



**Figure 32** : Boxplot du nombre de graines par capsule pour chaque modalité. Légende : lettres = groupes du test SNK

### 5) PMG

Le PMG présente une différence hautement significative entre les modalités (p-valeur =  $1,56 \cdot 10^{-3}$ ).

Le PMG du témoin est supérieur aux modalités ayant reçu plus de 50 kgN/ha. Une diminution de celui-ci avec la fertilisation azotée est observée (Figure 33).

Dans une étude de Pageau et al. (2006), l'augmentation de la fertilisation a entraîné une diminution du PMG. Cet effet dépendait de l'année de production. Herzog et al. (2017) a observé le même phénomène.

Cependant, dans d'autres études, la fertilisation n'a pas eu d'effet significatif sur le PMG (Hocking et al., 1991 ; Zhang et al., 2020).

## 6) Rendement en graines

L'analyse met en avant une différence très hautement significative du rendement en graines entre les modalités (p-valeur =  $3,73 \cdot 10^{-6}$ ).

L'augmentation de la fertilisation entraîne une augmentation du rendement, passant de 3,2 à 4,8 T/ha, respectivement pour les modalités 1 et 6.

Le fractionnement de la modalité 5 diminue légèrement le rendement, mais n'est pas statistiquement différent des modalités 3 et 4.

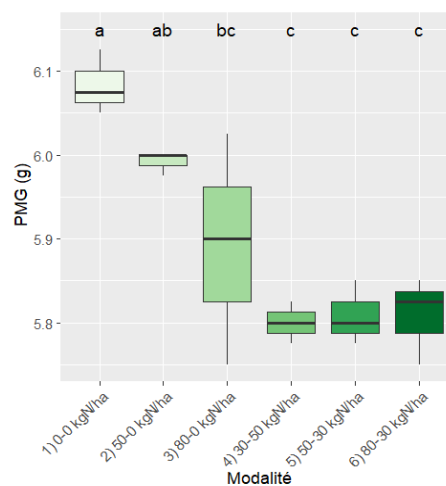
D'après Cui et al. (2022), la fertilisation azotée permet d'augmenter l'absorption de l'azote et d'améliorer son efficacité d'utilisation. Il en découle une amélioration du rendement en graines. Cette amélioration de rendement, allant de 25 à 49% du rendement par rapport au témoin, s'observe dans cette étude. Elle est également vérifiée dans l'étude de Dordas (2011) avec une augmentation de 34% par rapport au témoin.

Toutefois, les plantes ne peuvent absorber l'azote excédentaire (Cui et al., 2022) et le lin ne tolère pas une application excessive d'engrais azoté. Un taux d'application trop élevé peut entraîner une diminution du rendement (Zhang et al., 2020). Ceci n'est pas observé dans cet essai avec une application maximale de 110 kgN/ha.

Le fractionnement permettrait une meilleure absorption de l'azote entre la formation des bourgeons et le pic de floraison, qui est la période de plus grande demande (Hocking et al., 1991). Or, il n'y a pas de différence entre les modalités 3 et 4.

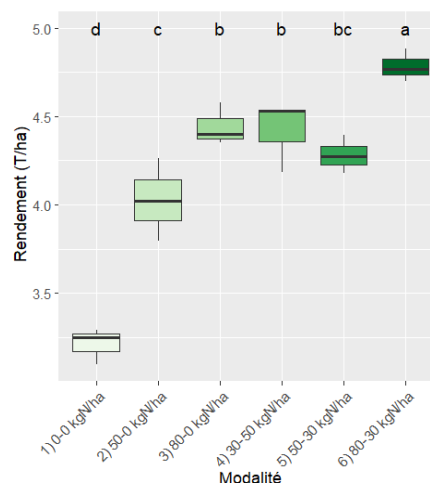
## F. Corrélation entre les variables

Les corrélations représentées ci-dessous indiquent qu'avec le levier agronomique de la fertilisation azotée, le nombre de branches par plante ainsi que le nombre de capsules par branche sont corrélés



**Figure 33** : Boxplot du PMG pour chaque modalité.

Légende : lettres = groupes du test SNK

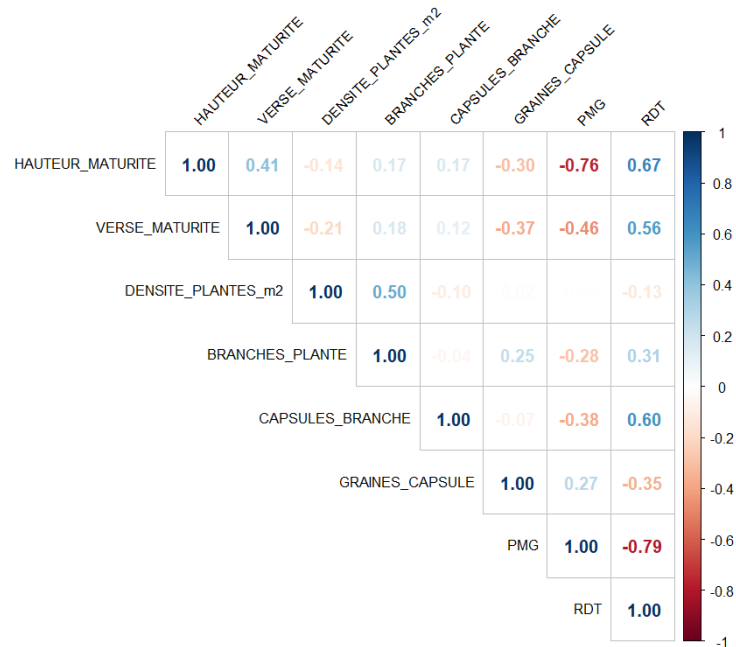


**Figure 34** : Boxplot du rendement en graines pour chaque modalité.

Légende : lettres = groupes du test SNK

positivement avec le rendement. Au contraire, le PMG et le nombre de graines par capsule sont corrélés négativement.

Les tendances des corrélations se sont inversées par rapport à l'essai variétal. Il semblerait que les relations négatives entre les composantes de rendement et le rendement soient compensées grâce à la fertilisation. Cependant, les relations qui étaient positives sont devenues significativement négatives dans cet essai.



**Figure 35** : Matrice de corrélations entre les variables numériques de l'essai fumure.

Légende : corrélation entre +1 (bleu) et -1 (rouge).



## 5.2 Analyses de la qualité – récolte essais 2022-2023

### 5.2.1 Effet variétal

La variété Orival ne s'est pas très bien développée dès le semis et n'a pas rattrapé son retard par la suite. Les résultats de cette variété ne sont donc pas entièrement à prendre en compte pour l'ensemble des variables.

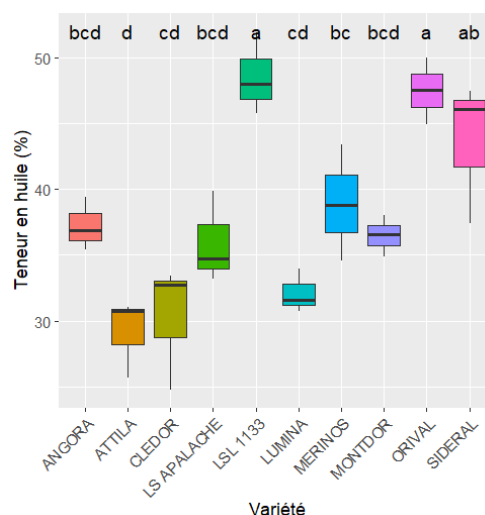
Les tableaux de résultats se trouvent en Annexe 13.

#### A. Teneur en huile

Le PMG, étant nécessaire afin de calculer la teneur en huile, a été comptabilisé et analysé. L'analyse se trouve en Annexe 13.

La teneur en huile d'une graine présente une différence très hautement significative entre les variétés ( $p$ -valeur =  $8,11.10^{-6}$ ).

La variété contenant le plus d'huile est LSL1133 (48,5%). Orival contient également beaucoup d'huile au vu des petites graines produites. Au contraire, Attila est significativement inférieure et contient en moyenne 29,1% d'huile. Les autres variétés sont comprises entre 30,3 et 43,6% d'huile.



**Figure 36** : Boxplot de la teneur en huile pour chaque variété.  
Légende : lettres = groupes du test SNK.

La teneur en huile des graines de lin est généralement comprise entre 35 et 46% (Zuk et al., 2015). Les facteurs génétiques, tels que la variété utilisée, influencent la qualité des graines (Čeh et al., 2020). Cette variation a pu être observée dans cet essai où des différences apparaissent entre les variétés. Le choix variétal reste un facteur important au vu des normes de commercialisation à respecter lorsque la culture est réalisée sous contrat. En France, ces normes sont de 38% d'huile au minimum (Berard et al., 2022).

La couleur de la graine influence également la teneur en huile. D'après Bjelková et al. (2012), il existe une corrélation significative entre la couleur des graines et la teneur en huile. Une corrélation de (-0,29) a été mise en avant dans cette étude et signifie que les graines jaunes sont négativement corrélées à la teneur en huile, mais celle-ci n'est pas significative (Figure 40). Au contraire, Upadhyay et al. (2019) montre que les graines jaunes possèdent une teneur en huile plus élevée que les brunes.

De plus, la teneur en huile peut varier en fonction des conditions climatiques. Un climat frais en régions tempérées favorise les hautes teneurs en huile. Toutefois, il a aussi été mis en évidence qu'un manque prolongé de précipitations, accompagné de températures élevées pendant la floraison, diminue le rendement en graines, mais entraîne une teneur en huile plus élevée (Čeh et al., 2020). Ce phénomène s'observera probablement lors de l'analyse des graines de la récolte de 2023, au vu de la sécheresse pendant la floraison et de la baisse de rendement en graines.

Les conditions pédologiques et les choix culturaux peuvent également influencer les teneurs en huile. En effet, les cinq variétés testées par Semences de France en 2022 contiennent le même ordre de pourcentage d'huile que dans cet essai, à l'exception d'Attila et de Lumina. Ces variétés ont en moyenne respectivement 38,8% et 41,1% d'huile en France, contre 29,1% et 32,1% en région limoneuse (Semences de France, 2023a, 2023b, 2023c, 2023d, 2023e).

## B. Rendement en huile

Afin de calculer le rendement en huile, les données de rendement en graines de l'année précédente ont été reprises. L'analyse approfondie de cette variable se trouve dans l'étude de Hubaux (2022) et les valeurs moyennes se trouvent en Annexe 13.

Le rendement en huile présente une différence très hautement significative entre les variétés ( $p$ -valeur =  $3,44 \cdot 10^{-8}$ ).

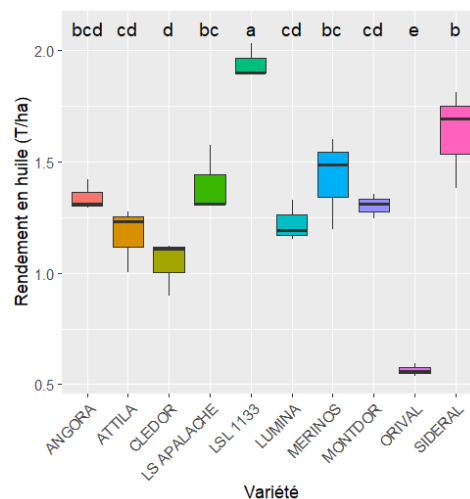
LSL1133 possède le rendement en huile le plus haut avec une moyenne de 1,9 T/ha. Ce résultat était attendu au vu des hautes valeurs de rendement en graines et de teneur en huile. En effet, le rendement en huile est corrélé positivement à ces deux variables, respectivement avec des valeurs de 0,44 et 0,96. Les autres variétés sont significativement inférieures et sont comprises entre 1 et 1,6 T/ha. Comme attendu, Orival possède un très mauvais rendement en huile malgré sa haute teneur en huile, compte tenu de son rendement très bas.

Comme les deux variables précédentes, le rendement en huile dépend de la variété utilisée (Čeh et al., 2020) et cela est observé dans cet essai. La couleur de la graine a également un effet sur cette variable avec une corrélation négative de (-0,41).

### Rendement en huile en fonction du rendement en grain

Le rendement en huile est en moyenne de 35 à 50% du poids des graines (Zuk et al., 2015). Cette relation a pu être vérifiée pour la plupart des variétés, sauf pour Attila, Cledor et Lumina pour lesquelles les rendements moyens en huile sont de l'ordre de 29 à 32% du rendement en graines (Tableau 15).

