

Potentiel du tournesol en région wallonne : Aspects phytotechniques et usage du tourteau en aviculture de chair

Auteur : Raskinet, Camille

Promoteur(s) : Beckers, Yves; 15922

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/2268.2/13842>

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.

POTENTIEL DU TOURNESOL EN RÉGION WALLONNE : ASPECTS PHYTOTECHNIQUES ET USAGE DU TOURTEAU EN AVICULTURE DE CHAIR

CAMILLE RASKINET

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

CO-PROMOTEURS : PROF - YVES BECKERS & DR - GUILLAUME JACQUEMIN (CRA-W)

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(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de GxABT

POTENTIEL DU TOURNESOL EN RÉGION WALLONNE : ASPECTS PHYTOTECHNIQUES ET USAGE DU TOURTEAU EN AVICULTURE DE CHAIR

CAMILLE RASKINET

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

CO-PROMOTEURS : PROF - YVES BECKERS & DR - GUILLAUME JACQUEMIN (CRA-W)

Ce travail de fin d'études a été réalisé en collaboration avec le Département productions agricoles, Unité productions végétales du CRA-W. Les aspects zootechniques de ce travail ont été effectués au sein du département de zootechnie de la faculté de Gembloux Agro-Bio-Tech, université de Liège.

Remerciements

Je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont soutenue et aidée dans la réalisation de ce mémoire.

Je remercie tout particulièrement mes promoteurs, Yves Beckers et Guillaume Jacquemin pour l'organisation et la mise en œuvre du projet. Je les remercie également pour leur disponibilité, leur accompagnement, leurs conseils avisés et les moyens qu'ils ont déployés pour le bon déroulement de ce mémoire.

Je remercie aussi toute l'équipe de l'unité de zootechnie de la faculté pour leur accueil chaleureux et bienveillant. J'adresse particulièrement mes remerciements à Sylvie Mabilille pour son aide incroyable au labo, sa disponibilité pour le suivi des poulets dans le poulailler et sa patience. Sans son aide, les essais digestion *in vitro* et *in vivo* des poulets de chair n'auraient pas été possibles. Je remercie également François pour le travail réalisé dans le poulailler et son aide lors des mélanges de différents régimes donnés aux poulets.

J'aimerais également remercier Monsieur Courtois et Monsieur De Ryckel de m'avoir permise de disposer, en temps et en heure, de poulets de chair de 21 jours pour l'expérimentation à la ferme expérimentale.

Par ailleurs, je tiens à remercier Jessica Denayer, ma coéquipière dans les (immenses) champs de tournesols, lors du battage et triage de ceux-ci, et ce, quelles que soient les conditions météorologiques. J'en profite pour remercier l'Unité 4 de production végétale du CRA-W dans son ensemble pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur au quotidien.

Mes remerciements vont aussi à Sébastien Gofflot à la tête du laboratoire de biochimie du CRA-W (Unité valorisation des produits, de la biomasse et du bois), pour les nombreuses analyses réalisées et l'intérêt qu'il a porté à mon TFE.

J'aimerais remercier Lucie, Coline, Laurena, Chloé, Florine, Adèle, Justine et tous les autres membres de l'option agro pour les bons moments partagés durant les diverses activités gembloutoises. Je voudrais également remercier ma marraine de baptême et mes lapines, particulièrement Noémie qui a toujours été là quand j'avais besoin d'elle.

Un immense merci va à mon compagnon Gilles, pour son soutien indéfectible, la gestion des crises de panique et de doute et ses talents de confident inestimable dans les moments difficiles. Je le remercie également pour son aide dans le champ de tournesols, les visites dans le poulailler les week-ends et les nombreuses relectures effectuées. Merci d'être la personne que tu es, et d'avoir toujours été là quand j'en avais besoin. Je pense qu'on aura encore de quoi faire pour se soutenir mutuellement dans nos projets de vie... Plein d'amour et de surprises !

Enfin, je remercie ma famille de m'avoir soutenue durant toutes mes années d'études. Merci maman pour ta compréhension, tes encouragements, ton soutien à toute épreuve, les relectures et j'en passe... Je leur suis infiniment reconnaissante de toute l'aide qu'ils m'ont apportée tout au long de cette aventure et je leur dédie modestement ce mémoire.

Camille Raskinet

Résumé

La présente étude vise à aider au développement de la filière du tournesol en Wallonie. Le contexte climatique étant actuellement en plein changement, les agriculteurs et éleveurs belges souhaitent de plus en plus, au sein de leur ferme, repenser leurs cultures ainsi qu'augmenter leur résilience en améliorant leur autonomie protéique. Pour ce faire, un premier essai phytotechnique en champs sur la densité de culture du tournesol a été mené avec 5 densités de semis différentes. Les densités de semis 9 et 10 plantes/m² se sont révélées être les densités les plus intéressantes d'un point de vue phytotechnique.

Un essai portant sur différents taux de décorticages des graines de tournesol (4 au total) a également été effectué préalablement au triturage, dans une PME spécialisée en huile de colza. Le tourteau de tournesol est une source alternative de protéines pour l'alimentation animale, mais sa valeur élevée en fibres réduit sa valeur nutritionnelle. C'est pour cela que différents procédés de décorticage peuvent améliorer la teneur en protéines et la valeur nutritionnelle du tourteau. Cette approche de décorticage et pressage des graines étant nouvelle en Wallonie, le pressage effectué n'a pu être complètement efficace. Les différents tourteaux de tournesol présentaient une teneur en matières grasses nettement supérieure aux teneurs ordinaires d'un pressage à froid. Toutefois, ce premier essai montre des résultats encourageants.

À partir des différents tourteaux de tournesol obtenus, des essais *in vitro* imitant la digestion du poulet de chair ont été réalisés. Une nouvelle méthode a été utilisée, cependant, elle ne montre pas de résultats satisfaisants.

Enfin, un essai en poulailler a également permis de tester l'incorporation du tourteau de tournesol dans l'alimentation de la volaille de chair à raison de 15,55%, 24,08%, 34,21% et 31,24%, correspondant aux 4 formes de décorticage effectuées. L'essai des performances zootechniques a débuté à l'âge de 21 jours sur 288 poulets (poulets en finition) et s'est achevé à un poids d'abattage de 2,4 kg.

De cet essai, aucune interaction entre les paramètres de croissance associés au tourteau de tournesol et au degré de décorticage n'a pu être mise en évidence. Ces résultats démontrent le peu d'effet du changement d'alimentation par du tourteau de tournesol ainsi que du degré de décorticage des graines de tournesol.

À l'avenir, un essai de ce type, tant pour l'aspect phytotechnique que zootechnique, devrait être réitéré, afin de confirmer ou d'infirmer les premiers résultats obtenus quant au développement de cette nouvelle filière Wallonne.

Mots clés : Transition agricole – tournesol – densité de semis – décorticage des graines – poulet de chair – performance

Abstract

This study aims to contribute to the development of the sunflower sector in Wallonia. As the climatic context is currently changing, Belgian farmers and stockbreeders increasingly wish to rethink their crops and increase their resilience by improving their protein autonomy. For this, a first phytotechnical field trial on sunflower crop density was carried out with 5 different sowing densities. Sowing densities of 9 and 10 plants/m² proved to be the most interesting, from a phytotechnical point of view.

A trial with different rates of sunflower seed hulling (4 in total) was also carried out and then crushed in a SME specialising in rapeseed oil. Indeed, sunflower meal is an alternative source of protein for animal feed, but its high fibre value reduces its nutritional value. Therefore, different dehulling processes can improve the protein content and nutritional value of the meal. As this approach of dehulling and pressing the seeds is new in Wallonia, the pressing carried out could not be completely efficient. The various sunflower cakes contained a fat content that was significantly higher than the usual cold press content. However, this first trial shows encouraging results.

Based on the different sunflower cakes obtained, *in vitro* trials, mimicking the digestion of broilers were carried out. A new method was used, however, it did not show satisfactory results.

Finally, a henhouse trial also tested the incorporation of sunflower meal in broiler feed at 15.55%, 24.08%, 34.21% and 31.24%, corresponding to the 4 forms of dehulling performed. The zootechnical performance trial started at 21 days of age on 288 chickens (finishing chickens) and was completed at a slaughter weight of 2.4 kg.

From this trial, no interaction between the growth parameters associated with sunflower meal and the degree of dehulling could be demonstrated. These results show that there is no effect of changing the diet to sunflower meal and the degree of sunflower seed hulling.

In the future, a trial of this type, both for the phytotechnical and zootechnical aspects, should be repeated, in order to confirm or invalidate the first results obtained regarding the development of this new Walloon sector.

Keywords: Agricultural transition - sunflower – sowing density - seed hulling - broiler - performance

Liste des abréviations

pH : Potentiel Hydrogène

Ha : Hectare

a.a : Acide aminé

AB : Agriculture biologique

ADF : *Acid Detergent Fibre* (= cellulose et lignine)

ADL : *Acid Detergent Lignin* (= lignine)

CELL : Cellulose brute

CT : Cendre totale

D2 : 2 passages dans la décortiqueuse

D3 : 3 passages dans la décortiqueuse

D4 : 4 passages dans la décortiqueuse

DJ : Degrés-jours

DO : Absorbance à 568 nm

EM : Energie métabolisable

GQM : Gain quotidien moyen

IC : Indice de consommation

MG : Matière grasse

MF : Matière fraîche

MPT : Matière protéique totale

MS : Matière sèche

N : Azote

ND: Non décortiqué

NDF : *Neutral Detergent Fibre* (= cellulose, hémicellulose et lignine)

TT: Tourteau de tournesol

Table des matières

I. Introduction	1
II. Synthèse bibliographique	2
1. Le tournesol (<i>Helianthus annuus</i> L.).....	2
1.1. Cycle de développement du tournesol et besoins de la culture	2
1.2. Un semis de qualité.....	6
1.3. Principales maladies foliaires	6
1.3.1. Sclérotinia.....	7
1.4. Les oiseaux ravageurs du tournesol	8
1.5. Intérêt du tournesol : point de vue agro-environnemental.....	8
2. Débouchés à partir du tournesol	9
2.1. L'huile de tournesol pour l'alimentation humaine	9
2.2. Le tourteau de tournesol pour l'alimentation animale.....	10
2.2.1. Nouveau règlement européen concernant les productions animales sous le régime de l'agriculture biologique	12
3. Les procédés de décorticage et extraction de l'huile.....	12
3.1. Procédés de décorticage.....	12
3.2. Extraction de l'huile	14
III. Matériel et méthodes	16
1. Partie phytotechnique	16
1.1. Localisation de l'essai et conditions météorologiques	16
1.2. Dispositif expérimental.....	17
1.3. Itinéraire phytotechnique	18
1.4. Relevés de terrain : Observations et paramètres mesurés.....	19
1.5. Traitement statistique des données	20
2. Partie zootechnique	20
2.1. Généralités.....	20
2.2. Matériel mécanique (décortiqueuse, trieuse et triturateur)	21
2.2.1. Décorticage mécanique des graines de tournesol.....	21
2.2.2. Triage mécanique des graines de tournesol.....	21
2.2.3. Trituration mécanique des graines de tournesol.....	22
2.3. Caractérisation des graines, des coques et des tourteaux	22
2.3.1. Les échantillons de graines, de coques et de tourteaux	22
2.4. Digestibilité <i>in vitro</i> des protéines des tourteaux de tournesol.....	23
2.4.1. Mouture des échantillons	23
2.4.2. Digestion <i>in vitro</i>	23

2.4.3.	Calcul de la digestibilité des protéines.....	24
2.5.	Expérimentation animale « <i>in vivo</i> » chez le poulet.....	24
2.5.1.	Matériel animal.....	24
2.5.2.	Dispositif expérimental.....	24
2.5.3.	Composition des régimes.....	25
2.5.4.	Observations et paramètres mesurés.....	27
IV.	Résultats et discussions	28
1.	Partie phytotechnique.....	28
1.1.	Dégâts d'oiseaux.....	28
1.2.	Suivi de la culture.....	28
1.2.1.	Développement de la culture.....	29
1.2.2.	Hauteur des plantes.....	30
1.2.3.	Diamètre des tiges.....	30
1.2.4.	Diamètre des capitules.....	31
1.2.5.	Plantes versées et affectées par le sclérotinia sur tige.....	32
1.2.6.	Rendement absolu du tournesol.....	33
1.2.7.	Corrélations entre variables.....	35
1.3.	Récapitulatif des résultats issus de l'essai.....	36
2.	Partie zootechnique.....	38
2.1.	Décorticage, triage et trituration des graines.....	38
2.2.	Analyse biochimique.....	39
2.2.1.	Extraction des fibres et rendement en huile.....	40
2.2.2.	Hypothèse de teneur en MPT et NDF dans le tourteau.....	41
2.3.	Digestion <i>in vitro</i> des protéines du tourteau de tournesol chez le poulet.....	43
2.3.1.	Etape 1 : Digestion enzymatique.....	43
2.3.2.	Etape 2 : Hydrolyse à l'HCl.....	45
2.3.3.	Etape 3 : Digestibilité réelle des protéines.....	46
2.3.4.	Hypothèses des faibles valeurs de digestibilité.....	47
2.3.5.	Hypothèses des variations observées entre répliquât.....	48
2.3.6.	Méthode publiée.....	48
2.4.	Performances zootechniques des poulets.....	49
2.4.1.	Évolution des poids moyens des poulets.....	50
2.4.2.	Analyse des régimes initiaux et refus alimentaires des poulets.....	51
V.	Conclusion et perspectives	53
VI.	Contribution personnelle de l'étudiante	55
	Références Bibliographiques	56
	Annexes	61

Table des figures

Figure 1 : Evolution des sommes de températures (en base 6°C) au cours des 20 dernières années, du 20 avril au 20 septembre, (Jacquemin, 2021)	3
Figure 2 : Les principaux stades-clés du tournesol, (CETIOM, 2014).	3
Figure 3 : Itinéraire culturel du tournesol, (Chambre d’agriculture de l’Aude, n.d.)	4
Figure 4 : Courbes de réponse du rendement à l'eau, (Lecomte et al., 2011) d’après INRA, Auzeville, 1980	5
Figure 5 : Carence en potasse sur jeune plante, (Champolivier, 2019a)	5
Figure 6 : Carence en molybdène sur jeune plante, (Champolivier, 2019b)	5
Figure 7 : Carence en magnésium, (Champolivier, 2019b)	5
Figure 8 : Carence en bore, (Champolivier, 2019)	6
Figure 9 : Attaque de sclérotinia sur collet et sur capitules (Source personnelle)	7
Figure 10 : Attaque de sclérotinia sur tige (Source personnelle)	7
Figure 11 : Décortiqueuse type « multi-chocs », (Peyronnet et al., 2012)	13
Figure 12 : Schéma d’une presse à vis (d’après une illustration de Bogaert, (2017))	14
Figure 13 : Schéma général des procédés de production d’huile de tournesol, (Campbell, 1983; Kartika, 2005)	15
Figure 14 : Vue aérienne du champ expérimental de Villers-Le-Bouillet, (“WalOnMap,” 2021)	16
Figure 15 : Températures et précipitations mensuelles observées durant la saison 2021 par rapport aux normales de saison à Villers-Le -Bouillet (IRM ,2021)	17
Figure 16 : Plan expérimental de l’essai densité de semis. (Les numéros correspondent aux modalités de semis.)	18
Figure 17 : Décortiqueuse de laboratoire utilisée lors du décorticage des graines de tournesol, (AG, Wintersteiger, 2021)	21
Figure 18 : Trieur de laboratoire utilisé pour trier les graines des coques et copeaux de tiges, (SAMATEC, 2021)	21
Figure 19 : Dispositif expérimental / 1 : tourteau de tournesol non décortiqué (TTND) – 2 : tourteau de tournesol, 2 passages décortiqueuses (TTD2) – 3 : tourteau de tournesol, 3 passages décortiqueuses (TTD3) – 4 : tourteau de tournesol, 4 passages décortiqueuses (TTD4) – T : régime classique	25
Figure 20 : Organisation des loges au sein du poulailler	25
Figure 21 : Dégâts d’oiseaux sur les capitules de tournesols	28
Figure 22 : Hauteur du tournesol à maturité en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.	30
Figure 23 : Diamètre des tiges du tournesol à maturité en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.	30
Figure 24 : Diamètre des capitules du tournesol à maturité en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.	31
Figure 25 : Tournesols situés en milieu (gauche) et en bordure de parcelle (droite)	31
Figure 26 : Pourcentage de sclérotinia sur tige et de verses le 20/08/2021 et le 03/09/2021 sur le tournesol en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.	32
Figure 27 : Rendement réel du tournesol en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.	33
Figure 28 : Rendement théorique « sans problème » du tournesol en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.	34

Figure 29 : Rendement théorique de « la verse et du sclérotinia sur tige » du tournesol en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.	34
Figure 30 : Corrélogramme reprenant les corrélations entre variables. Les abréviations sont les suivantes : Moyenne_hauteur = moyenne des hauteurs, maladies date 1 et 2 = pourcentage de plantes affectées par le sclérotinia le 20/08/21 et le 03/09/2021, verse date 1 et 2 = pourcentage de plantes versés le 20/08/2021 et le 03/09/2021, diametre_tiges = moyenne du diamètre des tiges, diametre_capitules = moyenne du diamètre des capitules	35
Figure 31 : Digestion enzymatique des tourteaux de tournesol (de non décortiqués à 4 passages à la décortiqueuse) et de la caséine pour les 3 essais.....	44
Figure 32 : Absorbance des échantillons de l'hydrolyse à l'HCl.....	45
Figure 33 : Digestibilité réelle des protéines des différents tourteaux de tournesol et de la caséine pour les 3 essais.....	46
Figure 34 : Évolution du poids moyen des poulets par régime sur les 3 semaines d'essai.....	50

Table des tableaux

Tableau 1 : Composition moyenne des graines, coques et tourteaux de tournesol, (Peyronnet et al., 2012).....	11
Tableau 2 : Composition des tourteaux de tournesol et de soja, (Tables INRA/AFZ 2004).....	11
Tableau 3 : Opérations culturales réalisées sur le champ d'essai.....	18
Tableau 4 : Observations et mesures réalisées sur le champ de tournesol.	19
Tableau 5 : Énergie métabolisable (kcal EM/kg) estimée par régression multiple des 4 tourteaux de tournesol utilisés dans l'essai	26
Tableau 6 : Composition en pourcents (%) des 5 régimes. (Régime 1 = régime contenant du TT de graines entières, Régimes 2 = régime contenant du TT de graines décortiquées 2 fois, Régimes 3 = régime contenant du TT de graines décortiquées 3 fois, Régime 4 = régime contenant du TT de graines décortiquées 4 fois).	26
Tableau 7 : Evolution de la somme des degrés jours du tournesol en fonction de la date et des stades de développement. Les températures moyennes (2021) proviennent de la station météorologique de Couthuin située à 10 km de Villers-Le-Bouillet (CRA-W AGROMET, 2021)	29
Tableau 8 : Extrapolation des sommes de températures aux années antérieures par rapport à l'année 2021. Les données des températures antérieures proviennent également de la station météorologique de Couthuin (CRA-W AGROMET, 2021)	29
Tableau 9 : Pourcentage de verses et de sclérotinia sur tige aux 2 dates de relevés.	32
Tableau 10 : Nombre de capitules théoriques et nombre de capitules réellement récoltées sur 2 lignes	33
Tableau 11 : Données du décorticage et triage des graines de tournesol.....	38
Tableau 12 : Données du pressage des graines de tournesol chez Alvenat.....	38
Tableau 13 : MS = teneur en matière sèche, CT= cendres totales, MPT = matière protéique totale (N*6,25), MG = matière grasse, CELL = cellulose, NDF = fibres insolubles dans les détergents neutres, ADF= fibres insolubles dans les détergents acides, ADL = fibres solubles dans les solutions neutres ou acides	39
Tableau 14 : Extraction des fibres sur base des COQUES sortie machine (décortiqueuse).....	40
Tableau 15 : Extraction théorique des COQUES	40
Tableau 16 : Rendement d'extraction de l'HUILE sur base de la MG.....	41
Tableau 17 : Teneur théorique en MPT et NDF dans le TOURTEAU si 100 % de MG dans les graines (il resterait 0% MG dans le tourteau)	41

Tableau 18 : Teneur théorique en MPT et NDF dans le tourteau si 90 % de MG dans les graines sont extraites (il resterait 10% MG dans le tourteau)	42
Tableau 19 : Teneur théorique en cellulose dans le tourteau si 90 % de MG dans les graines sont extraites	42
Tableau 20 : Pourcentage de variation d'absorbances entre la valeur la plus élevée et la plus faible des 3 essais pour les échantillons de TT 1 et de caséine	44
Tableau 21 : Pourcentage de variation des valeurs d'absorbance.....	45
Tableau 22 : Paramètres de croissance des volailles	49
Tableau 23 : Caractérisation des régimes. (MS 103°C = teneur en matière sèche à 103°C, CT = cendres totales, MPT = matière protéique totale (N*6,25), MG = matière grasse (extrait éthéré), NDF = fibres insolubles dans le détergent neutre)	51
Tableau 24 : Caractérisation des refus. (MS 103°C = teneur en matière sèche à 103°C, CT= cendres totales, MPT= matière protéique totale (N*6,25), MG= matière grasse (extrait éthéré), NDF = fibres insolubles dans le détergent neutre).....	51

Table des annexes

Annexe 1 : Les 3 principaux oiseaux ravageurs du tournesol	61
Annexe 2 : Insolations observées durant la saison 2021 par rapport aux normales de saison.....	62
Annexe 3 : Galerie photos des graines de tournesol entières, partiellement décortiquées et du tourteau obtenu après trituration	63
Annexe 4 : Étapes de trituration des graines de tournesol.....	64
Annexe 5 : Protocole du dosage de la digestibilité in vitro des protéines selon la méthode de Bryan et al. 2019.....	65
Annexe 6 : Teneurs de différents tourteaux de tournesol utilisés pour réaliser la régression multiple (INRA, 2004)	67
Annexe 7 : Rapport détaillé de la régression multiple réalisée à partir des 13 tourteaux de tournesol	67
Annexe 8 : Estimation de l'EM des différents tourteaux de tournesol à partir de la régression multiple	68
Annexe 9 : Table DSM des besoins nutritionnels des poulets de chair (DSM, 2018)	69
Annexe 10 : Résultats des statistiques descriptives.....	71
Annexe 11 : Moyenne des paramètres mesurés par densité et par bloc.....	72
Annexe 12 : Exemples de variations élevées entre mêmes échantillons.....	74
Annexe 13 : Paramètres de croissance des volailles, comprenant toutes les loges	75

I. Introduction

Le tournesol, appelé autrefois Hélianthe ou Soleil, est une plante annuelle, largement cultivée autour du globe (56 millions de tonnes par an). En Europe, l'Ukraine, la France, la Hongrie, l'Espagne, la Bulgarie et la Roumanie sont les principaux producteurs européens (42 millions de tonnes par an) (FAOSTAT, 2019). Sa superficie plantée en Belgique était, jusqu'il y a peu, pratiquement nulle à l'exception de bandes fleuries semées par quelques agriculteurs soucieux d'améliorer les pratiques environnementales et la biodiversité dans les campagnes.

En cette année 2021, dans le cadre du projet Sunwall, cinq essais portant sur la faisabilité de cultiver du tournesol en Wallonie ont été réalisés par le CRA-W (Centre de Recherches Agronomiques Wallon), la SCAM (Société Coopérative Agricole de la Meuse) et Alvenat (PME, spécialisée dans la production d'huile végétale locale et responsable).

Cette volonté d'implanter la culture du tournesol dans nos régions est le fruit du contexte climatique en plein changement, ce qui pousse les agriculteurs belges à repenser leurs cultures. De plus, les nécessités de répondre à la diversification des rotations agricoles et d'augmenter la résilience des fermes, en améliorant l'autonomie protéique des élevages belges, sont des défis de demain. En outre, le développement du circuit court, dans l'idée de productions agricoles plus locales et plus durables, est également un élément supplémentaire qui permet d'envisager, l'intégration du tournesol dans nos systèmes agricoles wallons.

Un des paramètres importants pour une conduite culturale durable et adéquate est la densité de semis à adopter. Dans de bonnes conditions, les densités peuvent souvent atteindre plus de 100 000 graines/ha permettant d'accéder à un certain niveau de rendement (Ibrahim, 2012). Mais d'autres facteurs (maladies, diamètres des fleurs, verse...) jouent également un rôle dans le choix de la densité de peuplement. Un essai d'implantation et suivi dans ce sens constitue le premier volet de ce travail.

En ce qui concerne l'autonomie protéique des élevages belges, elle pourrait être améliorée par la fabrication de tourteaux de tournesol locaux. Cette nouvelle source de protéines pouvant se substituer aux protéines d'importation, telles que le tourteau de soja, serait une bonne alternative, sachant que le soja représente environ 25% des matières premières consommées dans les aliments avicoles. De plus, cette culture oléo protéagineuse pose aujourd'hui de nombreuses complications tant économiques, sociétales ou encore environnementales (Recoules et al., 2016).

Ce co-produit des graines de tournesol, appelé tourteau, obtenu après trituration des graines, rend également possible une valorisation supplémentaire de la récolte. Il permet ainsi de rester compétitif vis-à-vis des autres espèces oléagineuses (Roche, 2005). Néanmoins, sa teneur élevée en fibres réduit sa valeur nutritionnelle pour l'alimentation animale. C'est pourquoi, des procédés de décorticage des graines sont réalisés préalablement à la trituration afin d'en améliorer la valeur nutritionnelle et la teneur en protéines. L'étude de l'influence du décorticage sur la valeur nutritionnelle constitue par conséquent le second volet de ce travail.

Dans ce cadre, l'objectif général de ce travail de fin d'études est d'aider au développement de la filière du tournesol en Wallonie. Les deux volets s'intègrent respectivement dans l'étude de la phytotechnie de la culture et du comportement zootechnique des poulets de chair en lien avec une alimentation riche en tourteau de tournesol. L'objectif spécifique est de connaître le taux idéal de décorticage permettant un meilleur rendement de l'huile et du tourteau produit. Une approche *in vitro* de la digestibilité des protéines du tourteau a également été réalisée afin de connaître sa valeur alimentaire chez le poulet. Enfin, un essai d'orientation de l'incorporation du tourteau de tournesol dans l'alimentation de la volaille de chair est également effectué.

II. Synthèse bibliographique

1. Le tournesol (*Helianthus annuus* L.)

Le tournesol, de son nom latin *Helianthus annuus* L., est une espèce diploïde (2n) appartenant à la famille des Astéracées. Cette plante, originaire d'Amérique du Nord, se caractérise par une inflorescence de type « capitule » dont les fleurs ligulées « les pétales » sont jaunes. Cette plante est également caractérisée par une longue tige pouvant mesurer jusqu'à 2 mètres de haut (Muller et al., 2006). Le genre *Helianthus* comprend environ 70 espèces dont seulement deux sont cultivées, le tournesol (*H. annuus* L.) et le topinambour (*H. tuberosus* L.) (INA P-G, 2003). Cette plante était autrefois cultivée par les Amérindiens, principalement pour son huile mais également pour sa matière colorante, ses propriétés médicinales et ses graines comestibles, source de nourriture à la fois pour l'homme et les animaux.

Le tournesol a été introduit en Europe au 16^e siècle par les Espagnols mais sa culture comme plante oléagineuse s'est seulement étendue à la Russie et à toute l'Europe au début du 19^e siècle (Soltner, 2005). Grâce à l'amélioration variétale, les graines dites akènes, au sens botanique du terme, peuvent contenir des teneurs en huile de plus de 40% (Pedroche, 2015).

Aujourd'hui, il s'agit de la troisième grande culture américaine après la pomme de terre et le maïs, à avoir traversé l'Atlantique, mais son expansion est longuement restée modérée (Jacquemin, 2021). En 2019, les principaux producteurs de tournesol étaient : l'Ukraine (14,71 millions de tonnes) suivie de la fédération de Russie (14,06 millions de tonnes) et de l'Union Européenne (9,21 millions de tonnes). En Europe, les principaux producteurs, après l'Ukraine, sont la Roumanie (3,31 millions de tonnes), la Bulgarie (1,94 million de tonnes), la Hongrie (1,76 million de tonnes) et la France (1,28 million de tonnes) (FAOSTAT, 2019).

Le rendement de cette culture peut être affecté par toute une série de facteurs dont la date de semis, la disponibilité en nutriments, le type de sol, la variété, la densité mais également les conditions abiotiques telles que la température et l'humidité. D'autres paramètres liés aux conditions environnementales peuvent également affecter le rendement, à savoir certaines maladies, adventices ou encore ravageurs (Terres Inovia, 2021a).

Par ailleurs, en comparaison à la culture de colza, plante cultivée en Belgique et également oléagineuse, le tournesol semble être plus tolérant aux maladies et aux insectes. Vu l'importance des nouvelles réalités climatiques, il possède aussi d'autres avantages, tels que la résistance à la sécheresse et un faible besoin en azote. Cette rusticité permet donc à cette culture des conduites culturales à faibles intrants, respectant le cahier des charges de l'agriculture biologique (INRAE, 2020).

1.1. Cycle de développement du tournesol et besoins de la culture

Le cycle complet du tournesol se réalise entre 120 et 150 jours selon les variétés (très précoces, précoces, mi-précoces, mi-tardives ou tardives). Les variétés précoces nécessitent des sommes de températures en base 6°C de 1 500 degrés-jours entre le semis et la maturité des grains. La germination des graines est relativement rapide si la température du sol atteint au moins 8 à 10°C (CETIOM, 2014).

La sélection variétale crée aujourd'hui des variétés dites « très précoces » qui ne nécessitent que 1 450 degrés-jours en base 6°C. Avant 2015, rares étaient les années où ces sommes de températures étaient

atteintes en Belgique (Jacquemin, 2021). Le dérèglement climatique change maintenant petit à petit la donne et ces sommes de températures nécessaires à une bonne croissance de la culture sont à présent de plus en plus fréquentes (Figure 1).

