



**HAL**  
open science

# Détermination des facteurs limitants du rendement grainier de la luzerne porte-graine par analyse d'un réseau d'essais

Dorian Lusson

► **To cite this version:**

Dorian Lusson. Détermination des facteurs limitants du rendement grainier de la luzerne porte-graine par analyse d'un réseau d'essais. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-01887956

**HAL Id: dumas-01887956**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01887956>**

Submitted on 4 Oct 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



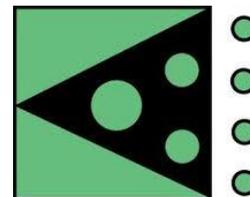
Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

AGROCAMPUS  
OUEST

- CFR Angers  
 CFR Rennes



UNIVERSITÉ DE NANTES



**FNAMS**

Année universitaire : 2017-2018

Mention : Biologie végétale

Parcours : Semences et Plants

**Mémoire de Fin d'études**

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage  
 de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage  
 d'un autre établissement ( tudiant arrivé en M2)

## Détermination des facteurs limitants du rendement grainier de la luzerne porte-graine par analyse d'un réseau d'essais

Par : Dorian LUSSON



**Soutenu   Angers le 18/09/2018**

**Devant le jury composé de :**

Président : Teulat Béatrice

Maître de stage : Ravenel Coraline

Enseignant r f rent : Leprince Olivier

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Macherel Marie-Hélène

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST



Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»





## **ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT**

Je, soussigné (e), **LUSSON Dorian**

déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

Signature :



## Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

### Confidentialité

Non  Oui si oui :  1 an  5 ans  10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible <sup>(1)</sup>.

Date et signature du **maître de stage** <sup>(2)</sup> :  
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

**A la fin de la période de confidentialité**, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

### Droits d'auteur

L'auteur<sup>(3)</sup> **Lusson Dorian**

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui  Non

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif)  accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'**auteur** :

### Autorisation de diffusion par le responsable du master ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui  Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'**enseignant** :



## Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps, Coraline Ravenel mon maître de stage pour sa disponibilité, ses conseils et son écoute qui m'ont permis d'avancer et de répondre à l'objet de l'étude.

Je remercie également toute l'équipe technique de la FNAMS qui m'a permis d'enrichir mes connaissances sur le domaine de l'expérimentation, ainsi que l'ensemble des saisonniers et stagiaires pour leurs aides lors des suivis d'essais.

Merci également à l'équipe pédagogique pour les connaissances apportées et à Olivier Leprince d'avoir pris le temps de lire et corriger mon rapport.



## Liste des Figures

<a href="#"><u>Figure 1</u></a> : Localisation des différentes stations de la FNAMS (Site FNAMS).....	1
<a href="#"><u>Figure 2</u></a> : Superficie de la production de semences de luzerne au niveau français (GNIS, 2017).	1
<a href="#"><u>Figure 3</u></a> : Evolution des surfaces cultivées et des rendements de la luzerne porte-graine (GNIS, 2017).....	1
<a href="#"><u>Figure 4</u></a> : Cycle de la luzerne (CIRA, 2014).....	3
<a href="#"><u>Figure 5</u></a> : Développement aérien d'une plante de luzerne (Mariensen, 1988).....	3
<a href="#"><u>Figure 6</u></a> : Développement d'une inflorescence de luzerne (Dorian Lusson).....	3
<a href="#"><u>Figure 7</u></a> : Photographie d'une fleur de luzerne déclenchée et non déclenchée (Dorian Lusson)...	4
<a href="#"><u>Figure 8</u></a> : Composantes du rendement.....	4
<a href="#"><u>Figure 9</u></a> : Photo de luzerne parasitée par de la cuscute.....	5
<a href="#"><u>Figure 10</u></a> : Schéma représentant les facteurs influençant l'élaboration des composantes de rendements.....	9
<a href="#"><u>Figure 11</u></a> : Plan des dispositifs expérimentaux.....	10
<a href="#"><u>Figure 12</u></a> : Boxplot représentant la variabilité du rendement grainier moyen (kg/ha) entre les stations (Brain, Condom, Etoile).....	13
<a href="#"><u>Figure 13</u></a> : Boxplot représentant la variabilité interannuelle du rendement grainier (kg/ha) pour les 3 stations (Brain, Condom, Etoile) de 2013 à 2017.....	13
<a href="#"><u>Figure 14</u></a> : Boxplot représentant la variabilité du rendement en fonction de l'âge de la culture (A1, A2, A3) et de la date de précoupe (PC1, PC2).....	14
<a href="#"><u>Figure 15</u></a> : Variation des dates de précoupe entre les stations et les années.....	15
<a href="#"><u>Figure 16</u></a> : Schéma récapitulatif des coefficients de corrélations de Pearson (r) entre le rendement et les composantes.....	16
<a href="#"><u>Figure 17</u></a> : Schéma récapitulatif des principaux facteurs influençant les composantes de rendement.....	17
<a href="#"><u>Figure 18</u></a> : Exemple de l'effet de l'application d'un insecticide sur les ravageurs de graines à la station de Brain.....	18



## Liste des Tableaux

<a href="#"><u>Tableau 1</u></a> : Récapitulatif de l'ensemble des essais depuis 2012 sur les différentes stations.....	10
<a href="#"><u>Tableau 2</u></a> : Récapitulatif des périodes et stade de notations des composantes du rendement.....	11
<a href="#"><u>Tableau 3</u></a> : Variabilité des composantes du rendement (2013-2017). Anova fixe au seuil de 5%. Test de Tukey au seuil de 5%.....	15
<a href="#"><u>Tableau 4</u></a> : Coefficient de corrélation de Person (r) entre le rendement et ses composantes (2013-2017) (Variété : Galaxie). Anova au risque de 5%.....	16
<a href="#"><u>Tableau 5</u></a> : Caractéristiques des conditions climatiques des régions des 3 stations sur la période (Précoupe-DF) et (DF-Maturité). Test de Tukey au risque de 5%.....	17
<a href="#"><u>Tableau 6</u></a> : Corrélations entre les indicateurs environnementaux et le nombre de graines par inflorescence. Anova au risque 5%.....	18
<a href="#"><u>Tableau 7</u></a> : Corrélations entre les indicateurs environnementaux et le nombre de gousses par inflorescence. Anova au risque de 5%.....	18
<a href="#"><u>Tableau 8</u></a> : Corrélations entre les indicateurs environnementaux et le PMG. Anova au risque 5%.....	19
<a href="#"><u>Tableau 9</u></a> : Corrélations entre les indicateurs environnementaux et le nombre de tiges fructifères par m <sup>2</sup> . Anova au risque 5%.....	19



## Liste des Annexes

[Annexe I](#) : Sorties R : ANOVA multi factorielle entre les facteurs pouvant expliquer l'instabilité du rendement.

[Annexe II](#) : Sorties R : ANOVA entre le rendement, l'âge de culture et la précoupe.

[Annexe III](#) : Tableau représentant les caractéristiques pédologiques, le mode d'implantation de la luzerne et les applications phytosanitaires.

[Annexe IV](#) : Sorties R : ANOVA sur les températures, les précipitations et le rayonnement sur la période Précoupe-Début Floraison et Début Floraison-Maturité.

[Annexe V](#) : Sorties R : Régressions de Stepwise entre les indicateurs environnementaux pouvant expliquer la variabilité du nombre de graines par inflorescence et de gousses par inflorescence.

[Annexe VI](#) : Sorties R : Régressions de Stepwise entre les indicateurs environnementaux pouvant expliquer la variabilité du PMG et du nombre de tiges fructifères.



# SOMMAIRE

1. INTRODUCTION .....	1
1.1. Présentation de la structure d'accueil .....	1
1.2. Contexte et objectifs de l'étude .....	1
1.3. Synthèse bibliographique de l'étude.....	2
1.3.1. Botanique .....	2
1.3.2. Morphologie et Physiologie .....	2
1.3.3. Facteurs limitants l'élaboration des composantes du rendement. ....	4
1.3.3.1. Conditions climatiques .....	4
1.3.3.2. Activité des pollinisateurs .....	5
1.3.3.3. Adventices .....	5
1.3.3.4. Ravageurs et Maladies .....	6
1.3.3.5. Pratiques culturales.....	7
Précoupe .....	7
Exigences pédologiques .....	7
Ecartement x Densité .....	8
Fertilisation.....	8
1.3.4. Résumé .....	9
1.4. Objectifs .....	9
2. MATERIELS ET METHODES .....	9
2.1. Description du réseau et dispositif expérimental .....	9
2.2. Observation et Variables collectées en cours du cycle de culture.....	10
2.2.1. Observation des stades phénologiques .....	10
2.2.2. Notations des adventices .....	10
2.2.3. Notations des ravageurs.....	10
2.2.4. Abondance des pollinisateurs .....	10
2.2.5. Composantes du rendement.....	10
2.2.6. Analyse des lots récoltés .....	11
2.2.7. Relevés de variables climatiques.....	11
2.2.8. Pratiques culturales.....	11
2.3. Base de données et Analyses statistiques.....	11
3. RESULTATS.....	12
3.1. Instabilité régionale et interannuelle du rendement.....	12
3.1.1. Variation du rendement par station.....	13
3.1.2. Variation annuelle du rendement .....	13
3.1.3. Variation du rendement en fonction de l'âge de la culture et de la précoupe.....	13
3.2. Variation des dates de précoupe .....	13
3.3. Variabilité des composantes du rendement .....	14



3.4.	Observation des corrélations entre le rendement grainier et ses composantes.....	14
3.5.	Détermination des facteurs pédoclimatiques et cultureux pouvant influencer les composantes de rendement.....	15
3.5.1.	Caractéristiques pédologiques et culturelles de chaque station .....	15
3.5.1.1.	Type de sol.....	15
3.5.1.2.	Implantation de la luzerne .....	16
3.5.1.3.	Apports d'éléments minéraux et de produits phytosanitaires .....	16
3.6.	Caractéristiques climatiques .....	17
3.7.	Influence des conditions environnementales et des pratiques culturelles sur les composantes du rendement.....	18
3.7.1.	Variation du nombre de graines par inflorescence .....	18
3.7.2.	Variation du nombre de gousses par inflorescence.....	18
3.7.3.	Variation du PMG .....	19
3.7.4.	Variation du nombre de tiges fructifères par m <sup>2</sup> .....	19
3.8.	Résumé des facteurs limitants environnementaux sur les composantes du rendement.....	19
3.9.	Principaux facteurs définissant les facteurs limitant des composantes du rendement .....	20
3.9.1.	Déficit hydrique pendant la floraison.....	20
3.9.2.	Quotient photothermique 30 jours avant la floraison.....	20
3.9.3.	Nombre de tychius .....	20
3.9.4.	Abeilles sauvages.....	20
3.9.5.	Températures moyennes supérieures à 20°C pendant la floraison.....	21
3.10.	Résumé .....	21
4.	DISCUSSION.....	21
4.1.	Oscillations du rendement grainier et des composantes intra et inter-régionaux.....	21
4.2.	Corrélation entre le rendement et les composantes .....	22
4.3.	Indicateurs environnementaux pouvant expliquer la variabilité des composantes du rendement.....	23
4.3.1.	Déficit hydrique pendant la floraison.....	23
4.3.2.	Quotient photothermique 30 jours avant floraison.....	23
4.3.3.	Températures supérieures à 20°C et cumul de rayonnement pendant la floraison.....	24
4.3.4.	Abondance des abeilles sauvages .....	24
4.3.5.	Nombre de tychius .....	24
4.4.	Pratiques culturelles.....	25
4.4.1.	Date de précoupe .....	25
4.4.2.	Graines par m <sup>2</sup> .....	26
5.	CONCLUSION .....	26
6.	PERSPECTIVES.....	27
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	28



# 1. INTRODUCTION

## 1.1. Présentation de la structure d'accueil

La Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateur de Semences (FNAMS) est une organisation professionnelle chargée de représenter les intérêts des agriculteurs multiplicateurs et d'élaborer des références techniques en production de semences.

Créée en 1956 par l'association générale des producteurs de blé (FNAMS, 2017), la FNAMS est aujourd'hui au service de 19000 agriculteurs multiplicateurs de semences (AMS). Elle est organisée en quatre sections par groupe d'espèces : la Betterave sucrière, les Fourragères, les Céréales et Protéagineux et les Potagères.

L'équipe technique de la FNAMS, réparti sur sept stations régionales (Figure 1), a pour missions d'élaborer des références techniques et économiques pour les cultures porte-graine. Pour cela, elle met en place différentes expérimentations sur l'ensemble de son réseau afin d'améliorer et d'adapter les itinéraires techniques culturaux permettant d'améliorer la qualité sanitaire et germinative ainsi que le rendement des productions de semences.

La FNAMS conduit des projets en partenariat avec différents instituts tels que l'Institut Technique de la Betterave (ITB), ou ARVALIS-Institut du Végétal mais également avec des organismes de recherche comme l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) pour répondre à différentes problématiques communes (FNAMS, 2017).

## 1.2. Contexte et objectifs de l'étude

La luzerne porte-graine est la principale espèce fourragère multipliée en France avec une superficie de production de 24 608 hectares (Figures 2 et 3) (GNIS, 2017). Les zones de production sont réparties principalement dans le Centre-Ouest, le Sud-Ouest et le Sud-Est de la France. Les rendements moyens oscillent entre 3 et 4.5 quintaux/ha.

La luzerne dispose de nombreuses qualités agronomiques. En effet, elle permet de restituer environ 60 U/ha d'azote pour les cultures suivantes. Comme l'ensemble des légumineuses, la luzerne dispose de la capacité à réaliser une symbiose au niveau de sa partie racinaire avec des bactéries du genre *Rhizobium* (ex : *Rhizobium mililoti*) qui lui permettent de fixer l'azote atmosphérique  $N_2$  revalorisé par la plante (ARVALIS, 2015). Elle permet également d'améliorer la structure du sol avec sa racine pivotante, mais aussi d'allonger la rotation des cultures (FNAMS, 2000). La luzerne est principalement utilisée pour l'alimentation du bétail pour sa richesse protéique.



Cependant, la production française de semences de luzerne est irrégulière dans l'espace et dans le temps à cause de la sensibilité de la culture aux variations environnementales et culturelles.

Depuis plusieurs années, les agriculteurs multiplicateurs doivent faire face à une stagnation voire à une baisse des rendements grainiers de la luzerne. Dans certaines situations où de faibles rendements sont obtenus, la culture n'est plus rentable économiquement.

La recherche d'une plus grande régularité de rendement grainier de la luzerne porte-graine est un enjeu majeur pour le maintien et le développement de cette production en France.

C'est pourquoi en 2012, la FNAMS décide de mettre en place un réseau d'essais multi local situé dans 3 stations et régions différentes (Brain (49), Condom (32) et Etoile (26)) et pluriannuel (2012-2018) dans le but d'identifier et de hiérarchiser les facteurs (ex : Facteurs pédoclimatiques, culturels, etc...) pouvant influencer les composantes et le rendement grainier de la luzerne porte-graine. Des études sur un seul facteur (densité, pollinisateurs, ...) avaient déjà été réalisées auparavant. Dans notre cas, l'étude est multifactorielle avec la présence du facteur précoupe avec deux dates testées (Date optimale et tardive) et le facteur variété (3 variétés).

### 1.3. Synthèse bibliographique de l'étude

#### 1.3.1. Botanique

La luzerne cultivée dont le nom latin est *Medicago sativa* L. est une dicotylédone tétraploïde à 32 chromosomes. La luzerne appartient à la famille des légumineuses et au genre *Medicago*.

La luzerne cultivée est issue du croisement entre deux espèces sauvages de luzerne *Medicago sativa* provenant de l'Iran et *Medicago falcata* de Sibérie. La sélection a permis de conserver des caractères intéressants des deux parents et de créer des variétés avec une tolérance au froid très élevée pouvant atteindre les - 20°C et disposant de qualités agronomiques et environnementales intéressantes (ARVALIS, 2015).

#### 1.3.2. Morphologie et Physiologie

La survie de la luzerne dépend de sa capacité à s'acclimater au froid hivernal et à la diminution de la photopériode. Pour cela, toutes les variétés de luzerne sont classées avec un indice de dormance (ID). L'indice de dormance est noté de 1 à 11 et ces 11 classes sont réparties en 3 groupes : dormance élevée (1 à 4), dormance moyenne (5-7) et dormance faible (8 à 11). Le choix des semences de luzerne est donc à adapter en fonction de la région pour que la luzerne survive à l'hiver pour pérenniser la culture (Bertrand et al., 2017). Un ID moyen est conseillé pour les régions du Centre-Ouest de la France et faible pour les régions du Sud.

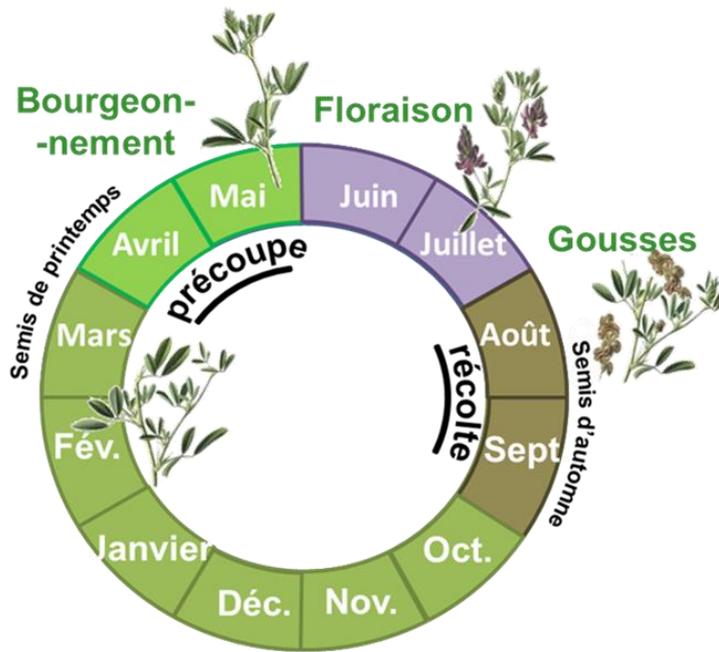


Figure 4 : Cycle de la luzerne (CIRA, 2014).

