

Le lin oléagineux d'hiver (*Linum usitatissimum* L.) : Comment adapter et optimiser son itinéraire technique pour la Belgique ?

Auteur : Hubaux, Alix

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15330>

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.

**LE LIN OLÉAGINEUX D'HIVER
(*LINUM USITATISSIMUM* L.) :
COMMENT ADAPTER ET OPTIMISER SON
ITINÉRAIRE TECHNIQUE POUR LA
BELGIQUE ?**

ALIX HUBAUX

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

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 académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

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

**LE LIN OLÉAGINEUX D'HIVER
(*LINUM USITATISSIMUM* L.) :
COMMENT ADAPTER ET OPTIMISER SON
ITINÉRAIRE TECHNIQUE POUR LA
BELGIQUE ?**

ALIX HUBAUX

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR : BENJAMIN DUMONT

Remerciements

Je tiens à remercier mon promoteur, le professeur Benjamin Dumont pour m'avoir permis de réaliser un travail de fin d'études répondant à mes attentes et pour le temps et les moyens consacrés tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie le CePiCOP pour l'accueil et les moyens matériels et financiers mis à ma disposition. Plus particulièrement, Alice Nysten qui m'a encadrée et fait totalement confiance durant de ce travail. Merci aux techniciens et aux stagiaires pour leur aide et pour l'attention apportée aux parcelles.

Je remercie le professeur Yves Brostaux pour les réponses qu'il a apporté à mes questions statistiques.

Merci à Guillaume Jacquemin pour la relecture de ce travail.

Merci aux doctorants : Laura, Arthur et Christophe pour leur aide tout au long de ce travail.

Merci à toutes les personnes qui ont montré un intérêt envers mon travail de fin d'études.

Un clin d'œil particulier à mes acolytes de Gembloux, Sophie et Aurélie. Merci de m'avoir supporté et pour les merveilleux moments passés ensemble.

Les derniers remerciements mais pas les moindres vont à ma famille, mes parents et ma sœur. Ils m'ont soutenu et surtout supporté durant ces six années d'études. Ils m'ont poussé à croire en mes capacités et à entreprendre un master après avoir décroché mon premier diplôme. Merci de m'avoir permis de choisir mes études selon mes choix et mes envies et de m'avoir toujours suivie.

Sur ce, je termine sur cette dernière citation :

« Je ne peux pas rester en place. Il faut que j'explore et que j'expérimente. Je ne suis jamais content de mon travail. Je n'accepte pas les limites de mon imagination. »

WALT DISNEY



Résumé

Le lin oléagineux (*Linum usitatissimum* L.) est une culture aux multiples débouchés (industrie, alimentation humaine et animale, ...). Cependant, elle est peu cultivée en Belgique. Les références techniques sur le sujet sont peu nombreuses.

Afin de mieux conseiller les agriculteurs et les autres parties prenantes sur la culture du lin oléagineux d'hiver en Belgique, des essais ont été menés en micro-parcelles à Lonzée (Belgique). Ceux-ci portaient sur l'évaluation de dix variétés, de six modalités de fertilisation azotée et de cinq modalités de désherbage. Le but était d'étudier différents éléments de l'itinéraire cultural afin de les optimiser.

L'essai variétal a permis de mettre en avant diverses corrélations entre les variables mesurées (densité, symptômes foliaires, rendement, ...). Par la suite, quatre groupes distincts de variétés ont pu être différenciés. Chacun de ceux-ci est caractérisé par des critères propres. Cette analyse permet de distinguer les variétés les plus adaptées au territoire belge.

L'essai sur la fertilisation a confirmé que la culture de lin oléagineux est peu demandeuse en intrant azoté. Un faible apport en azote de l'ordre de 50 kgN/ha a permis de se différencier en termes de rendement de la modalité non fertilisée tout en étant non significativement différent de la modalité à 110 kgN/ha. Ces conclusions sont cependant très dépendantes des conditions climatiques annuelles.

L'essai sur le désherbage a pu démontrer l'efficacité du désherbage chimique et mixte (mécanique et chimique) en culture de lin oléagineux d'hiver. Il a aussi mis en avant les limites du désherbage mécanique.

De nombreuses études sont encore à mener sur le sujet afin de tirer des conclusions pertinentes à long terme.

Mots clés : *Linum usitatissimum*, lin oléagineux, variété, fertilisation, désherbage.

Abstract

Linseed (*Linum usitatissimum* L.) is a numerous outlets crop (industry, human and animals feeding, ...). However, it is not much cultivated in Belgium. Technical references on this subject are few.

In order to advise farmers and other stakeholders on winter linseed in Belgium, trials on micro-plots were established in Lonzée (Belgium). Those trials studied ten varieties, six nitrogen fertilization modalities and five weeding modalities. The goal was to study different elements of the cultural itinerary to be able to optimize them.

The varieties trial enabled to highlight different correlations between measured variables (density, foliar symptoms, yield...). Afterwards, four distinct groups of varieties were differentiated. Each of these is characterised by its own characteristics. This analysis allows to distinguish varieties which are the most suitable for the Belgian territory.

The fertilization trial confirmed that linseed crop needs little nitrogen fertilization. A little nitrogen input like 50 kgN/ha enabled to distinguished in terms of yield from unfertilized modality. Little nitrogen input wasn't significantly different from 110 kgN/ha modality. These conclusions are however dependant to annual climate conditions.

The weeding trial highlighted the efficiency of chemical weeding and mixed weeding in winter linseed crop. This trial also showed the limits of mechanical weeding.

Many studies are still to be carried out on this subject to draw relevant conclusions in the long-term.

Key words: *Linum usitatissimum*, linseed, variety, fertilization, weeding.

Table des matières

1. Introduction	1
2. État de l'art : le lin oléagineux d'hiver	2
2.1. <i>Linum usitatissimum</i>	2
2.1.1. Ses origines	2
2.1.2. Sa classification	2
2.2. Le lin oléagineux.....	2
2.2.1. La sélection de <i>Linum usitatissimum</i> au lin oléagineux d'hiver.....	2
2.2.2. Caractérisation	4
2.2.2.1. Morphologique	4
2.2.2.2. Phénologique	5
2.2.2.3. Agronomique	6
2.2.3. Production.....	8
2.2.3.1. Mondiale.....	8
2.2.3.2. Européenne.....	9
2.2.3.3. Belge	9
2.2.3.4. Française.....	9
2.2.4. Utilisation	10
3. Objectifs de ce travail.....	11
4. Matériel et méthodes.....	12
4.1. Site des essais.....	12
4.2. Analyse de sol.....	12
4.3. Conditions climatiques.....	13
4.4. L'expérimentation	14
4.4.1. Dispositifs expérimentaux	14
4.4.1.1. Facteur variété	14
4.4.1.2. Facteur fertilisation	15
4.4.1.3. Facteur méthode de désherbage	15
4.4.2. Les opérations culturales	16
4.4.3. Observations et variables mesurées	16
4.4.3.1. Essai variété	16
4.4.3.2. Essai fertilisation	19
4.4.3.3. Essai désherbage.....	20
4.4.4. Analyse des données	21
5. Résultats et discussion.....	23
5.1. Essai variétal	23
5.1.1. Suivi temporel	23
5.1.2. Caractérisation variétale.....	26
5.1.2.1. Couverture du sol.....	26
5.1.2.2. Symptômes foliaires	27
5.1.2.3. Composantes du rendement	28
5.1.2.4. Corrélations entre variables	32
5.1.3. Classification des variétés par groupe.....	34
5.2. Essai fertilisation	36

5.2.1.	Suivi temporel	36
5.2.1.1.	Biomasse.....	36
5.2.1.2.	Azote.....	37
5.2.1.3.	Hauteur et stades.....	38
5.2.2.	Caractérisation de la fertilisation	38
5.2.2.1.	Composantes du rendement	38
5.2.2.2.	Courbe critique de dilution de l'azote.....	42
5.3.	Essai désherbage	44
5.3.1.	Caractérisation du désherbage	44
5.3.1.1.	Efficacité	44
5.3.1.2.	Sélectivité.....	48
5.3.1.3.	Point de vue pratique.....	49
6.	<i>Contribution personnelle</i>	51
7.	<i>Conclusion et perspectives.....</i>	52
8.	<i>Bibliographie.....</i>	54
9.	<i>Annexes</i>	59

Table des figures

Figure 1 : Morphologie de <i>Linum usitatissimum</i> L.. Source : (Müller, February-21-2022).	4
Figure 2 : Cycle du lin oléagineux d'hiver. Source: (Berard et al., 2020).....	5
Figure 3 : Risques liés aux altises et aux thrips. Source : (Berard et al., 2020).	7
Figure 4 : L'itinéraire technique du lin oléagineux d'hiver en image. Source : (Berard et al., 2020).....	8
Figure 5 : Production mondiale de graines de lin oléagineux (ha) de 2010 à 2020. Données provenant de (FAO, February-21-2022).	8
Figure 6 : Principales régions de production de lin oléagineux en France. Source : (Terres Univia, February-21-2022).	9
Figure 7 : Aperçu de l'emplacement des essais et caractérisation de la nature du sol. Source : (SPW, March-15-2022; "Google Maps," March-15-2022).....	12
Figure 8 : Vue aérienne du plan expérimental global.....	14
Figure 9 : Illustration du résultat obtenu après traitement par l'application Canopeo. Source personnelle et application Canopeo.	17
Figure 10 : Méthode de mesure de la densité du lin oléagineux en sortie d'hiver. Source personnelle.....	17
Figure 11 : Méthode de mesure de la hauteur des plantes. Source personnelle.	17
Figure 12 : Symptôme de <i>Kabatiella lini</i> (craquelures à la base de la tige). Source personnelle.....	17
Figure 13 : Agents ou causes des symptômes foliaires observés. Sources personnelles.	18
Figure 14 : <i>Botrytis cinerea</i> . Source personnelle.	18
Figure 15 : Insectes ravageurs observés. Source personnelle.	18
Figure 16 : Bourdon. Source personnelle.	19
Figure 17 : Évolution des stades BBCH en fonction de la somme de degrés-jours (en base 3°C).	23
Figure 18 : Zoom sur le graphique de l'évolution des stades BBCH au moment de la floraison en fonction de la somme de degrés-jours (en base 3°C).....	24
Figure 19 : Boxplot de la couverture du sol (%) de chaque variété.	26
Figure 20 : Photographies de la couverture du sol de GOH22 et d'Orival. Sources personnelles.	27
Figure 21 : Boxplot de la densité (plantes/m ²) pour chaque variété.....	28
Figure 22 : Boxplot du nombre de capsules par plante pour chaque variété.	28
Figure 23 : Boxplot du rendement à 9% d'humidité (t/ha) pour chacune des variétés.....	29
Figure 24 : Boxplot du rendement d'Angora à 9% d'humidité (t/ha) pour chaque année de présence dans les essais (2020, 2021, 2022).	30
Figure 25 : Boxplot du rendement à 9% d'humidité (t/ha) de chaque variété pour chaque année de présence dans les essais.	31
Figure 26 : Matrice de corrélation entre variables numériques.....	32
Figure 27 : Matrice de corrélation entre les variables explicatives et les dimensions de l'ACP.	34
Figure 28 : Boxplot du rendement (t/ha) à 9% d'humidité de chaque modalité de fertilisation pour la récolte de 2022.....	39
Figure 29 : Rendement à 9% d'humidité (t/ha) pour chaque modalité prenant en compte les récoltes de 2021 et 2022.....	41
Figure 30 : Rendement à 9% d'humidité (t/ha) pour les récoltes de 2021 et 2022.....	41
Figure 31 : Graphique de la courbe critique de dilution de l'azote et des valeurs de l'ensemble des prélèvements à chaque stade de prélèvement.	42
Figure 32 : Graphique de la courbe critique de dilution de l'azote et de la valeur moyenne par modalité pour chacun des stades de prélèvement.	43
Figure 33 : Boxplot de l'efficacité des différentes modalités de désherbage en semaine +8.	45
Figure 34 : Photos du développement des gailllets gratterons au 1er juin 2022. Sources personnelles.	46
Figure 35 : Boxplot de l'efficacité de chaque modalité de désherbage contre le gailllet gratteron en semaine +8.	47
Figure 36 : Boxplot de la spécificité de chaque modalité de désherbage en semaine +8.	48
Figure 37 : Boxplot de la couverture du sol (%) de chaque modalité de désherbage.	49
Figure 38 : Réalisation de cotation en champ. Source personnelle.....	51
Figure 39 : Moisson des essais. Source personnelle.	51

Table des tableaux

Tableau 1 : Classification de <i>Linum usitatissimum</i> . Source : (VASCAN, February-21-2022).....	2
Tableau 2 : Production belge de lin oléagineux (ha). Données provenant de (STATBEL, February-21-2022).	9
Tableau 3 : Composition de la graine de lin oléagineux d'hiver. Données provenant de (Weill et al., 2010; Labalette et al., 2011; Luginbühl et al., 2015; Morin, 2015; Savoie et al., 2015; Kaur et al., 2018; Evon et al., 2019; Sharma et al., 2019; Terres Univia, February-21-2022).....	10
Tableau 4 : Avantages de la culture de lin oléagineux d'hiver.....	11
Tableau 5 : Résultats de l'analyse de sol. Données provenant du CPAR à La Hulpe.	12
Tableau 6 : Normales climatiques annuelles d'Uccle. Source : (IRM, July-29-2022).	13
Tableau 7 : Conditions météorologiques de l'expérimentation. Source : CRA-w. Localisation : Station météorologique d'Ernage-Gembloux.	13
Tableau 8 : Informations détaillées sur les variétés. Source : (Terres Inovia, April-5-2022).	14
Tableau 9 : Modalités de fertilisation et années de présence dans les essais.	15
Tableau 10 : Modalités de désherbage.....	15
Tableau 11 : Schéma global des opérations culturales pour les essais de 2021-2022.....	16
Tableau 12 : Dates des prélèvements de biomasse.....	19
Tableau 13 : Dates des relevés de la flore adventice et de la population de lin.	20
Tableau 14 : Récapitulatif des analyses de données.	21
Tableau 15 : Valeurs moyennes de la précocité à la floraison (degrés-jours) \pm std pour chacune des variétés et groupes résultants du complément d'analyse de l'ANOVA (Test Newman-Keuls).....	24
Tableau 16 : Stade BBCH moyen et déviation standard de chaque variété à la date du 6 juillet 2022.	25
Tableau 17 : Groupes du test Newman-Keuls pour les hauteurs à différentes dates.	25
Tableau 18 : Valeurs moyennes \pm std de la présence de symptômes foliaires, groupes du test Newman-Keuls. .	27
Tableau 19 : Précipitations (mm) durant les mois de mai, juin et juillet pour les années de récolte 2020, 2021 et 2022 et normales saisonnières.	30
Tableau 20 : Rendements moyens pour les essais français de Motard et al. (2020, 2021) et les essais belges de ce travail (t/ha) pour les récoltes de 2020 et 2021.	31
Tableau 21 : Qualité de représentation des variables explicatives en prenant en compte deux dimensions.	35
Tableau 22 : Moyenne des valeurs des différentes variables explicatives pour chacun des groupes.....	35
Tableau 23 : Biomasse sèche moyenne (t/ha) \pm std pour chacune des modalités et chacun des prélèvements. .	36
Tableau 24 : Groupes du test Newman-Keuls pour la teneur en azote de chaque modalité à chaque stade de prélèvement.....	37
Tableau 25 : Hauteur moyenne (cm) \pm std de chaque modalité aux stades "Début floraison", "Fin floraison", "Maturité".	38
Tableau 26 : Densité moyenne (plantes/m ²) et déviation standard de chaque modalité.....	38
Tableau 27 : Nombre de capsules moyen par plante et déviation standard par modalité.....	39
Tableau 28 : Flore adventice présente dans l'essai sur le désherbage. Sources : (CRAAQ, May-7-2022; INRAE, May-7-2022; Syngenta, May-7-2022).	44
Tableau 29 : Groupes du test Newman-Keuls de l'efficacité de chaque modalité de désherbage en semaine +2, +4, +6 et +8.....	44
Tableau 30 : Groupes du test Newman-Keuls de l'efficacité de chaque modalité de désherbage contre le gaillet en semaine +2, +4, +6 et +8.....	46
Tableau 31 : Groupes du test Newman-Keuls de la sélectivité de chaque modalité de désherbage en semaine +2, +4, +6 et +8.	48

Table des équations

Équation 1 : Somme des degrés-jours. Source : (Mekhlouf et al., 2006).	16
Équation 2 : Efficacité des méthodes de désherbage. Source : (Sicard et al., 2013).	20
Équation 3 : Sélectivité des méthodes de désherbage. Source : (Sicard et al., 2013).	21
Équation 4 : Courbe critique de référence de dilution de l'azote du lin oléagineux. Source : (Flénet et al., 2006).	22

Table des annexes

Annexe 1 : Échelle BBCH traduite de (Smith et al., 1998).	59
Annexe 2 : Dispositif expérimental de l'essai variétal.	60
Annexe 3 : Dispositif expérimental de l'essai fertilisation.	60
Annexe 4 : Dispositif expérimental de l'essai désherbage.	60
Annexe 5 : Tableau des opérations culturales détaillées pour chaque facteur étudié.	61
Annexe 6 : Boxplots des hauteurs (cm) de chaque variété aux différentes dates de prise de mesures.	62
Annexe 7 : Tableau récapitulatif des rendements variétaux moyens à 9% d'humidité (t/ha) \pm std de 2020 à 2022.	63
Annexe 8 : Graphe des variables explicatives par rapport aux dimensions 1 et 2 de l'ACP.	64
Annexe 9 : Dendrogramme scindant les individus par groupe.	64
Annexe 10 : Graphique des individus repris par groupe selon les deux premières dimensions de l'ACP.	64
Annexe 11 : Graphique de l'évolution de la biomasse sèche moyenne (t/ha) pour chaque modalité de fertilisation en fonction du stade de prélèvement.	64
Annexe 12 : Boxplots des teneurs en azote (%) des prélèvements aux trois stades avec des différences significatives entre modalités.	65
Annexe 13 : Tableau récapitulatif des rendements moyens (t/ha) à 9% d'humidité \pm std pour chaque modalité de fertilisation de 2021 et 2022.	66
Annexe 14 : Boxplots de l'efficacité des méthodes de désherbage sur l'ensemble des adventices.	66
Annexe 15 : Boxplots de l'efficacité des méthodes de désherbage sur les gaillets gratterons.	67
Annexe 16 : Boxplots de la sélectivité des méthodes de désherbage.	68
Annexe 17 : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes des variables évaluées pour chaque variété.	69

1. Introduction

Le lin oléagineux (*Linum usitatissimum* L.) est cultivé depuis le début de l'agriculture (Worku et al., 2015). Sa production mondiale s'élevait à plus de 3 790 000 ha en 2020 (FAO, February-21-2022). Les surfaces cultivées en Belgique varient entre 60 et 120 ha par an avec un rendement moyen de 2 à 2,5 t/ha pour le lin oléagineux d'hiver (Berard et al., 2020; STATBEL, February-21-2022).

Le lin oléagineux est cultivé pour les caractéristiques de sa graine et plus particulièrement de son huile. Celle-ci possède une haute teneur en oméga 3. Elle est utilisée en industrie, en pharmacopée, en alimentation humaine et animale,... (Conforti et al., 2009; Weill et al., 2010; Labalette et al., 2011; Morin, 2015; Zuk et al., 2015; Kaur et al., 2018; Evon et al., 2019; Sharma et al., 2019; Tremblin et al., 2021).

En France, la culture a repris grâce au développement du label « Bleu Blanc Cœur ». Ce label vise à augmenter la teneur en oméga 3 des produits animaux en intégrant du lin oléagineux dans la ration des animaux (Charrier et al., 2013; Labalette et al., 2013; Carof et al., 2015; Mourot et al., 2015).

Des initiatives similaires ont vu le jour en Belgique notamment au sein de la coopérative « En direct de mon élevage » mais aussi chez le vendeur d'aliments Dumoulin avec la gamme de produit Euroclim. Malheureusement, le succès n'a pas été équivalent au succès français (Damsin, 2022; Henri, May-4-2022).

Ce manque d'attrait des agriculteurs provient en partie du manque de références techniques sur la culture mais également des difficultés liées au désherbage, au manque de produits phytosanitaires agréés,... (Labalette et al., 2011, 2013; Meynard et al., 2013; Andruszczak et al., 2016).

Cependant, de rares études ont déjà été réalisées en Suisse (Luginbühl et al., 2015; Herzog et al., 2017), en Grèce (Dordas, 2012), en Pologne (Andruszczak et al., 2016),... mais également en dehors de l'Europe comme en Nouvelle-Zélande, au Canada ou en Inde (Dastgheib, 2003, 2006; Pageau et al., 2006; Nagar et al., 2020). Ces études portent en partie sur la comparaison de différentes variétés de lin oléagineux, sur la fertilisation azotée et sur les méthodes de désherbage.

Les articles comparant les différentes variétés ne traitent pas des variétés françaises actuelles qui sont utilisées en Belgique. Néanmoins, il est possible de comparer les résultats obtenus dans cet essai avec les fiches variétales produites par Terres Inovia.

La majorité des articles traitant de la fertilisation conseillent une fertilisation aux alentours de 80 kgN/ha. Cependant, les réponses aux différentes fertilisations sont assez variables en fonction des études et des conditions climatiques (Lafond, 1993; Ryser et al., 2001; Flénet et al., 2006; Pageau et al., 2006; Herzog et al., 2017).

Concernant les études sur le désherbage en culture de lin oléagineux, les herbicides utilisés par exemple en Inde ne sont pas similaires à ceux utilisés dans cette étude (Nagar et al., 2020). Néanmoins, il est démontré dans plusieurs articles que le désherbage chimique est la méthode la plus efficace et la plus utilisée en culture de lin oléagineux (Dastgheib, 2003, 2006; Carof et al., 2015; Nagar et al., 2020).

La présente étude va se pencher sur l'ensemble de ces facteurs (variété, fertilisation azotée et désherbage) et les comparer avec ceux obtenus dans d'autres pays.

Ces comparaisons ont pour hypothèse :

- Qu'il existe au moins une variété adaptée à la Belgique.
- Qu'une fertilisation de 80 kgN/kg est suffisante.
- Que les systèmes de désherbage pratiqués en France sont transposables en Belgique.

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

2.1. *Linum usitatissimum*

2.1.1. Ses origines

Le lin est une des plus anciennes plantes cultivées par l'homme (Casa et al., 1999). Elle était utilisée à la fois pour ses graines et pour ses fibres (Worku et al., 2015; Kaur et al., 2018). C'est de là que provient son nom latin « *Linum usitatissimum* » signifiant « lin de tous les usages ». Le lin serait utilisé depuis plus de 30 000 ans et cultivé pour son huile depuis 8 000 ans soit depuis le début de l'agriculture (Weill et al., 2010; Worku et al., 2015).

La région d'origine du lin se situe de l'est de la Méditerranée à l'Inde (Weill et al., 2010). Il semble que sa domestication ait commencé au niveau de la région du « Croissant Fertile » en Asie occidentale (Patil et al., 2019). Le lin s'est ensuite peu à peu répandu dans le monde (Weill et al., 2010).

2.1.2. Sa classification

Linum usitatissimum L. (2n=30) est l'espèce de lin la plus cultivée (Bert, 2013; Patil et al., 2019; Tremblin et al., 2021). Comme mentionné dans le tableau ci-dessous, elle fait partie de la famille des Linacées et du genre *Linum* qui possède plus de 200 espèces (Bert, 2013; Kaur et al., 2018; Sharma et al., 2019).

Tableau 1 : Classification de *Linum usitatissimum*.

Source : (VASCAN, February-21-2022).

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</i> sect. <i>Linum</i>
Espèce	<i>Linum usitatissimum</i>

2.2. Le lin oléagineux

2.2.1. La sélection de *Linum usitatissimum* au lin oléagineux d'hiver

Actuellement, il existe deux types de lin, le lin oléagineux ou lin graine (angl. : linseed) et le lin fibre ou textile (angl. : flax) (Patil et al., 2019; Tremblin et al., 2021). La sélection de ces deux types de lin s'est mise en place lors du développement de leurs usages industriels. Soit, il y a 60 à 200 ans en fonction des sources. Le lin oléagineux est cultivé principalement pour son huile. Le lin fibre fournit des fibres textiles, issues de sa paille (Weill et al., 2010; Labalette et al., 2011; Tremblin et al., 2021).

En France, les premières variétés de lin oléagineux de printemps ont été obtenues grâce à la recherche publique menée par l'INRA². Par la suite, des variétés d'hiver ont été sélectionnées et créées à partir de la fin des années 1970 et plus intensément dans les années 1980-1990 (Smith et al., 1998; Weill et al., 2010). La première variété d'hiver inscrite au catalogue français en 1995 était nommée « Oliver » (Weill et al., 2010; Labalette et al., 2011). Ces variétés d'hiver sont relativement récentes et peu d'études ont été réalisées sur le sujet (Labalette et al., 2013).

La sélection de variétés d'hiver a été possible grâce à l'utilisation de matériel génétique provenant de Bulgarie, Turquie, Yougoslavie et Hongrie croisés par la suite avec d'autres lignées. Ces croisements ont permis, en plus d'augmenter la résistance au froid, d'augmenter la taille des graines et d'améliorer la résistance à la verse. De plus, les variétés d'hiver sont intéressantes car elles sont moins exposées aux stress hydriques imposés à la culture durant la floraison et la phase de remplissage du grain (Smith et al., 1998; Labalette et al., 2011; Luginbühl et al., 2015).

Les critères de résistance à l'hiver utilisés en sélection peuvent être de nature morphologique ou physiologique.

Au niveau morphologique, la sélection peut limiter le refroidissement rapide de la plante en favorisant un port étalé, proche du sol durant l'hiver. Cela permet de bénéficier de l'effet de tampon thermique du sol. Il est également possible de limiter son élongation durant l'hiver. Lorsque les conditions redeviennent favorables, la plante pourra reprendre sa croissance, se redresser et compenser les pertes dues au froid en produisant de nouvelles ramifications (Menoux, 1986).

Au niveau physiologique, la résistance au froid peut se traduire par la sélection d'une faible teneur en eau dans les tissus, une capacité de la plante à empêcher la formation de cristaux de glace intracellulaire ou encore en ralentissant sa croissance. La plante peut également contrôler la perméabilité de ces cellules à l'eau et aux solutés (Menoux, 1986).

Malheureusement, aujourd'hui, le lin oléagineux ne bénéficie que d'une faible activité de sélection par rapport aux grandes cultures. Cela est dû au fait qu'il s'agisse d'une culture minoritaire en France mais aussi en Europe (Labalette et al., 2013).

Les critères actuels de sélection de cette culture sont les suivants : la précocité, le rendement, la teneur en acides gras linoléique, la lutte contre la verse et la résistance aux maladies. Il serait également intéressant de tenir compte de la teneur en huile (Labalette et al., 2013).

Plus récemment, une sélection a été réalisée au Canada pour rendre l'huile issue des graines de lin moins sensible à l'oxydation. Le type « Linola » également appelé « Solin » a été créé. Ce lin oléagineux, à graine jaune, possède une teneur plus faible en oméga 3 par rapport au type « Omega ». L'huile en résultant est également plus stable à haute température (Kole, 2007; Conforti et al., 2009; Kaur et al., 2018).

² INRA : Institut national de la recherche agronomique

2.2.2. Caractérisation

2.2.2.1. Morphologique

Le lin est une plante herbacée annuelle (Conforti et al., 2009; Karimmojeni et al., 2013; Tremblin et al., 2021).

La hauteur du lin oléagineux varie de 45 à 80 cm tandis que celle du lin fibre est comprise entre 50 et 120 cm (Heller et al., 2015; Tremblin et al., 2021). Le lin oléagineux se différencie aussi du lin fibre par son nombre de ramifications plus important, son système racinaire plus développé et sa tige plus épaisse (Heller et al., 2015). Les fibres contenues dans les tiges représentent 38 à 40% de la masse sèche de celle-ci. La longueur de ces fibres varie entre 5,1 et 5,3 cm après réhumidification et extraction (Evon et al., 2019).

Le lin possède des feuilles qui sont, la plupart du temps, trinervées, sessiles, simples et lancéolées. Elles sont disposées de manières alternes (Tremblin et al., 2021).

Ses fleurs sont solitaires et composées de cinq pétales libres mais également cinq sépales, cinq étamines et un ovaire (Bert, 2013; Tremblin et al., 2021). Elles sont majoritairement de couleur bleue mais peuvent être blanches ou même roses (Conforti et al., 2009; Bert, 2013; Worku et al., 2015; Tremblin et al., 2021).

Suite à la fécondation des fleurs, le fruit, appelé capsule, se forme. Cette capsule possède cinq loges séparées par de fausses cloisons. Deux graines se trouvent généralement au sein de chaque loge (Tremblin et al., 2021).

Les graines du lin oléagineux mesurent 3 à 5 mm. Elles sont de forme ovale et pointue à l'une de leurs extrémités. En dessous de leur cuticule épaisse se retrouvent des couches de pigments et de mucilage. Ces différentes couches rendent la graine lisse et brillante en surface (Kole, 2007; Weill et al., 2010; Labalette et al., 2013; Tremblin et al., 2021). Finalement, sous ces différentes couches se retrouvent les cotylédons riches en huile entourant l'embryon (Weill et al., 2010). Les graines sont majoritairement de couleur brune mais parfois jaune en fonction des variétés (Weill et al., 2010; Patial et al., 2019; Tremblin et al., 2021).

Finalement, concernant le système racinaire du lin oléagineux, la racine principale peut atteindre 1 mètre de profondeur et 30 cm pour les racines secondaires (Kole, 2007).



