



**HAL**  
open science

## Analyse des facteurs limitant le rendement lavandicole en présence d'une couverture végétale inter-rang

Kelvin Sage

► **To cite this version:**

Kelvin Sage. Analyse des facteurs limitant le rendement lavandicole en présence d'une couverture végétale inter-rang. Amélioration des plantes. 2020. dumas-03641991

**HAL Id: dumas-03641991**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03641991v1>**

Submitted on 14 Apr 2022

**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.

## Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome

Option : Production Végétale Durable

### Analyse des facteurs limitant le rendement lavandicole en présence d'une couverture végétale inter-rang



Par Kelvin SAGE

Année de soutenance : 2020

Organisme d'accueil : Centre Régionalisé Interprofessionnel d'Expérimentation en Plantes à Parfum Aromatiques et Médicinales (CRIEPPAM)

# **Mémoire de fin d'études**

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome

Option : Production Végétale Durable

## **Analyse des facteurs limitant le rendement lavandicole en présence d'une couverture végétale inter-rang**



Source : CRIEPPAM

**Par Kelvin SAGE**

**Année de soutenance : 2020**

**Mémoire préparé sous la direction de :  
Léo GARCIA**

**Présenté le 10/09/2020**

**Devant le jury :**

**Aurélie METAY**

**Gaëlle DAMOUR**

**Organisme d'accueil : Centre  
Régionalisé Interprofessionnel  
d'Expérimentation en Plantes à  
Parfum Aromatiques et Médicinales  
(CRIEPPAM)**

**Maitre de stage : Thomas COSTES**

## Résumé

La France est le premier producteur d'huile essentielle de lavandin avec 90% de la production mondiale. Cependant, les cultures de lavandins sont actuellement touchées à la fois par le phytoplasme du Stolbur et par les évolutions climatiques en cours dans la région méditerranéenne, et nécessitent d'être plus résilientes face aux aléas climatiques et aux bio-agresseurs tout en étant aussi productives. C'est pour répondre à ces enjeux que le projet CASDAR RECITAL expérimente différentes gestions de l'inter-rang en parcelle de lavandin. Les couverts végétaux inter-rang testés et comparés à un témoin sol nu sont les suivants : triticale, mélange de légumineuses, mélange de légumineuses et de triticale et un mélange d'espèces gélives. Pour comparer les systèmes entre eux, plusieurs variables sont suivies sur toute la durée du projet : état hydrique et azote minéral du sol, température du sol, azote foliaire du lavandin, volume des plants, rendement, dépérissement, suivi de *Hyalosthes obsoletus* et recouvrement de l'inter rang. Le couvert d'espèces gélives n'est pas une réussite car il s'implante très mal, au contraire des autres couverts. La totalité des couverts qui s'implantent réduisent le rendement en huile essentielle du fait de concurrences pour les ressources disponibles dans le sol. Le couvert de triticale semble être le moins concurrent. L'état de stress hydrique du lavandin a été estimé lorsque le sol dispose de moins de 30 mm de réserve utile en eau. Et cet état de stress hydrique est atteint de l'ordre d'une semaine plus tôt pour ces couverts par rapport au témoin sol nu. Le rendement en huile essentielle est principalement déterminé par le volume des plants mesuré en sortie d'hiver et dans une moindre mesure par l'azote foliaire du lavandin au mois de juin. Le volume des plants met en évidence les concurrences qu'il existe entre les couverts inter-rang et le lavandin.

Les couverts inter-rang permettent aussi de réduire la présence de *H. obsoletus* qui est le vecteur du phytoplasme du Stolbur, responsable du dépérissement. Cela permet de diminuer la proportion de plants contaminés par le dépérissement. La mise en place de couverts végétaux inter-rang est un bon levier agronomique qui permet la durabilité des parcelles de lavandin dans le temps, mais qui diminue le rendement les premières années de production.

Mots clés : lavandin, dépérissement, couvert végétal, nutrition azotée, stress hydrique, rendement, huile essentielle

## Abstract

France is the leading producer of lavandin essential oil with 90% of the world's production. Currently affected both by the Stolbur phytoplasma and by the climatic changes in the Mediterranean region, lavandin crops need to be more resilient to climatic hazards and bio-aggressors while being equally productive. That's why the CASDAR RECITAL project is testing different management methods for inter-row management in lavandin crops. The inter-row plant cover tested and compared to a bare soil control are as follows: triticale, a legumes' mixture, a legumes and triticale's mixture and a mixture of frost-species. To compare the systems with each other, several variables are measured over the project's duration: soil moisture and mineral nitrogen status, soil temperature, lavender foliar nitrogen, plant volume, yield, dieback, *Hyalosthles obsoletus* monitoring, and inter-row cover. The frost-species cover is not a success because it has poorly developed, unlike the other covers. The totality of inter-row plant cover that grew has reduced the yield of essential oil due to competition for the available soil's resources. The triticale cover appears to be the least competitive. The lavandin's hydric stress has been estimated when the soil has less than 30 mm of useful water reserve. This hydric stress is reached about a week earlier for this cover compared to the bare soil control. The yield in essential oil is mainly determined by the plants' volume measured at the end of winter and to a lesser extent by the foliar nitrogen of lavandin in June. Plant volume highlights the competition between inter-row cover crop and lavandin.

Inter-row cover crop also reduces the presence of *H. obsoletus*, which is the vector of Stolbur phytoplasma, responsible for the dieback. This reduces the proportion of Stolbur contaminated plants. The establishment of inter-row plant cover is a good agronomic lever that allows the sustainability of lavandin crops over time but reduces the yield in the first years of production.

Keywords: lavandin, dieback, inter-row cover crop, nitrogen nutrition, hydric stress, yield, essential oil

## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon maître de stage Thomas Costes pour son encadrement, ses conseils et l'ensemble des connaissances qu'il m'a partagé tout au long de ce stage.

Je remercie également l'ensemble des membres du CRIEPPAM de m'avoir rapidement intégré dans leur équipe et de m'avoir fait découvrir leur travail dans le monde des PPAM. Merci pour l'accueil et les bonnes conditions de travail qui m'ont permis d'évoluer avec vous dans une atmosphère conviviale. Merci à Elsa et Antoine pour votre bonne humeur et d'avoir partagé avec moi ce grand bureau des stagiaires.

Je remercie Léo Garcia pour sa disponibilité et sa grande implication pour répondre à mes interrogations et pour me conseiller dans la rédaction de ce mémoire.

Merci à Elsa, Matthieu et Maxime pour tous ces incroyables moments passés à Manosque et à découvrir les alentours.

Un grand merci à mes parents de m'avoir toujours aidé et suivi lors de ce projet. Également un grand merci à mon oncle pour m'avoir transmis cette passion pour l'agriculture, qui m'a sans aucun doute permis de suivre cette voie.

Pour finir je souhaite remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique PVD pour cette dernière année d'école à SupAgro, qui clôture mes études. Cette dernière année a été très enrichissante et je suis très heureux d'avoir passé du temps avec la promotion PVD 2019. Merci pour la bonne ambiance en salle PVD, pour les pauses café et gâteaux, pour les moments d'échanges et de débats et d'avoir été une très bonne source de motivation.

## Table des matières

Résumé .....	3
Abstract.....	4
Remerciements .....	5
Index des tableaux.....	8
Index des figures .....	9
Liste des abréviations .....	11
1 – Introduction.....	12
2 – Contexte et état de l’art.....	13
2.1 – Importance de la filière Lavande/Lavandin en France.....	13
2.2 – Le lavandin.....	15
2.3 – La production d’huile essentielle par le lavandin .....	16
2.4 – Dépérissement et phytoplasme du Stolbur .....	18
2.5 – Les couverts végétaux inter-rang : les grands principes et intérêts .....	19
2.6 – Le projet CASDAR RECITAL .....	20
2.7 – L’action N°2 du projet Récital au CRIEPPAM.....	21
3 – Problématique .....	21
4 – Matériels et méthodes.....	22
4.1 – Le dispositif expérimental de l’essai .....	22
4.2 – Les variables suivies .....	25
4.2.1 – Le rendement.....	25
4.2.2 – Le dépérissement .....	25
4.2.3 – Le suivi de <i>Hyalesthes obsoletus</i> .....	26
4.2.4 – Le recouvrement de l’inter-rang .....	26
4.2.5 – L’évolution de l’azote minéral dans le sol .....	26
4.2.6 – L’évolution de l’azote foliaire du lavandin .....	27
4.2.7 – Le volume des plants .....	27
4.2.8 – Le gain de diamètre des tiges de lavandin .....	27
4.2.9 – L’humidité et la température du sol .....	27
4.3 – Stratégies d’analyses des données .....	28
4.3.1 – Caractérisation des couverts inter-rang et de la fertilisation azotée .....	28
4.3.2 – Identification des facteurs limitant la production d’huile essentielle de lavandin .....	29
4.3.3 – Elaboration d’un modèle explicatif du rendement en huile essentielle de lavandin.....	30
5 – Résultats.....	30