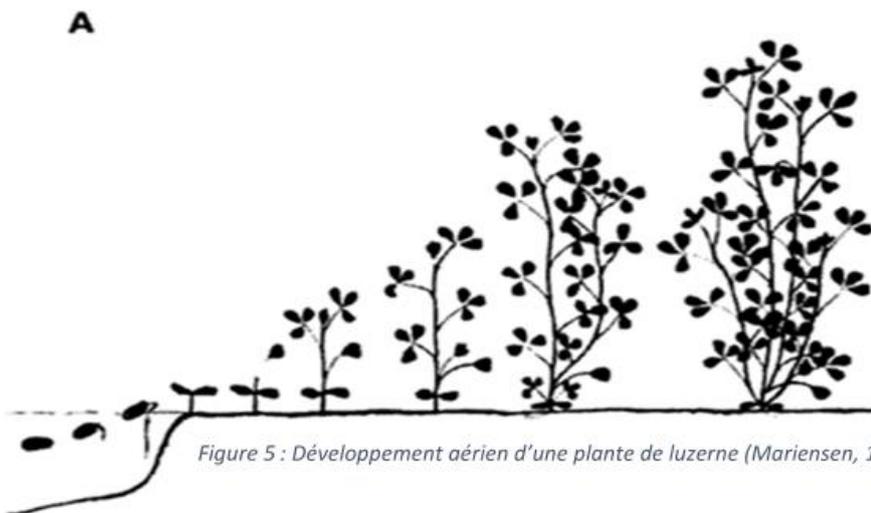


Figure 5 : Développement aérien d'une plante de luzerne (Mariensen, 1988).



Figure 6 : Développement d'une inflorescence de luzerne : A : Bourgeons < 0.5 cm, B : Bourgeons > 0.5 cm, C : Liseré violet, D : Inflorescences, E : Gousses vertes, F : Gousses Brunes, G : Semences (Dorian Lusson).

Après le semis et lorsque les conditions sont favorables (20-25°C), la semence commence son processus de germination (Figure 4 et 5). La germination est hypogée et la première feuille formée est unifoliée. Les feuilles qui seront formées par la suite seront alternes et trifoliées. La luzerne a un port érigé et un système racinaire pivotant très développé pouvant atteindre les 2 mètres (Gosse et *al.*, 1990).

La première feuille formée dispose d'un bourgeon axillaire qui va permettre la formation d'une tige secondaire. Les autres tiges formées par la suite proviendront du plateau de tallage. La tige est constituée d'un ensemble de phytomères qui se succèdent les uns après les autres. Le développement végétatif de la luzerne (n+1) intervient rapidement en sortie d'hiver et une précoupe est habituellement effectuée entre la fin du mois d'avril et fin mai (FNAMS, 2000).

Lorsque la précoupe est réalisée, la luzerne reprend son développement végétatif à l'aide des ressources azotées stockées dans la racine.

Des bourgeons sont initiés et se développent (fin mai, début juin). Le bourgeonnement va permettre la mise en place d'inflorescences (Figure 6). Environ 10 inflorescences sont réparties sur la tige principale au niveau des nœuds florifères et sont composées de 15 à 30 fleurs (Huyghe et Hacquet, 2000). L'initiation florale dépend de la longueur du jour. Chez la luzerne l'initiation commence lorsque la longueur du jour est d'environ 12 heures.

La luzerne est une plante allogame à fleurs papilionacées, hermaphrodites et à pollinisation entomophile (Figure 7). La fleur est composée de 5 pétales soudés (1 étendard, 2 ailes, 2 carènes) 10 étamines et 1 pistil.

Les fleurs papilionacées nécessitent d'être déclenchées pour être pollinisées. Le déclenchement de la fleur par les insectes désigne l'action de rendre accessible le pistil et les anthères renfermés au sein de la carène. Cette structure de fleur permet de favoriser la pollinisation croisée et de restreindre l'autopollinisation (Gosse et *al.*, 1990). Un auto-déclenchement est présent au niveau des fleurs en présence de températures élevées, de vent et de précipitations (Free, 1993).

Les fleurs sont pollinisées, fécondées et des gousses vertes spiralées se forment (fin juin, début juillet), contenant à l'intérieur les futures graines. Le stade limite d'avortement des graines est d'environ 450 degrés-jours après la pollinisation (~20 jours) (FNAMS, 2000).

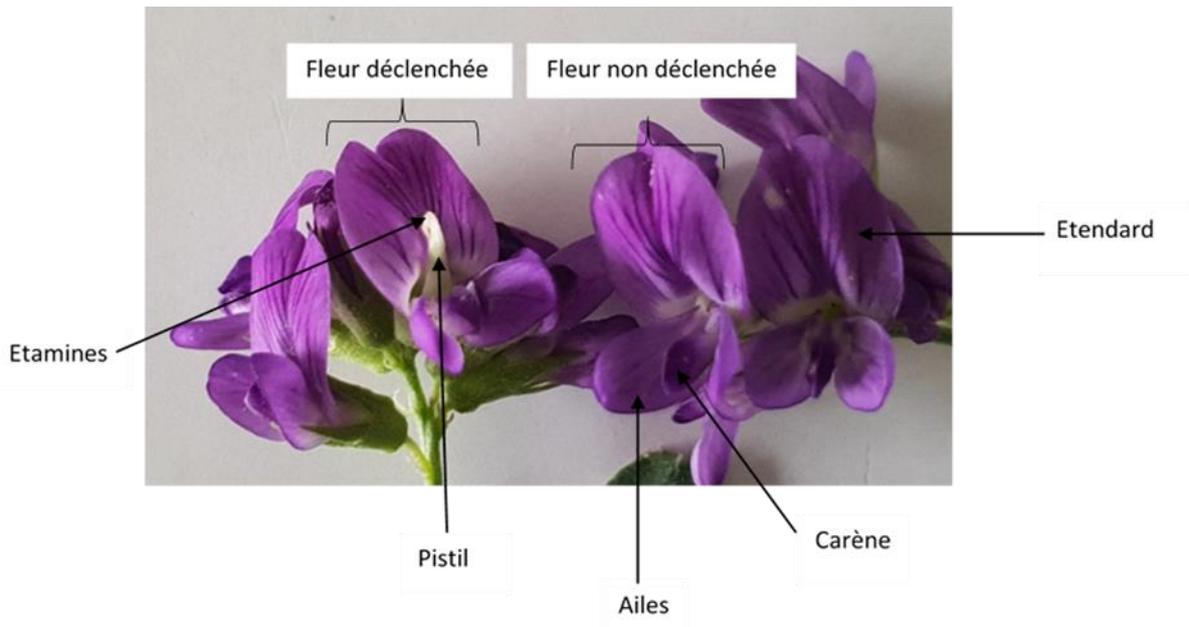


Figure 7 : Photographie d'une fleur de luzerne, avec une fleur déclenchée et non déclenchée (Dorian Lusson).

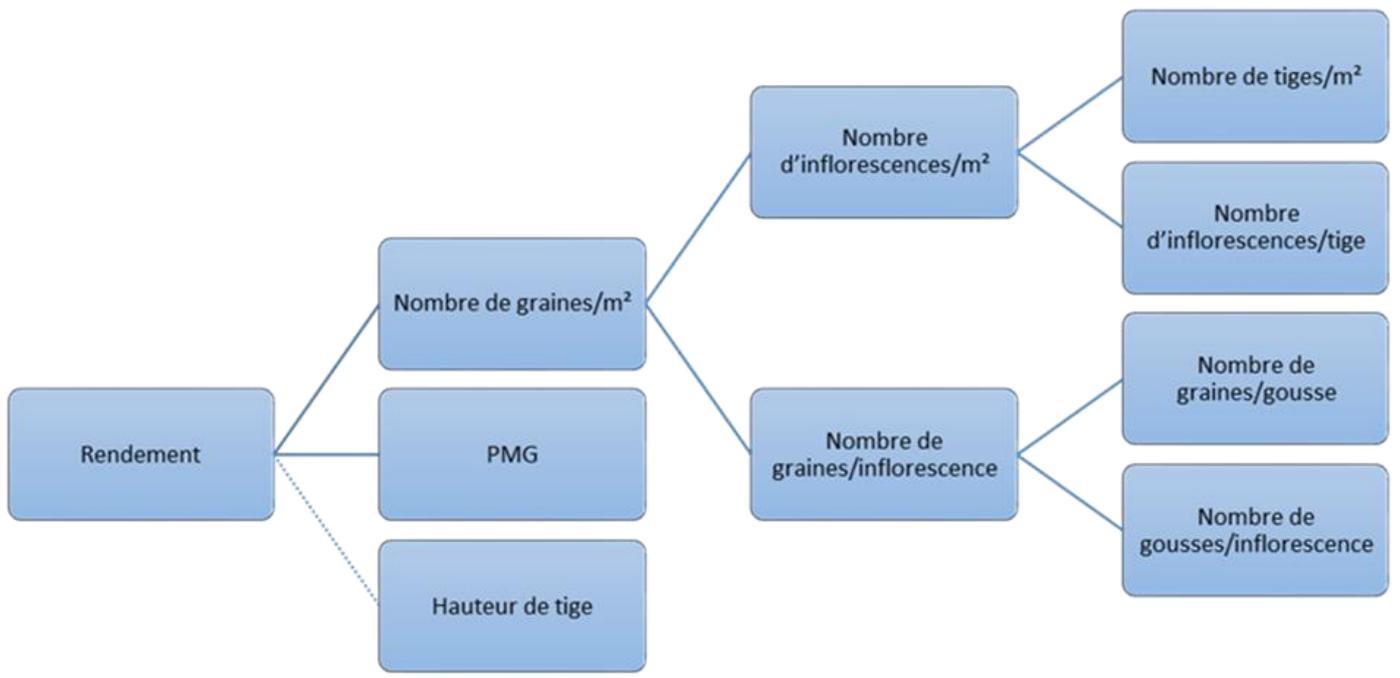


Figure 8 : Composantes du rendement.

Ce sont les gousses matures de couleur brunâtre qui seront récoltées au mois d'août. La maturité des gousses est hétérogène sur la plante. En effet, les différents stades de floraison se chevauchent au sein d'une même parcelle. Des gousses matures peuvent être voisines avec une inflorescence en fleur ou avec des gousses vertes (Gosses *et al.*, 1990).

Enfin, pour récolter les semences, il faut attendre que 80 à 85% des gousses de luzerne soient matures. La récolte peut être réalisée soit directement après l'application de produits chimiques entraînant la dessiccation de la plante, ou par fauchage-andainage (FNAMS, 2000).

### 1.3.3. Facteurs limitants l'élaboration des composantes du rendement.

Le rendement est défini par différentes composantes (Figure 8) et par l'équation suivante:

$$\text{Rendement} = \text{Nombre de graines par m}^2 \times \text{PMG}$$

#### 1.3.3.1. Conditions climatiques

Les conditions météorologiques affectent différents aspects de la luzerne en jouant sur le développement végétatif, l'induction florale, le pollen ou encore sur la maturation des graines (Hampton, 1990).

Le vent associé aux fortes pluies facilite la verse et peuvent avoir un impact important sur le rendement grainier de la luzerne (Mauriès, 2003) par des avortements d'embryons réduisant alors le nombre de graines par inflorescence (Medeiros *et al.*, 1995)

De plus, des températures inférieures à 20°C durant la phase de floraison entraînent une diminution du nombre de grains de pollen par fleur et une diminution de la fertilité du pollen réduisant là encore le nombre de graines par inflorescence (Blondon *et al.*, 1981).

D'autre part, les précipitations ainsi que des températures inférieures à 20°C durant la période de floraison entraînent une compétition entre la croissance végétative et le développement des fleurs, affectant le nombre d'inflorescences par tige (Hacquet et Karagic, 2013).

Dans le cas contraire, des fortes températures (~30°C) entraînent un déficit hydrique au niveau de la plante. Un déficit hydrique intervenant après la réalisation de la précoupe peut limiter et retarder la repousse des tiges impactant le nombre de tiges par m<sup>2</sup>.

Lorsque ce stress intervient durant la floraison, celle-ci peut être stoppée, entraînant une coulure des fleurs et une réduction du nombre de gousses par inflorescence (Genter, 1998). La coulure des fleurs peut aussi être due à la compétition entre les organes fructifères et végétatifs bien que les fleurs soient pollinisées.



*Figure 9 : Photo de luzerne parasitée par de la cuscute.*

<http://www.luzernes.org/?q=luzerne-et-agronomie/parasitisme/parasite-v%C3%A9g%C3%A9tale-la-cuscute>

En conditions normales le taux d'avortement est de 50% et en fonction des conditions climatiques la coulure des fleurs varie entre 20 et 80% selon les années (Gosse *et al.*, 1990).

Le déficit hydrique a également un effet sur l'assimilation des éléments minéraux et sur la photosynthèse, impactant le Poids de Mille Grains (PMG), par un remplissage des graines moins important (Hireche, 2006).

#### 1.3.3.2. *Activité des pollinisateurs*

Des conditions favorables à l'activité des pollinisateurs sont importantes pour maximiser le déclenchement et la pollinisation des fleurs de luzerne.

En effet, au niveau d'une parcelle seulement 20% des fleurs sont pollinisées selon Genter *et al.*, (1997). Les abeilles domestiques (*Apis mellifera*), sauvages (*Mégachile argentatata*, *Andrena ovatula*, ...) et les bourdons (*Bombus sp.*) sont des insectes pollinisateurs très présents au niveau des parcelles de luzerne.

Cependant, les abeilles domestiques participent très peu à la pollinisation des fleurs de luzerne. En effet, elles déclenchent à peine 30% des fleurs visitées contre environ 90% pour les abeilles sauvages (Taséi, 1978). Les abeilles domestiques sont capables de prélever le nectar de la fleur sans entraîner son déclenchement contrairement aux abeilles sauvages et aux bourdons (Ravenel et Hacquet, 2013).

De plus, l'activité des pollinisateurs est très dépendante des conditions météorologiques (Jevtic et Radovic, 2012). En effet, l'activité des pollinisateurs est favorisée par des températures comprises entre 20°C et 30°C au cours de la période de floraison (Hacquet, 1990).

La présence d'insectes pollinisateurs au niveau de la culture est importante pour augmenter la production de gousses par inflorescence (Al-Kathani *et al.*, 2017).

#### 1.3.3.3. *Adventices*

La luzerne est une plante qui supporte mal la compétition avec les mauvaises herbes (ARVALIS, 2015). En effet, dans l'ensemble des cultures il faut savoir limiter la présence d'adventices, puisqu'une densité importante peut entraîner une compétition au niveau de la lumière perçue par la luzerne, réduisant alors son développement.

Leur présence dans la parcelle entraîne également une compétition au niveau de l'eau et des éléments minéraux présent dans le sol et diminue le rendement de la culture et le nombre de tiges (Casals *et al.*, 2014).

Par exemple, la présence de cuscute (*Cuscuta Campestris*) dans la luzerne (Figure 9) cause des dégâts importants.



La cuscute est un parasite obligatoire. En effet, elle ne dispose pas de système chlorophyllien. La cuscute colonise la plante et puise les réserves de la luzerne à l'aide de suçoirs entraînant un affaiblissement et la mort de la plante. La cuscute doit être éliminée de la parcelle pour réduire la perte de tiges fructifères réduisant ainsi le rendement grainier de la culture (Hacquet, 2006).

D'autres adventices comme le rumex, l'amarante ou la renouée entraînent des pertes importantes de rendements lors de la phase de triage des lots (FNAMS, 2000).

Des interventions chimiques ou mécaniques doivent être effectuées pour limiter le développement des adventices afin de garder le plus propre possible la culture pour ne pas détériorer la quantité et la qualité du lot de luzerne.

#### 1.3.3.4. Ravageurs et Maladies

De nombreux ravageurs sont présents au sein de la parcelle de luzerne et nuisent à la production grainière de la culture. Les larves de la **cécidomyie des fleurs** (*Contarinia medicaginis*) forment des galles à la place des boutons floraux, les **punaises mirides** (*Lygus rugulipennis*) stoppent le développement des boutons floraux, les larves du **tychius** (*Tychius aureolus*) et les chenilles de la **tordeuse** (*Cydia medicaginis*) consomment les graines formées en pénétrant dans les gousses et les **pucerons verts** (*Acyrtosiphon pisum*) entraînent un avortement des fleurs (Boissière et Hacquet, 2011).

Les larves de cécidomyie des fleurs et les punaises mirides sont nuisibles dès leur apparition au stade bourgeonnement et jusqu'à maturité. Ils provoquent l'avortement des inflorescences et entraînent une diminution du nombre d'inflorescences par tiges. Les tychius sont nuisibles à partir du stade début gousses vertes.

Ce ravageur pond dans les gousses et sa descendance se nourrit des graines, pouvant engendrer d'importantes pertes de graines et de gousses par inflorescence pouvant aller jusqu'à 30% de pertes (Mériaux, 2011). Sans perturbation du cycle biologique du ravageur, l'abondance des tychius continuera de croître sur la parcelle.

Les chenilles de la tordeuse percent et consomment également les graines et les gousses. Elles sont donc nuisibles dès l'apparition des premières gousses. Les pucerons verts sont eux nuisibles au stade floraison (FNAMS, 2000).

Les ravageurs de la luzerne peuvent intervenir sur une composante de rendement tout au long du cycle de culture, c'est pourquoi il est important de contrôler leurs présences avec l'utilisation de produits phytosanitaires.



Les maladies de la luzerne affectent l'ensemble des parties de la plante. Le champignon Phoma (*Ascochyta imperfecta*) ou la maladie des taches communes (*Pseudopeziza medicaginis*) se développent lors de périodes humides et chaudes en été.

Elles provoquent des pertes de rendement pouvant aller jusqu'à 10% due à d'importantes nécroses foliaires affectant l'appareil photosynthétique de la plante (Graham *et al.*, 1972).

Le bon diagnostic des ravageurs et des maladies est nécessaire avant une intervention sur la culture pour adapter le produit phytosanitaire afin de diminuer et d'éradiquer les dégâts causés sur la luzerne porte-graine.

#### 1.3.3.5. Pratiques culturales

##### Précoupe

La réalisation d'une précoupe permet d'obtenir des repousses plus résistantes au phénomène de verse (Karagic *et al.*, 2006) et un nombre de tiges/ m<sup>2</sup> plus élevé. Le nombre d'inflorescences/tige est moins important puisque la hauteur des tiges et le nombre de nœuds florifères sont réduits (Hacquet, 2011).