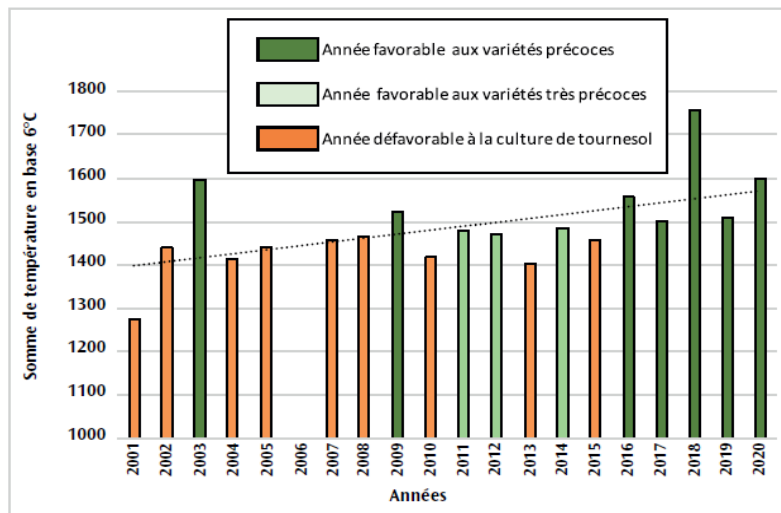


Figure 1 : Evolution des sommes de températures (en base 6°C) au cours des 20 dernières années, du 20 avril au 20 septembre, (Jacquemin, 2021)

Les Figures 2 et 3 illustrent les principaux stades-clés du tournesol ainsi que l’itinéraire technique utilisé notamment en France. Elles permettent d’avoir une bonne vue d’ensemble de toutes les opérations à effectuer au sein de la culture et d’identifier à quel stade celles-ci doivent être réalisées.

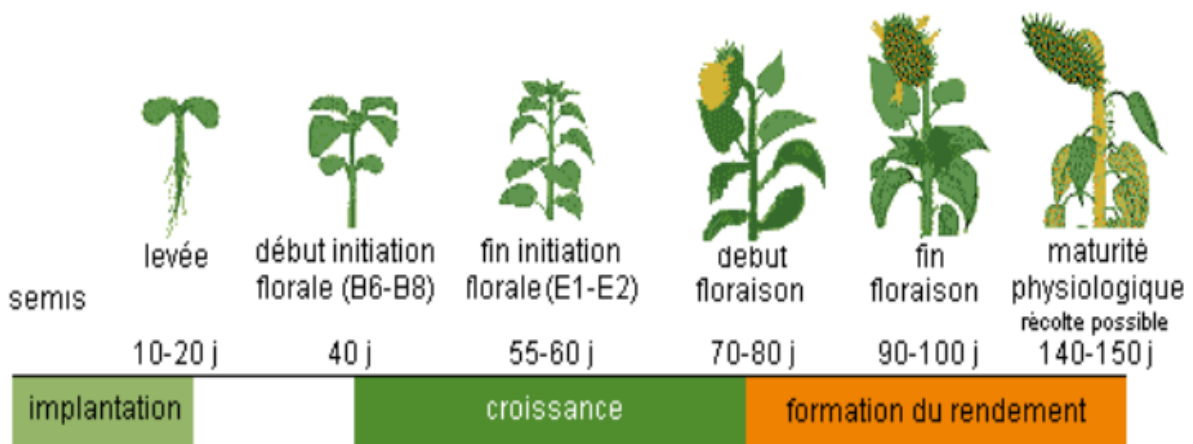


Figure 2 : Les principaux stades-clés du tournesol, (CETIOM, 2014).

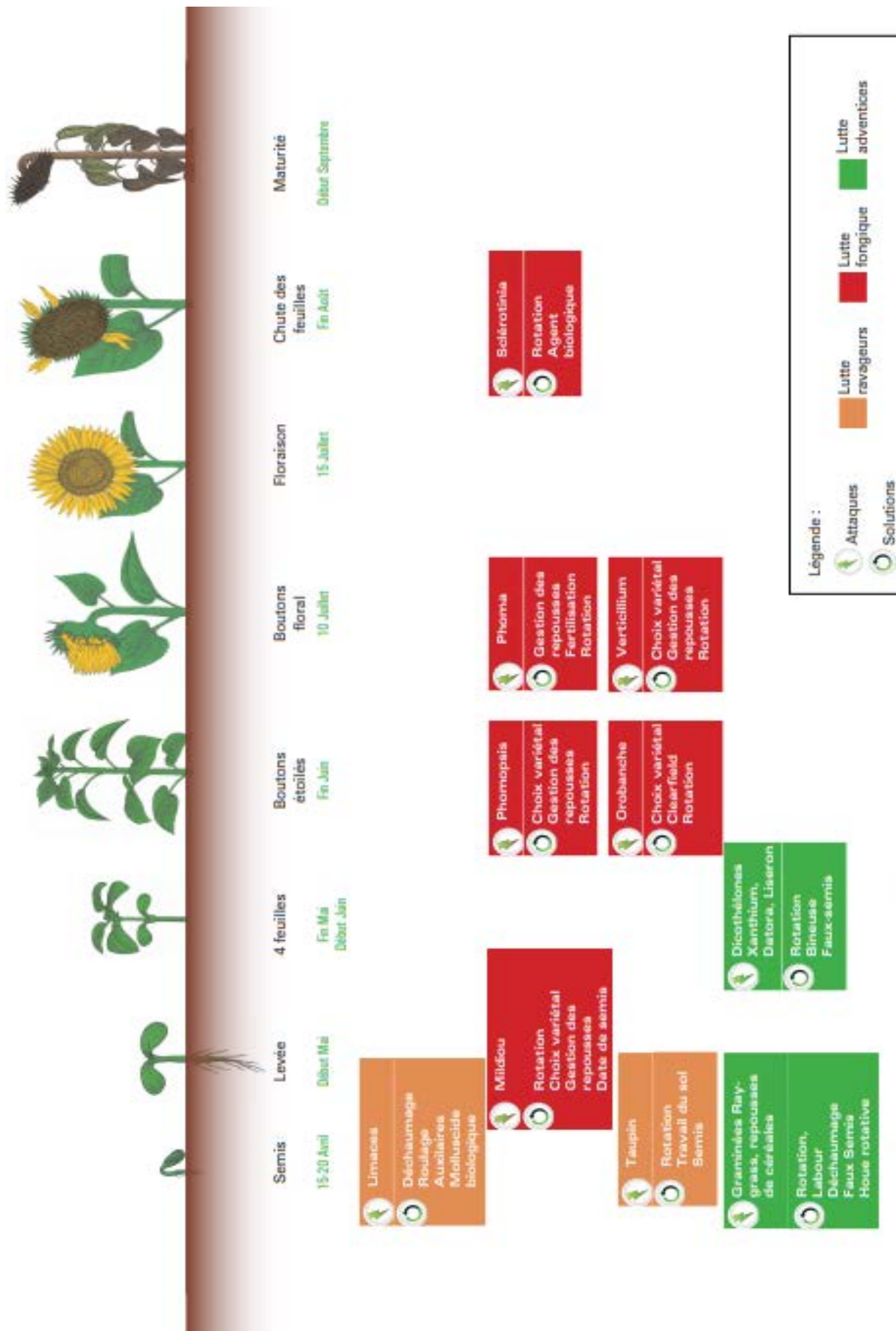


Figure 3 : Itinéraire cultural du tournesol, (Chambre d'agriculture de l'Aude, n.d.)

Besoins en eau

Le tournesol est connu pour être une culture résistante à la sécheresse. Il peut se satisfaire de 80 mm de pluie par cycle, mais peut en consommer beaucoup plus lorsqu'elle lui est fournie en abondance. L'atout du tournesol est de pouvoir atteindre son optimum de rendement avec une couverture de seulement 75 % de ses besoins en eau (Martin-Monjaret et al., 2020). La principale raison de cette tolérance à la contrainte hydrique est qu'il bénéficie d'un enracinement pivotant et profond pouvant exploiter la gamme d'eau utile sur une large partie d'horizons explorés (Cabelguenne et al., 1998). Selon Lecomte et al. (2011), les courbes de réponse à l'eau de la Figure 4 confirment que le tournesol s'accommode bien à un manque d'eau et donc à un stress hydrique marqué. De plus, lors des pluies, l'orientation de ses feuilles et la forme de ses pétioles permettent de ramener l'eau au pied de la plante pour être valorisée. Enfin, un semis plus précoce permet au tournesol de ne pas manquer d'eau en floraison et ainsi récolter celui-ci dans les meilleures conditions (Martin-Monjaret et al., 2020).

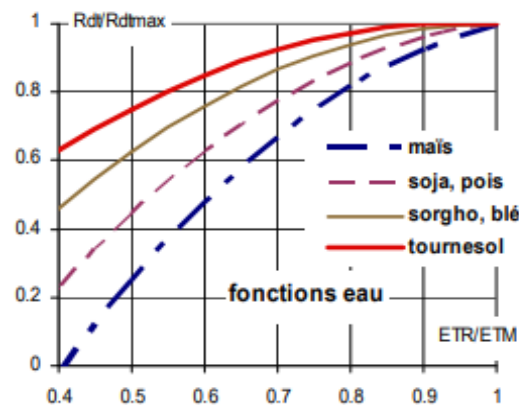


Figure 4 : Courbes de réponse du rendement à l'eau, (Lecomte et al., 2011) d'après INRA, Auzeville, 1980

Besoins en intrants

Pour un rendement de plus de 35q/ha et des sols à teneur moyenne en azote, phosphate et potassium, le tournesol se contente de plus ou moins 60 unités d'azote, 40 kg P₂O₅ et 40 kg K₂O par ha. Des carences sont possibles en cas d'enracinement médiocre et une disponibilité en eau limitante (Champolivier, 2019a).

La Figure 5 permet d'illustrer une carence en potasse sur une jeune plante, limitant sa croissance végétative et son potentiel de rendement.

Le tournesol peut également subir d'autres carences, à savoir des carences en molybdène ou en magnésium. Dans des sols trop acides (pH inférieur à 6), des carences en molybdène peuvent apparaître. La Figure 6 illustre nettement cette carence. On peut observer comme symptômes caractéristiques, des feuilles en forme de cuillère et des couleurs allant du vert clair au jaune-citron. Les carences en magnésium se caractérisent quant à elles par une chlorose internervaire des feuilles qui affecte, comme illustré sur la Figure 7, l'ensemble du limbe (Champolivier, 2019b).



Figure 5 : Carence en potasse sur jeune plante, (Champolivier, 2019a)



Figure 6 : Carence en molybdène sur jeune plante, (Champolivier, 2019b)



Figure 7 : Carence en magnésium, (Champolivier, 2019b)

Enfin, une attention particulière doit être portée au bore. C'est en effet un oligo-élément essentiel au jeune plant de tournesol. Il en absorbe plus de 400g/ha dont 80 % entre le stade « 5 paires de feuilles » et le stade « bouton floral » (Champolivier, 2019c). Les symptômes de carence en bore peuvent s'exprimer au début par une décoloration et une grillure sèche sur la base du limbe et, dans des cas plus graves, par un cisaillement de la tige pour conduire à la chute du capitule.



Figure 8 : Carence en bore, (Champolivier, 2019c)

1.2. Un semis de qualité

Un semis de qualité est primordial afin d'obtenir un peuplement régulier et suffisant dans les parcelles semées. Premièrement, la densité de semis doit être adaptée aux conditions de levée préalablement attendues et à la contrainte hydrique du sol afin d'y obtenir la meilleure combinaison de rendement en graines et huiles de qualité. Le rendement est en effet très affecté par ce paramètre. Dans des sols riches et bien pourvus en eau, l'objectif de semis peut atteindre jusqu'à 100 000 graines/ha (Ibrahim, 2012). En France, dans de bonnes conditions, une quantité de 75 000 graines/ha est visée avec une perte d'environ 15% (Terres Inovia, 2021b). Il est cependant nécessaire de moduler la densité en fonction du sol dans lequel la culture est implantée. En effet, si le sol ne dispose pas de grandes réserves hydriques, il requiert de privilégier une faible densité.

Les graines sont généralement semées avec un écartement entre rangs de 45 cm et une profondeur de semis se situant entre 3 et 5 cm lorsque la terre est suffisamment réchauffée, permettant ainsi, d'assurer un bon contact entre la graine et le sol (Terres Inovia, 2021b). Concernant la date de semis, celle-ci doit être réfléchi en fonction des risques d'un semis trop précoce ou trop tardif, de la variété ou encore de la région cultivée.

1.3. Principales maladies foliaires

Depuis son expansion mondiale, la culture du tournesol est soumise aux attaques de nombreux bioagresseurs cryptogamiques. Les quatre maladies les plus importantes et pour lesquelles le risque de pertes de rendement est le plus élevé, sont le phoma (*Phoma macdonaldii*), le mildiou (*Plasmopara halstedii*), le phomopsis (*Phomopsis helianthi*) et le sclérotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*) (Debaeke, Bret-Mestries, et al., 2014).

Dans ce document, une des quatre maladies cryptogamiques évoquées sera totalement développée : *Sclerotinia sclerotiorum*, seul le sclérotinia ayant fait des dégâts en 2021.

1.3.1. Sclérotinia

Le sclérotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*) est un agent pathogène fongique majeur qui attaque le tournesol et touche toutes les régions de production de tournesols (Masirevic et al., 1992). Il est capable de se conserver durant de longues années dans le sol sous la forme d'un sclérote (forme asexuée) et constitue donc un danger permanent pour la culture (Terres Inovia, 2019a). En été, lorsque les racines de tournesol en croissance entrent en contact avec les scléroties, celles-ci germent et infectent la racine et le collet de la plante. Le mycélium se développe rapidement en bas de la tige entraînant par la suite un flétrissement et la mort de la plante. On appelle cela le flétrissement sclérotique ou encore la pourriture des tiges (Gregoire et al., 2000). Une pourriture de couleur blanche de la tige supérieure et du capitule peut également être initiée par la germination des scléroties en conditions pluvieuses, produisant des millions de spores (apothécies) en suspension dans l'air (Gulya, 1989; Gregoire et al., 2000). Sur le capitule, les contaminations se réalisent à la floraison.

Il est cependant important de noter que les types d'attaques du pathogène sont différents en fonction de l'endroit du globe où est cultivé le tournesol. L'attaque des racines par le mycélium est en effet la plus importante en Amérique du Nord, alors que l'attaque du capitule est la plus importante en Europe, en Argentine et en Chine (Vear, 2017). Enfin, les pertes dues à sclérotinia sont généralement relativement importantes, et dépendent du taux de précocité de l'attaque. Les symptômes sur capitule restent, quant à eux, les plus nuisibles et peuvent avoir comme conséquences des pertes de rendement, allant jusqu'à 80% pour les infections les plus graves (Masirevic et al., 1992; Aubertot et al., 2019).



Figure 9 : Attaque de sclérotinia sur collet et sur capitules (Source personnelle)



Figure 10 : Attaque de sclérotinia sur tige (Source personnelle)

Moyens de lutte

Des moyens de lutte culturels sont toutefois envisageables et peuvent réduire le risque d'apparition de toutes ces maladies évoquées. Le choix variétal a son importance, certaines variétés sont tolérantes voire en partie résistantes à certaines maladies. Ensuite, la prévention par les rotations culturales, l'ajustement des dates de semis et la promotion de conditions climatiques défavorables aux pathogènes sont aussi un ensemble de mesures visant à réduire le risque d'attaques fongiques. Ces combinaisons de mesures sont en effet la clé d'un contrôle efficace, intégré et durable des maladies du tournesol et doivent être encouragées (Debaeke, Mestries, et al., 2014). Enfin, la densité des plantes affecte également le taux d'humidité relative dans la canopée qui, par conséquent, améliore la germination des spores et augmente les processus d'infestation des feuilles (Debaeke et al., 2003 et Delos et al., 1996). Une densité de semis trop importante est donc à éviter pour se prémunir contre certaines maladies.

1.4. Les oiseaux ravageurs du tournesol

Le tournesol est l'une des cultures les plus vulnérables aux attaques d'oiseaux (Sausse et al., 2021). Les graines de tournesol sont en effet un aliment de prédilection pour les oiseaux car elles contiennent de nombreuses protéines et graisses essentielles à leur croissance et au maintien de leur poids (Besser, 2015). À l'échelle mondiale, les dégâts dus aux oiseaux se produisent principalement au sein des cultures de printemps (maïs, tournesol, blé, orge, légumineuses...) (Clergeau, 1997). C'est à ce moment-là que la nature se réveille et si l'on effectue un semis précocement, les graines et les plantules seront les premières sources d'alimentation des oiseaux.

Selon plusieurs déclarations et enquêtes menées en France ces dernières années, plus d'un tiers des parcelles sont attaquées par les oiseaux, avec une forte incidence du pigeon ramier, celui-ci consommant soit partiellement les cotylédons (peu d'impact sur le devenir de la plante), soit le sectionnant totalement (plantule perdue). Les corvidés (corneilles noires, corbeaux freux ou encore choucas des tours) causent eux, plus de dégâts dès le semis, déterrants les graines une fois semées. Les attaques sur tournesol peuvent donc avoir lieu du semis au stade 4 feuilles mais également plus tardivement sur capitule lors de la maturité des grains (Sahar, 2019). Il s'agit alors généralement de passereaux dont les moineaux sont les plus fréquents. Néanmoins, 91 % des attaques ont lieu lors de la phase semis-levé et seulement 2 % à maturité (Terres Inovia, 2018, 2019b).

Des méthodes de lutte existent au champ afin de diminuer les attaques, mais leur efficacité n'est cependant pas garantie. De plus, en Europe, il existe de moins en moins de véritables répulsifs chimiques autorisés contre les oiseaux. Le risque de dégâts est d'autant plus important que le semis est isolé dans le temps ou dans l'espace, les semis isolés étant propices à la concentration des oiseaux (Bodson et al., 2019). Les agriculteurs agissent donc souvent de manière préventive par la mise en place de canons, de cerfs-volants en forme d'oiseaux ou encore d'effaroucheurs. Il est également conseillé, si le semis est précoce, d'augmenter la profondeur du semis.

Les 3 principaux oiseaux causant des dommages au sein des cultures de tournesols sont exposés en Annexe 1.

1.5. Intérêt du tournesol : point de vue agro-environnemental

L'introduction du tournesol est appréciée pour son faible impact environnemental, laissant le sol dans un état favorable aux cultures suivantes (Lecomte et al., 2011). Les importants résidus de culture sont en effet enfouis pour enrichir le sol et favoriser les cultures suivantes. De plus, celui-ci étant souvent planté en tête de rotation, il s'intègre parfaitement dans les cultures à dominance céréalières et est très compétitif vis-à-vis des adventices (Lecomte et al., 2011). Le tournesol représente donc un excellent levier pour améliorer la gestion des adventices.

D'un autre point de vue agro-environnemental, le tournesol ne nécessite aucun insecticide. Il attire bien les pucerons verts du prunier (*Brachycaudus helichrysi*), mais n'est pas sensible aux virus que les pucerons pourraient transmettre (Jacquemin, 2021). Cependant, lorsque les pucerons sont présents en nombre, ceux-ci provoquent un flétrissement et l'enroulement des feuilles (Badenhausser, 1996). Néanmoins, les auxiliaires présents permettent souvent de réguler ces populations (Robert et al., 2021).

Par ailleurs, les insectes pollinisateurs dont les abeilles, bourdons, syrphes ainsi que certains lépidoptères effectuent la pollinisation lors de la floraison de ces grandes fleurs jaunes. Des relations mutualistes entre la plante et les pollinisateurs y sont donc assurées. Tous ces insectes peuvent être importants en termes d'afflux, toutefois la pollinisation de la plupart des espèces de la famille des *Asteraceae* est

principalement assurée par les abeilles (Hyménoptères Apiformes) (Lhuillier, 2009). Cette interaction est bénéfique pour les insectes qui transportent le pollen de fleur en fleur en échange de nectar fabriqué par la plante (Lhuillier, 2009).

2. Débouchés à partir du tournesol

Le tournesol est, avant tout, cultivé pour ses graines contenant 35 à 50% d'huile et 17 à 25 % de protéines (Muttagi, 2017). Elles représentent l'une des plus importantes sources d'huile alimentaire au monde et est la quatrième huile végétale la plus cultivée derrière l'huile de palme, de soja et de colza (Actualitix, 2016; Pilorgé, 2020). Les débouchés de cette culture sont très divers, tant pour l'alimentation humaine par la production d'huile principalement, mais également dans une moindre mesure, pour l'alimentation animale (production de tourteaux) mais aussi dans le secteur non alimentaire (production de biodiesel, agro matériaux, lubrifiants, encres d'imprimerie, etc.) (Borredon et al., 2011).

2.1. L'huile de tournesol pour l'alimentation humaine

L'huile alimentaire de tournesol, obtenue après trituration des graines, se compose de triglycérides (98 à 99%) et d'autres composés mineurs (diacylglycérols, de phospholipides, de tocophérols, d'acides gras libres, etc.) rassemblés dans la fraction insaponifiable (Delplanque, 2000). Elle trouve de nombreuses applications sur le marché alimentaire principalement comme huile de table (sauces à salades, émulsions) et également depuis peu, comme huile de cuisson. Aujourd'hui, plus de 21.000 tonnes d'huile de tournesol sont consommées chaque année en Belgique (FAOSTAT, 2018).

Le tournesol oléagineux produit actuellement 2 types d'huiles ; l'une riche en acides gras poly-insaturés (riche en acides linoléiques) et l'autre riche en acides gras mono-insaturés (riche en acides oléiques) (Doty, 2015). L'huile de tournesol riche en poly-insaturés est appelée huile « standard », « traditionnelle » ou encore « huile linoléique » et est obtenue à partir de variétés des premières générations. Celle-ci présente une richesse en acide linoléique élevée (60-70 % de C18:2 (ω 6) pour 15-25 % d'acides oléique (C18:1 (ω 9)) (Delplanque, 2000). Cette caractéristique intrinsèque (richesse en ω 6) est dite essentielle car l'acide linoléique ne peut être synthétisé par l'organisme et est donc indispensable au bon fonctionnement de celui-ci. L'huile de tournesol « standard » détient également des teneurs élevées en vitamines E (tocophérol), autre qualité pouvant avoir un impact sur le plan nutritionnel, puisque la vitamine E possède des propriétés anti-oxydantes (Delplanque, 2000). Ces molécules sont impliquées dans la prévention des maladies cardiovasculaires, notamment l'athérosclérose (Leger, 2000). Le rôle préventif des tocophérols sur certaines maladies neurodégénératives (Alzheimer) ou encore certains cancers (prostate, pancréas) pourraient également avoir des effets et les études actuellement en cours laissent supposer de nombreuses propriétés de ces molécules (Leger, 2000).

Depuis deux décennies, on note l'apparition des premières variétés de tournesols riches en acide oléique (ω 9). L'amélioration végétale a ainsi permis l'apparition du phénotype « High oleic » (70% pour le type mi-oléique jusqu'à plus de 90% pour les très riches en acide oléique) (Delplanque, 2000 ; Labalette et al., 2012). Ces variétés ont désormais atteint un niveau très proche des variétés linoléiques classiques et tentent à se substituer aux graisses hydrogénées telle que l'huile de palme (Labalette et al., 2012). D'autre part, en raison de sa faible teneur en acides gras poly-insaturés (pauvres en doubles liaisons, C 18:2 et C 18:3) et de sa teneur plus élevée en tocophérols, l'huile issue de ces nouvelles variétés possède

une grande résistance aux hautes températures (haute stabilité thermo-oxydante) et rend de ce fait possible son utilisation comme huile de friture.

Selon les résultats présentés par Garcés et al. (2009), des huiles à haute teneur en acide oléique et en tocophérols chauffées à 180°C pendant 25h étaient moins polymérisées que des huiles de tournesol standard après 2h d'expérience, ce qui rend cette huile extrêmement stable. Cette huile aux nouvelles propriétés, est ainsi mieux adaptée aux industries alimentaires mais également aux applications non alimentaires telles que les biolubrifiants et le biodiesel (Garcés et al., 2009).

Enfin, les 2 types d'huiles évoqués ci-dessus ne contiennent pas d'acide linoléique ($\omega 3$), ce qui est un bon point technologique en raison des mauvaises résistances hydrolytiques et oxydantes de cet acide gras poly-insaturé, mais également pour ses odeurs désagréables à la friture (Labalette et al., 2012). Cela reste néanmoins un défaut du point de vue alimentaire puisque l'acide linoléique ($\omega 3$) est aussi qualifié d'essentiel en nutrition humaine et animale.

2.2. Le tourteau de tournesol pour l'alimentation animale

Le tourteau de tournesol, appelé aussi tourteau « pailleux », est constitué des résidus de graines broyées extraites de leur huile. En tant que matière végétale riche en fibres et en protéines, le tourteau de tournesol est le troisième tourteau oléagineux valorisé pour l'alimentation animale dans le monde. 90% du tourteau produit est centralisé en UE, Ukraine, Russie, Argentine, Turquie et aux USA. Près de 81% est consommé par ces pays producteurs qui sont, par conséquent, principalement les premiers à consommer le tourteau produit sur leurs terres (Pilorgé, 2020).

Actuellement, la dépendance européenne en protéines végétales, essentiellement de soja, pour le secteur de l'alimentation animale (toutes espèces confondues) est élevée et incite davantage les pays européens à améliorer leur autonomie protéique (Peyronnet et al., 2012; Recoules et al., 2016).

Le tourteau classique non décortiqué a une teneur en protéines qui varie de 23 à 30% et contient une teneur en fibres (composés pariétaux ; lignine, cellulose...) relativement élevée. Ces teneurs élevées en fibres limitent par conséquent son utilisation et celui-ci est donc principalement utilisé dans les rations alimentaires animales les moins concentrées, à savoir pour les bovins de boucherie, les truies et les lapins (Peyronnet et al., 2012 ; Pilorgé, 2020).

Cependant, depuis quelques années, il existe du tourteau dit « décortiqué ». La coque constitue une part importante de la graine de tournesol, de 22 à 28% (variant en fonction du cultivar et de la taille des graines) et se retrouve en quantité importante dans la fraction tourteau après extraction de l'huile (Peyronnet et al., 2012). Elle se compose essentiellement de fibres brutes (50-60%) et d'une quantité insignifiante de matières grasses (2-3%). Le procédé de décortiquage permet donc d'améliorer le contenu énergétique et le taux protéique de celui-ci. Ce type de tourteau dit « high-pro », semble être une opportunité pour être également utilisé dans les rations alimentaires des volailles de hautes qualités, telles que les poules pondeuses, les poulets labels ou encore les canards, puisque les teneurs en protéines peuvent, grâce à ce procédé, être relevées aux alentours de 33% à 40% (Borredon et al., 2011 ; Peyronnet et al., 2012). Les volailles nécessitent des teneurs élevées en protéines dans leurs rations et de faibles teneurs en fibres brutes (Recoules et al., 2016). Les teneurs maximales en fibres des volailles dans les rations, plus particulièrement pour les poulets de chair, doivent effectivement être maintenues en dessous de 4 % pour les jeunes volailles et entre 7 et 10 % maximum pour les poulets de chair « adultes » (Swennen et al., 2010 ; Salah, 2012 ; Dusart, 2015).

Le Tableau 1 présente des taux en protéines nettement augmentés et des teneurs en fibres (CELL, NDF, ADF et ADL) diminuées lorsqu'un décortiquage est effectué au préalable sur les graines de tournesol.

Tableau 1 : Composition moyenne des graines, coques et tourteaux de tournesol, (Peyronnet et al., 2012)

	Graines	Graines entièrement décortiquées	Coques	Tourteau de tournesol pailleux (non décortiqué)	Tourteau de tournesol entièrement décortiqué
Matière sèche (MS) %	92,8	90,5		88,8	90,5
Huiles (%MS)	48,0	61,3	2,5	2,2	1,2
Protéines (%MS)	16,7	20,6	0,2	31,9	52,6
Cellulose brute (%MS)	17,3	2,4	57,6	28,1	6,2
Cendres brutes (%MS)	3,5	3,6	3,2	7,1	9,2
NDF (%MS)	26,6	5,4	8,9	45,1	13,7
ADF (%MS)	19,5	2,7	64,9	32,0	7,0
ADL (%MS)	6,3	0,4	22,3	10,5	0,9

D'un point de vue composition en acides aminés, le tourteau de tournesol décortiqué possède l'avantage d'être riche en acides aminés soufrés (Méthionine + Cystéine), la méthionine étant l'un des premiers acides aminés limitant la croissance et la production des volailles (Ravindran et al., 1999). Un autre atout supplémentaire du tourteau est qu'il ne contient pas de facteurs antinutritionnels (Borredon et al., 2011), ce qui n'est pas le cas pour le tourteau de soja ou encore celui du colza. En revanche, il ne contient qu'une faible teneur en lysine (a.a également essentiel), bien que celle-ci soit généralement bien digérée.

Le Tableau 2 présente les compositions du tourteau de soja et du tourteau de tournesol pailleux et semi décortiqués, plus particulièrement les teneurs en acides aminés essentiels.

Tableau 2 : Composition des tourteaux de tournesol et de soja, (Tables INRA/AFZ 2004)

Matières premières	Tourteau soja 48	Tourteau de tournesol pailleux (non décortiqué)	Tourteau tournesol semi décortiqué
MS %	88,0	89,0	90,0
Protéines brutes %	45,3	27,7	33,4
Cellulose brute %	6,0	25,5	21,2
Matières grasses %	1,9	2,0	1,7
Lysine g/kg	27,8	10,0	11,8
Méthionine g/kg	13,1	11,2	13,4
Tryptophane g/kg	5,9	3,4	4,1
Thréonine g/kg	17,7	10,0	12,0

Actuellement, le taux d'incorporation du tourteau de tournesol décortiqué trouve sa place en alimentation pour volailles à raison de 5 à 10 %, mais pour réduire drastiquement la place du tourteau de soja dans les rations, il faudrait atteindre des taux d'incorporation de l'ordre de 30% (Peyronnet et al., 2012). Les taux d'incorporation du tourteau de tournesol peuvent en effet atteindre 30% sans effet néfaste sur la croissance et/ou la santé des poulets (Senkoylu et al., 2006 ; Mushtaq et al., 2009).

De plus, selon les travaux de Alagawany et al. (2018), les résultats ont révélé que l'augmentation de la substitution du tourteau de soja par du tourteau de tournesol jusqu'à 50% était associée à une augmentation du poids corporel ($p < 0,01$). Le taux de conversion alimentaire était également amélioré ($p < 0,01$) dans les groupes ayant reçu du tourteau de tournesol à 25 et 50% par rapport au témoin. L'incorporation du tourteau de tournesol dans les régimes pourrait donc être recommandée pour des poulets de chair âgés de 7 à 42 jours.

Cependant, les résultats d'autres travaux sont contrastés. En effet, selon Araújo et al. (2014), des différences significatives ont été observées pour le taux d'incorporation du tourteau de tournesol dans les rations alimentaires des poulets. De fait, l'augmentation de l'ajout alimentaire de tourteau de tournesol a amélioré les performances des poulets pour 8% d'inclusion de tourteaux de tournesol, mais a réduit le gain de poids et a aggravé le taux de conversion alimentaire (FCR) ($p > 0,05$) pour les pourcentages d'incorporation supérieurs. Des taux élevés de tourteau de tournesol incorporés dans les rations pénalisent donc les performances animales.