La régression linéaire explique la corrélation entre les deux variables. La variété Orival a été enlevée du jeu de données. La pente positive de la régression indique une corrélation positive (0,44).



**Figure 37** : Boxplot du rendement en huile pour chaque variété.

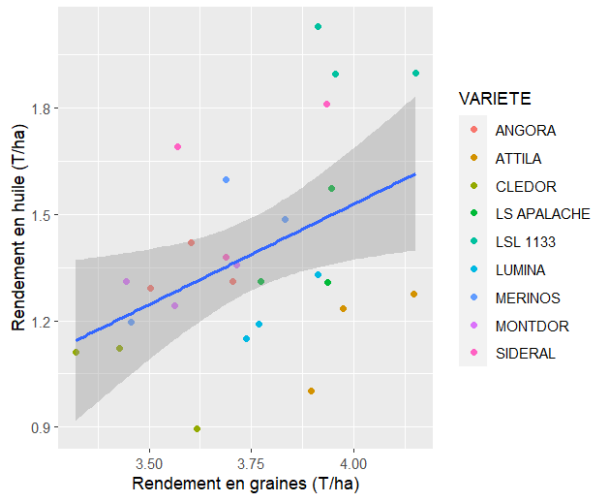
Légende : lettres = groupes du test SNK.

**Tableau 15** : Relation entre le rendement en huile et le rendement en graines exprimée en pourcentage du rendement en graines.

Variété	Rendement moyen en grain (T/ha)	Rendement moyen en huile (T/ha)	Relation entre RDT huile et RDT graines (%)
ANGORA	3,60	1,34	37,2
ATTLILA	4,00	1,17	29,3
CLEDOR	3,45	1,04	30,1
LS APALACHE	3,88	1,40	36,1
LSL 1133	4,01	1,94	48,4
LUMINA	3,81	1,22	32,0
MERINOS	3,66	1,43	39,1
MONTDOR	3,57	1,30	36,4
ORIVAL	1,19	0,56	47,1
SIDERAL	3,73	1,63	43,7

Le coefficient estimé pour le rendement en graines est de 0,567. Cela implique qu'une augmentation d'une unité du rendement en graines entraînera une augmentation de 0,567 unité du rendement en huile.

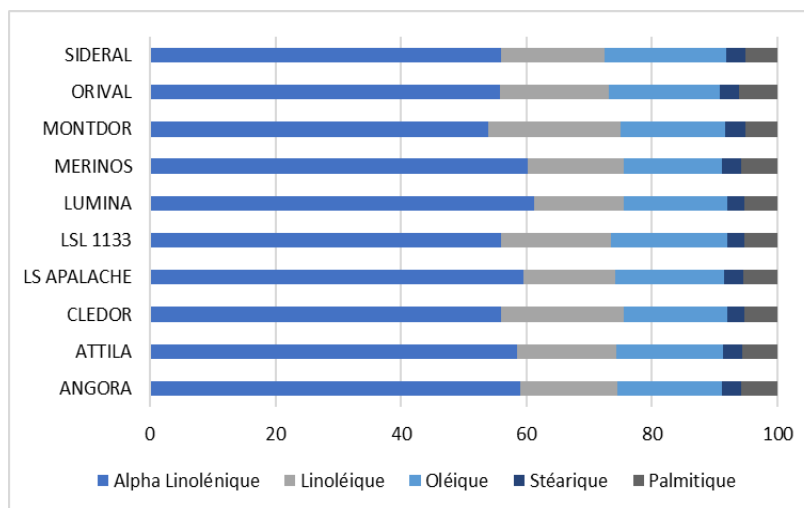
Le modèle de régression est significatif dans son ensemble avec une p-valeur de 0,0212. Le rendement en graines a un effet significatif sur le rendement en huile. Toutefois, le coefficient de détermination  $R^2$ , qui montre la proportion de la variance totale du rendement en huile expliquée par le modèle, est de 0,0195. Cela signifie que le modèle explique seulement 19,5% de la variance dans le rendement en huile. D'autres facteurs peuvent donc influencer le rendement en huile et ne sont pas repris dans ce modèle.



**Figure 38** : Graphique de la régression linéaire entre le rendement en huile et le rendement en grain en fonction des variétés.  
Légende : zone ombrée = intervalle de confiance.

### C. Profil en acide gras

Le profil en acide gras des 10 variétés est illustré ci-dessous.



**Figure 39** : Profil en acide gras des 10 variétés.

Les analyses de la variance pour chaque acide gras montrent des différences très hautement significatives entre les variétés (Tableau 16). Les boxplots se trouvent en Annexe 14.

**Tableau 16** : Valeurs moyennes des acides gras  $\pm$  std pour chaque variété et groupes du test SNK.

Variété	Acide palmitique moyen (%) $\pm$ std	Groupe SNK	Acide stéarique moyen (%) $\pm$ std	Groupe SNK	Acide oléique moyen (%) $\pm$ std	Groupe SNK	Acide linoléique moyen (%) $\pm$ std	Groupe SNK	Acide alpha-linolénique moyen (%) $\pm$ std	Groupe SNK
ANGORA	5,80 $\pm$ 0,15	b	2,97 $\pm$ 0,15	bc	16,78 $\pm$ 0,52	de	15,38 $\pm$ 0,20	f	59,07 $\pm$ 0,60	cd
ATTILA	5,52 $\pm$ 0,13	c	3,14 $\pm$ 0,18	ab	16,98 $\pm$ 0,39	de	15,85 $\pm$ 0,07	e	58,51 $\pm$ 0,51	d
CLEDOR	5,27 $\pm$ 0,22	cd	2,74 $\pm$ 0,13	c	16,40 $\pm$ 0,38	e	19,54 $\pm$ 0,04	b	56,04 $\pm$ 0,66	e
LS APALACHE	5,48 $\pm$ 0,09	c	2,99 $\pm$ 0,17	abc	17,38 $\pm$ 0,46	cd	14,64 $\pm$ 0,05	g	59,50 $\pm$ 0,47	c
LSL 1133	5,26 $\pm$ 0,38	cd	2,73 $\pm$ 0,34	c	18,54 $\pm$ 0,15	b	17,43 $\pm$ 0,05	c	56,04 $\pm$ 0,11	e
LUMINA	5,29 $\pm$ 0,14	cd	2,69 $\pm$ 0,10	c	16,45 $\pm$ 0,30	e	14,39 $\pm$ 0,09	h	61,17 $\pm$ 0,25	a
MERINOS	5,81 $\pm$ 0,32	b	3,04 $\pm$ 0,30	ab	15,57 $\pm$ 0,79	f	15,33 $\pm$ 0,29	f	60,24 $\pm$ 1,10	b
MONTDOR	5,02 $\pm$ 0,13	d	3,31 $\pm$ 0,14	a	16,58 $\pm$ 0,21	e	21,17 $\pm$ 0,13	a	53,91 $\pm$ 0,22	f
ORIVAL	6,09 $\pm$ 0,12	a	3,10 $\pm$ 0,03	ab	17,64 $\pm$ 0,46	c	17,38 $\pm$ 0,41	c	55,79 $\pm$ 0,68	e
SIDERAL	5,08 $\pm$ 0,16	d	3,15 $\pm$ 0,16	ab	19,34 $\pm$ 0,36	a	16,50 $\pm$ 0,15	d	55,94 $\pm$ 0,38	e
p-valeur	1,95.10 <sup>-12</sup> (***)		2,70.10 <sup>-6</sup> (***)		<2.10 <sup>-16</sup> (***)		<2.10 <sup>-16</sup> (***)		<2.10 <sup>-16</sup> (***)	

Légende : niveau de signification : \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

### Acide alpha-linolénique (ALA)

La variété Lumina contient la plus haute teneur en cet acide gras avec une valeur moyenne de 61,2%. Au contraire, la variété Montdor n'en contient que 53,9% et est la variété qui en contient le moins. Les variétés Attila, LS Apalache et Merinos sont significativement différentes entre elles et ont entre 58,5 et 60,2% d'ALA. Les variétés classées dans le groupe "e" ne sont pas différentes entre elles et ont environ 56% d'ALA.

Les graines produites sous nos latitudes ont des hautes teneurs en ALA de l'ordre de 55% (Parmentier, 2007). Cela est vérifié pour la plupart des variétés de cet essai qui ont des teneurs supérieures à ce pourcentage, sauf pour la variété Montdor. En effet, cette variété est connue pour avoir des faibles teneurs, de l'ordre de 50% d'ALA. À l'opposé, Lumina a été sélectionnée pour ses hautes teneurs, de l'ordre de 62% d'ALA (Semences de France, 2023c, 2023e). La composition de l'huile varie donc selon la variété, car la teneur en ALA est fortement liée à des facteurs génétiques (Čeh et al., 2020).

De plus, il semblerait que les graines jaunes contiennent moins d'acide de type oméga 3 et qu'il existerait une corrélation négative entre la couleur des graines et la teneur en ALA, comme pour la teneur en huile (Bjelková et al., 2012). Ceci a été observé dans cette étude avec une corrélation de (-0,65) entre ces deux variables. Toutefois, la variété Sideral n'est pas significativement supérieure aux variétés Cledor et Orival.

Le choix variétal idéal repose sur l'objectif du débouché de la culture. Comme pour les teneurs en huile, en France, il existe des normes de teneurs en ALA lorsque la production est contractualisée. Ces normes dépendent du contrat et sont comprises entre 54 et 56%. Toutefois, il existe une grille de bonification-réfaction (Berard et al., 2022). Les variétés à haute teneur sont alors à privilégier.

### Acide linoléique (LA)

Les teneurs en LA sont comprises entre 14,4 et 21,2%. Dans la littérature, les pourcentages de LA sont d'environ 15% (Zuk et al., 2015). Les variétés jaunes sont significativement différentes entre elles et ont les teneurs les plus élevées, supérieures à ces 15%. Elles contiennent des teneurs plus élevées que

les variétés brunes, à l'exception de LSL1133 qui n'est pas différente d'Orival. En effet, il y a une corrélation positive entre la couleur de la graine et la teneur en LA (0,90).

Une corrélation négative entre l'acide alpha-linolénique et l'acide linoléique existe (-0,88). Les variétés ayant les teneurs les plus faibles en ALA, ont les teneurs les plus élevées en LA.

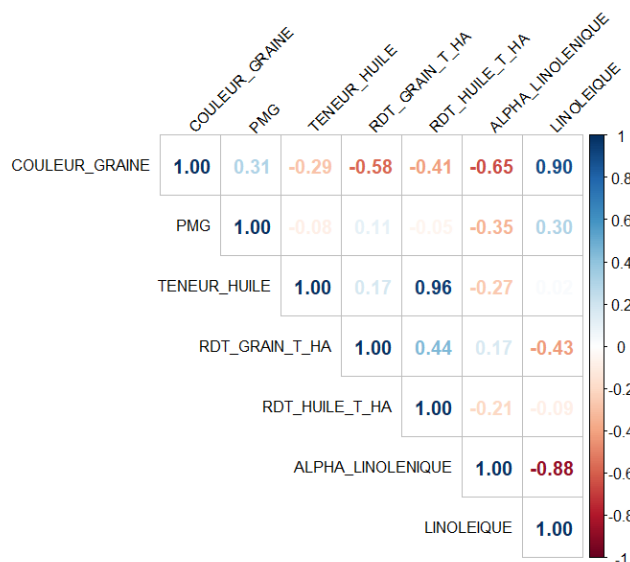
### Autres acides gras

Les teneurs en acide palmitique, stéarique et oléique présentes dans le tableau 16 sont présentées à titre informatif.

Finalement, en plus de l'influence de la variété, la qualité de l'huile dépend également de l'année de production et surtout des températures et du régime pluviométrique perçus par la culture. Un climat tempéré est favorable aux hautes teneurs en ALA et aux faibles teneurs en LA, par rapport aux régions méditerranéennes et subtropicales (Čeh et al., 2020).

Plusieurs années d'essais sont alors indispensables afin de caractériser les variétés dans une région précise.

### D. Corrélations entre les variables



**Figure 40** : Matrice de corrélations entre les variables numériques de l'essai variétal de 2022.  
Légende : corrélation entre +1 (bleu) et -1 (rouge).

### E. Classification des variétés par groupe

Les résultats de l'ACP se trouvent en Annexe 15. Suite à la classification numérique (Annexe 16), trois groupes de qualité distinctes sont ressortis de l'analyse (Tableau 17).