La précoupe permet d'éliminer les adventices qui pourraient monter à graines et entraîneraient une détérioration de la qualité du lot récolté. Elle permet aussi d'homogénéiser le développement de la luzerne et de retarder la période de floraison de 2 à 4 semaines vers une période où les conditions météorologiques et environnementales sont les plus favorables à la pollinisation et à la nouaison (15 juin-15 juillet) (Taséi, 1971).

La date de précoupe est à optimiser pour permettre au stade floraison de la luzerne de tomber dans une période où les conditions sont optimales. Une précoupe tardive diminue le temps de floraison de la culture (Hacquet, 2011).

En présence d'un sol séchant, il n'y a pas de précoupe réalisée quel que soit la région de production (Recommandations FNAMS). Contrairement à un sol profond où la précoupe est réalisée du 15 au 20 Mai en région Centre Ouest, de début Mai au 20 Mai au Sud-Ouest et pas de précoupe ou précoupe fin Avril en région Sud-Est (FNAMS, 2000).

##### Exigences pédologiques

Le choix de la parcelle pour l'implantation de la culture de luzerne est un point important à optimiser pour permettre dès le début du cycle une bonne implantation et de garantir la réussite de la culture. En effet, le sol doit être sain, drainé et aéré. La plante ne supporte pas les sols hydromorphes et les sols à pH acide (<6.5) (Collin et Brun, 2003).



Un faible pH peut entraîner une mauvaise interaction bactérie-plante pour l'assimilation atmosphérique de l'azote. Les sols favorables à l'implantation de la luzerne sont les sols calcaires et limono-argileux sain car ils disposent d'une bonne structure et les sols ont une faible compaction ce qui favorise l'aération et le drainage (Collin et Brun, 2003).

#### Ecartement x Densité

Dès l'implantation de la culture, la densité et l'écartement vont déterminer le nombre de pieds/ m<sup>2</sup>.

D'après l'étude de Rashidi *et al.*, (2009) la densité de semis joue un rôle important sur le rendement et ses composantes. Dans les conditions testées (Iran), ils ont pu mettre en avant que le rendement le plus élevé était obtenu avec la densité de semis la plus faible (2.5 kg/ha) et inversement le rendement le plus faible avec la densité la plus élevée (12.5 kg/ha).

De plus, Bekovic *et al.*, (2016) mettent en avant dans les conditions testées (Serbie) que l'espace inter-rang joue un rôle sur le rendement et ses composantes. En effet, une faible densité (5 kg/ha) associée à un espace inter-rang important (60 cm) permet d'obtenir des rendements supérieurs à une densité forte (15 kg/ha) et un écartement plus faible (20 cm). Le nombre d'inflorescences par tige (9.84, 14.39), le nombre de gousses par inflorescence (5.96, 8.14) et le nombre de graines par gousses (3.64, 4.18) sont plus important pour une densité faible et un fort écartement.

Par ailleurs, la structure de la plante va être modifiée en fonction de la densité et de l'écartement entre les lignes de semis. La plante est d'autant plus vigoureuse que l'espace interligne est élevé (~60 cm) (Birouk, 2004) et une faible densité de semis permet de limiter la compétition pour les éléments nutritifs et l'eau entre les plantes.

Au niveau des pratiques françaises, celles-ci sont variables en fonction des régions. Dans l'Ouest et le Centre de la France, la densité est d'environ 5 kg/ha avec un écartement de 30 cm. Pour le Sud-Ouest 3 kg/ha avec un écartement de 60 cm et pour le Sud-Est une densité de 6 kg/ha et un écartement de 55 cm.

#### Fertilisation

Des apports de phosphore (P) et de potassium (K) peuvent être réalisés durant le cycle de la culture puisque la luzerne est très consommatrice de ces deux éléments. La fertilisation préconisée par la FNAMS pour 3 années de récolte est de 115 unités de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 280 unités de K<sub>2</sub>O par hectare. Des oligo-éléments (Bore, Zinc) peuvent également être apportés lorsque des carences sont présentes (Casals, 2011).

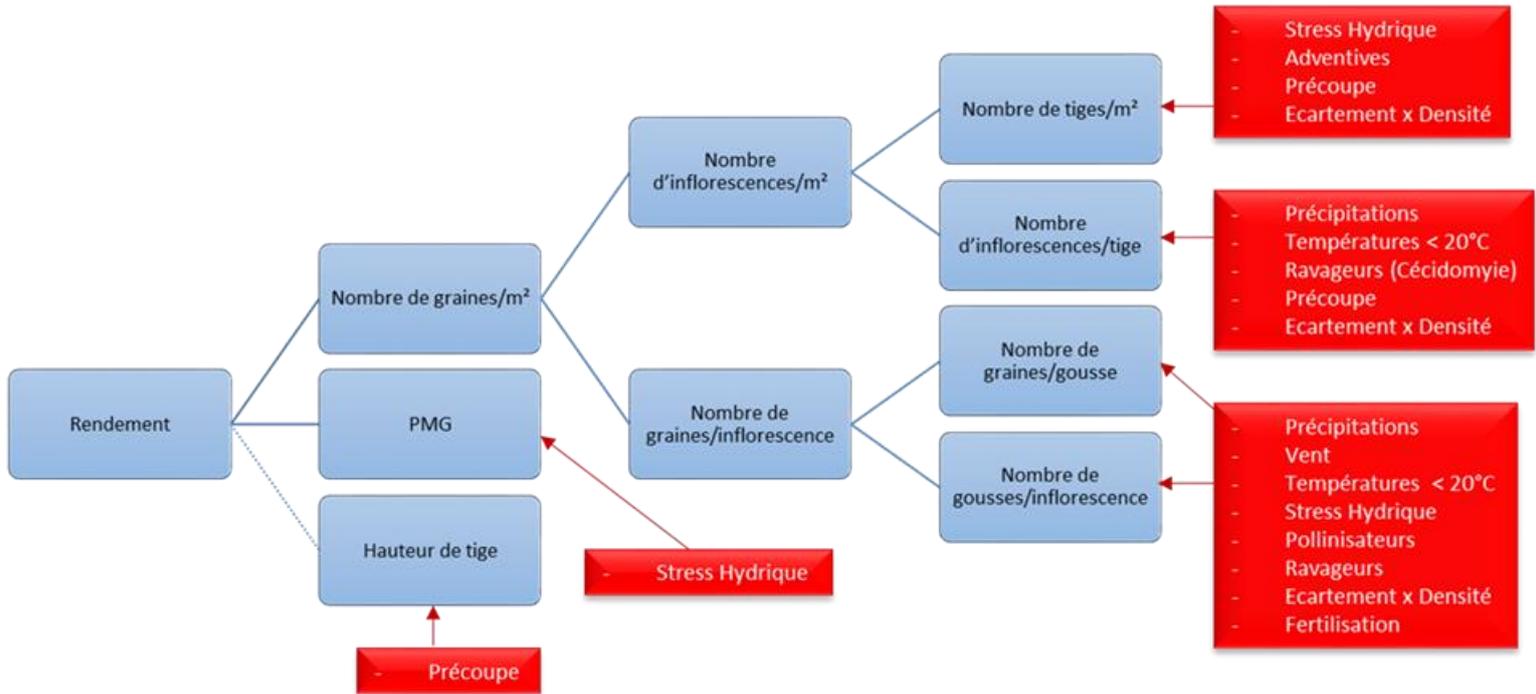


Figure 10 : Schéma représentant les facteurs influençant l'élaboration des composantes du rendement.

De plus, du bore (B) peut-être apporté en application foliaire. Cet apport de bore favorise le déclenchement de la floraison et permet d'augmenter le rendement grainier dans certaines régions (Fisher et Berger, 1951). Le nombre de graines par gousse (Témoin : 4.24, Bore : 4.43) et de gousses par inflorescence (Témoin : 79.3, Bore : 85.1) peut également augmenter de façon significative suite à une application foliaire de bore (Terzic *et al.*, 2011).

Il en est de même pour un apport de potassium en cours de culture qui lui permet d'augmenter le diamètre racinaire de la plante mais également la biomasse aérienne (Collin *et al.*, 1986).

#### 1.3.4. Résumé

Les différents facteurs limitants pouvant influencer le rendement grainier de la luzerne porte-graine et les composantes du rendement déterminés à l'aide la bibliographie sont répertoriés Figure 10.

#### 1.4. Objectifs

L'objectif de cette étude est de déterminer les facteurs limitant agro-climatiques à l'élaboration du rendement grainier de la luzerne grâce à l'étude et l'analyse de données récoltées par l'ensemble des notations réalisées sur un réseau d'essais (2013-2017), afin de mieux comprendre les variations de rendement. Les données de la dernière année d'essais (2018) ne figurent pas dans ce rapport, puisque la récolte de l'essai sera réalisée après la fin du stage. Mais ma participation au suivi de l'essai 2018, me permet de comprendre et de suivre l'évolution de la mise en place du rendement grainier de la luzerne.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1. Description du réseau et dispositif expérimental

Le réseau d'essais mit en place par la FNAMS est un réseau d'essais multi-local et pluriannuel.

Le réseau d'essais est localisé dans 3 stations de la FNAMS située à Brain-sur-l'Authion (49), à Etoile (26) et à Condom (32). Lors de la première année, des essais ont été implantés sur la station de Lusignan (86). La station de Brain-sur-l'Authion a repris et continué les essais par la suite.

La multi-localité des parcelles permet de tester des facteurs différents pouvant être limitant sur l'élaboration du rendement grainier de la luzerne (sol, climat, pratiques régionales, etc...).

Lors de l'implantation du dispositif en 2012 et 2013, deux facteurs ont été étudiés sur la luzerne. Ces facteurs sont : la variété (Galaxie, Cannelle, Salsa) et la date de précoupe (Date 1, Date 2). PC1 = Précoupe optimale ou sans précoupe, PC2 = Précoupe tardive.

A partir des implantations de 2014, seul le facteur date de précoupe a été étudié.

Tableau 1 : Récapitulatif de l'ensemble des essais depuis 2012 sur les différentes stations : (86) Lusignan, (26) Etoile, (32) Condom, (49) Brain, (A0) année d'implantation. (A1) première année de récolte. (A2) deuxième année de récolte. (A3) troisième année de récolte.

Variétés	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Série A</b> (semis 2012- 3 variétés)	A0 (86-26-32)	A1 (86-26-32)	A2 (49-26-32)				
<b>Série B</b> (semis 2013- 3 variétés)		A0 (26-32)	A1 (26-32)	A2 (26-32)	A3 (32)		
<b>Série C</b> (semis 2014- 1 variétés)			A0 (49-26-32)	A1 (49-26-32)	A2 (49-26)	A3 (26-32)	
<b>Série D</b> (semis 2015- 1 variétés)				A0 (49-26-32)	A1 (49-26-32)	A2 (49-26-32)	A3 (49-26-32)
<b>Série E</b> (semis 2016- 1 variétés)					A0 (49-26-32)	A1 (49-26-32)	A2 (49-26-32)

BLOC I						BLOC III					
Cannelle	Salsa	Galaxie	Galaxie	Salsa	Cannelle	Cannelle	Galaxie	Salsa	Cannelle	Galaxie	Salsa
Précoupe (date 1)	Précoupe (date 1)	Précoupe (date 1)	Précoupe (date 2)	Précoupe (date 1)	Précoupe (date 1)	Précoupe (date 1)					
BLOC II						BLOC IV					
Cannelle	Salsa	Galaxie	Galaxie	Salsa	Cannelle	Galaxie	Salsa	Cannelle	Salsa	Galaxie	Cannelle
Précoupe (date 1)	Précoupe (date 1)	Précoupe (date 1)	Précoupe (date 2)	Précoupe (date 1)	Précoupe (date 1)	Précoupe (date 1)					

Figure 11 : Plan des dispositifs expérimentaux.

La luzerne reste en place pendant 2 à 3 années sur la parcelle d'expérimentation. Les parcelles sont notées et différenciées en fonction de l'âge de la luzerne (A0, A1, A2, A3) (Tableau 1).

Le protocole expérimental est commun à chaque essai. Les parcelles d'essais sont disposées selon le modèle split plot factoriel à 3 ou 4 répétitions (Figure 11).

Les parcelles élémentaires ont une dimension de 10 m de long et une largeur qui varie en fonction de l'écartement de semis (11 rangs minimum).

Toutes les interventions des itinéraires techniques sont en adéquation avec les pratiques régionales habituelles, dans l'objectif de se rapprocher de référencements issus des parcelles de multiplication.

## 2.2. Observation et Variables collectées en cours du cycle de culture

### 2.2.1. Observation des stades phénologiques

Les stades phénologiques sont identifiés afin d'observer la date d'apparition dans le temps de ces différents stades et leur durée. Le stade est noté sur 5 tiges principales cueillis au hasard dans chaque bloc.

### 2.2.2. Notations des adventices

Les adventices présentes dans les différents blocs sont répertoriées. Le stade de développement de l'adventice et sa densité sur le bloc sont observés. Pour cela 2-3 notations sont réalisées avant la précoupe.

### 2.2.3. Notations des ravageurs

Chaque semaine à partir du mois de juin, un passage au filet fauchoir est réalisé pour observer la présence de ravageurs dans les parcelles. Les ravageurs suivants sont dénombrés : Sitone, Apion, Phytonome, Punaise, Tychius, Escargot, Puceron, Négril et Tordeuse.

### 2.2.4. Abondance des pollinisateurs

Le nombre d'abeilles sauvages, d'abeilles domestiques et de bourdons sera comptabilisé 1 à 2 fois par semaine pendant la floraison sur une placette de 1m de large sur 10m de long. La notation est effectuée de préférence entre 10h et 16h (période la plus favorable à l'activité des pollinisateurs).

### 2.2.5. Composantes du rendement

Les composantes du rendement ont été notées au cours de différents stades d'avancement de la culture.

Tableau 2 : Récapitulatif des périodes et stades de notations des composantes du rendement.

Période	Stade de la culture	Notations des composantes du rendement
Avril- Mai	Avant précoupe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauteur (5 mesures sur l'ensemble de la parcelle)</li> </ul>
Juin- Juillet	Floraison-Début gousses vertes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauteur</li> <li>• Nombre d'inflorescences/tige (4 tiges * 5 zones de la parcelle)</li> <li>• Tiges fructifères/m<sup>2</sup> ( Sur 2 rangs adjacents * 1 m de long )</li> </ul>
Août	Maturité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauteur</li> <li>• Nombre de gousses/inflorescence (10 inflorescences * 5 zones de la parcelle)</li> <li>• Nombre de graines/gousse (10 inflorescences * 5 zones de la parcelle)</li> <li>• PMG (10 inflorescences * 5 zones de la parcelle)</li> <li>• Poids de graines/inflorescence(10 inflorescences * 5 zones de la parcelle)</li> </ul>

Le nombre d'inflorescences par tige est noté entre le stade floraison et gousse verte, au stade gousse verte le nombre de tiges fructifères, à 3 stades différents pour la hauteur, le nombre de gousses par inflorescence, le nombre de graines par inflorescence, le PMG et le poids de graines par inflorescence sont notés à maturité (Tableau 2).

#### 2.2.6. Analyse des lots récoltés

Après la récolte, les lots de semences sont envoyés et analysés par le laboratoire d'analyses de semences LABOSEM. Le taux de déchets (%), le rendement (kg), le poids de mille grains (PMG) (g) et la faculté germinative (%) sont déterminées

#### 2.2.7. Relevés de variables climatiques

Les données climatiques ont été commandées et recueillies depuis 2012 près des stations météorologiques les plus proches des stations d'expérimentations.

Les températures minimales, maximales, moyennes, la pluviométrie, le rayonnement solaire (GLOT) et l'évapotranspiration (ETP) sont les variables récoltées.

Le déficit hydrique est calculé à partir de la somme de précipitation reçue sur une période donnée moins la somme de l'évapotranspiration sur la même période.

Le quotient photothermique ( $J/cm^2$ ) est le rapport entre le rayonnement (GLOT) et la température moyenne.

#### 2.2.8. Pratiques culturales

L'ensemble des interventions réalisées sur la parcelle d'essai sont également enregistrées comme l'écartement entre rang, la densité de semis, les applications phytosanitaires ou les apports de minéraux par exemple.

### 2.3. Base de données et Analyses statistiques

Pour déterminer les facteurs limitants qui interviennent dans l'élaboration du rendement grainier de la luzerne, des analyses statistiques seront effectuées. L'analyse statistique portera sur l'ensemble des données récoltées depuis la mise en place de ce réseau d'essais. L'ensemble des notations réalisées sur le réseau sont répertoriées dans une base de données Excel.

Les différents tests statistiques effectués lors de cette étude, vont être réalisés grâce à un outil d'analyses statistiques de données d'expérimentations agricoles gratuit conçu et réalisé par ARVALIS (Expé-R) et complémenté par le logiciel R et le package R-Commander (version 3.3.2).



Dans un premier temps, un regroupement d'essai permettra de tester l'effet de la variété et de la date de précoupe sur le réseau d'essais. Une Anova mixte au seuil alpha de 5% sera réalisée sur les séries A à D.

Par la suite, nous chercherons à identifier les composantes de rendement ayant l'effet le plus important sur le rendement.

Pour cela, des tests de corrélations seront réalisées pour distinguer ces composantes les unes des autres avec un seuil de significativité de 5% avec uniquement la variété Galaxie.

Le coefficient de corrélation obtenu va nous permettre d'identifier les composantes principales qui influent majoritairement sur l'élaboration du rendement grainier de la luzerne.

Dans un deuxième temps, les facteurs environnementaux et culturaux pouvant influencer les composantes majoritaires déterminées dans l'étape précédente seront analysées afin d'observer et de déterminer les pratiques et les conditions climatiques ayant un effet sur ces composantes.

Des matrices de corrélations seront réalisées pour observer la corrélation entre les composantes et les facteurs limitants pour permettre d'ajuster le modèle linéaire où des régressions linéaires multiples pas à pas (Stepwise) seront effectuées, afin de déterminer les facteurs qui influencent le plus la composante.