5.1 – Caractérisation des couverts inter-rang et de la fertilisation azotée .....	30
5.1.1 – Des rendements en huile essentielle différents .....	30
5.1.2 – Le dépérissement à Stolbur .....	33
5.1.3 – Le suivi de <i>Hyalesthes obsoletus</i> .....	35
5.1.4 – Le recouvrement de l’inter-rang .....	36
5.1.5 – Lien entre recouvrement de l’inter-rang et présence de <i>H. obsoletus</i> .....	38
5.1.6 – L’azote du sol .....	38
5.1.7 – L’azote foliaire.....	39
5.1.8 – Le volume des plants .....	40
5.2 – Les facteurs limitant le rendement.....	41
5.2.1 – Caractérisation du stress hydrique du lavandin .....	41
5.2.2 – Rendement et humidité du sol .....	42
5.2.3 – Rendement et température du sol .....	43
5.2.4 – Prédiction du rendement .....	43
6 – Discussion.....	44
6.1 – Les effets des couverts inter-rang et de la fertilisation azotée sur la physiologie du lavandin.....	44
6.1.1 – Des rendements en huile essentielle fortement liés à la quantité de matière sèche des épis.....	44
6.1.2 – Le volume des plants de lavandin traduit une concurrence avec les couverts inter-rang.....	45
6.1.3 – Concurrence pour l’azote et couverture inter-rang.....	45
6.2 – Lutte contre <i>H. obsoletus</i> et le dépérissement à Stolbur .....	46
6.2.1 – Un suivi du dépérissement sur les premières années de la durée de vie d’une parcelle de lavandin.....	46
6.2.2 – Des populations de <i>H. obsoletus</i> variables.....	46
6.3 – Des biais liés au dispositif expérimental et matériel et méthodes .....	47
6.4 – Estimation du stress hydrique et lien avec le rendement .....	48
6.5 – Stress azoté et rendement .....	50
6.6 – Le modèle explicatif du rendement en huile essentielle .....	50
7 – Conclusion .....	51
Références bibliographiques .....	52
Annexes.....	57



## Index des tableaux

Tableau 1 : Périodes pendant lesquelles les 5 modalités de couvert inter-rang possèdent au moins une répétition des données d'humidité et de température. ....	28
Tableau 2 : Synthèse des p-value obtenues pour chaque facteur de l'ANOVA « Variable rendement ~ Couvert * Fertilisation » .....	31
Tableau 3 : Synthèse des p-value obtenues pour chaque test exact de Fisher, testant les facteurs « couvert » et « fertilisation » indépendamment. ....	33
Tableau 4 : Synthèse des p-value obtenues pour les $\chi^2$ testant l'effet de chaque facteur de la loi de Poisson « Nombre de H. obsoletus ~ Couvert * Fertilisation ». Les « / » indiquent un manque de données pour les modalités « sans fertilisation azotée ».....	35
Tableau 5 : Synthèse des p-value obtenues pour chaque facteur de l'ANOVA « Volume des plants ~ Couvert * Fertilisation ». Toutes les p-values sont issues de tests de Kruskal-Wallis, sauf celles du facteur d'interaction.....	40
Tableau 6 : Synthèse des corrélations établies entre les indicateurs du rendement et la proportion de mesures d'humidité du sol supérieure au seuil d'humidité qui donne la meilleure corrélation, en vert les corrélations significatives et en orange celles qui le sont presque .....	43
Tableau 7 : Synthèse des corrélations établies entre les indicateurs du rendement et la proportion de mesures de température du sol selon le seuil de température qui donne la meilleure corrélation, en vert les corrélations significatives et en orange celles qui le sont presque .....	43

## Index des figures

Figure 1 : Répartition des surfaces PPAM en France métropolitaine par principaux bassins de production en 2018. D'après (FranceAgriMer 2018) .....	14
Figure 2 : Répartition des surfaces (ha) par commune en lavande et lavandin en 2018. D'après (FranceAgriMer 2018).....	14
Figure 3 : Cartes des zones de présence à l'état naturel de la lavande fine (A), de la lavande aspic (B) et du lavandin (C). D'après (Upson et Andrews 2004) .....	15
Figure 4 : Détail d'une cyme de lavandin .....	15
Figure 5 : Description de l'inflorescence de lavandin. D'après (Upson et Andrews 2004), dessiné par Georita Harriott. ....	16
Figure 6 : Structure d'un trichomes glandulaire pelté. D'après (Iriti et al. 2006).....	16
Figure 7 : Photo au microscope d'une coupe transversale d'un calice de lavandin colorée au réactif Nadi. Modifié d'après (Guitton et al. 2010b). Vue générale de la coupe transversale du calice (A) et agrandissement sur un trichome glandulaire pelté (B).....	17
Figure 8 : Coupes colorées d'un trichome glandulaire pelté chargé d'huile essentiel avant distillation (A) et déchirée après distillation (B). Photos de A. Perrin et M. Colson, Professeurs du Laboratoire BVPAM, Université de St-Etienne.....	17
Figure 9 : Photo de <i>Hyalesthes obsoletus</i> . Source : CRIEPPAM 2016 .....	18
Figure 10 : Cycle biologique de <i>H. obsoletus</i> sur lavande ou lavandin. D'après ITEIPMAI .....	18
Figure 11 : Dispositif expérimental sur le site du CRIEPPAM .....	23
Figure 12 : Dispositif expérimental sur le site de l'ITEIPMAI .....	23
Figure 13 : Itinéraire technique simplifié mis en place sur les parcelles expérimentales .....	24
Figure 14 : Illustration des symptômes associés à chaque note de dépérissement à Stolbur lors de la pleine floraison, par Thomas COSTES.....	25
Figure 15 : Echelle de notation du dépérissement à Stolbur .....	26
Figure 16 : Zones de prélèvement des échantillons d'azote du sol pour une modalité. D'après rapport de stage Robin .....	27
Figure 17 : Stades phénologiques et étapes importantes du développement du lavandin. Source personnelle .....	30
Figure 18 : Récapitulatif des rendements moyens obtenus sur chaque modalité de couvert inter-rang, pour chaque site et année. Les barres d'erreur représentent les écarts-types et les lettres des groupes constitués par différences significatives au seuil alpha = 5 %. Moyennes et écarts-types calculés indépendamment des modalités de fertilisation azotée.	31
Figure 19 : Récapitulatif des rendements moyens obtenus sur chaque modalité de fertilisation azotée, pour chaque site et année. Moyennes et écarts-types calculés indépendamment des modalités de couvert inter-rang. ....	32
Figure 20 : Matière sèche des épis (A) et teneur en huile des épis (B) selon la modalité de couvert en place. ....	32
Figure 21 : Matière sèche des épis (A) et teneur en huile des épis (B) selon la modalité de fertilisation azotée en place.....	33
Figure 22 : Evolution des proportions d'individus appartenant à chaque classe de sévérité des symptômes de dépérissement selon les modalités de couvert, au CRIEPPAM. ....	33
Figure 23 : Evolution des proportions d'individus appartenant à chaque classe de sévérité des symptômes de dépérissement selon les modalités de fertilisation azotée, au CRIEPPAM. ....	34
Figure 24 : Evolution des proportions d'individus appartenant à chaque classe de sévérité des symptômes de dépérissement selon les modalités de couvert, à l'ITEIPMAI.....	34