Figure 1 : Morphologie de *Linum usitatissimum* L..

Source : (Müller, February-21-2022).

2.2.2.2. Phénologique

Les étapes clé du développement du lin oléagineux d'hiver sont reprises au sein d'une échelle décimale basée sur le principe de l'échelle BBCH³. L'échelle détaillée des stades se retrouve en annexe 1 (Smith et al., 1998).

Le cycle du lin oléagineux d'hiver se déroule comme illustré ci-dessous.

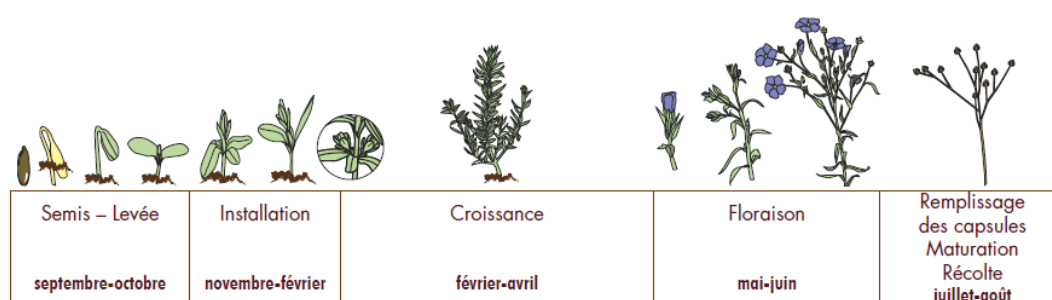


Figure 2 : Cycle du lin oléagineux d'hiver. Source: (Berard et al., 2020).

A. Semis-levée

Les variétés de lin oléagineux d'hiver sont semées, en Europe, à l'automne, aux environs du mois de septembre-octobre (Smith et al., 1998). La température de base nécessaire pour la croissance du lin oléagineux varie en fonction des sources de la littérature et du type de lin oléagineux. La température de base pour le lin oléagineux de printemps est d'environ 5°C (Casa et al., 1999; Savoie et al., 2015) alors que celle du lin oléagineux d'hiver est située entre 2 et 3°C (D'Antuono et al., 1995).

B. Installation

Avant l'hiver, la plante doit avoir atteint 5 cm et ne pas dépasser 10 cm pour résister au froid (Berard et al., 2020).

C. Croissance

La plante se ramifie davantage augmentant le nombre de branches fertiles qui produiront des capsules (Smith et al., 1998; Casa et al., 1999). Le développement des ramifications se produit durant la phase d'endurcissement et de reprise de végétation (Menoux, 1986). Les variétés d'hiver couvrent ainsi le sol avant de se redresser (Luginbühl et al., 2015).

La croissance suit son cours et les bourgeons floraux se développent.

D. Floraison

Le lin fleurit durant environ deux semaines et la fécondation se produit. Les fleurs ont une durée de vie d'une seule journée voire de quelques heures (Kole, 2007; Tremblin et al., 2021).

La fécondation est majoritairement autogame (Kole, 2007; Labalette et al., 2011, 2013). La fécondation croisée ne représente que deux pourcents (Kole, 2007).

E. Remplissage et maturation des capsules

La maturation commence 20 à 25 jours après la floraison (Kole, 2007).

F. Récolte

La maturation est suivie de la récolte au mois de juillet-août (Smith et al., 1998).

³ Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt and Chemical industry (Heller et al., 2015)

2.2.2.3. Agronomique

Certains facteurs influencent le rendement et le développement de la culture. Il est important de les prendre en considération.

A. Besoins de la culture

La fertilisation

Le lin oléagineux nécessite peu d'apport en azote (Pageau et al., 2006). L'azote reste toutefois un facteur limitant du rendement (Herzog et al., 2017). L'apport conseillé en France est fonction de l'objectif de production. Les besoins du lin s'élèvent à 4,5 kg d'azote pour un quintal de graines produit (Berard et al., 2020).

Un élément particulièrement important est le zinc. Il peut ralentir voire stopper la croissance de la culture. Les besoins de la culture sont de 300 g/ha d'élément pur. Le lin oléagineux d'hiver est moins sensible aux carences que celui de printemps (Berard et al., 2020).

Les conditions pédoclimatiques

Pour ce qui est des conditions pédologiques, un sol bien drainé, à texture moyenne à lourde, de type limono-argileux, limono-sableux ou limoneux avec un pH situé entre 6,5 et 6,9 est favorable au développement de la culture (Casa et al., 1999; Heller et al., 2015). Le lin peut cependant se développer dans une large gamme de sol mais exprimera mieux son potentiel dans un sol riche (Labalette et al., 2011).

Cette culture est présente dans de nombreuses régions (tempérées, subtropicales, hauts plateaux tropicaux) et est assez adaptée aux différents climats. Cependant, elle peut souffrir des aléas climatiques (Worku et al., 2015; Tremblin et al., 2021).

Lors de la floraison, il est impératif d'éviter tout stress hydrique et thermique. (Luginbühl et al., 2015; Berard et al., 2020; Tremblin et al., 2021). Des températures trop importantes diminuent la durée de germination du pollen (Pageau et al., 2011). Le lin d'hiver permet, en partie, de limiter ce risque comme cité précédemment (Luginbühl et al., 2015; Tremblin et al., 2021).

Durant la phase de remplissage du grain, des conditions modérées à fraîches sont favorables. Finalement, lors de la maturation, des températures trop élevées peuvent affecter négativement le nombre de graines par capsule ainsi que le poids des graines, leur teneur en huile et leur qualité. C'est pour cela que les régions tempérées sont les plus propices à la culture (Casa et al., 1999).

B. Les bioagresseurs

Les adventices

La gestion des adventices est essentielle car cette culture est peu couvrante notamment de par sa faible surface foliaire et son développement relativement lent en début de saison. De plus, elle possède un système racinaire peu développé. Cette culture est donc peu compétitive face aux adventices (Karimmojeni et al., 2013; Andruszczak et al., 2016; Berard et al., 2020).

Les maladies

Les principales maladies rencontrées en lin oléagineux sont d'origine cryptogamiques et sont les suivantes : (Berard et al., 2020)

- La septoriose : *Septoria linicola*
- L'oïdium : *Oïdium lini*
- La fusariose : *Fusarium oxysporum f.sp. lini*
- La kabatiellose : *Kabatiella lini*

Les ravageurs

Les deux principaux ravageurs en lin oléagineux sont les altises et les thrips. À la figure 3, sont reprises les périodes d'expositions les plus critiques de ces insectes pour la culture.

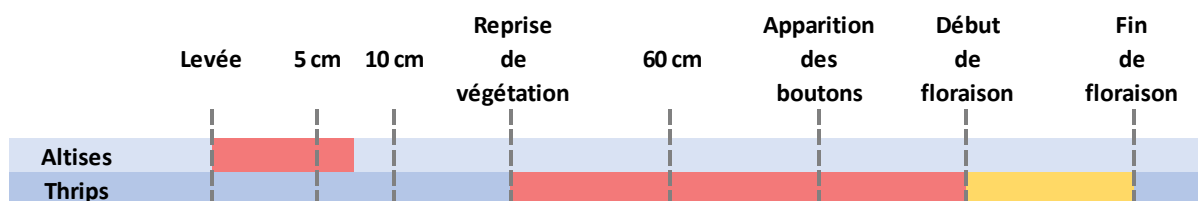


Figure 3 : Risques liés aux altises et aux thrips. Source : (Berard et al., 2020).

Légende : Rouge = Risque principal, Orange = Vigilance.

C. Les composantes du rendement

Les composantes du rendement sont : (Hocking et al., 1991; Andruszczak et al., 2016)

- Le nombre de branches fertiles par plante
- Le nombre de capsules par plante
- Le nombre de graines par capsule
- Le poids des graines
- La concentration en huile des graines

Ce rendement variera en fonction de la variété, des conditions climatiques et de la localisation de la culture (Casa et al., 1999). Le lin oléagineux d'hiver est plus productif que celui de printemps (Menoux, 1986). Le poids de mille grains du lin oléagineux d'hiver se situe entre 5,4 et 14 grammes (Labalette et al., 2011; Heller et al., 2015). Le rendement d'un lin d'hiver s'élève généralement aux alentours de 25 q/ha par rapport à 23 q/ha pour celui de printemps. La paille représente un rendement de deux tonnes récoltables par hectare (Labalette et al., 2011).

D. Itinéraire technique théorique

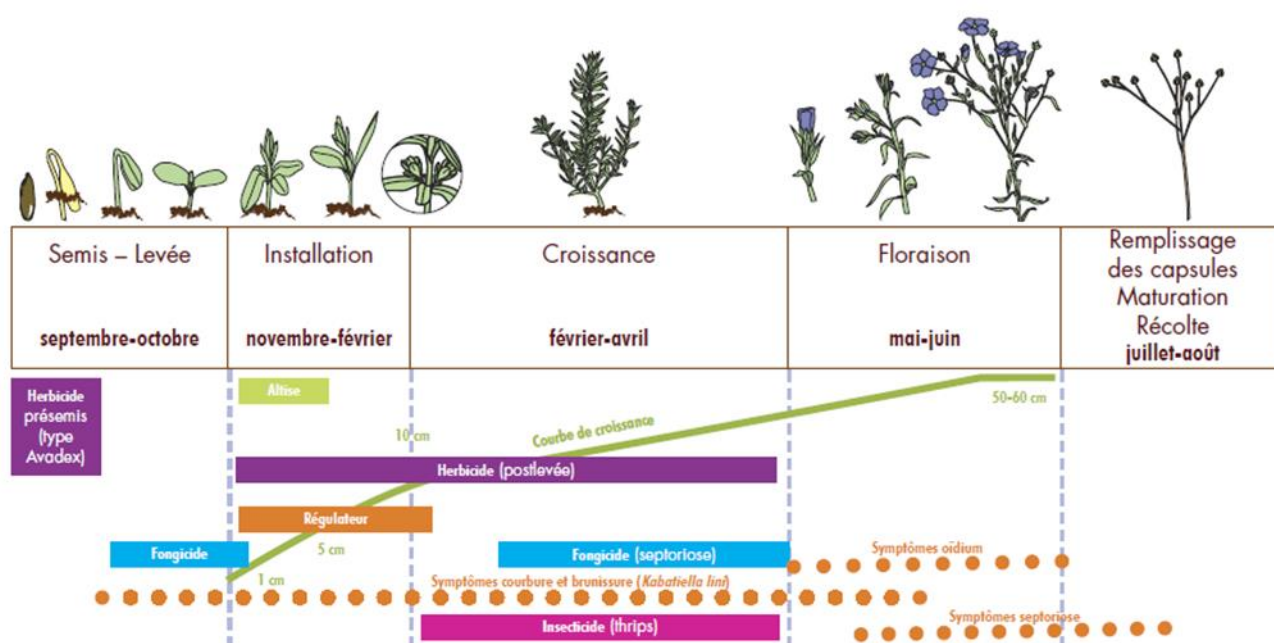


Figure 4 : L'itinéraire technique du lin oléagineux d'hiver en image. Source : (Berard et al., 2020).

2.2.3. Production

2.2.3.1. Mondiale

La production mondiale de lin oléagineux s'élevait en 2020 à plus de 3 790 000 ha selon la FAO (2022). La superficie accordée à cette culture a augmenté de plus 1 400 000 ha entre 2010 et 2020. Les trois principaux pays producteurs en 2020, que ce soit en termes de superficie ou de tonnage, sont : le Kazakhstan, la Fédération de Russie et le Canada.

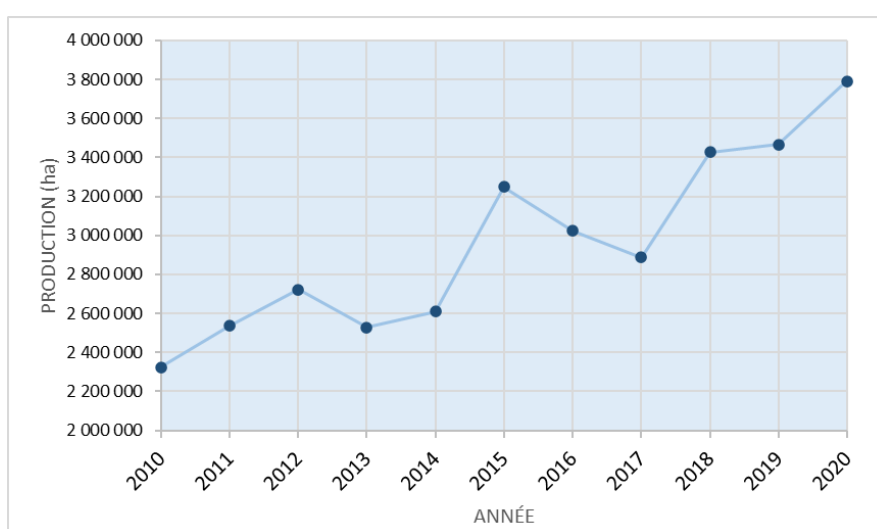


Figure 5 : Production mondiale de graines de lin oléagineux (ha) de 2010 à 2020.

Données provenant de (FAO, February-21-2022).

2.2.3.2. Européenne

Un peu plus de 115 000 ha sont cultivés sur le continent européen, soit seulement 3% de la surface totale cultivée. L'Europe est fortement dépendante des importations. Elle importe principalement ses graines de lin du Canada et des Etats-Unis mais depuis peu, elle est fournie en grande partie par la Russie et l'Ukraine (Labalette et al., 2011).

2.2.3.3. Belge

En 2020, la Belgique est le 16^{ème} producteur en termes de superficie en Europe. Sa production a largement chuté depuis 2017. La surface renseignée par la FAO de 2010 à 2017 prend en compte la culture de lin fibre. STATBEL (2022) considère uniquement la production de lin oléagineux et met en évidence l'importance de la production wallonne en Belgique.

Tableau 2 : Production belge de lin oléagineux (ha).
Données provenant de (STATBEL, February-21-2022).

	Lin oléagineux					
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Région Flamande	1	3,93	2,56	4,81	4,73	0,57
Région Wallonne	83,21	115,98	76,45	84,51	54,92	104,28
Belgique	84,21	119,91	79,01	89,32	59,65	104,85

2.2.3.4. Française

La France, pays voisin de la Belgique, a cultivé plus de 32 000 ha en 2020 (FAO, February-21-2022). Ce pays est le deuxième producteur de lin oléagineux en Europe après le Royaume-Uni accompagné de l'Irlande du Nord (Labalette et al., 2013; FAO, February-21-2022). Les principales régions productrices de lin oléagineux sont reprises dans la figure 6.

Contrairement aux grandes cultures, le lin est encore une culture minoritaire et ce pour plusieurs raisons. À l'échelle européenne, les changements dans les régimes d'aides de la PAC⁴ n'ont pas aidé au développement des surfaces cultivées. À l'international, les fluctuations des prix sur les marchés couplés à la concurrence des grandes cultures n'ont pas incités les producteurs européens à cultiver du lin oléagineux (Labalette et al., 2011, 2013; Charrier et al., 2013; Meynard et al., 2013; Carof et al., 2015). Par conséquent, les efforts en amélioration génétique et en homologation de produits phytosanitaires sont peu nombreux. De plus, les connaissances liées à cette culture restent limités (Labalette et al., 2011, 2013; Meynard et al., 2013; Andruszczak et al., 2016).

Principales régions de production de lin oléagineux en France

(Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Centre-Val de Loire, Pays de la Loire, Bourgogne-Franche-Comté)

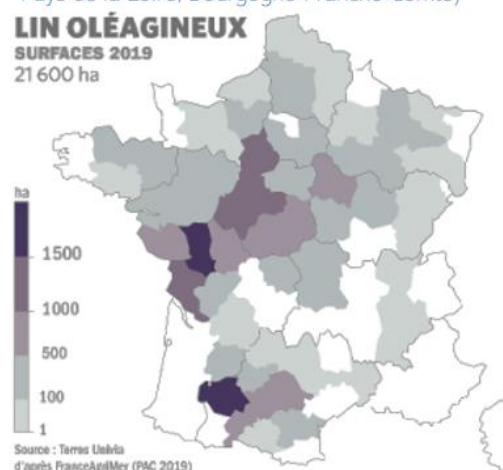


Figure 6 : Principales régions de production de lin oléagineux en France. Source : (Terres Univia, February-21-2022).

⁴Politique Agricole Commune

Valorex⁵ a développé dans les années 2000 un marché de produits animaux sous le label « Bleu Blanc Cœur ». Il est basé sur l'utilisation de graines de lin dans le régime des animaux afin d'augmenter la teneur de leurs produits en oméga 3. Celui-ci a permis de relancer la culture en France (Charrier et al., 2013; Labalette et al., 2013; Carof et al., 2015; Mourot et al., 2015).

2.2.4. Utilisation

Le lin oléagineux est utilisé pour les caractéristiques de son huile (propriétés siccatives, durcissantes, d'imperméabilisation, ...), pour sa composition (Tableau 3) et plus particulièrement pour sa teneur élevée en oméga 3. Cette teneur en oméga 3 peut notamment prévenir de certaines maladies (cardiaques, digestives, ...) (Conforti et al., 2009; Weill et al., 2010; Kaur et al., 2018; Sharma et al., 2019; Tremblin et al., 2021). Elle permet également d'améliorer la santé animale et de réduire la quantité de méthane émise par les bovins qui en consomment (Weill et al., 2010; Charrier et al., 2013).

Tableau 3 : Composition de la graine de lin oléagineux d'hiver. Données provenant de (Weill et al., 2010; Labalette et al., 2011; Luginbühl et al., 2015; Morin, 2015; Savoie et al., 2015; Kaur et al., 2018; Evon et al., 2019; Sharma et al., 2019; Terres Univia, February-21-2022).

Graine de lin						
Huile				Protéine		Fibre
34 à 49%				20-25%		20-25%
C18:3	C18:2 n-6	C18:1 n-9	Autres	Globuline	Glutéline	Amidon
Acide alpha-linolénique (Omega 3)	Acide linoléique	Acide oléique				Eau
54-56%	16%	18%	10-12%	80%	20%	Minéraux
						4%

La composition et la qualité des graines varient en fonction de différents facteurs tels que : les précipitations, les températures, la lumière, l'exposition à l'ozone, la faim d'azote, la fertilisation, ... Il est à noter que les lins oléagineux d'hiver possèdent une teneur en huile et en oméga 3 plus importante que ceux de printemps (Savoie et al., 2015).

Les graines de lin oléagineux sont utilisées en pharmacopée, en alimentation humaine et animale. Elles peuvent être traitées thermiquement, mécaniquement ou rester entières (ex : boulangerie) (Weill et al., 2010; Labalette et al., 2011; Zuk et al., 2015; Kaur et al., 2018).

L'huile est peu utilisée en alimentation humaine car elle est très sensible à l'oxydation à cause de sa haute teneur en acides gras polyinsaturés (Conforti et al., 2009; Weill et al., 2010; Morin, 2015; Evon et al., 2019). Il est donc difficile de la conserver (Labalette et al., 2011).

Elle est majoritairement utilisée en industrie pour produire des cosmétiques, des encres végétales, de la peinture à l'huile, des nettoyeurs pour sols ou des traitements pour le bois. C'est également un élément essentiel dans la production de linoléum (Weill et al., 2010; Labalette et al., 2011; Morin, 2015; Evon et al., 2019; Sharma et al., 2019; Tremblin et al., 2021).

Finalement plusieurs parties de la paille peuvent être valorisées à savoir la fibre, les anas et les poussières. Les anas⁶ et poussières sont obtenus suite à l'extraction des fibres aux propriétés mécaniques intéressantes. Les anas, riches en lignine, sont majoritairement utilisés en litière mais peuvent également être utilisés pour la fabrication d'isolants, de biomatériaux ou comme liant naturel. Les poussières peuvent être intégrées dans la composition de thermoplastiques (Evon et al., 2019; Grégoire et al., 2019).

⁵ Entreprise française de nutrition animale

⁶ Fragments de paille

3. Objectifs de ce travail

Les avantages de la culture de lin oléagineux d'hiver sont nombreux. Une partie de ceux-ci sont repris dans le tableau 4.

Tableau 4 : Avantages de la culture de lin oléagineux d'hiver.

Avantages	Articles
Elle peut être cultivée dans des environnements moins favorables comme des sols superficiels ou lors d'étés plus échaudants. Cependant, elle n'y exprimera pas au mieux son potentiel.	(Labalette et al., 2011)
Le lin oléagineux d'hiver permet de couvrir le sol en hiver.	(Pellet et al., 2004; Luginbühl et al., 2015)
Cette culture permet de diversifier les rotations et nécessite d'allonger celles-ci à 6 ans ou plus.	(Labalette et al., 2011, 2013; Carof et al., 2015; Worku et al., 2015)
Elle s'insère facilement dans le calendrier cultural.	(Carof et al., 2015)
Elle ne demande pas d'investissement supplémentaire concernant le matériel de semis, de fertilisation, de désherbage, ... par rapport aux céréales d'hiver.	(Casa et al., 1999)
Elle demande peu d'intrants notamment en engrais azotés. Ses impacts sur l'environnement sont donc réduits.	(Casa et al., 1999; Weill et al., 2010; Meynard et al., 2013; Herzog et al., 2017)
Le lin permet également de diminuer la quantité d'intrants nécessaire pour une culture de froment suivant celle-ci mais également d'autres cultures.	(Labalette et al., 2011; Carof et al., 2015)
Le lin oléagineux est un bon précédent pour le froment. Il permet d'augmenter le rendement de la culture de froment qui la suivra comme cité dans de nombreux articles par rapport à un précédent froment, orge ou colza.	(Labalette et al., 2011; Carof et al., 2015)

Seulement, comme énoncé précédemment, les connaissances techniques sur cette culture sont peu nombreuses et faiblement étudiées. Ce constat est relevé dans de récents articles (Flénet et al., 2004; Labalette et al., 2011, 2013; Meynard et al., 2013; Andruszczak et al., 2016). Davantage d'études devraient s'intéresser par exemple à l'effet de la densité de semis, à l'application de régulateur, à la fertilisation, ... Ce manque de connaissance freine considérablement son développement.

L'objectif de ce travail est d'initier l'étude de différents éléments de l'itinéraire technique de la culture de lin oléagineux d'hiver afin de mettre en lumière les choix les plus appropriés pour assurer une conduite culturale optimale en Belgique. Ces éléments sont l'étude du potentiel variétal, l'effet de différentes modalités de fertilisation ou encore de différentes méthodes de désherbage.

4. Matériel et méthodes

4.1. Site des essais

Les parcelles d'essais de la saison 2021-2022 se situaient à Lonzée (50°33'00.8"N, 4°44'32.0"E, Gembloux, Belgique) et ont été implantées par le CePiCOP. La région agricole est la région limoneuse de Hesbaye. Les terres sur lesquelles se trouvaient les essais sont de nature limoneuse à drainage naturel modéré ou imparfait et à drainage assez pauvre à très pauvre en fonction de l'endroit dans la parcelle (SPW, March-15-2022).

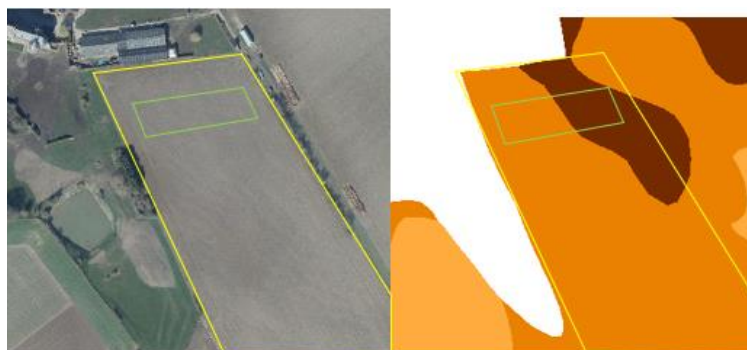


Figure 7 : Aperçu de l'emplacement des essais et caractérisation de la nature du sol. Source : (SPW, March-15-2022; "Google Maps," March-15-2022).

Légende : ■ = sols limoneux à drainage naturel favorable, ■ = sols limoneux à drainage modéré ou imparfait, ■ = sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre, □ = emplacement des essais.

4.2. Analyse de sol

Un prélèvement de sol a été réalisé le 21 février 2022 soit 134 jours après le semis de la culture. Cet échantillon a été analysé au CPAR⁷ à La Hulpe.

La texture du sol est bien du limon comme mentionné ci-avant. Différents éléments ont été analysés et sont repris dans le tableau 5 :

Tableau 5 : Résultats de l'analyse de sol. Données provenant du CPAR à La Hulpe.

	P (mg/100g)	K (mg/100g)	Mg (mg/100g)	Ca (mg/100g)	Zn (mg/kg)	Azote nitrique (kg N-NO3/ha)	pH KCl
Recommandation pour l'horizon n°1	4,6 - 7,5	14-21	7,0 - 10		8,5 - 13		6
Horizon n°1 : 0 - 30 cm	7,4	1	12	242	4,7	14	6,9
Horizon n°2 : 30 - 60 cm	4,4	16	11	191	3,6	23	6,6
Horizon n°3 : 60 - 90 cm	1,3	13	12	174	2	32	6,2

Dans le premier horizon, la teneur en carbone organique est de l'ordre de 11,2 g/kg, ce qui s'avère bon. La teneur en humus est de 2,2%. Le rapport carbone/azote est de 7 avec une teneur en azote total de 0,10%.

L'avis de fumure du laboratoire préconisait l'apport de 45 kgN/ha. Aucune analyse granulométrique n'a été réalisée. Cependant, cela pourrait influencer l'efficacité de la fumure.

⁷ Centre Provincial de L'Agriculture et de la Ruralité

4.3. Conditions climatiques

En Belgique, le climat est tempéré océanique (SPF, April-5-2022). Les normales climatiques annuelles calculées sur 30 ans pour la ville d'Uccle⁸ sont les suivantes (IRM, July-29-2022) :

Tableau 6 : Normales climatiques annuelles d'Uccle. Source : (IRM, July-29-2022).

Température moyenne	11°C
Température maximale moyenne	14,7°C
Température minimale moyenne	7,3°C
Total des précipitations	837,1 mm

En ce qui concerne les conditions météorologiques enregistrées durant l'expérimentation, les données utilisées proviennent de la station météorologique Agromet d'Ernage-Gembloux du CRA-w⁹. Celle-ci est située dans la commune de Gembloux tout comme le site d'essai. Pour la saison 2021-2022, les valeurs de température minimale, maximale, moyenne ainsi que les précipitations et la somme de degrés-jours en base 3°C sont reprises par mois dans le tableau 7.

Tableau 7 : Conditions météorologiques de l'expérimentation.

Source : CRA-w. Localisation : Station météorologique d'Ernage-Gembloux.

Légende : Pour les températures moyennes (excepté octobre) : **rouge** = valeur supérieure aux normales saisonnières d'Uccle, **bleu** = valeur inférieure aux normales saisonnières d'Uccle, blanc = valeur comprise dans les normales saisonnières. Pour les précipitations (excepté octobre) : **rouge** = valeur inférieure aux normales saisonnières d'Uccle, **bleu** = valeur supérieure aux normales saisonnières d'Uccle. (*) les données du mois d'octobre sont prises en compte à partir du jour de semis soit le 10 octobre 2021, (**) les données du mois de juillet n'ont pas été disponibles.

	T° min (°C)	T° max (°C)	T° moy (°C)	Précipitations (mm)	Somme de degrés-jours (>3°C) (°C)	
Octobre	1,9	18	10,5	38,1	165,2	*
Novembre	-1,9	12,2	5,4	33,5	77,1	
Décembre	-3,4	13,7	5	89,3	74,2	
Janvier	-2,3	13,5	3,6	62,9	37	
Février	-1,8	12,8	6	77,2	84,3	
Mars	-2,7	18,4	7,6	6	146	
Avril	-3	20,4	9,2	27,7	190,8	
Mai	2,2	27,2	14,5	33,4	357,3	
Juin	4,3	33,1	16,8	93,5	413,2	
Juillet						**
Total				461,6	1545,1	

De nombreux mois présentent des précipitations inférieures aux précipitations de références. Seuls les mois de décembre (+8,3mm), de février (+14,1mm) et de juin (+33,5mm) sont supérieurs à celles-ci.

⁸ Ville belge de référence

⁹ Centre wallon de Recherches Agronomiques

4.4. L'expérimentation

4.4.1. Dispositifs expérimentaux

Sur les parcelles d'essais, trois facteurs ont été étudiés séparément, à savoir, les variétés, la fertilisation et le désherbage.

Le plan expérimental est le suivant :

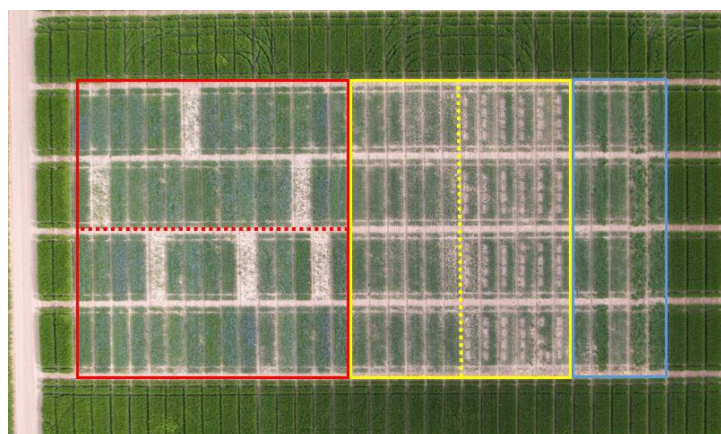


Figure 8 : Vue aérienne du plan expérimental global.