Enfin des régressions linéaires multiples au seuil de 5% sont réalisées pour déterminer la variabilité des facteurs limitants sur les composantes. La normalité des résidus sera bien évidemment testée par un test de Shapiro ainsi que l'homoscédasticité des résidus avec un test de Fisher-Snedecor.

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Instabilité régionale et interannuelle du rendement

Les rendements grainiers de luzerne sont variables d'une année sur l'autre et d'une station à l'autre. En effet, l'ANOVA mixte au seuil de 5% permet de mettre en avant des différences très significatives  $p\text{-value} = 2.2 \cdot 10^{-16}$  pour l'effet station et  $2.52 \cdot 10^{-11}$  pour l'effet année. Il est également observé un effet de l'âge de la culture ( $p\text{-value} = 0.003$ ) et de la précoupe ( $p\text{-value} = 0.001$ ) (Annexe I). Cependant, aucun effet significatif de la variété n'est observé sur le rendement. Dans la suite des analyses seule la variété Galaxie sera donc utilisée.

Au niveau des interactions entre les différentes variables sur le rendement, on peut observer que le facteur précoupe (fact1) n'a pas d'interaction avec l'année et la commune car les variances sont égales à 0. L'année et la commune sont cependant en interaction et ont donc un effet sur le rendement (Annexe I).

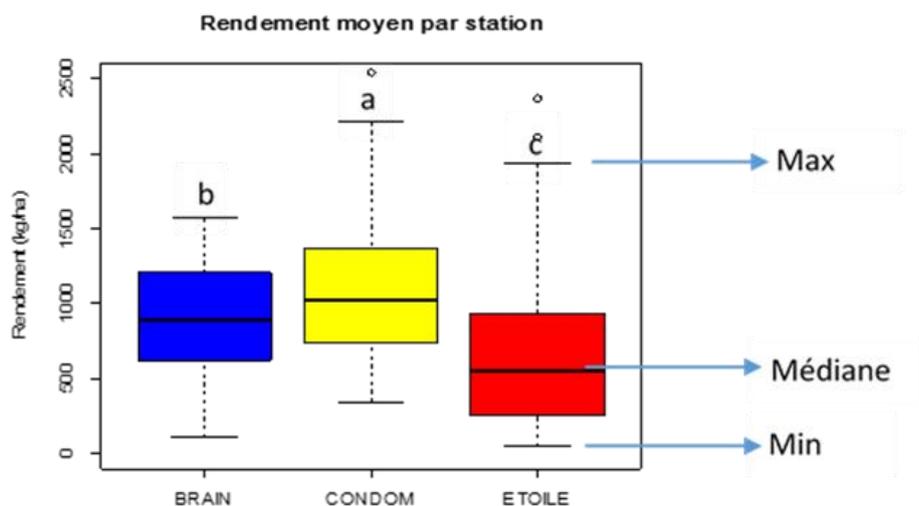


Figure 12 : Boxplot représentant la variabilité du rendement grainier moyen (kg/ha) entre les stations (Brain, Condom, Etoile) de 2013 à 2017 pour les deux dates de précoupe et toutes variétés confondues. Test de Tukey au seuil de 5%.

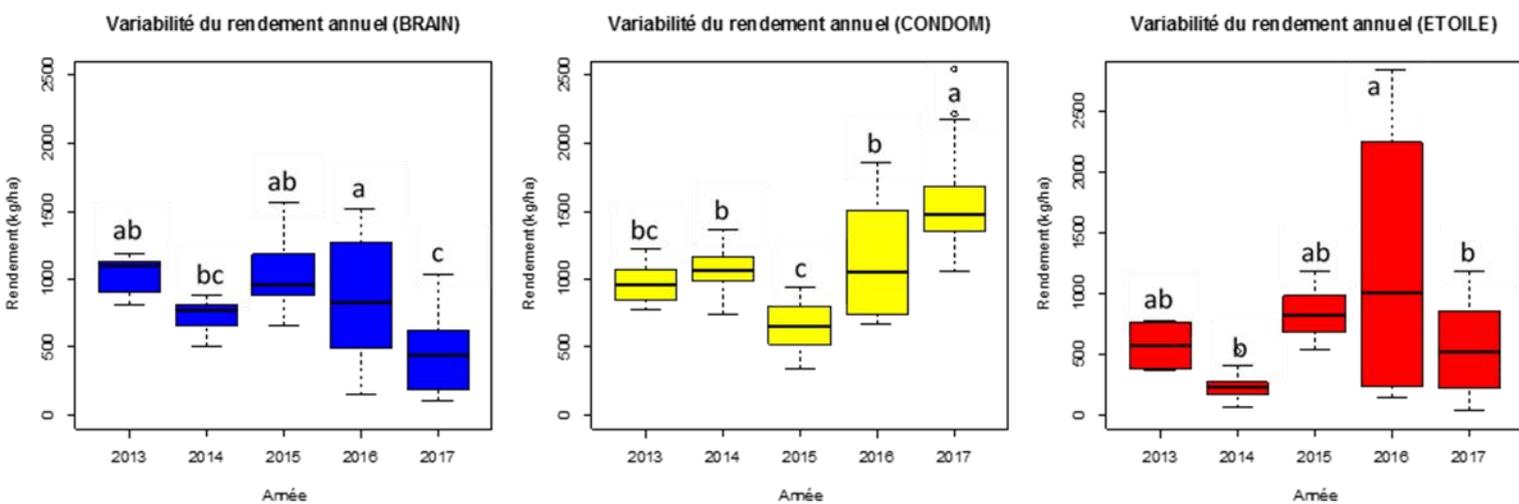


Figure 13 : Boxplot représentant la variabilité interannuelle du rendement grainier (kg/ha) pour les 3 stations (Brain, Condom, Etoile) de 2013 à 2017 pour les deux dates de précoupe et toutes variétés confondues. Test de Tukey au seuil de 5%.

### 3.1.1. Variation du rendement par station

La variabilité des rendements moyens par station peut être observée par une dispersion importante des rendements par rapport à la médiane. Le rendement moyen de 2013 à 2017 est de 887 kg/ha pour Brain, 1124 kg/ha pour Condom et de 722 kg/ha pour la station d'Etoile (Figure 12).

### 3.1.2. Variation annuelle du rendement

Une variation interannuelle importante du rendement moyen avec les deux dates de précoupe est observée pour chaque station. Le rendement peut chuter ou augmenter de plus de 50% d'une année sur l'autre (Figure 13).

En effet, en 2013 pour la station de Brain, le rendement moyen était de 1033 kg/ha alors que l'année suivante la moyenne est seulement de 733 kg/ha. Il en est de même pour la station de Condom où le rendement passe de 654 kg/ha en 2015 à 1151 kg/ha en 2016. Sur l'ensemble des années, l'effet année sur le rendement est significatif au seuil de 5% pour la station de Brain ( $p$ -value = 0.015) et pour la station de Condom ( $p$ -value =  $5 \cdot 10^{-6}$ ) et au seuil de 10% pour la station d'Etoile ( $p$ -value = 0.08).

### 3.1.3. Variation du rendement en fonction de l'âge de la culture et de la précoupe

La représentation graphique du rendement par rapport à l'âge de la culture et de la date de précoupe pour les différentes stations permet de montrer que l'âge de la culture et la date de précoupe jouent également un rôle sur le rendement grainier pour certaines stations (Figure 14).

En effet, aucun effet significatif de l'âge ( $p$ -value = 0.26) et de la date de précoupe ( $p$ -value = 0.344) est observé pour la station de Brain. Cependant, pour la station de Condom et Etoile, un effet significatif de l'âge ( $p$ -value =  $3.2 \cdot 10^{-5}$ ,  $3.6 \cdot 10^{-4}$ ) et de la date de précoupe ( $p$ -value = 0.009, 0.067) est observé sur le rendement mais sans aucun effet significatif entre les deux variables ( $p$ -value = 0.94, 0.99) (Annexe II).

On peut également observer sur l'ensemble des trois stations, malgré le manque de significativité pour la station de Brain que la date de précoupe optimale (PC1) génère des tendances de rendements moyens plus importants.

## 3.2. Variation des dates de précoupe

D'une année sur l'autre, les dates de précoupe sont adaptées aux conditions météorologiques. C'est pourquoi on peut observer des dates de précoupe optimales (PC1) différentes entre les années au sein d'une même station. La station de Brain a des dates de précoupe plus tardive que Condom ou Etoile (Figure 15). Pour la station d'Etoile, de 2015 à 2017 aucune précoupe n'est réalisée (PC1) puisque la pratique optimale est de ne pas précouper contrairement à Brain pour 2017 (PC2).

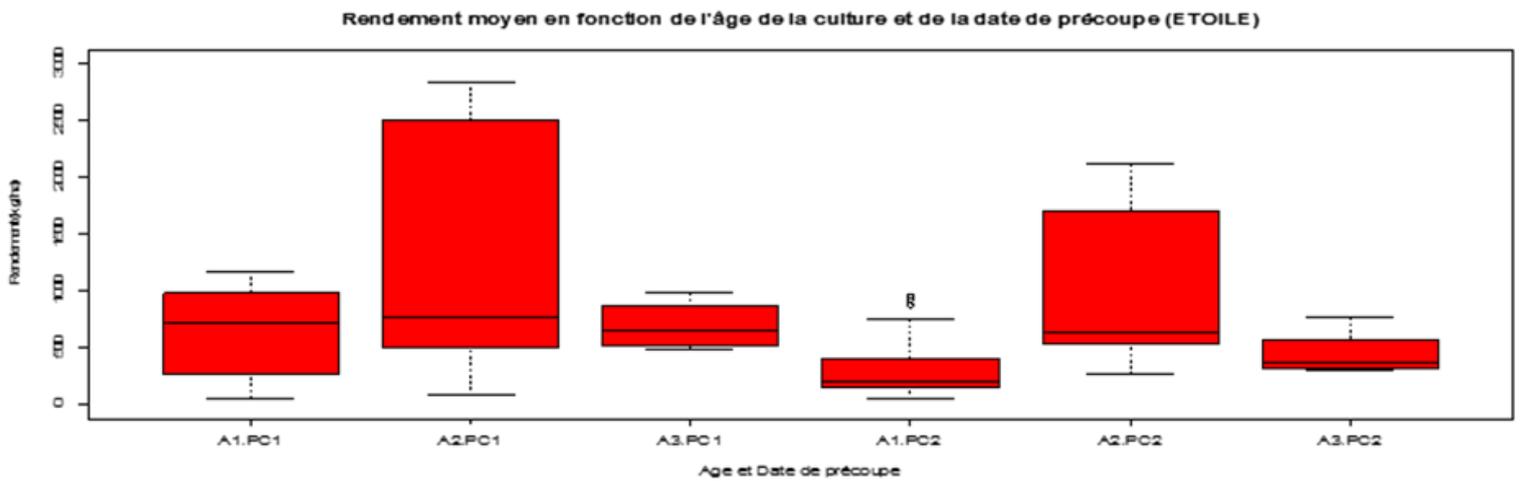
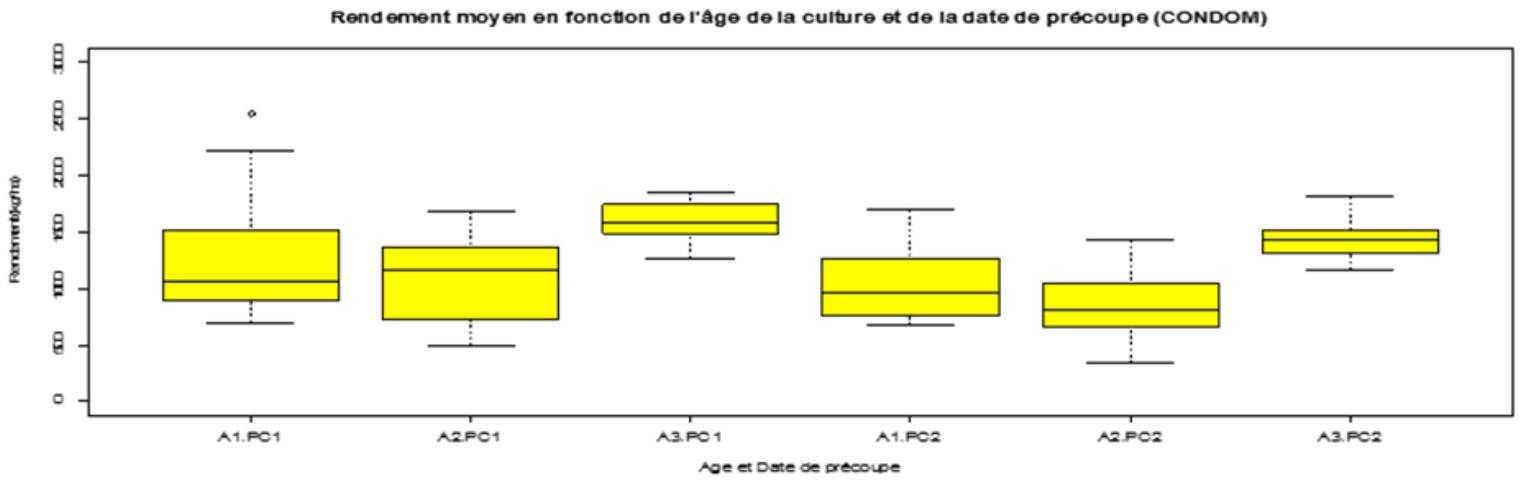
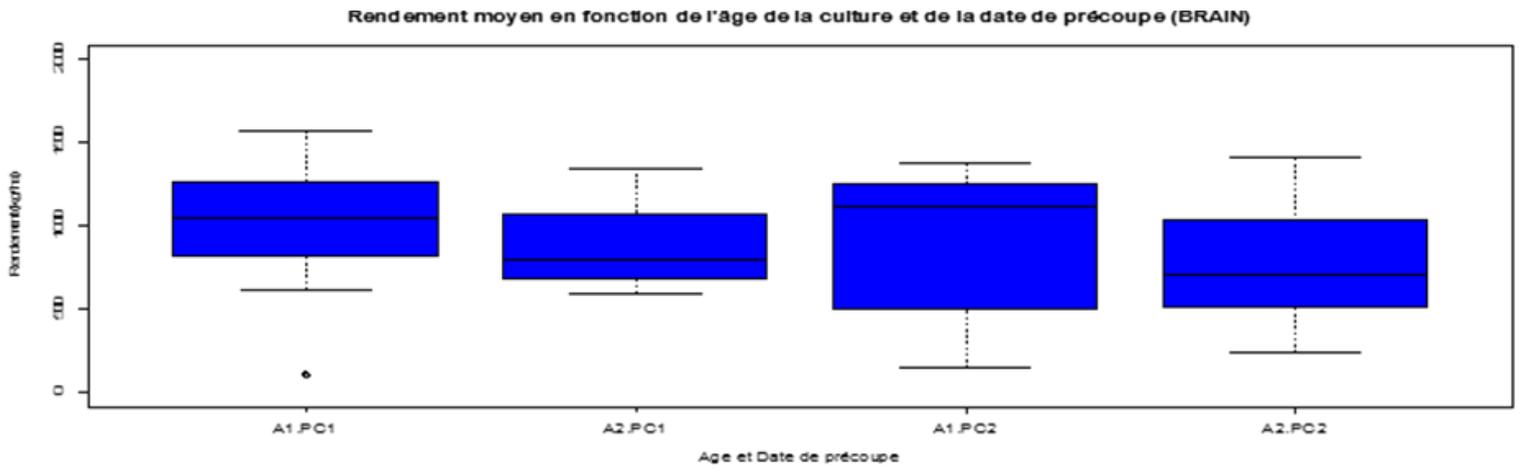


Figure 14 : Boxplots représentant la variabilité du rendement en fonction de l'âge de la culture (A1, A2, A3) et de la date de précoupe (PC1, PC2) de 2013 à 2017 pour la station de Brain (Bleu), Condom (Jaune) et Etoile (Jaune) et pour les 3 variétés.

### 3.3. Variabilité des composantes du rendement

Les composantes du rendement fluctuent également. En effet, un effet de la station est observé ( $p$ -value  $< 0.05$ ) pour l'ensemble des composantes (Anova fixe 5%).

L'année a également un effet important sur les composantes sauf sur le nombre d'inflorescences par tige et le PMG (Tableau 3).

L'effet de l'âge de la culture est présent pour le nombre de graines et le nombre de gousses par inflorescence ( $p$ -value = 0.047 et 0.027) ainsi que sur le nombre d'inflorescences par tige et la hauteur à maturité.

Pour la précoupe, un effet est seulement observé sur le nombre d'inflorescences par tige ( $p$ -value =  $7.5 \cdot 10^{-12}$ ) et la hauteur (0.029). Les stations de Brain et Etoile ont un nombre d'inflorescences par tige supérieure à Condom avec respectivement 16.8 et 16.5 inflorescences par tige en moyenne contre 10.3. Etoile a une hauteur significativement différente de Condom avec 78.1 cm de moyenne contre 66 cm et Brain a une hauteur de tige moyenne à maturité de 76.1 cm.

Le PMG, le nombre de tiges fructifères par  $m^2$  et la hauteur à maturité sont les composantes qui subissent l'effet de la variété. La variété Cannelle a un PMG inférieur (1.95g) à Galaxie et Salsa (2.05g). Pour la hauteur à maturité, la variété Galaxie est plus grande avec 75 cm contre 68.5 cm pour Salsa et 67 cm pour Cannelle. Le nombre de tiges fructifères par  $m^2$  est également plus important pour la variété Galaxie avec 112 tiges fructifères par  $m^2$  contre 88 et 82 respectivement pour Cannelle et Salsa.

Le test de Tukey permet de mettre en avant des différences significatives entre les moyennes des différentes composantes du rendement entre les stations.

Aucune différence significative n'est observée pour le nombre de graines par inflorescence entre Brain et Condom, alors que le nombre de graines par gousse, le PMG et le nombre de tiges fructifères diffèrent entre les stations. (Tableau 3). La station de Brain a un nombre de tiges fructifères par  $m^2$  supérieur aux autres stations avec 146.1 tiges fructifères par  $m^2$  contre 88.6 et 107.1 pour Condom et Etoile.

La présence d'un effet de la zone de production sur certaines composantes du rendement va nous aider à mettre en avant les facteurs influençant ces composantes au sein des stations à l'aide d'indicateurs (conditions pédoclimatiques, densité de semis, ...).