2.2.1. Nouveau règlement européen concernant les productions animales sous le régime de l'agriculture biologique

À partir du 1^{er} janvier 2022, de nombreux changements concernant la réglementation bio pour la filière avicole seront d'application, notamment pour l'alimentation des volailles. Actuellement, au minimum 20% de l'alimentation bio doit provenir de l'exploitation ou être produite dans la région. Cette proportion sera portée à 30 % dans la nouvelle législation européenne dès janvier 2022 (Biowallonie asbl, 2020). À cette même date s'ajoute l'autorisation d'utiliser des aliments protéiques non biologiques, à raison de maximum 5% par période de 12 mois, uniquement pour les jeunes volailles (Biowallonie asbl, 2020). L'ancien règlement autorisait, en effet, l'incorporation d'un pourcentage de 5 % maximal pour l'alimentation des monogastriques, peu importe leur stade de développement (Lahon, 2020). En outre, cette autorisation d'utiliser des aliments protéiques non biologiques sera levée le 31 décembre 2025 (Biowallonie asbl, 2020).

La possibilité de produire un tourteau de tournesol, riche en protéines et source d'énergie au sein de l'exploitation, est donc un atout pour les éleveurs, notamment dans le cadre du respect de cette nouvelle législation, mais également en termes de phytotechnie. En effet, selon les spécialistes, la culture du tournesol en AB est aisée, particulièrement au vu de sa compétitivité vis-à-vis des adventices (Lecomte et al., 2011).

Comme spécifié antérieurement, cela permettra également d'atteindre un certain niveau d'autonomie protéique des exploitants agricoles et de réduire ainsi leur dépendance aux protéines d'importations (comme le soja). Ce sont en effet des objectifs que visent progressivement les éleveurs pratiquant l'élevage biologique d'animaux de production.

3. Les procédés de décortilage et extraction de l'huile

Les conditions de traitement des graines de tournesol lors de l'extraction de l'huile sont essentielles pour maximiser le rendement en huile et fournir un tourteau de bonne qualité.

3.1. Procédés de décortilage

Le décortilage des graines de tournesol est souvent réalisé de manière partielle avant trituration. Il est, de fait, impossible sur le plan technique d'extraire toutes les coques sans perdre une partie importante de l'huile. Dans les industries de trituration, la technologie du décortilage est déjà largement intégrée à l'étranger, en particulier en Bulgarie, Roumanie, Ukraine, Russie et Argentine (Dauguet, 2015).

Ce décortiquage partiel présente de nombreux avantages, tels qu'une porosité appropriée pour le processus d'extraction de l'huile, une meilleure qualité de l'huile brute (teneur en cire plus faible) et du tourteau déshuilé (teneur plus élevée en protéines), ainsi qu'une augmentation de la durée de vie des machines (de Figueiredo et al., 2014). Néanmoins, quelques variétés se révèlent plus difficiles à décortiquer que d'autres, et ce, particulièrement chez les variétés très riches en huile (Dauguet, 2015).

Il existe actuellement plusieurs types de décortiqueuses qui peuvent être appliquées aux graines. Elles se différencient par la manière dont les chocs y sont exécutés (Peyronnet et al., 2012). Premièrement, il existe des décortiqueuses de type « compression-décompression », mais celles-ci ne sont pas adaptées aux graines riches en huile et sont donc en pratique limitées aux graines de tournesol de bouche pour la consommation humaine. La seconde méthode de traitement, type « Bühler » est basée sur le principe de propulsion des graines contre une paroi par la force centrifuge. Néanmoins, des inconvénients sont également présents : transfert de l'huile dans les coques et production de fines² dues aux vitesses élevées de rotation. C'est pourquoi, les décortiqueuses les plus efficaces et performantes sont basées sur une combinaison de forces d'impacts et centrifuges, de type « multi-chocs ». Celles-ci ont une action similaire aux batteuses à céréales (Peyronnet et al., 2012). Les graines sont tout d'abord introduites dans le haut du dispositif et un rotor en rotation les expulse contre le cadre d'impact de la décortiqueuse (Figure 11). La coque y est ainsi retirée par la force d'impact et la séparation est réalisée sur base de leur densité par aspiration sur des tamis vibrants (de Figueiredo et al., 2014). Avec ce type de décortiqueuse, le rendement du décortiquage est donc amélioré et la proportion de brisures est réduite, en raison principalement des impacts multiples qui sont d'intensités modérées (Peyronnet et al., 2012).

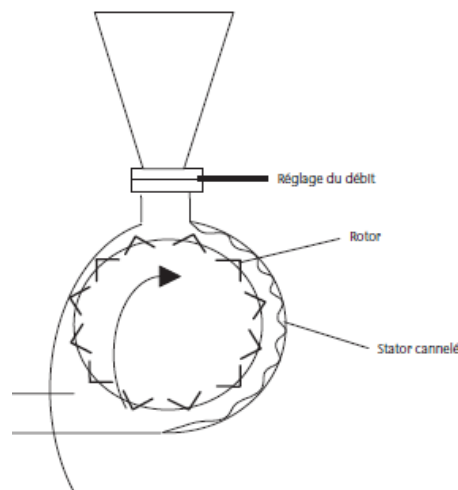


Figure 11 : Décortiqueuse type « multi-chocs », (Peyronnet et al., 2012)

Economiquement, il est préférable de décortiquer le moins possible (coûts moindres lorsque le décortiquage n'est pas réalisé) tout en atteignant l'objectif protéique dans les tourteaux, sachant aussi que les coques ont moins de valeur économique que les tourteaux riches en protéines (Dauguet et al., 2012). Cependant, elles peuvent généralement être valorisées en tant que biocombustible dans une chaudière à biomasse lors des étapes ultérieures de la trituration (production de vapeur), les coques ayant des caractéristiques techniques proches du bois (Dauguet, 2015). Il faut donc trouver un équilibre entre le taux de décortiquage, une combustion des coques idéale et une qualité du tourteau également optimale afin d'obtenir une rentabilité économique globale de l'unité (Peyronnet et al., 2012).

² Grains brisés de petite taille.

3.2 Extraction de l'huile

Il existe actuellement plusieurs procédés d'extraction de l'huile des graines oléagineuses, mais avant pressage, un broyage est généralement réalisé dans un broyeur à marteaux/ cylindre cannelé. Cette étape est effectuée afin d'augmenter le rapport surface/volume des graines récoltées. Un aplatissage des graines est ensuite habituellement réalisé par écrasement entre des cylindres lisses à une température de 40°C. Cette étape a pour objectif d'augmenter la plasticité de la graine. Par la suite, une cuisson (88°C) et un séchage (110°C) des graines sont effectués afin de garantir une efficacité d'extraction et une qualité de l'huile de tournesol (Kartika, 2005).

Il existe 2 grands procédés d'extraction de l'huile : l'extraction mécanique par presse à vis (pression) et la combinaison d'extraction mécanique par pression et par solvant organique.

L'extraction mécanique par presse à vis (pression) est un procédé purement mécanique sans ajout de chaleur, ni de raffinage. Il est donc également nommé « pressage à froid ». Il consiste à forcer un produit à travers un ou plusieurs orifices de petit diamètre sous l'action de pressions élevées obtenues grâce à une presse mono ou bi-vis continues (Figure 12). Ces presses sont composées d'une vis sans fin (presse mono-vis) ou de deux vis parallèles sans fin (presse bi-vis) placées dans un **fourreau**³. Les graines y sont insérées dans la **zone d'alimentation** et la rotation de la vis ou des deux vis parallèles entraîne leur progression vers la **zone de décharge**⁴. Le fourreau permet **l'écoulement de l'huile** vers l'extérieur de la presse, tout en retenant le produit solide à l'intérieur. Au niveau de la sortie, un cône mobile est également présent permettant d'ajuster l'épaisseur du tourteau formé. (Kartika, 2005 ; Bogaert, 2017).

Dans le principe, la presse bi-vis est similaire à la presse mono-vis, mais elle fournit de nombreux avantages. Globalement, elle offre une meilleure maîtrise de la production et de la qualité des produits finis. Elle améliore également la productivité et permet une plus grande flexibilité due à la capacité de transformer une plus large gamme de matières premières.

Enfin, ce procédé d'extraction mécanique a comme caractéristique d'obtenir une huile très pure sans aucune substance étrangère mais ne permet cependant pas d'extraire toute l'huile des graines. De 9 à 20% d'huile est encore présent dans le tourteau d'extraction.

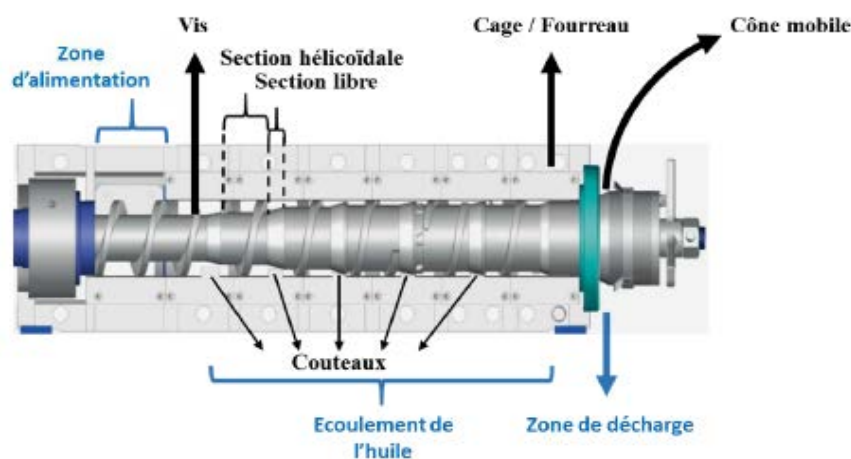


Figure 12 : Schéma d'une presse à vis (d'après une illustration de Bogaert, (2017))

³ Cage perforée en acier équipée de filtres à barreaux qui reçoit la ou les vis d'une presse

⁴ Zone par laquelle sort le tourteau

La combinaison d'extraction par pression et par solvant organique constitue le deuxième grand procédé d'extraction de l'huile. Lors de la combinaison de deux procédés d'extraction, l'extraction par pression est nommée pré-pressage. Après l'utilisation de la presse à vis, l'huile du tourteau est extraite par un solvant organique apolaire, généralement de l'hexane, produit issu du pétrole. Cette deuxième méthode est généralement la plus utilisée par la production industrielle car elle permet d'extraire plus d'huile que la méthode par pression seule (entre 0,5% et 1,5% d'huile restent dans le tourteau) (Kartika, 2005).

Le schéma général des procédés de production de l'huile de tournesol est illustré dans la Figure 13.

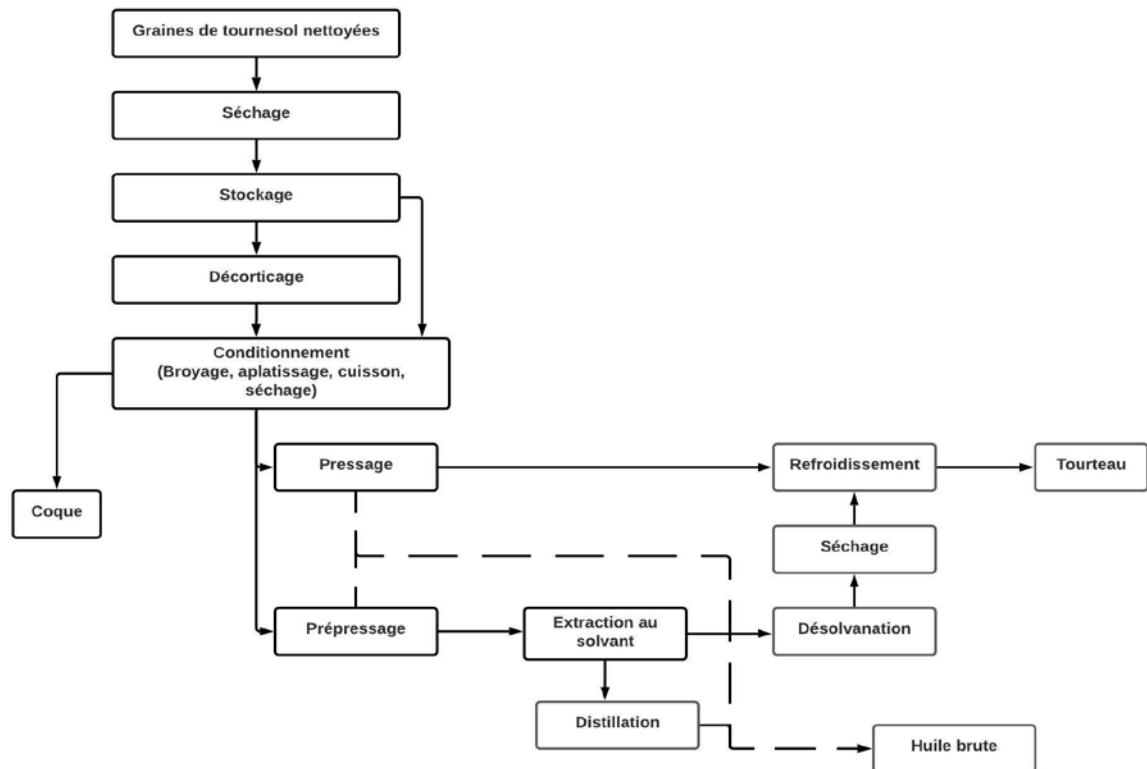


Figure 13 : Schéma général des procédés de production d'huile de tournesol. (Campbell, 1983; Kartika, 2005)

III. Matériel et méthodes

Ce travail de fin d'études se scinde en 2 parties, une partie phytotechnique et une partie zootechnique. La partie phytotechnique consiste en un essai expérimental sur la densité de semis du tournesol durant la saison culturale 2021.

La partie zootechnique comprend quant à elle plusieurs subdivisions :

- Le décortilage, le triage et la trituration de graines de tournesol afin de produire des tourteaux de graines décortiquées destinées aux poulets de chair.
- La digestion des protéines du tourteau de tournesol de manière « *in vitro* » chez le poulet de chair.
- Un essai d'orientation de l'incorporation du tourteau de tournesol dans l'alimentation du poulet de chair de manière « *in vivo* ».

1. Partie phytotechnique

1.1. Localisation de l'essai et conditions météorologiques

Le champ de l'essai phytotechnique « densité de semis » est situé dans la région agricole limoneuse de Hesbaye, en province de Liège, rue du Fiz, à Warnant Dreye, sur les terres de Monsieur Pierre Warnier (50°35'28.4"N 5°13'52.3"E). La parcelle est caractérisée par un sol de type Abal (sols limoneux à drainage naturel favorable) (*WalOnMap | Géoportail de la Wallonie, 23/03/2015*).



Figure 14 : Vue aérienne du champ expérimental de Villers-Le-Bouillet, (“WalOnMap,” 2021)

Les conditions météorologiques mensuelles de cette année d'essai 2021 sont indiquées dans la Figure 15 (IRM, 2021). Les températures et précipitations de « Villers-le-Bouillet 30 » sont les références. Elles sont basées sur les observations des 30 dernières années.

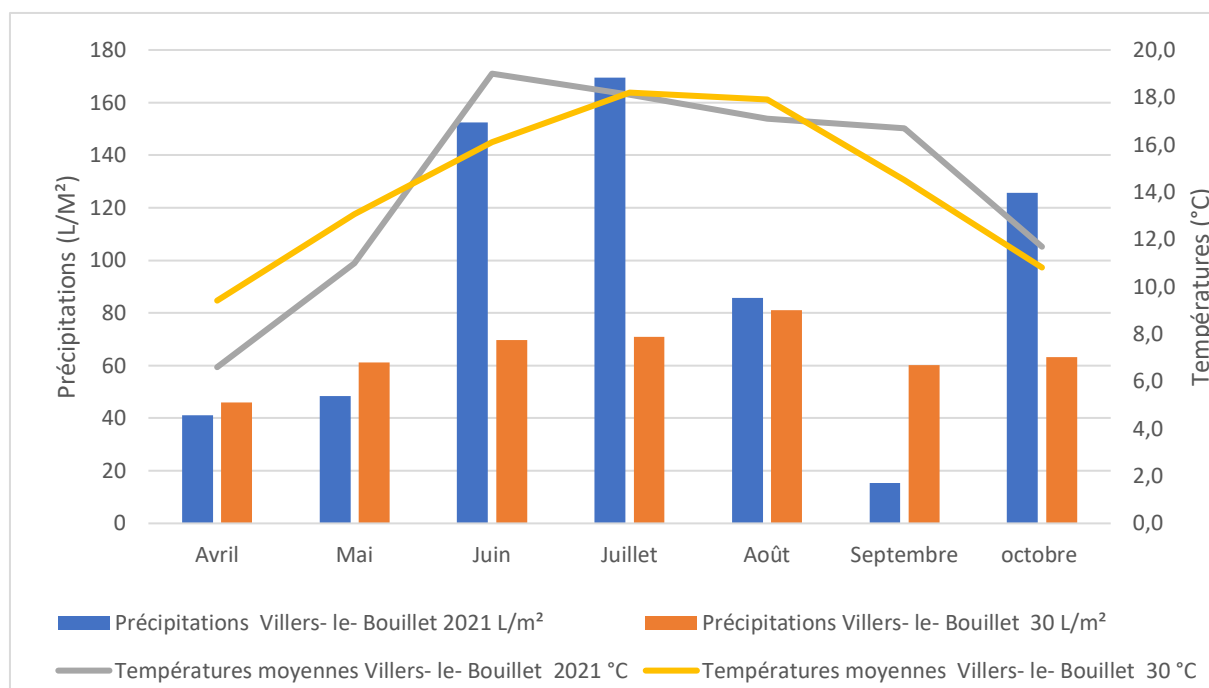


Figure 15 : Températures et précipitations mensuelles observées durant la saison 2021 par rapport aux normales de saison à Villers-Le -Bouillet (IRM ,2021)

À titre informatif, le graphique du nombre d'heures d'ensoleillement est présenté en Annexe 2.

1.2. Dispositif expérimental

L'intérêt de cet essai phytotechnique est d'identifier les meilleures densités de semis à adopter pour la culture du tournesol en Wallonie. Au sein de cet essai, plusieurs modalités ont été testées sur des micro-parcelles de 18m² (soit 1,8m sur 10m).

Les densités de semis varient de 6 plantes/m² à 12 plantes/m², soit 6, 8, 9, 10 et 12 plantes/m². Le dispositif statistique initialement organisé comprenait donc 5 modalités à 6 répétitions (= blocs) organisé en alpha-plan. Afin de maximiser les chances de levée, l'ensemble de l'essai a été semé en 14 plantes/m² et ensuite démarié pour obtenir le nombre de plants voulu par parcelle. Néanmoins, plusieurs parcelles (4 au total) n'ont pas atteint un nombre suffisant de plantes/m² et ont donc été déclassées. Les 2 blocs comprenant ces parcelles déclassées n'ont dès lors pas été pris en considération afin de respecter l'égalité des observations lors des tests statistiques. Grâce à la mise en place de l'essai en alpha plan, 4 blocs de 5 micro-parcelles ont finalement été utilisés pour l'expérimentation. Le bloc 4 (initialement le bloc 6) avait été placé de la sorte afin de rentrer dans les traces de pulvérisation de l'agriculteur. Enfin, afin de séparer les différentes parcelles, des bordures d'une ligne entre chaque parcelle ont été implantées (B en gris sur la Figure 16). L'essai expérimental est repris dans la figure ci-dessous, mais n'a pas été réalisé à l'échelle.

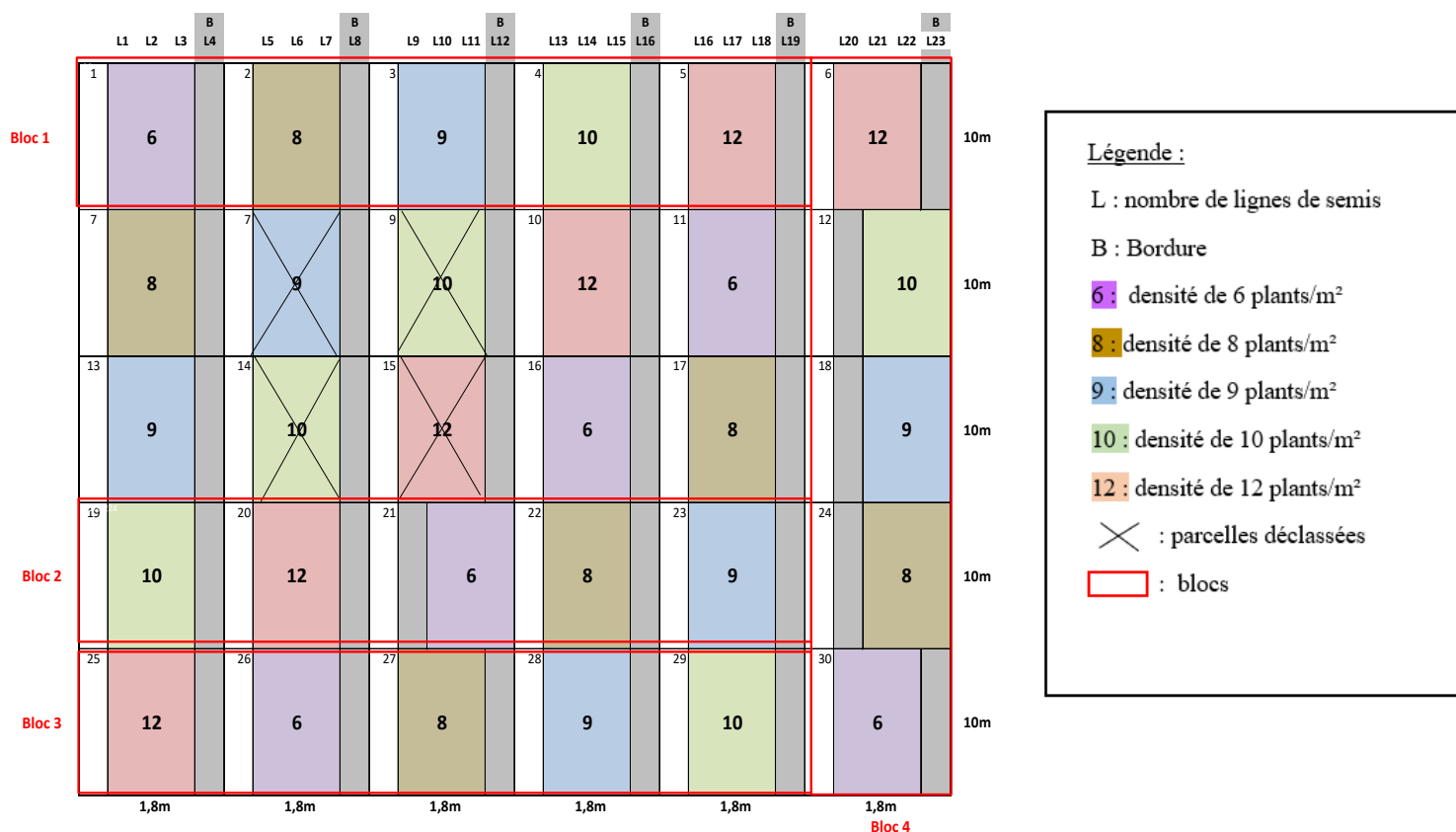


Figure 16 : Plan expérimental de l'essai densité de semis. (Les numéros correspondent aux modalités de semis.)

1.3. Itinéraire phytotechnique

La parcelle d'essai a été implantée avec des semences de tournesol oléique précoce (Variété : TOSCANA CS). La parcelle est conduite en agriculture conventionnelle et la pratique du non-labour est également appliquée. Le précédent cultural était de l'épeautre. L'ensemble des opérations culturales réalisées dans le cadre de cet essai est repris dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Opérations culturales réalisées sur le champ d'essai

Date	Opérations culturales
22-04-21	Herse rotative
23-04-21	Semis du tournesol (Variété Toscana CS) : Densité 14 plantes/m ² - semoir à betterave pneumatique - interligne 45 cm - profondeur 3,5 cm - 7,35kg/ha - PMG : 60g
09-05-21	Date 1 ère levée
27-05-21	Délimitation des parcelles et démariage : densité 6, 8, 9, 10, 12 plantes/m ²
11-06-21	Désherbage mécanique (passage d'une bineuse avant)
25-10-21	Récolte du tournesol à la main sur 2 lignes

1.4. Relevés de terrain : Observations et paramètres mesurés

Des observations et mesures ont été réalisées au cours de la saison sur la culture du tournesol. Une vue globale de celles-ci sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Observations et mesures réalisées sur le champ de tournesol.

Observations et paramètres mesurés	Date	Protocole
Hauteur des plantes (cm)	09-08-21	La hauteur de 3 plantes par micro-parcelle est mesurée avec une latte en bois de 4m de haut. La mesure de la hauteur est la distance entre la base de la tige et le sommet du bouton floral non pris en compte. La moyenne des 3 mesures est ensuite calculée.
Diamètre des tiges (cm)	09-08-21	Le diamètre de 3 plantes par micro-parcelle est mesuré avec un pied à coulisse en acier, à 30 cm du bas de la tige. La moyenne des 3 mesures est ensuite calculée.
Diamètre des capitules (cm)	20-08-21	Le diamètre de 5 capitules par micro-parcelle est mesuré avec un mètre pliant en bois. La moyenne des 5 mesures est ensuite calculée.
Plantes versées (%)	20-08-21	Comptage du nombre de plantes versées au sein des micro-parcelles
Plantes malades (%) (Sclérotinia sur tiges)	20-08-21	Comptage du nombre de plantes sclérotées au sein des micro-parcelles
Plantes versées (%)	03-09-21	Comptage du nombre de plantes versées au sein des micro-parcelles
Plantes malades (%) (Sclérotinia sur tiges)	03-09-21	Comptage du nombre de plantes sclérotées au sein des micro-parcelles
Rendement en grains ramené à 9% d'humidité (kg/ha)	25-10-21	2 lignes centrales de chaque micro-parcelle ont été récoltées à la main et séchées à l'étuve. Les graines ont ensuite été battues et triées pour chaque parcelle. (La récolte s'est faite à la main, la moissonneuse étant tombée en panne lors de la récolte d'un essai antérieur.)

Après séchage, l'humidité des graines de 2 parcelles (choisies aléatoirement) a été mesurée à l'aide d'un humidimètre de la marque Dickey-John. La moyenne de ces 2 mesures a ensuite été effectuée afin de ramener les rendements des différentes parcelles à un taux de 9% pour chacune d'entre elles. Les 2 mesures d'humidité effectuées étaient respectivement de : 5,85% et 6,25%. La moyenne de ces 2 mesures étant donc de 6,05 %.

Parmi les observations réalisées, le relevé des levées pour les différentes densités implantées n'a pas été effectué. L'essai ayant seulement été repris par l'étudiante fin juin 2021. Une observation globale de la date de levée, floraison et maturité des grains a cependant été réalisée.

Enfin, le sclérotinia sur capitules n'a également pas pu être mesuré, cette maladie sur capitules ayant émergé très tardivement en fin de cycle.

1.5. Traitement statistique des données

Les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel RStudio.

Les paramètres mesurés ont fait l'objet d'une analyse de la variance à deux critères de classifications (AV2 modèle croisé mixte) :

$$y_{ij} = A_i + b_j + (Ab)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

où y_{ij} est la valeur du paramètre observé i (facteur fixe) au sein du bloc j (facteur aléatoire). A_i est l'effet du facteur observé i , b_j est l'effet du bloc j , $(Ab)_{ij}$ est l'effet de l'interaction entre le facteur observé i et le bloc j . ε_{ij} est l'erreur résiduelle associée au facteur i et au bloc j .

Les moyennes significativement différentes ont fait l'objet d'une comparaison multiple (test de Tukey : selon le facteur significatif). Des corrélations ont également été effectuées entre variables.

Les conditions d'application, à savoir la normalité des résidus (test de Shapiro-Wilk), n'ont pu être réalisées lors de l'analyse des données, le nombre d'observations des variables étant inférieur à 10. Des qqplot ont tout de même été effectués pour chaque paramètre et affichaient une courbe régulière sans saut de valeur près de son centre. La normalité a donc été supposée comme étant rencontrée pour chaque paramètre mesuré. Le test d'égalité des variances (test de Barlett et/ou test de Levene) a, lui, pu être effectué sur les paramètres possédant plus d'une observation par unité expérimentale.

2. Partie zootechnique

2.1. Généralités

Afin de réaliser un essai expérimental sur des volailles, un big bag de 438 kg de graines de tournesol provenant de la coopérative Coopagora, en France, a été acheté par GxABT. Ces graines proviennent de la commune de Songeons (60380) qui se situe dans le département de l'Oise en région Hauts de France. La variété des graines achetées n'est malheureusement pas connue.

Au cours de cet essai, plusieurs étapes de décorticage et de triage ont été opérées au CRA-W à partir des graines de tournesol de la même origine (Songeons). Plusieurs types de tourteaux ont ensuite été produits par pressage des graines et comparés sur un petit nombre de poulets de chair afin d'étudier les effets du décorticage de la graine sur la valeur alimentaire du tourteau de tournesol.

Au total, 400 kg de graines de tournesol ont été utilisés :

- 100kg de graines entières, non décortiquées (ND)
- 100kg de graines, 2 passages dans la décortiqueuse (D2)
- 100kg de graines, 3 passages dans la décortiqueuse (D3)
- 100kg de graines, 4 passages dans la décortiqueuse (D4)

Le taux d'humidité des graines a été mesuré avec un humidimètre de la marque Dickey-John. Celui-ci était de 7,93% d'humidité pour tout le big bag.

2.2. Matériel mécanique (décortiqueuse, trieuse et triturateur)

2.2.1. Décortiquage mécanique des graines de tournesol

Les graines sont décortiquées avec une « batteuse à épis » de laboratoire, Hege 16, vendue par Wintersteiger. Le réglage à variation continue de la vitesse du batteur, du contre batteur ainsi que des plaques de débardage garantissent une adaptation aux graines de tournesol (AG, Wintersteiger, 2021), mais cependant initialement non destiné à ce type de graines. L'ensemble des graines partiellement décortiquées par la force centrifuge des disques ont été récoltées à l'avant de la batteuse. Le reste des coques, ainsi que des fines ont, elles, été contenues dans le micro-conteneur à l'arrière de la machine. Le tout a ensuite été répété 2, 3 ou 4 fois selon le nombre de passages désirés dans la décortiqueuse. Une visualisation de la batteuse à épis utilisée lors du décortiquage est reprise dans la Figure 17.