Légende : **rouge** = essai variété, **jaune** = essai fertilisation, **bleu** = essai désherbage. Crédits photo : Froylan Regout.

4.4.1.1. Facteur variété

Dix variétés ont été étudiées durant la saison 2021-2022. Quatre de celles-ci ont été implantées dans l'essai de l'année précédente et seul la variété Angora avait été testée en 2019-2020.

Tableau 8 : Informations détaillées sur les variétés. Source : (Terres Inovia, April-5-2022).

N°	Variété	Obtenteur	Représentant(s)	Année d'inscription	Couleur des graines	Année de présence dans les essais		
						2019 -2020	2020-2021	2021-2022
1	Angora	GIE Linéa Semences de lin	SCA LIN-2000 Semences de France	2013	Brune			
2	Attila	GIE Linéa Semences de lin	SCA LIN-2000 Semences de France	2020	Brune			
3	Merinos	GIE Linéa Semences de lin	Linéa SCA LIN-2000	2021	Brune			
4	Cledor	GIE Linéa Semences de lin	SCA LIN-2000 Semences de France	2017	Jaune			
5	Montdor	GIE Linéa Semences de lin	Linéa SCA LIN-2000	2022	Jaune			
6	GOH22	GIE Linéa Semences de lin			Brune			
7	LS Apalache		Laboulet Semences	2019	Brune			
8	Sideral		Laboulet Semences	2009	Brune			
9	LSL1133		Laboulet Semences		Brune			
10	Orival		Laboulet Semences	2017	Jaune			

Certaines lignées (n°6 et 9) ne sont pas encore inscrites au catalogue national et sont dès lors dénommées par des codes.

À l'automne 2021, les variétés ont été semées en trois répétitions non traitées (sans fongicide) et trois répétitions traitées (avec fongicide). Dans chaque répétition, les dix variétés ont été semées aléatoirement. Le dispositif est un ensemble de deux dispositifs en blocs aléatoires complets (Annexe 2).

4.4.1.2. Facteur fertilisation

En 2021-2022, six modalités de fumures ont été appliquées sur la variété Angora. Les trois modalités à 80 kgN/ha ont été fixées à partir des recommandations française et suisse (Herzog et al., 2017; Berard et al., 2020). Trois autres modalités complètent l'essai : un témoin, une fertilisation inférieure et une supérieure à 80 KgN/ha. L'engrais utilisé est un ammonitrate solide 27%. Cinq de ces six modalités ont été testées l'année précédente.

Tableau 9 : Modalités de fertilisation et années de présence dans les essais.

N°	1 ^{ère} fraction (Reprise de la végétation)	2 ^{ème} fraction (4-5 semaines plus tard)	Total de la fertilisation	Année de présence dans les essais	
				2020 - 2021	2021-2022
1 (Témoin)	0 kgN/ha	0 kgN/ha	0 kgN/ha		
2	50 kgN/ha	0 kgN/ha	50 kgN/ha		
3	80 kgN/ha	0 kgN/ha	80 kgN/ha		
4	30 kgN/ha	50 kgN/ha	80 kgN/ha		
5	50 kgN/ha	30 kgN/ha	80 kgN/ha		
6	80 kgN/ha	30 kgN/ha	110 kgN/ha		

Le dispositif expérimental de 2021-2022 est un ensemble de deux dispositifs en blocs aléatoires complets (Annexe 3). Un dispositif était composé de quatre répétitions dont les parcelles ont été utilisées pour des prélèvements. Les parcelles de l'autre dispositif sont restées intactes jusqu'à la récolte.

4.4.1.3. Facteur méthode de désherbage

Cinq modalités différentes de désherbage ont été testées sur la variété Angora.

Tableau 10 : Modalités de désherbage.

N°	Modalités
1	Témoin (aucun passage)
2	Un passage de houe rotative + un passage de herse
3	Deux passages de herse
4	Un passage de herse + deux désherbages chimiques
5	Deux désherbages chimiques

L'essai sur le désherbage ne respecte pas la forme d'un dispositif en blocs aléatoires complets étant donné la contrainte liée au matériel de désherbage (Annexe 4). Cependant, quatre répétitions par modalité sont présentes.

4.4.2. Les opérations culturales

Le schéma global des opérations culturales pour les essais de 2021-2022 était le suivant :

Tableau 11 : Schéma global des opérations culturales pour les essais de 2021-2022.

Date	Opérations culturales
10 octobre 2021	Semis à une densité de 350 grains/m ² en micro-parcelles
17 mars 2022	Fertilisation avec 80 kgN/ha
22/24 mars 2022	Désherbage chimique à l'aide de Gratil 40g/ha
28 mars 2022	Traitement fongicide avec du RIZA EC 1,25l/ha
13 avril 2022	Application du régulateur Caramba 0,5l/ha
19 avril 2022	Désherbage chimique à l'aide de Gratil 40g/ha
26 avril 2022	Application du régulateur Caramba 0,7l/ha
24 juillet 2022	Récolte

Les opérations culturales détaillées pour chaque facteur étudié sont reprises en annexe 5.

4.4.3. Observations et variables mesurées

4.4.3.1. Essai variété

A. Stade de la culture

Le stade de chaque parcelle des blocs non traités a été relevé le 8 mars, 28 mars, 15 avril, 28 avril, 3 mai, 4 mai, 5 mai, 9 mai, 10 mai, 12 mai, 17 mai, 23 mai, 1^{er} juillet et le 6 juillet 2022. Ces relevés ont été réalisés selon l'échelle BBCH du lin oléagineux d'hiver présente en annexe 1. Le stade a été donné à la parcelle après l'avoir parcourue entièrement.

Les relevés des stades ont été mis en relation avec la somme des degrés-jours selon la formule suivante :

Équation 1 : Somme des degrés-jours. Source : (Mekhlouf et al., 2006).

Légende : Tmax = température maximale de la journée, Tmin = température minimale de la journée, Tbase = température de base du lin oléagineux d'hiver (= 3°C (D'Antuono et al., 1995)).

$$DJ = \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) - T_{base}$$

À partir du relevé de stade, l'évaluation de la précocité à la floraison et à la maturité peut être déduite.

- La **précocité à la floraison** est le nombre de jour (ou degrés-jours) séparant la date du semis et l'apparition de la première fleur (Casa et al., 1999).
- La **précocité à maturité** représente le nombre de jours (ou degrés-jours) entre le semis et la maturité ou entre la floraison et la maturité (Worku et al., 2015). La maturité correspond au stade 89 de l'échelle BBCH.

B. Couverture du sol

Afin d'évaluer le degré de couverture du sol de chaque variété en sortie d'hiver, l'application smartphone « Canopeo » a été utilisée. Son fonctionnement est expliqué par Patrignani et al. (2015). La mesure a été réalisée le 4 mars 2022 sur l'ensemble des parcelles des blocs non traités. Le paramètre de correction a été réglé à 1,1. Un exemple est repris ci-dessous.

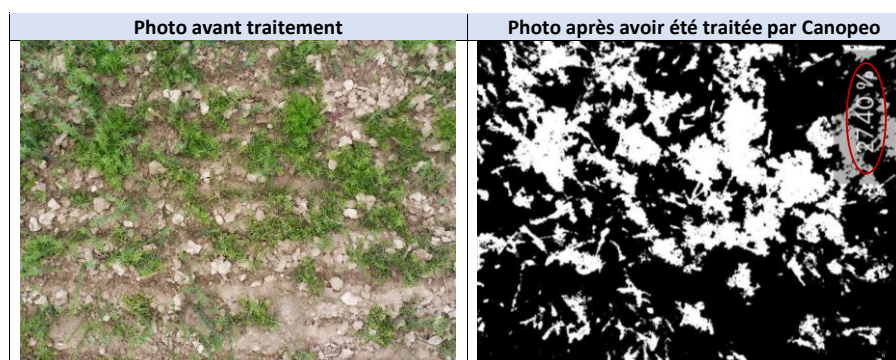


Figure 9 : Illustration du résultat obtenu après traitement par l'application Canopeo.

Source personnelle et application Canopeo.

Légende : entouré en rouge = pourcentage de couverture de la végétation.

C. Densité

La densité de plantes par mètre linéaire a été relevée au début de la reprise de la végétation à la date du 16 mars 2022. Le nombre de plantes rencontrées sur un mètre linéaire (deux répétitions par parcelle des blocs non traités) a été comptabilisé (Sankari, 2000; Pageau et al., 2006). La mesure est ensuite transformée en nombre de plantes/m².

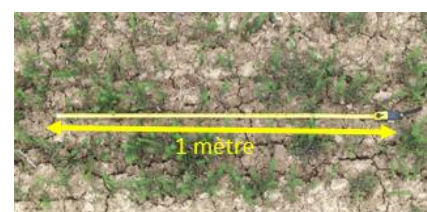


Figure 10 : Méthode de mesure de la densité du lin oléagineux en sortie d'hiver. Source personnelle.

D. Hauteur des plantes

L'évolution de la hauteur a été déterminée en mesurant cinq poignées de plantes, de la surface du sol au sommet des plantes tenues droites le long d'un mètre, dans chacune des parcelles des blocs non traités (Sankari, 2000; Dordas, 2010; Pageau et al., 2011; Luginbühl et al., 2015). Ce relevé a été réalisé toutes les deux semaines du 28 mars au 25 mai 2022 afin d'observer la dynamique de croissance des différentes variétés.

La mesure de la hauteur finale a été réalisée aux alentours de la maturité des capsules le 1^{er} juillet 2022.



Figure 11 : Méthode de mesure de la hauteur des plantes. Source personnelle.

E. Sensibilité aux maladies

Maladies de la base de la tige

Une pression élevée en *Kabatiella lini* a été observée mais n'a pas pu être cotée. L'existence de cette maladie est remise en question par les experts d'Arvalis.



Figure 12 : Symptôme de *Kabatiella lini* (craquelures à la base de la tige). Source personnelle.

Symptômes foliaires

Une cotation de 1 à 9 a été attribuée le 23 mai 2022 à chacune des parcelles des blocs non traités (Bodson et al., 2019). Cette cotation est fonction de la sévérité des symptômes foliaires sur les feuilles (pourcentage de surface de feuilles touchées) et du pourcentage de plantes touchées pour chaque parcelle. Plus la cotation est élevée, plus la parcelle présentait des symptômes foliaires.

Les agents ou causes pouvant provoquer des symptômes foliaires et qui ont été observés sont :

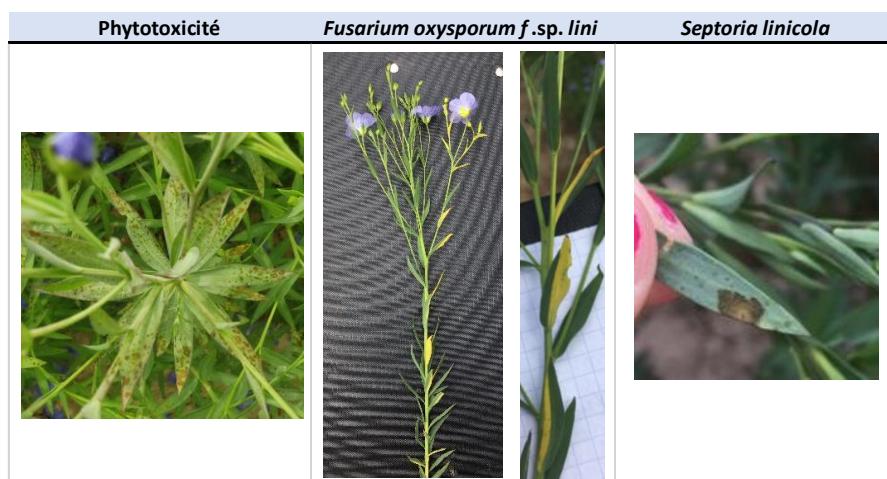


Figure 13 : Agents ou causes des symptômes foliaires observés. Sources personnelles.

Maladies des capsules

Le champignon, *Botrytis cinerea*, a pu être observé le 28 juin 2022. Étant peu présent, aucune cotation n'a pu être réalisée.

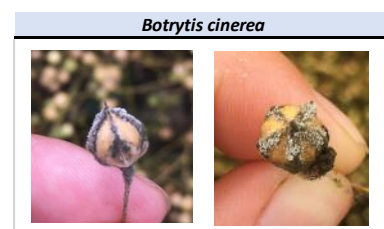


Figure 14 : *Botrytis cinerea*. Source personnelle.

F. Présence d'insectes

Un simple suivi visuel de la présence d'insectes ravageurs sur plante a été réalisé lors de chaque sortie de terrain.

Les insectes ravageurs observés sont les suivants :

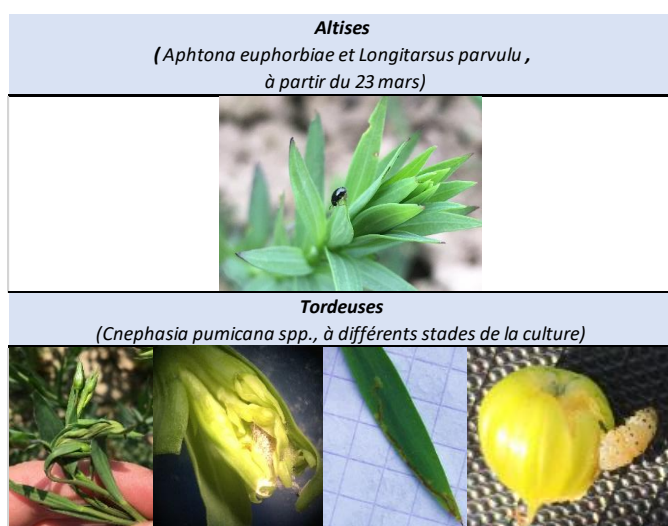


Figure 15 : Insectes ravageurs observés. Source personnelle.

Divers pollinisateurs ont également été observés tel que le bourdon.



Figure 16 : Bourdon. Source personnelle.

G. Composantes de rendement

Le nombre de capsules par plante

Le nombre de capsules par plante a été compté sur cinq plantes de chaque parcelle des blocs non traités le 28 juin 2022 afin d'estimer le nombre moyen de capsules par plante (Andruszczak et al., 2016; Patial et al., 2019).

Le rendement

Le rendement de chaque parcelle a été obtenu suite à la récolte de celles-ci, le 24 juillet 2022, à l'aide d'une moissonneuse batteuse d'expérimentation Wintersteiger® (Pageau et al., 2006, 2011; Herzog et al., 2017). Le 26 juillet 2022, la récolte a été pesée et le taux d'humidité des graines évalué à l'aide d'un analyseur de grains GAC® 2500-INTL. Le rendement a ensuite été recalculé à 9% d'humidité.

4.4.3.2. Essai fertilisation

A. Biomasse aérienne

Les prélèvements de biomasse aérienne ont été réalisés à différents stades de la culture : avant la fertilisation au stade 10 cm, au stade 30 cm, à l'apparition des bourgeons, au début de la floraison et à la fin de la floraison (Flénet et al., 2006).

Tableau 12 : Dates des prélèvements de biomasse.

Stade	Date	Jours après semis
Hauteur de 10 cm	18 mars 2022	159
Hauteur de 30 cm	18 avril 2022	190
Bourgeonnement	2 mai 2022	204
Début floraison	6 mai 2022	208
Fin floraison	7 juin 2022	240

Quatre lignes de semis sur un mètre de longueur ont été prélevées soit une surface de 0,5m². Chaque prélèvement a été placé dans un sachet microperforé et identifié.

L'ensemble des échantillons ont été mis à l'étuve à une température de 65°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La température de séchage est plus basse en comparaison aux références scientifiques (D'Antuono et al., 1995; Casa et al., 1999; Hassan et al., 1999; Dordas, 2010, 2012) mais correspond à la pratique courante dans les essais menés dans l'unité de phytotechnie tempérée.

Les prélèvements ont ensuite été pesés afin d'obtenir leur biomasse sèche. Ce résultat a été transformé en tonnes par hectare.

B. Teneur en azote

La détermination de la teneur en azote de chaque échantillon a été réalisée par le laboratoire CPAR de La Hulpe. Les échantillons ont subi un prétraitement consistant en un broyage à 1 mm par un broyeur à couteaux. Ensuite, la teneur en azote a été déterminée par combustion sèche selon la norme ISO 16634-1.

C. Hauteur des plantes

La hauteur des plantes des différentes modalités a été mesurée le 12 mai, le 28 mai et le 1^{er} juillet 2022 avec la même méthode que pour l'essai variétal.

D. Densité

Le protocole a été le même que celui de l'essai variétal. Le relevé a été effectué le 6 juillet 2022.

E. Composantes de rendement

Les protocoles sont identiques à l'essai variétal. Le relevé du nombre de capsules a été effectué le 6 juillet 2022. L'évaluation des rendements a été réalisé aux mêmes dates que l'essai variétal.

4.4.3.3. Essai désherbage

A. Flore adventice

Au sein de chaque parcelle, deux quadrats de 65 cm de côté ont été placés aléatoirement. Avant les différents désherbages, un relevé de la flore adventice a été réalisé au sein de ceux-ci en identifiant et en comptant les différentes espèces d'adventices. Ensuite, deux semaines après le premier désherbage, les relevés ont été renouvelés. Ceux-ci ont été réitérés toutes les deux semaines jusqu'à floraison de la culture (Bouhache et al., 2014).

Tableau 13 : Dates des relevés de la flore adventice et de la population de lin.

Date		Opération culturale	Relevé de données	Semaines après 1 ^{er} désherbage mécanique	Semaines après 1 ^{er} désherbage chimique
Octobre	10	Semis			
Mars	8		1er comptage (Semaine 0)	0	0
	10	Désherbage mécanique			
	22	Désherbage chimique			
	23		2ème comptage (Semaine +2)	2	0
Avril	6		3ème comptage (Semaine +4)	4	2
	15		Canopeo		
	19-20	Désherbage mécanique et chimique			
	21		4ème comptage (Semaine +6)	6	4
Mai	4		5ème comptage (Semaine +8)	8	6

Ces comptages ont permis de calculer l'efficacité du désherbage qui représente le pourcentage d'adventices détruites. Elle peut être calculée pour l'ensemble de la population adventice ou par espèce (Sicard et al., 2013).

Équation 2 : Efficacité des méthodes de désherbage. Source : (Sicard et al., 2013).

Légende : E = efficacité du désherbage, d = nombre d'adventices avant désherbage, d' = nombre d'adventices après désherbage.

$$\%E = \frac{(d - d')}{d}$$

B. Densité de lin oléagineux

Au sein des quadras placés pour le relevé de la flore, le nombre de lin a été compté afin d'évaluer l'impact de la pratique de désherbage sur la culture comme cela se fait dans d'autres cultures (Royer et al., 2020). Ces relevés de densité ont été réalisés aux mêmes moments que ceux des flores adventices. À partir de ces comptages, il est possible de calculer la sélectivité du désherbage.

Équation 3 : Sélectivité des méthodes de désherbage. Source : (Sicard et al., 2013).

Légende : E = efficacité du désherbage, S = sélectivité du mode de désherbage, d = nombre de plantes avant désherbage, d' = nombre de plantes après désherbage.

$$\%E = 1 - \frac{(d - d')}{d}$$

$$\%S = 1 - \%E$$

C. Couverture du sol

La couverture du sol a été évaluée le 14 avril 2022 avec l'application Canopeo avec la même méthode que l'essai variétal.

4.4.4. Analyse des données

L'ensemble des analyses ont été réalisées avec le logiciel R avec l'interface R Studio (Version 1.4.1106) et sont reprises dans le tableau suivant.

Tableau 14 : Récapitulatif des analyses de données.

Essai variétal	Essai désherbage	Essai fertilisation
Analyse graphique		
Variables : Stades		
ANOVA + Test complémentaire	ANOVA + Test complémentaire	ANOVA + Test complémentaire
Variables : Couverture du sol Densité Hauteur Précocité à la floraison Symptômes foliaires Nombre de capsules Rendement	Variables : Efficacité Spécificité Couverture	Variables : Biomasse Teneur en azote Hauteur Densité Nombre de capsules Rendement
ACP + Classification numérique		Courbe critique de dilution de l'azote
Variables : Couverture du sol Densité Hauteur à floraison Précocité à la floraison Symptômes foliaires Nombre de capsules Rendement		

Le niveau de signification de toutes les hypothèses est fixé à p -valeur $< 0,05$.

A. Graphiques

L'ensemble des graphiques ont été réalisés avec le package ggplot2.

B. ANOVA

Les conditions d'application des ANOVA ont été testées sur les résidus à l'aide du test de Bartlett et de Shapiro. Lorsque le test de normalité n'était pas concluant, les valeurs aberrantes ont été supprimées. Chaque ANOVA a été réalisée avec la fonction aov suivie d'un test complémentaire de type Newman-Keuls avec la fonction SNK.test.

C. ACP¹⁰

L'ACP a été réalisée avec la fonction PCA précédé d'analyses pour évaluer quelles dimensions de l'ACP conserver. La classification numérique a été réalisée avec la méthode de Ward avec la fonction hclust.

D. Courbe critique de dilution de l'azote

Les biomasses sèches et les teneurs en azote de l'essai sur la fertilisation ont été utilisées afin de positionner chacun de prélèvements par rapport à la courbe critique de dilution de l'azote du lin oléagineux. Cette courbe représente la concentration minimum d'azote total de la plante afin de produire le maximum de biomasse sèche (Flénet et al., 2006).

L'équation de la courbe est la suivante :

Équation 4 : Courbe critique de référence de dilution de l'azote du lin oléagineux. Source : (Flénet et al., 2006).

Légende : N_{SC} = teneur en azote (%), W_{SC} = Biomasse sèche (t/ha).

$$\log N_{SC} = \log a - b \log W_{SC}$$

$$a = 4,69$$

$$b = 0,53$$

Elle a été calculée grâce à la méthode de Justes (1994).

¹⁰ Analyse en composantes principales

5. Résultats et discussion

5.1. Essai variétal

5.1.1. Suivi temporel

A. Stades

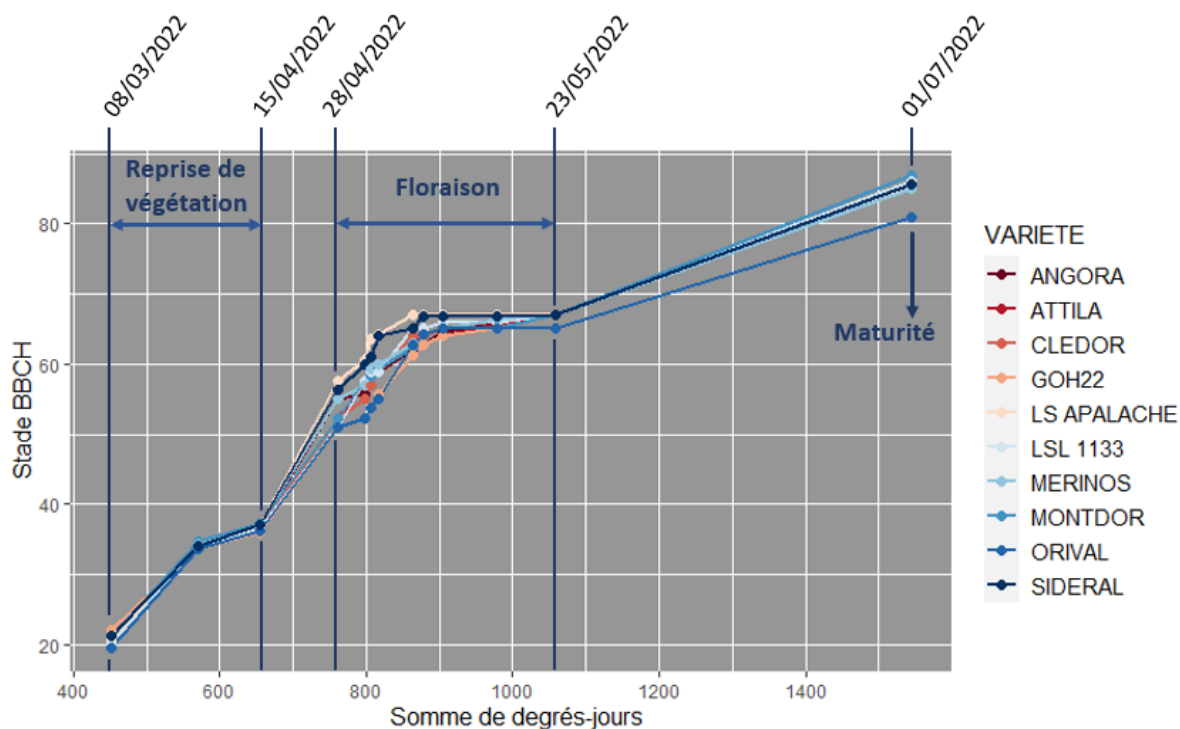


Figure 17 : Évolution des stades BBCH en fonction de la somme de degrés-jours (en base 3°C).

Le coefficient de corrélation entre le développement des variétés et la somme de degrés-jours varie entre 0,87 et 0,94.

D'Antuono et al. (1995) ont démontré que le taux de développement de la culture de lin est linéairement corrélé à la température et influence de manière importante la croissance. Ce constat est le même dans ce travail.

Reprise de végétation

L'écart de stade BBCH entre les variétés à la reprise de végétation est faible.

Le lin oléagineux d'hiver se trouve entre 5 et 10 cm de hauteur avant l'hiver pour faire face au froid (Berard et al., 2020). Les conditions idéales de croissance (température et pluviométrie) ne sont pas rassemblées au moment de la reprise de végétation. Ces éléments expliquent le faible écart entre variétés.

Floraison

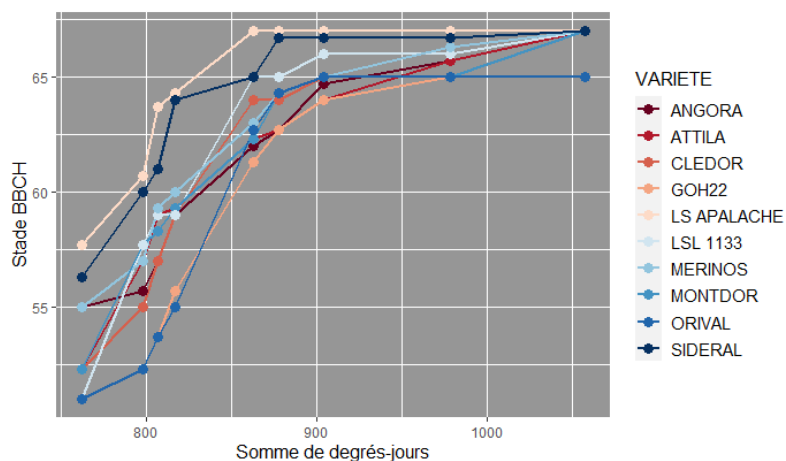


Figure 18 : Zoom sur le graphique de l'évolution des stades BBCH au moment de la floraison en fonction de la somme de degrés-jours (en base 3°C).

Légende : les couleurs correspondent aux variétés.

Tableau 15 : Valeurs moyennes de la précocité à la floraison (degrés-jours) \pm std¹¹ pour chacune des variétés et groupes résultants du complément d'analyse de l'ANOVA (Test Newman-Keuls).

Légende : lettre en **bleu** = Variété plus précoce, lettre en **rouge** = Variété plus tardive, niveau de signification : *** = très hautement significatif (p -valeur $< 0,001$).

Variété	Somme de degrés-jour moyenne pour arriver à floraison	Date correspondant à la valeur moyenne de la somme de degrés-jours	Groupe SNK
ANGORA	816,8 \pm 0,00	5 mai 2022	bc
ATTILA	803,8 \pm 5,08	4 mai 2022	c
CLEDOR	816,8 \pm 0,00	5 mai 2022	bc
GOH22	823,8 \pm 6,06	6 mai 2022	b
LS APALACHE	767,0 \pm 4,39	29 avril 2022	d
LSL 1133	803,8 \pm 5,08	4 mai 2022	c
MERINOS	806,7 \pm 0,00	4 mai 2022	c
MONTDOR	807,1 \pm 9,46	5 mai 2022	c
ORIVAL	835,2 \pm 6,87	7 mai 2022	a
SIDERAL	767,0 \pm 4,39	29 avril 2022	d
p-valeur	4,35.10 ⁻¹¹ (***)		

Des différences très hautement significatives entre variétés sont observées. Certaines variétés telles que LS Apalache et Sideral sont plus précoces alors que d'autres, à savoir Orival et GOH22, sont plus tardives. Les variétés les plus précoces atteignent la floraison avec une somme de 767 degrés-jours tandis que les plus tardives demandent plus de 800 degrés-jours.

Le résultat concernant la précocité de Sideral est confirmé par Berard et al. (2020) qui classe la variété comme précoce. Motard et al. (2021) classe quant à eux Sideral comme mi-précoce. Angora, Attila et Merinos sont identifiées également comme mi-précoce par Motard et al. (2021) et Semences de France (2021a, 2021b, 2022a), ce qui est bien le cas dans cet essai. Cledor est classée comme mi-tardive par Motard et al. (2021) mais intermédiaire par Semences de France (2022b). Ce dernier résultat est similaire à cet essai. Ces différences de classification sont souvent expliquées par la différence de longueur des jours entre la France et la Belgique. Les autres variétés ne sont pas présentées dans ces rapports.

¹¹ Déviation standard

Précocité à la maturité

Tableau 16 : Stade BBCH moyen et déviation standard de chaque variété à la date du 6 juillet 2022.

Légende : chiffre en **rouge** = variété plus tardive, chiffre en **bleu** = variété plus précoce.