### 3.4. Observation des corrélations entre le rendement grainier et ses composantes

Pour observer les composantes qui définissent principalement le rendement des corrélations ont été réalisées.

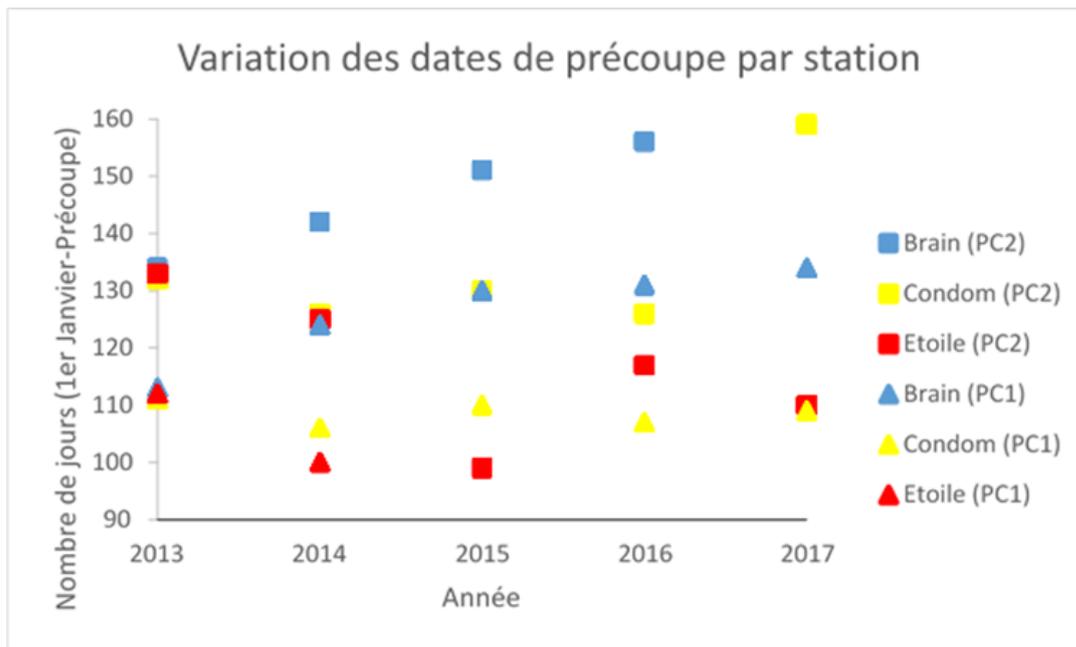


Figure 15 : Variation des dates de précoupe entre les stations et entre les années. (PC1=Précoupe Optimale, PC2= Précoupe Tardive).

Tableau 3 : Variabilité des composantes du rendement (2013-2017). Anova fixe au seuil de 5%. Test de Tukey au seuil de 5%.

Composantes du rendement	Moyennes BRAIN	Moyennes CONDOM	Moyennes ETOILE	Effet Station (Variété Galaxie, Série A-E)	Effet Année (Variété Galaxie, Série A-E)	Effet Age (Variété Galaxie, Série A-E)	Effet Précoupe (Variété Galaxie, Série A-E)	Effet Variété (Série A, B)
Nombre de Graines/inflorescence	91.4 a	97.2 a	63.5 b	Oui 0.006	Oui 0.010	Oui 0.047	Non 0.087	Non 0.553
Nombre de Gousses/inflorescence	13.1 b	22.7 a	21.1 a	Oui $4.1 \times 10^{-12}$	Oui $7.6 \times 10^{-4}$	Oui 0.027	Non 0.943	Non 0.408
Nombre de Graines/gousse	4.81 a	4.32 b	3.30 c	Oui $1.0 \times 10^{-11}$	Oui $2.0 \times 10^{-16}$	Non 0.419	Non 0.563	Non 0.325
PMG (g)	2.073 b	1.947 c	2.152 a	Oui $2.0 \times 10^{-16}$	Non 0.108	Non 0.323	Non 0.060	Oui $2.5 \times 10^{-6}$
Nombre de tiges fructifères/m <sup>2</sup>	146.1 a	88.6 c	107.1 b	Oui $3.7 \times 10^{-6}$	Oui $3.1 \times 10^{-6}$	Non 0.506	Non 0.398	Oui 0.004
Nombre d'inflorescences/tige (2016, 2017)	16.80 a	10.30 b	16.58 a	Oui $2.4 \times 10^{-4}$	Non 0.448	Oui $1.9 \times 10^{-4}$	Oui $7.5 \times 10^{-12}$	Qu'une variété
Hauteur à maturité (cm)	76.1 ab	66.0b	78.1a	Oui 0.037	Oui $3.1 \times 10^{-10}$	Oui $2.0 \times 10^{-16}$	Oui 0.029	Oui 0.014

On peut observer que le rendement est corrélé positivement au nombre de graines par inflorescence ( $r = 0.435$ ,  $p\text{-value} = 2 \cdot 10^{-16}$ ).

Le nombre de gousses par inflorescence ( $r = 0.216$ ) et le nombre de tiges fructifères par  $m^2$  ( $r = 0.285$ ) sont également corrélés positivement et significativement avec le rendement. Le nombre de graines par gousse n'est pas pris en compte ici puisqu'il a été obtenu par calcul. (Tableau 4).

Le PMG est pour sa part corrélé négativement et significativement au rendement ( $r = 0.327$ ,  $p\text{-value} = 6.6 \cdot 10^{-11}$ ), ainsi qu'avec le nombre de gousses par inflorescence ( $r = 0.233$ ) et le nombre de graines par inflorescence ( $r = 0.624$ ).

Le nombre de graines par inflorescence est la composante la plus corrélée au rendement. Cette composante est également corrélée significativement à deux composantes qui la définissent principalement. Ces deux composantes sont le nombre de graines par gousse ( $r = 0.690$ ) et le nombre de gousses par inflorescence ( $r = 0.374$ ) (Tableau 4).

Le rendement étant principalement corrélé positivement au nombre de graines par inflorescence et négativement avec le PMG qui elle-même est corrélée au nombre de gousses par inflorescence (Figure 16) permet de nous informer sur le fait que la fluctuation du rendement intervient avant le stade limite d'avortement des grains et pendant la phase de remplissage des grains.

L'impact des facteurs limitants sur le nombre de graines par inflorescence, le nombre de gousses par inflorescence, le nombre de tiges fructifères et le PMG doivent être minoritaires puisque ce sont les composantes les plus corrélées au rendement.

C'est donc pourquoi dans la suite de l'analyse, nous nous intéresseront à identifier les facteurs limitants de ces composantes avec une analyse des variables pédoclimatiques, des pratiques culturales, des pollinisateurs et des ravageurs afin de déterminer les causes des variations de rendement.

### 3.5. Détermination des facteurs pédoclimatiques et culturaux pouvant influencer les composantes de rendement

#### 3.5.1. Caractéristiques pédologiques et culturelles de chaque station

##### 3.5.1.1. *Type de sol*

La profondeur des sols est différente entre et au sein des stations. En effet, en fonction de l'emplacement de l'essai sur la station, la profondeur du sol est différente. Les 3 stations disposent de sols profonds ( $\sim 80$  cm) et de sols moins profonds pour la station de Condom et Brain ( $\sim 50 - 60$  cm). Plus le sol est profond, plus celui-ci peut stocker d'éléments et d'eau et permet d'avoir un bon enracinement de la plante (Annexe III).

Tableau 4 : Coefficient de corrélation de Person ( $r$ ) entre le rendement et ses composantes (2013-2017) (Variété : Galaxie). Anova au risque de 5%. Rouge : Corrélation négative ; Vert : Corrélation positive ; \*\*\* ( $p$ -value < 0.0001), \*\* ( $p$ -value < 0.001), \* ( $p$ -value < 0.0)

Composantes du rendement	Rendement	PMG	Nombre de Graines/inflorescence	Nombre de Gousses/inflorescence	Nombre de Graines/gousse	Nombre de tiges fructifères/m <sup>2</sup>	Nombre d'inflorescence s/tige (2016, 2017)	Hauteur de tiges étirées à maturité
Rendement	1	0.327 ***	0.435 ***	0.216 ***	0.194 **	0.235 *	0.134	0.051
PMG		1	0.624 *	0.233 **	0.398 ***	0.214	0.212	0.239
Nombre de Graines/inflorescence			1	0.374 **	0.690 ***	0.297 *	0.142	0.141
Nombre de Gousses/inflorescence				1	0.416 ***	0.203	0.196	0.219
Nombre de Graines/gousse					1	0.167	0.047	0.109
Nombre de tiges fructifères/m <sup>2</sup>						1	0.354	0.242
Nombre d'inflorescences/tige							1	0.292
Hauteur de tiges étirées à maturité								1

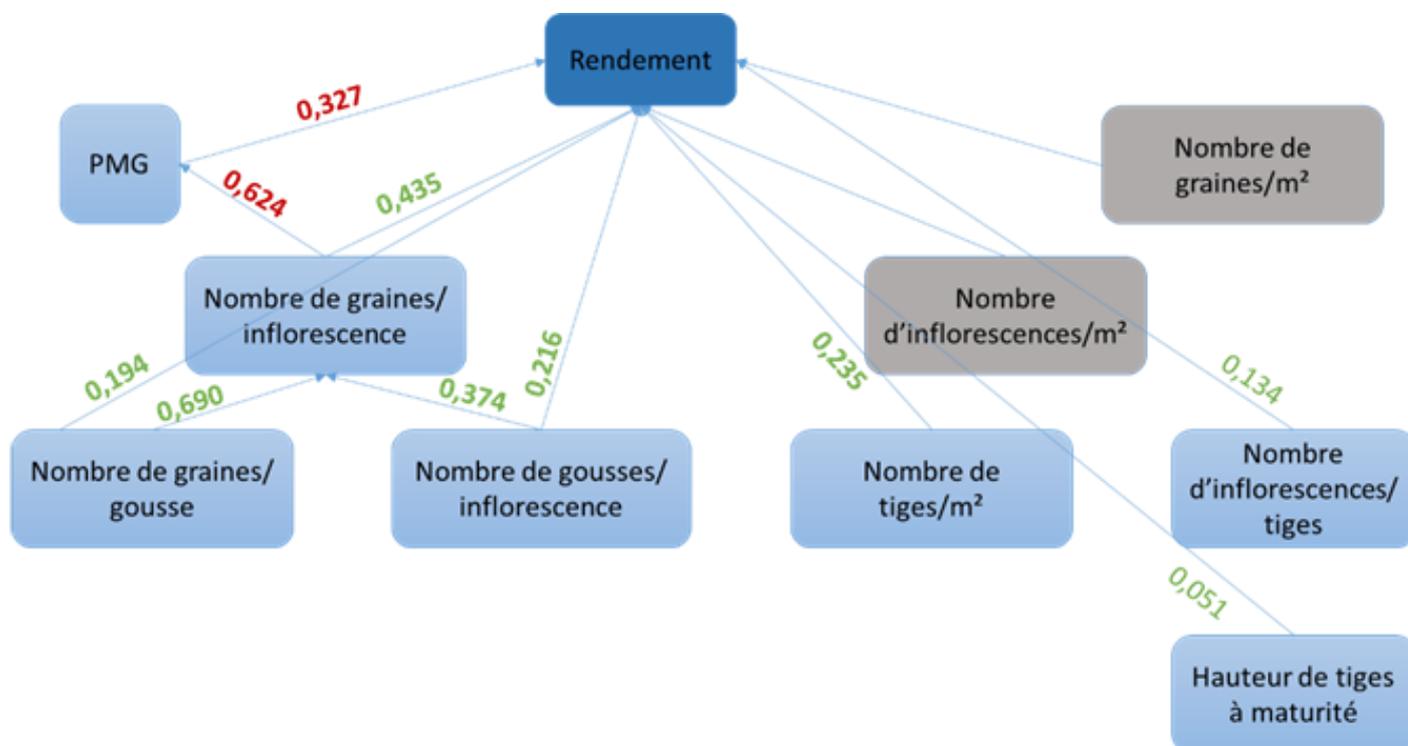


Figure 16 : Schéma récapitulatif des coefficients de corrélations de Pearson ( $r$ ) entre le rendement et les composantes.

Le type de sol est également différent entre les stations. En effet, la station de Condom dispose d'un sol Argilo-Calcaire, un sol Limono-Sablo-Argileux pour Etoile et Sablo-Argileux pour la station de Brain. Le pouvoir tampon d'un sol Argilo-Calcaire est préféré par la culture de luzerne. En effet, celui-ci est moins sensible à la sécheresse avec des teneurs en argile plus importantes permettant de retenir plus longtemps l'eau et de limiter le déficit hydrique.

#### *3.5.1.2. Implantation de la luzerne*

La densité de semis et l'écartement sont variables entre les stations (Annexe III). En effet, la densité et l'écartement sont adaptés au type de sol, aux conditions climatiques et aux pratiques régionales afin de réussir au mieux la mise en place de la culture.

Au niveau de l'écartement inter-rang, la station de Brain est à 35 cm contre 55 et 60 cm pour Etoile et Condom. Les régions du Sud sont plus propices que les régions du Nord aux déficits hydriques. C'est donc pourquoi, l'écartement inter-rang est plus important (55 - 60 cm) afin de limiter la compétition pour les ressources hydriques entre les plantes.

Les essais ont été implantés principalement sous couvert de tournesols et de maïs. Pour Brain, la luzerne est implantée sur sol nu pour la première année (Lusignan) ainsi qu'en 2014, puis sous maïs ensilage. Un semis sous couvert de tournesol est réalisé par les stations de Condom et Etoile. Sauf pour la première année (2012) lors de la mise en place de l'essai, Etoile a implantée la luzerne sur un sol nu.

#### *3.5.1.3. Apports d'éléments minéraux et de produits phytosanitaires*

Des apports de P, K ont été réalisés par Etoile en 2014 en pré-semis. Le bore est l'élément minéral le plus apporté sur les essais au début du stade bourgeonnement.

L'application de produits phytosanitaires est dépendante de la pression des ravageurs sur la culture. Pour la pression des maladies et des insectes nuisibles à la luzerne, les applications des produits sont effectuées lorsque le seuil de nuisibilité est dépassé.

Il peut donc être observé que la pression des maladies fongiques est plus importante à Etoile avec un nombre d'application moyen de 2 contre 0 pour les autres stations. L'application d'insecticides est plus importante à Condom avec un nombre d'application de 3 en moyenne par année contre 1.4 à Brain et 2 pour Etoile. L'application d'herbicides avant la reprise de végétation pour limiter et garder propre la parcelle est similaire entre les stations (Annexe III).

Les applications phytosanitaires sont variables d'une année sur l'autre en fonction de la pression des ravageurs et des maladies.

Tableau 5 : Caractéristiques des conditions climatiques des régions des 3 stations sur la période (Précoupe-DF) et (DF-Maturité). Test de Tukey au risque de 5%. Les couleurs (Bleu, Jaune et Rouge) représentent les années où le rendement était le plus faible pour les différentes stations.

Variable climatique	Station	Minimum (Précoupe-DF)	Maximum (Précoupe-DF)	Moyenne (Précoupe-DF)	Minimum (DF-Maturité)	Maximum (DF-Maturité)	Moyenne (DF-Maturité)
Températures moyennes (°C)	Brain	12.3 (2013)	14.3 (2015)	13.5 b	18.6 (2014)	22.2 (2015)	20.9 b
	Condom	13.6 (2013)	16.7 (2015)	15.3 a	20.6 (2014)	22.5 (2015)	21.7 ab
	Etoile	13.6 (2013)	17.4 (2015)	15.6 a	20.7 (2014)	13.6 (2015)	22.6 a
Somme des précipitations (mm)	Brain	95.2 (2017)	182 (2016)	133.6 b	46.8 (2016)	172. (2014)	114.9 b
	Condom	114 (2015)	256 (2013)	182.8 a	71.4 (2013)	151 (2015)	129.6 b
	Etoile	92.4 (2017)	336 (2013)	192.1 a	26 (2017)	216 (2016)	141.7 a
Somme du rayonnement (J/cm <sup>2</sup> )	Brain	116 146 (2016)	155 889 (2017)	137 081 c	145 842 (2017)	156 879 (2013)	152 969 c
	Condom	131 283 (2013)	163 071 (2017)	144 988 b	151 262 (2017)	168 162 (2015)	161 010 b
	Etoile	133 113 (2013)	171 369 (2017)	155 248 a	162 808 (2014)	187 080 (2013)	179 898 a

### 3.6. Caractéristiques climatiques

La température moyenne durant la période Précoupe – DF, est significativement différente entre les années (p-value = 0.00003) et les stations (p-value = 0.00001). En effet, Etoile et Condom enregistrent des températures moyennes similaires respectivement 15.3 °C et 15.6°C mais plus élevées que Brain (13.5°C) (Anova fixe au seuil de 5%) (Tableau 5).

Sur la période DF – Maturité, la température moyenne est également significativement différente entre les stations (p-value = 0.016) et les années (p-value = 0.004). Sur cette période, la station d'Etoile a une température moyenne la plus élevée (22.6°C) que Condom (21.7°C) et Brain (20.9°C) (Annexe IV).

Un effet significatif du rayonnement est également présent entre les stations et les années. La station de Brain a une somme de rayonnement perçu sur la période Précoupe – DF et DF – Maturité moins importante (137081 et 152969 J/cm<sup>2</sup>) que Condom (144988 et 161010 J/cm<sup>2</sup>) et Etoile (155248 et 179898 J/cm<sup>2</sup>).

Cependant, la somme des précipitations reçue par la culture sur les deux périodes ne montre aucune différence significative entre les communes (Annexe IV)

Le rendement le plus faible pour Brain est en 2017. Cette année-là, peu de précipitations sont tombées (95.2 mm) et une somme de rayonnement élevée (155 889 J/cm<sup>2</sup>) sur la période Précoupe –DF et un faible rayonnement reçu sur la période DF-Maturité (145 842 J/cm<sup>2</sup>). Pour Condom, le rendement le plus faible est en 2015. En 2015, la température moyenne sur la période Précoupe-DF est élevée (16.7°C) et sur la période DF-Maturité (22.5°C). La somme de précipitations (151 mm) et le rayonnement (168 162 J/cm<sup>2</sup>) sont également élevés sur la période DF-Maturité. Pour Etoile en 2014, seul la température moyenne (20.7°C) et le rayonnement (162 808 J/cm<sup>2</sup>) sont faibles sur la période DF-Maturité (Annexe IV).