**Tableau 17** : Moyennes des variables en fonction des groupes de classification.

Groupe	Couleur graines	PMG (g)	Teneur huile (%)	Rendement en graines (T/ha)	Rendement en huile (T/ha)	Teneur en ALA (%)	Teneur en LA (%)
1	Brune	6,96	34,84	3,78	1,31	59,44	15,19
2	Jaune	7,23	33,39	3,51	1,17	54,98	20,36
3	Brune	6,85	47,80	3,90	1,86	56,04	17,09
Moyennes		7,00	36,92	3,75	1,39	57,82	16,69

Légende : rouge = valeur supérieure à la moyenne de tous les individus, bleu = valeur inférieure à la moyenne.

Le **premier groupe** se caractérise par des variétés à graines brunes, avec un PMG, une teneur en huile et des rendements en graines et en huile moyens. Ces variétés possèdent de très hautes teneurs en ALA et de faibles teneurs en LA. Il regroupe la majorité des variétés.

Le **deuxième groupe** se compose exclusivement de variétés à graines jaunes. Elles sont caractérisées par un PMG plus élevé que les autres variétés et des teneurs en LA élevées. Les autres variables sont toutes inférieures à la moyenne.

Le **troisième groupe** est représenté par des variétés à PMG plus bas et à teneurs en ALA et LA moyennes. Au contraire, elles possèdent un rendement en graines, une teneur en huile et un rendement en huile les plus élevés. Il s'agit de la variété LSL1133 et deux répétitions de la variété Sideral.

### 5.2.2 Effet de la fertilisation

Les tableaux de résultats se trouvent en Annexe 17.

#### A. Teneur en huile

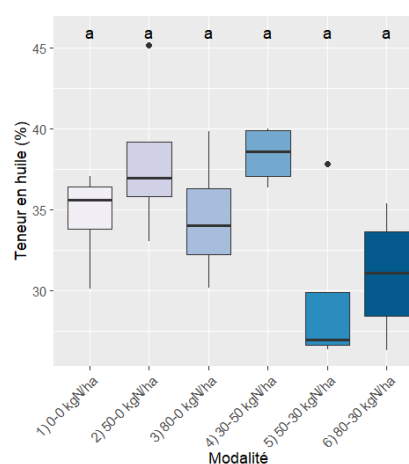
Le PMG a également été mesuré afin de calculer la teneur en huile.

Aucune différence significative de teneur en huile n'est relevée entre les modalités (p-valeur = 0,0502).

Les teneurs sont comprises entre 29,5 et 38,4% d'huile, respectivement pour les modalités 5 et 4.

Une tendance à la baisse est observée lorsque le taux d'application augmente, mais n'est pas vérifiée statistiquement.

Il s'avère que la teneur en huile n'est pas influencée par la fertilisation azotée (Herzog et al., 2017) et qu'aucun changement de teneur en huile n'est relevé suite à un stress en azote ou à un changement du taux d'application (Hocking et al., 1991).



**Figure 41** : Boxplot de la teneur en huile pour chaque modalité.

Légende : lettres = groupes du test SNK.

## B. Rendement en huile

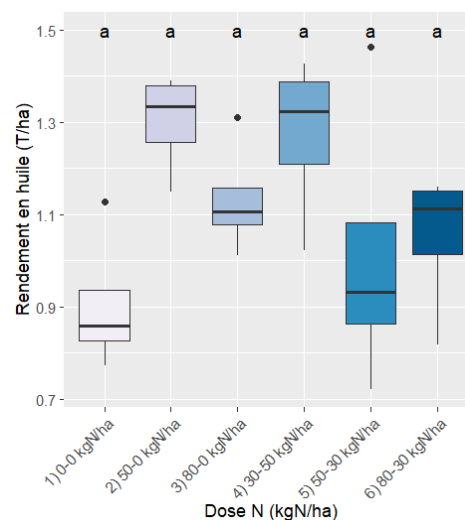
Les rendements en graines ont été repris de Hubaux (2022) pour calculer le rendement en huile.

Le rendement en huile ne présente pas de différence significative entre les modalités (p-valeur = 0,0646).

Les rendements vont de 0,9 à 1,3 T/ha, respectivement pour les modalités 1 et 2.

Il existe une corrélation positive entre cette variable et la teneur en huile (0,71). Une corrélation apparaît également avec le rendement en graines (0,68) (Figure 43).

D'après Zhang et al. (2020), le rendement en huile diminue lorsque la dose d'azote dépasse les 90 kgN/ha. Une tendance à la baisse est observée, mais n'est pas vérifiée statistiquement dans cet essai.



**Figure 42** : Boxplot du rendement en huile pour chaque modalité.

Légende : lettres = groupes du test SNK.

## C. Profil en acide gras

Des différences significatives sont observées. Les boxplots se trouvent en Annexe 18.

**Tableau 18** : Valeurs moyennes des acides gras  $\pm$  std pour chaque modalité et groupes du test SNK.

Modalité		Acide palmitique moyen(%) $\pm$ std	Groupe SNK	Acide stéarique moyen (%) $\pm$ std	Groupe SNK	Acide oléique moyen (%) $\pm$ std	Groupe SNK	Acide linoléique moyen (%) $\pm$ std	Groupe SNK	Acide alpha-linolénique moyen (%) $\pm$ std	Groupe SNK
N°	Fractionnement										
1	0-0 kgN/ha	5,72 $\pm$ 0,15	b	2,77 $\pm$ 0,10	a	15,27 $\pm$ 0,35	b	15,23 $\pm$ 0,10	a	61,02 $\pm$ 0,26	a
2	50-0 kgN/ha	5,92 $\pm$ 0,23	ab	2,74 $\pm$ 0,34	a	16,17 $\pm$ 0,35	a	15,20 $\pm$ 0,23	a	59,97 $\pm$ 0,36	b
3	80-0 kgN/ha	6,17 $\pm$ 0,27	a	2,43 $\pm$ 0,40	a	16,11 $\pm$ 0,80	a	14,80 $\pm$ 0,41	b	60,48 $\pm$ 1,12	ab
4	30-50 kgN/ha	6,05 $\pm$ 0,36	ab	2,89 $\pm$ 0,59	a	16,14 $\pm$ 0,48	a	14,89 $\pm$ 0,24	ab	60,03 $\pm$ 0,59	b
5	50-30 kgN/ha	5,78 $\pm$ 0,08	b	2,85 $\pm$ 0,30	a	16,39 $\pm$ 0,46	a	15,10 $\pm$ 0,21	ab	59,87 $\pm$ 0,80	b
6	80-30 kgN/ha	5,90 $\pm$ 0,18	ab	2,85 $\pm$ 0,30	a	16,57 $\pm$ 0,56	a	15,10 $\pm$ 0,24	ab	59,57 $\pm$ 0,91	b
p-valeur		0,0205 (*)		0,401		3,32.10 <sup>-4</sup> (***)		0,0104 (*)		2,42.10 <sup>-3</sup> (**)	

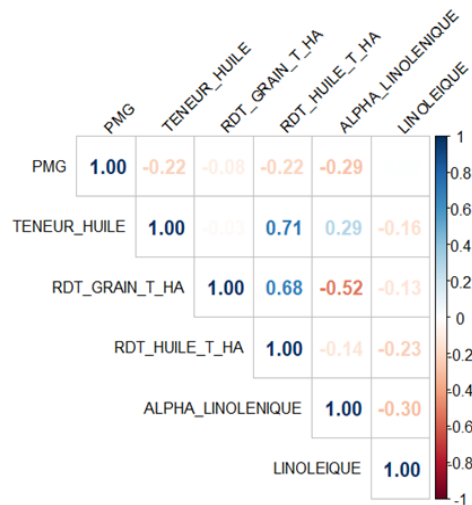
Légende : niveau de signification : \* = (p-valeur < 0,05), \*\* = (p-valeur < 0,01), \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

Une différence hautement significative de teneur en ALA apparaît entre les modalités. La modalité témoin présente la plus haute teneur en ALA avec une moyenne de 61%. La modalité 3 n'est pas significativement différente du témoin. Une corrélation négative existe entre le rendement en graines et la teneur en ALA (-0,52).

Une différence significative de teneur en LA est observée entre les modalités. Le témoin possède également la plus haute teneur en LA. Il n'est statistiquement pas différent des autres modalités, hormis la modalité 3 qui est inférieure aux autres.

La fumure azotée influence la qualité de l'huile. Les teneurs en ALA et LA sont négativement impactées par l'intensité de la fumure. Au contraire, la fertilisation favorise la teneur en acide oléique (Herzog et al., 2017).

#### D. Corrélations entre les variables



**Figure 43** : Matrice de corrélations entre les variables numériques de l'essai fumure de 2022.  
Légende : corrélation entre +1 (bleu) et -1 (rouge).



## 6. Contribution personnelle

Lors de ce travail de fin d'études, je me suis pleinement impliquée afin de fournir un travail de qualité.

J'ai choisi ce que je voulais étudier sur cette culture avec l'aide de mon promoteur et de mon encadrante du CePiCOP.

J'ai planifié et effectué les différentes collectes de données sur le terrain, avec l'aide précieuse des équipes lors des prélèvements et des comptages. Il a parfois fallu s'adapter en fonction des aléas climatiques et des conditions de terrain.

J'ai également réalisé les manipulations en laboratoire qui étaient innovantes pour moi. J'ai pu développer de nouvelles compétences techniques et j'ai montré mes capacités à effectuer un travail rigoureux en suivant des protocoles précis. Il a fallu s'adapter à un nouvel environnement et faire face aux contraintes du partage de matériel entre tous les occupants du laboratoire.

Je me suis investie dans l'analyse des données et l'interprétation des résultats en passant de nombreuses heures à coder sur RStudio. Cela m'a permis d'apprendre de nouvelles choses par moi-même et d'améliorer mes compétences analytiques.

Lors de la visite de la plateforme d'essais, organisée par le CePiCOP, j'ai eu l'opportunité de présenter la culture et les résultats préliminaires de mes recherches. Cela m'a également permis d'échanger avec des personnes extérieures ayant diverses connaissances.

Il me tenait à cœur de participer à la compréhension d'une culture ayant presque disparue de nos rotations en Belgique afin de mettre à disposition ces recherches pour les agriculteurs et autres acteurs de la filière.

## 7. Conclusion et perspectives

L'essai variétal a permis de mettre en avant les caractéristiques de chaque variété. Ces particularités résultent de la sélection génétique et dépendent de la variété. Concernant la couverture du sol, la variété Merinos se démarque par son pouvoir couvrant très important. D'autres variétés sont précoces à la floraison et à la maturité, telles que LS Apalache, avec une longue durée de floraison. Les caractéristiques inverses sont observées avec la variété Lumina, qui est plus tardive avec une durée de floraison plus courte. Certaines variétés sont courtes et plus tolérantes à la verse, comme Angora, Lumina et Sideral.

Chaque variable contribue plus ou moins à l'élaboration du rendement, soit positivement ou négativement. La densité de plantes est positivement corrélée et le nombre de capsules par branche est négativement corrélé au rendement en graines. Chaque variété va favoriser l'une ou l'autre composante de rendement. La variété Angora a plus de branches par plante mais Merinos a plus de capsules par branche, en plus d'avoir la densité de plantes la plus élevée. À côté de cela, Attila a beaucoup de graines par capsule et LS Apalache a le PMG le plus élevé.

Le potentiel de rendement est de 2 à 2,5 T/ha en France. Néanmoins, les rendements dans le nord de la France se rapprochent des 3 T/ha. Les rendements en graines obtenus cette année sont nettement supérieurs à ce potentiel. Les variétés Attila, GOH24 et LS Apalache se sont démarquées. Ces variétés ont notamment moins de capsules par branche mais plus de graines par capsule, ce qui a favorisé le rendement.

L'essai variétal a permis de montrer l'adaptabilité de toutes les variétés de lin oléagineux d'hiver, testées dans les conditions pédoclimatiques de la région limoneuse. Les variétés sous codes ont également montré de bonnes capacités de production avec des rendements supérieurs au potentiel attendu. Toutefois, la tolérance à la verse reste un critère de sélection pouvant encore être amélioré pour GOH23, GOH25 et LSL1133.