Variété	Stade BBCH	Déviation standard
ANGORA	91	0,6
ATTILA	91	0,6
CLEDOR	92	2,3
GOH 22	91	0,6
LS APALACHE	92	0,6
LSL 1133	92	0,6
MERINOS	91	0,6
MONTDOR	94	2,3
ORIVAL	82	1,2
SIDERAL	91	0,0

Il n'a pas été possible de réaliser un suivi régulier durant la maturité afin de connaître exactement le jour où chaque parcelle a atteint le stade BBCH 89 (graines matures).

Au vu des observations du dernier relevé, Montdor est la variété la plus précoce suivie de Cledor, LS Apalache et LSL1133. Orival est la variété la plus tardive. Les autres variétés sont intermédiaires.

Les variétés les plus précoces en floraison, LS Apalache et Sideral, ne sont pas les plus précoces à maturité. Berard et al. (2020) classent Sideral en variété précoce à maturité ce qui n'est pas le cas pour cette année. Selon Motard et al. (2021), Angora, Attila, Merinos, Sideral et Cledor sont toutes mi-précoces pour la maturité, ce qui est confirmé dans cet essai. Les fiches variétales d'Angora, Attila, Mérimos et Cledor vont dans le même sens (Semences de France, 2021a, 2021b, 2022a, 2022b).

B. Hauteurs

Tableau 17 : Groupes du test Newman-Keuls pour les hauteurs à différentes dates.

Légende : lettre en **bleu** = variété plus courte, lettre en **rouge** = variété plus haute, niveau de signification : *** = très hautement significatif (p -valeur $< 0,001$).

Variété	Date					
	28/03/2022	15/04/2022	28/04/2022	10/05/2022	25/05/2022	01/07/2022
ANGORA	c	d	bcd	ab	abc	abc
ATTILA	bc	cd	bcd	abc	abcd	abcd
CLEDOR	ab	bcd	abc	abc	abcd	bcd
GOH 22	d	e	d	ab	bcd	bcd
LS APALACHE	ab	b	abc	abc	bcd	bcd
LSL 1133	abc	bc	ab	a	a	a
MERINOS	abc	bcd	cd	bc	d	d
MONTDOR	a	bc	bcd	bc	cd	cd
ORIVAL	d	e	e	c	bcd	abc
SIDERAL	a	a	a	a	ab	ab
Hauteur moyenne	18,25 cm	30,02 cm	45,07 cm	55,33 cm	60,51 cm	59,24 cm
p-valeur	$1,52 \cdot 10^{-7}$ (***)	$4,55 \cdot 10^{-10}$ (***)	$7,84 \cdot 10^{-7}$ (***)	$5,49 \cdot 10^{-4}$ (***)	$6,34 \cdot 10^{-4}$ (***)	$7,07 \cdot 10^{-4}$ (***)

Le classement des hauteurs évolue au fil du temps. À la reprise de végétation, les variétés les plus grandes sont Sideral et Montdor et les plus courtes Orival et GOH22. Sideral reste la variété la plus haute jusqu'au 10 mai. À partir de cette date, elle est non significativement différente de LSL1133 qui s'avère être la variété la plus haute. Orival suivie de GOH22 restent respectivement les variétés les plus courtes jusqu'au 10 mai et 15 avril. Merinos se démarque ensuite à partir du 10 mai en étant non significativement différent d'Orival. Les autres variétés sont intermédiaires et se retrouvent dans plusieurs groupes. Les valeurs exactes sont reprises dans les boxplots en annexe 6.

Des différences significatives de hauteur entre variétés sont aussi recensées dans d'autres études de comparaisons de variétés (Sankari, 2000; Gupta et al., 2017).

Motard et al. (2021) qualifient Sideral comme une variété haute avec une hauteur en fin de floraison de 62 cm ce qui ressort également des présents résultats avec une hauteur moyenne de 64,4 cm. Angora et Cledor sont classées comme variétés à hauteur moyenne ce qui est aussi vérifié dans cet essai. Finalement, Mérinos et Attila sont considérées comme des variétés courtes. Ceci a été clairement relevé pour Mérinos mais de façon plus nuancée pour Attila. Les autres variétés ne sont pas présentes dans le rapport de Motard et al. (2021).

Selon Pageau et al. (2006), plus la variété est courte, plus vite elle atteindra la maturité ce qui est le cas dans cette étude. Montdor, la variété la plus précoce en maturité, est non significativement différente de la variété la plus petite. Cependant, la variété la plus petite, Merinos, est moins précoce que la variété la plus haute (LSL1133). Cette affirmation est partiellement remise en question dans le cadre de cette étude.

Sankari (2000) met en avant le fait que les conditions météorologiques à certains stades du développement de la culture exercent une influence importante d'une année à l'autre sur la hauteur. Le classement présenté ici pourrait donc évoluer dans les prochaines années.

5.1.2. Caractérisation variétale

5.1.2.1. Couverture du sol

La différence de couverture du sol en sortie d'hiver entre variétés est très hautement significative (p -valeur = $2,43 \cdot 10^{-11}$).

GOH22 se démarque avec une couverture dépassant les 20%. Orival est dernier au classement avec moins de 2,5% de couverture (Figure 20). Les autres variétés sont intermédiaires (de 6 à 13%) et se retrouvent dans plusieurs groupes.

Le manque de couverture d'Orival provient soit d'un problème à la levée soit du fait que la variété n'ait pas atteint une hauteur comprise entre 5 et 10 cm avant l'hiver. Dans ce cas, la variété aurait pu souffrir du froid (Berard et al., 2020).

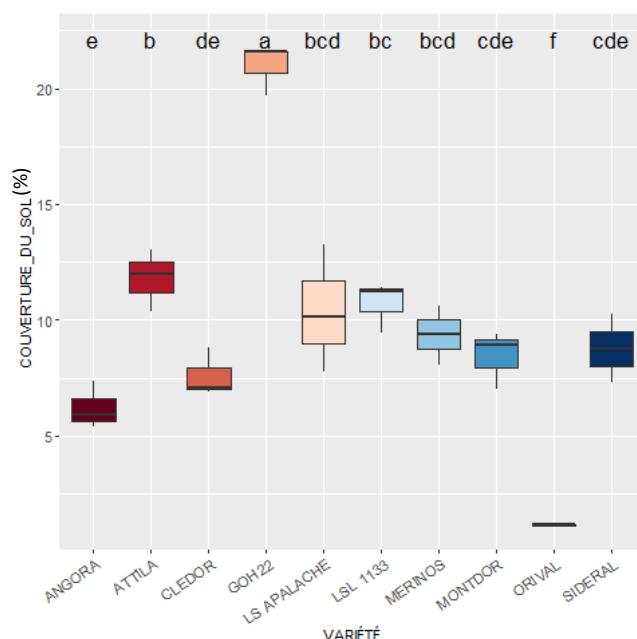


Figure 19 : Boxplot de la couverture du sol (%) de chaque variété.
Légende : couleur propre à chaque variété, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

Lorsque la couverture est plus élevée, cela permet de mieux lutter contre l'enherbement qui est un problème récurrent en culture de lin oléagineux (Dastgheib, 2006; Ehrensing, 2008; Luginbühl et al., 2015).

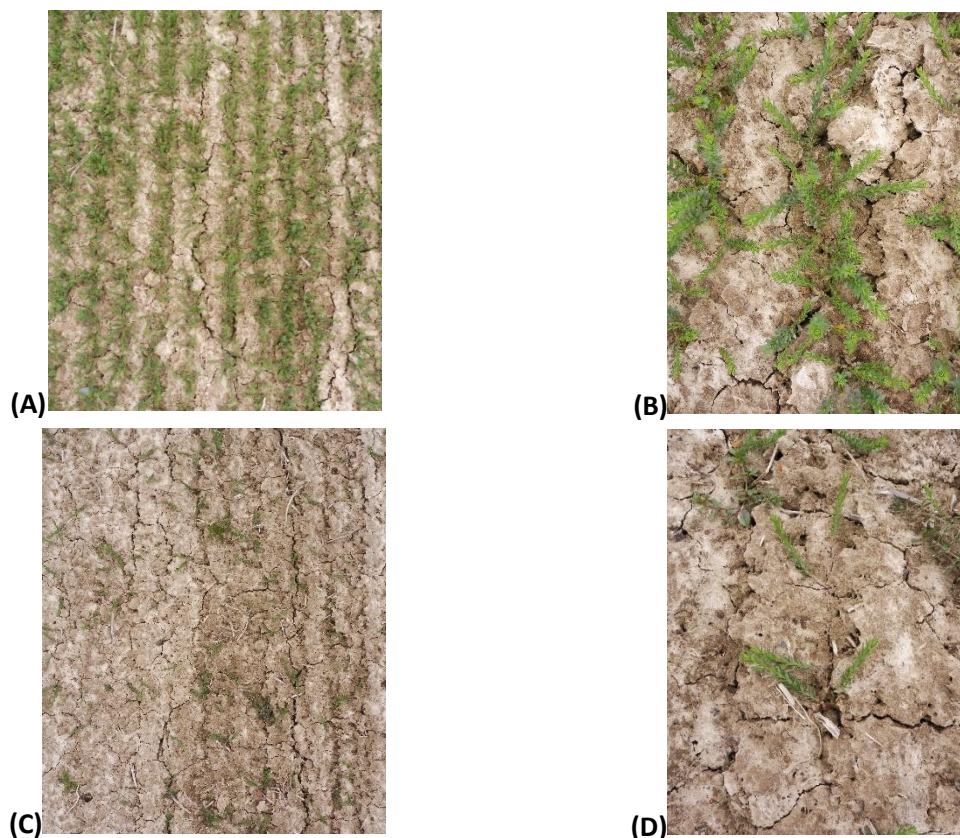


Figure 20 : Photographies de la couverture du sol de GOH22 et d'Orival. Sources personnelles.

Légende : **(A)** GOH22 : vue à hauteur d'homme, **(B)** GOH22 : vue à échelle de la ligne de semis, **(C)** Orival : vue à hauteur d'homme, **(D)** Orival : vue à échelle de la ligne de semis.

5.1.2.2. Symptômes foliaires

Les différences entre variétés concernant la présence de symptômes foliaires (septoriose et phytotoxicité supposée) sont très hautement significatives. Trois variétés se démarquent des autres. Sideral suivie de Montdor et de LSL1133 présentent davantage de symptômes foliaires.

La résistance aux symptômes foliaires est propre à chaque variété en fonction de la sélection réalisée en amont. Aucune information sur la sensibilité à la phytotoxicité ou la septoriose n'est reprise au sein des rapports et fiches variétales (Motard et al., 2020, 2021; Semences de France, 2021a, 2021b, 2022b, 2022a).

Tableau 18 : Valeurs moyennes \pm std de la présence de symptômes foliaires, groupes du test Newman-Keuls.

Légende : lettre en **bleu** = peu de symptômes foliaires, lettre en **rouge** = beaucoup de symptômes foliaires, niveau de signification : *** = très hautement significatif (p -valeur $< 0,001$).

Variété	Cotation moyenne de la présence de symptômes foliaires	Groupe SNK
ANGORA	$1,3 \pm 0,58$	d
ATTILA	$1,7 \pm 0,58$	d
CLEDOR	$1,0 \pm 0,00$	d
GOH 22	$1,3 \pm 0,58$	d
LS APALACHE	$0,7 \pm 0,58$	d
LSL 1133	$2,7 \pm 0,58$	c
MERINOS	$1,0 \pm 0,00$	d
MONTDOR	$4,7 \pm 0,58$	b
ORIVAL	$1,0 \pm 0,00$	d
SIDERAL	$6,3 \pm 1,15$	a
p-valeur	$2,23.10^{-9}$ (***)	

5.1.2.3. Composantes du rendement

A. Densité

La différence de densité entre variété est très hautement significative (p -valeur = $1,6 \cdot 10^{-6}$). La variété la moins dense est Orival avec moins de 100 plantes/m². Les variétés les plus denses sont Attila et GOH22. Cependant, d'autres variétés sont non significativement différentes de ces deux dernières telles que Cledor, LS Apalache et LSL1133. Les autres variétés ont une densité inférieure à Attila et GOH22 mais supérieure à Orival.

L'objectif de densité de plantes/m² s'élève entre 250 et 300 plantes/m² voir 400 (Andruszczak et al., 2016; Berard et al., 2020). Huit variétés sur dix l'atteignent. Le manque de densité d'Orival est dû à un manque de levée ou à une sensibilité au froid trop importante comme énoncé pour la couverture du sol.

Selon Luginbühl et al. (2015), les variétés les plus denses arrivent plus précocement à maturité. Or, Montdor qui s'avère être la variété la plus précoce en maturité n'est pas la plus dense. Il indique également que les variétés les moins denses devraient arriver le moins rapidement à maturité. Ceci est confirmé dans le cas d'Orival.

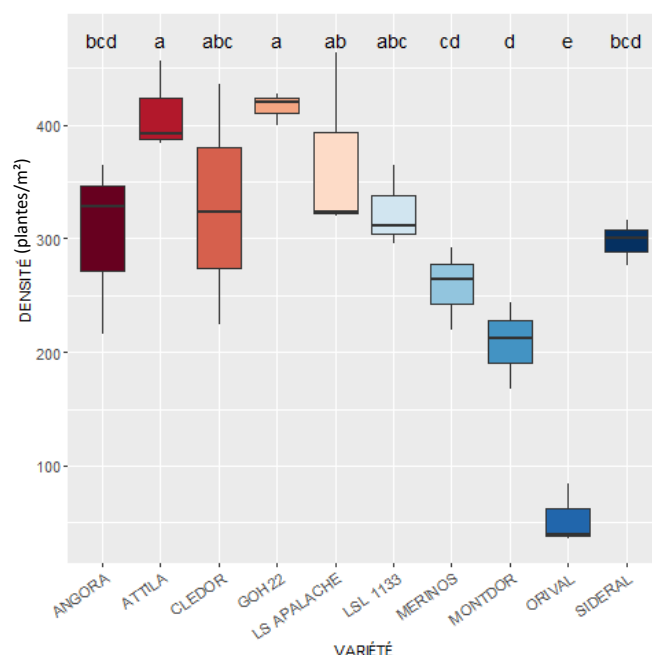


Figure 21 : Boxplot de la densité (plantes/m²) pour chaque variété. Légende : couleur propre à chaque variété, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

B. Nombre de capsules par plante

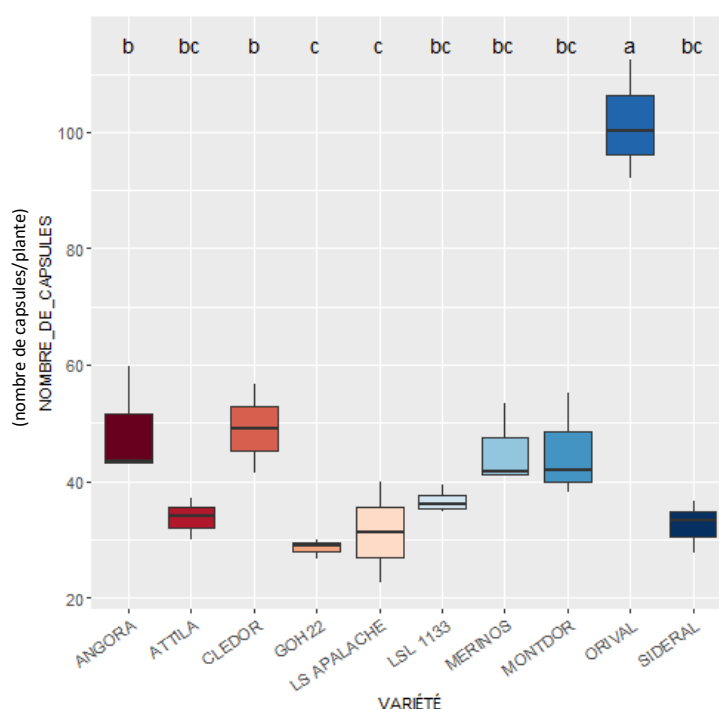


Figure 22 : Boxplot du nombre de capsules par plante pour chaque variété. Légende : couleur propre à chaque variété, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

La différence entre variétés pour le nombre de capsules est très hautement significative avec une p-valeur de $1,64.10^{-9}$. Orival se démarque par son grand nombre de capsules par plante aux alentours de 100 capsules/plante. Angora et Cledor la succèdent avec une moyenne aux alentours de 50 capsules/plantes suivies d'Attila, LSL1133, Merinos, Montdor et de Sideral. GOH22 et LS Apalache en possède le moins à hauteur de 30 capsules/plante.

Des différences en nombre de capsules par plante entre variétés sont aussi relevées par Gupta et al. (2017).

C. Rendement

Après réalisation de l'ANOVA, il n'y a pas d'interaction entre le facteur variété et traitement. Une différence significative a été relevée pour le facteur traitement (p-valeur = $1,51.10^{-2}$) mais elle n'a pas été identifiée par le test de Newman-Keuls. Les blocs traités présentent un rendement moyen de 3,57 t/ha et ceux non traités 3,58 t/ha.

Une différence très hautement significative du facteur variété (p-valeur 2.10^{-16}) ressort de l'ANOVA.

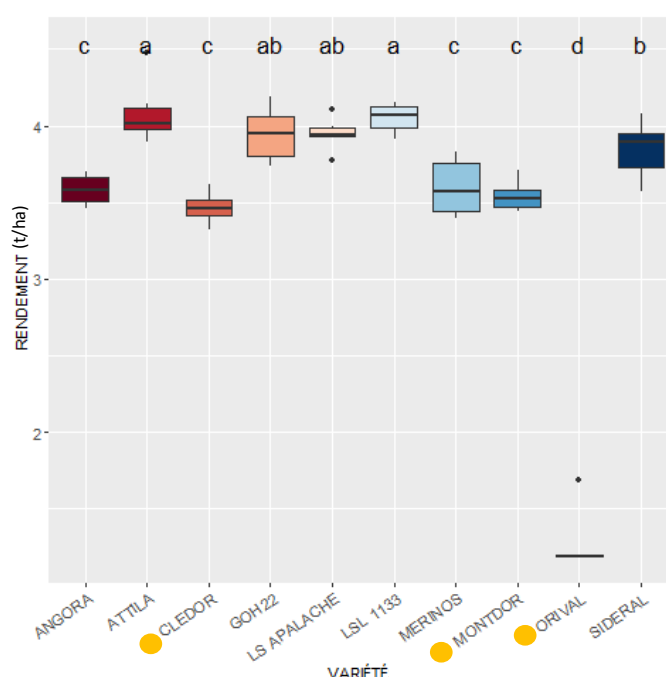


Figure 23 : Boxplot du rendement à 9% d'humidité (t/ha) pour chacune des variétés.

Légende : couleur propre à chaque variété, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls, pastille jaune = variété à graine jaune.

Les variétés avec le plus haut rendement sont Attila et LSL1133 avec plus de 4 t/ha. GOH22 et LS Apalache sont non significativement différentes de ces deux dernières. En dernière position se retrouve Orival avec un rendement sensiblement supérieur à 1 t/ha. Les autres variétés sont intermédiaires et se situent aux alentours de 3,5 t/ha. Les rendements moyens de chaque variété sont repris en annexe 7.

Diepenbrock et al. (1995), D'Antuono et al. (1995) et Pellet et al. (2004) évoquent que le rendement des lins oléagineux dépend en grande partie de la variété, ce qui est bien le cas ici. Pellet et al. (2004) indiquent que le rendement de la culture fluctue généralement entre 1,1 et 2,5 t/ha. Dans le cas présent, les rendements sont nettement supérieurs à ces valeurs à l'exception d'Orival.

Comme dans les présents résultats, Attila a été classée première en 2020 et 2021 dans les essais de Terres Inovia avec un rendement moyen de 2,54 et 2,21 t/ha (Motard et al., 2020, 2021). Les rendements moyens étaient inférieurs à ceux enregistrés cette année.

Klimek-Kopyra et al. (2012) ont observé que les variétés à graines jaunes permettent un rendement similaire aux variétés à graines brunes. Dans cette étude, même si Orival ne doit pas être prise en compte étant donné son manque de levée, les variétés à graines jaunes Cledor et Montdor présentent des rendements inférieurs à la majorité des variétés à graines brunes.

Le rendement de certaines variétés a pu être comparés avec ceux des années précédentes.

Sans surprise, Angora, présente dans les essais pendant trois années consécutives, montre des rendements très différents en fonction des années. Cette différence est très hautement significative ($p\text{-valeur} = 1,25.10^{-6}$).

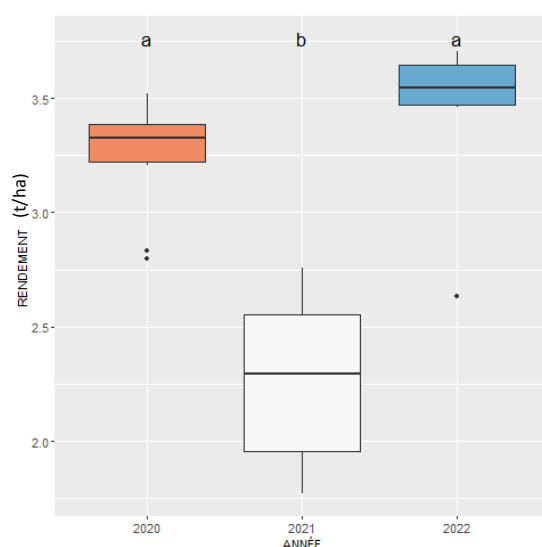


Figure 24 : Boxplot du rendement d'Angora à 9% d'humidité (t/ha) pour chaque année de présence dans les essais (2020, 2021, 2022).

Légende : couleur propre à chaque année, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

Les récoltes des années 2020 et 2022, avec des rendements supérieurs à 3 t/ha, ne sont pas significativement différentes. La récolte de 2021 est significativement différente des deux autres avec un rendement aux alentours des 2,3 t/ha.

Cette différence entre année est due principalement aux conditions climatiques comme énoncé par Casa et al. (1999) et Sankari (2000). L'été 2021 a été très humide par rapport aux deux autres années et aux normales saisonnières (Tableau 19) et a fortement impacté le rendement.

Tableau 19 : Précipitations (mm) durant les mois de mai, juin et juillet pour les années de récolte 2020, 2021 et 2022 et normales saisonnières.

Légende : chiffres en *bleu* = précipitations supérieures aux normales saisonnières, chiffres en *rouge* = précipitations inférieures aux normales saisonnières.

Mois	Année de récolte			Normale saisonnière
	2020	2021	2022	
Mai	9,7	72,4	33,4	69,7
Juin	50,5	172,8	93,5	76,3
Juillet	44,5	165,8	/	71,4

La température moyenne observée durant le mois de juin, qui correspond au mois de floraison intense, était supérieure durant l'année 2021 (17,8°C) aux deux autres années (16,5°C (2020), 16,8°C (2022)) ainsi qu'aux normales saisonnières (14,9°C). De nombreux articles tel que Pageau et al. (2011) démontrent que des températures plus fraîches durant la floraison favorisent un rendement plus élevé.

En comparant les résultats de rendement de la France avec ceux de cet essai (Tableau 20), la même tendance est observée même si la différence entre 2020 et 2021 est plus faible. D'une manière générale, les rendements des essais belges sont supérieurs.

Tableau 20 : Rendements moyens pour les essais français de Motard et al. (2020, 2021) et les essais belges de ce travail (t/ha) pour les récoltes de 2020 et 2021.

Année	France	Belgique
2020	2,22 t/ha	3,26 t/ha
2021	2,06 t/ha	2,27 t/ha

Les rendements de 2021 et 2022 d'Angora, d'Attila, de LS Apalache et de Sideral ont été comparés. Une interaction très hautement significative (p -valeur = $2,21 \cdot 10^{-4}$) a été relevée entre le facteur variété et année. L'analyse a été décomposée.

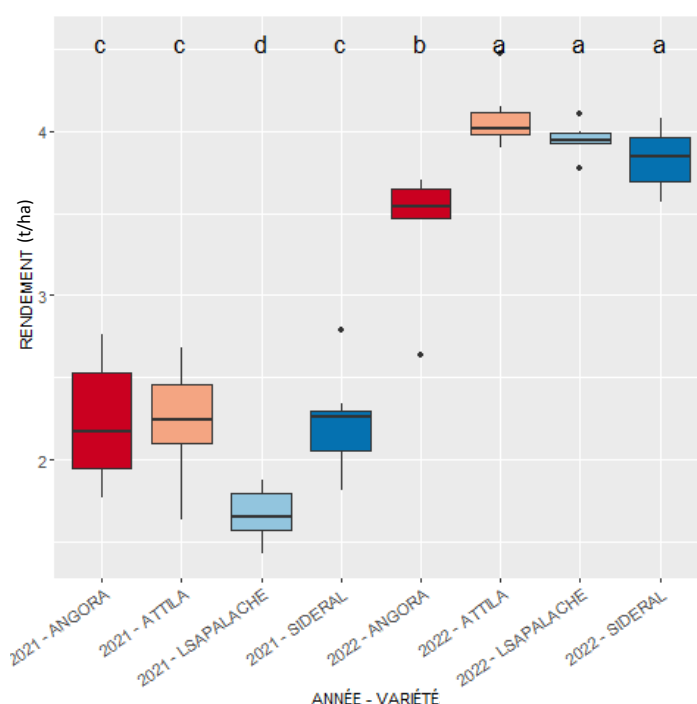


Figure 25 : Boxplot du rendement à 9% d'humidité (t/ha) de chaque variété pour chaque année de présence dans les essais. Légende : Couleur propre à chaque variété, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

Il y a des différences entre variétés au sein de chaque année (p -valeur = $2 \cdot 10^{-16}$). Cependant, les variétés réagissent différemment en fonction de l'année.

LS Apalache se situe en dernière position en 2021 et est significativement différente des trois autres variétés. En 2022, c'est Angora qui est la variété au plus faible rendement et significativement différente des autres variétés.

Ce constat pourrait signifier que le rendement de LS Apalache est plus affecté que celui des trois autres variétés lors d'année avec un été plus humide et plus chaud. Cette variété est peut-être plus sensible à la verse provoquée en 2021 par les intempéries. Angora a un potentiel de rendement inférieur aux autres variétés lors de saison avec un été plus sec. Les deux autres variétés, Attila et Sideral, semblent moins dépendantes des conditions climatiques. Il faut toutefois rester prudent car l'expérimentation ne porte que sur deux années.

5.1.2.4. Corrélations entre variables

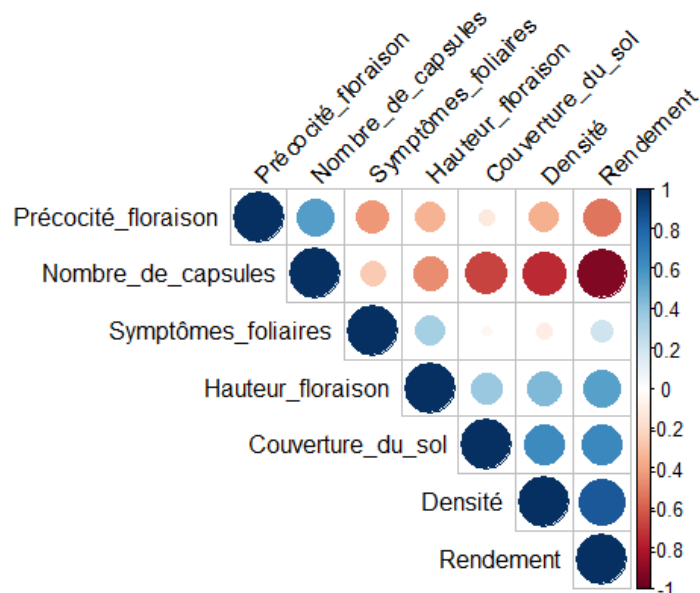


Figure 26 : Matrice de corrélation entre variables numériques.
Légende : corrélation variant de -1 (rouge foncé) à 1 (bleu foncé).

De nombreuses corrélations sont mises en évidence dans la figure ci-dessus :

- La **précocité à la floraison** est positivement corrélée au nombre de capsules (0,55) et négativement au rendement (-0,54), aux symptômes foliaires (-0,43), à la hauteur à floraison (-0,35), à la densité (-0,35) et à la couverture du sol (-0,11).
- Le **nombre de capsules** est négativement corrélé au rendement (-0,93), à la densité (-0,74), à la couverture du sol (-0,67), à la hauteur à floraison (-0,47) et aux symptômes foliaires (-0,26).
- Les **symptômes foliaires** sont positivement corrélés à la hauteur à floraison (0,33) et au rendement (0,21).
- La **hauteur à floraison** est positivement corrélée au rendement (0,54), à la densité (0,45) et à la couverture du sol (-0,04).
- La **couverture du sol** est positivement corrélée au rendement (0,65) et à la densité (0,63).

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

Le nombre de capsules est fortement corrélé avec la densité de plantes/m² car la plante est capable de compenser le manque de plantes en augmentant son nombre de branches basales, fructifères mais aussi son nombre de capsules. Ces différents éléments impactent le rendement (Casa et al., 1999; Pageau et al., 2006; Andruszczak et al., 2016; Patial et al., 2019).

Le rendement peut être maintenu même à de plus faibles densités selon Casa et al. (1999). Dans cet essai, une limite de compensation est démontrée. Orival qui a une densité moyenne de 53 plantes/m² a produit beaucoup plus de capsules par plante (>100 capsules/plante). Cependant, son rendement est significativement inférieur aux autres variétés.