L'hétérogénéité des conditions climatiques dans les régions des 3 stations peuvent être à l'origine des fluctuations du rendement grainier de la luzerne. En effet d'une année sur l'autre, la période des précipitations ou des fortes températures peuvent intervenir à des stades phénologiques différents de la luzerne.

Les pratiques culturales d'une station à l'autre étant également différentes peuvent également influencer la mise en place des composantes.

C'est pourquoi dans la suite des résultats, nous nous intéresserons plus précisément sur les conditions climatiques et les pratiques culturales pouvant influencer les composantes principales corrélées au rendement.

Tableau 6 : Corrélations entre les indicateurs environnementaux et le nombre de graines par inflorescence. Anova au risque 5%.  
Rouge : Corrélation négative.

Indicateurs (n=92)	$\Sigma$ Rayonnement (30 J avant Flo)	$\Sigma$ Rayonnement (DF-GB)	$\Sigma$ Quotient Photothermique (30 J avant Flo)	$\Sigma$ Quotient Photothermique (DF-GB)	Déficit hydrique (DF-FF)	Déficit hydrique (DF-GB)	$\Sigma$ Précipitations (DF-GB)	$\Sigma$ Jours T° > 20°C (DF-GB)
Corrélation (R <sup>2</sup> )	<b>0.507</b>	<b>0.307</b>	<b>0.525</b>	0.028	0.048	0.171	<b>0.609</b>	0.04
P-Value	<0.0001	0.002	<0.0001	0.78	0.64	0.10	<0.0001	0.65
Indicateurs (n=28)	Moyenne Tychius	Moyenne Punaises						
Corrélation (R <sup>2</sup> )	<b>0.531</b>	<b>0.343</b>						
P-Value	<b>0.003</b>	<b>0.07</b>						

Tableau 7 : Corrélations entre les indicateurs environnementaux et le nombre de gousses par inflorescence. Anova au risque de 5%. Rouge : Corrélation négative ; Vert : Corrélation positive.

Indicateurs (n=82)	$\Sigma$ Rayonnement (DF-GB)	$\Sigma$ Quotient Photothermique (30 J avant Flo)	$\Sigma$ Quotient Photothermique (DF-GB)	Déficit hydrique (DF-FF)	Déficit hydrique (DF-GB)	$\Sigma$ Précipitations (DF-GB)	$\Sigma$ Jours T° > 30°C (DF-FF)	Moyenne Abeilles Sauvage	Déclenchement
Corrélation (R <sup>2</sup> )	0.239	<b>0.501</b>	0.091	0.091	0.304	0.048	<b>0.343</b>	<b>0.283</b>	0.161
P-Value	0.08	<b>0.0002</b>	0.52	0.51	<b>0.02</b>	0.63	<b>0.01</b>	<b>0.04</b>	0.25
Indicateurs (n=28)	Moyenne Tychius	Moyenne Punaises							
Corrélation (R <sup>2</sup> )	<b>0.114</b>	<b>0.254</b>							
P-Value	0.25	0.61							

### 3.7. Influence des conditions environnementales et des pratiques culturales sur les composantes du rendement

Des corrélations entre les composantes étudiées et les variables pouvant expliquer les variations des composantes sont réalisées afin d'ajuster le modèle linéaire avec lequel les régressions de Stepwise seront réalisées, dans le but de déterminer les facteurs environnementaux et culturaux impactant l'élaboration de la composante.

#### 3.7.1. Variation du nombre de graines par inflorescence

Différents indicateurs climatiques ont pu être testés sur le nombre de graines par inflorescence (Tableau 6). L'ensemble des indicateurs ont une corrélation négative sur le nombre de graines. La régression pas à pas (Stepwise) permet de faire ressortir deux indicateurs qui influencent le plus le nombre de graines par inflorescence. En effet, le quotient photothermique 30 jours avant la floraison ( $p\text{-value} = 1.0 \cdot 10^{-6}$ ) et les précipitations reçues pendant la floraison ( $p\text{-value} = 1.5 \cdot 10^{-9}$ ) sont les conditions environnementales qui influencent pour 50% le nombre de graines par inflorescence (Annexe V).

La pression des ravageurs de graines (Tychius et Punaises) a également un effet négatif sur la composante ( $R^2 = -0.53$  et  $-0.34$ ). Le nombre de données étant moins important pour les ravageurs, la régression a donc été refaite avec  $n=28$ . On peut observer que les indicateurs climatiques qui ressortent sont les mêmes que précédemment (Annexe V).

Le nombre de tychius affecte plus le nombre de graines par inflorescence que les punaises.

Aucun effet de la précoupe n'est observé, cependant la densité de semis est corrélée négativement ( $R^2 = -0.52$ ) avec le nombre de graines par inflorescence.

#### 3.7.2. Variation du nombre de gousses par inflorescence

Le quotient photothermique 30 jours avant la floraison et le déficit hydrique pendant la floraison sont des indicateurs climatiques qui impacts négativement le nombre de gousses par inflorescence (Tableau 7). Cependant, la moyenne d'abeilles sauvages et la somme de jours où les températures sont supérieures à  $30^\circ\text{C}$  sont corrélées positivement avec le nombre de gousses par inflorescence ( $R^2 = 0.28$  et  $0.34$ ).

Aucun effet significatif des ravageurs sur le nombre de gousses n'est ressorti. Mais 45% de la variabilité du nombre de gousses par inflorescence est représentée par ces différents indicateurs environnementaux. Aucun effet des pratiques culturales n'a été mis en avant sur le nombre de gousses par inflorescence.

Tableau 8 : Corrélations entre les indicateurs environnementaux et le PMG. Anova au risque 5%. Rouge : Corrélacion négative ; Vert : Corrélacion positive.

Indicateurs (n=94)	$\Sigma$ Rayonnement (DF-GB)	$\Sigma$ Quotient Photothermique (DF-GB)	Déficit hydrique (DF-FF)	Déficit hydrique (DF-GB)	$\Sigma$ Précipitations (DF-GB)	$\Sigma$ Jours $T^> 30^{\circ}\text{C}$ (DF-FF)
Corrélacion ( $R^2$ )	0.06	0.11	0.108	0.375	0.185	0.216
P-Value	0.56	0.32	0.34	0.0006	0.09	0.05

Tableau 9 : Corrélations entre les indicateurs environnementaux et le nombre de tiges fructifères par m<sup>2</sup>. Anova au risque 5%. Rouge : Corrélacion négative.

Indicateurs (n=50)	$\Sigma$ Rayonnement (DF-GB)	$\Sigma$ Rayonnement (30 J avant Flo)	$\Sigma$ Quotient Photothermique (30 J avant Flo)	$\Sigma$ Quotient Photothermique (DF-GB)	Déficit hydrique (DF-FF)	$\Sigma$ Précipitations (DF-GB)	$\Sigma$ Jours $T^> 20^{\circ}\text{C}$ (DF-FF)
Corrélacion ( $R^2$ )	0.402	0.152	0.422	0.402	0.19	0.35	0.49
P-Value	0.003	0.29	0.002	0.72	0.17	0.69	0.0002

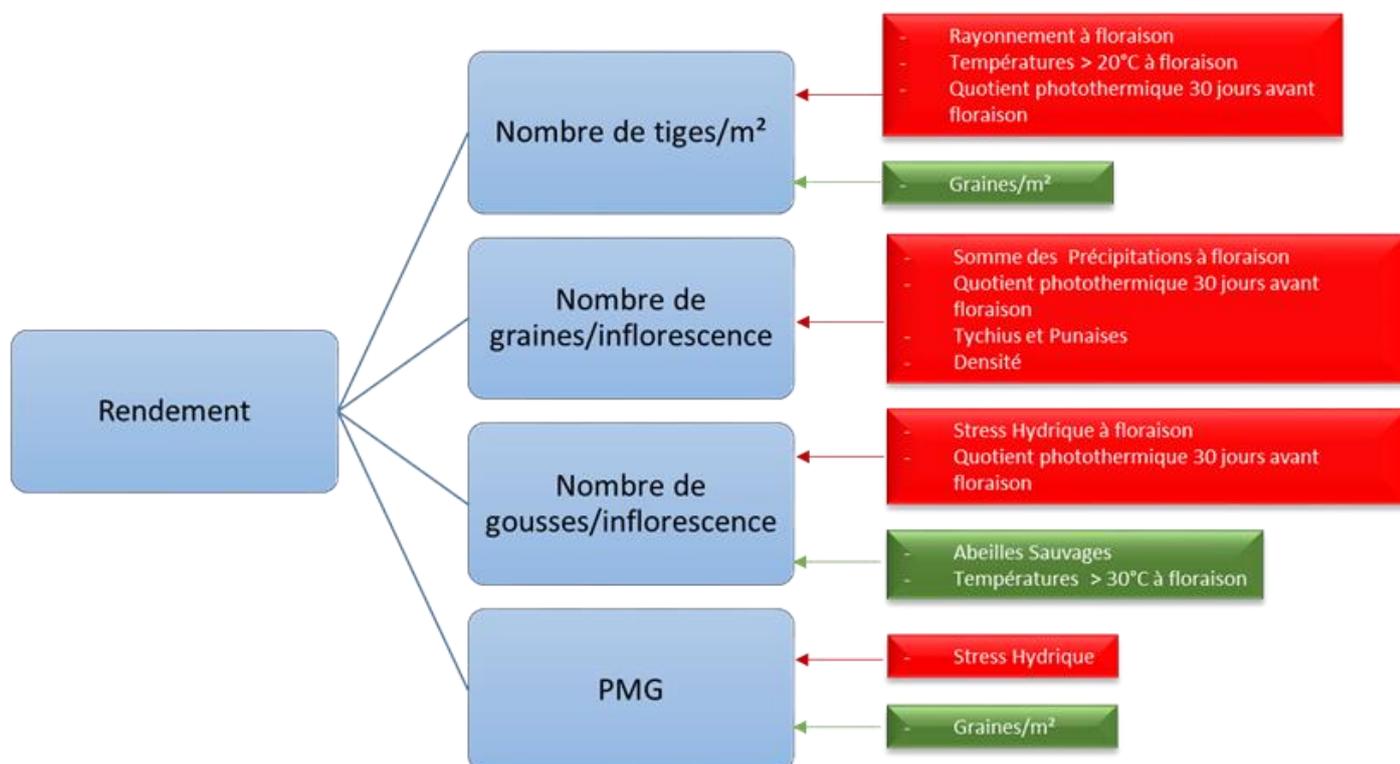


Figure 17 : Schéma récapitulatif des principaux facteurs influençant les composantes de rendement. Rouge : Effet négatif ; Vert : Effet positif.

### 3.7.3. Variation du PMG

Sur l'ensemble des indicateurs climatiques testés, on peut observer que seul le déficit hydrique durant la floraison ( $R^2 = -0.37$ ) a un effet significatif sur le PMG. Avec cet indicateur, 46% de la variabilité du PMG peut être expliqué ( $p\text{-value} = 2.2 \cdot 10^{-16}$ ) (Tableau 8) (Annexe VI).

Au niveau des pratiques culturales, le PMG est corrélé positivement avec le nombre de graines par  $m^2$  ( $R^2 = 0.72$ ).

### 3.7.4. Variation du nombre de tiges fructifères par $m^2$

Différents indicateurs sont corrélés significativement avec le nombre de tiges fructifères par  $m^2$  (Tableau 9). Le rayonnement pendant la floraison, le quotient photothermique 30 jours avant floraison et le nombre de jours où les températures sont supérieures à  $20^\circ\text{C}$  également pendant la floraison affectent le nombre de tiges fructifères par  $m^2$ . Cependant, la régression de Stepwise permet de montrer et de faire ressortir que 45% de la variabilité du nombre de tiges fructifères est due à la somme de jours supérieur à  $20^\circ\text{C}$  ( $p\text{-value} = 1.24 \cdot 10^{-5}$ ) et au quotient photothermique 30 jours avant la floraison ( $1.1 \cdot 10^{-4}$ ) (Annexe VI).

Le nombre de graines par  $m^2$  est corrélé positivement avec le nombre de tiges fructifères ( $R^2 = 0.35$ ) et un effet de la précoupe est également observé ( $p\text{-value} = 7.5 \cdot 10^{-12}$ )

## 3.8. Résumé des facteurs limitants environnementaux sur les composantes du rendement

Les précipitations et le déficit hydrique pendant la phase de floraison ont un effet négatif sur le nombre de graines par inflorescence, sur le nombre de gousses par inflorescence et sur le PMG. Le quotient photothermique 30 jours avant la phase de floraison a un impact négatif sur 3 composantes qui sont le nombre de graines et de gousses par inflorescence et sur le nombre de tiges fructifères par  $m^2$ . La somme de jours où les températures sont supérieures à  $20^\circ\text{C}$  a un effet que sur le nombre de tiges fructifères. Les conditions climatiques sont responsables d'au moins 50% de la variabilité des composantes du rendement (Figure 17).

Le nombre de Tychius ainsi que la présence d'abeilles sauvages sont des facteurs de l'environnement qui influent le nombre de graines et gousses par inflorescence.

Pour les pratiques culturales, seul le nombre de graines par  $m^2$  qui est corrélé avec la densité de semis et l'écartement a un effet négatif sur le nombre de graines par inflorescence et positif sur le PMG.

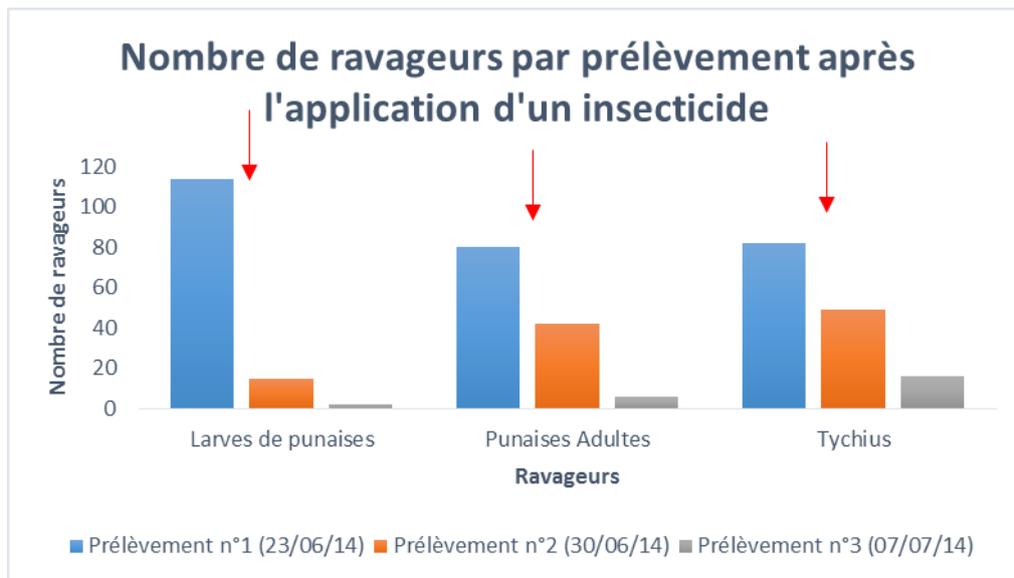


Figure 18 : Exemple de l'effet de l'application d'un insecticide (flèches rouges) sur les ravageurs de graines à la station de Brain.

C'est donc pourquoi dans la dernière partie de notre analyse nous nous intéresserons aux facteurs et aux pratiques culturales pouvant limiter l'impact de ces facteurs sur les composantes.

### 3.9. Principaux facteurs définissant les facteurs limitant des composantes du rendement

#### 3.9.1. Déficit hydrique pendant la floraison

Le déficit hydrique pendant la floraison est défini à 66% par la fréquence des précipitations (p-value =  $4.8 \cdot 10^{-12}$ ) et du rayonnement perçu (p-value =  $2.0 \cdot 10^{-16}$ ).

On peut également observer que plus la précoupe est tardive, plus le déficit hydrique pendant la floraison est important. Mais seulement 6% de la variabilité du déficit hydrique est due à la précoupe (p-value = 0.002) alors que 37% est due à un effet station (p-value =  $2.1 \cdot 10^{-7}$ ). La profondeur du sol a aussi un effet sur le déficit hydrique (p-value = 0.011). Plus celui-ci est faible, plus le risque de déficit hydrique est augmenté.

#### 3.9.2. Quotient photothermique 30 jours avant la floraison

Le quotient photothermique est défini principalement par le rayonnement et les températures. Il faut donc des températures plutôt moyennes pour limiter l'impact négatif du quotient photothermique sur le nombre de graines et gousses par inflorescence.

20% de la variabilité du quotient photothermique est due à un effet station et de l'année (p-value =  $8.5 \cdot 10^{-4}$ ) et 10% est expliqué par la date de précoupe. En effet, plus la précoupe est tardive, plus le quotient photothermique 30 jours avant la floraison est important.

#### 3.9.3. Nombre de tychius

Le manque de données sur la pression des ravageurs ne nous permet pas de mettre en avant l'effet de l'âge de la culture sur le nombre de tychius. La pression du ravageur est cependant favorisée lorsque la culture reste en place plusieurs années. Une luzerne en 3<sup>ème</sup> année de production serait donc plus propice à une présence importante de tychius. Cependant, afin de limiter la présence des ravageurs, on peut observer que l'application de produits phytosanitaires permet de réduire la population de tychius et de punaises et ainsi de limiter l'impact sur le nombre de gousses par inflorescence (Figure 18).

#### 3.9.4. Abeilles sauvages

Le nombre d'abeilles sauvages est corrélé négativement avec les fortes températures ( $>30^{\circ}\text{C}$ ) ( $R^2 = -0.35$ ).



Cependant aucun effet de l'abondance d'abeilles sauvages n'est observé sur le taux de déclenchement. Le taux de déclenchement est cependant corrélé positivement avec les températures supérieures à 30°C ( $R^2 = 0.55$ ).

Aucun effet de la station est observé sur l'abondance des pollinisateurs mais un effet de l'année ( $p\text{-value} = 5.5 \cdot 10^{-7}$ ) est observé ( $R^2 = 0.52$ ).