Les analyses de qualité des échantillons des essais de 2022 ont montré que la teneur en huile et le profil en acide gras dépendaient de la variété utilisée. La couleur jaune des graines influence négativement la teneur en huile, le rendement en graines, le rendement en huile et la teneur en acide alpha-linolénique. Au contraire, l'acide linoléique est favorisé par la couleur jaune des graines. Les analyses ont mis en avant les variétés LSL1133 et Sideral comme ayant une haute teneur en huile. La variété Lumina présentait la plus haute teneur en acide alpha-linolénique et Montdor avait la plus haute teneur en acide linoléique. Les variétés de la récolte de 2023 devraient avoir des teneurs en huile plus élevées au vu de la diminution du rendement en graines, causée par la sécheresse lors de la floraison. Cependant, les analyses de qualité étant encore en cours, elles n'ont pu être présentées dans ce travail.

L'effet de la fertilisation a été significativement observé sur le nombre de graines par capsule, le PMG et le rendement en graines. Ces deux premières variables sont négativement corrélées au rendement. Une dose d'azote à partir de 50 kgN/ha augmente significativement la biomasse aérienne et le rendement en graines par rapport à une parcelle n'ayant reçu aucun apport de fertilisation.

La teneur en azote de la biomasse n'est par contre pas influencée par la fertilisation azotée. À la fin de la culture, les modalités 1 (0-0 kgN/ha) et 4 (30-50 kgN/ha) montrent une carence azotée sur la courbe de dilution de l'azote. Au contraire, la modalité ayant reçu 110 kgN/ha est plutôt dans un état nutritif

excessif. Les modalités 2 (50-0 kgN/ha), 3 (80-0 kgN/ha) et 5 (50-30 kgN/ha) semblent être les plus appropriées afin d'obtenir un état nutritif de la culture suffisant.

La fertilisation n'a montré aucun effet sur la teneur en huile mais a diminué la teneur en acide alpha-linolénique dans les échantillons de la récolte de 2022. Les valeurs de teneur en huile obtenues pour la modalité 3 (80-0 kgN/ha) n'étaient pas statistiquement différentes du témoin sans fertilisation.

Le choix variétal repose donc sur l'objectif de rendement et de la qualité souhaitée selon les débouchés de la culture. La dose optimale d'azote dépend également de l'objectif de rendement et du contexte pédologique. Les modalités 3 (80-0 kgN/ha) et 5 (50-30 kgN/ha) semblent être les plus optimales.

La culture de lin oléagineux et les variétés actuelles sont adaptées aux sols limoneux wallons. Des essais sont encore à effectuer dans divers contextes pédoclimatiques. Des analyses de la qualité sur plusieurs années de récolte seraient également intéressantes pour confirmer les observations réalisées dans ce travail.

Au vu de ses atouts agronomiques et ses bienfaits nutritionnels, cette culture pourrait être une culture d'avenir. Cependant, la première contrainte réside dans le manque de développement de la filière de transformation et le peu de débouchés belges qui sont actuellement présents. Le prix mondial de cette graine oléagineuse et les importations d'autres pays écrasent le marché belge. De ce fait, la production recule d'années en années.

## 8. Bibliographie

- AOCS, 2011. AOCS Official Method Am 2-93 - Determination of Oil Content in Oilseeds. In: SAMPLING AND ANALYSIS OF VEGETABLE OIL SOURCE MATERIALS.
- Arvalis, March-15-2023. Thrips - Ravageur sur Lin. Les Fiches Accidents - ARVALIS-infos.fr. <http://www.fiches.arvalis-infos.fr>, (15/03/2023).
- Ataï E., Mirlohi A., Sabzalian M.R., Sharif-Moghaddam N., Sadri N., Jafari P. & Mohammadi Mirik A., 2021. Genetic characterization of a diversity panel, selected from IPK linseed (*Linum usitatissimum*) world collection. *Plant Breeding* **140**(5), 919–932, DOI:[10.1111/pbr.12962](https://doi.org/10.1111/pbr.12962).
- Ayitre A., 2017. Cultures émergentes en grandes cultures : Lin et Chanvre.
- Berard S. & le Bihan Z., 2022. Guide de culture lin oléagineux 2022 - Terres Inovia. <https://www.terresinovia.fr/o/commerce-media/products/454228/guide-lin/4643451/Guide%20de%20culture%20lin%20ol%C3%A9agineux%202022%20-%20Terres%20Inovia.pdf?download=false&title=fichier.pdf>, (13/02/2023).
- Bjelková M., Nôžková J., Fatrcová-Šramková K. & Tejklová E., 2012. Comparison of linseed (*Linum usitatissimum* L.) genotypes with respect to the content of polyunsaturated fatty acids. *Chemical Papers* **66**(10), 972–976, DOI:[10.2478/s11696-012-0209-4](https://doi.org/10.2478/s11696-012-0209-4).
- Canopeo, March-29-2023. How To Use It. <https://canopeoapp.com/#/login>, (29/03/2023).
- Casa R., Russell G., Lo Cascio B. & Rossini F., 1999. Environmental effects on linseed (*Linum usitatissimum* L.) yield and growth of flax at different stand densities. *European Journal of Agronomy* **11**(3), 267–278, DOI:[10.1016/S1161-0301\(99\)00037-4](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00037-4).
- Čeh B., Štraus S., Hladnik A. & Kušar A., 2020. Impact of Linseed Variety, Location and Production Year on Seed Yield, Oil Content and Its Composition. *Agronomy* **10**(11), 1770, DOI:[10.3390/agronomy10111770](https://doi.org/10.3390/agronomy10111770).
- Charrier F., Magrini M.-B., Charlier A., Fares M., Bail M.L., Messéan A. & Meynard J.-M., 2013. Alimentation animale et organisation des filières : une comparaison pois protéagineux-lin oléagineux pour comprendre les facteurs freinant ou favorisant les cultures de diversification. *OCL* **20**(4), D407, DOI:[10.1051/ocl/2013011](https://doi.org/10.1051/ocl/2013011).
- CPAR, April-20-2023. Pôle “Laboratoires d’analyses agricoles.” Province du Brabant wallon. <https://www.brabantwallon.be/bw/entreprendre-travailler/agriculture-1/pole-laboratoires-d-analyses-agricoles/>, (20/04/2023).
- CRAW. Données Pameseb- Station Ernage-Gembloux.
- Cui Z., Yan B., Gao Y., Wu B., Wang Y., Wang H., Xu P., Zhao B., Cao Z., Zhang Y., Xie Y., Hu Y., Ma X. & Niu J., 2022. Agronomic cultivation measures on productivity of oilseed flax: A review. *Oil Crop Science* **7**(1), 53–62, DOI:[10.1016/j.ocsci.2022.02.006](https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2022.02.006).
- CultureSciences-Chimie, April-3-2023. Utilisation de l’évaporateur rotatif. *CultureSciences-Chimie*. <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-organique/methodes-et-outils/utilisation-de-l-evaporateur-rotatif>, (03/04/2023).
- D’Antuono L.F. & Rossini F., 1995. Experimental estimation of linseed (*Linum usitatissimum* L.) crop parameters DOI:[10.1016/0926-6690\(95\)00004-V](https://doi.org/10.1016/0926-6690(95)00004-V).
- Doreau M., Martin C. & Morgavi D.P., 2017. Réduire les émissions de méthane entérique par l’alimentation des ruminants. *Viandes & Produits Carnés*.
- Dordas C.A., 2011. Nitrogen nutrition index and its relationship to N use efficiency in linseed. *European Journal of Agronomy* **34**(2), 124–132, DOI:[10.1016/j.eja.2010.11.005](https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.005).
- FAO, February-10-2023. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/fr/#home>, (10/02/2023).

- Flénet F., Guérif M., Boiffin J., Dorvillez D. & Champolivier L., 2006. The critical N dilution curve for linseed (*Linum usitatissimum* L.) is different from other C3 species. *European Journal of Agronomy* **24**(4), 367–373, DOI:[10.1016/j.eja.2006.01.002](https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.01.002).
- GEVES, March-14-2023. Lin - Geves - Expertise & performance. GEVES. <https://www.geves.fr/search/lin/>, (14/03/2023).
- Grégoire M., Ouagne P., Barthod-Malat B., Evon P., Labonne L. & Placet V., 2019. Extraction de fibres de lin oléagineux pour des applications textiles techniques : influence des paramètres de pré-traitement sur le rendement en fibres, la répartition granulométrique et les propriétés mécaniques. *Revue des composites et des matériaux avancés = Journal of Composite and Advanced Materials* **29**(1), 107, DOI:[10.18280/rcma.290115](https://doi.org/10.18280/rcma.290115).
- Herzog C., Anderegg J. & Luginbühl C., 2017. La fumure azotée du lin oléagineux influence le rendement en graines et la qualité de l'huile.
- Hocking P.J. & Pinkerton A., 1991. Response of growth and yield components of linseed to the onset or relief of nitrogen stress at several stages of crop development. *Field Crops Research* **27**(1), 83–102, DOI:[10.1016/0378-4290\(91\)90024-P](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90024-P).
- Hubaux A., 2022. Le lin oléagineux d'hiver (*Linum usitatissimum* L.) : Comment adapter et optimiser son itinéraire technique pour la Belgique ?
- IRM, March-8-2023. Normales climatiques à Uccle. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/normales-climatiques-a-uccle/generalites>, (08/03/2023).
- Justes E., Mary B., Meynard J.-M., Mchet J.-M. & Thelier-Huche L., 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany* **74**(4), 397–407, DOI:[10.1006/anbo.1994.1133](https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1133).
- Kaur V., Kumar S., Yadav R., Wankhede D.P., Aravind J., Radhamani J., Rana J.C. & Kumar A., 2018. Analysis of genetic diversity in Indian and exotic linseed germplasm and identification of trait specific superior accessions **39**(5), 702–709, DOI:[10.22438/jeb/39/5/MRN-849](https://doi.org/10.22438/jeb/39/5/MRN-849).
- Labalette F., Landé N., Wagner D., Roux-Duparque M. & SAILLET E., 2011. La filière lin oléagineux française : panorama et perspectives. *OCL* **18**(3), 113–122, DOI:[10.1051/ocl.2011.0383](https://doi.org/10.1051/ocl.2011.0383).
- Labalette F. & Legros S., 2013. Forces et faiblesses de l'amélioration variétale d'espèces oléagineuses de diversification, l'exemple pour la France du soja, du lin et du chanvre. *OCL* **20**(4), D404, DOI:[10.1051/ocl/2013008](https://doi.org/10.1051/ocl/2013008).
- Laboratoire de chimie des molécules naturelles - Gx.A.B.T., 2023a. Dosage des acides gras totaux par (trans)esterification au BF3.
- Laboratoire de chimie des molécules naturelles - Gx.A.B.T., 2023b. Extraction de l'huile par Soxhlet.
- Laboulet, n.d. LS Apalache - Lin oléagineux d'hiver.
- Laboulet, n.d. Sideral - Lin oléagineux d'hiver.
- Lafond G.P., Irvine B., Johnston A.M., May W.E., McAndrew D.W., Shirtliffe S.J. & Stevenson F.C., 2008. Impact of agronomic factors on seed yield formation and quality in flax. *Can. J. Plant Sci.* **88**(3), 485–500, DOI:[10.4141/CJPS07112](https://doi.org/10.4141/CJPS07112).
- López-Bascón M.A. & Luque de Castro M.D., 2020. Chapter 11 - Soxhlet Extraction. In: Poole, C.F. ed. *Liquid-Phase Extraction, Handbooks in Separation Science*. Elsevier, 327–354.
- Luque de Castro M.D. & García-Ayuso L.E., 1998. Soxhlet extraction of solid materials: an outdated technique with a promising innovative future. *Analytica Chimica Acta* **369**(1), 1–10, DOI:[10.1016/S0003-2670\(98\)00233-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00233-5).
- McMaster G.S. & Wilhelm W.W., 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* **87**(4), 291–300, DOI:[10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0).
- Meier U., Bleiholder H., Buhr L., Feller C., Hack H., Heß M., Lancashire P., Schnock U., Stauß R., Boom T., Weber E. & Zwerger P., 2009. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants-history and publications. *Journal für Kulturpflanzen* **61**, 41–52, DOI:[10.5073/JfK.2009.02.01](https://doi.org/10.5073/JfK.2009.02.01).