Figure 25 : Evolution des proportions d'individus appartenant à chaque classe de sévérité des symptômes de dépérissement selon les modalités de fertilisation azotée, à l'ITEIPMAI.	35
Figure 26 : Cumul hebdomadaire du nombre de <i>H. obsoletus</i> capturé par site de 2017 à 2019.	35
Figure 27 : Cumul du nombre total de <i>H. obsoletus</i> capturé par piège, par année et par site selon le couvert inter-rang. Chaque point représente un piège, et le losange noir correspond à la moyenne par modalité de couvert.	36
Figure 28 : Cumul du nombre total de <i>H. obsoletus</i> capturé par piège, par année et par site selon la fertilisation azotée. Chaque point représente un piège, et le losange noir correspond à la moyenne par modalité de fertilisation.	36
Figure 29 : Suivi du pourcentage de recouvrement par les différents couverts, les adventices et un mulch de biomasse de 2017 à 2019, au CRIEPPAM (A) et à l'ITEIPMAI (B).	37
Figure 30 : Variabilité de pourcentage de recouvrement par les couverts (A) et par les adventices (B) selon la fertilisation azotée, de 2017 à 2019, au CRIEPPAM et à l'ITEIPMAI. Les « * » témoigne d'une différence significative (alpha = 5 %), après un test de Kruskal-Wallis. Les losanges noirs représentent la moyenne de la modalité en question.	37
Figure 31 : Régression non-linéaire entre le pourcentage de recouvrement par les couverts en juillet 2018 et le nombre de <i>H. obsoletus</i> capturé en 2018 sur chaque modalité de couvert. La courbe rouge correspond à la courbe de régression non-linéaire.	38
Figure 32 : Evolution de la concentration de nitrate dans le sol des deux sites expérimentaux, de 2017 à 2019, par modalité de couvert et de fertilisation.	39
Figure 33 : Evolution de la concentration d'azote foliaire sur les deux sites expérimentaux, de 2017 à 2019, par modalité de couvert et de fertilisation.	39
Figure 34 : Volume des plants de lavandin selon le couvert végétal inter-rang. Les différentes lettres forment des groupes significativement différents (au seuil alpha = 5 %). Les losanges noirs représentent la moyenne obtenue pour une modalité de couvert.	40
Figure 35 : Volume des plants de lavandin selon le niveau de fertilisation azotée. Les différentes lettres forment des groupes significativement différents (au seuil alpha = 5 %). Les losanges noirs représentent la moyenne obtenue pour une modalité de couvert.	41
Figure 36 : Mise en relation des données de précipitations (A), de gain de diamètre du tronc d'un lavandin (B) et de l'humidité du sol (C). Toutes ces données concernent la modalité « Témoin – Fertilisation azotée », en 2019. Le rectangle orange représente la période de stress hydrique du lavandin, et la barre verticale violette représente le jour de la récolte.	42
Figure 37 : Mise en relation des données de précipitations (A), de gain de diamètre du tronc d'un lavandin (B) et de l'humidité du sol (C). Toutes ces données concernent la modalité « Légumineuses – Fertilisation azotée », en 2019. Le rectangle orange représente la période de stress hydrique du lavandin, et la barre verticale violette représente le jour de la récolte.	42
Figure 38 : Confrontation des données réellement observées (les points) avec les données prédites par le modèle explicatif du rendement en huile essentielle (les lignes).	44

## Liste des abréviations

CASDAR : Compte d'affectation spécial pour le développement agricole et rural

CRIEPPAM : Centre interprofessionnel d'expérimentation en plantes à parfum aromatiques et médicinales

F : Modalité « Fertilisation azotée »

FTSW : Fraction d'eau du sol transpirable

Gelif : Modalité « gélif »

INN : Indice de Nutrition Azotée

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

ITEIPMAI : Institut technique interprofessionnel des plantes à parfum, médicinales et aromatiques

Leg : Modalité « mélange de Légumineuses »

PépiPIAF : Système de surveillance et d'expertise de la croissance des plantes et des arbres

PIAF : Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant

PPAM : Plantes à Parfums, Aromatiques et Médicinales

RECITAL : Réponses aux évolutions climatiques par l'innovation et les techniques alternatives dans les lavanderaies

SF : Modalité « Sans Fertilisation azotée »

Triti : Modalité « Triticale »

T+L : Modalité « mélange de triticale et de légumineuses »

UMR : Unité Mixte de Recherche

## 1 – Introduction

La région méditerranéenne du sud de la France est touchée par le changement climatique : de 1970 à 2009, le climat méditerranéen s'est étendu de 250km vers le nord de la France (Lelièvre et al. 2011). Ces modifications se caractérisent par une augmentation des températures et d'une diminution des précipitations en période estivale (Giorgi et Lionello 2008). Par conséquent, les productions agricoles ont besoin de s'adapter au changement climatique. La filière lavandicole française n'échappe pas à ces mutations climatiques puisque leurs effets s'ajoutent au problème du dépérissement à phytoplasme et l'amplifie. Or, la France est le 1<sup>er</sup> producteur mondial d'huile essentielle de lavandin : elle réalise 90% de la production mondiale (PPAM de France). La France est aussi le 2<sup>nd</sup> producteur d'huile essentielle de lavande fine, derrière la Bulgarie (FranceAgriMer 2019). L'intérêt économique de la filière lavandicole est donc très important en Provence et permet aussi le développement du tourisme. C'est pour cela que des innovations culturelles agroécologiques sont nécessaires pour pallier les difficultés de production. L'objectif principal est d'accroître la résilience des cultures de lavandes et lavandins face au climat et aux bio-agresseurs.

Aujourd'hui la lutte contre le dépérissement à phytoplasme du Stolbur apparaît comme essentielle puisque les symptômes sont exacerbés par les épisodes récurrents de sécheresse. De plus, les problèmes d'érosion et de qualité des sols sont aussi d'actualité en lavandiculture du fait de l'intensité d'évènements climatiques. Les cultures de lavandes et lavandin permettent de cultiver des zones peu propices à l'agriculture comme les sols pauvres et séchants. Ces problèmes climatiques et de dépérissement affectent de manière plus intense les cultures de lavandes que les cultures de lavandins, mais les méthodes envisagées pour rendre plus résilientes ces cultures s'appliquent aux deux espèces. Il y a une trentaine d'années, le 1<sup>er</sup> levier utilisé contre les problèmes de dépérissement était la sélection variétale : au moment où la variété de lavandin Abrial était très sensible au dépérissement à Stolbur, la variété de lavandin Grosso s'est avérée plus tolérante et plus productive (Chaisse et al. 2013), ce qui a largement diffusé son utilisation. La lutte chimique contre l'insecte vecteur *Hyalesthes obsoletus* qui est le vecteur du dépérissement à Stolbur est impossible puisque sa période de présence coïncide avec la floraison du lavandin et cela a pour conséquence de détériorer la qualité de l'huile essentielle produite (Yvin et al. 2017). Actuellement, le déploiement de plants sains indemnes de maladies lors des nouvelles plantations constitue une des méthodes de lutte utilisable contre ce dépérissement (utilisation depuis 2010 environ) (CRIEPPAM 2016). Actuellement, environ 50% des plantations sont issues de plants sains. Cependant, ces plants sains ne sont pas à l'abri des contaminations au champ et montrent donc leurs limites. Le 3<sup>ème</sup> levier envisageable pour lutter contre le dépérissement du lavandin est la mise en place d'une couverture végétale inter-rang dès les 1<sup>ères</sup> années de culture. Les premières expérimentations réalisées au CRIEPPAM ou à l'ITEIPMAI permettent d'affirmer que cette gestion de l'inter-rang diminue en moyenne de 50% les phénomènes de dépérissement (Costes 2020). Pour finir, aucun moyen de lutte biologique n'est actuellement disponible contre *H. obsoletus*.

C'est dans un contexte de changement climatique et de l'intérêt de l'utilisation d'une couverture végétale inter-rang pour plusieurs objectifs que le projet CASDAR RECITAL a été créé. Ce projet permettra notamment d'identifier des stratégies de gestion de l'inter-rang en lavanderaie qui permettent de rendre ces productions plus résilientes face au climat et au dépérissement à Stolbur, tout en ayant un niveau de production acceptable. De plus, au cours de cette expérimentation, des connaissances sur la physiologie du lavandin dans des contextes

climatiques différents seront acquises. Le projet RECITAL se décompose en trois actions qui sont de déterminer les effets du stress hydrique sur la croissance du lavandin, améliorer la gestion de l'inter-rang, et enfin valoriser les résultats en les diffusant auprès des producteurs.

Plus particulièrement, les objectifs de cette 2<sup>ème</sup> action sont de sélectionner les modes de gestions de l'inter-rang les mieux adaptés pour garantir un confort hydrique et azoté pour la production lavandicole dans le contexte de changement climatique, limiter et perturber le développement du ravageur xérophile *H. obsoletus* et permettre une maîtrise durable des adventices. Finalement, cette action a pour volonté d'identifier les facteurs limitant la production lavandicole en présence de couverture végétale inter-rang. Et aussi de caractériser les effets de chaque couvert végétal inter-rang testé ainsi que des effets d'une fertilisation azotée.

## 2 – Contexte et état de l'art

### 2.1 – Importance de la filière Lavande/Lavandin en France

Les huiles essentielles de lavande fine, de lavande aspic, de lavandin et plus généralement du genre *Lavandula* sont utilisées depuis des siècles pour des usages thérapeutique ou cosmétiques car elles sont réputées pour avoir des propriétés antiseptiques (Cavanagh et Wilkinson 2002). A partir du 19<sup>ème</sup> siècle, l'activité de cueillette de la lavande à l'état sauvage se développe en Provence (Despinasse 2015), afin de profiter aux familles les plus pauvres (Chaise et al. 2014). Puis, au début du 20<sup>ème</sup> siècle, la production s'organise sous l'incitation des parfumeurs de Grasse, qui exercent une demande croissante en huile essentielle de lavande (CIHEF). De plus, cette production permet d'utiliser des terres peu fertiles et souvent arides où d'autres cultures ne sont pas possibles (CIHEF).