#### 3.9.5. Températures moyennes supérieures à 20°C pendant la floraison

La variabilité des températures moyennes supérieures à 20°C pendant la floraison est représenté avec 92% par un effet station et de l'année ( $p\text{-value} = 1.6 \cdot 10^{-7}$ ).

### 3.10. Résumé

On a pu voir que la variabilité du déficit hydrique est principalement due à la somme de précipitations reçue et au rayonnement. La profondeur du sol et la précope influencent également le déficit hydrique. De plus, le quotient photothermique est influencé par les températures et également par la date de précope.

L'âge de la culture expliquerait la variabilité d'abondance du tychius et les températures supérieures à 30°C l'abondance des abeilles sauvages.

Pour l'ensemble des facteurs limitants, l'effet année et station représente une part importante de variabilité.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Oscillations du rendement grainier et des composantes intra et inter-régionaux

Les rendements sont variables d'une station à l'autre et d'une année sur l'autre. Différents effets ont pu être mis en avant afin d'expliquer ces variations de rendements intra et inter-régionaux. Tout d'abord, l'effet année et région sont les facteurs expliquant majoritairement la variabilité du rendement grainier. Le rendement moyen pour la région Sud-Ouest représenté par la station de Condom (1124 kg/ha) est 35% supérieur au rendement moyen de la station d'Etoile (722 kg/ha) (Sud-Est) et 21% supérieur à Brain (Ouest). Les rendements moyens obtenus sont supérieurs à la moyenne nationale comprise entre 300 et 450 kg/ha, mais bien loin du potentiel grainier que peut fournir la luzerne et estimé par Hacquet (1990) à 2000 kg/ha. Le potentiel grainier est plus élevé sur les essais stations puisque nous sommes sur des petites parcelles d'expérimentations.

Au sein d'une même station, le rendement moyen oscillait également d'une année sur l'autre avec des baisses ou des gains de rendement pouvant atteindre les 50%.



Outre l'effet année et station, les variations annuelles du rendement sont également dues à des effets moins importants mais présents de l'âge de la luzerne et de la précoupe. En effet, on a pu observer qu'une luzerne en première année de production à Brain obtient de meilleurs rendements qu'une luzerne en deuxième année, alors que pour Condom et Etoile, une luzerne en 3<sup>ème</sup> année de production obtient de meilleurs rendements. La luzerne en 3<sup>ème</sup> année de production (2018) à Brain va permettre de voir si les rendements sont supérieurs pour une A3 comme dans les deux autres stations.

Au niveau des composantes du rendement, l'effet station et année sont également très présents. L'effet année n'est pas présent pour le nombre d'inflorescences par tige, mais cela peut être dû au fait que les notations sur cette composante ont commencé en 2016. La précoupe a un effet sur le nombre d'inflorescences par tige et la hauteur à maturité. La précoupe permet de réduire la hauteur des tiges afin de limiter le phénomène de verse (Karagic, 2006). La hauteur étant moins importante, le nombre de nœuds florifères est donc également réduit se traduisant par une réduction du nombre d'inflorescences par tige (Huyghe et Hacquet, 2000).

Aucun effet de la variété n'a été montré dans ce rapport sur le nombre de graines par gousse. Cependant, cette composante est génétiquement très variable entre les variétés (Bolanos et al., 2002).

D'autre part, en plus des conditions environnementales, les facteurs génétiques fixent également le PMG de la graine (Ney et al., 1994), ce qui peut expliquer l'effet variété pour le PMG.

#### 4.2. Corrélations entre le rendement et les composantes

Le rendement est expliqué principalement par le nombre de graines par inflorescence ( $R^2 = 0.435$ ) et par le nombre de gousses par inflorescence ( $R^2 = 0.216$ ). Ces composantes du rendement ressortent dans la littérature comme étant les plus corrélées au rendement ( $R^2 = 0.685$  pour le nombre de graines par inflorescence et  $R^2 = 0.645$  pour le nombre de gousses par inflorescence) comme l'ont montré Ilic et Dukic (2006).

Le PMG est corrélé négativement avec le rendement ( $R^2 = -0.327$ ), avec le nombre de graines par inflorescence ( $R^2 = -0.624$ ) et le nombre de gousses par inflorescence ( $R^2 = -0.233$ ). En effet, lorsque le nombre de graines augmente à l'intérieur des gousses une compétition entre les graines se met en place pour les éléments nutritifs (Lannucci et al., 2002). Cette corrélation négative entre le PMG et le nombre de graines est présente chez la plupart des espèces.

Le nombre de tiges fructifères par m<sup>2</sup> est corrélé positivement avec le rendement ( $R^2 = 0.235$ ). D'après Lannucci et al., (2002) la composante jouerait un rôle important sur l'élaboration du rendement.



Ilic et Dukic (2006) ont également mis en évidence une corrélation entre le rendement et le nombre d'inflorescences par tige ( $R^2 = 0.589$ ), mais dans notre cas une faible corrélation non significative est obtenue. Le faible nombre de données (2 années de notations) sur le nombre d'inflorescences par tige est peut être la cause du manque de significativité.

#### 4.3. Indicateurs environnementaux pouvant expliquer la variabilité des composantes du rendement

##### 4.3.1. Déficit hydrique pendant la floraison

Dans notre situation le déficit hydrique pendant la floraison a un effet négatif sur le nombre de gousses par inflorescence, le PMG et significatif au seuil de 10% pour le nombre de graines par inflorescence. A Brain en 2017 en présence d'un déficit hydrique de  $-130$  mm, le nombre de gousses est de 2 en moyenne contre une vingtaine normalement, et pour Etoile en présence d'un déficit hydrique de  $-190$  mm, le nombre de gousses par inflorescence est de 13 contre 23 en moyenne.

Mais, des précipitations associées à des températures élevées ( $>30^{\circ}\text{C}$ ) durant la période floraison peut entraîner une coulure physiologique des fleurs et des avortements d'embryons important (Medeiros et *al.*, 1995). De plus, des pluies importantes favorisent le développement végétatif à défaut d'organes reproducteurs.

Cependant, Chebouti et *al.*, (2001) ont noté que peu importe le stade de développement de la luzerne, un déficit hydrique entraîne une diminution de la production de gousses et de graines. Mais que cette réduction est plus importante lorsque le déficit hydrique est appliqué lors de la phase floraison que végétative.

Un déficit hydrique durant la phase de floraison provoque l'avortement des organes fructifères et des graines augmentant alors le PMG des graines non avortée. Cependant, en présence d'un déficit hydrique, l'activité photosynthétique est réduite, réduisant la production de sucre pouvant être assimilé par la graine d'où les faibles variations du PMG (Hireche, 2006). La symbiose entre la luzerne et *Rhizobium* est également affectée par le déficit hydrique réduisant la fixation azotée assimilable par la plante (Durand, 2007).

##### 4.3.2. Quotient photothermique 30 jours avant floraison

Un quotient photothermique élevé a un impact négatif sur le nombre de graines par inflorescence, le nombre de gousses et le nombre de tiges fructifères. Fischer (1985) a montré sur le blé que le quotient photothermique avait un effet positif sur le nombre de graines. C'est donc pourquoi, cet indicateur climatique a été testé sur les composantes (Casagrande, 2008).



Le quotient photothermique étant corrélé négativement, l'impact pourrait être due à l'effet d'un rayonnement trop important avant la floraison.

Le rayonnement favorisant la photosynthèse, favorise aussi le développement végétatif. Dans le même cas que les fortes précipitations la croissance végétative est alors préférée à la production d'organes reproducteurs.

Le rayonnement et la température étant corrélés, l'augmentation des températures moyennes avant la période de floraison peut diminuer le temps de l'initiation florale (Dobrenz et *al.*, 1965). Dans le cas contraire, des faibles températures avant la floraison peut diminuer la viabilité du pollen (Blondon et *al.*, 1991).

#### 4.3.3. Températures supérieures à 20°C et cumul de rayonnement pendant la floraison

Ces deux indicateurs montrent que le quotient photothermique pendant la floraison a un effet négatif sur le nombre de tiges fructifères. La coulure physiologique importante de fleurs lorsque les températures ou le rayonnement sont élevés peut expliquer l'impact négatif sur le nombre de tiges fructifères (Gosse et *al.*, 1990).

#### 4.3.4. Abondance des abeilles sauvages

L'activité des pollinisateurs et plus particulièrement des abeilles sauvages est favorisée par des températures supérieures à 20°C (Hacquet, 1990). L'activité des pollinisateurs est très dépendante des conditions météorologiques (Jevtic et *al.*, 2012).

Les températures optimales varient selon le pollinisateur. En effet, pour le bourdon des températures avoisinant les 17°C sont favorables à son activité. L'abondance des abeilles sauvages est corrélée positivement sur le nombre de gousses par inflorescence.

Les abeilles commencent à voyager lorsque les températures avoisinent les 20°C accompagnées d'une forte intensité lumineuse (Shebl, 2010).

Cependant, aucune corrélation significative entre le taux de déclenchement et l'abondance des abeilles sauvages n'a pu être montrée. Mais une corrélation entre la somme de jours où les températures étaient supérieures à 30°C et le taux de déclenchement est présente. Cette corrélation peut-être due à l'effet de l'auto-déclenchement lorsque la fleur est en présence de fortes températures (Free, 1993).

#### 4.3.5. Nombre de tychius

L'abondance des tychius (*T.aureolus*) dans une parcelle de luzerne a un effet négatif sur le nombre de graines par inflorescence ( $R^2 = - 0.53$ ). Peu d'études existent au sujet de ce ravageur.



D'après Boissière et Hacquet (2011), le tychius est le ravageur de luzerne qui impact le plus le rendement grainier.

En effet, la femelle pond sa descendance à l'intérieure des gousses. Les larves du coléoptère consomment les graines entraînant donc une diminution du nombre de graines par inflorescence. Les larves de tychius se transforment en nymphe et tombe au sol où elles passeront l'hiver (Buridant, 2011). Sans perturbation du cycle biologique du ravageur, l'abondance des tychius continuera de croître sur la parcelle. Un travail du sol post précoupe permettrait de réduire et perturber le cycle des tychius et ainsi de limiter leur présence (Gombert, 2014).

#### 4.4. Pratiques culturales

##### 4.4.1. Date de précoupe

La date de précoupe est adaptée à la région. On a pu observer qu'en fonction de la station les dates de précoupe optimales étaient différentes. A noter que la date de précoupe optimale pour la station d'Etoile était de ne pas précouper la luzerne. La date de précoupe est en effet adaptée aux conditions météorologiques de la région afin de d'optimiser les températures sur les différents stades du cycle de multiplication de la luzerne. L'impact de la précoupe sur les composantes du rendement n'est pas directement visible. L'effet de la précoupe est plus visible sur les facteurs limitants des composantes du rendement.

Tout d'abord, lors de la réalisation de la précoupe, les températures et les précipitations reçues doivent être favorables à la repousse et au développement du couvert.

Un déficit hydrique post précoupe réduit la photosynthèse ainsi que l'activité symbiotique entre la luzerne et Rhizobium, réduisant donc la fixation azotée assimilable par la plante et par conséquent le développement végétatif (Durand, 2007).

Par ailleurs, la précoupe permet de décaler la floraison vers des températures favorables à l'activité des pollinisateurs. En effet, la sortie des pollinisateurs est dépendante des conditions climatiques. Il est donc important d'estimer la date de pleine floraison pour que celle-ci tombe avec le pic d'activité des pollinisateurs (Taséi, 1971).

Le déficit hydrique est corrélé aux fortes températures. La date de précoupe ne doit donc pas être trop tardive pour éviter les fortes chaleurs durant la période floraison afin de limiter la coulure des fleurs et de favoriser l'activité des pollinisateurs.



#### 4.4.2. Graines par m<sup>2</sup>

Le nombre de graines par m<sup>2</sup> est corrélé à la densité et l'écartement interligne lors du semis.

Le nombre de graines par inflorescence diminue avec un nombre de graines par m<sup>2</sup> plus élevés (250 et 275 G.m<sup>2</sup>). Comme l'a montré Birouk (2004), une densité trop importante engendre une compétition pour les éléments nutritifs réduisant le nombre de graines par inflorescence.

Le nombre de graines par inflorescence étant moins important en présence d'une forte densité, le PMG est donc corrélé positivement à une forte densité de semis.

## 5. CONCLUSION

Au cours de cette étude, nous avons essayé de rechercher les causes de la variabilité du rendement grainier de la luzerne porte-graine et d'identifier les facteurs limitants agro-climatiques. L'ensemble des essais mis en place depuis 2012 jusqu'à 2018 sur 3 stations de la FNAMS nous ont permis de mieux comprendre comment s'élabore le rendement grainier à partir des différentes composantes et également d'en identifier les principaux facteurs limitants.

Nos résultats suggèrent que les facteurs limitants intervenants pendant l'établissement du nombre de graines par inflorescence, du nombre de gousses par inflorescence, du nombre de tiges fructifères mais également du PMG sont responsables de la variabilité des rendements observés. Le rendement étant corrélé à ces composantes, l'impact des facteurs limitants sur ces composantes doit être limité. Du début de la floraison jusqu'à maturité des graines, la culture est particulièrement sensible à ces facteurs limitants.

En effet, un déficit hydrique intervenant pendant la période de floraison est dans notre cas en accord avec la littérature puisque l'on observe un effet négatif sur le nombre de graines par inflorescence. L'effet pouvant être due à un avortement des graines, mais également à une coulure physiologique des fleurs.

Il est également important de favoriser la présence des pollinisateurs et plus précisément des abeilles sauvages puisqu'elles ont un effet positif sur le nombre de gousses par inflorescence.

Par ailleurs, la présence des ravageurs et plus précisément celle du tychius au niveau de la parcelle doit être limitée puisque le ravageur entraîne des dégâts importants au niveau du rendement grainier de la luzerne en consommant les graines à l'intérieures des gousses.

Afin de limiter l'impact des facteurs limitants et de favoriser les facteurs ayant un effet positif sur l'élaboration des composantes de rendement, les pratiques culturales doivent être adaptées.



En effet, afin de limiter l'effet d'un déficit hydrique le choix d'un sol profond, d'un sol ayant une bonne rétention d'eau est préférable.

La réalisation d'une précoupe permet de décaler la période de floraison où les températures sont propices à l'activité des pollinisateurs. De plus, le raisonnement pour le choix de la date de précoupe doit prendre en compte le risque de déficit hydrique pour une zone agro-climatique connue. Cependant, les conditions climatiques n'étant pas prévisibles d'une année sur l'autre, la date de précoupe doit être ajustée et adaptée aux conditions météorologiques de l'année.

## 6. PERSPECTIVES

Afin d'observer plus précisément l'effet de la date de précoupe, il serait intéressant de réaliser des essais où la date de précoupe est la même chaque année.

Cela permettrait de déterminer encore plus précisément les facteurs climatiques limitants puisque la précoupe serait réalisée d'une année sur l'autre dans des conditions pouvant être favorables ou défavorables à l'élaboration du rendement.

Des sondes climatiques devraient être implantées au niveau des parcelles pour avoir des données météorologiques précises.

Une analyse de sol complète et un profil de sol serait également intéressant à effectuer afin de disposer de données sur la pédologie afin de calculer plus précisément le déficit hydrique et de pouvoir apporter des éléments minéraux si besoin.

Un essai luzerne irrigué serait également intéressant à mettre en place afin d'observer si l'élaboration des composantes et du rendement différent avec un essai sans irrigation (déficit hydrique).



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-Kathani S.N., Abdou Taha K. et Al-Abdulsalam M. (2017) Alfalfa (*Medicago sativa* L.) sees yield in relation to phosphorus fertilization and honeybee pollination. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24:1051-1055.
- ARVALIS-Institut du végétal (2015) La culture de la luzerne. *Edition ARVALIS*, 80 p.
- Bekovic D., Biberdzic M., Stanisavljevic R., Stojkovic S. et Vukovic A. (2016) The influence of row spacing on seed yield, yield components and seed quality of Alfalfa. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 8:87-92.
- Bertrand A., Bipfubusa M., Claessens A., Rocher S. et Castonguay Y. (2017) Effect of photoperiod prior to cold acclimation on freezing tolerance and carbohydrate metabolism in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant Science*, 264:122-128.
- Birouk A. (2004) Production de semences de luzerne. *Bulletin mensuel d'information et de liaison de PNTTA*, 117:1-4.
- Blondon F., Ghesquiere M. et Guy P. (1981) Variation de la fertilité pollinique en fonction de la température chez des luzernes de différentes origines (*Medicago sativa* L. et *M. media* Pers.). *Agronomie, EDP Sciences*, 1 (5):383-388.
- Boissière L. et Hacquet J. (2011) Ravageurs de la luzerne porte-graine, A chaque région, ses risques. *Bulletin semences*, 218:30-32.
- Bolanos E.D., Huyghe C., Ecalle C., Hacquet J. et Julier B. (2002) Effect of cultivar and environment on seed yield in Alfalfa. *Crop Sciences*, 42:45-50.
- Buridant C. (2011) Recherche de méthodes alternatives de lutte contre un ravageur de la luzerne porte-graine *Tychius aureolus*. *Kiesw*, 32 p.
- Casagrande M. (2008) Early assessment of organic winter wheat performances (yield and grain protein content): a combination of regional agronomic diagnosis, modelling with weed indicators and analyzing information sampled by farmers to manage their technical practice. Thèse Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement. *Life Sciences (q-bio) AgrosParisTech*.
- Casals M.L. (2011) Phosphore et potassium, Indispensables à la croissance des végétaux. *Bulletin semences*, 221:26-28.
- Casals M.L., Hacquet J., Deneufbourg F., Chauvel B. et Citron G. (2014) Approche raisonnée de la gestion des adventices en culture de la luzerne porte-graine dans la région Centre-Ouest. *Innovation Agronomiques*, 35:19-269.
- Chebouti A., Abdelguerfi A., et Mefti M. (2001) Effet du déficit hydrique sur le rendement en gousses et en graines chez trois espèces de luzerne annuelle. *CIHEAM*, 163-166.
- Collins M., Lang D.J. et Kelling K.A. (1986). Effects of phosphorus, potassium and sulfur on Alfalfa nitrogen-fixation under field conditions. *Agronomy Journal*, 78:959-963.
- Collin F. et Brun L. (2003) Produire des semences de luzerne dans un itinéraire agrobiologique. *Techn'ITAB semences*.
- Dobrenz A.K., Messengal M.A. et Phillips W.S. (1965) Floral initiation in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Crop Science*, 13:572-575.
- Durand J.L. (2007) Les effets du déficit hydrique sur la plante : aspect physiologiques. *Fourrage*, 190:181-195.