Figure 17 : Décortiqueuse de laboratoire utilisée lors du décortiquage des graines de tournesol, (AG, Wintersteiger, 2021)

2.2.2. Triage mécanique des graines de tournesol

La séparation des coques avec un trieur de laboratoire, RÖBER'S type mini 380 -L S3 a permis d'obtenir un mélange de graines dépourvues de débris de coques et de copeaux de tiges (provenant de la plante lors de la moisson). Les 4 types de graines obtenus après passage dans la décortiqueuse ont tous été tamisés dans le trieur illustré ci-dessous (Figure 18).



Figure 18 : Trieur de laboratoire utilisé pour trier les graines des coques et copeaux de tiges, (SAMATEC, 2021)

2.2.3. Trituration mécanique des graines de tournesol

Le principal objectif après décortiquage et triage des graines de tournesol était d'obtenir différents tourteaux contenant des quantités en fibres différentes. L'obtention du tourteau a été réalisée chez Alvenat, PME située à Achêne, principalement spécialisée dans la production d'huile végétale de colza locale et responsable. La trituration est réalisée par pression discontinue à froid. La technique mise au point par l'entreprise est unique en Europe et permet une véritable bio-extraction de la matière première (Lange, 2021).

La presse étant principalement dédiée pour triturer des graines de colza, une quarantaine de kilos de graines de tournesol (appartenant à Guillaume Jacquemin, Var. Bella, saison 2020) a été sacrifiée afin de voir si les réglages colza étaient adaptés au pressage des graines de tournesol.

Après les différentes étapes de décortiquage et triage, un total de 338 kg de graines de tournesol (Var. Inconnue) a été obtenu et utilisé ensuite pour la trituration :

- 98,4 kg de graines entières, dépoussiérées mais non décortiquées (passées au trieur seulement) (ND)
- 84,8 kg de graines décortiquées, 2 passages dans la décortiqueuse (D2)
- 80,6 kg de graines décortiquées, 3 passages dans la décortiqueuse (D3)
- 74,2 kg de graines décortiquées, 4 passages dans la décortiqueuse (D4)

Ces graines sont partiellement dépourvues de coques (à des degrés différents), de copeaux de tiges et de poussière.

Les étapes de pressage des graines de tournesol sont disponibles en Annexe 4.

2.3. Caractérisation des graines, des coques et des tourteaux

Des analyses biochimiques après trituration ont été réalisées par le laboratoire de Biochimie (Analyse des fourrages et d'aliments pour animaux) au CRA-W, département Connaissance et valorisation des produits (D4), Unité valorisation des produits, de la biomasse et du bois (U11).

2.3.1. Les échantillons de graines, de coques et de tourteaux

4 échantillons de graines de tournesol, 3 échantillons de coques et 1 échantillon de copeaux de bois ont été transmis pour analyse : copeaux de bois (= débris de tiges), coques décortiquées 2 passages, coques décortiquées 3 passages, coques décortiquées 4 passages, graines entières, graines décortiquées 2 passages, graines décortiquées 3 passages et enfin, graines décortiquées 4 passages dans la décortiqueuse.

4 échantillons de tourteaux de tournesol ont également été transmis pour analyse : tourteau de graines entières, non décortiquées (TTND), tourteau de graines décortiquées 2 passages (TTGD2), tourteau de graines décortiquées 3 passages (TTGD3) et enfin tourteau de graines décortiquées 4 passages (TTGD4) dans la décortiqueuse.

Lors de ces analyses, 8 paramètres ont été mesurés pour chaque échantillon :

- La teneur en matière sèche (**MS**)
- La teneur en cendres totale (**CT**) : qui correspond à la fraction inorganique de l'échantillon, contenant les matières minérales.
- La teneur en matière protéique totale (**MPT**) : qui correspond aux protéines, polypeptides ainsi qu'aux acides aminés libres. La teneur en azote (N) est tout d'abord obtenue par la méthode Kjeldahl et ensuite multipliée par 6,25, en admettant que la MPT soit exclusivement composée de protéines contenant 16% de N.
- La teneur en matière grasse (**MG**)
- Les constituants pariétaux :
 - o **NDF** : qui contient de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine. Il a été analysé selon le fractionnement Van Soest.
 - o **ADF** : qui rassemble de la cellulose et de la lignine. L'hémicellulose y est ici solubilisée. Il a été analysé selon le fractionnement Van Soest.
 - o **ADL** : qui contient de la lignine seulement. Il a été analysé selon le fractionnement Van Soest.
 - o La cellulose brute (**CELL**) : qui a été analysée selon Weende.

La référence relative aux méthodes analytiques employées selon Van Soest est la norme NF V18-122, août 1997. Les analyses selon Van Soest et Weende ont été précédées d'un dégraissage des échantillons.

Les références relatives aux autres paramètres concernant les méthodes analytiques employées sont disponibles dans le Règlement (CE - 152, 2009) du journal officiel de l'Union européenne.

2.4. Digestibilité *in vitro* des protéines des tourteaux de tournesol

2.4.1 Mouture des échantillons

Afin d'effectuer les analyses *in vitro* de digestibilité, les différents échantillons de tourteaux ont préalablement été placés 24h au congélateur à -20°C. Ceux-ci ont ensuite été broyés à 1mm. La mouture des échantillons a été effectuée à l'aide d'un appareil de type FRITSCH pulvérisette 14 Rotor Speed Mill.

2.4.2. Digestion *in vitro*

Les essais *in vitro* ont été inspirés du protocole décrit en détail par Bryan et al. (2019). Celui-ci a été choisi car il possède l'avantage d'être le plus récent protocole publié à ce sujet.

La méthode d'essai *in vitro* des différents échantillons d'aliments possède une phase gastrique de 30 min, correspondant à l'activité de la pepsine. Elle possède ensuite une phase intestinale de 4h correspondant à l'activité de la pancréatine⁵, imitant ainsi les étapes de la digestion des protéines chez le poulet.

L'un des réactifs utilisés dans l'étude de Bryan et al. (2019) n'étant pas disponible sur le continent européen, le réactif ainsi que le protocole ont quelque peu été modifiés. De la pancréatine de porc solide

⁵ Mélange de plusieurs enzymes digestives (amylase, trypsine, lipase, ribonucléase et protéase) produites par les cellules exocrines du pancréas.

(8 X USP- Sigma P7545) a été utilisée afin de remplacer la pancréatine bovine liquide initialement utilisée dans l'étude. Après des recherches dans la littérature scientifique, les calculs de concentration ont été établis à partir des 30 667 unités BAEE⁶/ml de trypsine, dosée par la pancréatine RENCO (Bryan et al. (2019)). Une concentration de 50g/litre a été calculée pour une pancréatine à 8 X USP (Sigma P7545) utilisée. Pour plus de détails, le calcul de la concentration en pancréatine se trouve en Annexe 5.

Les essais *in vitro* ont été réalisés sur les 4 échantillons différents de tourteaux de tournesol. De la caséine de lait de vache (Sigma C3400) a également été utilisée comme aliment de référence et à titre de comparaison des différents tourteaux.

Le protocole décrit en détail par Bryan et al. (2019) comprend 2 étapes distinctes. L'une correspondant à la digestion enzymatique des protéines des échantillons et l'autre correspondant à l'hydrolyse complète de celles-ci à l'HCl. Les acides aminés issus de l'hydrolyse sont quantifiés par réaction à la ninhydrine⁷ et la mesure de la DO (568 nm) au spectromètre (Nanocolor type UV/VIS II) suivant Bryan et al. (2019).

Le protocole complet modifié du dosage de la digestibilité *in vitro* des protéines se trouve en Annexe 5.

2.4.3. Calcul de la digestibilité des protéines

La digestibilité des protéines des échantillons a été calculée à l'aide de la DO de l'échantillon digéré par les enzymes et de la DO du produit totalement hydrolysé à l'HCl :

$$\text{Protéines digestibles (\%)} = \frac{\text{DO brute de chaque échantillon} - \text{DO blanc (subissant la digestion enzymatique)}}{\text{DO brute de chaque échantillon} - \text{DO blanc (subissant l'hydrolyse acide)}}$$

Où la DO = l'absorbance à 568 nm.

2.5. Expérimentation animale « *in vivo* » chez le poulet

2.5.1. Matériel animal

La Commission d'Éthique Animale de l'université de Liège a approuvé, le 26 octobre 2021, la réalisation d'un essai zootechnique sur 303 poulets de chair de la souche ROSS 308, âgés de 21 jours (Dossier 2339 – Avenant, Oct 2021). Le tourteau de tournesol étant donc incorporé dans le régime des poulets en finition. Ceux-ci provenaient de l'exploitation de Jean Michel De Ryckel à Fosses-la-Ville et ont été amenés à la ferme expérimentale (CEPA), le 8 novembre 2021.

2.5.2. Dispositif expérimental

Les poulets ont été répartis en 24 loges de 1,5m², suivant un dispositif en blocs aléatoires complets. Le dispositif expérimental comprenait 4 blocs de 6 loges. Les groupes de poulets et les régimes ont donc été assignés de manière aléatoire dans les blocs de manière à ce que le poids initial des poulets par loge soit le plus homogène possible au sein du même bloc. Ce sont 288 poulets qui ont été utilisés pour l'essai

⁶ Le BAEE permet une mesure d'activité catalytique standardisée.

⁷ Composé chimique utilisé pour colorer les acides aminés

expérimental, chaque loge incluant ainsi 12 poulets (= unité expérimentale). Les 15 poulets supplémentaires ont été écartés dans une loge de réserve et ont reçu un régime classique, identique au témoin. Au sein de chaque bloc, chaque régime (régime 1 ; contenant du TTND, régime 2 ; contenant du TTD2, régime 3 ; contenant du TTD3 et régime 4 ; contenant du TTD4) est répété une fois, seul le régime témoin (régime classique) est répété 2 fois par bloc. Dès lors, chaque régime est répété 4 fois pour les régimes aux TT et 8 fois pour les témoins.

	Bloc 3						Bloc 4					
Loge	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47
Traitement	4	1	T	2	T	3	T	4	2	3	1	T
Couloir												
Loge	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
Traitement	1	2	3	4	T	T	2	T	3	4	T	1
	Bloc 1						Bloc 2					

Figure 19 : Dispositif expérimental / 1 : tourteau de tournesol non décortiqué (TTND) – 2 : tourteau de tournesol, 2 passages décortiqueuses (TTD2) – 3 : tourteau de tournesol, 3 passages décortiqueuses (TTD3) – 4 : tourteau de tournesol, 4 passages décortiqueuses (TTD4) – T : régime classique

Dans chaque loge, de la sciure de bois a été utilisée comme litière. Une mangeoire et 3 abreuvoirs automatiques étaient également placés dans chacune des loges (Figure 20). Le poulailler est éclairé de façon constante pendant 18 heures avec 6 heures d’obscurité (4 heures de minuit à 4h00 et 2 heures de 6h00 à 8h00) afin de permettre le repos des poulets.



Figure 20 : Organisation des loges au sein du poulailler

2.5.3. Composition des régimes

Les volailles réparties en loges ont été nourries *ad libitum* avec cinq régimes différents. Quatre régimes contenaient du tourteau de tournesol : TTND, TTD2, TTD3, TTD4 présents à des pourcentages respectifs de 15,6%, 24,1%, 34,2% et 31,2%, remplaçant ainsi partiellement le tourteau de soja. Le dernier régime ne contenait pas de tourteau de tournesol.

Les aliments complémentaires, ajoutés au tourteau de tournesol (TT) correspondant, sont du maïs jaune, du tourteau de soja (44/7 Argentine), de l’huile de soja, de la craie alimentaire, du sel alimentaire (NaCl), des minéraux et vitamines (CMV) ainsi que de la L-Lysine - HCl et de la DL-Méthionine. Le mélange

des aliments complémentaires au TT concerné est effectué à l'aide d'une mélangeuse afin d'homogénéiser de façon optimale le régime final. Les matières premières ont été utilisées en l'état sachant que le maïs était sous forme concassée.

Enfin, les 5 régimes distribués aux poulets ont été formulés pour être iso-énergétiques (3 030 kcal EM/kg) et iso-protéiques (194g/kg) et satisfaisant les besoins nutritionnels des poulets de chair à 21 jours (DSM, 2018).

L'énergie métabolisable (EM) des différents TT a été estimée par régression multiple sur base des compositions chimiques en MPT, MG, CELL brute de différents tourteaux de tournesol (13 au total) et des tables de compositions des aliments (Annexe 9). Les teneurs en acides aminés des TT ont ensuite été estimées au prorata de leurs teneurs respectives en protéines et de la teneur en acides aminés digestibles du TT chez le poulet de chair (INRA, 2004). Les tableaux relatifs à ces démarches se trouvent en Annexe 6, 7 et 8.

Enfin, l'énergie métabolisable estimée par régression multiple est présentée en Tableau 5 et la composition centésimale des régimes est donnée en Tableau 6.

Tableau 5 : Energie métabolisable (kcal EM/kg) estimée par régression multiple des 4 tourteaux de tournesol utilisés dans l'essai

<i>Tourteaux</i>	Energie métabolisable estimée (kcal EM/kg)
TTND	2969
TTGD2	3363
TTGD3	3781
TTGD4	4118

Tableau 6 : Composition en pourcents (%) des 5 régimes. (Régime 1 = régime contenant du TT de graines entières, Régimes 2 = régime contenant du TT de graines décortiquées 2 fois, Régimes 3 = régime contenant du TT de graines décortiquées 3 fois, Régime 4 = régime contenant du TT de graines décortiquées 4 fois).

Aliment	Témoin	Régime 1	Régime 2	Régime 3	Régime 4
DL-Méthionine	0,3%	0,2%	0,2%	0,1%	0,2%
L-Lysine HCl	0,1%	0,2%	0,3%	0,4%	0,3%
Coque D4	5,7%	0,0%	0,0%	0,8%	2,8%
TTGD4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	31,2%
TTGD3	0,0%	0,0%	0,0%	34,2%	0,0%
TTGD2	0,0%	0,0%	24,1%	0,0%	0,0%
TTND	0,0%	15,6%	0,0%	0,0%	0,0%
CMV	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Sel alimentaire (NaCl)	0,3%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
Phosphate monocalcique	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Craie alimentaire	0,0%	0,1%	0,0%	0,2%	0,2%
Huile de soja	11,8%	7,1%	4,0%	0,0%	0,0%
Tourteau de soja 44/7 Argentine	35,3%	27,4%	21,0%	15,2%	16,9%
Maïs jaune	43,6%	45,9%	47,1%	45,7%	44,9%

Composition du CMV: Carbonate de calcium/ Phosphate monocalcique/ Chlorure de sodium/ Bicarbonate de sodium (nuscience : MINEVITA BRO)

2.5.4. Observations et paramètres mesurés

Durant l'expérimentation, un relevé journalier des paramètres d'ambiance (température et humidité relative) du poulailler a été effectué. Des pesées hebdomadaires de chaque loge ont également été réalisées. Grâce aux différentes pesées, le GQM des poulets de chair a été calculé (= Poids final (g) - Poids initial (g)) /jours de test).

De plus, la consommation en aliments des poulets par loge a également été quantifiée pour y calculer l'indice de consommation (IC) (= GQM(g/j) /MS ingérée(g)) permettant de voir l'évolution de la quantité d'aliments ingérés par les poulets d'une même loge. L'ingestion hebdomadaire est assimilée à la différence de poids des mangeoires en début et fin de semaine. Étant restreint au niveau du régime 3 (TTD3 limitant) et afin de ne pas gaspiller des aliments, les refus non souillés étaient redistribués aux volailles.

Durant l'essai, des échantillons des 5 régimes distribués ont été prélevés pour des analyses également réalisées par le laboratoire de biochimie du CRA-W. De même, en fin d'essai, les refus par loge ont été échantillonnés pour analyse. Ces analyses permettent de constater un tri éventuel des volailles sur les aliments qui leur étaient administrés. Ces analyses concernent la MS, la matière organique (MO), la MPT, la MG et le NDF.

Enfin, la période de l'essai a été différente suivant les blocs, l'essai ayant été arrêté une fois que les poulets avaient atteint leur poids d'abattage, c'est-à-dire 2,4 kg. L'essai expérimental a duré 2 semaines et 3 jours pour les blocs 1 et 2 qui détenaient les plus gros poulets au départ de l'expérience, et 3 semaines pour les blocs 3 et 4.

2.5.5. Traitement statistique des données

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio.

Les paramètres mesurés ont fait l'objet d'une analyse de la variance à deux critères de classifications (AV2 modèle croisé mixte) :

$$y_{ij} = A_i + b_j + (Ab)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

où y_{ij} est la valeur du paramètre observé avec le régime i (facteur fixe) au sein du bloc j (facteur aléatoire). A_i est l'effet du régime i , b_j est l'effet du bloc j , $(Ab)_{ij}$ est l'effet de l'interaction entre le régime i et le bloc j . ε_{ij} est l'erreur résiduelle associée au régime i et au bloc j . Enfin, l'unité expérimentale correspondait à une loge.

Les moyennes significativement différentes selon les régimes ont fait l'objet d'une comparaison avec le régime témoin (test de Dunnett).

Les conditions d'application, à savoir la normalité des résidus (test de Shapiro-Wilk), n'ont pu être vérifiées lors de l'analyse des données, le nombre d'observations des variables étant inférieur à 10. La normalité a donc été supposée comme étant rencontrée pour chaque paramètre mesuré. Le test d'égalité des variances (test de Barlett et/ou test de Levene) a, lui, pu être effectué sur les paramètres possédant plus d'une observation par unité expérimentale.

IV. Résultats et discussions

1. Partie phytotechnique

1.1. Dégâts d'oiseaux

Essai tournesol « Hannut »

Initialement, un essai dans la région de Hannut avait été implanté par le CRA-W. L'essai a cependant été entièrement ravagé par les pigeons ramiers, les corbeaux freux et les corneilles. Ils y ont en réalité mangé les graines semées sur toute la parcelle, directement après le semis. Des effaroucheurs pourtant placés par l'agriculteur, se sont révélés totalement inefficaces. La parcelle de l'agriculteur jouxtant l'essai du CRA-W a également subi le même sort, ce qui totalise une surface détruite à Hannut d'un hectare et demi. Les illustrations des dégâts sont présentées en Annexe 1.

Essai densité

Au cours de l'essai densité à Villers-le-Bouillet, des dégâts d'oiseaux sur les plantules n'ont que peu été observés mais sont cependant responsables du déclassement de 4 parcelles. Des dégâts de passereaux à un stade plus tardif ont toutefois été observés sur les capitules en maturation de façon plus notable. Les 2 illustrations en Figure 21 montrent les dégâts sur capitules.

Ces dégâts d'oiseaux étant difficilement quantifiables, aucun traitement de données n'a été réalisé. Cependant, lors du triage des graines de tournesol, un nombre élevé de fientes a été relevé sur les capitules avant récolte.



Figure 21 : Dégâts d'oiseaux sur les capitules de tournesols

1.2. Suivi de la culture

Concernant le suivi de la culture, l'ensemble des tableaux d'analyses des variances et des moyennes générales pour chaque paramètre mesuré sont repris en Annexe 10 et 11.

Un gradient d'hétérogénéité élevé concernant le bloc 4, se situant dans le sens contraire aux 3 autres blocs (cf. Figure 16), a été identifié pour les paramètres de verses, de sclérotinia sur tiges, ainsi que des rendements. Celui-ci n'a donc pas été pris en considération pour l'interprétation des résultats de ces paramètres.

En outre, l'application en intrants, comme le bore ou encore le molybdène, n'a pas été réalisée puisqu'aucun problème particulier n'a été observé vis-à-vis de carences limitant la croissance végétative et/ou le potentiel de rendement, les carences se marquant les années de culture plus sèches.

1.2.1. Développement de la culture

Les stades de développement de la culture (levée, floraison et maturité du tournesol) sont repris dans le Tableau 7 avec les sommes de degrés-jours associés (DJ en base 6°C). La date de levée du tournesol pour l'ensemble de la parcelle a été évaluée au 18 mai (90% plants/m² levés) pour des sommes de 102 DJ. La floraison du tournesol a, elle, été relevée le 27 juillet avec un total de 860 DJ comptabilisé.

Enfin, les sommes de températures rapportées pour le tournesol sont en moyenne de 1570 DJ toutes variétés confondues (Terres Inovia, 2019c). La variété Toscana étant une variété précoce en France, les sommes de degrés rapportés à maturité sont aux alentours de 1530° et ont été atteintes le 29 septembre.

Tableau 7 : Evolution de la somme des degrés-jours du tournesol en fonction de la date et des stades de développement. Les températures moyennes (2021) proviennent de la station météorologique de Couthuin située à 10 km de Villers-Le-Bouillet (CRA-W|AGROMET, 2021)

Date (2021)	Nbre de jours à partir du semis	Température moyenne °C	T° base 6	Somme degrés jours	Stade
23-avr	1	7,8	1,8	2	Semis
01-mai	9	6,7	0,7	19	
18-mai	26	10,7	4,7	102	levé 90%
27-mai	35	11	5	143	
04-juin	43	18,8	12,8	231	
20-juin	59	20,3	14,3	448	
28-juin	67	18,4	12,4	531	
07-juil	76	17,6	11,6	625	
23-juil	92	18,7	12,7	812	
27-juil	96	17,9	11,9	860	Floraison
08-août	108	15,7	9,7	986	
24-août	124	16	10	1166	
01-sept	132	14,3	8,3	1239	
17-sept	148	15,9	9,9	1426	
29-sept	160	11,8	5,8	1530	mature
02-oct	163	14,4	8,4	1550	
05-oct	166	12,1	6,1	1571	
21-oct	182	9,5	3,5	1645	
25-oct	186	9,6	3,6	1655	

Ensuite, afin de comparer les stades de développement de 2021, une extrapolation des sommes de températures (DJ) par rapport aux années antérieures a été réalisée (semis, floraison et maturité) (Tableau 8).

Tableau 8 : Extrapolation des sommes de températures aux années antérieures par rapport à l'année 2021. Les données des températures antérieures proviennent également de la station météorologique de Couthuin (CRA-W|AGROMET, 2021)

Année	Semis		Floraison		Maturité 9%	
	Date	Somme degré jours	Date	Somme degré jours	Date	Somme degré jours
2021	23-avr	0	27-juil	860	29-sept	1530
2020	23-avr	0	19-juil	860	16-sept	1530
2019	23-avr	0	19-juil	860	24-sept	1530
2018	23-avr	0	07-juil	860	01-sept	1530
2017	23-avr	0	10-juil	860	25-sept	1530

1.2.2. Hauteur des plantes

La hauteur moyenne des plantes a été étudiée en fonction de la densité de plantes/m². L'analyse statistique révèle une différence hautement significative entre la densité de semis et la hauteur des tournesols ($0,001 < p\text{-valeur} < 0,01$). De la densité 6 à la densité 12 plantes/m², les moyennes des hauteurs (cm) sont croissantes et respectivement de : **212,25** ± 18,23 ; **220,67** ± 15,81 ; **219,33** ± 15,55 ; **232,33** ± 15,42 et **234,50** ± 8,47. Les tendances relevées par l'analyse statistique sont illustrées en Figure 22.

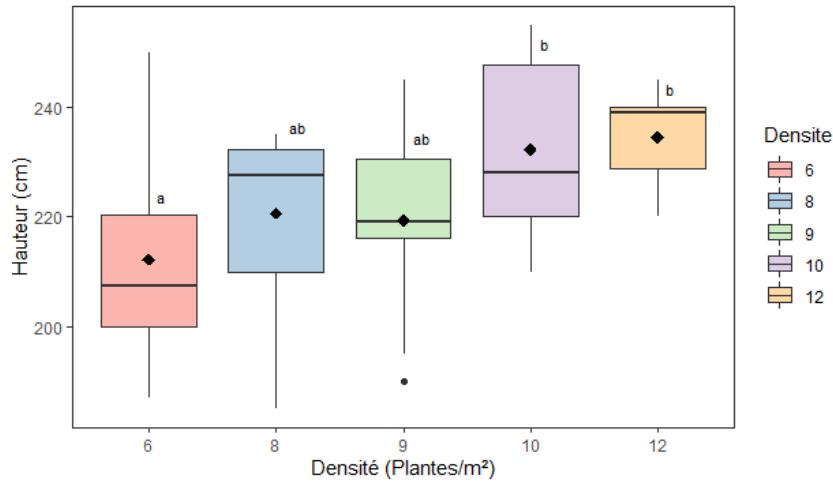


Figure 22 : Hauteur du tournesol à maturité en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.

1.2.3. Diamètre des tiges

Le diamètre moyen des tiges de tournesols a également été étudié en fonction de la densité de plantes/m². L'analyse statistique ne révèle aucune différence significative entre la densité de semis et le diamètre des tournesols ($p\text{-valeur} > 0,05$). De la densité 6 à la densité 12 plantes/m², les moyennes des diamètres des tiges (cm) sont respectivement de : **2,90** ± 0,172 ; **2,60** ± 0,449 ; **2,96** ± 0,459 ; **2,82** ± 0,226 et **2,76** ± 0,336. Les tendances relevées par l'analyse statistique sont illustrées en Figure 23.

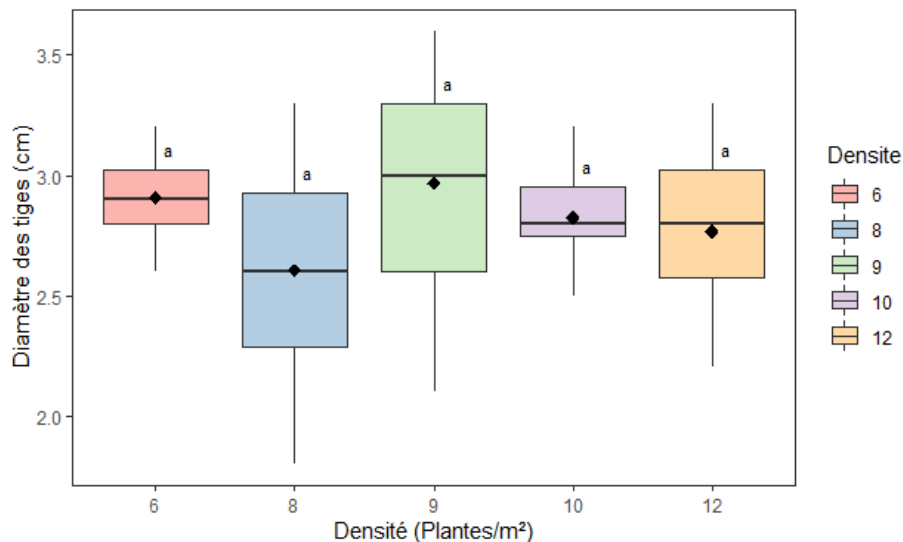


Figure 23 : Diamètre des tiges du tournesol à maturité en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.

1.2.4. Diamètre des capitules

Concernant le diamètre moyen des capitules en fonction de la densité de plantes/m², l'analyse statistique révèle une différence très hautement significative entre la densité de semis et le diamètre des capitules (p-valeur <0,001). De la densité 6 à la densité 12 plantes/m², les moyennes des diamètres des capitules (cm) sont décroissantes et sont respectivement de : **17,53 ± 1,95** ; **15,75 ± 1,55** ; **14,68 ± 1,29** ; **14,25 ± 0,94** et **13,25 ± 1,19**. Les tendances relevées par l'analyse statistique sont illustrées en Figure 24.

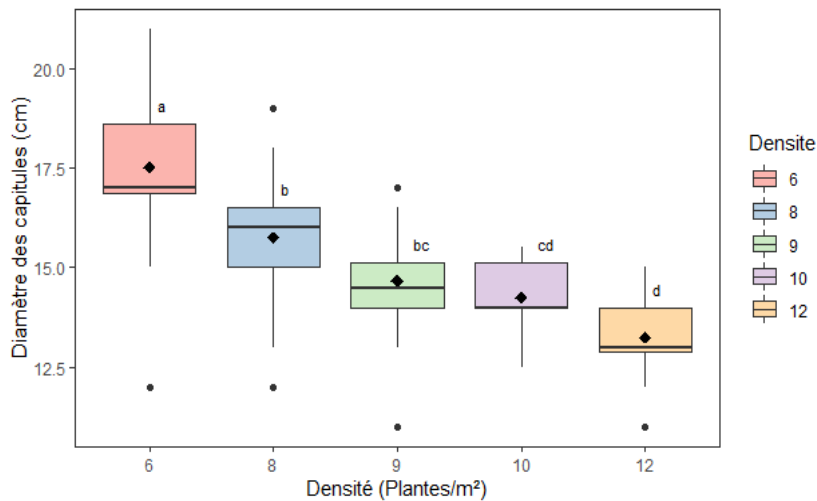


Figure 24 : Diamètre des capitules du tournesol à maturité en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.

Observations personnelles du diamètre des capitules et du diamètre des tiges

Les capitules situés en bordure de parcelle possédaient un diamètre largement supérieur aux tournesols situés en milieu de parcelle. Le fait qu'ils n'aient pas eu de concurrent potentiel pour se développer pleinement et que leurs surfaces foliaires aient été totalement exposées au rayon du soleil ont impacté leur taille finale. Le nombre de graines présentes sur le capicule des plantes situées en bordure de parcelle étaient, par conséquent, nettement supérieur également. Ces tendances étaient visibles par simple observation en bordure de parcelle (Figure 25).



Figure 25 : Tournesols situés en milieu (gauche) et en bordure de parcelle (droite)

Comme exposé en Figure 23, le test statistique n'a montré aucune significativité entre la densité de semis et le diamètre des tiges. Néanmoins, des diamètres de tiges plus élevés ont également été observés pour les densités de semis les plus faibles, lors de la récolte. Les relevés du diamètre des tiges ayant probablement été entrepris trop tôt dans le cycle de croissance du tournesol.

1.2.5. Plantes versées et affectées par le sclérotinia sur tige

Les analyses statistiques effectuées pour les mesures de plantes versées et affectées par le sclérotinia aux 2 dates différentes (20/08/2021 et 03/09/2021) n'ont révélé aucune différence significative.

Néanmoins, les cotations réalisées, révèlent tout de même une forte tendance. Ces pourcentages ne sont pas significativement différents entre eux, mais ceux-ci évoluent continuellement jusqu'à la densité 12 plants/m². Le Tableau 9 illustre ces pourcentages moyens pour les 2 dates de plantes versées ou affectées par le sclérotinia su tige.

Tableau 9 : Pourcentage de verses et de sclérotinia sur tige aux 2 dates de relevés.

%	Tournesols versés		%	Sclérotinia sur tige		
	Densité	20-08-21		03-09-21	Densité	20-08-21
	6	2,87 ± 0,93	5,86 ± 6,17	6	1,23 ± 0,53	4,63 ± 1,85
	8	2,31 ± 1,06	7,87 ± 10,05	8	3,47 ± 2,08	5,09 ± 2,23
	9	3,09 ± 1,23	10,08 ± 6,54	9	2,67 ± 1,78	4,12 ± 1,98
	10	5,56 ± 4,75	11,30 ± 9,00	10	1,85 ± 0,85	5,00 ± 1,47
	12	7,10 ± 4,86	14,51 ± 9,03	12	4,32 ± 1,17	7,25 ± 3,71

NB : Les verses sont comptées séparément du sclérotinia sur tige dans les micro-parcelles.