Selon Pellet et al. (2004) et Berard et al. (2020), un seuil de densité de 100-150 plantes/m² peut déjà impacter le potentiel de rendement. Cependant, selon Casa et al. (1999), le rendement n'est pas affecté par la densité lorsqu'elle se situe entre 100 et 700 plantes/m². Luginbühl et al. (2015) et Andruszczak et al. (2016) mettent aussi en avant les limites de compensation du lin oléagineux. Il est à noter que la capacité de compensation est moins importante en culture de lin de printemps dû à la durée de végétation raccourcie (Casa et al., 1999; Berard et al., 2020).

À contrario, une densité de plantes élevée influencera négativement le nombre de capsules/plante. Dans cet essai, les variétés avec une densité supérieure à 150 plantes/m² et un nombre de capsules/plante inférieur ont produit un meilleur rendement. Ce qui a pour conséquence une corrélation positive entre le rendement et la densité et négative entre le rendement et le nombre de capsules. Les composantes de rendement dont fait partie le nombre de capsules/plante sont cependant davantage influencées par l'année et le type de sol que par la densité de plantes/m² d'après Casa et al. (1999).

La densité et la couverture du sol sont positivement corrélées ce qui semble normal car si plus de plantes sont présentes, plus de surface de sol est couverte. Par effet domino, plus la couverture est élevée, plus la densité est élevée ce qui influence négativement le nombre de capsules.

Dans ce travail, la hauteur à floraison est positivement corrélée à la densité. Ce qui n'est pas le cas dans l'article Casa et al. (1999). Ce dernier a testé une seule variété à plusieurs densités alors que dans le cas de cette étude, plusieurs variétés ont été testées et ont présenté des densités différentes. L'influence de la variété sur la hauteur à floraison est peut-être plus importante que l'influence de la densité sur celle-ci.

La hauteur à floraison est positivement corrélée au rendement. La variété LSL1133, la plus grande au classement, a produit un rendement non significativement différent du meilleur rendement. Cette relation positive entre hauteur de plante et rendement est énoncée par Casa et al. (1999). La hauteur est par conséquent négativement corrélée au nombre de capsules ce que cite Kole (2007).

Le nombre de degrés-jours nécessaires pour atteindre la floraison est positivement corrélé au nombre de capsules, cela laissant présager que plus la variété fleurit tard plus elle produira de capsules. Orival est la variété la plus tardive en floraison et produit le plus de capsules. Cependant, ce nombre de capsules est surtout influencé par le manque de densité de la variété. GOH22, qui est l'une des variétés les plus tardives, a un nombre de capsules par plante similaire aux variétés les plus précoces (LS Apalache et Sideral). Il est difficile de statuer sur cette corrélation. Néanmoins, les sources indiquent que plus la floraison est précoce, plus il est possible d'éviter la période de sécheresse durant la floraison et d'optimiser le rendement (Casa et al., 1999).

Cette année, les précipitations de janvier et de mars à mai ont été inférieures aux normales saisonnières. Une floraison plus précoce n'a pas permis réellement d'éviter la sécheresse. Les variétés à la floraison plus précoce ont tout de même produit plus de rendement. Orival a fortement influencé la corrélation la faisant passer de -0,29 à -0,54. Casa et al. (1999) ajoute que le rendement est davantage influencé par les conditions météorologiques durant la floraison que par la densité de plantes sur pied.

Concernant l'apparition de symptômes foliaires, plus la variété est précoce plus la variété présente des symptômes foliaires. Cette année, il aurait fallu privilégier des variétés plus tardives pour diminuer la sensibilité de la variété à ces symptômes.

Les symptômes foliaires sont plus présents sur les variétés les plus hautes en taille à savoir Sideral et LSL1133 mais Montdor fait exception. La présence de ces symptômes foliaires est positivement corrélée avec le rendement, ce qui semble surprenant. Ces symptômes foliaires n'ont pas tous été mis en lien avec des maladies. Cependant, si la surface foliaire est touchée cela devrait diminuer la capacité photosynthétique et impacter négativement le rendement (D'Antuono et al., 1995), ce qui n'est pas le cas ici.

5.1.3. Classification des variétés par groupe

Deux dimensions de l'ACP ont été conservées. La part d'information prise en compte par la première dimension est de 55,75% et 20,06% pour la deuxième soit au total 75,81%.

La première dimension est corrélée positivement avec le rendement, la densité, la couverture du sol, la hauteur à floraison et à l'apparition de symptômes foliaires. Elle est négativement corrélée avec le nombre de capsules et la précocité à floraison (Annexe 8).

La deuxième dimension est corrélée positivement avec la précocité à floraison, la couverture du sol et la densité. Elle est négativement corrélée avec l'apparition de symptômes foliaires et légèrement avec la hauteur.

Les valeurs des corrélations sont les suivantes :

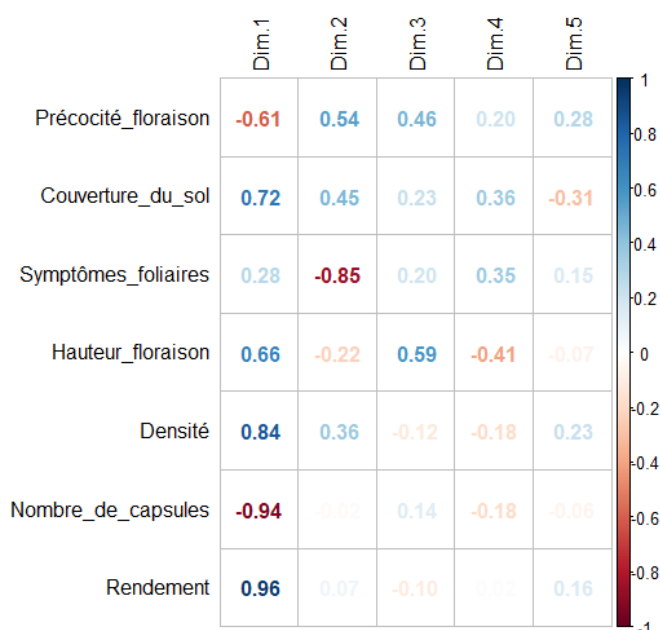


Figure 27 : Matrice de corrélation entre les variables explicatives et les dimensions de l'ACP.
Légende : corrélation varie de -1 (rouge foncé) à 1 (bleu foncé).

Avec la prise en compte des deux dimensions, la qualité de représentation des variables explicatives sont les suivantes.

Tableau 21 : Qualité de représentation des variables explicatives en prenant en compte deux dimensions.

Variable explicative	Qualité de représentation
Rendement	0,93
Nombre de capsules par plante	0,88
Densité de plantes/m ²	0,84
Symptômes foliaires	0,80
Couverture du sol	0,72
Précocité à la floraison	0,66
Hauteur à floraison	0,49

Quatre groupes ont été distingués et trois de ceux-ci représentent des variétés plus « extrêmes ». Le premier groupe est composé de variétés qui peuvent être considérées comme « standard », c'est-à-dire qui ressemble à la moyenne des variétés (Annexe 9 et 10).

Tableau 22 : Moyenne des valeurs des différentes variables explicatives pour chacun des groupes.

Légende : en **rouge**= valeur inférieure à la moyenne de l'ensemble des parcelles, en **bleu** = valeur supérieure à la moyenne de l'ensemble des parcelles.

Groupe	Précocité à la floraison (degrés-jours)	Couverture du sol (%)	Symptômes foliaires	Hauteur à floraison (cm)	Densité (plantes/m ²)	Nombre de capsules par plante	Rendement (t/ha)
1	804,23	9,46	1,86	55,08	319,64	40,74	3,77
2	766,97	8,76	6,33	59,87	297,33	32,47	3,96
3	822,05	24,13	1,00	59,10	410,00	29,50	4,14
4	835,23	1,14	1,00	50,07	53,33	101,6	1,35

Le **groupe 1** est constitué d'un grand nombre de variétés repris en annexe 10. Il est caractérisé par des valeurs correspondant à la moyenne calculée à partir des données de toutes les parcelles. Les variétés sont mi-tardives. Elles ont une couverture du sol moyenne, peu de symptômes foliaires, une hauteur, une densité et un rendement moyen.

Le **groupe 2**, à savoir la variété Sideral, est caractérisé par une floraison précoce, des symptômes foliaires très présents, un rendement supérieur à la moyenne, une hauteur élevée et un nombre de capsules un peu inférieures à la moyenne. La couverture du sol et la densité sont moyennes.

Le **groupe 3**, constitué de deux répétitions de la variété GOH22, est caractérisé par une floraison mi-tardive, une couverture du sol importante, une absence de symptômes foliaires, une hauteur de plante et une densité élevée et un nombre de capsules inférieur à la moyenne. Son rendement est nettement supérieur à la moyenne.

Le **groupe 4**, à savoir la variété Orival, est caractérisé par une floraison tardive, une couverture du sol et un rendement très faible, une absence de symptômes foliaires, une petite taille, une densité de plante très faible et un nombre de capsules dépassant largement la moyenne.

5.2. Essai fertilisation

Pour rappel, l'ensemble des modalités de fertilisation ont été testées sur la variété Angora.

5.2.1. Suivi temporel

5.2.1.1. Biomasse

Tableau 23 : Biomasse sèche moyenne (t/ha) \pm std pour chacune des modalités et chacun des prélèvements.

N°	Modalité Fractionnement	Stade					
		10 cm	30 cm	Bourgeonnement	Début floraison	Fin floraison	Maturité
1	0 - 0 kgN/ha	0,18 \pm 0,04	0,82 \pm 0,15	1,53 \pm 0,27	2,35 \pm 0,47	5,62 \pm 0,92	5,30 \pm 0,40
2	50 - 0 kgN/ha	0,17 \pm 0,06	0,86 \pm 0,14	1,86 \pm 0,34	2,44 \pm 0,33	7,52 \pm 1,38	7,21 \pm 1,18
3	80 - 0 kgN/ha	0,20 \pm 0,05	0,73 \pm 0,14	2,07 \pm 0,67	2,72 \pm 0,82	8,17 \pm 1,33	7,68 \pm 0,91
4	30 - 50 kgN/ha	0,18 \pm 0,04	0,67 \pm 0,13	1,59 \pm 0,40	1,96 \pm 0,45	6,44 \pm 1,15	6,75 \pm 1,11
5	50 - 30 kgN/ha	0,20 \pm 0,04	0,72 \pm 0,15	2,03 \pm 0,33	2,71 \pm 0,39	6,80 \pm 1,90	7,07 \pm 2,27
6	80 - 30 kgN/ha	0,18 \pm 0,05	0,74 \pm 0,15	1,86 \pm 0,35	3,03 \pm 0,61	8,63 \pm 1,04	8,25 \pm 0,50
p-valeur		0,941	0,534	0,376	0,208	0,078	0,101

Pour chaque stade, les biomasses sèches des différentes modalités de fertilisation ne sont pas significativement différentes entre elles bien que la p-valeur se rapproche, du stade 10cm au stade fin floraison, du seuil de 0,05.

La production de biomasse est essentielle pour la production du rendement en grains (Hassan et al., 2001).

Hassan et al. (2001) décrivent le développement de la biomasse sèche du lin comme un modèle sigmoïdale similaire aux autres plantes cultivées. Ce modèle est approuvé par les résultats de cette étude (Annexe 11). Il est possible d'apercevoir de légères différences entre modalités. La modalité avec 110 kgN/ha produit en moyenne le plus de biomasse et le témoin le moins de biomasse.

L'augmentation de biomasse sèche au début du développement est lente ce qui est démontré par Hassan et al. (2001).

La biomasse sèche atteint son maximum au stade fin floraison ou à la maturité en fonction de la modalité. Hassan et al. (2001) approuvent ce constat en ajoutant que l'augmentation durant la phase de croissance principale est linéaire. Dans l'article de Casa et al. (1999), où les variétés sont semées au printemps, le maximum de biomasse est atteint 19 à 24 jours après la floraison. Selon Pellet et al. (2004), le lin produit 75% de sa biomasse sèche quelques jours avant sa floraison et durant celle-ci sur une durée totale de 30 jours, ce qui est également constaté dans ce travail. L'augmentation de biomasse est due notamment à l'apparition des capsules.

Une tendance est observée, la biomasse sèche est supérieure pour les modalités 3 et 6, mais elle n'est pas statistiquement validée. Selon Flénet et al. (2006), la biomasse sèche augmente avec la fertilisation à partir du bourgeonnement. Dordas (2012) et Gupta et al. (2017) indiquent aussi que la fertilisation influence positivement la biomasse sèche.

5.2.1.2. Azote

Tableau 24 : Groupes du test Newman-Keuls pour la teneur en azote de chaque modalité à chaque stade de prélèvement.

Légende : lettre en **rouge** = teneur en azote plus élevée, lettre en **bleu** = teneur en azote plus faible, niveau de signification : ** = hautement significatif (p -valeur < 0,01), *** = très hautement significative (p -valeur < 0,001).

N°	Modalité Fractionnement	Stade				
		10 cm	30 cm	Bourgeonnement	Début floraison	Fin floraison
1	0 - 0 kgN/ha	a	b	c	a	b
2	50 - 0 kgN/ha	a	a	ab	a	a
3	80 - 0 kgN/ha	a	a	a	a	a
4	30 - 50 kgN/ha	a	a	ab	a	a
5	50 - 30 kgN/ha	a	a	bc	a	a
6	80 - 30 kgN/ha	a	a	a	a	a
Teneur en azote moyenne		3,46%	3,51%	2,51%	2,04%	1,42%
p-valeur		$6,24.10^{-1}$	$9,07.10^{-4}$ (***)	$3,40.10^{-4}$ (***)	$6,67.10^{-1}$	$2,48.10^{-3}$ (**)

Les teneurs en azote entre modalités sont significativement différentes à partir du stade 30 cm excepté pour le stade début floraison.

Au stade 30 cm, la modalité 1 se différencie des autres en se plaçant en dernière position du classement.

À partir du stade bourgeonnement, deux modalités se démarquent, la modalité 3 et la modalité 6. Les différences sont très hautement significatives. Elles ont toutes les deux une teneur en azote moyenne de 2,79%. Les modalités 2 et 4 sont non significativement différentes de ces dernières. La modalité 5 est non significativement différente par rapport aux modalités 2 et 4 mais également à la modalité 1 dont la teneur en azote moyenne s'élève à 2,07%.

Au début de la floraison, les différences entre modalités sont non significativement différentes.

Au stade fin floraison, le constat est le même que pour le stade 30cm. La modalité 1 se place dernière avec une teneur en azote de 1,23%. Les boxplots des trois stades avec p -valeur < 0,05 sont repris en annexe 12.

L'apport d'une quantité plus importante en première fraction, à savoir 80 kgN/ha, permet d'augmenter la teneur en azote au stade bourgeonnement. Cependant, les modalités 2 et 4 sont non significativement différentes des modalités 3 et 6. Selon Pageau et al. (2006), si l'apport en fertilisation azotée est plus important, la teneur en azote de la paille le sera également. Flénet et al. (2006) évoquent également qu'avec une fertilisation azotée plus importante la concentration en azote dans la plante est plus élevée. Dordas (2011) ajoute que cette influence est visible à la floraison et à la récolte. Les présents résultats montrent une différence du stade 30 cm au stade fin floraison à l'exception du début de la floraison. Ce même auteur indique qu'il n'y a pas de différence de teneur en azote entre une modalité à 40 kgN/ha et 80 kgN/ha. Ce qui est comparable aux résultats entre la modalité 2 et les modalités 3,4 et 5.

Selon Hocking et al. (1991), l'accumulation maximale en azote se situe, tout comme la biomasse, après le début de la floraison. Dans cette étude, l'accumulation maximale d'azote se situe en fin de floraison mais la teneur maximale en azote est atteinte au stade 30 cm avec une moyenne de 3,51%. Hassan et al. (2000) ajoutent que la teneur en azote diminue avec l'âge de la plante ce qui est le cas ici.

5.2.1.3. Hauteur et stades

Tableau 25 : Hauteur moyenne (cm) \pm std de chaque modalité aux stades "Début floraison", "Fin floraison", "Maturité".

Modalité		Date		
N°	Fractionnement	12/05 (Début floraison)	28/05 (Fin floraison)	01/06 (Maturité)
1	0 - 0 kgN/ha	55,00 \pm 3,35	58,20 \pm 2,39	58,20 \pm 3,14
2	50 - 0 kgN/ha	55,55 \pm 2,17	58,25 \pm 2,72	58,05 \pm 1,10
3	80 - 0 kgN/ha	54,50 \pm 1,25	58,95 \pm 2,04	58,10 \pm 1,19
4	30 - 50 kgN/ha	54,95 \pm 2,52	61,45 \pm 1,18	57,75 \pm 2,73
5	50 - 30 kgN/ha	55,35 \pm 1,84	59,45 \pm 2,55	58,75 \pm 1,86
6	80 - 30 kgN/ha	53,95 \pm 0,90	58,80 \pm 2,79	57,65 \pm 1,73
p-valeur		0,847	0,510	0,984

Il n'y a pas de différence significative entre modalités pour les trois dates de relevé. Il n'y aurait pas d'influence de la fertilisation sur la hauteur du lin oléagineux.

Il n'y aurait pas non plus d'influence de la fertilisation sur le développement de la culture. L'ensemble des parcelles ont atteint la floraison au même moment. Cependant, la maturité différerait légèrement entre modalités mais pas de façon assez importante que pour réaliser un relevé.

Ces constats sur l'influence de la fertilisation sur la hauteur et le développement de la culture sont les mêmes que ceux de Pageau et al. (2006). Une différence de maturité est aussi évoquée par Hocking et al. (1991). Dans les articles de Herzog et al. (2017) et Dordas (2010), il est évoqué que la floraison est plus précoce lorsque l'apport en azote est élevé. Ce qui n'a pas été le cas dans cet essai. Il est énoncé dans l'article d'Hocking et al. (1991) que le stress azoté a un effet négatif sur le taux de fleurs produites durant le cycle ce qui n'a pas été observé dans cet essai.

Finalement, selon Hocking et al. (1991), les plantes stressées par un manque d'azote sont plus courtes. Gupta et al. (2017) ajoutent que l'augmentation de la fertilisation augmente la hauteur des plantes. Ces affirmations ne correspondent pas aux conclusions de ce travail. Les conditions de sécheresse rencontrées en sont peut-être la cause.

5.2.2. Caractérisation de la fertilisation

5.2.2.1. Composantes du rendement

A. Densité

Tableau 26 : Densité moyenne (plantes/m²) et déviation standard de chaque modalité.

Modalité		Densité moyenne (plantes/m ²)	Déviation standard
N°	Fractionnement		
1	0 - 0 kgN/ha	160	24,87
2	50 - 0 kgN/ha	151	15,45
3	80 - 0 kgN/ha	164	16,33
4	30 - 50 kgN/ha	157	20,49
5	50 - 30 kgN/ha	153	20,49
6	80 - 30 kgN/ha	161	17,70
p-valeur		0,941	

Il n'y a pas de différence significative de densité entre modalités.

Les densités sont faibles étant donné que l'optimum est de 250 à 400 plantes/m² (Andruszczak et al., 2016; Berard et al., 2020). Dans l'article d'Andruszczak et al. (2016), une différence significative est relevée entre une fertilisation de 60 et 80 kgN/ha par rapport à une fertilisation de 40 kgN/ha. Les modalités de fertilisation plus élevées donnent une densité plus élevée par unité de surface et donc une meilleure productivité par plante et par parcelle que les modalités de fertilisation plus faibles. Dans ce travail aucune différence de densité n'est observée même entre la modalité 0 kgN/ha et la modalité 110 kgN/ha.

B. Nombre de capsules

Il n'y a pas de différence significative entre modalités concernant le nombre de capsules par plante. Comme énoncé dans l'essai variétal, la densité de plantes/m² est corrélée avec le nombre de capsules/plante. Il est normal que s'il n'y a pas de différence pour la densité, il n'y a pas de différence pour le nombre de capsules/plante.

Tableau 27 : Nombre de capsules moyen par plante et déviation standard par modalité.

N°	Modalité Fractionnement	Nombre de capsules moyen par plante	Déviation standard
1	0 - 0 kgN/ha	38	11,71
2	50 - 0 kgN/ha	47	6,86
3	80 - 0 kgN/ha	42	6,13
4	30 - 50 kgN/ha	48	4,52
5	50 - 30 kgN/ha	40	12,72
6	80 - 30 kgN/ha	47	3,65
p-valeur		0,433	

Un stress azoté aurait pu diminuer le nombre de capsules formées ce qui n'est pas statistiquement le cas. Cependant, la modalité témoin présente un nombre moyen de capsules inférieur par rapport aux autres modalités. Selon Hocking et al. (1991), le stress azoté a un impact négatif sur le taux de fleurs et donc sur le nombre de capsules produites contrairement à ce qui est démontré dans cet essai. Il y est même cité : « *L'effet dominant du stress azoté sur le rendement est la réduction du nombre de capsules par plante* ». Un stress azoté constant pouvant diminuer la production de capsules de 75% (Hocking et al., 1991). Ce même constat est posé par Gupta et al. (2017).

C. Rendement

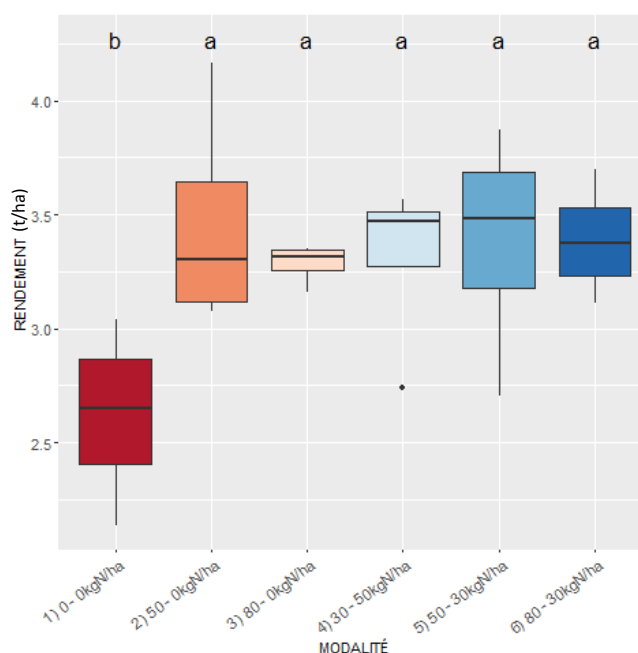


Figure 28 : Boxplot du rendement (t/ha) à 9% d'humidité de chaque modalité de fertilisation pour la récolte de 2022. Légende : couleur propre à chaque modalité, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

La différence de rendement entre modalités est hautement significative (p -valeur = $9,69.10^{-3}$). Seul le rendement de la modalité témoin (2,62t/ha) est significativement différent des autres. L'ensemble des rendements moyens sont repris en annexe 13.

Dans la présente étude, il y a une influence de la fertilisation sur le rendement avec une augmentation moyenne variant de 24 à 32% par rapport au témoin. L'augmentation de rendement est comparable aux 35% énoncés par Dordas (2011).

Gupta et al. (2017) admettent une augmentation de rendement lorsque de l'azote est appliqué. Cette augmentation n'est pas significativement différente lorsque la dose d'azote est augmentée. Les présents résultats ont montré que toutes les modalités apportant de l'azote atteignent des rendements comparables. De leur côté, Nuttall et al. (1991) et Diepenbrock et al. (1995) notent une augmentation du rendement dû à une augmentation de la fertilisation.

Ryser et al. (2001) sont plus nuancés. Ils préconisent une fertilisation à hauteur de 80 kgN/ha et ajoutent que l'augmentation de cette fertilisation permet, dans certaines situations, d'augmenter le rendement. Lafond (1993) tire la même conclusion. La culture de lin demande moins d'azote que d'autres cultures annuelles comme évoqué par Dordas (2012) et Herzog et al. (2017).

Selon Sankari (2000), Pageau et al. (2006), Zimmermann et al. (2006) et Andruszczak et al. (2016), la fertilisation n'a pas ou peu d'effet significatif sur le rendement, ce qui va à l'encontre des résultats précités. Cependant, une fertilisation trop importante augmente le risque de verse et diminue le rendement. Ils ajoutent que l'influence de la fertilisation azotée est très variable.

Concernant le fractionnement, il n'y a pas de différence significative au niveau du rendement entre la modalité 3 (sans fractionnement) et les modalités 4 et 5 qui fournissent toutes un total de 80 kgN/ha. La moyenne de rendement des modalités fractionnées est sensiblement supérieure à celle de la modalité sans fractionnement. La modalité 3 possède un plus petit écart-type que les modalités 4 et 5.

Selon Hocking et al. (1991), le fractionnement de la fertilisation azotée permet de diminuer les pertes d'azote dans le sol mais réduit le rendement si la fraction est apportée à une culture déficiente en azote après l'apparition des bourgeons. Cette perte de rendement n'a pas été observée dans ce travail.

Quatre modalités avaient déjà été testées l'an passé. L'ANOVA montre une différence significative entre modalités ($p\text{-valeur} = 2,84.10^{-2}$) et une différence hautement significative entre années ($p\text{-valeur} = 3,71.10^{-7}$). Il n'y a pas d'interaction entre ces deux facteurs.

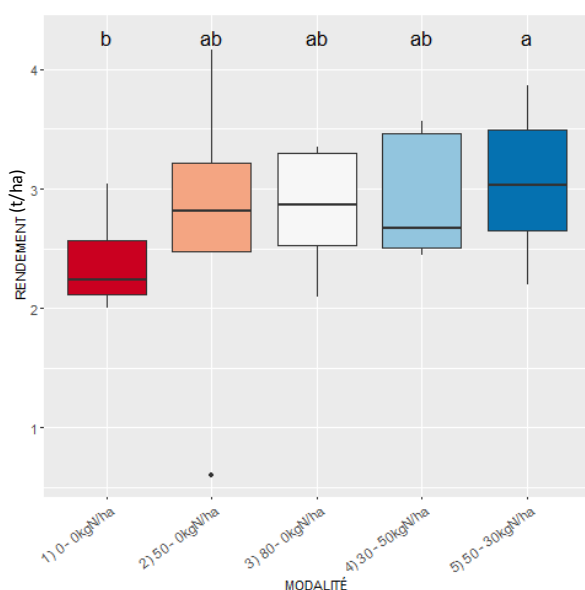


Figure 29 : Rendement à 9% d'humidité (t/ha) pour chaque modalité prenant en compte les récoltes de 2021 et 2022. Légende : couleur propre à chaque modalité, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

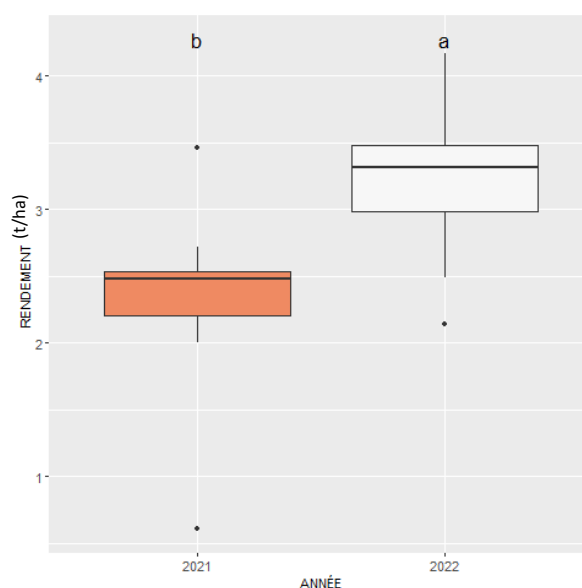


Figure 30 : Rendement à 9% d'humidité (t/ha) pour les récoltes de 2021 et 2022.

Légende : couleur propre à chaque année, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

La modalité 5 est classée première des rendements mais les modalités 2, 3 et 4 lui sont non significativement différentes. La modalité 1 est classée dernière mais est non significativement différentes des modalités 2, 3 et 4.

Le fractionnement des 80 kgN/ha aurait une certaine incidence sur le rendement. Une première fraction plus importante (50 kgN/ha) en début de reprise de végétation permettrait d'éviter que la plante soit trop carencée en azote au bourgeonnement lors de l'apport de la deuxième fraction. Les modalités 2 et 3 ne sont pas fractionnées et la modalité 4 apporterait trop peu d'azote en début de reprise de végétation. Selon Hocking et al. (1991), il est important que la culture ne soit pas déficiente en azote à l'apparition des bourgeons afin d'améliorer le rendement grâce à la seconde fraction. Il ajoute que la fertilisation après le stade 51 (bourgeons visibles) détermine le rendement mais également la teneur en huile. Il est possible de reporter la fertilisation jusqu'au stade 51 sans diminuer le rendement dans certaines conditions. Selon Herzog et al. (2017) à partir de 90 kgN/ha, il existe un risque de perte d'azote.

Les résultats ne sont pas similaires au point précédent étant donné que deux années de rendement sont prises en compte. Selon Pellet et al. (2004) et Dordas (2011), l'augmentation du rendement grâce à la fertilisation dépend en partie des conditions climatiques et donc de l'année d'où ce changement de classement.

Concernant le facteur année, l'année 2021 est significativement différente de l'année 2022 et présente un rendement inférieur. Les conclusions sont similaires à celles émises pour Angora au point 5.1.2.3.c.

5.2.2.2. Courbe critique de dilution de l'azote

Les relevés de biomasse inférieurs à 1t/ha ne peuvent pas être comparés à la courbe de référence de dilution de l'azote (Justes, 1994). Les deux premiers prélèvements ne sont donc pas pris en compte dans les discussions.