La lavande fine produit une huile essentielle de haute qualité qui est plutôt utilisée dans le cosmétique et la parfumerie de luxe. Alors que le lavandin produit une huile essentielle plus camphrée (Guitton et al. 2010a) et donc de moins bonne qualité, qui est plus utilisée dans les produits d'entretien et d'hygiène comme les lessives, détergents ou savons. La production d'huile essentielle de lavandin est possible à des coûts de production plus faible (CIHEF) que celle de la lavande fine du fait d'une importante différence de rendement.

La filière Plantes à Parfums, Aromatiques et Médicinales (PPAM) occupe en 2018 plus de 53 000 hectares, pour un nombre de 5200 producteurs, répartis en seulement quelques bassins de production (Figure 1). Parmi cette surface de PPAM, on distingue 29 640 hectares de plantes à parfum dont les 3 espèces dominantes sont le lavandin et la lavande avec 25 620 hectares (48,2 % des PPAM) ainsi que la sauge sclérée avec 3 400 hectares (FranceAgriMer 2018). Dans le secteur des PPAM, c'est le secteur des plantes à parfum qui connaît la plus forte croissance, avec une augmentation de plus de 25 % des surfaces depuis 2014 (+ 29 % pour le lavandin et la lavande).

Les cultures de lavandin et lavande se localisent principalement dans le Sud-Est de la France, et surtout en Alpes-de-Haute-Provence (11 456 ha), dans la Drôme (6 840) et dans le Vaucluse (5 575 ha). On distingue trois gros pôles de production : le plateau de Valensole et le Tricastin dans la vallée du Rhône pour le lavandin et le plateau d'Albion pour la lavande et lavandin (Figure 2).

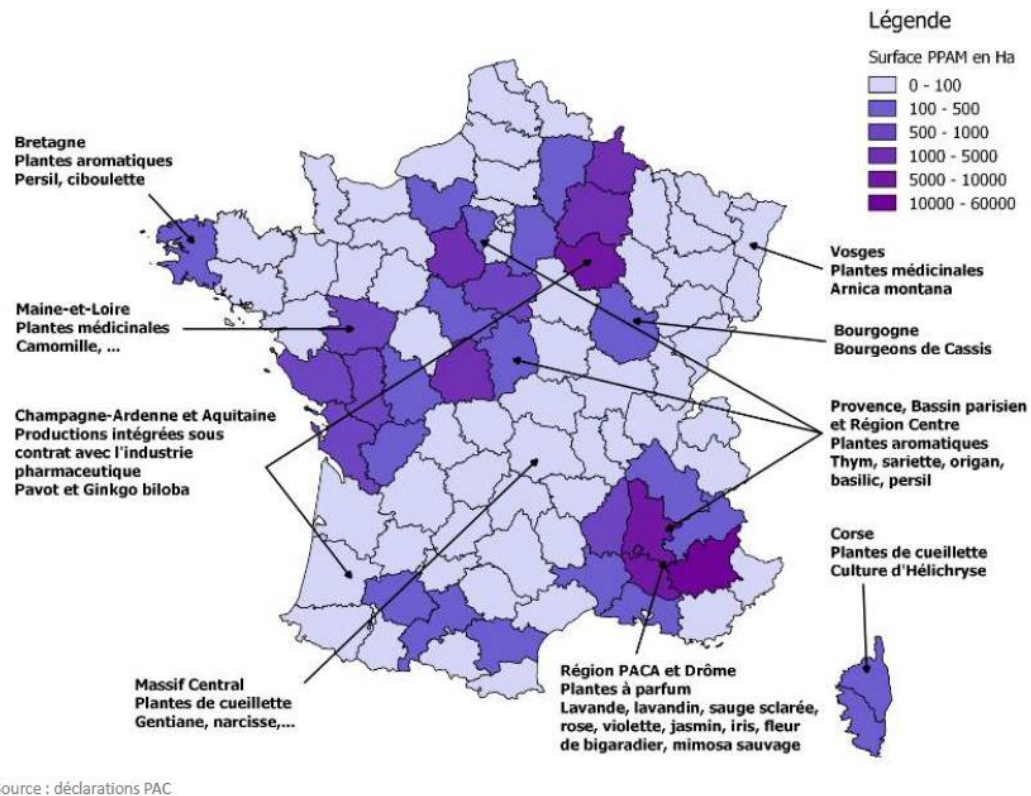


Figure 1 : Répartition des surfaces PPAM en France métropolitaine par principaux bassins de production en 2018. D'après (FranceAgriMer 2018)

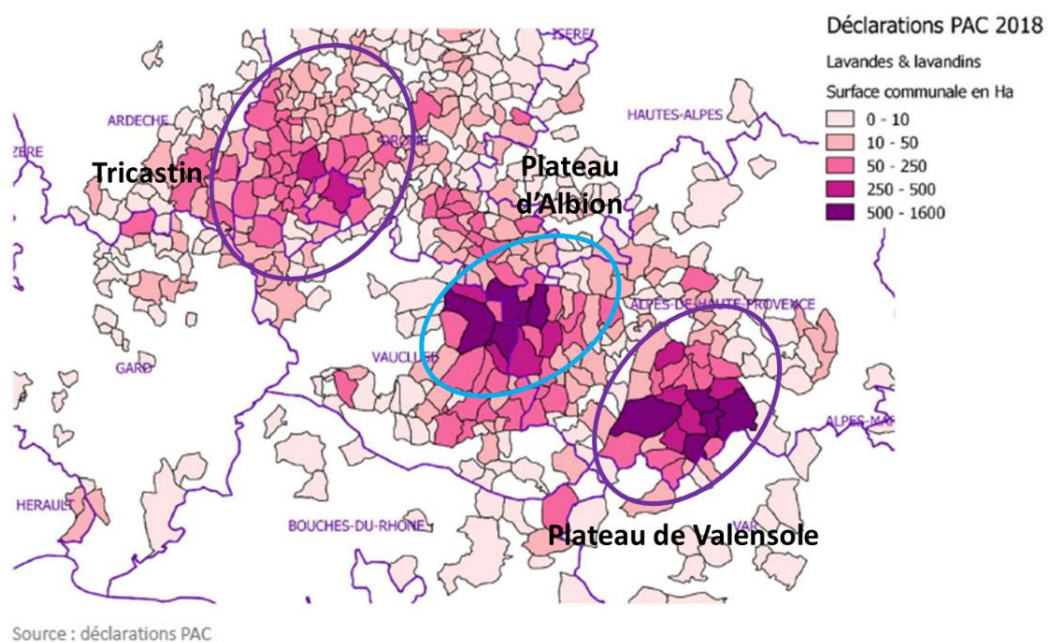


Figure 2 : Répartition des surfaces (ha) par commune en lavande et lavandin en 2018. D'après (FranceAgriMer 2018)

Concernant le lavandin, c'est la variété Grosso qui est la plus représentée avec 84 % des surfaces de lavandin en 2018 (CIHEF 2018), devant les variétés Abrial, Super et Sumian (FranceAgriMer 2018). Cette différence de surface s'explique par la plus forte productivité et une meilleure tolérance au dépérissement de la variété Grosso par rapport aux autres. En surface, le lavandin est plus cultivé que la lavande : en 2013, 16 200 hectares de lavandin cultivé contre 3 800 hectares de lavande fine (Chaisse, Fontaine, et Candaele 2014).

## 2.2 – Le lavandin

Le lavandin appartient à la famille des *Lamiacées*, qui regroupe de nombreuses plantes aromatiques comme le thym, le romarin, le basilic, la sauge, l'origan ou encore la menthe. Parmi l'ensemble des caractéristiques notables de cette famille de plantes, on distingue notamment la présence d'une tige quadrangulaire, d'inflorescences organisées en cymes dont les fleurs sont zygomorphes, de fruits organisés en tétrakène et la production importante de composés organiques volatils pour de nombreuses espèces qui permet l'extraction d'huile essentielle (Schmid et al. 2005). Plus précisément, le lavandin *Lavandula x intermedia* est un hybride interspécifique stérile naturel entre la lavande fine *Lavandula angustifolia* et la lavande aspic *Lavandula latifolia*. Ces trois espèces appartiennent toutes au genre *Lavandula*, qui regroupe 39 espèces présentes naturellement dans la zone méditerranéenne (Upson et Andrews 2004). Le genre *Lavandula* pousse naturellement dans des sols pauvres, arides, avec une forte charge en cailloux et un pH plutôt basique (pH 7,0 à 9,0) (Upson et Andrews 2004). Le lavandin est un sous-arbrisseau de forme sphérique qui peut atteindre jusqu'à un mètre de haut, sa durée de vie est d'une dizaine d'année maximum. Il est présent à l'état naturel dans les zones de chevauchement de la lavande fine et de la lavande aspic (Figure 3) (Lis-Balchin 2002).