Les graphiques reprenant ces tendances sont également présentés ci-dessous. On peut voir que la deuxième date d'observation (09/03/21) illustre davantage les tendances que la première date d'observation (20/08/21).

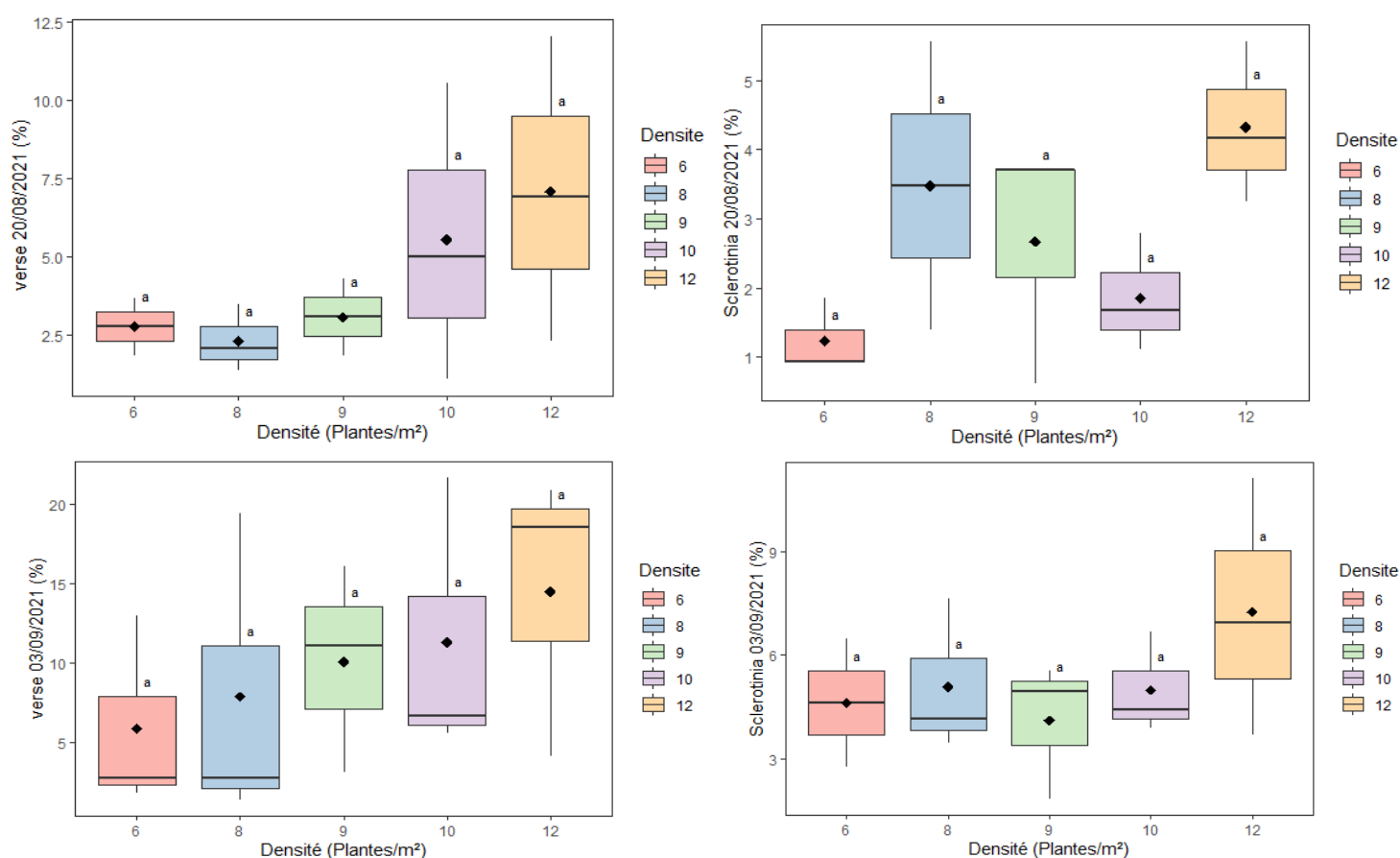


Figure 26 : Pourcentage de sclérotinia sur tige et de verses le 20/08/2021 et le 03/09/2021 sur le tournesol en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.

1.2.6. Rendement absolu du tournesol

Le rendement réel des parcelles ainsi que deux autres paramètres de rendement théorique ont été établis dans cette section. Le graphique ci-dessous illustre le rendement réel obtenu, comptabilisant la verse, le sclérotinia sur tige ainsi que le sclérotinia sur capitule. Le sclérotinia sur capitule ayant émergé en fin de cycle, un nombre élevé de plantes n'a donc pu être récolté. Il est important de noter que la variété Toscana possède cette année la plus grande sensibilité au sclérotinia (i.e. essai variété 2021).

Premièrement, le *rendement moyen réel* du tournesol a été étudié en fonction de la densité de plantes/m². L'analyse statistique ne révèle aucune différence significative entre la densité de semis et le rendement réel (p-valeur > 0,05). De la densité 6 à la densité 12 plantes/m², les moyennes des rendements (kg/ha) sont respectivement de : **2130 ± 1080** ; **1897 ± 792** ; **1868 ± 456** ; **1906 ± 671** et **2210 ± 455** (Figure 27).

L'allure en forme de V des écarts de rendement permet également de visualiser que la densité 9 et 10 plants/m² possèdent le plus faible écart type.

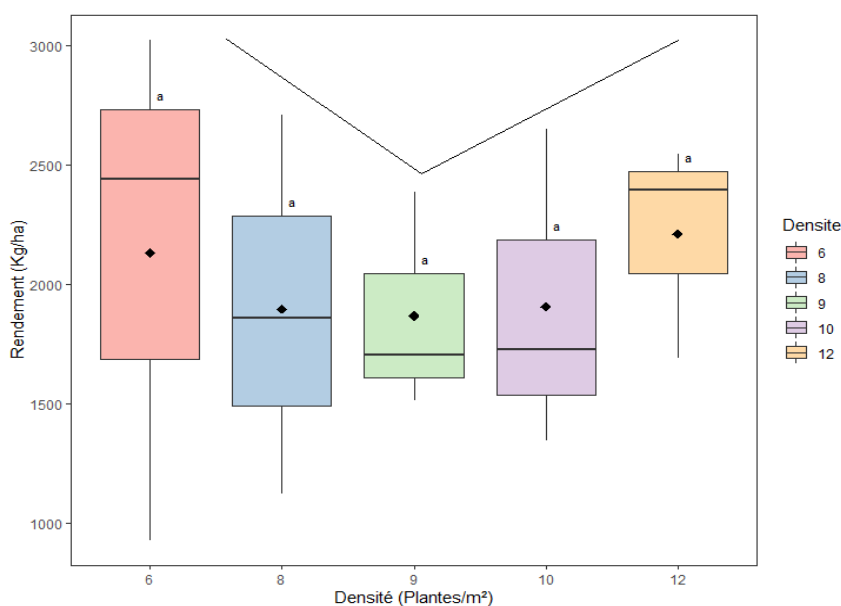


Figure 27 : Rendement réel du tournesol en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.

Le *rendement théorique « sans problème »* a également été calculé par extrapolation, celui-ci exprime le rendement si tous les capitules correspondant aux différentes densités plantées avaient été récoltés. Le Tableau 10 illustre le nombre de capitules réellement récoltés par rapport au nombre de capitules théoriques sur 2 lignes.

Tableau 10 : Nombre de capitules théoriques et nombre de capitules réellement récoltés sur 2 lignes

Densité (plant/m ²)	6	6	6	8	8	8	9	9	9	10	10	10	12	12	12
Nbre de capitules théoriques sur 2 lignes	54	54	54	72	72	72	81	81	81	90	90	90	108	108	108
Nbre de capitules réellement récoltés	42	45	20	53	33	28	33	41	32	35	58	26	43	35	49

L'analyse statistique révèle une différence significative entre la densité de semis et le rendement théorique « sans problème » (p-valeur < 0,05). De la densité 6 à la densité 12 plantes/m², les moyennes des rendements (kg/ha) sont respectivement de : **3091 ± 560** ; **3542 ± 595** ; **4248 ± 500** ; **4400 ± 272** et **5748 ± 1576** (Figure 28). (Le rendement à 10 plants/m² est de 4,4 T/ha. En 2020, celui-ci avait été atteint à la même densité pour cette variété.)

Le rendement théorique de la verse et du sclérotinia sur tige a également été calculé par extrapolation, celui-ci exprime le rendement si les capitules n'avaient pas été atteints en fin de cycle par le sclérotinia également.

On peut rapidement voir sur le graphique de droite que le rendement suit la même tendance que le graphique de gauche (rendement théorique « sans problème »). À la différence du rendement théorique « sans problème », l'analyse statistique du rendement théorique « de la verse et du sclérotinia sur tige » ne révèle pas de différence significative entre les densités. Ce dernier résultat est à prendre avec précaution car la p-valeur est de 0,066 et donc proche de la significativité. Ceci explique donc la tendance croissante sur le graphique de droite malgré des lettres identiques suite au test de Tukey. L'impact du sclérotinia sur capitule observé en fin de cycle a donc impacté le rendement réel de façon importante, puisque la Figure 27 illustre une courbe nettement différente.

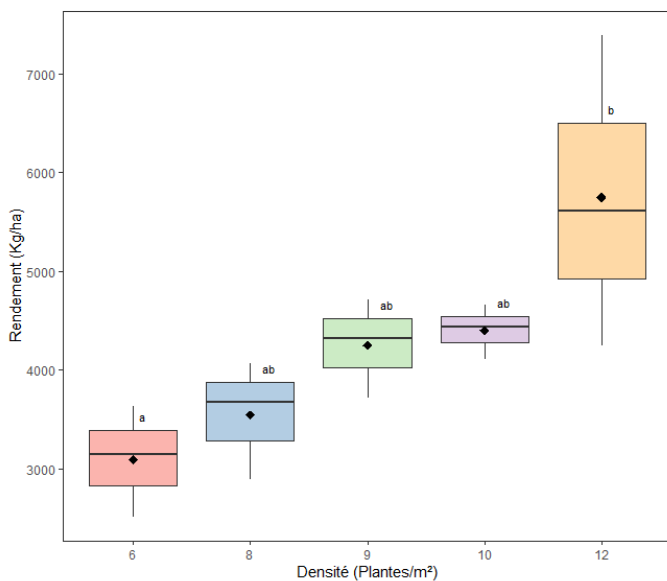


Figure 29: Rendement théorique « sans problème » du tournesol en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.

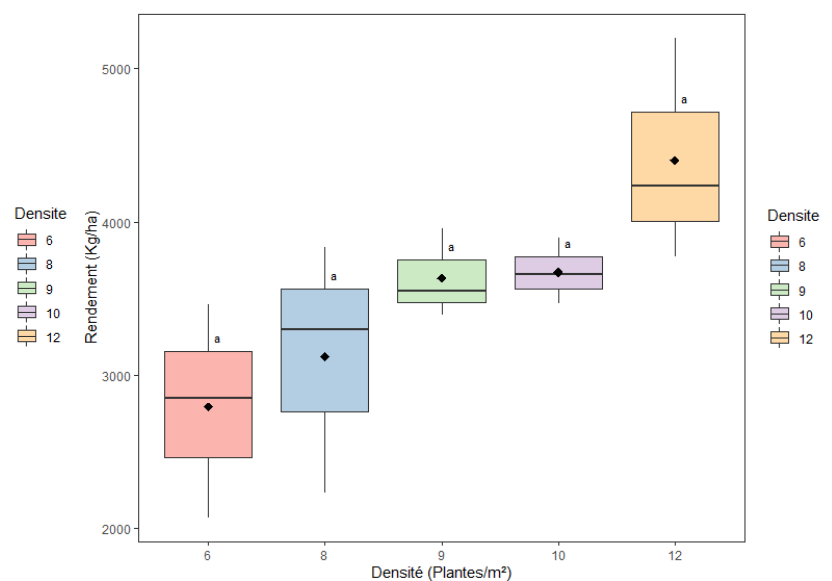


Figure 28 : Rendement théorique de « la verse et du sclérotinia sur tige » du tournesol en fonction de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement égales.

1.2.7. Corrélations entre variables

Un résumé des interactions entre les paramètres mesurés sur le tournesol est présenté dans la Figure 30. Il est important de noter que ces corrélations sous-entendent des relations linéaires, or les paramètres mesurés en fonction de la densité traduisent une allure gaussienne.

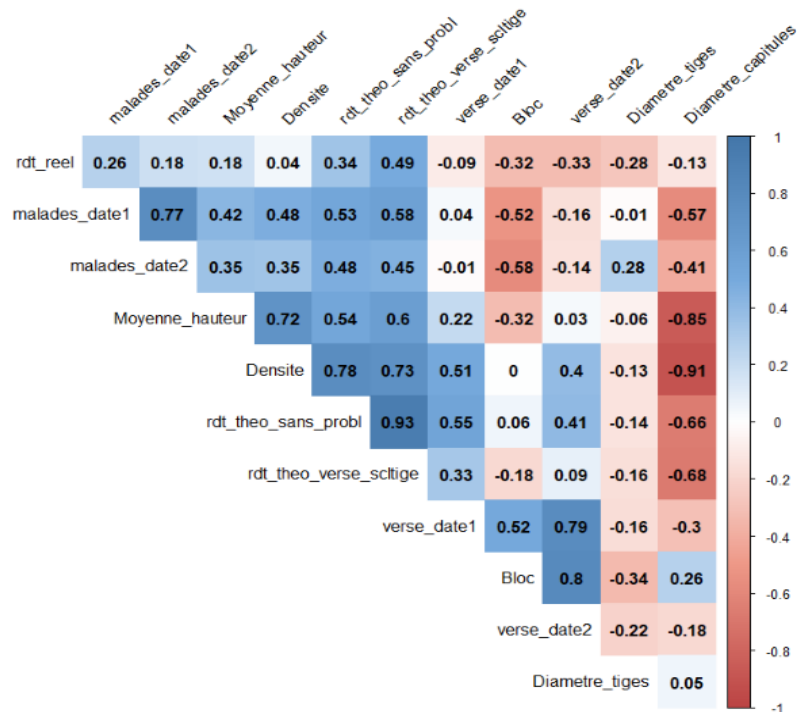


Figure 30 : Corrélogramme reprenant les corrélations entre variables. Les abréviations sont les suivantes : Moyenne_hauteur = moyenne des hauteurs, maladies date 1 et 2 = pourcentage de plantes affectées par le sclérotinia le 20/08/21 et le 03/09/2021, verse date 1 et 2 = pourcentage de plantes versés le 20/08/2021 et le 03/09/2021, diametre_tiges = moyenne du diamètre des tiges, diametre_capitules = moyenne du diamètre des capitules

On peut observer, comme relaté ci-dessus, que le diamètre des capitules est négativement corrélé à la densité de manière relativement élevée (-0,91). Il est aussi négativement corrélé à la hauteur des plantes et à la variable reprenant les plantes affectées par le sclérotinia sur tiges aux dates 1 et 2. Le diamètre des capitules est également négativement corrélé au rendement théorique « sans problème ». Enfin, le corrélogramme illustre peu d'effets concernant la taille des capitules sur la verse aux 2 dates différentes.

Les plantes affectées aux 2 dates différentes sont également positivement corrélées entre elles, ce qui est assez logique. Il en est de même pour les plantes versées aux dates 1 et 2.

Ensuite, pour la hauteur des plantes, celle-ci est positivement corrélée avec les plantes affectées par le sclérotinia aux 2 dates différentes de relevé. Il semblerait donc que les plantes les plus « grandes », risquent d'être plus affectées.

Enfin, aucune corrélation pertinente avec le rendement réel n'a pu être identifiée.

1.3. Récapitulatif des résultats issus de l'essai

Partant du constat de Sausse et al. (2021), depuis ces dernières années, les dégâts d'oiseaux dans les parcelles agricoles sont de plus en plus préoccupants et ce constat est une réalité pour le tournesol semé à Hannut et à Villers-Le-Bouillet. En Wallonie, ces espèces sont pour la plupart protégées et des dérogations ne sont que très peu octroyées sur les zones de cultures à risques, bien que leurs populations aient presque doublé en 30 ans. Comme l'a très justement souligné la fédération Wallonne de l'agriculture, il faudrait à l'avenir revenir à un meilleur équilibre de la densité actuelle de corvidés et colombidés en Wallonie, ce qui favoriserait également la petite faune des plaines (FWA, 2021). Sans quoi, la mise en place du tournesol dans les rotations des agriculteurs wallons pourrait être remise en cause.

Concernant la maturité du tournesol, elle a seulement été atteinte le 29 septembre. Cette date de maturité relevée est relativement tardive pour la variété Toscana, celle-ci étant connue pour être une variété précoce en France (Caussade semences, 2019). Néanmoins, Toscana n'est pas la plus précoce des variétés testées sur notre territoire. Il en existe, en effet, des plus précoces que Toscana, comme le révèlent les essais variétés de 2020 et 2021. Les variétés dites précoces en France ne peuvent donc pas être inéluctablement transposées pour la culture du tournesol wallon.

De plus, la fin du cycle de développement beaucoup trop humide dû aux fréquentes précipitations, les températures et les heures d'ensoleillement trop faibles sur l'ensemble du cycle de la culture n'ont pas permis d'atteindre une date plus hâtive de maturité. Le retard de croissance par rapport à l'année précédente a été estimé à 14 jours (Tableau 8). Les conditions météorologiques du mois d'octobre (i.e. Figure 15) expliquent donc la date de récolte tardive du 25 octobre pour cet essai.

Les dépressions importantes tout au long du cycle de culture n'ont, par conséquent, pas permis d'atteindre des rendements satisfaisants (Figure 27). La plus petite densité semée (6 plantes/m²) aurait en effet dû atteindre des valeurs de l'ordre de 28,50 q/ha minimum (Terres Inovia, 2021b). Les rendements réels obtenus pour cette densité semée sont de 21,30 q/ha et les rendements obtenus pour les parcelles semées à plus forte densité (8, 9, 10 et 12 plants/m²) n'atteignent pas non plus ce rendement de 28,50 q/ha. On peut cependant émettre l'hypothèse que ces rendements sont sous-estimés puisque la récolte tardive a attiré les oiseaux (passereaux) qui se sont concentrés sur la parcelle en fin de culture. Des pertes estimées entre 20 à 30 % sont donc à déplorer. Il est important de rappeler que la sensibilité importante de la variété Toscana au sclérotinia en est également la cause.

En outre, les rendements, obtenus lors de cet essai, ont permis de constater qu'aucune différence significative entre les rendements réels et les densités semées n'est présente. Les différences significatives obtenues pour la hauteur, le diamètre des capitules et les tendances observées pour le sclérotinia et la verse, n'ont donc peu, voire pas, d'impact sur le rendement. Cependant, le rendement est une donnée plus complexe qu'il n'y paraît, dont la valeur dépend de nombreux facteurs. Certains de ces facteurs augmentent le rendement et d'autres le réduisent. Les rendements réels présentés lors de l'essai sont équivalents. Toutefois, cela ne signifie pas pour autant que les différents facteurs n'ont pas d'influence sur le rendement. Ceux-ci sont probablement opposés mais lorsque la densité de semis a été modifiée, sur base des résultats de récoltes, tous ces facteurs se sont annulés.

Les tendances observées peuvent également être discutées. Premièrement, le graphique illustré en Figure 27 concernant les rendements réels indique qu'une densité de 9 plantes/m² semée permet une plus grande sécurité du rendement (faible écart-type). Les graphiques illustrés en Figures 28 et 29 (rendement théorique) montrent, eux, qu'une densité semée de 10 plants/m² permet aussi une grande sécurité de rendement (la densité 9 se situant en deuxième position). Les densités de semis 9 et 10 semblent donc être les plus stables et les plus intéressantes d'un point de vue phytotechnique, bien que les sols wallons s'avèrent être suffisamment riches pour satisfaire un semis de 12 plantes/m².

Concernant la hauteur des plantes, l'augmentation de densité a entraîné pour les densités 10 et 12 plants/m², des hauteurs de plantes significativement différentes par rapport à la densité 6 plants/m² semée. Ces différences significatives s'expliquent par un phénomène de compétition entre plantes. Les plantes à plus forte densité, essayant d'augmenter les rayonnements interceptés et grandiraient par conséquent plus rapidement (allongement des entre-nœuds et réduction du diamètre des tiges). Les résultats de Debaeke et al. (1999) et Ibrahim (2012) vont également dans ce sens.

En outre, concernant le diamètre des capitules, une autre hypothèse peut être établie. À travers les 2 illustrations (Figure 25) et les résultats de diamètres des capitules (Figure 24), l'hypothèse d'une diminution de rendement lié à l'augmentation de la densité par m² peut être émise. (Les résultats obtenus n'étant pas représentatifs sur une année d'essai.). De fait, selon Fiorucci, (2014), si une augmentation de densité est présente, les plantes individuelles peuvent exprimer le syndrome d'évitement de l'ombre. Ce syndrome s'exprime en réponse adaptative à la diminution du ratio rouge/rouge lointain qui correspond à des conditions de lumière défavorables produites par les compétiteurs (dans ce cas-ci, les tournesols voisins). Cette diminution a été présentée comme réduisant les rendements en grains par plantes. Des densités trop importantes ne sont donc pas à suggérer au vu de la grande différence de diamètres de capitules observée qui vont également dans ce sens (réduction du rendement en grains).

Finalement, comme constaté par Debaeke et al. (2003) pour la sensibilité au phomopsis, une tendance entre la densité de plantes/m² et les plantes infestées par le sclérotinia sur tige a été observée pour cet essai. Le taux d'humidité subsistant pour les densités plus élevées de plantes implantées, améliorerait la germination des spores et, par conséquent, le processus d'infestation des feuilles et des tiges.

Enfin, il est important de noter, vu l'hétérogénéité des résultats par bloc, qu'il aurait été préférable de prendre des mesures sur un plus grand nombre de blocs afin d'avoir une meilleure robustesse des données et une moins grande variabilité entre les blocs. (Comme expliqué ultérieurement, 2 blocs supplémentaires avaient été semés, ils n'ont cependant pas conservé le nombre de plantes désirées).

2. Partie zootechnique

2.1. Décortiquage, triage et trituration des graines

À partir de 100 kg de graines de tournesol pour chaque traitement (ND, D2, D3 et D4), des poids de respectivement 98,39 kg, 84,80 kg, 80,65 kg et 74,20 kg ont été obtenus après décortiquage et triage. La différence entre le poids initial des graines et le poids des graines après décortiquage et triage permet d'obtenir le poids des coques et autres débris de tiges. Pour le 4^{ème} traitement, près de 25 kg de coques ont pu être extraites, ce qui correspond à 25 % du poids initial des graines. Selon Peyronnet et al. (2012), la coque constitue entre 22 et 28 % du poids de la graine, il s'avère donc que presque la totalité des coques ont été extraites après 4 passages en machine (décortiqueuse).

Les temps de décortiquage pour les passages 2, 3 et 4 dans la décortiqueuse sont respectivement de 150 min, 180 min et 240 min pour 100 kg de graines. Un temps identique de 180 min est mesuré lors du triage pour les différents traitements. On peut dès lors constater que le temps de triage s'équilibre avec la décortiqueuse au traitement D3. Les données du temps de décortiquage et de triage sont cependant à prendre avec du recul puisque celles-ci ne représentent pas ce qui se produirait en modèle industriel.

Tableau 11 : Données du décortiquage et triage des graines de tournesol

<i>Décortiquage et triage</i>	Poids initial des graines (kg)	Poids des graines après triage + décortiquage (kg)	Poids des coques + débris de tiges (kg)	Temps décortiquage (min)	Temps triage (min)
Graines_ND	100	98,39	1,61	/	180
Graines_D2	100	84,80	15,20	150	180
Graines_D3	100	80,65	19,35	180	180
Graines_D4	100	74,20	25,80	240	180

En regard des poids de tourteau obtenus à partir des différents traitements, on remarque que les pourcentages sont très semblables puisqu'ils sont respectivement de 69, 66, 68 et 70% (Tableau 12).

Tableau 12 : Données du pressage des graines de tournesol chez Alvenat

<i>Pressage</i>	Poids des graines après triage + décortiquage (kg)	Poids du tourteau (kg)	Poids du tourteau en %	Temps pressage (min)	Rapport Temps (min)/Poids des graines (kg) ¹	Rapport Temps (min)/Poids du tourteau (kg) ²
Tourteau_ND	98,39	67,85	69%	45	46	66
Tourteau_D2	84,80	56,28	66%	35	41	62
Tourteau_D3	80,65	55,19	68%	32	40	58
Tourteau_D4	74,20	52,15	70%	29	39	56

¹ Le rapport temps (min)/poids des graines (kg) traduit le nombre de minutes pour traiter 100 kg de graines

² Le rapport temps (min)/poids du tourteau (kg) traduit le nombre de minutes pour traiter 100 kg de tourteau

Le rapport du temps de pressage sur le poids des graines est également globalement équivalent pour les 3 derniers traitements (41 min, 40 min et 39 min). Le rapport du temps de pressage sur le poids du tourteau non décortiqué (ND) est quant à lui de 46 min. La raison du temps de séjour plus court pour les graines partiellement décortiquées pourrait s'expliquer par l'architecture de la presse ainsi que par les réglages utilisés qui se sont traduits par un temps de séjour et un temps de pressage des graines plus court. La conséquence de ce temps de séjour plus court dans la presse a également un lien avec le taux de lipides résiduels plus élevé (cf. supra Tableau 13) pour les graines partiellement décortiquées.

Globalement, les graines décortiquées ont séjourné pratiquement 10 % du temps en moins dans le fourreau. En outre, du fait du retrait partiel des coques, l'effort de compression était manifestement plus faible sur les graines partiellement décortiquées.

2.2. Analyse biochimique

Diverses analyses de composition ont été réalisées sur les graines, les coques et les tourteaux afin de pouvoir justifier l'intérêt du décortiquage des graines de tournesol dans le régime des poulets.

Les teneurs en fibres (NDF et ADF) présentées ci-dessous sont supérieures pour les tourteaux de tournesol par rapport aux teneurs en graines (Tableau 13). On peut également constater que le décortiquage des graines (particulièrement les graines D3 et D4) augmente la teneur en MPT et MG et diminue celles en fibres par rapport aux graines non décortiquées (ND).

Parallèlement, les coques sont principalement constituées de lignocelluloses mais également de MPT et MG, ce qui pourrait démontrer la présence de parties de graines dans les coques.

Tableau 13: MS = teneur en matière sèche, CT= cendres totales, MPT = matière protéique totale (N*6,25), MG = matière grasse, CELL = cellulose, NDF = fibres insolubles dans les détergents neutres, ADF= fibres insolubles dans les détergents acides, ADL = fibres solubles dans les solutions neutres ou acides

	MS %	CT % as is	MPT % as is	MG % as is	CELL % as is	NDF % as is	ADF % as is	ADL % as is
Graines_ND	92,92	2,44	16,52	45,89	13,65	20,17	16,49	4,88
Graines_D2	93,54	2,53	18,06	50,59	9,63	14,10	11,47	3,08
Graines_D3	94,02	2,58	18,80	53,23	7,69	11,54	9,21	2,26
Graines_D4	94,28	2,52	19,13	55,10	6,06	9,12	7,38	1,79
Copeaux_ND	88,54	10,77	10,14	16,32	18,48	27,56	27,33	5,74
Coques_D2	89,14	3,86	8,99	17,95	35,35	49,00	42,25	13,01
Coques_D3	87,96	3,13	6,23	7,11	44,55	62,92	53,72	17,47
Coques_D4	88,70	3,00	6,79	10,61	42,94	60,00	50,30	16,43
Tourteau_ND	91,16	3,68	23,11	24,58	18,99	27,17	22,60	6,56
Tourteau_D2	91,36	3,71	26,03	29,30	14,09	20,09	16,32	4,40
Tourteau_D3	91,93	3,68	25,72	34,78	10,22	14,84	12,36	3,08
Tourteau_D4	92,37	3,50	25,53	39,05	8,10	12,28	9,72	2,17

2.2.1. Extraction des fibres et rendement en huile

À partir des données brutes présentées dans le Tableau 13 et du poids des graines présenté dans le Tableau 12, des valeurs d'extraction de composés (MF, MPT, MG, NDF et ADL) sur les graines (D2, D3 et D4) ont pu être calculées. La différence en %, suivant le poids à l'entrée et la sortie des graines dans la décortiqueuse, est présentée dans le Tableau 14. Selon les différents traitements effectués sur les graines, les passages machines (décortiqueuse et trieuse) permettent d'éliminer de 37 à 77% de NDF (lignine + cellulose + hémicellulose) et de 41 à 87% d'ADL (lignine seule). Ces résultats démontrent que le décortiquage effectué permet d'éliminer une quantité non négligeable de fibres dans les graines qui font, par la suite, l'objet du traitement d'huilerie.

Les pertes suite au décortiquage en MPT et MG sont estimées entre 7 et 11% et entre 3 et 6% respectivement. Les pertes en MG dans les graines après décortiquage sont au-dessus des chiffres rapportés par Peyronnet et al. (2012) qui sont, eux, de 2-3 %. Concernant la perte en MPT, les chiffres sont équivalents, voire inférieurs aux chiffres relatés également par Peyronnet et al. (2012), qui sont de 10 %. Ces résultats d'extraction sont relativement satisfaisants puisque la machine utilisée est une machine pilote initialement non destinée aux décortiquages de ce type de graines.

Tableau 14 : Extraction des fibres sur base des COQUES sortie machine (décortiqueuse)

	MF			MPT			MG		
	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Diff en %	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Diff en %	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Diff en %
Coques D2	100	15,2	15%	16,52	1,4	8%	45,89	2,7	6%
Coques D3	100	19,3	19%	16,52	1,2	7%	45,89	1,4	3%
Coques D4	100	25,8	26%	16,52	1,8	11%	45,89	2,7	6%

	NDF			ADL		
	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Diff en %	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Diff en %
Coques D2	20,165	7,4	37%	4,88	2,0	41%
Coques D3	20,165	12,1	60%	4,88	3,4	69%
Coques D4	20,165	15,5	77%	4,88	4,2	87%

Ensuite, le Tableau 15 ci-dessous illustre l'extraction théorique des coques (en kg) selon NDF ou ADL également à partir des données brutes du Tableau 12 et du poids des graines présentés dans le Tableau 11. Dans l'ensemble, les 2 paramètres (i.e. NDF et ADL) se rejoignent. On peut en effet remarquer que le poids diffère peu selon l'un ou l'autre composé pris en considération. Le poids des coques extraites suivant NDF est de 16,76 kg, 17,25 kg et 22,33 kg et le poids des coques extraites suivant ADL est de 17,4 kg, 17,5 kg et 21,6 kg pour les différents passages respectifs. Ces valeurs présentées dans le Tableau 11 diffèrent quelque peu du poids des coques (soustraction du poids initial avec le poids des graines après décortiquages) car les poids des coques ci-dessous sont des valeurs théoriques exprimées en fonction des données de composition chimiques (Tableau 13).