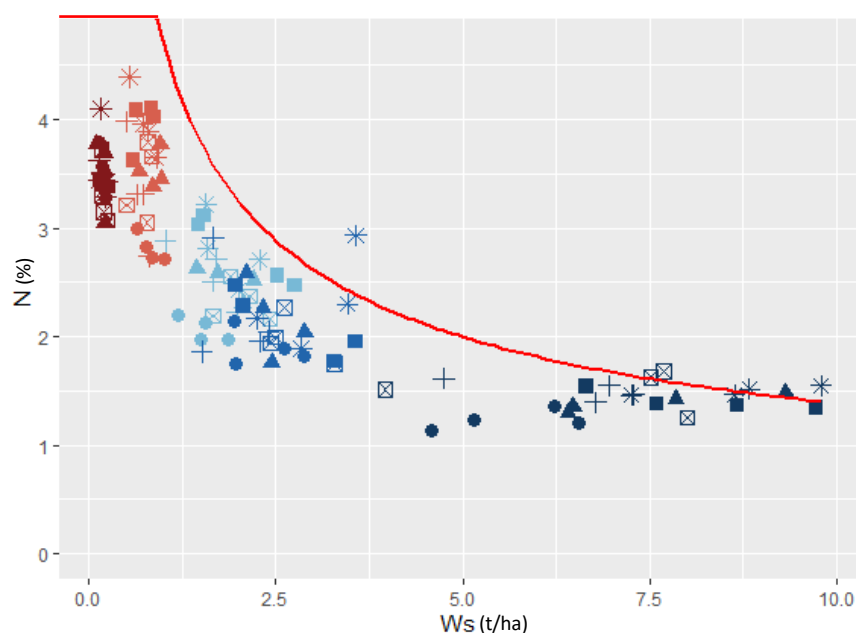


Figure 31 : Graphique de la courbe critique de dilution de l'azote et des valeurs de l'ensemble des prélèvements à chaque stade de prélèvement.

Légende : N = teneur en azote (%), Ws = Biomasse sèche (t/ha), modalités : ● = 1 (0 – 0 kgN/ha), ▲ = 2 (50 – 0 kgN/ha), ■ = 3 (80 – 0 kgN/ha), + = 4 (30 – 50 kgN/ha), ☒ = 5 (50 – 30 kgN/ha), * = 6 (80 – 30 kgN/ha), stades : ● = 10 cm, ● = 30 cm, ● = Bourgeonnement, ● = Début floraison, ● = Fin floraison, courbe en rouge = courbe critique de dilution de l'azote de référence du lin oléagineux.

Aucun prélèvement au bourgeonnement ne se trouve au-dessus de la courbe de dilution critique de l'azote. Un prélèvement de la modalité 6 se retrouve au-dessus de la courbe pour le stade « Début floraison ». Deux prélèvements de la modalité 5 et 6 et un prélèvement de la modalité 2 se retrouvent au-dessus de la courbe de référence pour le stade « Fin floraison ».

Lorsque le prélèvement se trouve en dessous de la courbe de référence cela signifie que celui-ci ne possède pas la concentration minimale d'azote pour produire un maximum de matière sèche (Flénet et al., 2006). Il y a une déficience en azote pour cette parcelle. Ce qui est le cas pour de nombreux prélèvements.

Le graphique suivant renseigne l'effet moyen de chaque modalité.

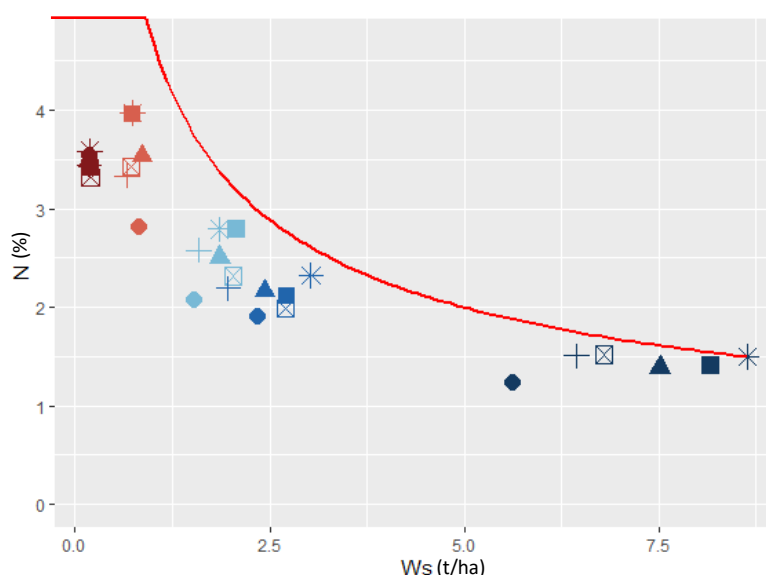


Figure 32 : Graphique de la courbe critique de dilution de l'azote et de la valeur moyenne par modalité pour chacun des stades de prélèvement.

Légende : N = teneur en azote (%), Ws = Biomasse sèche (t/ha), modalités : ● = 1 (0 – 0 kgN/ha), ▲ = 2 (50 – 0 kgN/ha), ■ = 3 (80 – 0 kgN/ha), + = 4 (30 – 50 kgN/ha), ☒ = 5 (50 – 30 kgN/ha), * = 6 (80 – 30 kgN/ha), stades : ● = 10 cm, ● = 30 cm, ● = Bourgeonnement, ● = Début floraison, ● = Fin floraison, courbe en rouge = courbe critique de dilution de l'azote de référence du lin oléagineux.

Au bourgeonnement, les modalités 3 et 6 sont situées au plus près de la courbe et la modalité 1 est la plus éloignée. Il en est de même pour le stade « Début floraison » mais la modalité 2 se rapproche de la courbe. Pour le dernier stade, la modalité 6 se trouve sur la courbe. La modalité 3 est sensiblement inférieure à celle-ci suivie de la modalité 2, 5 et 4. La modalité 1 est, comme pour les autres stades, la plus éloignée de la courbe.

Comme indiqué au point précédent, les conditions climatiques impactent fortement l'action de la fertilisation. Les précipitations peu abondantes après la première application ont eu pour conséquence une déficience azotée au stade bourgeonnement et début floraison. Les précipitations du mois de mars à mai ont été déficitaires par rapport aux normales saisonnières ne rendant pas l'azote disponible à la plante. De plus, le reliquat azoté était faible malgré un précédent pomme de terre.

Les modalités avec un apport plus élevé en première fraction sont plus proches de la courbe. La fertilisation tend à diminuer le stress azoté. Ce constat est similaire à celui du point précédent.

Selon Flénet et al. (2006), les valeurs maximales sur le graphique doivent être obtenues avec 40 à 80 kgN/ha. Aucun de ses prélèvements n'étaient en déficit azoté contrairement à cet essai. Le déficit hydrique de cette année semble avoir joué un grand rôle sur le positionnement des valeurs au sein du graphique.

5.3. Essai désherbage

5.3.1. Caractérisation du désherbage

La composition de la flore adventice était la suivante :

Tableau 28 : Flore adventice présente dans l'essai sur le désherbage.
Sources : (CRAAQ, May-7-2022; INRAE, May-7-2022; Syngenta, May-7-2022).

Nom vernaculaire	Nom latin	Famille
Chardon des champs	<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scopoli	Asteraceae
Épilobe à quatre angles	<i>Epilobium tetragonum</i>	Onagraceae
Gaillet gratteron	<i>Galium aparine</i> L.	Rubiaceae
Laiteron rude	<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill	Asteraceae
Matricaire camomille	<i>Matricaria chamomilla</i> L.	Asteraceae
Pâturin commun	<i>Poa trivialis</i>	Poaceae
Pomme de terre	<i>Solanum tuberosum</i>	Solanaceae
Renoncule rampante	<i>Ranunculus repens</i> L.	Ranunculaceae
Séneçon vulgaire	<i>Senecio vulgaris</i> L.	Asteraceae

5.3.1.1. Efficacité

A. Toutes les espèces d'adventices

Chacun des relevés d'adventices a montré une différence au moins significative après le premier désherbage mécanique réalisé pour les modalités 2,3 et 4. Les boxplots correspondant sont repris en annexe 14.

Tableau 29 : Groupes du test Newman-Keuls de l'efficacité de chaque modalité de désherbage en semaine +2, +4, +6 et +8.
Légende : lettre en **rouge** = efficacité plus élevée, lettre en **bleu** = efficacité plus faible, niveau de signification : * = significatif (p-valeur < 0,05), ** = hautement significatif (p-valeur < 0,01), *** = très hautement significatif (p-valeur < 0,001).

Modalité	Date du relevé à partir du premier désherbage mécanique			
	Semaine + 2	Semaine + 4	Semaine + 6	Semaine + 8
1 Témoin	b	b	ab	b
2 Houe + Herse	a	ab	ab	b
3 2 x Herse	a	a	a	ab
4 Herse + 2 x chimique	b	ab	ab	a
5 2 x chimique	b	ab	b	b
p-valeur	1,24.10 ⁻⁴ (***)	1,6.10 ⁻² (*)	3,24.10 ⁻² (*)	4,05.10 ⁻³ (**)

La modalité 3 est la plus efficace jusqu'à six semaines après la date du désherbage mécanique. Elle est non significativement différente de la modalité 4 ayant la meilleure efficacité huit semaines après le premier désherbage. La modalité témoin est classée dernière en semaine +2, +4 et +8 mais est non significativement différente de la modalité 5 en semaine +6.

En semaine +2, il est normal que les modalités 2 et 3 aient une efficacité supérieure aux modalités 1 et 5 étant donné qu'elles ont été désherbées mécaniquement deux semaines plus tôt et que le désherbage chimique a été réalisé la veille de ce comptage. La modalité 4 devrait se retrouver dans ce même groupe étant donné qu'elle a aussi été désherbée mais ce n'est pas le cas.

Il est intéressant de constater que quel que soit l'outil utilisé pour le désherbage mécanique (herse ou houe) l'efficacité à la semaine +2 est similaire, à l'exception de la modalité 4.

En semaine +4, le désherbage chimique a été effectué deux semaines avant le comptage et a eu un effet sur l'efficacité de la modalité 4 appartenant au groupe ab. La modalité 5 n'a pas bénéficié des effets du désherbage chimique mais se place tout de même dans le groupe ab dû à l'augmentation du nombre d'adventices de la modalité témoin. Les modalités 2 et 3 ont perdu en efficacité par rapport à la semaine +2.

En semaine +6, un désherbage mécanique a été réalisé pour les modalités 2 et 3 deux jours avant le comptage et un désherbage chimique a été appliqué aux modalités 4 et 5 la veille de celui-ci. L'efficacité des modalités 2 et 3 a augmenté. Les modalités 4 et 5 ont faiblement été impactées, l'effet du désherbage chimique ne pouvant pas être visible le jour après l'application du produit.

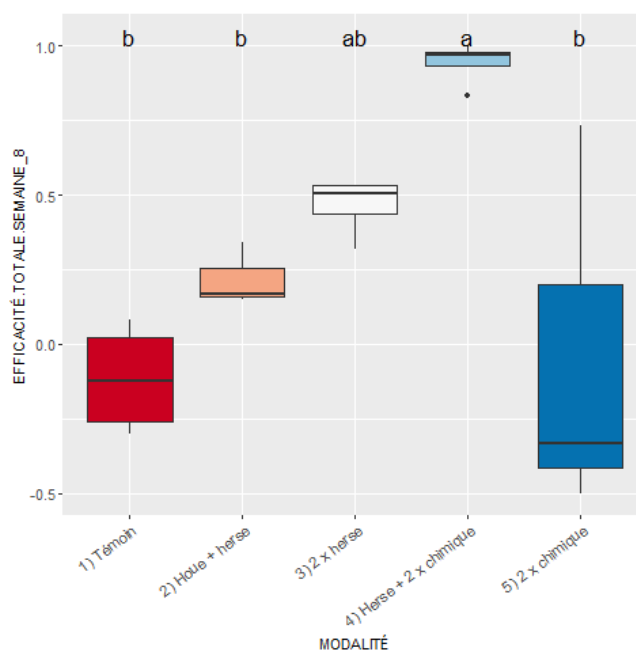


Figure 33 : Boxplot de l'efficacité des différentes modalités de désherbage en semaine +8.
Légende : couleur propre à chaque modalité, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

En semaine +8, le comptage final montre que la modalité 4 est la plus efficace de toutes. Néanmoins, la modalité 3 ne lui est pas significativement différente. Elle n'est pas non plus significativement différente aux autres modalités. Les modalités 2 et 5 se retrouvent dans le groupe b comme la modalité témoin.

L'efficacité du désherbage mécanique est inférieure à celle énoncée par Dastgheib (2006) qui s'élève à 40% après un passage (27 à 33% dans ce travail) et à 85% après deux passages (21 à 47% dans ce travail). Cette différence est principalement due au stade où le désherbage mécanique a été réalisé. Dastgheib (2006) réalise son désherbage sur des adventices peu développées (stade cotylédon) alors que dans ce travail les adventices étaient plus avancées dans leurs cycles (plus de 2 vraies feuilles).

Il faut rester critique par rapport à ces résultats. L'efficacité du désherbage est exprimée sur base de comptage d'adventices. Leur couverture et leur biomasse ne sont pas prises en compte. Les modalités 2 et 3 ont dû être broyées étant donné que, bien que le nombre d'adventices ait diminué, les gaillets gratterons se sont très fortement développés. La récolte aurait été impossible. Ce constat peut être observé sur les photos suivantes.

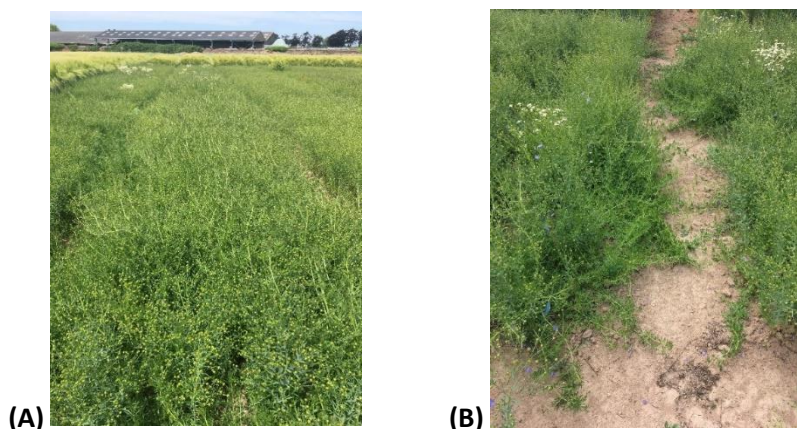


Figure 34 : Photos du développement des gaillets gratterons au 1er juin 2022. Sources personnelles.
Légende : (A) Parcelle de désherbage mécanique, (B) Chemin entre les parcelles de désherbage mécanique.

L'efficacité de la modalité 5 semble faible voire inexistante ce qui ne reflète pas non plus la réalité. Le produit utilisé en désherbage chimique visait essentiellement les gaillets gratterons. Les individus d'autres familles n'ont été que faiblement impactés et ont toujours été recensés dans les relevés même si leur incidence sur la culture était moindre.

B. Gaillets gratterons

Tableau 30 : Groupes du test Newman-Keuls de l'efficacité de chaque modalité de désherbage contre le gaillet en semaine +2, +4, +6 et +8.

Légende : lettre en **rouge** = efficacité plus élevée, lettre en **bleu** = efficacité plus faible, niveau de signification : . = non significatif (p -valeur $< 0,1$), *** = très hautement significatif (p -valeur $< 0,001$).

Modalité	Date du relevé à partir du premier désherbage mécanique			
	Semaine + 2	Semaine + 4	Semaine + 6	Semaine + 8
1 Témoin	b	a	a	c
2 Houe + herse	a	a	a	bc
3 2 x herse	a	a	a	ab
4 Herse + 2 x chimique	b	a	a	a
5 2 x chimique	b	a	a	a
p-valeur	$1,97 \cdot 10^{-4}$ (***)	$5,45 \cdot 10^{-2}$ (.)	$6,45 \cdot 10^{-2}$ (.)	$9,10 \cdot 10^{-4}$ (***)

L'analyse de l'efficacité centrée uniquement sur le gaillet gratteron conclu sur d'autres résultats (Annexe 15).

En semaine +2, les résultats sont similaires au point précédent étant donné que seul le désherbage mécanique a été réalisé.

En semaine +4, les différences entre modalités ne sont pas significatives. L'ensemble des modalités se retrouvent au sein du même groupe malgré des efficacités variant de -9% à 29%.

En semaine +6, les différences entre modalités ne sont pas non plus significatives malgré des différences d'efficacité de 0% à 49%. Le deuxième passage de désherbage mécanique n'a pas eu d'effet significatif sur la population de gaillet par rapport aux modalités comprenant du désherbage chimique.

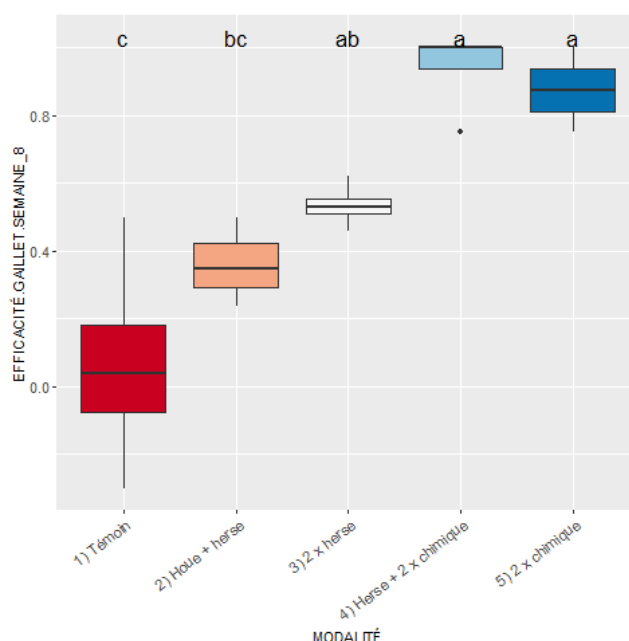


Figure 35 : Boxplot de l'efficacité de chaque modalité de désherbage contre le gaillet gratteron en semaine +8.
Légende : couleur propre à chaque modalité, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test de Newman-Keuls.

En semaine +8, le relevé final montre que les modalités 4 et 5 sont plus efficaces à hauteur de 90%. La modalité 3 n'est pas significativement différente de ces deux modalités mais n'est pas non plus significativement différente de la modalité 2. La modalité 2 n'est pas significativement différente de la modalité témoin. La modalité témoin se retrouve dernière au classement.

Le relevé final reflète mieux la réalité avec en première position, les modalités comprenant du désherbage chimique. Cela est cohérent étant donné que le produit utilisé cible essentiellement les gaillets. L'application d'herbicide est la solution la plus efficace en lin oléagineux comme énoncé par Nagar et al. (2020). Dans la plupart des cas étudiés par Carof et al. (2015), le désherbage est effectué à l'aide d'un à trois passages de désherbage chimique. Cependant Estela et al. (2007) évoquent qu'il est important de chercher des alternatives à l'utilisation d'herbicide pour rendre l'agriculture plus durable.

5.3.1.2. Sélectivité

Tableau 31 : Groupes du test Newman-Keuls de la sélectivité de chaque modalité de désherbage en semaine +2, +4, +6 et +8.

Légende : lettre en **rouge** = sélectivité plus élevée, lettre en **bleu** = sélectivité plus faible, niveau de signification : ** = non significatif (p -valeur $< 0,01$), *** = très hautement significatif (p -valeur $< 0,001$).

Modalité	Date du relevé à partir du premier désherbage mécanique			
	Semaine +2	Semaine +4	Semaine +6	Semaine +8
1 Témoin	a	a	a	a
2 Houe + herse	b	b	b	b
3 2 x herse	b	b	b	b
4 Herse + 2 x chimique	a	b	a	a
5 2 x chimique	a	a	a	a
p-valeur	$1,6.10^{-6}$ (***)	1.10^{-3} (***)	$2,96.10^{-3}$ (**)	$3,79.10^{-3}$ (**)

En semaine +2, l'impact du désherbage mécanique sur le nombre de lin est très hautement significatif (Annexe 16). Les modalités 2 et 3 se démarquent par une réduction du nombre de plantes du même ordre quel que soit l'outil utilisé (herse/houe). Néanmoins, la modalité 4 qui a été désherbée mécaniquement ne présente pas cette diminution de sélectivité.

En semaine +4, une différence se marque concernant la modalité 4 qui fait partie du groupe b démontrant une diminution de sélectivité. Les autres modalités n'ont pas évolué en termes de groupe.

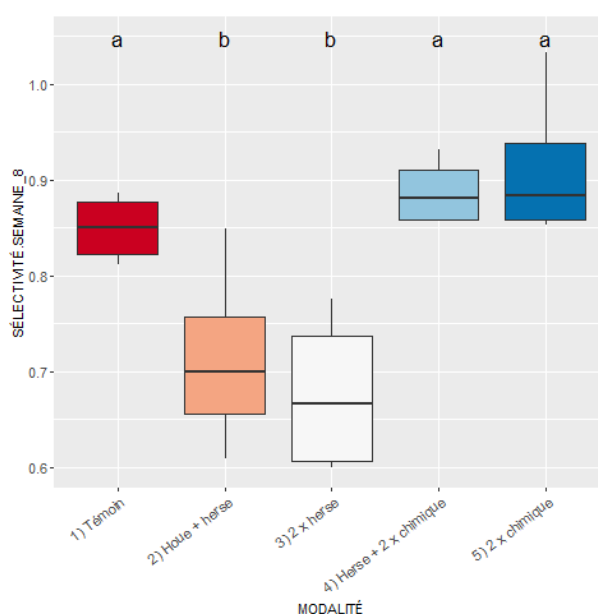


Figure 36 : Boxplot de la spécificité de chaque modalité de désherbage en semaine +8.

Légende : couleur propre à chaque modalité, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

En semaine +6 et +8, la modalité 4 se retrouve à nouveau dans le groupe a. Les modalités 2 et 3 ayant à nouveau fait l'objet d'un désherbage mécanique, la sélectivité a diminué. L'impact de ce désherbage n'a pas été observé à la semaine +6 étant donné que le désherbage avait été réalisé la veille du comptage et que les plantes étant encore vivantes. L'impact a été observé en semaine +8.

Les résultats d'analyses de la sélectivité des modes de désherbage mettent en avant l'impact du désherbage mécanique sur la réduction de la population de lin (29 à 32% de pertes) contrairement au désherbage chimique.

Dastgheib (2006) expose un pourcentage de perte de 27 à 30% à la suite d'un seul passage désherbage mécanique et jusqu'à 50% lorsqu'il est doublé. Ce pourcentage est nettement supérieur à ce qui a été relevé dans ce travail. Des cultures comme le pois et le froment ne perdent que 1 à 15% de la population après un passage de désherbage mécanique (Dastgheib, 2003). Il conseille en 2006 d'augmenter la densité de semis du lin pour pallier ces pertes.

Le changement de groupe de la modalité 4 en semaine +4 peut être dû à l'application de l'herbicide sur des plantes déjà fragilisées par le désherbage mécanique. Cela peut également être dû à une erreur de comptage au vu de l'évolution au cours de la semaine +6 ou la modalité s'apparente aux modalités 1 et 5 alors que la sélectivité des modalités 2 et 3 n'ont pas évolué.

5.3.1.3. Point de vue pratique

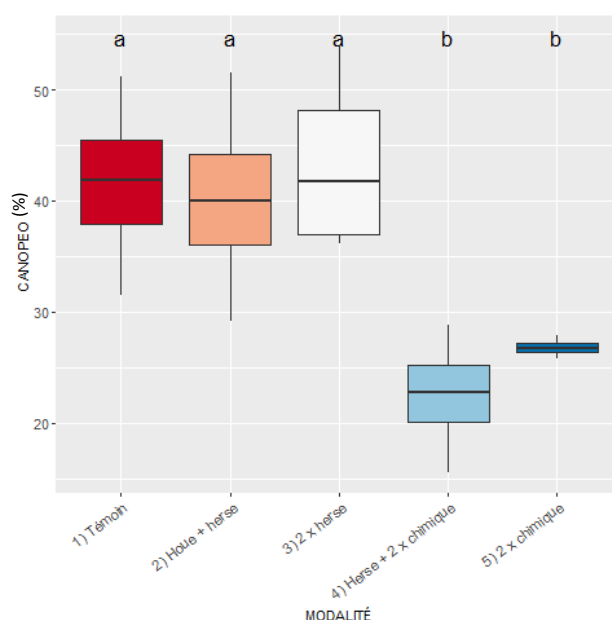


Figure 37 : Boxplot de la couverture du sol (%) de chaque modalité de désherbage.

Légende : couleur propre à chaque modalité, lettres situées au-dessus du graphique = groupes du test Newman-Keuls.

La couverture du sol des modalités 1, 2 et 3 est significativement supérieure à celle des modalités 4 et 5. Cette différence est hautement significative ($p\text{-valeur} = 1,11.10^{-3}$). La modalité 4 montre une couverture de sol sensiblement inférieure à la modalité 5 mais avec une déviation standard supérieure.

L'analyse de la couverture du sol juste avant le deuxième désherbage chimique et mécanique montre bien l'influence des premiers désherbages. Les modalités n'ayant pas reçu de traitement chimique ont une couverture de sol plus élevée due au développement des gaillets gratterons. De plus, comme énoncé au point 5.3.1.2., le nombre de lin a été impacté dès le premier désherbage mécanique laissant la place aux gaillets pour se développer diminuant la couverture du sol représentée par les plantes de lin. Cette observation est également relevée par Dastgheib (2006) où le désherbage, réalisé par des moutons, endommage la culture, ouvre celle-ci et permet aux adventices de se développer de façon plus vigoureuse.

Ce relevé de couverture du sol a été effectué au stade 30 cm. Après celui-ci, un deuxième désherbage mécanique a été réalisé malgré que le stade maximal recommandé pour le lin (10-12cm) et les

adventices ait été largement dépassé (Berard et al., 2020). Nagar et al. (2020) recommandent de gérer les adventices lorsque la hauteur de la culture se situe entre 5 et 10cm.

Ce dernier désherbage a eu pour conséquence de diminuer la population de lin mais également de stimuler la croissance du gaillet rendant la poursuite de la culture impossible. Dastgheib (2006) réalise ses deux passages de désherbage mécanique au stade cotylédon des adventices (lin 5-7cm) et au stade post-émergence de la culture (lin 9-12cm). Ce positionnement des désherbages réduit efficacement la densité d'adventices. Cependant, cette étude est réalisée en Nouvelle-Zélande où la réalisation du désherbage mécanique est peut-être plus facilement réalisable en début de saison qu'en Belgique.

Dastgheib (2006) évoque que la culture à des stades plus avancés est très sensible à la pression des roues.

Les désherbages chimiques peuvent être réalisés en pré-émergence du lin afin de limiter le risque de phytotoxicité (Lucomets et al., 2021).

Ehrensing (2008) et Lucomets et al. (2021) insistent sur le fait qu'il faut intervenir assez tôt pour réaliser le désherbage en culture de lin oléagineux.

6. Contribution personnelle

Au départ de ce travail de fin d'études, j'ai moi-même choisi les variables à mesurer sur la culture. J'ai bien entendu demandé validation auprès de mes encadrants. Je me suis ensuite occupée personnellement des relevés de données avec l'aide du personnel du CePiCOP lorsque la charge de travail était trop importante.

J'ai dû quelques fois m'adapter en fonction des difficultés liées au travail de terrain (conditions météorologiques, faisabilité des mesures, ...). J'ai parfois dû renoncer à certaines mesures trop ambitieuses au vu des moyens nécessaires pour les mettre en œuvre sans toutefois impacter la qualité de mon travail. J'ai réalisé un maximum de relevés de données au cours du développement de la culture afin d'anticiper le fait que la moisson ne puisse être réalisée ou que les résultats provenant d'intervenants extérieurs ne soient pas envoyés avant la date du dépôt du mémoire.

J'ai également appris pendant de longues heures à coder sur le logiciel R.



Figure 38 : Réalisation de cotation en champ. Source personnelle.



Figure 39 : Moisson des essais. Source personnelle.

Je me suis complètement investie dans ce travail pour fournir les meilleurs résultats possibles dans le but de faire avancer la recherche sur le sujet et potentiellement faire perpétuer l'étude du lin oléagineux dans le temps.

J'ai eu l'occasion d'échanger avec des personnes extérieures notamment lors des visites de champs. Ces échanges m'ont permis d'enrichir mes connaissances du point de vue pratique.

L'objectif majeur de mes recherches est de trouver des réponses aux questions pratiques des agriculteurs et des autres parties prenantes du secteur.

7. Conclusion et perspectives

L'essai variétal a permis de mettre en avant les variétés qui, cette année, étaient adaptées à la Belgique. L'ensemble de celles-ci, à l'exception d'Orival, semble l'être. Orival est écarté de la liste des variétés à recommander dû à sa faible densité en sortie d'hiver qui a eu un impact non négligeable sur son rendement.

Les variétés sous code, à savoir GOH22 et LSL1133, montrent de bonnes aptitudes démontrant l'amélioration résultant de la sélection. GOH22 se démarque particulièrement des autres variétés par son pouvoir couvrant et sa densité en sortie d'hiver. Cette caractéristique pourra être reprise pour la sélection de nouvelles variétés. Cependant, elle est plus tardive que les autres variétés, ce qui pourrait l'exposer aux stress hydriques et aux fortes chaleurs au moment de sa floraison, ce qui n'a toutefois pas impacté son rendement cette année.

Les plus anciennes variétés montrent également de bonnes caractéristiques notamment Attila qui a présenté une densité élevée en sortie d'hiver et a produit le meilleur rendement. Les autres variétés sont aussi intéressantes pour certains paramètres, le résumé de celles-ci est repris en annexe 17. Le choix entre l'une ou l'autre variété dépendra des attentes de l'agriculteur (couleur de graine, rendement, ...).