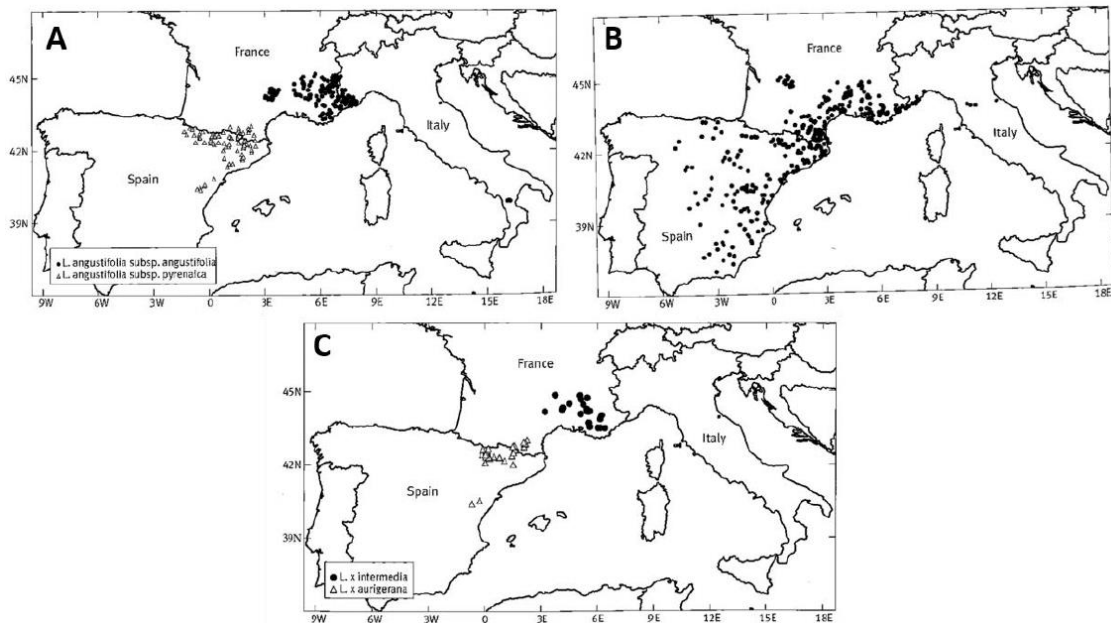


Figure 3 : Cartes des zones de présence à l'état naturel de la lavande fine (A), de la lavande aspic (B) et du lavandin (C). D'après (Upson et Andrews 2004)

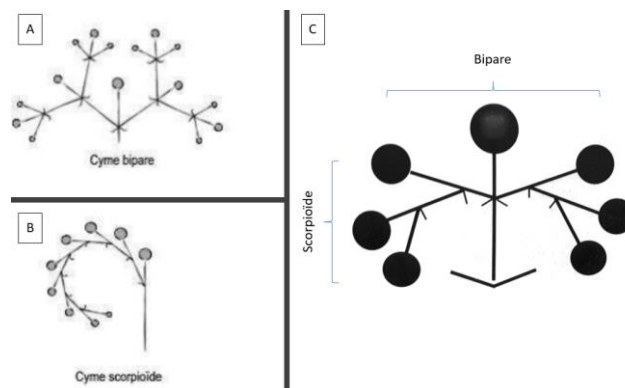
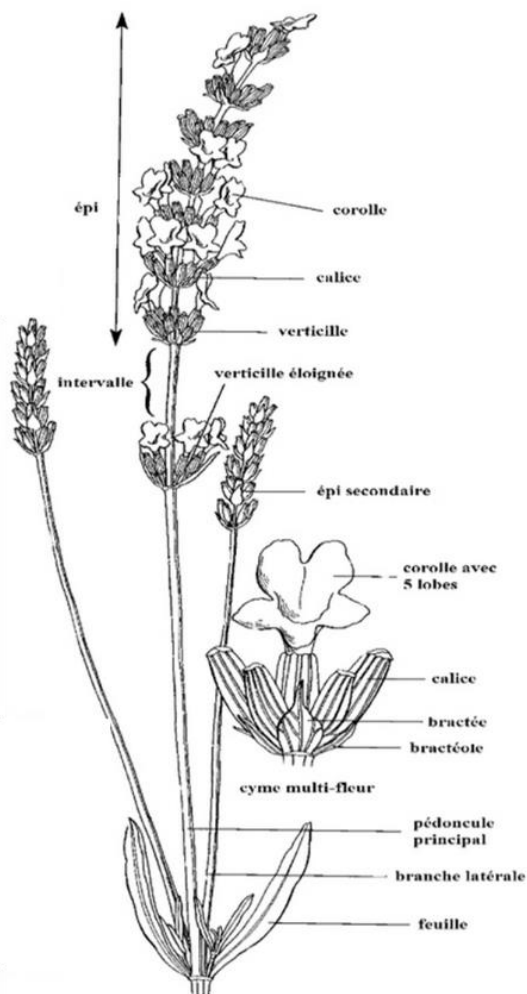


Figure 4 : Détail d'une cyme de lavandin





L'inflorescence du lavandin est à croissance indéterminée, elle est constituée de plusieurs verticilles de paires de cymes : sur chaque verticille de l'épis il y a donc deux cymes opposées l'une de l'autre (Figure 5). Ces cymes comportent un axe principal et sont capables de se ramifier plusieurs fois. Le nombre de fleurs par cyme est toujours impair puisque l'axe principal de la cyme, qui présente une fleur, se ramifie selon une cyme bipare, puis lorsque la place commence à manquer au sein du verticille, la ramification se fait selon une cyme scorpioïde (Figure 4) (Upson et Andrews 2004). A chaque ramification on ajoute donc 2 fleurs à l'inflorescence, ce qui donne un nombre impair de fleurs.

Figure 5 : Description de l'inflorescence de lavandin. D'après (Upson et Andrews 2004), dessiné par Georita Harriott.

### 2.3 – La production d'huile essentielle par le lavandin

L'huile essentielle de lavandin est stockée dans des structures particulières, appelées les trichomes glandulaires (Perrin et Colson 1986). Ces trichomes glandulaires se composent de cellules épidermiques basales, surmontées de 2 cellules sécrétrices pour les trichomes glandulaires capités et de 8 cellules sécrétrices pour les trichomes glandulaires peltés (Iriti et al. 2006). Ces cellules sécrétrices produisent des composés organiques volatiles (des terpènes) qui sont stockés sous leur cuticule (Figure 6), et forment une « tête glandulaire » (en violet sur la Figure 7 (Guitton et al. 2010b)).

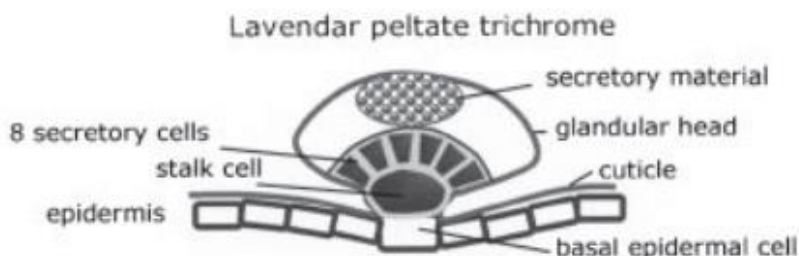


Figure 6 : Structure d'un trichomes glandulaire pelté. D'après (Iriti et al. 2006).

Les trichomes glandulaires sont localisés abondamment à la surface des calices et dans une très faible proportion à la surface des feuilles : la densité de trichomes glandulaire est donc beaucoup plus importante sur les calices que sur les feuilles ou la tige (Jullien et al. 2014). Les calices sont les principaux lieux de formation et de stockage des huiles essentielles

(Guitton et al. 2010a). Pour résumer, les feuilles produisent environ 10 fois moins d'huile essentielle que les inflorescences de lavandin (Guitton et al. 2010a; Jullien et al. 2014).