- Morice C., 2018. Valorex-Oniris : première étude épidémiologique mondiale en nutrition animale. La Revue De l'Alimentation Animale.
- MyVar, March-15-2023. MyVar: L'outil de Terres Inovia pour connaître et choisir ses variétés. <https://www.myvar.fr/>, (15/03/2023).
- Pageau D., Lajeunesse J. & Lafond J., 2006. Effet du taux de semis et de la fertilisation azotée sur la productivité du lin oléagineux. *Can. J. Plant Sci.* **86**(2), 363–370, DOI:[10.4141/P05-078](https://doi.org/10.4141/P05-078).
- Pageau D. & Lajeunesse J., 2011. Effet de la date de semis sur la productivité du lin oléagineux cultivé en climat frais. *Can. J. Plant Sci.* **91**(1), 29–35, DOI:[10.4141/cjps10021](https://doi.org/10.4141/cjps10021).
- Parmentier R., 2007. Développement de la culture du lin oléagineux en Région Wallonne.
- Patrignani A. & Ochsner T.E., 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal* **107**(6), 2312–2320, DOI:[10.2134/agronj15.0150](https://doi.org/10.2134/agronj15.0150).
- Phytoweb, July-13-2023. Recherche de produits phytopharmaceutiques | Phytoweb. <https://apps.health.belgium.be/fytoweb/pages/public/detail.xhtml?dswid=5057&product=36639070>, (13/07/2023).
- Pleinchamp, 2021. Le lin oléagineux en quête de producteurs. <https://www.pleinchamp.com/actualite/le-lin-oleagineux-en-quete-de-producteurs>, (14/03/2023).
- Prieur L., 2009. Fiche 1 : Maîtriser les adventices dans les cultures biologiques. RMT DévAB - Axe 1, Agronomie.
- PubChem, April-3-2023. n-HEXANE. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/8058>, (03/04/2023).
- Rokade B.S., Kamble P.S., Jadhav J.D. & Madane K.T., 2015. Effect of sowing environments on radiation interception and growing degree days in linseed (*Linum usitatissimum* L.).
- Saroha A., Pal D., Gomashe S.S., Akash, Kaur V., Ujjainwal S., Rajkumar S., Aravind J., Radhamani J., Kumar R., Chand D., Sengupta A. & Wankhede D.P., 2022. Identification of QTNs Associated With Flowering Time, Maturity, and Plant Height Traits in *Linum usitatissimum* L. Using Genome-Wide Association Study. *Frontiers in Genetics* **13**.
- Semences de France, February-24-2023. Lin Oléagineux. *Semences de France*. <https://www.semencesdefrance.com/cereales-a-paille/lin/>, (24/02/2023).
- Semences de France, 2022. Résultats réseau essais LOH récolte 2022.
- Semences de France, 2023a. ANGORA.
- Semences de France, 2023b. ATTILA.
- Semences de France, 2023c. LUMINA.
- Semences de France, 2023d. MERINOS.
- Semences de France, 2023e. MONTDOR.
- Singh P.K., 2016. Status Paper on Linseed/Flax Agriculture. In: Hegde, M.V., Zanwar, A.A., Adekar, S.P. eds. *Omega-3 Fatty Acids: Keys to Nutritional Health*. Cham: Springer International Publishing, 21–44.
- Smith J.M. & Froment M.A., 1998. A growth stage key for winter linseed (*Linum usitatissimum*). *Annals of Applied Biology* **133**(2), 297–306, DOI:[10.1111/j.1744-7348.1998.tb05829.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1998.tb05829.x).
- Soto-Cerda B.J., Duguid S., Booker H., Rowland G., Diederichsen A. & Cloutier S., 2014. Genomic regions underlying agronomic traits in linseed (*Linum usitatissimum* L.) as revealed by association mapping. *Journal of Integrative Plant Biology* **56**(1), 75–87, DOI:[10.1111/jipb.12118](https://doi.org/10.1111/jipb.12118).
- SPW, March-1-2023a. Superficie Agricole Utilisée. Etat de l'Agriculture Wallonne. <http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorsheets/EAW-1.html>, (01/03/2023).
- SPW, March-28-2023b. WalOnMap. <http://geoportail.wallonie.be/walonmap>, (28/03/2023).
- STATBEL, July-27-2023. Exploitations agricoles et horticoles | Statbel. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles>, (27/07/2023).
- Tadesse T., Singh H. & Weyesa B., 2006. GENETIC DIVERGENCE IN LINSEED GERMPLASM.

- Thomé O.W., 1885. Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz - Illustration *Linum usitatissimum*  
- Wikimedia Commons.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illustration\\_Linum\\_usitatissimum0.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illustration_Linum_usitatissimum0.jpg), (07/03/2023).
- UFS, March-14-2023. Section Oléagineux - Union française des semenciers. UFS. <https://www.ufs-semenciers.org/les-especes/section-oleagineux/>, (14/03/2023).
- Upadhyay S. & Mehta N., 2019. Variability studies in yellow seeded linseed (*Linum usitatissimum* L.) genotypes of chhattisgarh plains.
- VASCAN, February-16-2023. *Linum usitatissimum* Linnaeus - Base de données des plantes vasculaires du Canada (VASCAN). <https://data.canadensys.net/vascan/taxon/6560?lang=fr>, (16/02/2023).
- Weill P. & Mairesse G., 2010. Le lin, son huile, sa graine... et notre santé. *Phytothérapie* **8**(2), 84–88, DOI:[10.1007/s10298-010-0539-8](https://doi.org/10.1007/s10298-010-0539-8).
- Yang J., Wen C., Duan Y., Deng Q., Peng D., Zhang H. & Ma H., 2021. The composition, extraction, analysis, bioactivities, bioavailability and applications in food system of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil: A review. *Trends in Food Science & Technology* **118**, 252–260, DOI:[10.1016/j.tifs.2021.09.025](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.025).
- Yang S., Logan J. & Coffey D.L., 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology* **74**(1), 61–74, DOI:[10.1016/0168-1923\(94\)02185-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02185-M).
- Zhang Q., Gao Y., Yan B., Cui Z., Wu B., Yang K. & Ma J., 2020. Perspective on oil flax yield and dry biomass with reduced nitrogen supply. *Oil Crop Science* **5**(2), 42–46, DOI:[10.1016/j.ocsci.2020.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2020.04.004).
- Zuk M., Richter D., Matuła J. & Szopa J., 2015. Linseed, the multipurpose plant. *Industrial Crops and Products, Advances in Industrial Crops and Products Worldwide: AAIC 2014 international conference* **75**, 165–177, DOI:[10.1016/j.indcrop.2015.05.005](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.005).



## 9. Annexes

**Annexe 1** : Echelle BBCH adaptée au lin oléagineux. Source : (Smith et al., 1998).

<b>0 Germination et émergence</b>
<b>00</b> Semence sèche
<b>01</b> Semence imbibée
<b>02</b> Radicule visible
<b>04</b> Extension de l'hypocotyle
<b>05</b> Émergence
<b>07</b> Déploiement des cotylédons à partir de l'enveloppe de la graine
<b>08</b> Expansion des cotylédons
<b>09</b> Cotylédons déployés et complètement étendus
<b>1 Développement des feuilles (pousse principale)</b>
<b>10</b> Vraies feuilles visibles entre les cotylédons complètement étendus
<b>12</b> Première paire de vraies feuilles complètement étendues
<b>14</b> Deuxième paire de vraies feuilles complètement étendues
<b>16</b> Troisième paire de vraies feuilles complètement étendues
<b>18</b> Huit vraies feuilles complètement étendues
<b>1(n)</b> n feuilles complètement étendues
<b>2 Ramification basale</b>
<b>20</b> Bourgeons des ramifications basales visibles dans les aisselles des feuilles de cotylédons
<b>21</b> Feuilles visibles sur la première paire de ramification basale
<b>22</b> Deux ramifications basales développées (i.e. au moins une paire de feuilles complètement étendues sur la première paire de ramification basale)
<b>23</b> Feuilles visibles sur la seconde paire de ramification basale dans l'aisselle de la première paire de vraies feuilles
<b>24</b> Quatre ramifications basales développées (i.e. au moins une paire de feuilles complètement étendues sur la seconde paire de ramification basale)
<b>25</b> Feuilles visibles sur la troisième paire de ramification basale dans l'aisselle de la deuxième paire de vraies feuilles
<b>26</b> Six ramifications basales développées (i.e. au moins une paire de feuilles complètement étendues sur la troisième paire de ramification basale)
<b>3 Extension de la tige</b>
<b>31</b> Tige principale et ramifications passent d'un port allongé à dressé – début de l'extension de la tige
<b>32</b> Phase d'extension rapide de la tige - tiges dressées et s'étendant rapidement (20% de sa taille finale)
<b>35</b> Phase d'extension rapide de la tige - tiges dressées et s'étendant rapidement (50% de sa taille finale)
<b>39</b> Tige principale complètement allongée. Bourgeons floraux pas visible à l'œil nu
<b>4 Développement des parties végétatives à récolter de la plante</b>
Pas applicable en culture de lin oléagineux
<b>5 Émergence de l'inflorescence (pousse principale)</b>
<b>51</b> Bourgeons fermés visibles dans l'aisselle de la feuille de la tige la plus avancée de la plante
<b>53</b> Extension du bourgeon à partir de l'aisselle
<b>55</b> Corymbe formé
<b>57</b> Bourgeons fermés mais pétales visibles
<b>59</b> Première fleur formée
<b>6 Floraison et formation des capsules (toute la plante)</b>
<b>61</b> 10% des pédicelles portent des fleurs ouvertes
<b>63</b> 30% des pédicelles portent des fleurs ou des capsules
<b>65</b> 50% des pédicelles portent des fleurs ou des capsules
<b>67</b> Floraison encore en cours, 50% des pédicelles portent des capsules
<b>69</b> Fin de la floraison, tous les pédicelles portent des capsules
<b>7 Développement des graines et capsules (toute la plante)</b>
<b>71</b> Capsules formées et commencent à grandir, graines formées et en expansion
<b>75</b> Capsules en expansion, près de 50% des capsules ont atteint leur taille finale
<b>79</b> Capsules les moins matures vertes et ont leur taille finale, graines blanches et ont leurs tailles finales
<b>8 Maturité des capsules et graines</b>
<b>81</b> Les capsules deviennent jaunes
<b>83</b> La plupart des graines deviennent de couleur jaune ivoire
<b>85</b> Toutes les capsules sont jaunes bruns mais molles
<b>87</b> La plupart des graines deviennent brunes
<b>88</b> Toutes les graines sont brunes et dures
<b>89</b> Capsules brunes, sèches et sénescentes, graines tintent dans la capsule (→ récolte)
<b>9 Senescence de la tige</b>
<b>91</b> Tiges principalement vertes en dessous de la panicule
<b>93</b> La plupart des tiges sont à 30% brunes
<b>95</b> La plupart des tiges sont à 50% brunes
<b>97</b> Tiges à 75% brunes
<b>99</b> Tiges complètement brunes



**Annexe 2** : Valeurs moyennes des stades BBCH pour chacune des variétés et groupes SNK (Test Newman & Keuls).  
Légende : niveau de signification : \*\* = hautement significatif (p-valeur < 0,01), \*\*\* = très hautement significatif (p-valeur < 0,001).