Tableau 15 : Extraction théorique des COQUES

	MF			NDF				ADL			
	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Diff en %	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Diff	kg coque	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Diff	kg coque
Coques D2	100	84,8	15%	20,17	11,95	8,21	16,76	4,88	2,61	2,27	17,4
Coques D3	100	80,7	19%	20,17	9,31	10,85	17,25	4,88	1,82	3,06	17,5
Coques D4	100	74,2	26%	20,17	6,77	13,40	22,33	4,88	1,33	3,55	21,6

En outre, grâce aux analyses de composition chimique, le rendement d'extraction de l'huile (en %) lors du pressage des graines a pu être calculé. Celui-ci est présenté dans le Tableau 16 et est de 63%, 62%, 55% et 50% pour les 4 traitements respectifs. Théoriquement, le rendement d'extraction de l'huile pour les différents traitements aurait dû être égal pour l'ensemble, mais celui-ci diminue constamment jusqu'à l'Huile_D4. Cela est dû au réglage préalable de la presse. En effet, celle-ci avait été réglée pour le premier passage de Graines_ND et devrait idéalement être réglée pour chaque traitement. Pour les graines ayant perdu une partie de leur coque, l'ensemble était donc plus gras à cause du temps de séjour plus court dans la presse. Les tourteaux suivants en sont donc sortis beaucoup plus gras au fur et à mesure des traitements. Cela n'était pas aisé d'adapter un processus à une toute nouvelle matière qu'est le tournesol, c'est pourquoi dans le futur, si un nouvel essai a lieu, il sera intéressant de stabiliser correctement la machine pour chaque traitement différent de décorticage effectué.

Tableau 16 : Rendement d'extraction de l'HUILE sur base de la MG

	Entrée (kg)	MG (%)	MG graines (kg)	MG graine (kg)	MG tourteau (kg)	MG extraite (kg)	Rdt extraction (%)	
Graines_ND	98,4	45,89	45,16	Huile_ND	45,16	16,68	28,48	63%
Graines_D2	84,8	50,59	42,90	Huile_D2	42,90	16,49	26,41	62%
Graines_D3	80,7	53,23	42,96	Huile_D3	42,96	19,20	23,76	55%
Graines_D4	74,2	55,10	40,88	Huile_D4	40,88	20,36	20,52	50%

2.2.2. Hypothèse de teneur en MPT et NDF dans le tourteau

Des teneurs théoriques en MPT et NDF dans le tourteau ont été calculées en considérant une extraction totale de 100% et une extraction de 90 % de MG dans les graines, ce que nous ne sommes, en réalité, pas arrivés à effectuer lors de la trituration.

Pour une extraction de 100% de MG, les teneurs théoriques en MPT sont respectivement de 120%, 132% et 140% par rapport au Tourteau_ND. Les 4 passages machines font dès lors augmenter de presque 40% la teneur en protéines, arrivant pour le « tourteau D4 » à un taux de 42,61% en MPT. Ces teneurs se rapprochent donc nettement de la teneur en protéines du « tourteau de soja 48 » qui est de 45 % (Tableau 2, (INRA, 2004)). À propos des fibres contenues dans le tourteau, elles sont respectivement de 77%, 66% et 55% par rapport au Tourteau_ND également. Les 4 passages machines font dès lors ici diminuer de moitié les teneurs en fibres dans le tourteau (Tableau 17).

Tableau 17 : Teneur théorique en MPT et NDF dans le TOURTEAU si 100 % de MG dans les graines (il resterait 0% MG dans le tourteau)

	Huile si 100% MG extraite (kg)	Tourteau si 100% MG extraite (kg)	% MPT théorique (si extraction à 100% MG)	% MPT/ND	% NDF théorique (si extraction à 100% MG)	% NDF/ND	
Huile_ND	45,89	Tourteau_ND	54,11	30,53	37,27		
Huile_D2	50,59	Tourteau_D2	49,41	36,55	120%	28,53	77%
Huile_D3	53,23	Tourteau_D3	46,77	40,20	132%	24,67	66%
Huile_D4	55,10	Tourteau_D4	44,90	42,61	140%	20,31	55%

Une extraction de 90% de MG lors du pressage des graines paraît néanmoins la plus réaliste compte tenu du pressage à froid réalisable chez Alvenat. Les 90 % d'extraction de MG correspondent donc à l'objectif souhaité et sont présentés ci-dessous dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Teneur théorique en MPT et NDF dans le tourteau si 90 % de MG dans les graines sont extraites (il resterait 10% MG dans le tourteau)

Huile si 100% MG extraite (kg)		Tourteau si 100% MG extraite (kg)				
			% MPT théorique (si extraction à 100% MG)	% MPT/ND	% NDF théorique (si extraction à 100% MG)	% NDF/ND
Huile_ND	41,30	Tourteau_ND	58,70	28,14		34,35
Huile_D2	45,53	Tourteau_D2	54,47	33,16	118%	25,88 75%
Huile_D3	47,91	Tourteau_D3	52,09	36,09	128%	22,15 64%
Huile_D4	49,59	Tourteau_D4	50,41	37,95	135%	18,09 53%

Enfin, d'après Dusart (2015), les teneurs maximales en cellulose dans les rations des volailles doivent se situer en dessous de 8%. Selon les valeurs de pourcentages en cellulose présentées en colonne 2 du Tableau 19, le plus haut taux de décortiquage (D4) présente encore des taux en cellulose relativement élevés de l'ordre de 12%. Ces teneurs sont également 2 fois supérieures aux teneurs en cellulose présentes dans le tourteau de soja 48 (Tableau 2, (INRA, 2004)) et limiteront probablement l'incorporation du TT à des taux équivalents aux taux d'incorporation du tourteau de soja dans les régimes.

Globalement, ces teneurs élevées en fibres seront probablement le point d'étranglement pour ajouter des quantités plus importantes de TT dans les rations des volailles.

Tableau 19 : Teneur théorique en cellulose dans le tourteau si 90 % de MG dans les graines sont extraites

Tourteau si 90% MG extraite (kg)		% CELL théorique (si extraction à 90% MG)	
			% CELL/ND
Tourteau_ND	58,70	23,25	
Tourteau_D2	54,47	17,67	76%
Tourteau_D3	52,09	14,76	64%
Tourteau_D4	50,41	12,01	52%

Les résultats lors de ces étapes menant à l'obtention du tourteau et de l'huile de tournesol sont toutefois très encourageants, puisque les essais réalisés chez Alvenat montrent que la machine à trituration, initialement non destinée à ce type de graines, permet un pressage des graines efficace moyennant quelques réglages pour les futurs essais à venir.

2.3. Digestion *in vitro* des protéines du tourteau de tournesol chez le poulet

Cette section présente, en premier lieu, les résultats utilisables qui découlent des nombreuses tentatives de digestion *in vitro* au laboratoire. Des précautions doivent être prises car peu de résultats lors des différents essais effectués sont comparables, même après de nombreux essais préliminaires et une mise au point du protocole effectué.

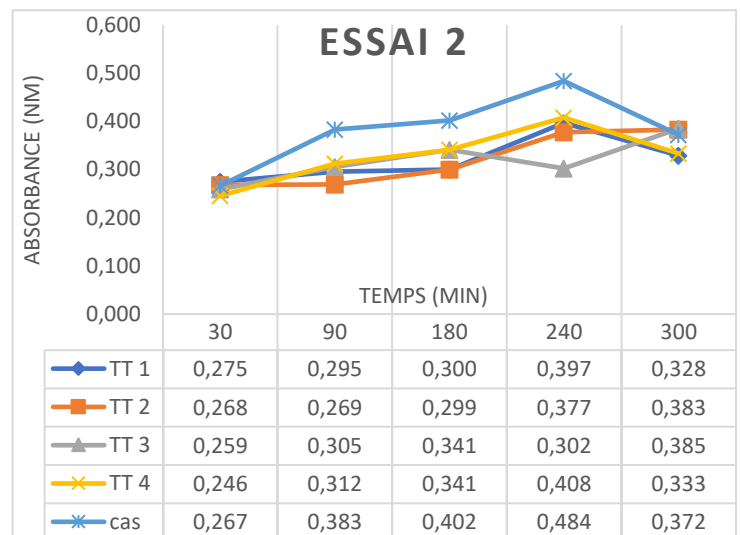
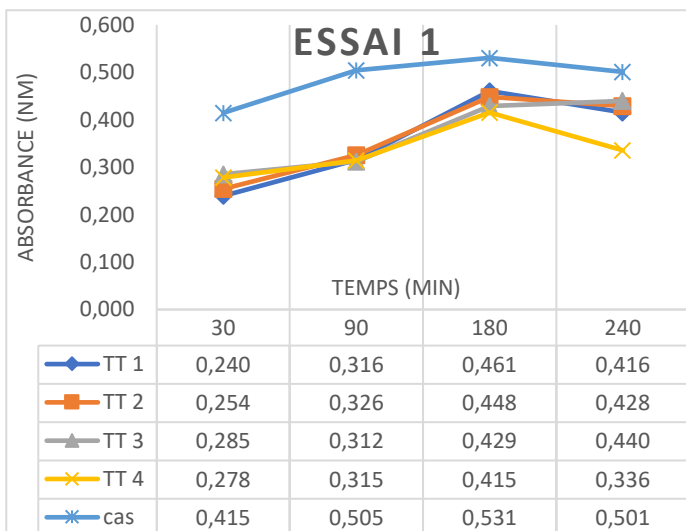
Les 3 « meilleurs » résultats de digestion enzymatique ainsi que le « meilleur » résultat d'hydrolyse à l'HCl y sont présentés.

Le résultat final du pourcentage de digestibilité réelle des protéines des différents échantillons est exposé à l'étape 3.

La méthode initiale propose d'étudier la dynamique de la digestion du poulet (variation de la durée d'action de la pancréatine) afin de modéliser et extraire ensuite les paramètres d'intérêt. L'idée étant d'obtenir, avec le temps le plus long, la digestibilité maximale des protéines et pouvoir estimer ensuite la digestibilité *in vivo* du poulet en fonction de la durée d'action des protéines.

2.3.1. Etape 1 : Digestion enzymatique

Tout d'abord, les résultats de digestion enzymatique exposés ci-dessous présentent de grandes différences d'absorbance entre essais pour des conditions de traitements identiques. Pour rappel, un point de donnée sur le graphique est la moyenne de 3 lectures de DO au spectromètre, pour un même échantillon (Figure 31).



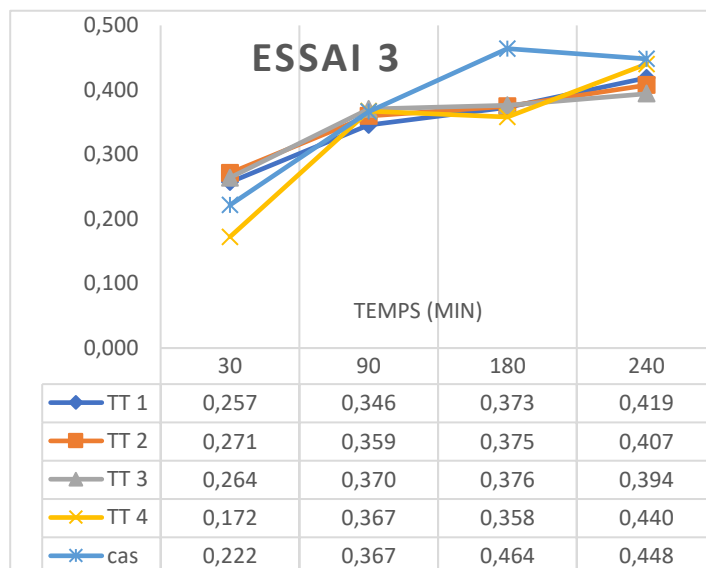


Figure 31 : Digestion enzymatique des tourteaux de tournesol (de non décortiqués à 4 passages à la décortiqueuse) et de la caséine pour les 3 essais.

Afin d'illustrer ces variations, le Tableau 20 présente, pour les échantillons de TT 1 et de caséine, le pourcentage de variation entre la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible des 3 essais. (Voulant uniquement illustrer quelques exemples de variations élevées, ce même tableau est exposé en Annexe 12 pour le TT 2, TT 3 et TT 4, présentant également des variations élevées d'absorbance.)

Tableau 20 : Pourcentage de variation d'absorbances entre la valeur la plus élevée et la plus faible des 3 essais pour les échantillons de TT 1 et de caséine

NOM échantillon	N° essai	Temps (min)	Absorbance (nm)	Pourcentage de différence (%)
TT 1	essai 1	30	0,240	15%
TT 1	essai 2	30	0,275	
TT 1	essai 3	30	0,257	
TT 1	essai 1	90	0,316	17%
TT 1	essai 2	90	0,295	
TT 1	essai 3	90	0,346	
TT 1	essai 1	180	0,461	54%
TT 1	essai 2	180	0,300	
TT 1	essai 3	180	0,373	
TT 1	essai 1	240	0,416	6%
TT 1	essai 2	240	0,397	
TT 1	essai 3	240	0,419	
Cas	essai 1	30	0,415	87%
Cas	essai 2	30	0,267	
Cas	essai 3	30	0,222	
Cas	essai 1	90	0,505	38%
Cas	essai 2	90	0,383	
Cas	essai 3	90	0,367	
Cas	essai 1	180	0,531	32%
Cas	essai 2	180	0,402	
Cas	essai 3	180	0,464	
Cas	essai 1	240	0,501	12%
Cas	essai 2	240	0,484	
Cas	essai 3	240	0,448	

On peut rapidement observer que le pourcentage de différence est très élevé pour de nombreux temps de digestion. Ces différences élevées confirment la non-reproductibilité des mesures entre essais.

On peut néanmoins observer à l'essai 1 et 3 que les valeurs d'absorbance des différents TT (1, 2, 3 et 4) se superposent quasiment (Figure 31). Ces résultats démontrent qu'il n'y a donc aucune dissemblance lors de l'étape 1 de digestion enzymatique des tourteaux de tournesol décortiqués à des degrés différents.

En outre, la caséine ne se détache que très peu vers des valeurs d'absorbance plus élevées à l'essai 1 et 2, et quasiment pas pour l'essai 3.

2.3.2. Etape 2 : Hydrolyse à l'HCl

Comme énoncé dans le matériel et méthodes de cette section, afin de comparer les lots entre eux, 2 lots des mêmes échantillons par essai ont été engagés au même instant dans l'étuve. Le TT 2 (1,513 nm) encadré en rouge sur la Figure 32 avait, lui, perdu près de 7g et a donc été écarté. La perte de poids explique ainsi une valeur d'absorbance plus élevée lors de la lecture au spectromètre. Cette perte est très certainement la conséquence de l'évaporation de l'acide durant l'hydrolyse.

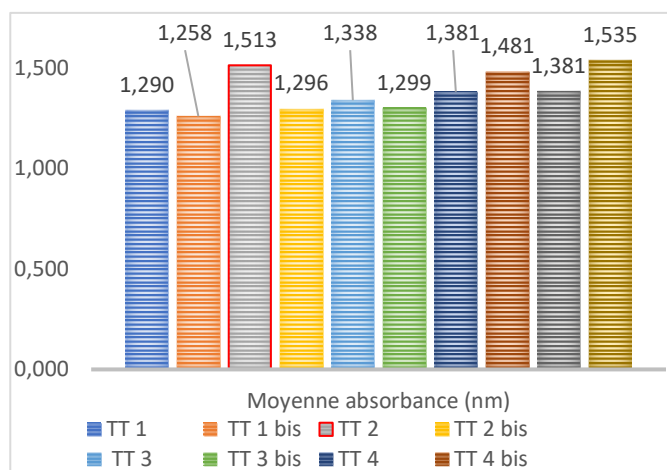


Figure 32 : Absorbance des échantillons de l'hydrolyse à l'HCl

Tableau 21 : Pourcentage de variation des valeurs d'absorbance

NOM échantillon	Absorbance (nm)	Pourcentage de différence (%)
TT 1	1,290	3%
TT 1 bis	1,258	
TT 2	1,513	/
TT 2 bis	1,296	
TT 3	1,338	3%
TT 3 bis	1,299	
TT 4	1,381	7%
TT 4 bis	1,481	
cas	1,381	11%
cas bis	1,535	

Les absorbances présentées en Figure 32 indiquent des valeurs plus élevées par rapport aux absorbances de la digestion enzymatique, ce qui est assez logique, puisque toutes les protéines sont hydrolysées à l'HCl 6N. On peut observer des valeurs d'absorbance relativement similaires entre les duplicats, avec des pourcentages de variation de 3 % pour le tourteau 1 et 3, de 7% pour le tourteau 4 et un pourcentage de différence un peu plus élevé de 11%, pour la caséine, les valeurs d'absorbance exposées ci-dessus étant les meilleures obtenues après quatre tentatives effectuées. La décision de prendre ces résultats pour illustrer les pourcentages de digestion réelle des protéines s'est faite aisément.

(La moyenne des 2 lots est prise en considération pour le calcul final de digestibilité réel (cf. étape 3)).

2.3.3. Etape 3 : Digestibilité réelle des protéines

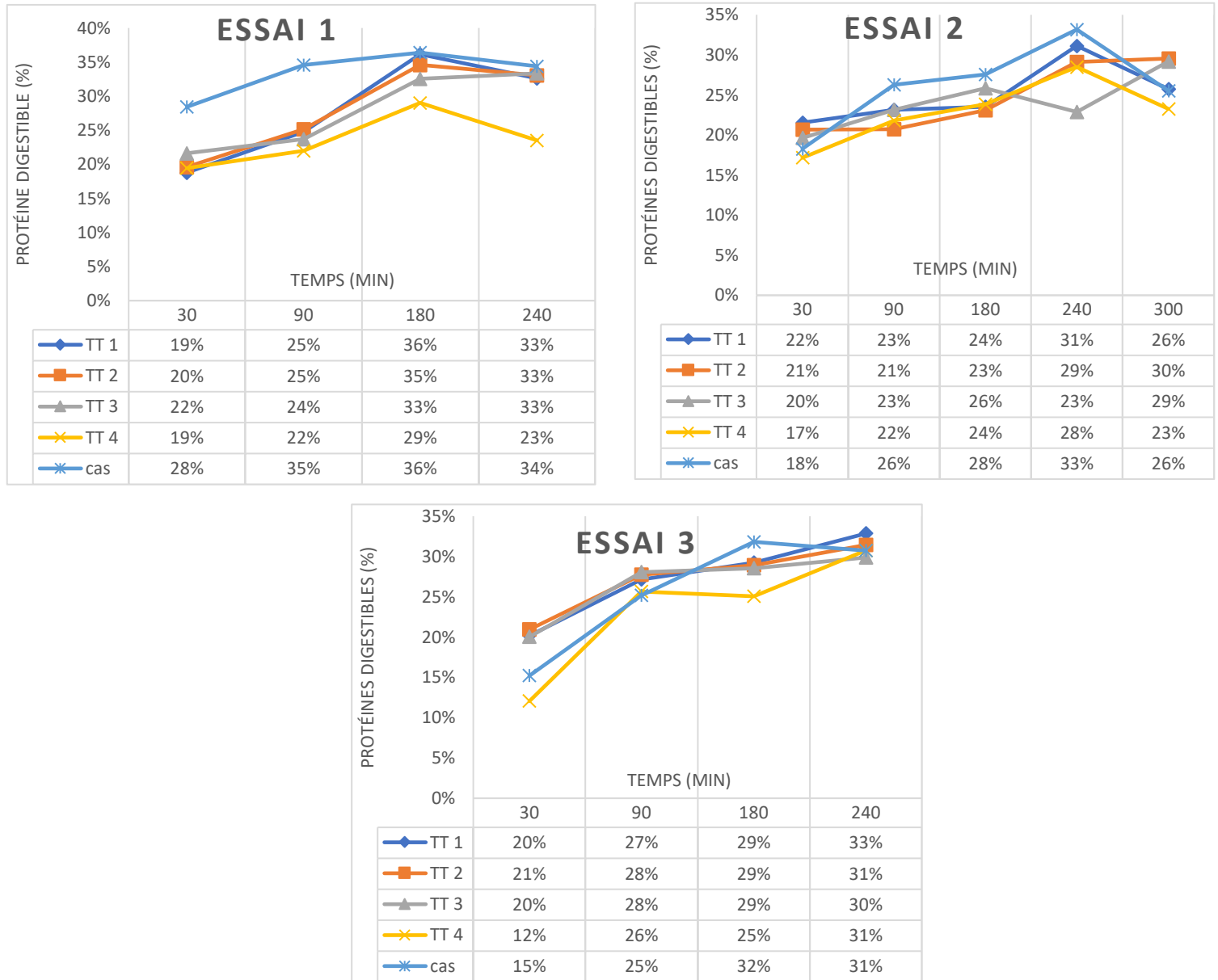


Figure 33 : Digestibilité réelle des protéines des différents tourteaux de tournesol et de la caséine pour les 3 essais

Les résultats finaux présentés en Figure 33 et relatifs à la digestibilité des protéines montrent également de grandes différences entre les tripliquas, ce qui est assez logique puisque la digestibilité des protéines (%) est la division des résultats de digestions enzymatiques par les résultats de l'hydrolyse à l'HCl. Elles sont cependant du même ordre de grandeur, commençant aux alentours de 15% à 30 min de digestion, et ne dépassant pas les 36% de digestion à 180 min (essai 1). La décision d'aller jusqu'à 240, voire 300 min (essai 2) de digestion, se justifie par le fait que la durée de digestibilité d'une volaille peut atteindre les 240 min, voire 300 min, pour certains aliments (Rougière, 2010). Dans le jabot, le temps de rétention moyen est en effet très variable.

Ces résultats finaux de digestibilité doivent donc être considérés avec prudence puisque la digestibilité de la caséine (moyenne de 33 %) est relativement similaire au TT, ce qui n'aurait normalement pas dû

être le cas, puisque la caséine bovine a une très bonne accessibilité aux enzymes digestifs. De plus, leurs différentes formes (α , β , κ et γ) sont toutes solubles sous leur forme native. Par ailleurs, selon Deglaire et al. (2009), la digestibilité réelle de la caséine chez le porc est de 97,6%, correspondant dès lors à un taux de digestibilité 3 fois plus élevé que les résultats obtenus.

Enfin, à titre de comparaison, les valeurs de digestibilité obtenues, pour le TT et pour la caséine, lors des laboratoires, étaient nettement inférieures aux valeurs de digestibilité obtenues par Bryan et al. (2019) pour la farine de sang. En effet, celle-ci atteignait une valeur de digestibilité de près de 49% tandis que les résultats de digestibilité de la caséine ne dépassaient pas les 36%.

Plusieurs origines, exposées ci-dessous, peuvent potentiellement expliquer les faibles valeurs de digestibilité obtenues ainsi que les variations observées entre répliquats.

2.3.4. Hypothèses des faibles valeurs de digestibilité

La première hypothèse des faibles valeurs de digestibilité en protéines obtenues s'est d'abord établie sur un possible taux trop important de MG dans le TT. En effet, comme expliqué antérieurement, le TT obtenu après trituration chez Alvenat était très gras. Un dégraissage préalable de ceux-ci avant les manipulations *in vitro* a dès lors été émis, mais cette décision n'a finalement pas abouti puisque la caséine ne possède aucune matière grasse et ses valeurs de digestibilité réelle ne dépassent pas les 36% en fin de phase intestinale.

La seconde hypothèse concernant les faibles valeurs de digestibilité obtenues (et particulièrement pour les échantillons de caséine qui auraient dû atteindre des pourcentages plus élevés) pourrait s'expliquer par une concentration en pancréatine incorporée trop faible. Cependant, comme exposé antérieurement dans le matériel et méthodes de cette section, une concentration de 50g/litre (8 X USP) a été utilisée tout au long des manipulations (concentrations obtenues à partir des 30 667 unités de BAEE/ml dosé par la pancréatine liquide RENCO de Bryan et al. (2019)). Pour appuyer le calcul effectué (Annexe 5), Chen et al. (2019) utilisent également une pancréatine solide de 4 X USP à 100g/litre. La concentration obtenue de 50g/litre paraît donc totalement vraisemblable, correspondant à une même concentration utilisée par Chen et al. (2019). En outre, la méthode mesure les acides aminés libérés qui réagissent avec la ninhydrine. D'autres méthodes mesurent le résidu d'azote non soluble après filtration. Il est donc possible que la pancréatine fournisse des oligopeptides « mal » dosés par la ninhydrine (elle se fixe uniquement sur la fonction amine libre des a.a ou des protéines).

La dernière hypothèse des faibles valeurs de digestibilité obtenues pourrait également provenir du temps d'action de la pepsine incorporée dans les échantillons. L'hypothèse étant que celle-ci n'arriverait pas à cliver un nombre assez élevé de protéines en petits peptides, dans un laps de temps de 30 minutes. Toutefois, la pepsine ayant comme unique fonction de cliver les protéines en peptides, celle-ci ne joue pas un rôle majeur dans le clivage total des protéines en a.a, rôle majeur, revenant à la pancréatine.

Aucune manipulation ultérieure à ces 2 hypothèses évoquées ci-dessus n'a été réalisée. Cependant, dans le futur, il serait intéressant d'entreprendre des essais avec des concentrations en pancréatine supérieures afin d'avoir une vue globale d'une possible augmentation de digestibilité protéique. Enfin, le temps d'action de la pepsine pourrait également être revu.

2.3.5. Hypothèses des variations observées entre répliquât

Une première hypothèse des variations observées entre répliquâts a été émise pour l'étape de la réaction à la ninhydrine des échantillons. En effet, la ninhydrine étant extrêmement liquoreuse, le nombre de millilitres injectés dans chaque échantillon variait régulièrement. Le volume ajouté (non constant) jouait donc nettement à la lecture de DO, se répercutant sur les valeurs de digestibilité déterminées par la mesure des acides aminés libérés qui réagissent avec la ninhydrine. L'idée de dissoudre les 1 000 µl de solution de ninhydrine directement dans les 1 900 ml d'eau milliQ a été testée, cependant, elle n'a pas permis d'obtenir une meilleure reproductibilité des résultats.

Enfin, l'hypothèse du dégraissage afin d'obtenir des variations entre répliquâts beaucoup plus faibles n'a également pas abouti, puisque la caséine ne possède aucune matière grasse et ses variations entre répliquâts étaient également très élevées (cf. Tableau 18).

2.3.6. Méthode publiée

À notre connaissance, le protocole adopté et publié en 2018 n'a jamais été utilisé par d'autres auteurs, mais il s'agissait du protocole le plus récent imitant la digestion complète des protéines en AA. Toutefois, comme précisé préalablement, la digestibilité *in vitro* présente une idée de la digestibilité globale du tourteau, mais ne tient pas compte des phénomènes digestifs se produisant au sein de l'animal. Cette méthode tente ainsi de reproduire les mécanismes *in vivo* mais imparfaitement.

En outre, les six répétitions préconisées par les auteurs de la méthode traduisent probablement une faible reproductibilité des échantillons.

L'utilisation de ce protocole et l'interprétation des résultats finaux amènent donc à montrer un effet anormal de la méthode lors des manipulations réalisées (indépendant de notre volonté). Une mise au point du protocole initial devrait être réalisé si un essai ultérieur sur des échantillons de tourteaux de tournesol, voire d'aliments en général, venait à être effectué. D'ailleurs, des informations supplémentaires ont été demandées en ce sens aux auteurs de l'article, mais aucune réponse de leur part n'a été donnée.

2.4. Performances zootechniques des poulets

Le Tableau 22 présente les performances des poulets selon les différents régimes administrés ainsi que leurs effets principaux. Les paramètres illustrés sont le poids initial, le poids final, la différence de poids (= différence du poids initial et du poids final), le GQM, la MS ingérée ainsi que l'indice de consommation (IC) des poulets.

L'analyse des données a été effectuée sur l'ensemble des données (toutes les loges) mais également en supprimant les loges 11, 21, 29, et 37 du traitement témoin, les poulets de ces loges ayant démarrés difficilement pour des raisons qui sont inconnues. Les résultats mis en évidence ci-dessous sont présentés avec ces 4 loges du régime « Témoin » ôtées. Le tableau ci-dessous présente ainsi les résultats avec un même nombre de loges par bloc. En outre, le GQM, les aliments consommés ainsi que l'IC sont calculés à partir de toutes les mesures effectuées pendant les 3 semaines d'essai.

(Le tableau comprenant toutes les loges est disponible en Annexe 13. Néanmoins, celui-ci ne présente pas de différences notables, en comparaison du tableau présenté ci-dessous (cf. régime Témoin)).

Tableau 22 : Paramètres de croissance des volailles

	Poids initial (kg/poulet)	Poids final (kg/poulet)	Différence de poids (kg/poulet)	GQM (g/jour)	MS ingérée (g/jour*poulet)	IC (gMS ingéré/gGQM)
Régime 1	0,912 ± 0,07	2,41 ± 0,09	1,50 ± 0,08	82,4 ± 10,2	122 ± 6,5	1,49 ± 0,11
Régime 2	0,875 ± 0,19	2,49 ± 0,28	1,62 ± 0,20	88,8 ± 12,4	131 ± 19,4	1,48 ± 0,08
Régime 3	0,894 ± 0,12	2,37 ± 0,20	1,48 ± 0,14	83,7 ± 16,8	131 ± 10,7	1,60 ± 0,20
Régime 4	0,878 ± 0,11	2,49 ± 0,15	1,62 ± 0,19	88,8 ± 5,9	127 ± 4,1	1,43 ± 0,06
Régime Témoin	0,867 ± 0,16	2,36 ± 0,17	1,49 ± 0,12	81,2 ± 9,0	122 ± 7,3	1,51 ± 0,12

Effets principaux

Régime	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Bloc	***	***	***	NS	NS	NS
Régime * Bloc	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Le GQM, la MS ingérée ainsi que l'IC sont calculés à partir des mesures effectuées pendant les 3 semaines d'essai

NS : Non significatif ; (P>0,05) ; * : (0,01<P≤0,05) ; ** : (0,001<P≤0,01) ; *** : (P≤0,001).