L'essai sur la fertilisation a démontré qu'un apport d'azote, à partir de 50 kgN/ha, augmente significativement le rendement par rapport à une modalité sans apport d'azote. Lorsque l'essai de l'année précédente est pris en compte, c'est la modalité 50-30 kgN/ha qui est la plus productive en termes de rendement sans être significativement différente des autres modalités.

Les modalités 80-0 kgN/ha et 80-30 kgN/ha permettent, cette année, d'augmenter sensiblement la biomasse aérienne et la teneur en azote de la plante. De plus, elles diminuent voire suppriment le stress azoté en fin de floraison.

Pour conseiller une fumure par rapport à une autre, il serait nécessaire de réaliser des analyses de qualité afin d'évaluer si la fertilisation azotée impacte, par exemple, la teneur en oméga 3 comme mentionné par Herzog et al. (2017).

L'essai désherbage a permis de souligner le manque d'efficacité et de sélectivité des modalités utilisant uniquement le désherbage mécanique. Ceux-ci ont été mal positionnés dans le temps et n'ont pas pu démontrer au mieux leurs avantages.

Le désherbage chimique a fait ses preuves malgré la persistance de certaines espèces d'adventices. Le choix en herbicide reste restreint en Belgique avec seulement 25 produits agréés.

Le désherbage mixte (mécanique et chimique) a permis d'améliorer l'efficacité du désherbage chimique sur l'ensemble des espèces d'adventices. C'est ce dernier mode de désherbage qui serait à conseiller regardant l'efficacité.

Afin de statuer sur la variété, la fumure azotée et le mode de désherbage à recommander pour une optimisation de la conduite culturale du lin oléagineux d'hiver, il est important de réitérer ces essais sur plusieurs années.

Quelques recommandations peuvent être émises telles que :

- Réaliser des analyses sur la qualité pour l'essai variétal et l'essai fertilisation.
- Repositionner les désherbages mécaniques en début de saison.
- Réaliser les essais dans différentes régions de la Belgique.
- Étudier d'autres facteurs influençant la conduite culturale du lin oléagineux d'hiver comme la fertilisation en zinc, la densité et la date de semis, la technique de récolte (andainage, moisson, ...), le coût économique des différentes pratiques, ...

Le lin oléagineux d'hiver n'est qu'à ses débuts mais promet un bel avenir. Il permettra aux éleveurs belges de nourrir leurs animaux (bovins, volailles, ...) avec des aliments et co-produits locaux aux caractéristiques intéressantes. D'autres filières autour du lin oléagineux pourraient être développées notamment autour de la valorisation de ses pailles ou de son huile.

Le succès français de Valorex va-t-il inspirer les coopératives et entreprises belges ?

8. Bibliographie

- Andruszczak S., Gawlik-Dziki U., Kraska P., Kwiecińska-Poppe E., Różyło K. & Pałys E., 2016. Yield and quality traits of two linseed (*Linum usitatissimum* L.) cultivars as affected by some agronomic factors. *Plant Soil Environ.* **61**(No. 6), 247–252, DOI:10.17221/120/2015-PSE.
- Berard S. & Plessix S., 2020. *Guide de culture lin 2020*, Terres Inovia.
- Bert F., 2013. *Lin fibre: culture et transformation*, Paris: Arvalis.
- Bodson B., De Proft M. & Watillon B., 2019. Livre Blanc Céréales : Edition Septembre 2019.
- Bouhache M., Taleb A., Elbilali T. & Chetouani M., 2014. Efficacité des herbicides de pré-émergence utilisés dans le désherbage du maïs. *Rev Mar Sci Agron Vét* **2**(2), 16–21.
- Carof M., Raimbault J., Merrien A. & Leterme P., 2015. Survey of 47 oilseed flax (*Linum usitatissimum* L.) growers to identify ways to expand its cultivation in France. *OCL* **22**(6), D604, DOI:10.1051/ocl/2015043.
- 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. *Eur. J. Agron.* **11**(3–4), 267–278, DOI:10.1016/S1161-0301(99)00037-4.
- Charrier F., Magrini M.-B., Charlier A., Fares M., Le Bail M., 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.
- Conforti F.D. & Cachaper K.F., 2009. Effects of selected antioxidants on physical and sensory characteristics of yeast bread containing flaxseed meal. *Int. J. Consum. Stud.* **33**(1), 89–93, DOI:10.1111/j.1470-6431.2008.00729.x.
- CRAAQ, May-7-2022. IRIIS phytoprotection. *IRIIS Phytoprotection*. <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/>, (07/05/2022).
- Damsin S., 2022. Euroclim Lait Dumoulin / Durabilité 2.0 FR. *Agrivirtual*. <https://agrivirtual.eu/reduisez-les-emissions-de-methane-de-vos-vaches-laitieres-jusqua-10-avec-euroclim/>, (04/05/2022).
- D’Antuono L.F. & Rossini F., 1995. Experimental estimation of linseed (*Linum usitatissimum* L.) crop parameters. *Ind. Crops Prod.* **3**(4), 261–271, DOI:10.1016/0926-6690(95)00004-V.
- Dastgheib F., 2003. Timing and frequency of tine weeding in organic wheat and pea crops. *Agron. NZ* **32**, 43–49.
- Dastgheib F., 2006. Non-chemical weed management in linseed. *Agron. NZ* **36**, 4–11.
- Diepenbrock W.A., Léon J. & Clasen K., 1995. Yielding Ability and Yield Stability of Linseed in Central Europe. *Agron. J.* **87**(1), 84–88, DOI:10.2134/agronj1995.00021962008700010015x.
- Dordas C.A., 2010. Variation of physiological determinants of yield in linseed in response to nitrogen fertilization. *Ind. Crops Prod.* **31**(3), 455–465, DOI:10.1016/j.indcrop.2010.01.008.
- Dordas C.A., 2011. Nitrogen nutrition index and its relationship to N use efficiency in linseed. *Eur. J. Agron.* **34**(2), 124–132, DOI:10.1016/j.eja.2010.11.005.
- Dordas C.A., 2012. Nitrogen and dry matter dynamics in linseed as affected by the nitrogen level and genotype in a Mediterranean environment. *Biomass Bioenergy* **43**, 1–11, DOI:10.1016/j.biombioe.2012.04.001.
- Ehrensing D.T., 2008. Flax (EM 8952) (Technical Report), Oregon, Oregon State University. Agricultural Experiment Station.

- Estela G., Schalamuk S.-V.S. & Sarandón S.J., 2007. Effect of Different Sowing Patterns of Oil Linseed (*Linum usitatissimum* L.) Crop on *Brassica* sp. as a Strategy for Sustainable Weed Management. *Biol. Agric. Hortic.* **25**(2), 123–131, DOI:10.1080/01448765.2007.9755041.
- Evon P., Barthod-Malat B., Grégoire M., Vaca G., Labonne L., Ballas S., Véronèse T. & Ouagne P., 2019. Fabrication de panneaux agglomérés de fibres à partir des anas collectés lors de l'extraction mécanique des fibres libériennes de la paille de lin oléagineux. *J. Compos. Adv. Mater.* **29**(1), 95–105.
- FAO, February-21-2022. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/fr/>, (21/02/2022).
- 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. *Eur. J. Agron.* **24**(4), 367–373, DOI:10.1016/j.eja.2006.01.002.
- Flénet F., Villon P. & Ruget F., 2004. Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop: spring linseed (*Linum usitatissimum*, L.). *Agronomie* **24**(6–7), 367–381, DOI:10.1051/agro:2004032.
- Google Maps, March-15-2022. . *Google Maps*. <https://www.google.be/maps/>, (15/03/2022).
- 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 **29**(1), 107–112.
- Gupta M., Kour S., Gupta V., Bharat R. & Sharma C., 2017. Effect of different doses of fertilizers on yield and npk uptake of linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Bengladesh J. Bot.* **46**(2), 575–581.
- Hassan F.U. & Leitch M.H., 2000. Influence of Seeding Density on Contents and Uptake of N, P and K in Linseed (*Linum usitatissimum* L.). *J. Agron. Crop Sci.* **185**(3), 193–199, DOI:10.1046/j.1439-037x.2000.00427.x.
- Hassan F.U. & Leitch M.H., 2001. Dry Matter Accumulation in Linseed (*Linum usitatissimum* L.)*. *J. Agron. Crop Sci.* **187**(2), 83–87, DOI:10.1046/j.1439-037x.2001.00504.x.
- Hassan F.U., Leitch M.H. & Ahmad S., 1999. Dry Matter Partitioning in Linseed (*Linum usitatissimum* L.). *J. Agron. Crop Sci.* **183**(3), 213–216, DOI:10.1046/j.1439-037x.1999.00305.x.
- Heller K., Sheng Q.C., Guan F., Alexopoulou E., Hua L.S., Wu G.W., Jankauskienė Z. & Fu W.Y., 2015. A comparative study between Europe and China in crop management of two types of flax: linseed and fibre flax. *Ind. Crops Prod.* **68**, 24–31, DOI:10.1016/j.indcrop.2014.07.010.
- Henri L., May-4-2022. En direct de mon élevage - Notre viande. *En Direct Mon Élev.* <https://www.endirectdemonlevage.be/notre-viande.html>, (04/05/2022).
- Herzog C., Anderegg J. & Luginbühl C., 2017. La fumure azotée du lin oléagineux influence le rendement en graines et la qualité de l'huile. *Rech. Agron. Suisse* **8**(5), 168–175.
- 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 Res.* **27**(1–2), 83–102, DOI:10.1016/0378-4290(91)90024-P.
- INRAE, May-7-2022. Ephytia. <http://ephytia.inra.fr/>, (07/05/2022).
- IRM, July-29-2022. Bilans climatologiques. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2021/annee>, (29/07/2022).
- Justes E., 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Ann. Bot.* **74**(4), 397–407, DOI:10.1006/anbo.1994.1133.

- Karimmojeni H., Pirbaloti A.G., Kudsk P., Kanani V. & Ghafori A., 2013. Influence of Postemergence Herbicides on Weed Management in Spring-Sown Linseed. *Agron. J.* **105**(3), 821–826, DOI:10.2134/agronj2012.0238.
- Kaur P., Waghmare R., Kumar V., Rasane P., Kaur S. & Gat Y., 2018. Recent advances in utilization of flaxseed as potential source for value addition. *OCL* **25**(3), A304, DOI:10.1051/ocl/2018018.
- Klimek-Kopyra A., Zajac T., Micek P. & Borowiec F., 2012. Effect of Mineral Fertilization and Sowing Rate on Chemical Composition of Two Linseed Cultivars. *J. Agric. Sci.* **5**(1), p224, DOI:10.5539/jas.v5n1p224.
- Kole C. (Ed.), 2007. *Oilseeds*, Genome mapping and molecular breeding in plants, Berlin ; New York: Springer, 302.
- Labalette F., Landé N., Wagner D., Roux-Duparque M. & Sallet E., 2011. La filière lin oléagineux française : panorama et perspectives. *Ol. Corps Gras Lipides* **18**(3), 113–122, DOI: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.
- Lafond G.P., 1993. The effects of nitrogen, row spacing and seeding rate on the yield of flax under a zero-till production system. *Can. J. Plant Sci.* **73**(2), 375–382, DOI:10.4141/cjps93-056.
- Lucomets V.M., Bushnev A.S. & Orekhov G.I., 2021. Weed control in oil flax sowings. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **650**(1), 012040, DOI:10.1088/1755-1315/650/1/012040.
- Luginbühl C. & Herzog C., 2015. Des pistes pour optimiser la production de lin oléagineux en Suisse. *Rech. Agron. Suisse* **6**(7–8), 304–311.
- Mekhlouf A., Bouzerzour H., Benmahammed A., Sahraoui A.H. & Harkati N., 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse* **17**(4), 507–513, DOI:10.1684/sec.2006.0054.
- Menoux Y., 1986. Recherche de critères de résistance à l'hiver pour le lin. *Agronomie* **6**(9), 789–796, DOI:10.1051/agro:19860902.
- Meynard J.-M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M.-B. & Savini I., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures : étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. *OCL* **20**(4), D403, DOI:10.1051/ocl/2013007.
- Morin O., 2015. Caractéristiques des huiles de lin et de chanvre. *OCL* **22**(6), D608, DOI:10.1051/ocl/2015053.
- Motard C. & Fourni C., 2021. Synthèse variétale nationale. Lin oléagineux d'hiver 2021, Terres Inovia.
- Motard C. & Plessix S., 2020. Synthèse variétale nationale. Lin oléagineux d'hiver 2020, Terres Inovia.
- Mouroit J. & de Tonnac A., 2015. The Bleu Blanc Cœur path: impacts on animal products and human health. *OCL* **22**(6), D610, DOI:10.1051/ocl/2015051.
- Müller W.O., February-21-2022. Plantes messicoles de l'Avesnois/Atlas des plantes messicoles/Présentation des espèces secondaires/*Linum usitatissimum* L. https://fr.wikibooks.org/wiki/Plantes_messicoles_de_l%27Avesnois/Linum_usitatissimum_L_, (21/02/2022).
- Nagar R., Bhatnagar G.S., Trivedi S.K., Kumar Meena R. & Nagar D., 2020. Efficacy of Various Herbicides and their Concentration on Weed Management of Linseed in India. *Curr. Res. Agric. Farming* **1**(4), 47–51, DOI:10.18782/2582-7146.122.

- Nuttall W.F. & Malhi S.S., 1991. The effect of time and rate of N application on the yield and N uptake of wheat, barley, flax and four cultivars of rapeseed. *Can. J. Soil Sci.* **71**(2), 227–238, DOI:10.4141/cjss91-022.
- 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.
- 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.
- Patil R., Paul S., Sharma D., Sood V.K. & Kumar N., 2019. Morphological characterization and genetic diversity of linseed (*Linum usitatissimum* L.). *J. Oilseeds Res.* **36**(1), 8–16.
- Patrignani A. & Ochsner T.E., 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agron. J.* **107**(6), 2312–2320, DOI:10.2134/agronj15.0150.
- Pellet D. & Vullioud P., 2004. Lin d'hiver ou de printemps: une culture à découvrir. *Rev. Suisse Agric* **36**(3), 109–116.
- Royer C., Brisset G. & Duval R., 2020. Le désherbage mécanique en culture de betterave. *Innovations Agronomiques* 81, 117-135 DOI:10.15454/9VCB-AC58.
- Ryser J.P., Walther U. & Flisch R., 2001. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. *Rev Suisse Agric* **33**, 4–80.
- Sankari H.S., 2000. Linseed (*Linum usitatissimum* L.) Cultivars and Breeding Lines as Stem Biomass Producers. *J. Agron. Crop Sci.* **184**(4), 225–231, DOI:10.1046/j.1439-037x.2000.00375.x.
- Savoire R., Lazouk M., Van-Hecke E., Roulard R., Tavernier R., Guillot X., Rhazi L., Petit E., Mesnard F. & Thomasset B., 2015. Environmental and varietal impact on linseed composition and on oil unidirectional expression process. *OCL* **22**(6), D605, DOI:10.1051/ocl/2015016.
- Semences de France, 2021a. Fiche variétale : Attila (Lin oléagineux - Hiver).
- Semences de France, 2021b. Fiche variétale : Merinos (Lin oléagineux - Hiver).
- Semences de France, 2022a. Fiche variétale : Angora (Lin oléagineux - Hiver).
- Semences de France, 2022b. Fiche variétale : Cledor (Lin oléagineux - Hiver).
- Sharma M., Dadhwal K., Gat Y., Kumar V., Panghal A., Prasad R., Kaur S. & Gat P., 2019. A review on newer techniques in extraction of oleaginous flaxseed constituents. *OCL* **26**, 14, DOI:10.1051/ocl/2019006.
- Sicard H., Gainche J. & Fontaine N., 2013. Notice du module adventices de la BAO RotAB.
- Smith J.M. & Froment M.A., 1998. A growth stage key for winter linseed (*Linum usitatissimum*). *Ann. Appl. Biol.* **133**(2), 297–306, DOI:10.1111/j.1744-7348.1998.tb05829.x.
- SPF, April-5-2022. Le climat. *Klim. Clim.* <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/climat>, (05/04/2022).
- SPW, March-15-2022. WalOnMap | Géoportail de la Wallonie. <https://geoportail.wallonie.be/walonmap>, (15/03/2022).
- STATBEL, February-21-2022. Exploitations agricoles et horticoles - Plus de chiffres | Statbel. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles/plus>, (21/02/2022).
- Syngenta, May-7-2022. Maladies, ravageurs et adventices des cultures. *Syngenta Fr.* <https://www.syngenta.fr/adventices-des-cultures>, (07/05/2022).

- Terres Inovia, April-5-2022. Myvar : L'outil de Terres Inovia pour connaître et choisir ses variétés. <https://www.myvar.fr/>, (05/04/2022).
- Terres Univia, February-21-2022. Lin - Cultures & utilisation - Terres Univia. <https://www.terresunivia.fr/cultures-utilisation/lin>, (21/02/2022).
- Tremblin G. & Marouf A., 2021. *Abrégé de biologie végétale appliquée*, EDP sciences, 552.
- VASCAN, February-21-2022. *Linum usitatissimum* Linnaeus - Base de données des plantes vasculaires du Canada (VASCAN). <https://data.canadensys.net/vascan/taxon/6560?lang=fr>, (21/02/2022).
- 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.
- Worku N., Heslop-Harrison J.S. & Aduana W., 2015. Diversity in 198 Ethiopian linseed (*Linum usitatissimum*) accessions based on morphological characterization and seed oil characteristics. *Genet. Resour. Crop Evol.* **62**(7), 1037–1053, DOI:10.1007/s10722-014-0207-1.
- Zimmermann R., Bauermann U. & Morales F., 2006. Effects of growing site and nitrogen fertilization on biomass production and lignan content of linseed (*Linum usitatissimum* L.). *J. Sci. Food Agric.* **86**(3), 415–419, DOI:10.1002/jsfa.2364.
- Zuk M., Richter D., Matuła J. & Szopa J., 2015. Linseed, the multipurpose plant. *Ind. Crops Prod.* **75**, 165–177, DOI:10.1016/j.indcrop.2015.05.005.

9. Annexes

Annexe 1 : Échelle BBCH traduite de (Smith et al., 1998).

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

8 Maturité des capsules et graines	
81	Les capsules deviennent jaunes
83	La plupart des graines deviennent de couleur jaune ivoire
85	Toutes les capsules sont jaunes bruns mais molles
87	La plupart des graines deviennent brunes
88	Toutes les graines sont brunes et dures
89	Capsules brunes, sèches et sénescentes, graines tintent dans la capsule (→ récolte)
9 Senescence de la tige	
91	Tiges principalement vertes en dessous de la panicule
93	Les plupart des tiges 30% brunes
95	La plupart des tiges 50% brunes
97	Tiges 75% brunes
99	Tiges complètement brunes

Annexe 2 : Dispositif expérimental de l'essai variétal.

Légende : R = répétition, T = traité (fongicide + régulateur), NT = non traité (régulateur), bloc en bleu = traité, bloc en blanc = non traité.

N° Colonne	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N° ligne	R1 T					R2 T					R3 T				
800	8	3	2	9	6	5	10	8	9	7	7	6	5	8	1
700	1	10	4	5	7	4	1	6	2	3	2	4	10	9	3
600	6	7	8	9	10	5	4	2	1	10	5	4	6	10	9
500	1	2	3	4	5	3	7	6	9	8	1	3	2	8	7
	R1 NT					R2 NT					R3 NT				

Annexe 3 : Dispositif expérimental de l'essai fertilisation.

Légende : R = répétition, D = parcelle destructive, bloc en bleu = destructif, bloc en blanc = non destructif.

N° Colonne	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
N° ligne	R3			R4			R3 D			R4D		
800	4	5	6	1	6	5	2	1	3	2	1	6
700	1	2	3	3	2	4	6	5	4	4	3	5
600	4	5	1	3	5	1	5	6	2	5	6	2
500	2	3	6	2	4	6	4	3	1	4	3	1
	R1			R2			R1 D			R2 D		

Annexe 4 : Dispositif expérimental de l'essai désherbage.

Légende : R = répétition.

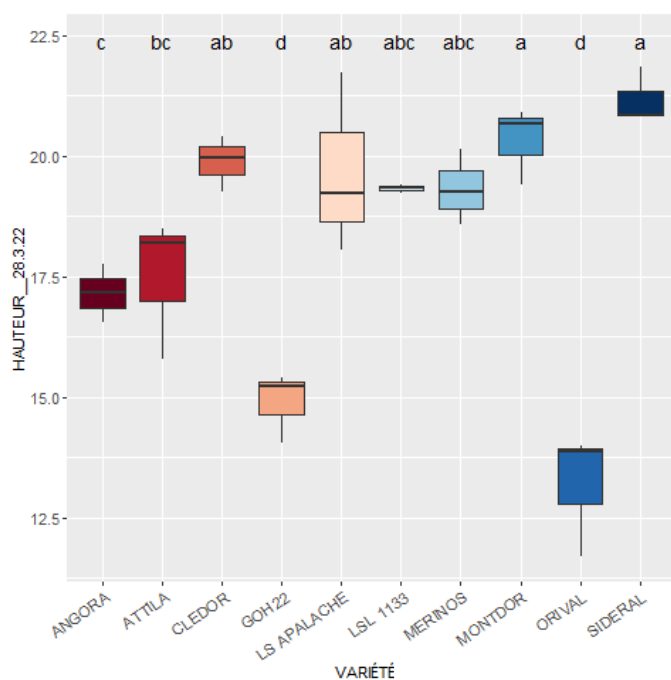
N° Colonne	28	29	30	31	32	
N° ligne						
800	5	1	4	3	2	R4
700	5	1	4	3	2	R3
600	5	1	4	3	2	R2
500	5	1	4	3	2	R1

Annexe 5 : Tableau des opérations culturales détaillées pour chaque facteur étudié.

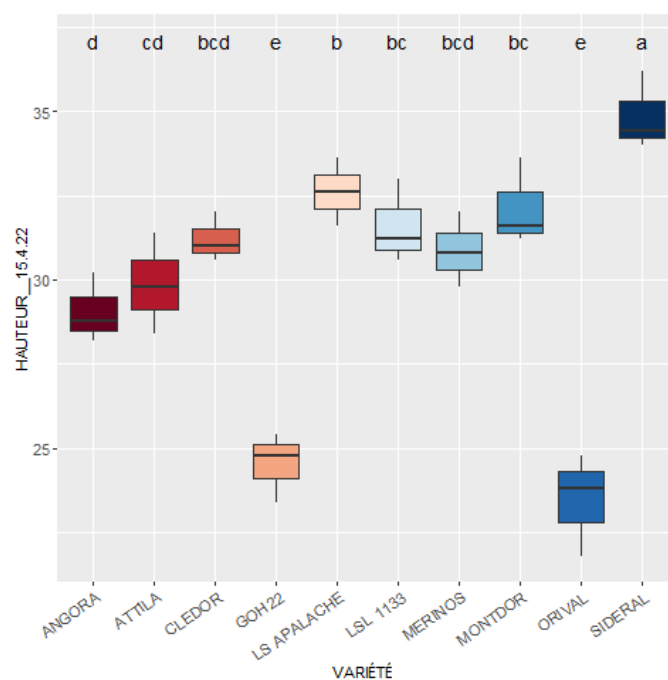
Date		Opérations culturales		
		Essai VARIETES	Essai DESHERBAGE	Essai FERTILISATION
Mois	Jour			
Octobre	10	Semis		
		Variétés : 10 différentes	Variété : Angora	Variété : Angora
		Précédent : Pomme de terre Préparation du sol : labour + herse rotative Densité : 350 grains/m² Interligne : 12,5 cm Surface d'une micro-parcelle : 16m²		
Mars	10		Désherbage mécanique (Modalités : 2,3,4)	
		Fertilisation		
	17	Quantité : 80 U d'azote		Quantité : 1 ^{ère} fraction en fonction des modalités
	22		Désherbage chimique (Modalités : 4, 5)	
	24	Désherbage chimique Produit utilisé : Gratil 40 g/ha		Désherbage chimique Produit utilisé : Gratil 40 g/ha
28	Traitement fongicide			
	Produit utilisé : RIZA EC 1,25 l/ha			
	Pour les parcelles traitées	Sur toutes les parcelles		
Avril	13	Régulateur		
		Produit utilisé : Caramba (0,5 l/ha)		
	19	Désherbage chimique		
		Produit utilisé : Gratil (40 g/ha)		
		Sur toutes les parcelles	Seulement la modalité 5	+ Fertilisation
				2 ^{ème} fraction de fertilisation pour les modalités 4, 5 et 6
	20		Désherbage mécanique et chimique Chimique seulement la modalité 4 Produit utilisé : Gratil (40 g/ha)	
26	Régulateur			
	Produit utilisé : Caramba (0,7 l/ha)			
Juin	24		Broyage Toutes les parcelles des modalités 2 et 3	
Juillet	24	Récolte		

Annexe 6 : Boxplots des hauteurs (cm) de chaque variété aux différentes dates de prise de mesures.
 Légende : couleur propre à chaque variété, lettre au-dessus du graphe = groupes du test Newman-Keuls.