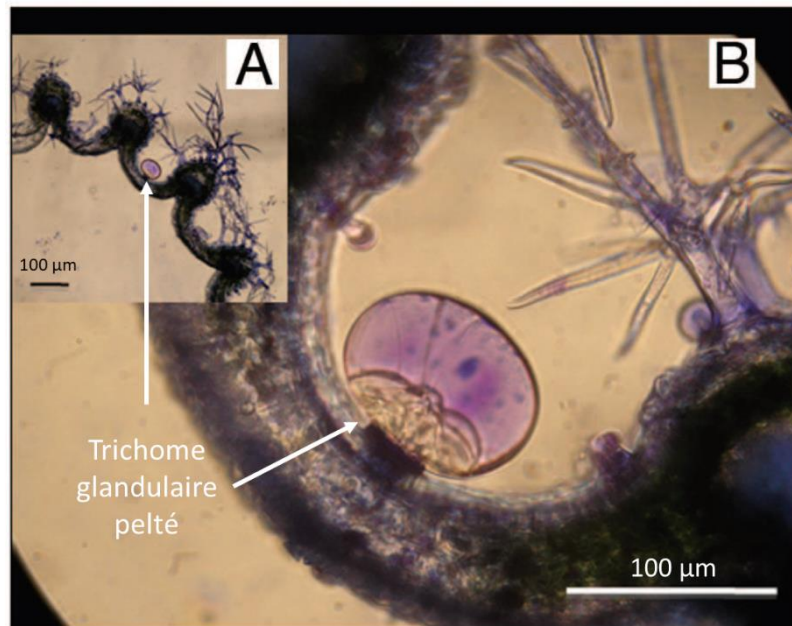


Figure 7 : Photo au microscope d'une coupe transversale d'un calice de lavandin colorée au réactif Nadi. Modifié d'après (Guitton et al. 2010b). Vue générale de la coupe transversale du calice (A) et agrandissement sur un trichome glandulaire pelté (B).

C'est pour cette raison que l'huile essentielle de lavandin est extraite par hydrodistillation des inflorescences, qui portent les calices (Figure 5). Lors de l'hydrodistillation du lavandin, les trichomes glandulaires sont chauffés et déchirés par la vapeur d'eau (Figure 8), ce qui permet l'entraînement des composés organiques volatils dans la vapeur d'eau (Iriti et al. 2006). Ensuite, cette vapeur d'eau chargée de composés organique volatils est condensée par refroidissement. Puis, l'huile essentielle, hydrophobe et plus légère constitue une phase distincte de l'eau, ce qui permet son extraction. Cette huile essentielle est composée d'environ 70 % de monoterpènes et de 30 % de sesquiterpènes (Lis-Balchin 2002). La quantité d'huile essentielle et les proportions relatives de ses différents composants évoluent selon le stade phénologique de l'épis (Guitton et al. 2010a, 2010b).

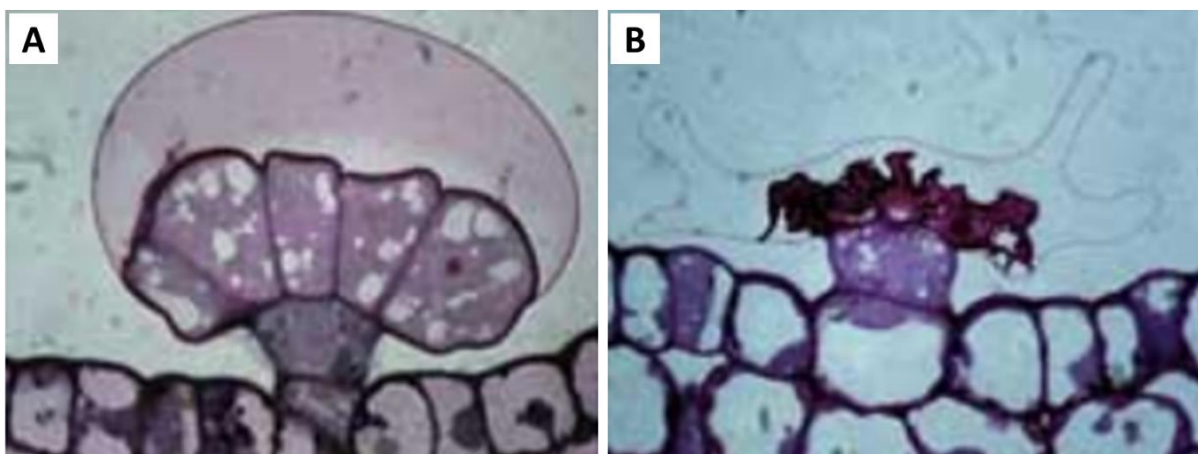


Figure 8 : Coupes colorées d'un trichome glandulaire pelté chargé d'huile essentielle avant distillation (A) et déchirée après distillation (B). Photos de A. Perrin et M. Colson, Professeurs du Laboratoire BVPAM, Université de St-Etienne.

## 2.4 – Dépérissement et phytoplasme du Stolbur

Depuis de nombreuses années, la lavande et le lavandin sont touchés par une maladie appelée communément le dépérissement et apparue au début du 20<sup>ème</sup> siècle (Chaisse et al. 2013). Mais c'est plus tard, vers les années 70-90 que l'on trouve l'origine de cette maladie (Chailan 2013) : l'agent responsable est le phytoplasme du Stolbur (c'est la bactérie *Candidatus Phytoplasma solani*) et l'agent vecteur est un cixiide prénommé *Hyalesthes obsoletus* (Quaglino et al. 2013) (Figure 9). *H. obsoletus*



Figure 9 : Photo de *Hyalesthes obsoletus*. Source : CRIEPPAM 2016

possède une multitude de plantes hôtes et en particulier certaines d'intérêt économique comme la vigne, le tabac ou encore la tomate (Cimerman et al. 2009). C'est un ravageur xérophile qui se développe en climat méditerranéen et c'est le seul à véhiculer le phytoplasme du Stolbur (Sforza et al. 1999): la bactérie est transmise de plante en plante comme décrit dans la Figure 10. Les larves passent l'hiver dans le sol puis lors des premières chaleurs elles se transforment en insectes ailés de juin à août selon les conditions (Panassiti et al. 2013), pour se nourrir de sève dans le phloème du lavandin. Selon les déplacements de ce ravageur, la propagation se fait de proche en proche dans un rayon d'une dizaine de mètres (Kessler, Kehrli, et Schaerer 2010).

Cette maladie entraîne la mort des plants en 1 ou 2 ans, et a provoqué une perte de 40% de la production de lavande ces 10 dernières années, ainsi qu'une diminution de la durée d'exploitation d'une plantation de lavande/lavandin de 15 à 5 ans (Despinasse 2015). Lorsqu'un plant est infecté, le phloème est obstrué et les symptômes qui suivent sont un jaunissement de la plante, un raccourcissement des hampes florales, un arrêt de croissance (donc une baisse de rendement) puis la mort par dessèchement (Lamacque 2020). Il est donc logique dans cette étude de mettre en relation dépérissement et rendement en huile essentielle.

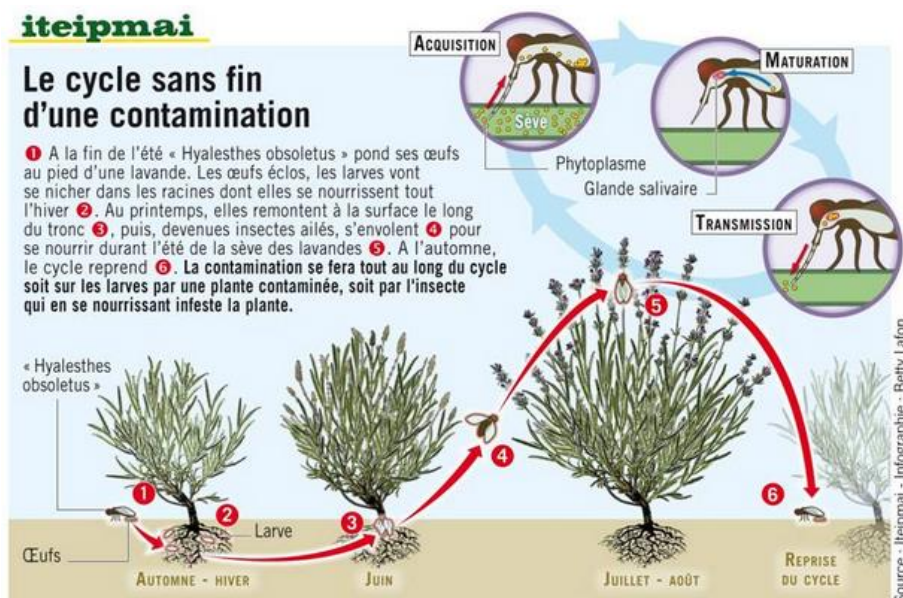


Figure 10 : Cycle biologique de *H. obsoletus* sur lavande ou lavandin. D'après ITEIPMAI

## 2.5 – Les couverts végétaux inter-rang : les grands principes et intérêts

Les couverts végétaux en inter-rang sont constitués d'espèces semées ou spontanées qui poussent volontairement sur une largeur définie de l'inter-rang d'une culture pérenne (cas de la vigne) ou semi-pérenne (cas du lavandin), dans le but de générer des services écosystémiques positifs et satisfaisants pour la production de la culture principale (Ripoche et al. 2010). Dans cette étude nous nous intéressons uniquement aux couverts semés. Selon les objectifs des couverts inter-rang mis en place et selon les conditions en parcelle, ces couverts peuvent être détruits chimiquement, mécaniquement ou simplement non-détruits (Ripoche et al. 2011) : ils ne sont donc pas récoltés.