- Fisher E.H. et Berger K.C. (1951) Alfalfa seed production as influenced by insecticide and fertilizer application. *Journal of Economic Entomology*, 44:113-114.
- Fisher R.A. (1985) Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science*, 105:447-461.
- FNAMS (2000) Guide pratique, Luzerne porte-graine. 35 p.
- FNAMS (2017) Rapport d'activité. 33 p.
- Free J.B. (1993) Insect Pollination of Crops. *Academic Press London UK*, 31 248-262.
- Genter T. (1998) Luzerne, L'avortement des graines. *Bulletin semences*, 144:19-22.
- Genter T., Deléens E. et Fleury A. (1997) Influence of photosynthetic restriction due to defoliation at flowering on seed abortion in lucerne (*Medicago sativa L.*). *Journal of Experimental Botany*, Vol. 48, No 315, pp. 1815.
- GNIS (2017) Sections semences fourragères et à gazons : éléments de conjonctures de la récolte 2016. *GNIS*, 3 p.
- GNIS (2017) Statistique Annuelle et séries chronologiques. Semences de plantes fourragères et gazons. *GNIS*, 17 p.
- Gombert J. (2014) Vers une stratégie de protection intégrée pour lutter contre *Tychius aureolus* en luzerne porte-graine. *AFPP – Dixième conférence internationale sur les ravageurs en grandes cultures*, 32 p.
- Gosse G., Hacquet M., Lemaire G., Plancquaert Ph. et Salsac L. (1990) Physiologie des légumineuses fourragères. *Techniques Agricoles*, 2204 (3-1990).
- Graham J.H, Kreitlow K.W. et Faulkner L.R. (1972) Diseases, In: C.H. Hanson. *Alfalfa Science and Technology*, pp. 497-523.
- Hacquet J. (1990) Genetic variability and climatic factors affecting lucerne seed production. *Journal of Applied Seed Production*, Vol. 8:59-67.
- Hacquet J. (2006) Luzerne porte-graine, Gare à la cuscute ! *Bulletin semences*. 189:34-36.
- Hacquet J. (2011) Luzerne porte-graine, bien gérer la précoupe. *Bulletin semences*, 219:22-24.
- Hacquet J. et Karagic D. (2013) Alfalfa management for higher and more sustainable seed yields. *Legumes Perspectives*, 4:34-35.
- Hampton J.G., (1990) Genetic variability and climatic factors affecting herbage legume seed production. *Journal of Applied Seed Production*, Vol.8:45-51.
- Hireche Y. (2006). Réponse de la luzerne (*Medicago sativa L.*) au déficit hydrique et à la profondeur de semis. Thèse Sciences Agronomiques, option Agrotechnie. *Université Al Hadj Lakhdar–Batna*. 83p.
- Huyghe C. et Hacquet J. (2000) Luzerne, Comprendre et maîtriser le rendement grainier. *Bulletin semences*, 155:31-34.
- Ilic O et Dukic D (2006) Correlations among Alfalfa yield components. *Genetika*, 3:251-258.
- Jevtic G. et Radovic J. (2012) The importance of honey bee (*Apis mellifera carnica Poll.*) in pollination and seed yield of Alfalfa (*Medicago sativa L.*). *International Conference on BioScience: Biotechnology and Biodiversity*, 11-24 p.



- Karagic D., Katic S., Milic D. et Vasiljevic S. (2006) Effect of cutting Schedule on seed yield in Alfalfa. *Romanian Agricultural research*, No 28.
- Lannucci A., Di Fonzo N. et Martiniello P. (2002) Alfalfa (*Medicago sativa L.*) seed yield and quality under different forage management systems and irrigation treatments in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 78:65-74.
- Mauriès M. (2003) Luzerne, culture, récolte, conservation, utilisation. *France Agricole Edition*, 240 p.
- Medeiros R.B., Jacques A.V.A., Nabinger C. (1995) Alfalfa (*Medicago sativa L.*) seed production under different row spacing and plant population in the seeding year. *Proceedings of the Third International Herbage Seed Conference*, 331-335.
- Ney B., Duchene E., Carroué B et Angevib F. (1994) Agrophysiologie du pois protéagineux. *INRA*, 280p.
- Rashidi M., Zand B. ET Gholami M. (2009) Effect of different seeding rates on seed yield and some seed yield components of Alfalfa (*Medicago sativa L.*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 11:779-782.
- Ravenel C. et Hacquet J. (2013) La luzerne a besoin de ses pollinisateurs. *Bulletin semences*, 232:23-25.
- Shebl M.A. (2010) Sustainable use of leaf cutting bee hives for Alfalfa pollination. *Cercetari Agronomice in Moldova*, 3:143.
- Taséi J.N. (1971) Influence de la date de la précoupe de la luzerne (*Medicago sativa L.*) sur sa pollinisation. *Apidologie*, 2:173-195.
- Taséi J.N. (1984) Les insectes pollinisateurs de la luzerne (*Medicago sativa L.*) en France. *Apidologie*, 9:175-194.
- Terzic D., Stanisavljević R., Dinić B., Vučković, S., Đokić D. et Marković, J. (2011) The effect of foliar application of boron on Alfalfa seed yield. *Serbia*, 3725, 68-71.



# ANNEXES



# ANNEXE I

## Sorties R : ANOVA multi factorielle entre les facteurs pouvant expliquer l'instabilité du rendement

Sortie R : Anova multi factorielle fixes au seuil de 5%. Toutes années de production (2013-2017).

```
> anova(res)
Type III Analysis of Variance Table with Satterthwaite's method
      Sum Sq Mean Sq NumDF DenDF F value    Pr(>F)
Variete  496330  165443      3   317  1.0700  0.361975
Precoupe 1569007 1569007      1   317 10.1473  0.001589 **
Annee    9351407 2337852      4   317 15.1197 2.523e-11 ***
Age      1776708  888354      2   317  5.7453  0.003540 **
Commune  14837742 7418871      2   317 47.9804 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Sortie Expé R pour observer les interactions entre le rendement, l'année, la commune et la précoupe.

## Variance des essais

effet	Variance	Std.Dev.
annee:commune	88165,47	296,93
annee:fact1	0,00	0,00
commune:fact1	0,00	0,00
annee	0,00	0,00
commune	9812,65	99,06
fact1:annee:commune	156180,55	395,20



## ANNEXE II

### Sorties R : ANOVA entre le rendement, l'âge de culture et la da précoupe.

Sortie R Anova au seuil de 5% entre le rendement, l'âge et la précoupe pour BRAIN

```
> summary(aov(Rdt~precoupe))
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
precoupe  1 140482 140482  0.911  0.344
Residuals 54 8325415 154174
> summary(aov(Rdt~Age))
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Age     1 198005 198005  1.293  0.26
Residuals 54 8267892 153109
```

Sortie R Anova au seuil de 5% entre le rendement, l'âge et la précoupe pour Condom

```
> summary(aov(Rdt~precoupe))
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
precoupe  1 1257849 1257849  7.022 0.00979 **
Residuals 76 13614455 179138
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> summary(aov(Rdt~Age))
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Age     2 3585108 1792554 11.91 0.0000322 ***
Residuals 75 11287195 150496
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Sortie R Anova au seuil de 5% entre le rendement, l'âge et la précoupe pour Etoile

```
> summary(aov(Rdt~precoupe))
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
precoupe  1 1470141 1470141  3.464 0.0672 .
Residuals 66 28013705 424450
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> summary(aov(Rdt~Age))
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Age     2 6365978 3182989  8.95 0.000369 ***
Residuals 65 23117868 355660
```



## ANNEXE III

Tableau représentant les caractéristiques pédologiques, le mode d'implantation de la luzerne et les applications phytosanitaires.

*Caractéristiques pédologique des stations.*

<b>Station</b>	<b>Type de sol</b>	<b>Profondeur (cm)</b>
<b>ETOILE</b>	Limono-Sablo-Argileux	~ 80
<b>BRAIN</b>	Sablo-Argileux	~ 50
	Sablo-Argileux	~ 80
<b>CONDOM</b>	Argilo-Calcaire	~ 60
	Argilo-Calcaire	~ 80

*Caractéristiques des implantations de la luzerne sur les 3 stations FNAMS.*

<b>Station</b>	<b>Densité (kg/ha)</b>	<b>Ecartement inter-rang (cm)</b>	<b>Graines / m<sup>2</sup></b>	<b>Semis (sol nu, sous couvert)</b>
<b>ETOILE</b>	5.5	55	275	Sol nu (2012) Sous couvert de tournesol (2013-2016)
<b>BRAIN</b>	5	35	250	Sol nu (2012, 2013) Sous couvert de maïs (2014-2016)
<b>CONDOM</b>	2.5	60	125	Sous couvert de tournesol (2012-2016)

*Nombre d'applications moyen de produits phytosanitaires par station d'une année sur l'autre.*

<b>Station</b>	<b>Nombre d'applications moyennes d'herbicides (Avant reprise de végétation)</b>	<b>Nombre d'applications moyennes de fongicides (PV-GV)</b>	<b>Nombre d'applications moyennes d'insecticides (PV-GV)</b>
<b>ETOILE</b>	1.6	2	2
<b>BRAIN</b>	2	0	1.4
<b>CONDOM</b>	2	0	3



## ANNEXE IV

### Sorties R : ANOVA sur les températures, les précipitations et le rayonnement sur la période Précoupe-Début Floraison et Début Floraison-Maturité.

Sortie R Anova au seuil de 5% sur la température moyenne sur la période Précoupe-DF

```
> summary(Température)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Commune  2  13.54   6.772   61.59 0.0000138 ***
Annee    4  15.98   3.995   36.33 0.0000355 ***
Residuals 8   0.88   0.110
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Sortie R Anova au seuil de 5% sur la température moyenne sur la période DF-Maturité

```
> summary(Température)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Commune  2   7.300   3.650   7.220 0.01615 *
Annee    4  19.076   4.769   9.434 0.00402 **
Residuals 8   4.044   0.505
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Sortie R Anova au seuil de 5% sur la somme de précipitations sur la période précoupe-DF

```
> summary(Précipitations)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Commune  2   1803     902   0.245 0.789
Annee    4  18047    4512   1.225 0.373
Residuals 8  29466    3683
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Sortie R Anova au seuil de 5% sur la somme de précipitations sur la période DF-Maturité

```
> summary(Précipitations)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Commune  2   9862    4931   1.670 0.248
Annee    4  32536    8134   2.754 0.104
Residuals 8  23624    2953
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Sortie R Anova au seuil de 5% sur la somme de rayonnement sur la période Précoupe-DF

```
> summary(Rayonnement)
      Df      Sum Sq    Mean Sq F value    Pr(>F)
Commune  2 829677230 414838615   11.99 0.003911 **
Annee    4 2090661184 522665296   15.11 0.000846 ***
Residuals 8  276678544  34584818
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Sortie R Anova au seuil de 5% sur la somme de rayonnement sur la période DF-Maturité

```
> summary(Rayonnement)
      Df      Sum Sq    Mean Sq F value    Pr(>F)
Commune  2 1910944899 955472449   47.960 0.0000351 ***
Annee    4 612913958 153228490   7.691  0.00757 **
Residuals 8  159379049  19922381
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```



## ANNEXE V

### Sorties R : Régressions de Stepwise entre les indicateurs environnementaux pouvant expliquer la variabilité du nombre de graines par inflorescence et de gousses par inflorescence.

Sortie R régression de Stepwise entre les indicateurs environnementaux et le nombre de graines par inflorescence  
Anova au seuil de 5%.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	181.1681	14.1675	12.788	< 2e-16	***
Quotient..DF.30j.	-0.6227	0.1188	-5.243	0.00000105697	***
X.précipitations..DF.GB.	-0.2681	0.0398	-6.735	0.00000000156	***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 17.46 on 89 degrees of freedom

(1048339 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.5201, Adjusted R-squared: 0.5093

F-statistic: 48.22 on 2 and 89 DF, p-value: 6.483e-15

Sortie R régression de Stepwise entre les indicateurs environnementaux et le nombre de graines par inflorescence  
Anova au seuil de 5%.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	131.42080	24.55688	5.352	0.0000171	***
X.précipitations..DF.GB.	-0.16051	0.07558	-2.124	0.04421	*
Quotient..DF.30j.	-0.37909	0.21610	-1.754	0.09215	.
Tychius	1.04468	0.29300	3.565	0.00157	**

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 17.76 on 24 degrees of freedom

(1048403 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.5082, Adjusted R-squared: 0.4467

F-statistic: 8.266 on 3 and 24 DF, p-value: 0.0005961

Sortie R régression de Stepwise entre les indicateurs environnementaux et le nombre de gousses par inflorescence  
Anova au seuil de 5%.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	41.67348	4.46822	9.327	1.32e-13	***
Quotient..DF.30j.	-0.19094	0.03277	-5.826	1.92e-07	***
Stress.Hydrique..DF.GB.	0.04460	0.01534	2.908	0.004972	**
Abeilles.sauvage	3.18232	1.38480	2.298	0.024787	*
X.J.T.30.C..DF.FF.	0.49118	0.12722	3.861	0.000263	***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.475 on 65 degrees of freedom

(12 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.4572, Adjusted R-squared: 0.4238

F-statistic: 13.69 on 4 and 65 DF, p-value: 0.00000003775



## ANNEXE VI

### Sorties R : Régressions de Stepwise entre les indicateurs environnementaux pouvant expliquer la variabilité du PMG et du nombre de tiges fructifères.

Sortie R régression de Stepwise entre les indicateurs environnementaux et le PMG Anova au seuil de 5%.

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -0.457334   0.001552  -294.6  <2e-16 ***
Stress.Hydryque..DF.GB.  1.458272   0.001523   957.6  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2974 on 1048417 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4666,    Adjusted R-squared:  0.4666
F-statistic: 9.171e+05 on 1 and 1048417 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Sortie R régression de Stepwise entre les indicateurs environnementaux et le nombre de tiges fructifères Anova au seuil de 5%.

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   315.7222    35.2177   8.965 9.63e-12 ***
X.J.T.20.C..DF.GB.  -2.8616     0.5859  -4.884 1.24e-05 ***
Quotient..DF.30j.  -1.0746     0.2544  -4.224 0.000109 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 34.76 on 47 degrees of freedom
(1048339 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.4551,    Adjusted R-squared:  0.4319
F-statistic: 19.63 on 2 and 47 DF,  p-value: 0.000000636
```

	Diplôme: Master Mention : Biologie Végétale (BV) Parcours : Semences et Plants
Auteur(s) : Lusson Dorian	Organisme d'accueil : FNAMS
Date de naissance* : 29/06/1995	Adresse : Impasse du Verger
Nb pages : 30      Annexe(s) : 6	49800 Brain sur l'Authion
Année de soutenance : 2018	Maître de stage : Ravenel Coraline
<p><b>Titre français : Détermination des facteurs limitants du rendement grainier de la luzerne porte-graine par analyse d'un réseau d'essais.</b></p> <p><b>Titre anglais : Determination of limiting factors of seed yield of alfalfa by analysis of trials network.</b></p>	
<p><b>Résumé:</b> Le rendement grainier de la luzerne porte-graine est très sensible aux variations agro-climatiques entraînant une irrégularité de rendement dans l'espace et dans le temps. Afin de connaître au mieux les causes de cette variabilité, un réseau d'essais a été mis en place par la FNAMS depuis 2012. L'analyse des composantes du rendement permet de montrer que la fluctuation est due principalement au nombre de graines par inflorescence (<math>r=0.435</math>) (graines/gousse x gousses/inflorescence) et au nombre de tiges fructifères/m<sup>2</sup> (<math>r=0.235</math>). L'impact des facteurs climatiques sur ces composantes permettent d'expliquer environ 50% de la variabilité. En effet, les précipitations, le déficit hydrique pendant la floraison et le quotient photothermique 30 jours avant floraison ont un effet négatif sur l'élaboration de ces composantes. Les ravageurs comme le tychius impact le nombre de graines par inflorescence. De plus, des températures optimales comprises entre 20 et 30 °C sont nécessaires pour favoriser l'activité des pollinisateurs. Par ailleurs, le choix de la densité de semis, de l'écartement et la précoupe sont des pratiques culturales pouvant être modifiées et adaptées pour favoriser la mise en place des composantes. Cependant, les conditions climatiques étant variables d'une année sur l'autre et d'une région à l'autre, il paraît nécessaire d'adapter la date de précoupe qui semble être la seule pratique pouvant limiter les stress durant la période de floraison et d'optimiser les températures pour l'activité des pollinisateurs.</p>	
<p><b>Abstract:</b> The seed yield of alfalfa is very sensitive to agro-climatic variations, resulting in uneven in a yield in space and time. In order to better understand the causes of this variability, a trial network has been set up by FNAMS since 2012. The analysis of the yield components shows that the fluctuation is mainly due to the number of seeds per inflorescence (<math>r = 0.435</math>) (seeds/pod x pods/inflorescences) and the number of fruiting stems / m<sup>2</sup> (<math>r = 0.235</math>). The impact of climatic factors on these components explains about 50% of the variability. Precipitation, water deficit during flowering and the photothermal quotient 30 days before flowering have a negative effect on the development of these components. Pests like tychius affect the number of seeds per inflorescence. In addition, optimum temperatures between 20 and 30 °C are required to promote pollinator activity. Moreover, the choice of the density of sowing, the spacing and the cutting are cultural practices that can be modified and adapted to favor the setting up of the components. However, the climatic conditions being variable from one year to another and from one region to another, it is necessary to adapt the cutting schedule, which seems to be the only practice that can limit stress during the flowering and optimize temperatures for pollinator activity.</p>	
<p><b>Mots-clés:</b> Luzerne, Rendement grainier, Composantes du rendement, Conditions climatiques, Précoupe, Réseau d'essais</p>	
<p><b>Key Words:</b> Alfalfa, Seed Yield, Yield components, Weather conditions, Cutting, Trials network</p>	