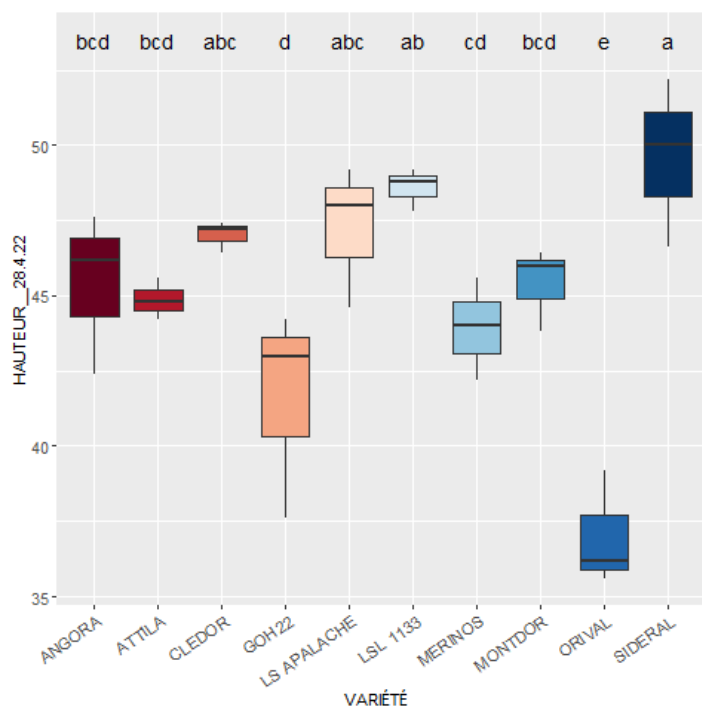
Hauteurs (cm) au 28/03/2022



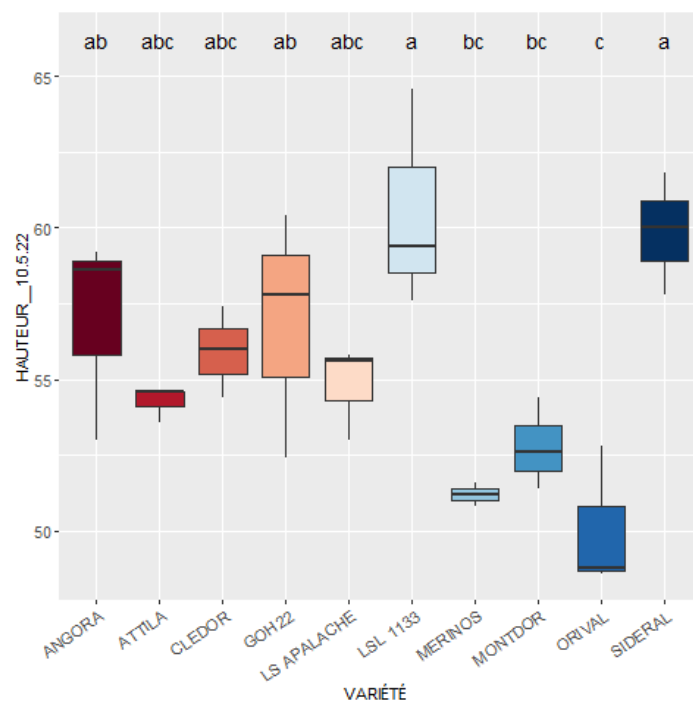
Hauteurs (cm) au 15/04/2022

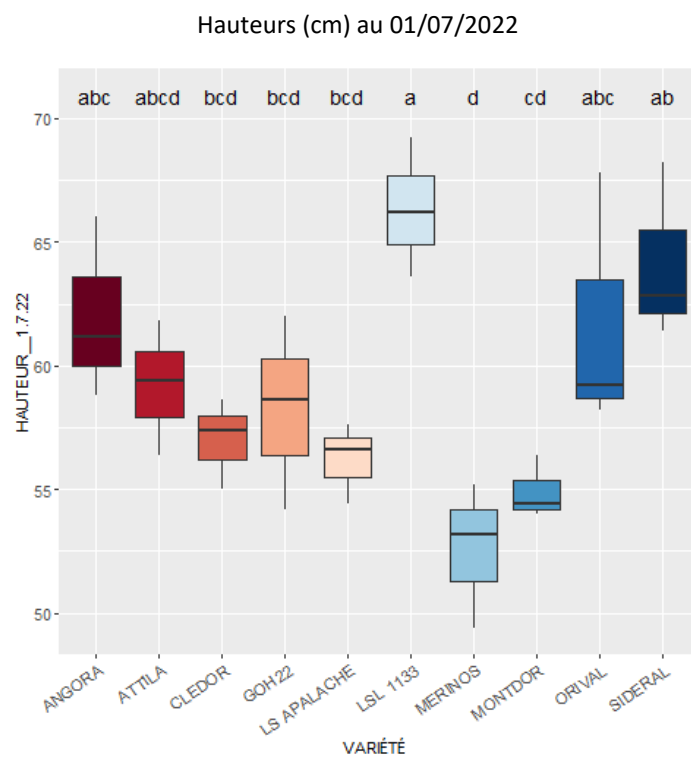
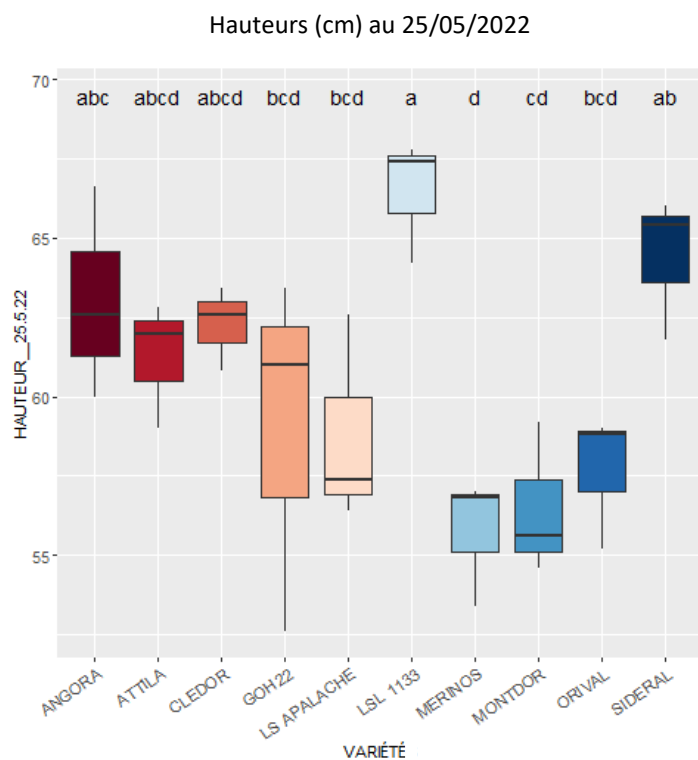


Hauteurs (cm) au 28/04/2022



Hauteurs (cm) au 10/05/2022

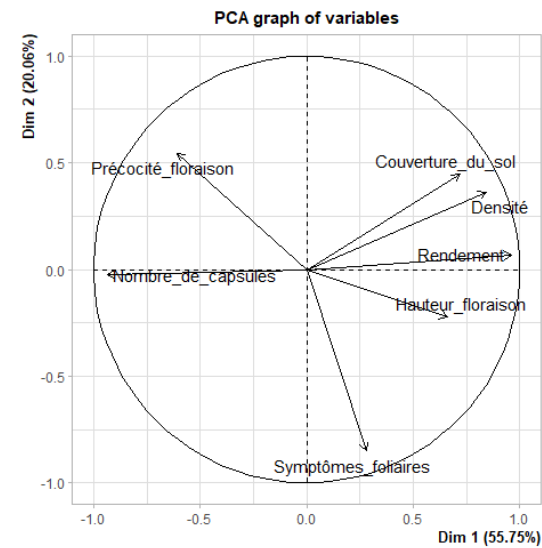




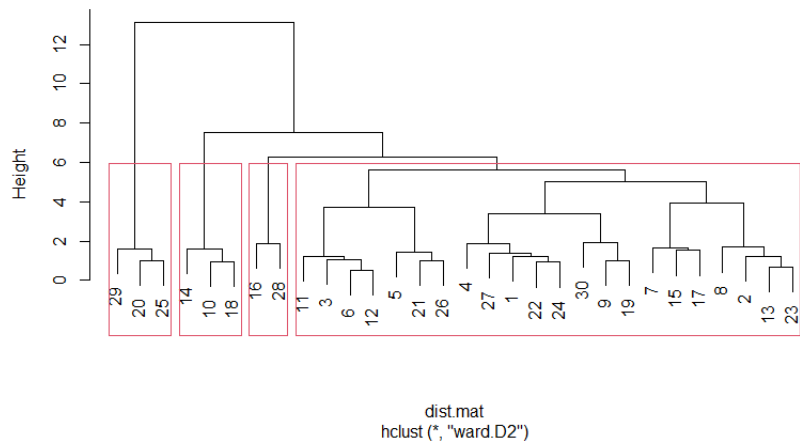
Annexe 7 : Tableau récapitulatif des rendements variétaux moyens à 9% d'humidité (t/ha) \pm std de 2020 à 2022.

Variété	Rendement à 9% d'humidité (t/ha) \pm std			Moyenne 2021-2022
	2020	2021	2022	
ANGORA	3,26 \pm 0,25	2,27 \pm 0,36	3,43 \pm 0,40	2,79 \pm 0,72
ATTILA		2,25 \pm 0,33	4,09 \pm 0,21	3,03 \pm 0,98
CLEDOR			3,46 \pm 0,10	
GOH 22			3,95 \pm 0,18	
LS APALACHE		1,67 \pm 0,16	3,95 \pm 0,11	2,72 \pm 1,19
LSL 1133			4,05 \pm 0,10	
MERINOS			3,60 \pm 0,19	
MONTDOR			3,54 \pm 0,10	
ORIVAL			1,29 \pm 0,22	
SIDERAL		2,22 \pm 0,29	3,85 \pm 0,19	2,84 \pm 0,85

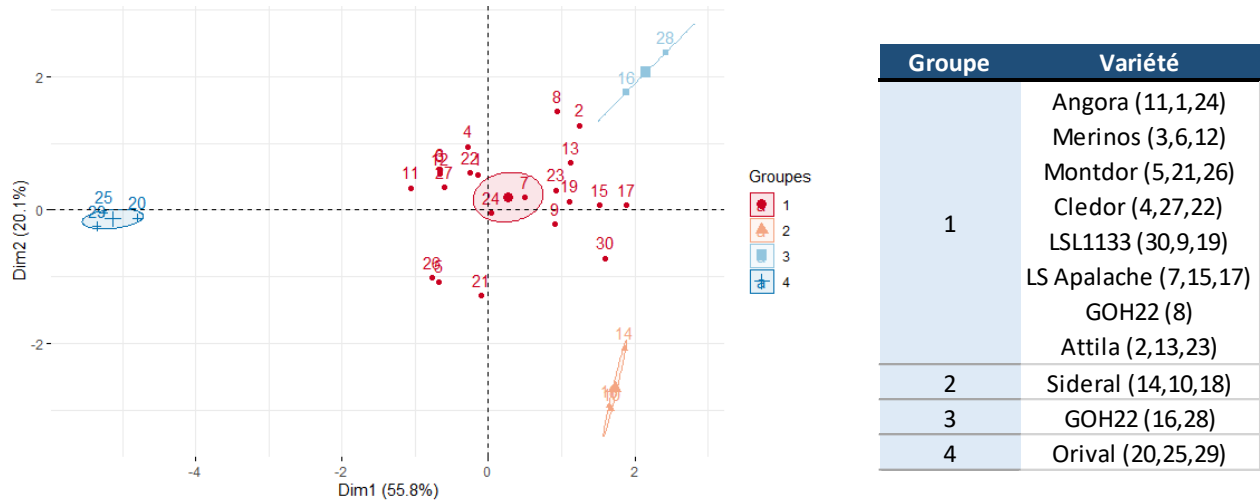
Annexe 8 : Graphe des variables explicatives par rapport aux dimensions 1 et 2 de l'ACP.



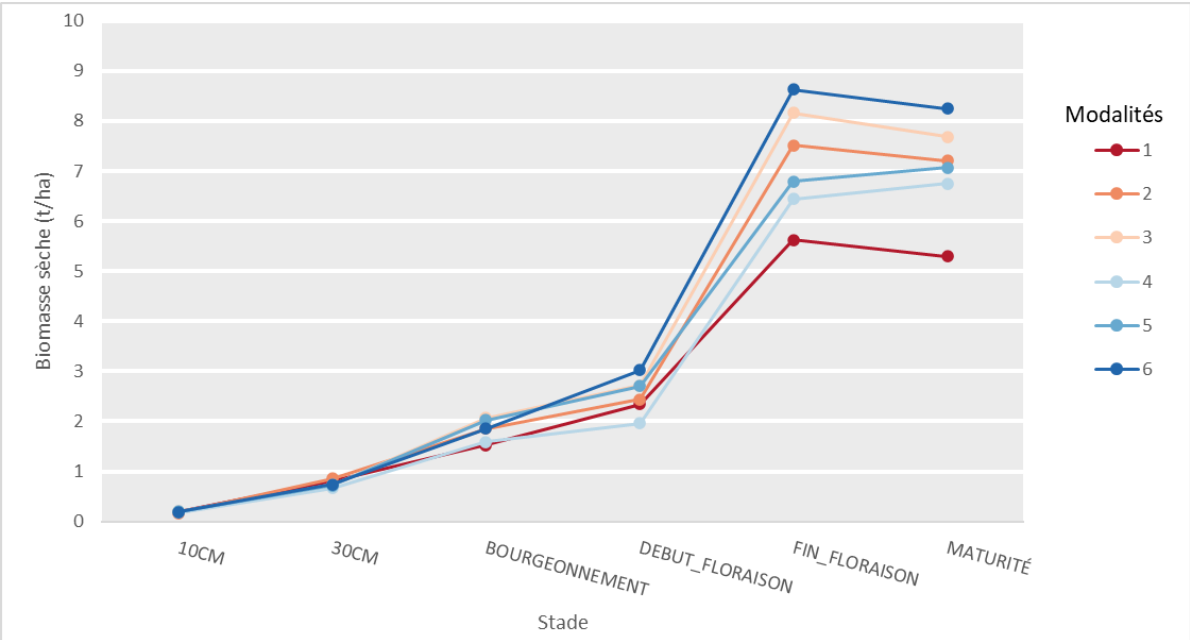
Annexe 9 : Dendrogramme scindant les individus par groupe.



Annexe 10 : Graphique des individus repris par groupe selon les deux premières dimensions de l'ACP.

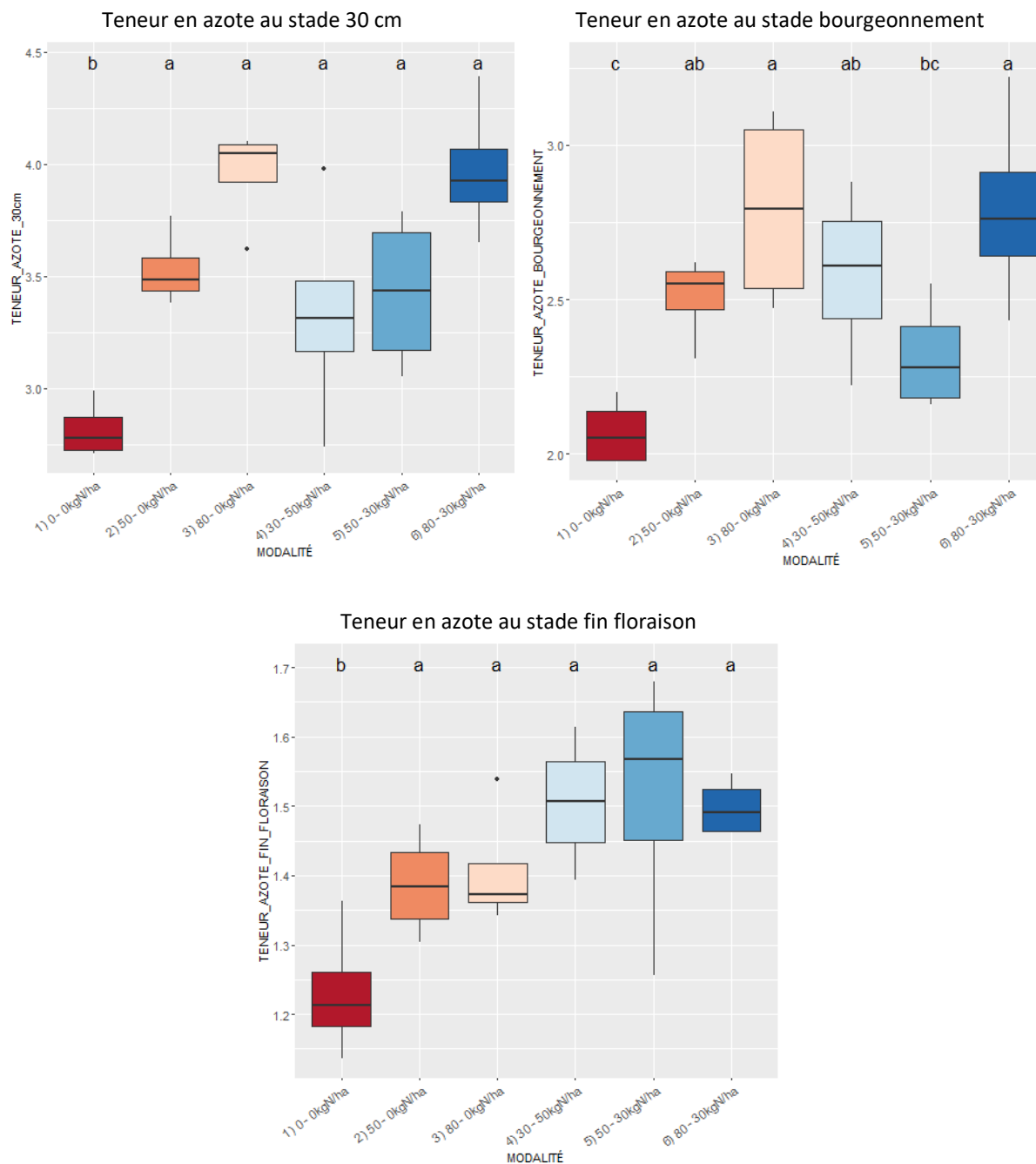


Annexe 11 : Graphique de l'évolution de la biomasse sèche moyenne (t/ha) pour chaque modalité de fertilisation en fonction du stade de prélèvement.



Annexe 12 : Boxplots des teneurs en azote (%) des prélèvements aux trois stades avec des différences significatives entre modalités.

Légende : couleurs spécifiques aux modalités, lettre au-dessus du graphe = groupes du test de Newman-Keuls.

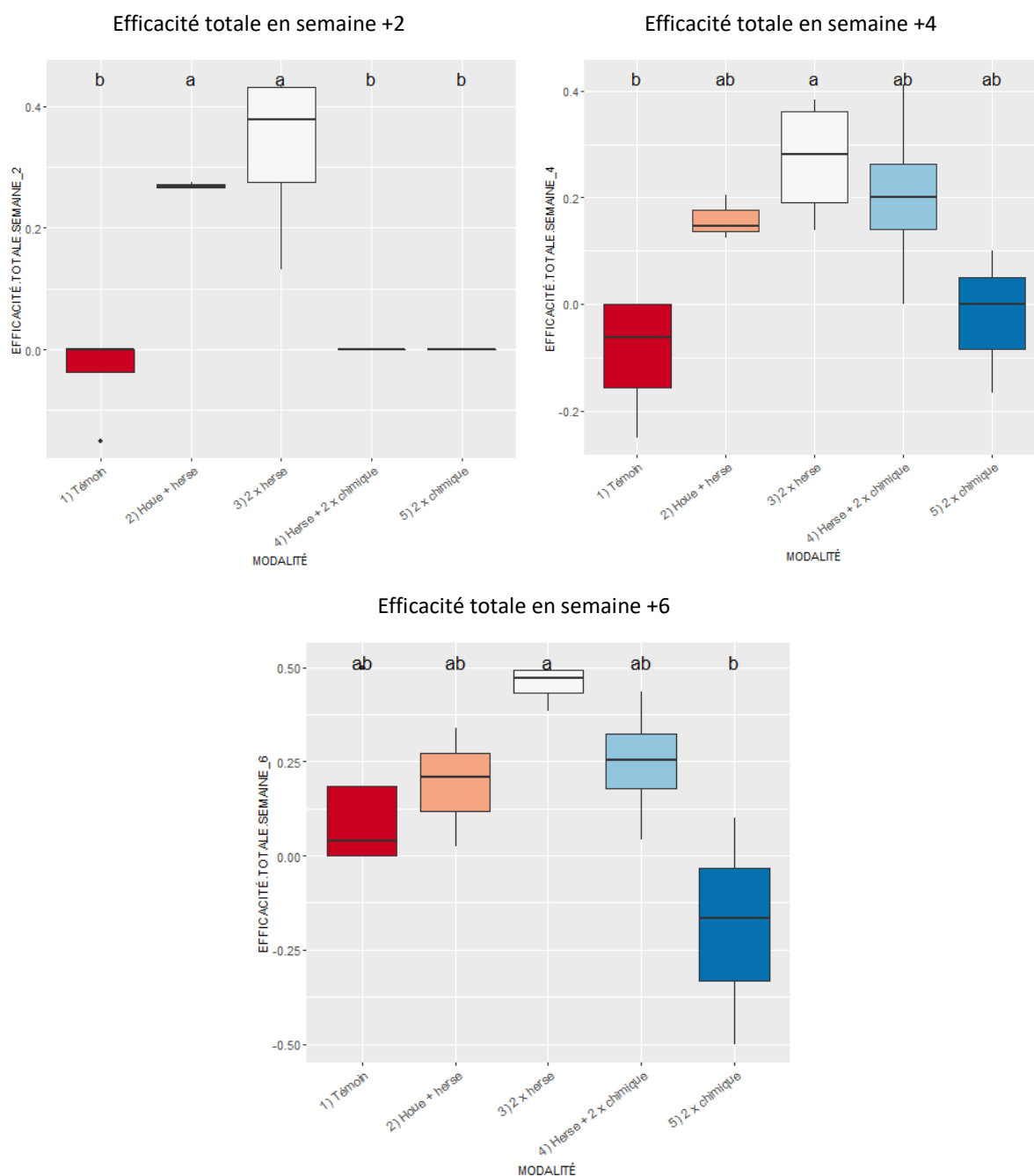


Annexe 13 : Tableau récapitulatif des rendements moyens (t/ha) à 9% d'humidité \pm std pour chaque modalité de fertilisation de 2021 et 2022.

Modalité		Rendement à 9% d'humidité (t/ha) \pm std		
N°	Fractionnement	2021	2022	Moyenne 2021-2022
1	0 - 0 kgN/ha	2,13 \pm 0,13	2,62 \pm 0,39	2,37 \pm 0,37
2	50 - 0 kgN/ha	2,03 \pm 0,95	3,46 \pm 0,50	2,74 \pm 1,04
3	80 - 0 kgN/ha	2,43 \pm 0,23	3,29 \pm 0,09	2,86 \pm 0,48
4	30 - 50 kgN/ha	2,50 \pm 0,06	3,31 \pm 0,38	2,91 \pm 0,50
5	50 - 30 kgN/ha	2,75 \pm 0,54	3,38 \pm 0,50	3,05 \pm 0,60
6	80 - 30 kgN/ha		3,39 \pm 0,25	

Annexe 14 : Boxplots de l'efficacité des méthodes de désherbage sur l'ensemble des adventices.

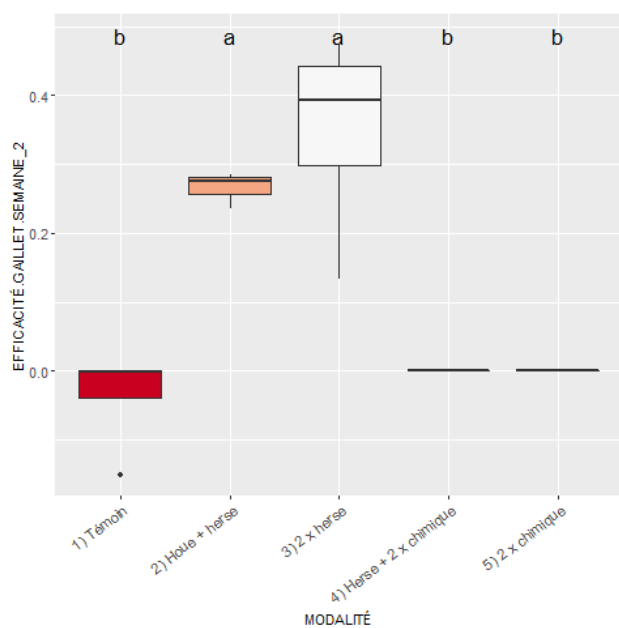
Légende : couleurs spécifiques aux modalités, lettres situées au-dessus du graphe = groupes du test Newman-Keuls.



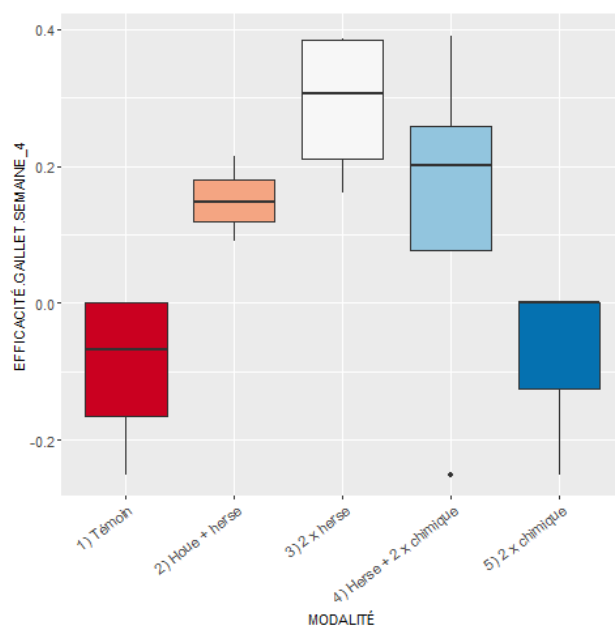
Annexe 15 : Boxplots de l'efficacité des méthodes de désherbage sur les gaillets gratterons.

Légende : couleurs spécifiques aux modalités, lettres situées au-dessus du graphe = groupes du test Newman-Keuls.

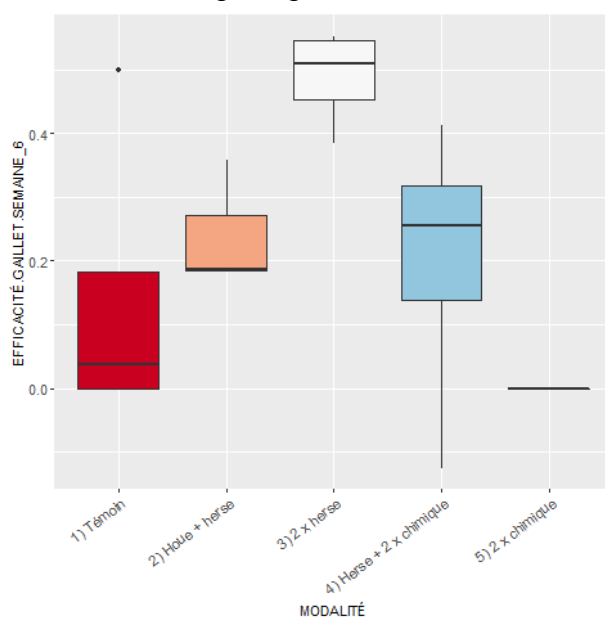
Efficacité sur gaillet gratteron en semaine +2



Efficacité sur gaillet gratteron en semaine +4

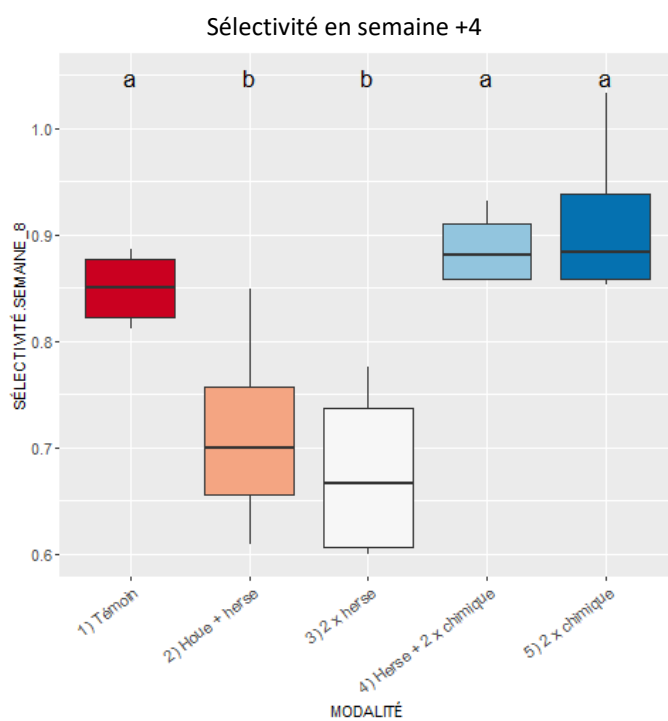
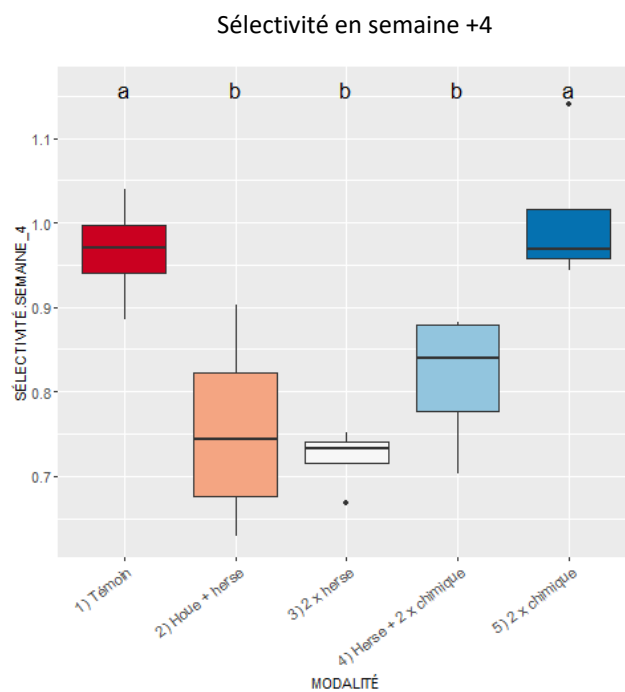
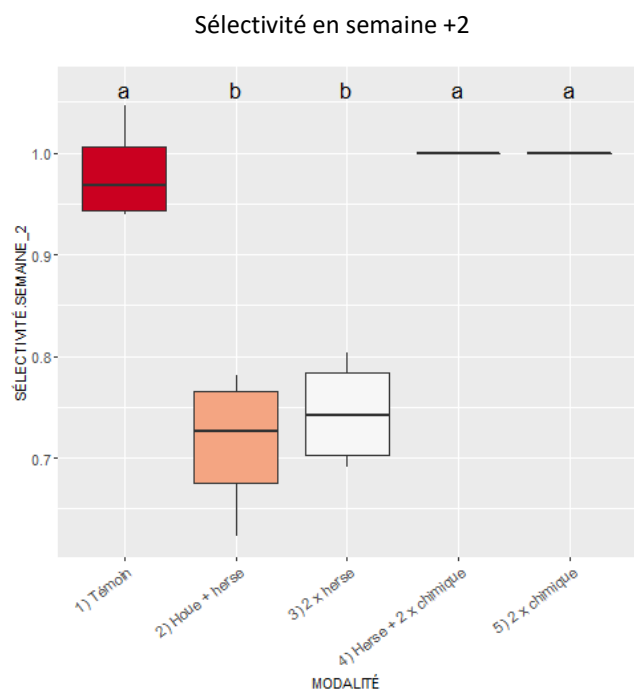


Efficacité sur gaillet gratteron en semaine +6



Annexe 16 : Boxplots de la sélectivité des méthodes de désherbage.

Légende : couleurs spécifiques aux modalités, lettres situées au-dessus du graphe = groupes du test Newman-Keuls.



Annexe 17 : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes des variables évaluées pour chaque variété.

Légende : - Précocité à la floraison : vert = plus précoce, rouge = plus tardif,

- Hauteur à floraison : vert = plus grande, rouge = plus courte,

- Couverture du sol : vert = plus couvrant, rouge = moins couvrant,

- Symptômes foliaires : vert = moins sensible, rouge = plus sensible,

- Densité : vert = plus dense, rouge = moins dense,

- Nombre des capsules par plante : vert = plus de capsules par plante, rouge = moins de capsules par plante,

- Rendement 2022 : vert = plus productif, rouge = moins productif.

Variété		Croissance					Composantes de rendement		Groupe ACP
		Densité (plantes/m²)	Couverture du sol (%)	Précocité à la floraison (degrés-jour)	Hauteur à floraison (cm)	Symptômes foliaires	Nombre de capsules par plante	Rendement 2022 (t/ha)	
1	Angora	303	6,21	816,8	63,07	1,3	49	3,43	1
2	Attila	411	11,78	803,8	61,27	1,7	34	4,09	1
3	Merinos	259	9,36	806,7	55,73	1,0	45	3,60	1
4	Cledor	328	7,58	816,8	62,27	1,0	49	3,46	1
5	Montdor	208	8,44	807,1	56,47	4,7	45	3,54	1
6	GOH22	416	20,98	823,8	59,00	1,3	29	3,95	3
7	LS Apalache	369	10,41	767,0	58,80	0,7	31	3,95	1
8	Sideral	297	8,76	767,0	64,40	6,3	33	3,85	2
9	LSL 1133	324	10,70	803,8	66,47	2,7	37	4,05	1
10	Orival	53	1,14	835,2	57,67	1,0	102	1,29	4