Variété	Stade BBCH 27/02	Groupe SNK	Stade BBCH 05/04	Groupe SNK	Stade BBCH 21/04	Groupe SNK	Stade BBCH 28/04	Groupe SNK	Stade BBCH 04/05	Groupe SNK	Stade BBCH 10/05	Groupe SNK
ANGORA	23,7	ab	32,5	c	51,0	a	53,0	c	55,0	bc	61,0	c
ATTILA	23,4	b	31,7	c	51,0	a	53,0	c	55,0	bc	61,0	c
GOH23	23,9	ab	34,7	a	51,0	a	53,0	c	55,0	bc	61,0	c
GOH24	23,5	ab	32,0	c	51,0	a	53,0	c	53,0	d	58,0	d
GOH25	24,1	ab	32,0	c	51,0	a	53,0	c	54,0	cd	59,0	d
LS APALACHE	22,4	c	35,0	a	51,5	a	55,0	a	59,0	a	65,0	a
LSL1133	24,0	ab	34,7	a	51,0	a	53,0	c	55,0	bc	61,0	c
LSL1283	23,7	ab	32,0	c	51,0	a	53,0	c	55,0	bc	59,0	d
LUMINA	23,9	ab	32,0	c	51,0	a	53,0	c	54,5	bc	58,0	d
MERINOS	23,6	ab	35,0	a	51,0	a	53,0	c	55,0	bc	61,0	c
MONTDOR	24,5	a	33,7	b	51,0	a	53,0	c	55,0	bc	61,0	c
SIDERAL	24,4	ab	35,0	a	51,0	a	53,5	b	56,0	b	63,0	b
p-valeur	7,87.10 <sup>-6</sup> (***)		2,7.10 <sup>-13</sup> (***)		0,467		2,62.10 <sup>-10</sup> (***)		1,68.10 <sup>-9</sup> (***)		1,35.10 <sup>-15</sup> (***)	
Variété	Stade BBCH 17/05	Groupe SNK	Stade BBCH 24/05	Groupe SNK	Stade BBCH 09/06	Groupe SNK	Stade BBCH 23/06	Groupe SNK	Stade BBCH 29/06	Groupe SNK	Stade BBCH 10/07	Groupe SNK
ANGORA	64,0	bc	66,5	a	69,5	b	81,5	bc	87,5	ab	94,5	abc
ATTILA	63,0	c	66,0	ab	69,0	b	81,0	bc	87,0	b	91,0	c
GOH23	61,5	d	65,0	b	69,0	b	81,0	bc	87,0	b	97,0	a
GOH24	61,0	d	65,0	b	69,0	b	80,0	c	87,2	b	93,0	bc
GOH25	61,0	d	65,0	b	69,0	b	80,5	bc	87,0	b	92,5	bc
LS APALACHE	67,0	a	67,0	a	69,0	b	84,0	ab	88,0	a	97,0	a
LSL1133	63,5	bc	66,5	a	69,0	b	80,5	bc	87,2	b	96,5	a
LSL1283	61,5	d	65,0	b	69,5	b	82,0	bc	87,0	b	96,0	ab
LUMINA	61,0	d	65,0	b	69,0	b	82,0	bc	87,5	b	93,0	bc
MERINOS	63,5	bc	67,0	a	69,0	b	81,0	bc	87,2	b	92,0	c
MONTDOR	63,0	c	66,0	ab	70,5	a	85,0	a	88,0	a	96,0	ab
SIDERAL	64,5	b	66,5	a	69,0	b	82,0	bc	87,7	ab	97,0	a
p-valeur	6,92.10 <sup>-14</sup> (***)		1,40.10 <sup>-5</sup> (***)		2,06.10 <sup>-3</sup> (**)		2,28.10 <sup>-3</sup> (**)		3,98.10 <sup>-4</sup> (***)		9,38.10 <sup>-6</sup> (***)	

**Annexe 3** : Valeurs moyennes de couverture du sol ± std pour chaque variété et groupes SNK.  
Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

Variété	Couverture moyenne du sol (%) ± std	Groupe SNK
ANGORA	19,98 ± 7,24	e
ATTILA	30,59 ± 6,44	cd
GOH23	43,45 ± 3,70	ab
GOH24	34,62 ± 3,04	bc
GOH25	43,43 ± 3,67	ab
LS APALACHE	35,57 ± 2,50	bc
LSL1133	22,15 ± 4,23	de
LSL1283	31,88 ± 2,62	cd
LUMINA	44,20 ± 10,39	ab
MERINOS	51,11 ± 5,55	a
MONTDOR	42,91 ± 4,07	ab
SIDERAL	27,21 ± 4,37	cde
p-valeur	6,17.10 <sup>-9</sup> (***)	

**Annexe 4** : Valeurs moyennes de hauteur à maturité  $\pm$  std pour chaque variété et groupes SNK.  
Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

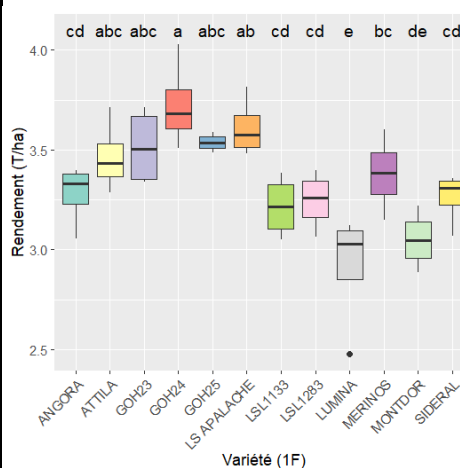
Variété	Hauteur moyenne à maturité (cm) $\pm$ std	Groupe SNK
ANGORA	74,45 $\pm$ 1,53	c
ATTILA	76,90 $\pm$ 3,21	bc
GOH23	83,40 $\pm$ 2,54	a
GOH24	80,75 $\pm$ 1,48	ab
GOH25	77,00 $\pm$ 2,23	bc
LS APALACHE	74,70 $\pm$ 2,31	c
LSL1133	78,85 $\pm$ 2,01	bc
LSL1283	78,20 $\pm$ 1,48	bc
LUMINA	75,15 $\pm$ 2,82	c
MERINOS	79,75 $\pm$ 1,02	b
MONTDOR	78,70 $\pm$ 1,99	bc
SIDERAL	74,30 $\pm$ 2,47	c
p-valeur	1,53.10 <sup>-6</sup> (***)	

**Annexe 5** : Valeurs moyennes des composantes de rendement  $\pm$  std pour chaque variété et groupes SNK.  
Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \*\* = (p-valeur < 0,01), \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

Variété	Densité moyenne de plantes/m <sup>2</sup> $\pm$ std	Groupe SNK	Nombre moyen de branches par plante $\pm$ std	Groupe SNK	Nombre moyen de capsules par branche $\pm$ std	Groupe SNK	Nombre moyen de graines par capsule $\pm$ std	Groupe SNK	Nombre moyen de graines par m <sup>2</sup> $\pm$ std	Groupe SNK	Rendement moyen (T/ha) $\pm$ std	Groupe SNK	PMG moyen (g) $\pm$ std	Groupe SNK
ANGORA	299 $\pm$ 36,71	abc	3,05 $\pm$ 0,30	a	14,29 $\pm$ 1,42	cd	6,57 $\pm$ 0,17	abcd	56 166 $\pm$ 1 895	bc	3,26 $\pm$ 0,11	ab	5,80 $\pm$ 0,07	f
ATTILA	342 $\pm$ 15,14	ab	2,15 $\pm$ 0,10	b	13,38 $\pm$ 2,76	cd	7,25 $\pm$ 0,71	ab	58 761 $\pm$ 2470	b	3,58 $\pm$ 0,15	a	6,10 $\pm$ 0,02	d
GOH23	356 $\pm$ 50,60	ab	2,60 $\pm$ 0,16	ab	13,06 $\pm$ 0,83	cd	6,70 $\pm$ 0,60	abcd	50 879 $\pm$ 2 026	d	3,35 $\pm$ 0,13	ab	6,59 $\pm$ 0,06	b
GOH24	370 $\pm$ 16,49	ab	2,80 $\pm$ 0,28	ab	10,59 $\pm$ 0,74	d	7,47 $\pm$ 0,53	a	58 802 $\pm$ 4 384	b	3,58 $\pm$ 0,20	a	6,09 $\pm$ 0,17	d
GOH25	356 $\pm$ 41,82	ab	2,50 $\pm$ 0,38	ab	13,29 $\pm$ 1,75	cd	6,12 $\pm$ 0,63	bcd	58 359 $\pm$ 3 688	b	3,46 $\pm$ 0,19	ab	5,92 $\pm$ 0,08	ef
LS APALACHE	358 $\pm$ 36,59	ab	2,40 $\pm$ 0,16	ab	13,47 $\pm$ 0,82	cd	6,40 $\pm$ 0,87	abcd	52 806 $\pm$ 3 779	cd	3,57 $\pm$ 0,28	a	6,76 $\pm$ 0,11	a
LSL1133	244 $\pm$ 32,16	c	2,60 $\pm$ 0,43	ab	19,34 $\pm$ 2,55	a	6,85 $\pm$ 0,60	abc	54 402 $\pm$ 1 639	bcd	3,19 $\pm$ 0,13	b	5,87 $\pm$ 0,09	ef
LSL1283	377 $\pm$ 66,00	ab	2,80 $\pm$ 0,63	ab	11,29 $\pm$ 0,23	d	5,92 $\pm$ 0,66	cd	58 467 $\pm$ 277	b	3,51 $\pm$ 0,05	ab	6,01 $\pm$ 0,11	de
LUMINA	377 $\pm$ 69,23	ab	2,30 $\pm$ 0,35	ab	14,22 $\pm$ 1,98	cd	5,92 $\pm$ 0,46	cd	59 508 $\pm$ 660	b	3,46 $\pm$ 0,08	ab	5,82 $\pm$ 0,10	f
MERINOS	394 $\pm$ 51,48	a	2,05 $\pm$ 0,19	b	17,48 $\pm$ 1,71	ab	5,47 $\pm$ 0,49	d	63 383 $\pm$ 1 165	a	3,44 $\pm$ 0,05	ab	5,43 $\pm$ 0,04	g
MONTDOR	303 $\pm$ 60,07	abc	2,30 $\pm$ 0,26	ab	12,61 $\pm$ 2,06	cd	5,37 $\pm$ 0,68	d	50 177 $\pm$ 975	d	3,22 $\pm$ 0,08	ab	6,42 $\pm$ 0,09	c
SIDERAL	268 $\pm$ 37,09	bc	2,60 $\pm$ 0,28	ab	16,33 $\pm$ 0,64	bc	5,85 $\pm$ 0,37	cd	54 093 $\pm$ 2 833	bcd	3,30 $\pm$ 0,14	ab	6,11 $\pm$ 0,07	d
p-valeur	8,69.10 <sup>-4</sup> (***)		7,36.10 <sup>-3</sup> (**)		2,98.10 <sup>-7</sup> (***)		9,73.10 <sup>-5</sup> (***)		1,79.10 <sup>-7</sup> (***)		1,91.10 <sup>-3</sup> (**)		< 2.10 <sup>-16</sup> (***)	

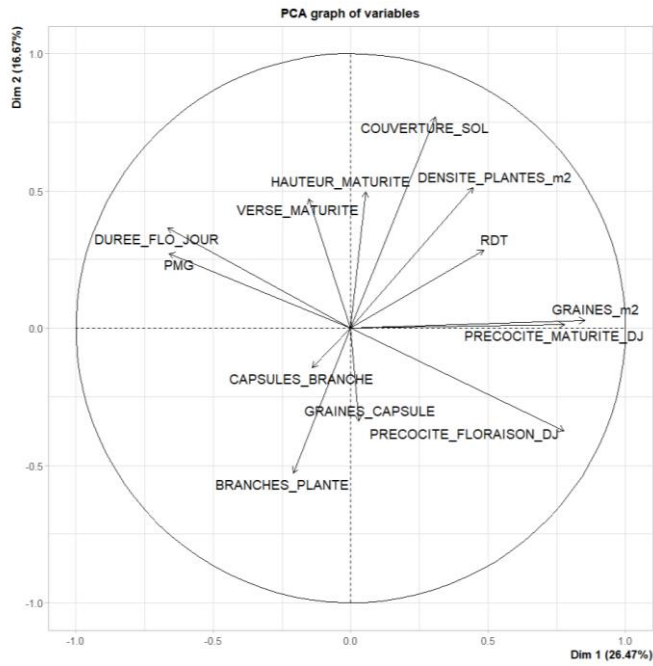
**Annexe 6** : Boxplot et valeurs moyennes du rendement en graines  $\pm$  std pour chaque variété traitée et groupes SNK.  
Légende : lettres = groupes SNK, std = déviation standard, niveau de signification : \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

Variété	Rendement moyen (T/ha) $\pm$ std	Groupe SNK
ANGORA	3,28 $\pm$ 0,16	cd
ATTILA	3,46 $\pm$ 0,18	abc
GOH23	3,52 $\pm$ 0,19	abc
GOH24	3,72 $\pm$ 0,22	a
GOH25	3,54 $\pm$ 0,04	abc
LS APALACHE	3,61 $\pm$ 0,15	ab
LSL1133	3,22 $\pm$ 0,16	cd
LSL1283	3,24 $\pm$ 0,15	cd
LUMINA	2,91 $\pm$ 0,30	e
MERINOS	3,38 $\pm$ 0,19	bc
MONTDOR	3,05 $\pm$ 0,15	de
SIDERAL	3,26 $\pm$ 0,13	cd
p-valeur	5,57.10 <sup>-8</sup> (***)	