En système lavandicole l'utilisation des couverts végétaux inter-rang est très peu documentée car seules quelques expérimentations ont eu lieu pour le moment (CRIEPPAM 2014a)). En viticulture, l'utilisation des couverts végétaux est plus ancienne et les services écosystémiques fournis par ces couverts sont assez bien référencés. Pour commencer, une couverture végétale inter-rang permet de limiter l'érosion selon son taux de recouvrement et sa nature (Durán Zuazo et Rodríguez Pleguezuelo 2008; Le Bissonnais et Andrieux 2007). En plus de garantir une protection contre l'érosion des sols, les couverts inter-rang maintiennent une structure des sols et une porosité favorables (Ferrero, Usowicz, et Lipiec 2005; Polge de Combret - Champart et al. 2013). Cela a pour conséquence d'améliorer l'infiltration de l'eau et le rechargement en eau des sols lors des épisodes pluvieux, ce qui peut être bénéfique pour la culture principale (Gaudin, Celette, et Gary 2010). Cependant cette quantité d'eau additionnelle peut être en partie ou totalement transpirée par le couvert inter-rang, ce qui constituerait une compétition pour la ressource en eau (Celette, Gaudin, et Gary 2008). Également, il a été observé qu'un stress hydrique en été diminuait le rendement viticole en année  $n$  et aussi  $n+1$  (Guilpart, Metay, et Gary 2014).

La présence de couvert inter-rang présente l'avantage d'optimiser l'utilisation de l'azote des sols (Tribouillois, Cohan, et Justes 2016) : lors de la croissance du couvert, de l'azote est prélevée et est immobilisée dans la biomasse, ce qui réduit la lixiviation de l'azote. Puis à la suite de la destruction des couverts, cet azote est minéralisé et remis à la disposition de la culture principale. Un mélange composé de légumineuses et de non-légumineuses permet à la fois de réduire la lixiviation de l'azote et à la fois de fournir un engrais vert (Couëdel et al. 2018). La quantité d'azote alors rendue disponible pour la culture associée dépend du rapport C/N du couvert inter-rang (Finney, White, et Kaye 2016). Cependant, les couverts peuvent également diminuer la disponibilité de l'azote pour la culture principale directement et indirectement. En effet la culture et le couvert prélèvent directement de l'azote minéral dans le même compartiment de sol. Également, le couvert inter-rang réduit la minéralisation de l'azote organique du sol en prélevant l'eau du sol, ce qui réduit la disponibilité en azote minéral pour la culture principale (Celette, Findeling, et Gary 2009).

Les couverts inter-rang ont également la capacité d'augmenter la biodiversité en parcelle et ainsi de fournir des habitats pour les ennemis naturels des ravageurs (Zhang et al. 2007). Les couverts inter-rang jouent ainsi un rôle de contrôle biologique des ravageurs (Fiedler, Landis, et Wratten 2008), par modification des systèmes trophiques (Beizhou et al. 2012). En lavandiculture, l'effet des couverts inter-rang sur le dépérissement a été confirmé plus récemment dans des essais conduits par le CRIEPPAM où quatre parcelles sur cinq âgées d'au moins 2 ans observent des taux de dépérissement significativement plus bas avec un couvert inter-rang par rapport à un témoin en sol nu (CRIEPPAM 2014b) : cette diminution du taux de dépérissement est de l'ordre de 50% en moyenne (Costes 2020). Une hypothèse

avancée est que les couverts engendrent un « écran végétal » qui limite les déplacements *H. obsoletus* : 80% de ces insectes volent à moins de 40 cm de hauteur (ITEIPMAI 2012). Toutefois, dans d'autres essais de la Chambre d'Agriculture de la Drôme, le couvert végétal est ras et on observe aussi une tendance à la réduction du dépérissement (CRIEPPAM 2014a). D'autres mécanismes semblent donc intervenir : on peut imaginer que les couverts inter-rang modifient une caractéristique du sol qui est nuisible à la survie des larves de *H. obsoletus*.

Il est aussi attendu que les couverts inter-rang limitent le développement des adventices. Des études montrent que cette diminution de la présence des adventices est particulièrement efficace pendant la période hivernale (Baumgartner, Steenwerth, et Veilleux 2008). En se dégradant, les couverts peuvent relâcher des composés allélochimiques qui ont pour effet de réduire la germination des graines d'adventice ou de réduire leur croissance (Lou, Davis, et Yannarell 2016). La lutte contre les adventices est d'autant plus efficace lorsque le couvert germe et s'implante correctement et qu'il recouvre bien le sol (Miglécz et al. 2015; Tardy et al. 2017).

Cependant, une gestion de la compétition entre le couvert inter-rang et la culture principale reste nécessaire et s'exprime notamment par un choix d'espèces les moins concurrentielles possibles (Delpuech 2013). Les espèces ayant un cycle de croissance décalé par rapport à la culture semblent être les plus intéressantes pour limiter toutes concurrences (Delabays 2006). De plus, une gestion adaptée de l'inter-rang (fauche, date de destruction chimique ou mécanique, ...) doit être établie selon des règles de décision pour essayer de maximiser les services écosystémiques que le couvert peut rendre (Celette et al. 2005 ; Ripoche et al. 2011).

Dans cette étude, les modalités de couverture végétale inter-rang permettent d'évaluer le choix d'espèces peu concurrentielles (triticale), d'espèces de légumineuses (fourniture en azote) et la durée d'implantation (annuelle ou permanente) au regard de la production lavandicole. Nous n'expérimentons pas directement des modes de gestion différents d'un unique couvert.

## 2.6 – Le projet CASDAR RECITAL

Ce programme intitulé RECITAL (Réponses aux Evolutions Climatiques par l'Innovation et les Techniques Alternatives dans les Lavanderaies) a pour ambition de proposer de nouvelles techniques de culture innovantes pour la filière lavandicole. Ce projet est motivé par des objectifs de reconquête de la qualité de l'eau et des sols, de meilleure gestion des adventices, et de lutte contre les ravageurs. Les objectifs de ce CASDAR sont triples :

- Quantifier et évaluer les limites maximales de déficit hydrique supporté par les variétés cultivées est essentielle pour déterminer celles qui sont le mieux adaptées.
- Identifier des modes de gestion de l'inter-rang les mieux adaptés pour garantir une résilience des cultures face au climat, aux conditions hydriques et azotées déficientes, au développement de ravageurs xérophiles comme *H. obsoletus*, et au développement des adventices.
- Diffuser les innovations agroécologiques chez les producteurs.

Ce projet de 42 mois initié en 2017 est conjointement mené par plusieurs partenaires techniques qui sont l'ITEIPMAI, le CRIEPPAM, les Chambres d'Agriculture de la Drôme et du Vaucluse, de l'UMR PIAF de l'INRAE et du Lycée Horticole Terre d'Horizon.

## 2.7 – L’action N°2 du projet Récital au CRIEPPAM

Le CRIEPPAM (Centre interprofessionnel d’expérimentation en plantes à parfum aromatiques et médicinales) est une association loi 1901 qui a été créée en 1994. Il est actuellement composé de 14 employés et compte environ 250 adhérents. Le CRIEPPAM travaille essentiellement sur la filière plantes à parfums, aromatiques et médicinales. Ses missions et axes de travail sont : la recherche agronomique, la production de plants sains certifiés indemnes de maladies, la récolte et transformation, la diffusion de l’information, des formations et enfin des prestations. Depuis sa création, le CRIEPPAM est installé à Manosque dans le département des Alpes-de-Haute-Provence, sur une parcelle expérimentale d’environ 2,5 hectares. Il est situé entre deux gros bassins de production qui sont le plateau de Valensole avec la culture de lavandin et le plateau d’Albion avec principalement la culture de lavande. C’est au CRIEPPAM que se trouve l’une des 2 parcelles expérimentale de l’action n°2 du projet CASDAR RECITAL.

## 3 – Problématique

Le lavandin est une culture emblématique de Provence et elle représente à elle seule pratiquement la moitié des surfaces cultivées de Plantes à Parfums Aromatiques et Médicinales en France. Cependant, l’avenir de cette culture est menacé par un contexte de changement climatique. De plus certaines zones de production sont fortement touchées par des phénomènes de dépérissement qui nuisent à la pérennité des parcelles de lavandin dans le temps. Enfin, de plus en plus soucieux de la qualité des sols et de l’eau, les lavandiculteurs sont demandeurs de nouvelles techniques de cultures. Dans ce contexte, l’utilisation de couverts végétaux inter-rang semble un bon levier agronomique.