Aucun effet significatif du régime n'a été mis en évidence lors de cet essai quant aux différents régimes soumis aux poulets (Tableau 22). Les effets étant tous non significatifs (NS) pour les régimes, aucun contraste n'a été estimé. Cependant, on remarque la très haute significativité du bloc sur les poids des poulets. De fait, ceux-ci ayant été regroupés en fonction de leur poids au début de l'expérimentation, ce résultat s'avère logique.

En ce qui concerne les régimes administrés, l'absence d'effets significatifs sur les différents paramètres de performance des volailles est en accord avec l'hypothèse initialement fixée. De fait, les régimes distribués étant iso-énergétiques, l'hypothèse d'effets non significatifs sur les performances des poulets avait été estimée.

On remarque cependant quelques tendances identifiables : la différence de poids (colonne 3) ainsi que le GQM (moyenne des 3 semaines d'essai) sont supérieurs pour les régimes 2 et 4. Ensuite, la quantité de MS ingérée par les volailles est supérieure pour les régimes 2 et 3, le régime 4 se situe lui en 3^{ème} position. Dès lors, on remarque que les régimes contenant du TT, et particulièrement ceux ayant subi un processus de décorticage, sont très bien appréciés par les volailles.

L'IC des volailles est compris entre 1,43 et 1,60. Ces résultats sont relativement conformes, puisqu' un poulet industriel standard a un indice compris entre 1,5 et 1,9 (Evereart, 2019, Cours de Fondements et dynamiques des systèmes d'élevage). Néanmoins, c'est le régime 4 qui détient l'IC le plus faible. Celui-ci permet donc d'économiser le plus d'aliments pour un gain de poids identique, à contrario du régime 3 qui possède un IC de 1,60. De fait, c'est le régime 3 qui a été limitant lors de l'essai.

En outre, les résultats obtenus contredisent les travaux de Araújo et al. (2014). Dans notre étude, les résultats obtenus avec des taux d'incorporation compris entre 15 et 34% n'ont en effet pas réduit le poids, ni aggravé le taux de conversion alimentaire (IC). Des taux relativement élevés de TT dans les rations (plus de 30%) ne pénaliseraient donc pas les performances animales dans l'essai qui a été entrepris. Pour rappel, dans les travaux de Araújo et al. (2014), l'augmentation de l'ajout alimentaire de TT avait amélioré les performances des poulets pour 8% d'inclusion, mais avait réduit le gain de poids et aggravé le taux de conversion alimentaire (FCR) ($p > 0,05$) pour les pourcentages d'incorporation supérieurs (16 et 24 % de TT). Un ajout d'AA de synthèse avait également été réalisé dans les régimes (comme dans notre essai) afin de corriger le profil initial en AA.

De plus, Alagawany et al. (2018) ont démontré que le poids corporel ainsi que le taux de conversion alimentaire étaient améliorés pour les groupes ayant reçu entre 5 et 10 % de TT par rapport au régime total, mais des taux d'inclusion supérieurs (15%) diminuaient également le gain de poids corporel et de taux de conversion comme déclarés également par Araújo et al. (2014).

Globalement, les résultats obtenus lors de notre essai contredisent ces résultats cités ci-dessus puisque les performances des volailles n'ont pas diminué significativement avec des taux d'inclusion élevés en TT. Dès lors, à partir des résultats de l'essai et particulièrement pour les résultats des régimes 3 et 4, le tournesol décortiqué à un taux élevé serait une solution pour réduire drastiquement la place du tourteau de soja dans les rations. Suite à ce décorticage, le TT a pu être incorporé au régime alimentaire à des taux de 34 et 31% (respectivement pour les régimes 3 et 4), sans observer de diminution de performances. Des taux d'inclusion de près de 30% ayant été suggérés par Peyronnet et al. (2012).

2.4.1. Évolution des poids moyens des poulets

On peut également observer, sur le graphique présenté en Figure 34, que les volailles ont exprimé une croissance et un développement similaire durant les 3 semaines d'essais, qu'importe le régime reçu.

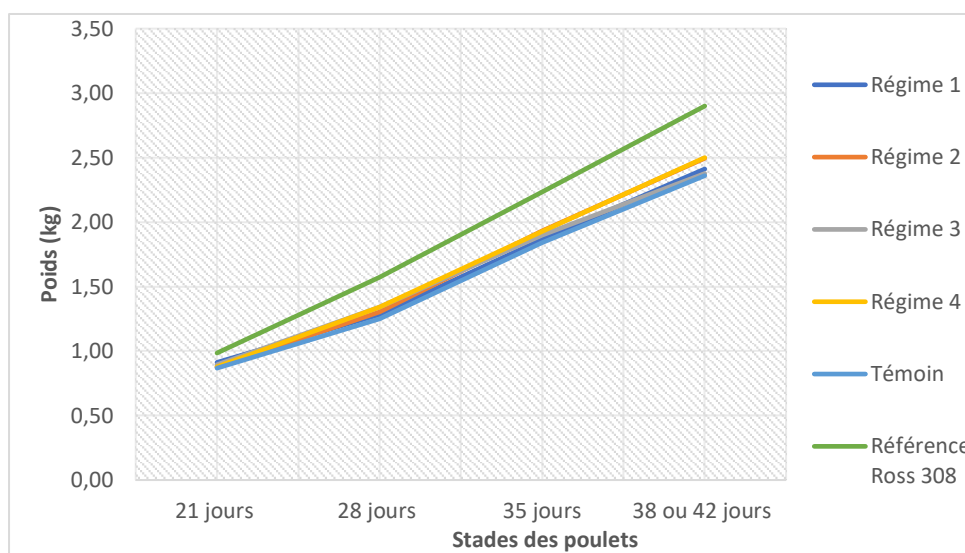


Figure 34 : Évolution du poids moyen des poulets par régime sur les 3 semaines d'essai.

En revanche, un écart de poids entre la « référence Ross 308 » et les différents régimes administrés peut être constaté. Les courbes de poids lors de l'essai ont en effet évoluées plus lentement dès le début. Le décrochage observé est expliqué, selon nous, par un temps d'acclimatation de presque une semaine. De fait, avant d'arriver à la ferme expérimentale, les poulets étaient nourris avec un régime principalement céréalier sous forme de pellets. Le changement drastique de nourriture grossièrement concassée et le changement d'environnement expliquent par conséquent ce retard. Le poids des volailles à partir du 28^{ème} jour d'essai a ensuite augmenté de façon régulière jusqu'à atteindre un poids de 2,4 kg, poids habituellement atteint par la souche Ross 308 dans les poulaillers conventionnels.

À l'avenir, un essai de ce type pourrait être réitéré, toutefois avec un temps d'adaptation des volailles à leur nouvel environnement, d'environ une semaine.

2.4.2. Analyse des régimes initiaux et refus alimentaires des poulets

Diverses analyses ont été réalisées sur les aliments présentés aux poulets ainsi que les refus récupérés des différents régimes. Ces analyses concernent la MS, les CT, la MPT, la MG et le NDF.

Tableau 23 : Caractérisation des régimes. (MS 103°C = teneur en matière sèche à 103°C, CT = cendres totales, MPT = matière protéique totale (N*6,25), MG = matière grasse (extrait éthéré), NDF = fibres insolubles dans le détergent neutre)

Régimes caractérisés	MS 103°C %	CT % MS	MPT % MS	MG % MS	NDF % MS
Régime 1	89,6	6,1	21,2	13,9	15,4
Régime2	89,8	6,9	22,1	15,0	15,6
Régime 3	89,8	6,2	21,9	16,2	15,8
Régime 4	90	6,9	22,4	16,1	16,5
Régime Témoin	89,6	6,3	21,6	15,9	14,4

Dans le Tableau 23, on peut constater que le pourcentage de MG ainsi que de fibres (NDF) est élevé pour tous les régimes. En effet, le taux de MG est plus de 2 fois supérieur à la recommandation de DSM (2018) qui est de 6,5% maximum et le taux de fibres est également de 5 % supérieur aux recommandations de Swennen et al. (2010), étant de 10 % maximum d'incorporation dans le régime.

Il est cependant important de rappeler que ces teneurs élevées en MG étaient obligatoires dans les régimes puisque la teneur en MG dans les TT n'a fait qu'augmenter au fur et à mesure de l'étape de trituration chez Alvenat. Toutefois, pour des volailles en finition à croissance rapide, ces taux plus élevés de MG et de fibres n'impactent pas les performances de croissance.

Tableau 24: Caractérisation des refus. (MS 103°C = teneur en matière sèche à 103°C, CT= cendres totales, MPT= matière protéique totale (N*6,25), MG= matière grasse (extrait éthéré), NDF = fibres insolubles dans le détergent neutre)

Refus caractérisés	MS 103°C %	CT % MS	MPT % MS	MG % MS	NDF % MS
Refus 1	90,7	7,1	22,4	13,9	17,0
Refus 2	90,7	7,3	22,4	15,2	17,7
Refus 3	90,6	6,8	21,8	15,9	17,0
Refus 4	91,1	8,0	23,1	18,0	19,2
Refus Témoin	90,7	6,4	21,5	15,3	16,4

Les refus calculés ci-dessus représentent la moyenne de 2 loges pour les refus aux TT et la moyenne de 4 loges pour les refus Témoin

En ce qui concerne la composition des refus des différents régimes, celle-ci semble relativement similaire au régime initial pour la MPT ainsi que pour la MG. Seul le refus du régime 4 présente un taux plus élevé de MG.

De plus, la teneur en fibres des refus (NDF) présente, pour tous les régimes, des valeurs plus élevées par rapport aux régimes initiaux, particulièrement pour les régimes 2 et 4. Le GQM plus élevé de ces deux régimes (Tableau 22) pourrait donc s'expliquer par la teneur en fibres (NDF), également plus élevée, observée dans les refus. Les volailles ont certainement trié les particules alimentaires, délaissant les coques de tournesol ajoutées dans l'alimentation notamment pour le régime 4 (coques ajoutées afin d'équilibrer la teneur en cellulose).

En outre, lors de la mouture des échantillons de refus alimentaire, une grande proportion de maïs a été observée. En effet, la couleur jaune des refus était bien plus prononcée par rapport aux régimes initiaux. Dès lors, ces observations permettent d'affirmer que le maïs était mangé en plus faible quantité en comparaison du tourteau de tournesol ou encore du tourteau de soja. Le maïs concassé dans le régime a probablement impacté la prise alimentaire des volailles, la taille des particules de maïs étant plus élevée que les particules de tourteau de tournesol et de soja.

La différence visuelle de tailles de particules entre les différents tourteaux (soja, tournesol) et le maïs incorporé dans le mélange alimentaire a également certainement provoqué le tri des volailles et ce, notamment pour le régime 2 qui ne contenait, lui, pas de coques de tournesol ajoutées au régime.

Il est cependant important de rappeler qu'aucune différence significative n'a été observée, par rapport aux régimes, lors des calculs de performances (Tableau 21). Ces compositions différentes de refus par rapport aux régimes initiaux n'ont donc pas eu d'effet significatif sur les performances de croissance des volailles.

De manière générale, cet essai a permis de montrer que les régimes contenant du TT permettaient, pour une même valeur nutritionnelle, de maintenir les performances des volailles par rapport à un régime contenant du soja importé. Une projection quant au taux de MPT, de NDF ainsi que de MG dans le régime des volailles peut finalement être interprétée. En effet, si le rendement d'extraction de l'huile lors de la trituration augmente (proche de 90% comme présenté dans la section 2.2.2.), le TT aura un pourcentage en MPT et NDF plus élevé mais un pourcentage en MG plus faible. Par conséquent, les qualités nutritives du TT ne seront pas tout à fait égales à celles du tourteau de soja. Les résultats de l'essai démontrent que le TT pourrait être très intéressant comme substitut à condition que le profil nutritionnel soit équilibré, par exemple l'ajout d'AA de synthèse et/ou des proportions plus faibles de TT que de tourteau de soja... Dans le futur, une étude en profondeur comparant ce qui varie considérablement entre ces 2 tourteaux pourrait être entreprise, particulièrement pour le taux de fibres et de MPT.

V. Conclusion et perspectives

Le suivi phytotechnique qui a été réalisé sur la densité de semis du tournesol reprend un essai sur les 5 semis implantés cette année. L'ensemble des performances du tournesol sur son potentiel de culture en Wallonie n'est donc pas encore connu. En effet, le tournesol devra encore être étudié pendant plusieurs années afin d'identifier son potentiel au-delà de la première année d'implantation.

Néanmoins, l'essai réalisé a démontré des effets significatifs sur plusieurs facteurs étudiés pour les différentes densités de semis implantées. Aucune différence significative concernant le rendement réel n'a été observé, cependant les densités 9 et 10 plantes/m² se sont révélées être les plus stables en termes de rendements. Un essai complémentaire avec des parcelles et des observations plus nombreuses devrait être réalisé afin de confirmer ou d'infirmer les effets de la densité de semis. De fait, l'année 2021, exceptionnelle en termes de volumes de précipitations, a eu un impact considérable sur le rendement.

Les dégâts d'oiseaux observés sur le tournesol cette année dégradent fortement la rentabilité du tournesol et remettent en cause sa place dans les rotations. Cette année, si peu de parcelles ont été touchées, elles l'ont été avec une grande sévérité (comptabilisation des parcelles d'essais et des parcelles des agriculteurs « Réseau Sunwall »). La distribution des dégâts observés est par conséquent fortement asymétrique au sein du territoire wallon.

Du point de vue du décortilage, triage et pressage des graines de tournesols, les résultats sont prometteurs. En effet, le décortilage des graines permet d'éliminer une quantité non négligeable de fibres dans le tourteau pour qu'il soit ensuite incorporé dans le régime des poulets de chair à des taux de 30 % comme suggéré par Peyronnet et al. (2012). Concernant le pressage à froid réalisé chez Alvenat, le rendement d'extraction de l'huile pour les différents traitements de graines (D2, D3 et D4) n'a pas été suffisant, les tourteaux étant ressortis trop gras de la presse. Toutefois, cela n'est pas toujours aisé d'adapter un processus à une toute nouvelle matière qu'est le tournesol. C'est pourquoi, dans le futur, il serait intéressant de stabiliser correctement la machine pour chaque traitement spécifique de décortilage effectué. En outre, les outils utilisés pour effectuer tout le processus de triage, décortilage et pressage n'étaient pas représentatifs des modèles utilisés en industrie et devront donc, à l'avenir, être revus et réfléchis en fonction des objectifs de cette nouvelle filière wallonne. Les coûts des processus mis en œuvre devront également être chiffrés.

Pour ce qui est de la digestion *in vitro* du tourteau de tournesol décortiqué à des degrés différents, les résultats obtenus ne sont pas très encourageants. Toutefois, les différents essais réalisés ne démontrent globalement pas de différence de digestion entre les échantillons de tourteaux. Enfin, les faibles valeurs de digestibilité obtenues ainsi que les variations observées entre répliquats pourraient, dans le futur, être améliorées par une mise au point de la méthode, constituant actuellement une limitation de la technique.

L'essai réalisé *in vivo* sur les performances zootechniques des poulets n'a pas démontré d'effet significatif quant à l'incorporation de tourteau de tournesol, et ce, même si le TT était décortiqué ou non décortiqué. Le premier point (incorporation du TT) confirme donc qu'un apport de TT dans le régime des volailles ne réduit pas le poids et n'aggrave pas le taux de conversion alimentaire. Des taux d'incorporation de l'ordre de 30 % pourraient par conséquent être une solution pour réduire drastiquement la place du tourteau de soja dans les régimes alimentaires des volailles de chair. Un tel taux d'utilisation requiert cependant le décortilage des graines afin de concentrer les protéines et réduire la teneur en fibres du tourteau, améliorant la digestibilité des nutriments. Enfin, par rapport au tourteau de soja, l'usage du TT demande une complémentarité en lysine de synthèse, voire en méthionine, chez le poulet à croissance rapide.

Pour conclure, l'objectif général de ce travail est d'aider au développement de la filière du tournesol en Wallonie. Il ouvre à présent de nouvelles perspectives pour de futurs essais, qui devraient permettre de

donner une indication aux futurs agriculteurs et entrepreneurs voulant se lancer dans cette nouvelle filière agricole. Le tournesol intégré dans une rotation permettra de remplir de nombreux services écosystémiques, tout en fournissant de l'huile pour la consommation humaine et du tourteau exploitable pour l'alimentation animale, ce qui peut s'avérer très intéressant pour les exploitations mixtes, en particulier pour les volailles, si les graines sont dépourvues partiellement de leurs coques.

VI. Contribution personnelle de l'étudiante

L'étudiante a débuté son travail de fin d'études par la recherche de 500 kg de graines de tournesol oléagineuses en provenance de France. Ces recherches lui ont permis de constater la difficulté de trouver, dans un laps de temps restreint, les graines de tournesol désirées. Après de nombreux échanges de mails avec des professionnels du milieu, les graines ont pu être trouvées et transportées jusqu'au CRA-W. En parallèle, l'étudiante a réalisé de nombreuses recherches dans la littérature scientifique. Elles lui ont permis de voir l'étendue des études déjà réalisées et d'en apprendre davantage dans les domaines liés à son sujet de TFE.

Ensuite est venue l'étape de décortilage et triage des graines de tournesol en vue de l'essai zootechnique sur les volailles de chair. Ces étapes ont nécessité une quantité importante de travail. L'étudiante a rassemblé tout le matériel requis afin de faciliter son organisation sur place (CRA-W). Par la suite, l'étape de trituration des graines a pu être effectuée. L'étudiante a pris soin de solliciter les personnes appropriées (Co-promoteur et directeur de la PME) afin de s'assurer du bon fonctionnement de la presse.

Pour son étude phytotechnique, l'étudiante a conçu le plan d'expérimentation, planifié et collecté des données en prenant en considération les contraintes liées au temps. Face aux conditions météorologiques, l'étudiante a dû faire preuve de patience et d'une capacité d'adaptation.

Des essais en laboratoire et en poulailler sur la digestion des poulets de chair ont suivi ces étapes. L'étudiante a tout d'abord réalisé des séances de laboratoires et contribué à la réécriture du protocole de laboratoire. L'étudiante a ensuite participé à la mise en place de l'essai et au suivi des poulets en réalisant des pesées et mesures hebdomadaires sur ceux-ci. Elle a également pris part à la préparation des 5 régimes alimentaires et à l'entretien général du poulailler.

Pour l'analyse des données récoltées, l'étudiante s'est renseignée sur les méthodes statistiques et a appris à utiliser le logiciel RStudio. La discussion de ce mémoire a également été enrichie par des recherches effectuées par l'étudiante dans la littérature scientifique.

De manière générale, ce TFE contribue au développement du Projet Sunwall mené par le CRA-W et constitue le premier travail ciblant la culture du tournesol et ses débouchés en Wallonie.

Références Bibliographiques

- Actualitix, 2016. Europe : Huile de tournesol - Pays producteurs (Tonnes). <https://fr.actualitix.com/pays/eurp/europe-huile-de-tournesol-production.php>, (23/08/2021).
- AG, Wintersteiger, 2021. Hege 16 batteuse à épis de laboratoire. <https://www.wintersteiger.com/fr/Recherche-et-culture-de-plantes/Produits/Programme-de-produits/Equipe-ment-de-recherche/71-Hege-16>, (18/08/2021).
- Alagawany M., Attia A., El-Hack M.E.A., Arif M. & Emam M., 2018. The influences of feeding broilers on graded inclusion of sunflower meal with or without Avizyme on growth, protein and energy efficiency, carcass traits, and nutrient digestibility. *Turk J Vet Anim Sci* 42, 168–176.
- Araújo W. de, Albino L.F.T., Rostagno H.S., Hannas M.I., Pessoa G.B.S., Messias R.K.G., Lelis G.R. & Ribeiro Jr V., 2014. Sunflower meal and enzyme supplementation of the diet of 21- to 42-d-old broilers. *Braz. J. Poult. Sci.* 16, 17–24, DOI:10.1590/1516-635x160217-24.
- Aubertot J.-N., Costa A., Zecchini M.-A.V., Robaldo G., Mestries E., Casadebaig P. & Debaeke P., 2019. Rapport scientifique du projet SUNFLOWERPEST (report).
- Badenhausser I., 1996. Sequential Sampling of *Brachycaudus helichrysi* (Homoptera: Aphididae) in Sunflower Fields. *J. Econ. Entomol.* 89(6), 8.
- Besser J.F., 2015. Birds and sunflower. In: *Sunflower Science and Technology*. 263–278.
- Biowallonie asbl, 2020. livret-réglementation-volailles-bio.pdf. https://www.biowallonie.com/wp-content/uploads/2020/09/2020_09_livret-re%CC%81glementation-volailles-bio.pdf, (14/09/2021).
- Bodson B., De proft M. & Watillon B., 2019. *Livre Blanc Céréales (édition Février 2019)*, Gembloux.
- Bogaert L., 2017. Étude et modélisation du pressage continu des graines oléagineuses (Thèse de Doctorat). Université de Technologie de Compiègne, 167p.
- Borredon M.-E., Berger M., Darracq Dauguet S., Labalette F., Merrien A., Mouloungui Z. & Raoul Y., 2011. Débouchés actuels et futurs du tournesol produit en France - Critères de qualité. *Innov. Agron.* 14, 19–38.
- Bryan D.D.S.L., Abbott D.A. & Classen H.L., 2019. Digestion kinetics of protein sources determined using an in vitro chicken model. *Anim. Feed Sci. Technol.* 248, 106–113, DOI:10.1016/j.anifeedsci.2019.01.002.
- Cabelguenne M. & Debaeke P., 1998. Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat. *Plant Soil* 202(2), 175–192.
- Caussade semences, 2019. Toscana CS.
- CETIOM, 2014. Les stades du Tournesol. *studylibfr.com*. <https://studylibfr.com/doc/4069775/les-stades-du-tournesol>, (26/04/2021).
- Champolivier L., 2019a. Fertilisation du tournesol: optimiser la fertilisation phosphatée et potassique. *Terres Inovia*. <https://www.terresinovia.fr/-/fertilisation-du-tournesol-optimiser-la-fertilisation-phosphatee-et-potassique>, (03/05/2021).

- Champolivier L., 2019b. Fertilisation du tournesol: carences en molybdène et en magnésium. *Terres Inovia*. <https://www.terresinovia.fr/-/fertilisation-du-tournesol-carences-en-molybdene-et-en-magnesium>, (07/08/2021).
- Champolivier L., 2019c. Fertilisation du tournesol: carence en bore, intervenir préventivement en cas de risque. *Terres Inovia*. <https://www.terresinovia.fr/-/fertilisation-du-tournesol-carence-en-bore-intervenir-preventivement-en-cas-de-risque>, (10/06/2021).
- Chen H., Wierenga P.A., Hendriks W.H. & Jansman A.J.M., 2019. In vitro protein digestion kinetics of protein sources for pigs. *animal* 13(6), 1154–1164, DOI:10.1017/S1751731118002811.
- Clergeau P., 1997. *Oiseaux et risques en ville et en campagne, vers une gestion intégrée des populations ?*, INRA Editions, 361.
- CRA-W|AGROMET, 2021. AGROMET - la plateforme météo des OAD agricoles. *CRA-W Cent. Wallon Rech. Agron.* <https://www.cra.wallonie.be/fr/agromet>, (18/11/2021).
- Dauguet S., 2015. Décorticage du tournesol : un tourteau plus riche en protéines. *Perspect. Agric.* 421, 37–39.
- Dauguet S., Guillemain C., Carre P. & Fine F., 2012. Effect of sunflower seeds quality on dehulling process in order to produce protein content guaranteed meal in oil mill industry.
- de Figueiredo A.K., Rodríguez L.M., Riccobene I.C. & Nolasco S.M., 2014. Analysis of the Performance of a Dehulling System for Confectionary Sunflower Seeds. *Food Nutr. Sci.* 05(06), 541–548, DOI:10.4236/fns.2014.56064.
- Debaeke P., Bret-Mestries E., Desanlis M. & Seassau C., 2014. Effects of Crop Management on the Incidence and Severity of Fungal Diseases in Sunflowers. 201–226.
- Debaeke P., Estragnat A., Pérès A. & Pasentin S., 1999. Recherche d'indicateurs du couvert pour la prévision précoce du risque phomopsis 7.
- Debaeke P., Mestries E., Desanlis M. & Seassau C., 2014. Effects of crop management on the incidence and severity of fungal diseases in sunflower 25.
- Debaeke P. & Pérès A., 2003. Influence of sunflower (*Helianthus annuus* L.) crop management on Phoma black stem (*Phoma macdonaldii* Boerema). *Crop Prot.* 22(5), 741–752, DOI:10.1016/S0261-2194(03)00037-1.
- Deglaire A., Bos C., Tomé D. & Moughan P.J., 2009. Ileal digestibility of dietary protein in the growing pig and adult human. *Br. J. Nutr.* 102(12), 1752–1759, DOI:10.1017/S0007114509991267.
- Delos M., Moinard J., Debaeke P. & Peres A., 1996. Asphodel : modèle de simulation des épidémies de phomopsis du tournesol (*Diaporthe Helianthi*) 7.
- Delplanque B., 2000. Intérêt nutritionnel des huiles de tournesols : tournesol linoléique et tournesol à haute teneur en oléique. *Ol. Corps Gras Lipides* 7(6), 467–472, DOI:10.1051/ocl.2000.0467.
- Doty H.O., 2015. Future of Sunflower as an Economic Crop in North America and the World. In: Carter, J.F. ed. *Agronomy Monographs*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 457–488.
- DSM, 2018. Besoins nutritionnels des poulets de chair (normen pluimveevoeders), DSM Nutritional Product.
- Dusart L., 2015. Besoin des animaux et recommandations 13–18.

Evereart N., 2019. Cours : Fondements et dynamiques des systèmes d'élevage, Poultry production, GXABT.

FAOSTAT, 2018. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/FBS>, (23/06/2021).

FAOSTAT, 2019. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC/visualize>, (26/04/2021).

Fiorucci A.-S., 2014. Étude des mécanismes chromatinien dans l'adaptation des plantes à la lumière. (Thèse de Doctorat), Université Paris-Sud, p274.

Francois J., 2020a. Corbeau freu - *Corvus frugilegus* - Rook. <https://www.oiseaux.net/oiseaux/corbeau.freux.html>, (07/08/2021).

Francois J., 2020b. Corneille noire - *Corvus corone* - Carrion Crow. <https://www.oiseaux.net/oiseaux/corneille.noire.html>, (07/08/2021).

FWA, 2021. Les dégâts de corvidés, une réalité de plus en plus préoccupante. *FWA Fédération Wallonne Agric.* <https://www.fwa.be/elevage/les-degats-de-corvides-une-realite-de-plus-en-plus-preoccupante>, (26/10/2021).

Garcés R., Martínez-Force E., Salas J.J. & Venegas-Calerón M., 2009. Current advances in sunflower oil and its applications. *Lipid Technol.* 21(4), 79–82, DOI:10.1002/lite.200900016.

Gregoire T., Lamey A. & Hofman V., 2000. Sclerotinia Head Rot of Sunflower. *NDSU Ext. Circ.* 1193.

Gulya T.J., 1989. Sclerotinia Head Rot of Sunflower in North Dakota: 1986 Incidence, Effect on Yield and Oil Components, and Sources of Resistance. *Plant Dis.* 73(6), 504, DOI:10.1094/PD-73-0504.

Ibrahim Hossam.M., 2012. Response of Some Sunflower Hybrids to Different Levels of Plant Density. *APCBEE Procedia* 4, 175–182, DOI:10.1016/j.apcbee.2012.11.030.

INA P-G, 2003. tournesol.pdf. <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/PHYTOTECHNIE/document/phytotechnie/pdf/tournesol.pdf>, (12/06/2021).

INRA (Ed.), 2004. *Tables of composition and nutritional value of feed materials: Pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses and fish*, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers.

INRAE, 2020. Sécheresse : le potentiel du tournesol. *INRAE Institutionnel*. <https://www.inrae.fr/actualites/secheresse-potentiel-du-tournesol>, (26/04/2021).

IRM, 2021. Météo en Belgique - IRM. <https://www.meteo.be/fr/belgique>, (23/09/2021).

Jacquemin G.C.-W. | C. wallon de R., 2021. 2021-sillonbelge-le_tournesol_en_wallonie.pdf. https://www.cra.wallonie.be/uploads/2021/03/2021-sillonbelge-le_tournesol_en_wallonie.pdf, (08/06/2021).

Kartika I.A., 2005. Nouveau procédé de fractionnement des graines de tournesol : expression et extraction en extrudeur bi-vis, purification par ultrafiltration de l'huile de tournesol (Thèse de doctorat). Institut National polytechnique de Toulouse, France, 339p.

Labalette F., Jouffret P. & Merrien A., 2012. *Oleic_Sunflower_production._Current_situation_and_trends..pdf*.

Lahon L., 2020. Nouveau règlement bio: ce qui change pour les volailles. *FWA Fédération Wallonne Agric.* <https://www.fwa.be/elevage/nouveau-reglement-bio-ce-qui-change-pour-les-volailles>, (10/09/2021).