**Annexe 7** : Résultats de l'ACP pour les variables numériques de l'essai variétal.

Graphes ACP des variables explicatives par rapport aux axes



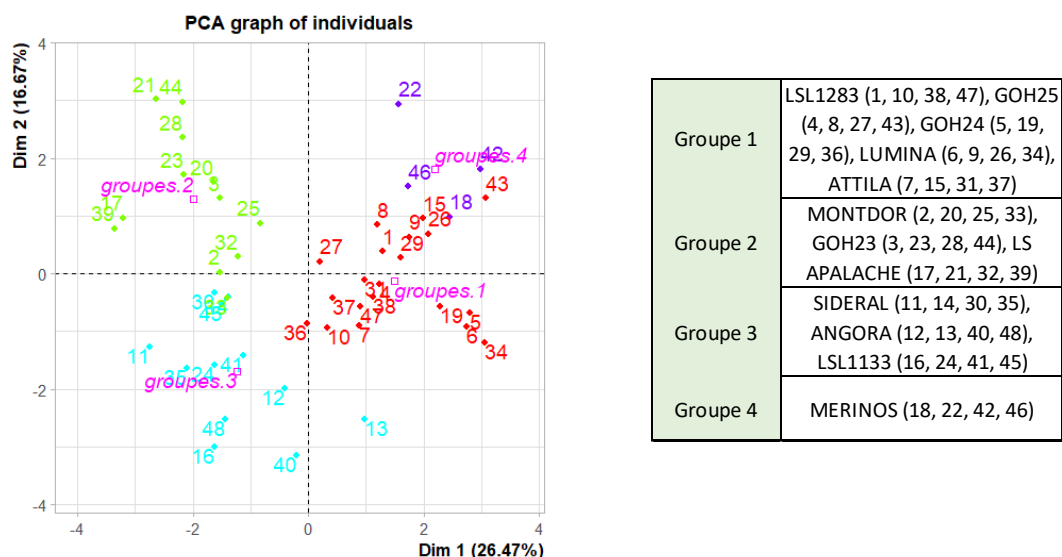
Matrice des corrélations des variables avec les dimensions

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
COUVERTURE_SOL	0.31	0.77	-0.07	0.21	-0.23
DENSITE_PLANTES_m2	0.45	0.51	0.33	-0.03	-0.23
PRECOCITE_FLORAISON_DJ	0.78	-0.37	0.08	0.42	-0.03
DUREE_FLO_JOUR	-0.67	0.36	-0.13	-0.42	0.29
PRECOCITE_MATURITE_DJ	0.78	0.01	-0.08	-0.20	0.26
VERSE_MATURITE	-0.15	0.47	-0.26	0.48	0.37
HAUTEUR_MATURITE	0.05	0.50	0.07	0.57	0.42
GRAINES_CAPSULE	0.03	-0.34	0.36	-0.03	0.77
CAPSULES_BRANCHE	-0.14	-0.14	-0.89	-0.13	0.15
BRANCHES_PLANTE	-0.21	-0.53	0.42	0.34	-0.03
PMG	-0.66	0.27	0.57	-0.13	0.01
RDT	0.48	0.28	0.42	-0.52	0.20
GRAINES_m2	0.85	0.03	-0.15	-0.27	0.14

Qualité de représentation des variables pour les 5 dimensions gardées

Variable explicative	Qualité de représentation
Branches/plante	0,62
Densité de plantes/m <sup>2</sup>	0,63
Verse à maturité	0,68
Précocité à la maturité (°CJ)	0,72
Hauteur à maturité (cm)	0,76
Couverture sol (%)	0,79
Rendement (T/ha)	0,8
Graines/capsule	0,83
Graines/m <sup>2</sup>	0,84
PMG (g)	0,85
Durée floraison (jour)	0,86
Capsules/branche	0,87
Précocité à la floraison (°CJ)	0,92

**Annexe 8** : Graphe ACP des individus avec les centroïdes des groupes et constitution des groupes.



**Annexe 9** : Valeurs moyennes de la biomasse aérienne sèche  $\pm$  std pour chaque modalité de fumure et groupes SNK.  
Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \*\* = (p-valeur < 0,01).

Modalité		10 cm	Groupe SNK	30 cm	Groupe SNK	Bourgeonnement	Groupe SNK	Capsules	Groupe SNK
N°	Fractionnement								
1	0-0 kgN/ha	1,62 $\pm$ 0,09	a	2,69 $\pm$ 0,74	a	2,89 $\pm$ 0,90	b	6,90 $\pm$ 1,22	b
2	50-0 kgN/ha	1,66 $\pm$ 0,09	a	3,33 $\pm$ 0,88	a	4,32 $\pm$ 0,88	ab	12,66 $\pm$ 0,79	a
3	80-0 kgN/ha	1,81 $\pm$ 0,23	a	3,95 $\pm$ 0,21	a	4,93 $\pm$ 0,78	a	11,68 $\pm$ 1,55	a
4	30-50 kgN/ha	1,65 $\pm$ 0,23	a	3,54 $\pm$ 0,42	a	4,05 $\pm$ 0,30	ab	11,60 $\pm$ 1,03	a
5	50-30 kgN/ha	1,82 $\pm$ 0,15	a	3,36 $\pm$ 0,30	a	4,19 $\pm$ 0,41	ab	11,11 $\pm$ 1,71	a
6	80-30 kgN/ha	1,39 $\pm$ 0,26	a	3,34 $\pm$ 0,43	a	4,40 $\pm$ 0,55	ab	12,71 $\pm$ 1,44	a
p-valeur		0,201		0,190		0,084		5,24.10 <sup>-3</sup> (**)	

**Annexe 10** : Valeurs moyennes de teneur en azote  $\pm$  std pour chaque modalité de fumure et groupes SNK.  
Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

Modalité		10 cm	Groupe SNK	30 cm	Groupe SNK	Bourgeonnement	Groupe SNK	Capsules	Groupe SNK
N°	Fractionnement								
1	0-0 kgN/ha	2,24 $\pm$ 0,22	a	1,59 $\pm$ 0,08	d	1,66 $\pm$ 0,09	a	1,01 $\pm$ 0,24	a
2	50-0 kgN/ha	2,28 $\pm$ 0,10	a	2,31 $\pm$ 0,26	bc	1,89 $\pm$ 0,15	a	1,15 $\pm$ 0,04	a
3	80-0 kgN/ha	2,23 $\pm$ 0,11	a	2,72 $\pm$ 0,15	ab	2,22 $\pm$ 0,17	a	1,16 $\pm$ 0,11	a
4	30-50 kgN/ha	2,20 $\pm$ 0,12	a	1,98 $\pm$ 0,04	c	2,12 $\pm$ 0,35	a	1,08 $\pm$ 0,22	a
5	50-30 kgN/ha	2,14 $\pm$ 0,21	a	2,64 $\pm$ 0,32	ab	2,25 $\pm$ 0,18	a	1,28 $\pm$ 0,11	a
6	80-30 kgN/ha	2,41 $\pm$ 0,19	a	2,90 $\pm$ 0,15	a	2,31 $\pm$ 0,50	a	1,38 $\pm$ 0,14	a
p-valeur		0,477		1,41.10 <sup>-4</sup> (***)		0,233		0,191	

**Annexe 11** : Valeurs moyennes de hauteur  $\pm$  std pour chaque modalité et groupes SNK.

Modalité		Hauteur moyenne (cm) $\pm$ std	Groupe SNK
N°	Fractionnement		
1	0-0 kgN/ha	70,67 $\pm$ 2,08	a
2	50-0 kgN/ha	73,13 $\pm$ 1,10	a
3	80-0 kgN/ha	74,07 $\pm$ 2,10	a
4	30-50 kgN/ha	73,87 $\pm$ 1,36	a
5	50-30 kgN/ha	73,73 $\pm$ 1,20	a
6	80-30 kgN/ha	74,13 $\pm$ 1,62	a
p-valeur		0,185	

**Annexe 12 :** Valeurs moyennes des composantes de rendement  $\pm$  std pour chaque modalité et groupes SNK (ou LSD).

Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \* = (p-valeur < 0,05), \*\* = (p-valeur < 0,01), \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

Modalité		Densité moyenne de plantes/m <sup>2</sup> $\pm$ std	Groupe SNK	Nombre moyen de branches par plante $\pm$ std	Groupe SNK	Nombre moyen de capsules par branche $\pm$ std	Groupe SNK	Nombre moyen de graines par capsule $\pm$ std	Groupe LSD	Nombre moyen de graines par m <sup>2</sup> $\pm$ std	Groupe SNK	Rendement moyen (T/ha) $\pm$ std	Groupe SNK	PMG moyen (g) $\pm$ std	Groupe SNK
N°	Fractionnement														
1	0-0 kgN/ha	306,67 $\pm$ 20,53	a	2,47 $\pm$ 0,11	a	10,43 $\pm$ 0,55	a	7,10 $\pm$ 0,36	a	52 797 $\pm$ 2 002	d	3,21 $\pm$ 0,10	d	6,08 $\pm$ 0,04	a
2	50-0 kgN/ha	277,33 $\pm$ 47,72	a	2,47 $\pm$ 0,42	a	13,55 $\pm$ 0,76	a	6,37 $\pm$ 0,11	b	67 199 $\pm$ 3 763	c	4,03 $\pm$ 0,23	c	5,99 $\pm$ 0,01	ab
3	80-0 kgN/ha	282,67 $\pm$ 9,24	a	3,00 $\pm$ 0,20	a	13,72 $\pm$ 3,21	a	6,97 $\pm$ 0,55	a	75 470 $\pm$ 3 787	b	4,44 $\pm$ 0,12	b	5,89 $\pm$ 0,14	bc
4	30-50 kgN/ha	278,67 $\pm$ 70,01	a	2,40 $\pm$ 0,20	a	14,19 $\pm$ 2,38	a	6,63 $\pm$ 0,38	ab	76 165 $\pm$ 3 224	b	4,42 $\pm$ 0,20	b	5,80 $\pm$ 0,02	c
5	50-30 kgN/ha	334,67 $\pm$ 65,03	a	3,00 $\pm$ 0,60	a	14,55 $\pm$ 2,28	a	7,07 $\pm$ 0,47	a	73 704 $\pm$ 1 409	b	4,28 $\pm$ 0,11	bc	5,81 $\pm$ 0,04	c
6	80-30 kgN/ha	269,33 $\pm$ 39,26	a	2,73 $\pm$ 0,11	a	15,10 $\pm$ 2,55	a	6,40 $\pm$ 0,82	b	82 353 $\pm$ 2 233	a	4,78 $\pm$ 0,09	a	5,81 $\pm$ 0,05	c
p-valeur		0,276		0,123		0,181		3,55.10 <sup>-2</sup> (*)		2,26.10 <sup>-6</sup> (***)		3,73.10 <sup>-6</sup> (***)		1,56.10 <sup>-3</sup> (**)	

**Annexe 13 :** Valeurs moyennes des composantes de rendement  $\pm$  std pour chaque modalité et groupes SNK de l'essai variétal de 2022.