- Lange M., 2021. La fabrication de l'huile de colza Alvenat. <http://www.alvenatproduction.com/production/mise-en-bouteille/>, (09/09/2021).
- Lecomte V. & Nolot J.M., 2011. Place du tournesol dans le système de culture. *Innov. Agron.* 14, 59.
- Leger C.-L., 2000. La vitamine E : état actuel des connaissances, rôle dans la prévention cardiovasculaire, biodisponibilité. *Ol. Corps Gras Lipides* 7(3), 258–265, DOI:10.1051/ocl.2000.0258.
- Lhuillier P., 2009. Impact de l'abondance et de la biodiversité de la faune pollinisatrice sur la pollinisation du tournesol en production de semences hybrides (Mémoires de fin d'études). Ecole Supérieure d'Agriculture (Groupe ESA), Angers, FRA.
- Martin-Monjaret C. & Tourton E., 2020. Les vrai-faux de l'irrigation du tournesol. *Terres Inovia.* <https://www.terresinovia.fr/-/les-vrai-faux-de-l-irrigation-du-tournesol>, (03/05/2021).
- Masirevic S. & Gulya T.J., 1992. Sclerotinia and Phomopsis - two devastating sunflower pathogens. *Field Crops Res.* 30, 271–300.
- Muller M.-H., Arlie G., Bervillé A., David J., Delieux F., Fernandez-Martinez J.M., Jouffret P., Lecomte V., Reboud X., Rousselle Y., Serieys H., Teissere N. & Tsitrone A., 2006. Le compartiment spontané du tournesol en Europe : prospections et premières caractérisations génétiques 6, 235–253.
- Mushtaq T., Sarwar M., Ahmad G., Mirza M.A., Ahmad T., Noreen U., Mushtaq M.M.H. & Kamran Z., 2009. Influence of sunflower meal based diets supplemented with exogenous enzyme and digestible lysine on performance, digestibility and carcass response of broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 149(3), 275–286, DOI:10.1016/j.anifeedsci.2008.06.008.
- Muttagi G., 2017. A Mechanical Method for Small Scale Dehulling of Sunflower Seeds. *Int. J. Pure Appl. Biosci.* 5, 379–388, DOI:10.18782/2320-7051.5826.
- Pedroche J., 2015. 13 - Utilization of Sunflower Proteins. In: Martínez-Force, E., Dunford, N.T., Salas, J.J. eds. *Sunflower*. AOCS Press, 395–439.
- Peyronnet C., Pressenda F., Quinsac A. & Carré P., 2012. Impact du décorticage du tournesol sur la valeur nutritionnelle et l'intérêt économique des tourteaux en fabrication d'aliments composés. *Ol. Corps Gras Lipides* 19(6), 341–346, DOI:10.1051/ocl.2012.0486.
- Pharmacopeia, October-31-2021. USP Monographs: Pancreatin. http://www.pharmacopeia.cn/v29240/usp29nf24s0_m60270.html, (31/10/2021).
- Pilorgé E., 2020. Sunflower in the global vegetable oil system: situation, specificities and perspectives. *OCL* 27, 34, DOI:10.1051/ocl/2020028.
- Ravindran V. & Bryden W.L., 1999. Amino acid availability in poultry—in vitro and in vivo measurements. *Aust. J. Agric. Res.* 50(5), 889–908, DOI:10.1071/ar98174.
- Recoules E., Brevault N., Cadre P. le, Peyronnet C., Bouvarel I. & Lessire M., 2016. L'autonomie protéique : état des lieux et voies d'amélioration pour l'alimentation des volailles. *INRAE Prod. Anim.* 29(2), 129–140, DOI:10.20870/productions-animales.2016.29.1.2522.
- Règlement CE 152, 2009. Journal officiel de l'Union européenne règlement CE 152-2009.
- Robert C. & Ruck L., 2021. Pucerons : Gestion en cours de campagne. *Terres Inovia.* <https://www.terresinovia.fr/-/ravageurs-du-tournesol-les-pucerons>, (11/06/2021).
- Roche J., 2005. Composition de la graine de tournesol (*Helianthus annuus* L.) sous l'effet conjugué des contraintes agri-environnementales et des potentiels variétaux 305.

- Rougière N., 2010. Étude comparée des paramètres digestifs des poulets issus des lignées génétiques D+ et D- sélectionnées pour une efficacité digestive divergente (Thèse de doctorat), Université François-Rabelais des Tours, p249.
- Sahar A., 2019. Evaluation et déterminants des dégâts provoqués aux grandes cultures par les oiseaux déprédateurs (Mémoire de fin d'études). Université Paris Est Créteil – Val de Marne, 55p.
- Salah H., 2012. Fibre plays a supporting role in poultry nutrition. *world poultry*.
- SAMATEC, 2021. SAMATEC Saatguttechnik & Maschinenbau GmbH - Nettoyage de semences de laboratoire type MINI 380-LS3. <https://www.samatec-roeber.de/produkte-samatec/labor-saatreinigung/laborsaatreinigung-typ-mini-380-ls3.html>, (18/08/2021).
- Sausse C. & Lévy M., 2021. Bird damage to sunflower: international situation and prospects. *OCLE* 28, 34, DOI:10.1051/ocle/2021020.
- Senkoylu N. & Dale N., 2006. Nutritional Evaluation of a High-Oil Sunflower Meal in Broiler Starter Diets. *J. Appl. Poult. Res.* 15(1), 40–47, DOI:10.1093/japr/15.1.40.
- Soltner D., 2005. *Les grandes productions végétales: phytotechnie spéciale : céréales, plantes sarclées, prairies*, Sciences et techniques agricoles. Série Agronomie, Sainte-Gemmes-sur-Loire: Sciences et Techniques Agricoles, 472.
- Swennen Q., Everaert N., Debonne M., Verbaeys I., Careghi C., Tona K., Janssens G.P.J., Decuypere E., Bruggeman V. & Buyse J., 2010. Effect of macronutrient ratio of the pre-starter diet on broiler performance and intermediary metabolism. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 94(3), 375–384, DOI:10.1111/j.1439-0396.2009.00918.x.
- Terres Inovia, 2018. Tournesol : comment lutter contre les oiseaux ? *Terre-Net*. <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/tournesol-comment-lutter-contre-les-oiseaux-217-137557.html>, (06/08/2021).
- Terres Inovia, 2019a. Réussir un tournesol sous pression de sclérotinia. *Terres Inovia*. https://www.terresinovia.fr/-/reussir-un-tournesol-sous-pression-de-sclerotinia?p_r_p_categoryId=130443&p_r_p_tag=69906&p_r_p_tags=283219, (20/06/2021).
- Terres Inovia, 2019b. Tournesol : prévenir les dégâts d'oiseaux. *Terres Inovia*. <https://www.terresinovia.fr/-/tournesol-prevenir-les-degats-d-oiseaux>, (06/08/2021).
- Terres Inovia, 2019c. Les clés de la conduite du tournesol en double culture (dérobé). *Terres Inovia*. <https://www.terresinovia.fr/-/les-cles-de-la-conduite-du-tournesol-en-double-culture-derobe>, (18/11/2021).
- Terres Inovia, 2021a. La culture du tournesol. *Terres Inovia*. <https://www.terresinovia.fr/tournesol>, (26/04/2021).
- Terres Inovia, 2021b. Guide_tournesol_Terres-Inovia-2021.pdf.
- Vear F., 2017. Breeding disease-resistant sunflowers. *CAB Rev. Perspect. Agric. Vet. Sci. Nutr. Nat. Resour.* 12(035), DOI:10.1079/PAVSNNR201712035.

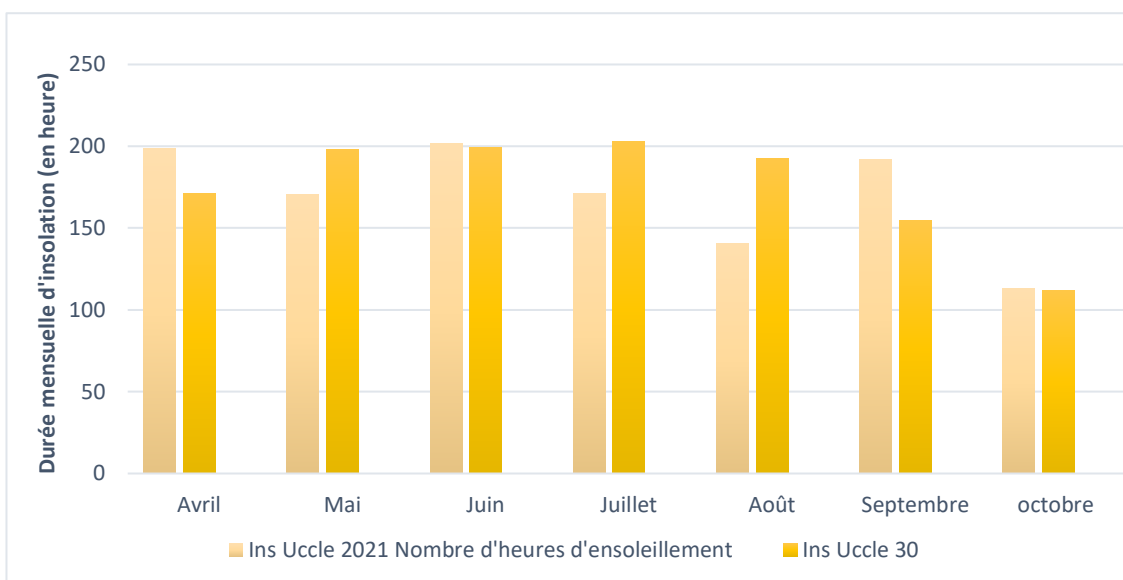
Annexes

Annexe 1 : Les 3 principaux oiseaux ravageurs du tournesol











<p>Oiseau</p>	<p>Le pigeon ramier <i>Columba palumbus</i></p>  <p>Pigeon ramier Source⁸</p>	<p>Le corbeau freu <i>Corvus frugilegus</i></p>  <p>Corbeau freu, Source : (Francois, 2020a)</p>	<p>La corneille noire <i>Corvus corone</i></p>  <p>Corneille noire, Source : (Francois, 2020b)</p>
<p>Mode d'action</p>	<p>Le pigeon consomme la jeune plantule (cotylédons, tiges, feuilles)</p>	<p>Le corbeau freu arrache la jeune plantule afin d'atteindre et consommer la semence.</p>	<p>La corneille noire arrache la jeune plantule afin d'atteindre et consommer la semence.</p>
<p>Illustration des dégâts</p>	 <p>Dégâts de pigeon ramiers, (Source personnelle)</p>	 <p>Dégâts de corvidés (Corbeau freu, corneille noire...) (Source personnelle)</p>	

⁸ <https://cocquy.be/main-verte/faune-sauvage/item/pigeon-ramier.html>

Annexe 2 : Insolation observée durant la saison 2021 par rapport aux normales de saison



Annexe 3 : Galerie photos des graines de tournesol entières, partiellement décortiquées et du tourteau obtenu après trituration

	Graines après 2 passages dans la décortiqueuse	Graines après 3 passages dans la décortiqueuse	Graines après 4 passages dans la décortiqueuse
			
Graines entières après passage dans le trieur	Graines décortiquées 2 fois après passage dans le trieur	Graines décortiquées 3 fois après passage dans le trieur	Graines décortiquées 4 fois après passage dans le trieur
			
Tourteaux de graines entières après passage dans la presse	Tourteaux de graines décortiquées 2 fois, après passage dans la presse	Tourteaux de graines décortiquées 3 fois, après passage dans la presse	Tourteaux de graines décortiquées 4 fois, après passage dans la presse
			

Annexe 4 : Étapes de trituration des graines de tournesol

Graines entières dépoussiérées mais non décortiquées :

- 1) La première série de graines de tournesol est insérée dans la machine → Sacs GE001.1 GE001.2 GE001.3 (98,4 kg).
- 2) À partir de la première goutte d'huile obtenue, une mesure du « TEMPS » de pressage a été évaluée.
- 3) Tous les 25 kg (+/-), un échantillon de 25 cl d'huile a été récolté dans cette même bouteille en plastique afin d'obtenir un échantillon homogène des 98,4 kg de graines pressées.
- 4) Une fois les 98,4 kg de graines de tournesol de la première série pressées, le tourteau de graines entières est récupéré dans un bac en plastique et placé à l'extérieur pour qu'il refroidisse.
- 5) Le chronomètre enclenché pour mesurer le « TEMPS » de pressage est arrêté lorsque plus aucun tourteau ne tombe dans le bac.
- 6) Un vide complet de la première série de graines de tournesol a ensuite été réalisé afin d'enlever les graines éventuelles de la première série.
- 7) Le tourteau récupéré après trituration dans les bacs et suffisamment refroidi a été pesé à la ferme expérimentale.
- 8) Les bacs contenant les tourteaux de graines entières sont appelés TTGE1.1 TTGE1.2 TTGE1.3.

Ces mêmes étapes ont également été réalisées sur les graines décortiquées 2, 3 et 4 passages dans le décortiqueur :

- Graines décortiquées, 2 passages dans la décortiqueuse : → Sacs GD002.1 GD002.2 et GD002.3 (84,8 kg).

Les bacs contenant le tourteau de graines décortiquées, 2 passages sont appelés TTGD2.1 et TTGD2.2

- Graines décortiquées, 3 passages dans la décortiqueuse : → Sacs GD003.1 GD003.2 et GD003.3 (80,6 kg).

Les bacs contenant le tourteau de graines décortiquées, 3 passages sont appelés TTGD3.1 et TTGD3.2

- Graines décortiquées, 4 passages dans la décortiqueuse : → Sacs GD004.1 et GD004.2 (74,2 kg).

Les bacs contenant le tourteau de graines décortiquées, 4 passages sont appelés TTGD4.1 et TTGD4.

Annexe 5 : Protocole du dosage de la digestibilité in vitro des protéines selon la méthode de Bryan et al. 2019

Calcul de la concentration en pancréatine

- La pancréatine RENCO (Bryan et al. 2019) est à 30667 unités de BAEE/ml pour la trypsine.
- La pancréatine utilisée est au minimum à 8 X USP (Sigma P7545), soit égal à 600 unités BAEE/mg (1 USP = 25 unités de protéase et 1 USP = 3 BAEE) (Pharmacopeia, 2021).
- $30667/600 = 51\text{mg/ml}$ (soit 50g/L).

Digestion enzymatique

- Peser une quantité d'aliments de manière à engager 500 mg de protéines : prévoir 4 Falcon par échantillon pour les temps respectifs de 30, 90, 180 et 240 min + 1 tube sans échantillon (blanc échantillon) pour les temps respectifs de 30, 90, 180 et 240 min également. (*Ici 24 Falcon de 50ml.*)
- Peser une quantité équivalente à 50 mg de gomme guar pour chaque tube et la dissoudre dans 8.5 ml d'HCl 10mM. (*Ici 1200mg de guar dans 204 ml.*)
- Vortexer.
- Ajouter 1,5 ml de solution de pepsine. 113.04mg de pepsine (250 unité/mg) pour 1.5ml d'HCl 10mM.
- Vortexer.
- Placer les tubes dans un bain-marie à 41°C pendant 30 min sous agitation (vitesse : 99 rpm (= 85,8 aller-retour/min)).
- Vortexer.
- Ajouter dans chaque tube 9,5 ml de tampon acétate de sodium (pH 6,5).
- Ajuster le pH à 7,5 avec NaOH 1M (7 gouttes = 270µl).
- Ajouter 6,5 ml de solution de pancréatine. 325mg de pancréatine (> 8 USP) pour 6,5ml de tampon acétate de sodium 4N (pH 7,5) (soit 50g/100L).
- Vortexer.
- Placer les tubes dans un bain-marie à 41°C sous agitation pendant 30, 90, 180 ou 240 min suivant les différents tubes prévus pour les différents temps au préalable.
- Centrifuger les échantillons après le temps (30, 90, 180 et 240 min) → à 22°C pendant 3 min à 2568 x g.
- Au temps de 30, 90, 180 et 240 min, prélever un échantillon de 0,5 ml dans chaque tube pour la réaction à la ninhydrine (*cf. infra*).
(*Ici on prélève les 0,5ml dans des nouveaux Falcon de 50ml*)
- *Prise de Ph : Blanc ; 7.00 – Tourteau de tournesol 1 ; 2 ; 3 ; 4 : entre 6,58 et 6.60 – Caséine ; 6.66*

Réaction à la ninhydrine des échantillons subissant la digestion enzymatique

- Ajouter 10 ml HCl 10mM dans chaque échantillon de 0,5 ml (*cf. supra*).
- Vortexer et attendre 3 min.
- Ajouter 10 ml de tampon acétate de sodium (pH 6,5).
- La concentration de la solution est de 0,469 mg de protéines/ml.
- Centrifuger à 2568 x g pendant 10 min à température ambiante.
- Prélever 3 fois 100 µl de chaque Falcon de 50 ml et les ajouter dans des Falcon de 15 ml.
- Ajouter 1900 µl d'H₂O milliQ et 1000 µl de solution de ninhydrine (ou dissoudre les 1000µl de solution de ninhydrine dans 1900 µl d'H₂O milliQ directement).

- Prévoir un blanco ninhydrine : 2000 ml d'H₂O milliQ et 1000 ml de solution de ninhydrine (ou dissoudre les 1000µl de solution de ninhydrine dans 2000 ml d'H₂O milliQ directement).
- Placer au bain-marie les Falcon à 100°C pendant 15 min.
- Refroidir les échantillons dans de la glace pillée pendant 10 min. Lecture directement après la DO à 568 nm.
- Calculer la DO nette de chaque échantillon = DO brute de chaque échantillon – DO blanco.
 - La valeur pour l'échantillon subissant la digestion enzymatique est utilisée au numérateur de la formule proposée pour déterminer la digestibilité des protéines.
 - Mesurer aussi la DO du blanco ninhydrine.

Hydrolyse à l'HCl

- Peser une quantité d'aliments de manière à engager 500 mg de protéines.
- Ajouter dans chaque flacon 4 ml d'HCl 6 N par 100 mg de prise d'essai (soit 20 ml d'HCl 6N).
- Fermer le Flacon de manière hermétique.
- Incuber pendant 24 h à 110°C.
- Laisser refroidir.
- Filtrer les solutions à l'aide de filtres Watman.
- Prélever 4,69 ml de la solution dans un berlin.
 - 4,69 ml d'une solution à 25 mg protéines/ml dans 250 ml d'eau donne une concentration finale de 0,469 mg protéines/ml (*cf.* échantillon subissant la digestion enzymatique).
- Ajouter 100 ml d'H₂O.
- Neutraliser la solution pour la porter à pH 7± 0,5 avec du NaOH .
 - Théoriquement
 - Si NaOH 1 N : 4,69 ml x 6 N = X ml x 1 N donc X = 28,14 ml
 - Si NaOH 4,9 N : 4,69 ml x 6 N = X ml x 4,9 N donc X = 5,74 ml
- Transvaser quantitativement dans un ballon de 250 ml en rinçant avec H₂O la sonde et le berlin.
- Porter à 250 ml avec H₂O et agiter.
- Prélever 3 fois 0,1 ml de la solution neutralisée pour la réaction à la ninhydrine (*cf. infra*).

Réaction à la ninhydrine des échantillons subissant l'hydrolyse acide

- Ajouter 1900 ml d'H₂O milliQ et 1000 ml de solution de ninhydrine (ou dissoudre les 1000µl de solution de ninhydrine dans 1900 ml d'H₂O milliQ directement).
 - Prévoir un blanco ninhydrine : 2000 ml d'H₂O milliQ et 1000 ml de solution de ninhydrine (ou dissoudre les 1000µl de solution de ninhydrine dans 2000 ml d'H₂O milliQ directement).
- Placer au bain-marie à 100°C pendant 15 min.
- Refroidir les échantillons et lire la DO à 568 nm.
- Calculer la DO nette de chaque échantillon = DO brute de chaque échantillon – DO blanco.
 - La valeur pour l'échantillon subissant l'hydrolyse acide est utilisée au dénominateur de la formule proposée pour déterminer la digestibilité des protéines.
 - Mesurer aussi la DO du blanco ninhydrine.

Annexe 6 : Teneurs de différents tourteaux de tournesol utilisés pour réaliser la régression multiple (INRA, 2004)

N	Tourteaux de tournesol	EM (kcal EM/kg)	MPT (%)	MG (%)	CB (%)
1	Tournesol graine décortiquée	4680,00	27,50	44,50	3,60
2	Tournesol graine	3748,00	14,00	29,00	28,50
3	TOURNESOL P.DH	3988,16	11,40	38,50	11,60
4	TT.TOURNESOL 27 EU	1014,73	27,10	1,50	26,00
5	TT.TOURNESOL 26, Arg	1034,63	27,30	1,80	27,20
6	TT.TOURNESOL 31	1148,65	30,60	2,00	23,00
7	TT.TOURNESOL 35	1272,44	35,40	1,50	18,50
8	TT.TOURNESOL 37	1288,44	36,60	1,10	17,50
9	TT.TOURNES.ARG. 28%	987,91	26,30	1,50	28,00
10	TOURTEAU DE TOURNESOL 28% VD	1035,07	27,80	1,50	26,40
11	TOURNESOL SCHILFER 28/9	1770,21	28,50	9,90	24,70
12	TOURNESOL SCHILFER 33/10	1740,98	30,00	8,80	18,70
13	HUILE TOURNESOL	8587,59	0,00	99,50	0,00

Annexe 7 : Rapport détaillé de la régression multiple réalisée à partir des 13 tourteaux de tournesol

<i>Statistiques de la régression</i>	
Coefficient de détermination multiple	0,997
Coefficient de détermination R ²	0,994
Coefficient de détermination R ²	0,992
Erreur-type	202,464
Observations	13

Analyse de la variance

	DL	Sum Sq	Mean Sq	F-value	Pr(>F)
Régression	3	59906563,3	19968854,4	487,14574	2,83316E-10
Résidus	9	368923,866	40991,5406		
Total	12	60275487,2			

	Coefficients	Erreur-type	Statistique t	Probabilité	Lim inf = 95%	Lim sup = 95%
Constante	215,402	944,910	0,228	0,825	-1922,134	2352,938
MAT	16,961	18,393	0,922	0,381	-24,646	58,568
MG	86,211	9,963	8,653	0,000	63,674	108,749
CB	12,776	17,721	0,721	0,489	-27,311	52,863

Analyse des résidus

Observation	Prévisions EM	Résidus
1	4564,214	115,786
2	3317,093	430,907
3	3876,089	112,071
4	1136,526	-121,800
5	1181,112	-146,478
6	1200,665	-52,016
7	1181,478	90,966
8	1154,571	133,866
9	1148,509	-160,595
10	1153,508	-118,434
11	1867,837	-97,627
12	1721,789	19,188
13	8793,426	-205,836

Annexe 8 : Estimation de l'EM des différents tourteaux de tournesol à partir de la régression

Tourteaux de tournesol	EM (kcal EM/kg)	MPT (%)	MG (%)	CB (%)
TTND	2969	23,11	24,58	18,99
TTGD2	3363	26,03	29,30	14,09
TTGD3	3781	25,72	34,78	10,22
TTGD4	4118	25,53	39,05	8,10

Annexe 10 : Résultats des statistiques descriptives

ANOVA à 1 facteur fixe (densité) et 1 facteur aléatoire (bloc) de la hauteur du tournesol

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	4206	1051.4	5.533	0.00121 **
Bloc	3	690	229.9	1.210	0.31851
Densite:Bloc	12	4179	348.2	1.833	0.07549
Residuals	40	7601	190.0		

ANOVA à 1 facteur fixe (densité) et 1 facteur aléatoire (bloc) du diamètre de la tige du tournesol

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	0.943	0.2358	2.144	0.0931
Bloc	3	0.479	0.1596	1.451	0.2423
Densite:Bloc	12	1.810	0.1509	1.372	0.2194
Residuals	40	4.398	0.1100		

ANOVA à 1 facteur fixe (densité) et 1 facteur aléatoire (bloc) du diamètre du capitule du tournesol

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	212.57	53.14	25.907	8.68e-14 ***
Bloc	3	16.41	5.47	2.667	0.0533
Densite:Bloc	12	12.62	1.05	0.512	0.9009
Residuals	80	164.10	2.05		

ANOVA à 1 facteur fixe (densité) de la verse le 20/08/2021

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	51.15	12.79	1.285	0.339
Residuals	10	99.50	9,95		

ANOVA à 1 facteur fixe (densité) de la verse le 03/09/2021

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	130,900	32,720	0,475	0,753
Residuals	10	688,200	68,820		

ANOVA à 1 facteur fixe (densité) de la maladie le 20/08/2021

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	18,270	4,569	2,313	0,129
Residuals	10	19,750	1,975		

ANOVA à 1 facteur fixe (densité) de la maladie le 03/09/2021

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	17,250	4,313	0,761	0,574
Residuals	10	56,650	5,665		

Anova à 1 facteur fixe (densité) du rendement REEL du tournesol

	Df	Sum	Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	293405	73351	0,0138	0,964	
Residuals	10	5322661	532266			

Anova à 1 facteur fixe (densité) du rendement THEORIQUE SANS PROBLEME du tournesol

	Df	Sum	Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	12306948	3076737	4.421	0.0258 *	Significatif
Residuals	10	6959222	695922			

Anova à 1 facteur fixe (densité) du rendement THEORIQUE VERSE + SCLEROTINIA sur tige du tournesol

	Df	Sum	Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Densite	4	4519487	1129872	3.115	0.066 .	Très proche de la significativité
Residuals	10	3626942	362694			

Annexe 11 : Moyenne des paramètres mesurés par densité et par bloc

Moyenne des hauteurs (cm)	Densité					
	Bloc	6	8	9	10	12
1		201,00	230,00	228,33	248,33	236,67
2		222,33	207,00	224,67	228,33	233,67
3		206,67	213,67	223,33	223,67	229,33
4		219,00	232,00	201,00	229,00	238,33
Total général		212,25	220,67	219,33	232,33	234,50

Moyenne des diamètres de tiges (cm)	Densité					
	Bloc	6	8	9	10	12
1		3,07	2,73	3,27	2,83	2,90
2		2,80	2,67	2,47	2,70	2,97
3		2,97	2,72	2,93	2,73	2,67
4		2,80	2,30	3,20	3,03	2,53
Total général		2,91	2,60	2,97	2,83	2,77

Moyenne des diamètres de capitules	Densité					
	Bloc	6	8	9	10	12
1		17,40	14,40	13,80	13,80	12,70
2		17,10	16,70	14,50	14,10	13,20
3		18,10	16,00	14,90	14,50	13,70
4		17,50	15,90	15,50	14,60	13,40
Total général		17,53	15,75	14,68	14,25	13,25

Moyenne de % plantes versées 1		Densité				
Bloc		6	8	9	10	12
1		2,78	2,08	1,85	5,00	2,31
2		1,85	1,39	3,09	1,11	6,94
3		3,70	3,47	4,32	10,56	12,04
Total général		2,78	2,31	3,09	5,56	7,10

Moyenne de % plantes sclérotées sur tiges 1		Densité				
Bloc		6	8	9	10	12
1		1,85	5,56	3,70	2,78	4,17
2		0,93	3,47	3,70	1,11	5,56
3		0,93	1,39	0,62	1,67	3,24
Total général		1,23	3,47	2,67	1,85	4,32

Moyenne de % plantes versées 2		Densité				
Bloc		6	8	9	10	12
1		2,78	2,78	3,09	5,56	4,17
2		1,85	1,39	11,11	6,67	18,52
3		12,96	19,44	16,05	21,67	20,83
Total général		5,86	7,87	10,08	11,30	14,51

Moyenne de % plantes sclérotées sur tiges 2		Densité				
Bloc		6	8	9	10	12
1		6,48	7,64	5,56	6,67	6,944
2		2,78	4,17	4,94	4,44	11,111
3		4,63	3,47	1,85	3,89	3,704
Total général		4,63	5,09	4,12	5,00	7,253

Moyenne de Rendement ramené à 9% d'humidité (kg/ha)		Densité				
Bloc		6	8	9	10	12
1		2441,09	2707,23	1514,21	1725,28	1690,87
2		3021,54	1860,65	2383,74	2649,87	2395,21
3		929,18	1124,19	1706,93	1344,44	2544,34
Total général		2130,60	1897,35	1868,29	1906,53	2210,14

Moyenne de Rdt théorique sans problème (kg/ha)		Densité				
Bloc		6	8	9	10	12
1		3138,55	3677,74	3716,70	4436,45	4246,84
2		3625,85	4059,59	4709,34	4111,87	7390,93
3		2508,77	2890,77	4320,67	4653,82	5607,92
Total général		3091,06	3542,70	4248,90	4400,71	5748,56

Moyenne de Rdt théorique Verse +scl.tige (kg/ha)		Densité				
Bloc		6	8	9	10	12
	1	2847,94	3294,65	3395,51	3894,21	3774,97
	2	3457,99	3834,06	3953,52	3655,00	5201,02
	3	2067,42	2228,30	3547,21	3464,51	4231,91
	Total général	2791,115	3119,002	3632,079	3671,240	4402,632

Annexe 12 : Exemples de variations élevées entre mêmes échantillons

NOM échantillon	N° essai	Temps (min)	Absorbance (nm)	Pourcentage de différence (%)
TT 2	essai 1	30	0,254	7%
TT 2	essai 2	30	0,268	
TT 2	essai 3	30	0,271	
TT 2	essai 1	90	0,326	33%
TT 2	essai 2	90	0,269	
TT 2	essai 3	90	0,359	
TT 2	essai 1	180	0,448	50%
TT 2	essai 2	180	0,299	
TT 2	essai 3	180	0,375	
TT 2	essai 1	240	0,428	16%
TT 2	essai 2	240	0,370	
TT 2	essai 3	240	0,407	

NOM échantillon	N° essai	Temps (min)	Absorbance (nm)	Pourcentage de différence (%)
TT 3	essai 1	30	0,285	10%
TT 3	essai 2	30	0,259	
TT 3	essai 3	30	0,264	
TT 3	essai 1	90	0,312	21%
TT 3	essai 2	90	0,305	
TT 3	essai 3	90	0,370	
TT 3	essai 1	180	0,429	26%
TT 3	essai 2	180	0,341	
TT 3	essai 3	180	0,376	
TT 3	essai 1	240	0,440	46%
TT 3	essai 2	240	0,302	
TT 3	essai 3	240	0,394	

NOM échantillon	N° essai	Temps (min)	Absorbance (nm)	Pourcentage de différence (%)
TT 4	essai 1	30	0,278	62%
TT 4	essai 2	30	0,246	
TT 4	essai 3	30	0,172	
TT 4	essai 1	90	0,315	18%
TT 4	essai 2	90	0,312	
TT 4	essai 3	90	0,367	
TT 4	essai 1	180	0,415	22%
TT 4	essai 2	180	0,341	
TT 4	essai 3	180	0,358	
TT 4	essai 1	240	0,336	31%
TT 4	essai 2	240	0,408	
TT 4	essai 3	240	0,440	

Annexe 13 : Paramètres de croissance des volailles, comprenant toutes les loges

	Poids initial (kg/poulet)	Poids final (kg/poulet)	Différence de poids (kg/poulet)	GQM (g/jour)	MS ingérée (g/jour*poulet)	IC (gMS ingéré/gGQM)
Régime 1	0,912 ± 0,07	2,41 ± 0,09	1,50 ± 0,08	82,4 ± 10,2	122 ± 7	1,49 ± 0,11
Régime 2	0,875 ± 0,19	2,49 ± 0,28	1,62 ± 0,20	88,8 ± 12,4	131 ± 19	1,48 ± 0,08
Régime 3	0,894 ± 0,12	2,37 ± 0,20	1,48 ± 0,14	83,7 ± 16,8	131 ± 11	1,6 ± 0,20
Régime 4	0,878 ± 0,11	2,49 ± 0,15	1,62 ± 0,19	88,8 ± 5,9	127 ± 4	1,43 ± 0,06
Régime Témoin	0,863 ± 0,12	2,29 ± 0,14	1,43 ± 0,13	78,5 ± 7,7	121 ± 7	1,55 ± 0,10
Effets principaux						
Régime	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Bloc	**	*	*	NS	NS	NS
Régime * Bloc	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Le GQM, les aliments consommés ainsi que l'IC sont calculés à partir des mesures effectuées pendant les 3 semaines d'essai (moyenne)