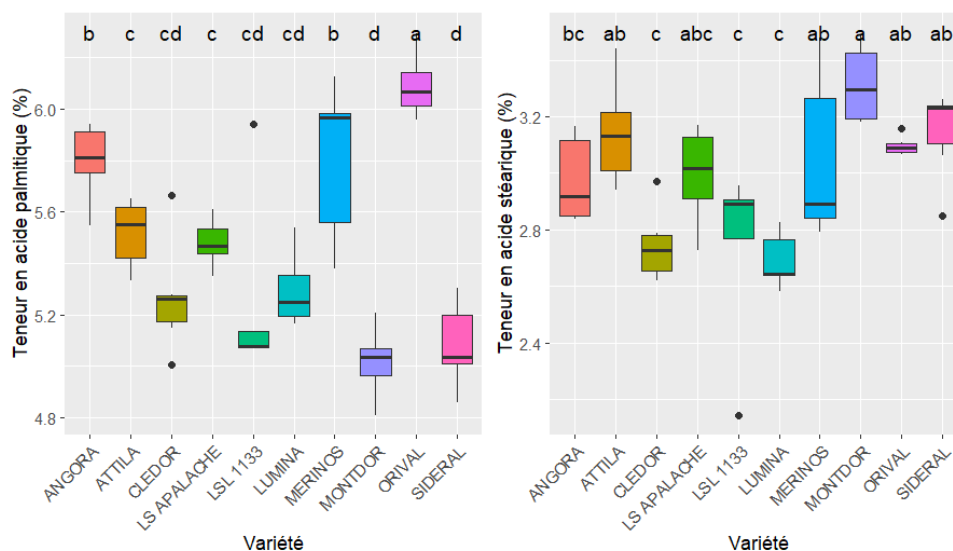
Légende : std = déviation standard, niveau de signification : \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

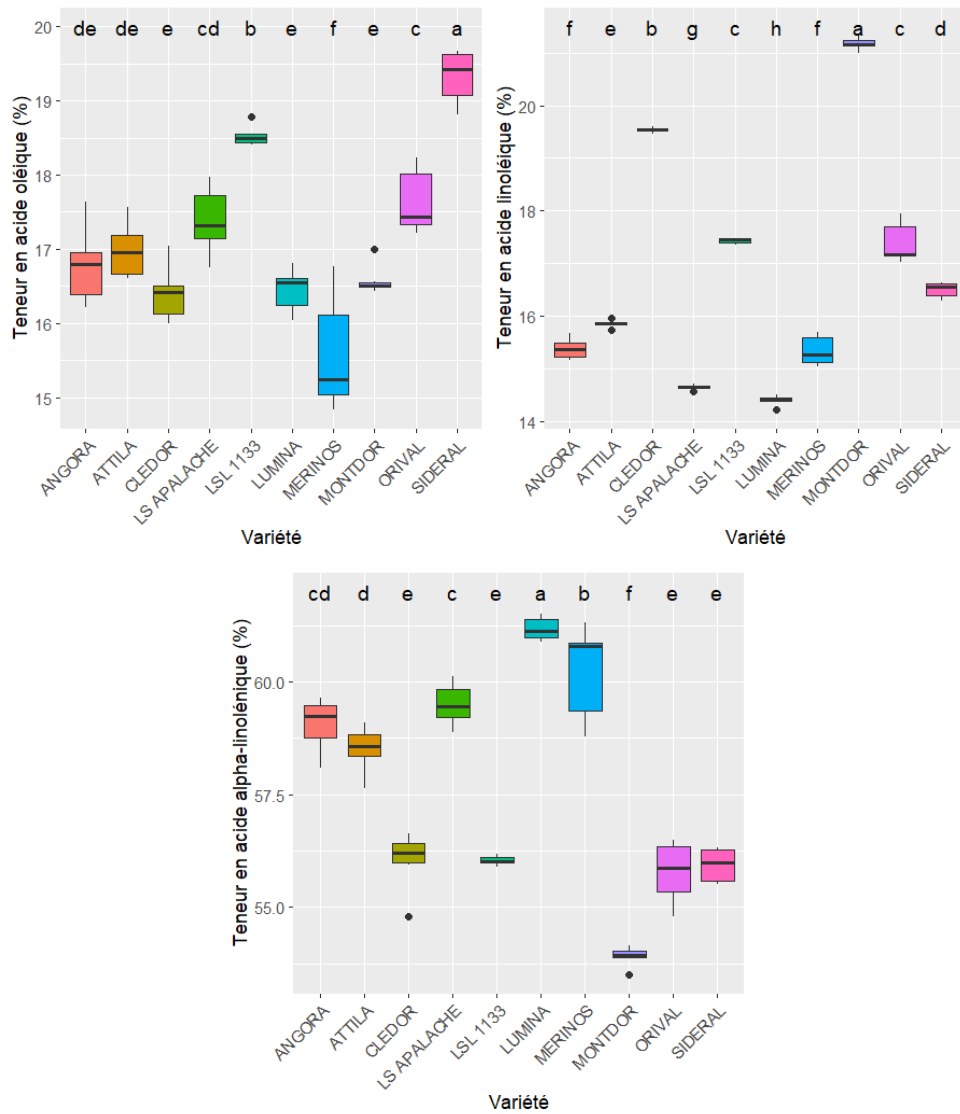
Source : données de rendement en graines provenant de (Hubaux, 2022).

Variété	PMG moyen (g) $\pm$ std	Groupe SNK	Teneur moyenne en huile d'une graine (%) $\pm$ std	Groupe SNK	Rendement moyen en graines (T/ha) $\pm$ std	Groupe SNK	Rendement moyen en huile (T/ha) $\pm$ std	Groupe SNK
ANGORA	6,77 $\pm$ 0,16	bcd	37,22 $\pm$ 2,02	bcd	3,60 $\pm$ 0,10	bc	1,34 $\pm$ 0,07	bcd
ATTILA	6,99 $\pm$ 0,06	b	29,16 $\pm$ 3,00	d	4,00 $\pm$ 0,13	a	1,17 $\pm$ 0,15	cd
CLEDOR	6,71 $\pm$ 0,01	cd	30,31 $\pm$ 4,81	cd	3,45 $\pm$ 0,15	c	1,04 $\pm$ 0,13	d
LS APALACHE	7,62 $\pm$ 0,02	a	35,94 $\pm$ 3,49	bcd	3,88 $\pm$ 0,10	ab	1,40 $\pm$ 0,15	bc
LSL 1133	6,82 $\pm$ 0,01	bc	48,51 $\pm$ 3,11	a	4,01 $\pm$ 0,13	a	1,94 $\pm$ 0,08	a
LUMINA	6,83 $\pm$ 0,19	bc	32,12 $\pm$ 1,67	cd	3,81 $\pm$ 0,09	ab	1,22 $\pm$ 0,09	cd
MERINOS	6,59 $\pm$ 0,14	d	38,92 $\pm$ 4,38	bc	3,66 $\pm$ 0,19	bc	1,43 $\pm$ 0,21	bc
MONTDOR	7,75 $\pm$ 0,07	a	36,48 $\pm$ 1,59	bcd	3,57 $\pm$ 0,13	bc	1,30 $\pm$ 0,06	cd
ORIVAL	6,12 $\pm$ 0,02	e	47,46 $\pm$ 2,54	a	1,19 $\pm$ 0,01	d	0,56 $\pm$ 0,03	e
SIDERAL	6,92 $\pm$ 0,04	bc	43,62 $\pm$ 5,42	ab	3,73 $\pm$ 0,18	abc	1,63 $\pm$ 0,22	b
p-valeur	2,92.10 <sup>-12</sup> (***)		8,11.10 <sup>-6</sup> (***)		1,01.10 <sup>-14</sup> (***)		3,44.10 <sup>-8</sup> (***)	

**Annexe 14 :** Boxplots des teneurs en acide gras pour chaque variété de 2022.

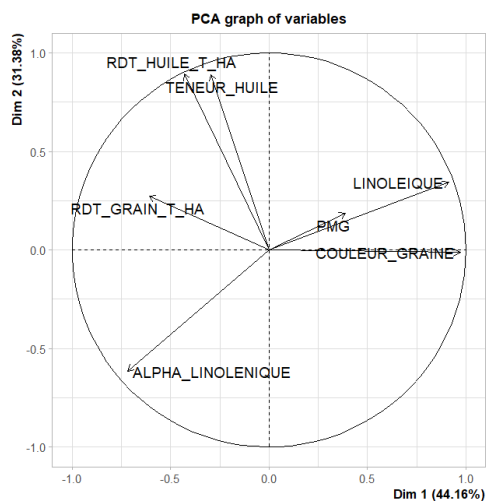
Légende : lettres = groupes SNK.





Annexe 15 : Résultats de l'ACP pour les variables numériques de l'essai variétal 2022.

Graphes ACP des variables explicatives par rapport aux axes



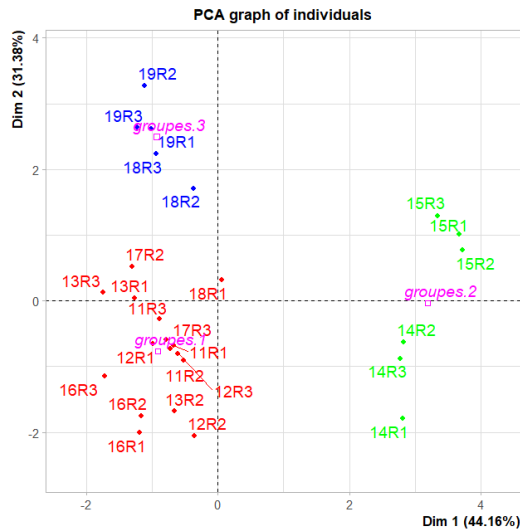
Matrice de corrélations entre les variables et les axes

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
COULEUR_GRAINE	0.97	-0.01	-0.05	-0.06	0.21
PMG	0.39	0.19	0.81	0.40	-0.01
TENEUR_HUILE	-0.30	0.89	-0.27	0.21	0.04
RDT_GRAIN_T_HA	-0.61	0.27	0.58	-0.45	0.08
RDT_HUILE_T_HA	-0.43	0.89	-0.09	0.05	0.07
ALPHA_LINOLENIQUE	-0.72	-0.62	-0.05	0.21	0.24
LINOLEIQUE	0.91	0.34	-0.07	-0.15	0.07

Qualité de représentation des variables dans les 3 dimensions gardées

Variable explicative	Qualité de représentation
Rendement en graines	0,79
PMG	0,84
Teneur en ALA	0,9
Couleur graines	0,94
Teneur en huile	0,95
Teneur en LA	0,96
Rendement en huile	0,99

**Annexe 16** : Graphe ACP des individus de l'essai variétal de 2022 avec les centroïdes des groupes et constitution des groupes.



Groupe 1	Angora (11R1, 11R2, 11R3), Attila (12R1, 12R2, 12R3), Merinos (13R1, 13R2, 13R3), Lumina (16R1, 16R2, 16R3), LS Apalache (17R1, 17R2, 17R3), Sideral (18R1)
Groupe 2	Cledor (14R1, 14R2, 14R3), Montdor (15R1, 15R2, 15R3)
Groupe 3	Sideral (18R2, 18R3), LSL1133 (19R1, 19R2, 19R3)

**Annexe 17** : Valeurs moyennes des composantes de rendement  $\pm$  std pour chaque modalité et groupes SNK.  
Légende : niveau de signification : \* = (p-valeur < 0,05), \*\* = (p-valeur < 0,01), \*\*\* = (p-valeur < 0,001).

Modalité		PMG moyen (g) $\pm$ std	Groupe SNK	Nombre de graines moyen/m <sup>2</sup> $\pm$ std	Groupe SNK	Rendement moyen en graines (T/ha) $\pm$ std	Groupe SNK	Teneur moyenne en huile d'une graine (%) $\pm$ std	Groupe SNK	Rendement moyen en huile (T/ha) $\pm$ std	Groupe SNK
N°	Fractionnement										
1	0-0 kgN/ha	6,81 $\pm$ 0,03	bc	38 470 $\pm$ 5 822	b	2,62 $\pm$ 0,39	b	34,59 $\pm$ 3,10	a	0,90 $\pm$ 0,15	a
2	50-0 kgN/ha	6,70 $\pm$ 0,07	c	51 713 $\pm$ 8 061	a	3,46 $\pm$ 0,50	a	38,02 $\pm$ 5,11	a	1,30 $\pm$ 0,11	a
3	80-0 kgN/ha	6,79 $\pm$ 0,08	bc	48 397 $\pm$ 992	a	3,28 $\pm$ 0,09	a	34,51 $\pm$ 4,10	a	1,13 $\pm$ 0,13	a
4	30-50 kgN/ha	6,92 $\pm$ 0,09	ab	47 924 $\pm$ 5933	a	3,31 $\pm$ 0,38	a	38,38 $\pm$ 1,83	a	1,27 $\pm$ 0,18	a
5	50-30 kgN/ha	6,84 $\pm$ 0,07	bc	49 493 $\pm$ 7 365	a	3,38 $\pm$ 0,50	a	29,52 $\pm$ 5,54	a	1,01 $\pm$ 0,32	a
6	80-30 kgN/ha	7,01 $\pm$ 0,05	a	48 357 $\pm$ 3 757	a	3,39 $\pm$ 0,25	a	30,96 $\pm$ 4,04	a	1,05 $\pm$ 0,16	a
p-valeur		2,21.10 <sup>-4</sup> (***)		0,0126 (*)		9,69.10 <sup>-3</sup> (**)		0,0502		0,0646	

**Annexe 18** : Boxplots des teneurs en acide gras en fonction des modalités de fumure de 2022.  
 Légende : lettres = groupes SNK.