Cependant, il est important de s’assurer que ces systèmes de culture innovants soient performants d’un point de vue environnemental et aussi économique. Cette étude tâche de répondre à la problématique suivante :

### **Quels sont les facteurs limitant le rendement lavandicole en présence d’une couverture végétale inter-rang ?**

Pour répondre à cette question, nous étudierons les relations entre les rendements obtenus pour chaque modalité de couvert inter-rang et de fertilisation azotée avec différentes variables mesurées au champ. Par conséquent, le projet RECITAL cherche à mettre en évidence les périodes clés et les facteurs d’intérêt qui sont impliqués dans l’élaboration du rendement en huile essentielle de lavandin.

Pour cela, nous chercherons à comprendre dans un 1<sup>er</sup> temps comment les couverts inter-rang et la fertilisation azotée modifient les variables mesurées au champ. Puis nous étudierons les liens qui peuvent exister entre les variables mesurées tout au long du projet et les données de rendement obtenues en 2018 et 2019. Nous rechercherons toutes les périodes et les variables qui sont liées à des pertes de rendement, ce qui nous permettra de déterminer des facteurs limitant la production d’huile essentielle de lavandin.

## 4 – Matériels et méthodes

### 4.1 – Le dispositif expérimental de l'essai

Le projet CASDAR RECITAL est mené de 2017 à mi-2020, pour une durée totale de 3 ans et demi, sur les sites expérimentaux du CRIEPPAM et de l'ITEIPMAI. Situé à Manosque dans les Alpes-de-Haute-Provence, le site du CRIEPPAM dispose d'un sol limono-argilo-sableux avec 1,26% de matière organique totale (Annexe 1). Le site de l'ITEIPMAI, situé à Montboucher-sur-Jabron dans la Drôme présente un sol sablo-argileux contenant une matière organique totale de 1,41% (Annexe 2). Du fait de leur localisation et de la composition de leur sol, les deux sites expérimentaux de l'action 2 du CASDAR RECITAL ont des contextes pédoclimatiques différents.

Dans cette expérimentation multisite, 4 couvertures végétales d'inter-rang sont testées et comparées à un témoin sol nu : ces 5 modalités constituent le traitement « couverture de l'inter-rang ». Les 5 modalités du traitement « couverture de l'inter-rang » sont les suivantes :

- Témoin (sol nu), noté « Témoin »
- Gélif (mélange d'espèces gélives : 20% gesse, 20% lentille alimentaire, 15% féverole de printemps, 15% phacélie, 15% tournesol, 15% radis fourrager), noté « Gelif »
- Légumineuses (mélange de : 40% Luzerne lupuline, 30% Lotier corniculé, 15% trèfle souterrain var. Rosabrook, 15% trèfle blanc var. nain), noté « Leg »
- Triticale (100%), noté « Triti »
- Triticale (50%) + légumineuses (20% luzerne lupuline, 15% Lotier corniculé, 7,5% trèfle souterrain var. Rosabrook, 7,5% trèfle blanc var. nain), noté « T+L »

En plus du traitement « couverture de l'inter-rang », nous testons les effets d'un 2<sup>nd</sup> traitement « fertilisation azotée » sur le lavandin et la croissance des couverts. Pour cela, 2 modalités sont mises en place : avec fertilisation azotée (noté « F ») ou sans fertilisation azotée (noté « SF »). La fertilisation azotée est comprise entre 40 et 60 unités, elle est apportée sous forme d'engrais minéral (ammonitrate).

Dans la suite de cette étude nous appellerons « sous-modalités » les modalités croisées entre le traitement « couverture de l'inter-rang » et le traitement « fertilisation azotée ». Nous avons donc un total de 10 sous-modalités testées sur chaque site expérimental. L'arrangement spatial des différentes sous-modalités est disposé de manière différente au CRIEPPAM (Figure 11) et à l'ITEIPMAI (Figure 12) : au CRIEPPAM les modalités de couverts sont organisées de manière perpendiculaire aux modalités de fertilisation alors qu'à l'ITEIPMAI les modalités de couvert et de fertilisation sont organisées dans le même sens. Sur le site du CRIEPPAM on peut donc parler d'un dispositif en bandes croisées (criss-cross) (Letourmy 1999), mais pas pour le site de l'ITEIPMAI. Ces dispositifs sont mis en place pour faciliter la gestion mécanique des différentes modalités : il n'y a donc pas de randomisation des modalités. Chaque sous-modalité fait 35m de long, et est composée de deux inter-rang de 1,80m de large et un rang central de lavandin. Chaque modalité est donc délimitée de part et d'autre par un rang intermédiaire de lavandin. La distance de plantation entre deux plants sur le rang est de 60cm.

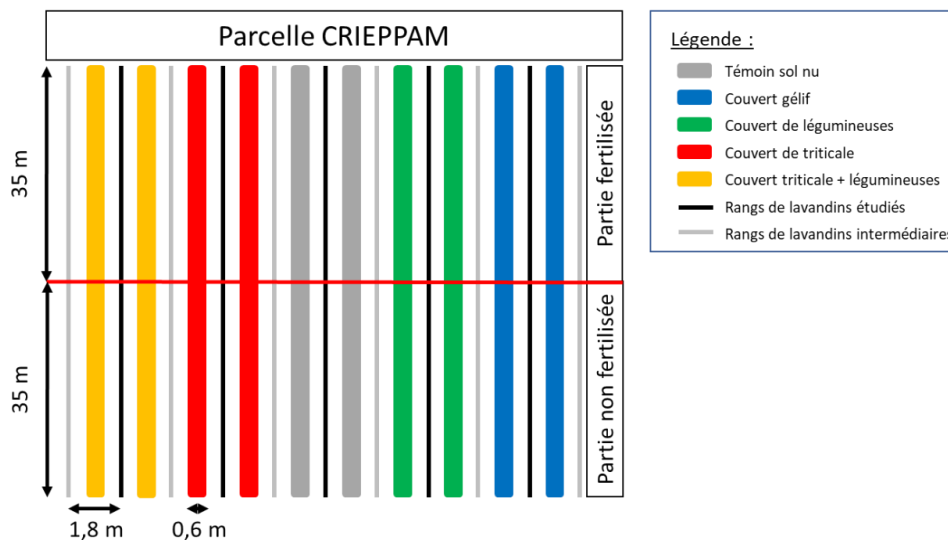


Figure 11 : Dispositif expérimental sur le site du CRIEPPAM

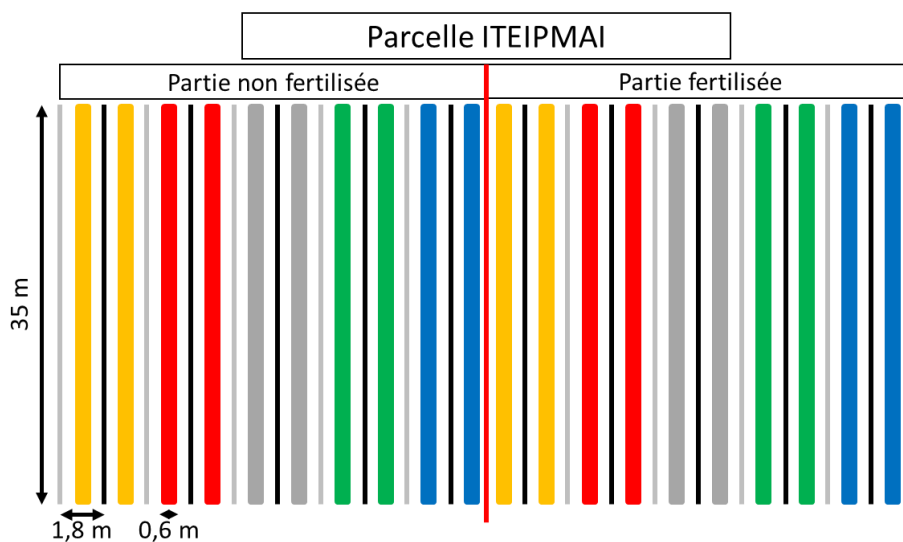


Figure 12 : Dispositif expérimental sur le site de l'ITEIPMAI

Les différents couverts ont été semés à l'automne 2016, avant le début des premières mesures qui ont débutées au début de l'année 2017 : ce choix a été fait pour permettre de récolter des données dès la 1<sup>ère</sup> année d'étude du projet. De plus, cette période d'implantation des couverts permet de limiter les risques de levée liés aux précipitations printanières aléatoires et les couverts sont mieux implantés et plus couvrants qu'un semis de printemps (COSTES, communication personnelle). Les couverts inter-rang sont semés sur une largeur de 60cm pour limiter les concurrences. Sur le rang, les plants sont entretenus de manière conventionnelle avec un entretien chimique pour lutter contre les adventices.

Parfois, les espèces semées sont difficilement sorties et ont donc été re-semées. D'ailleurs, la modalité « Gélif » peut aussi être appelée « Témoin bis » à cause des échecs successifs de ce couvert. Toutes les interventions culturales comme les binages, désherbages, broyages, irrigations, fertilisations ou récoltes sont synthétisées dans la Figure 13.



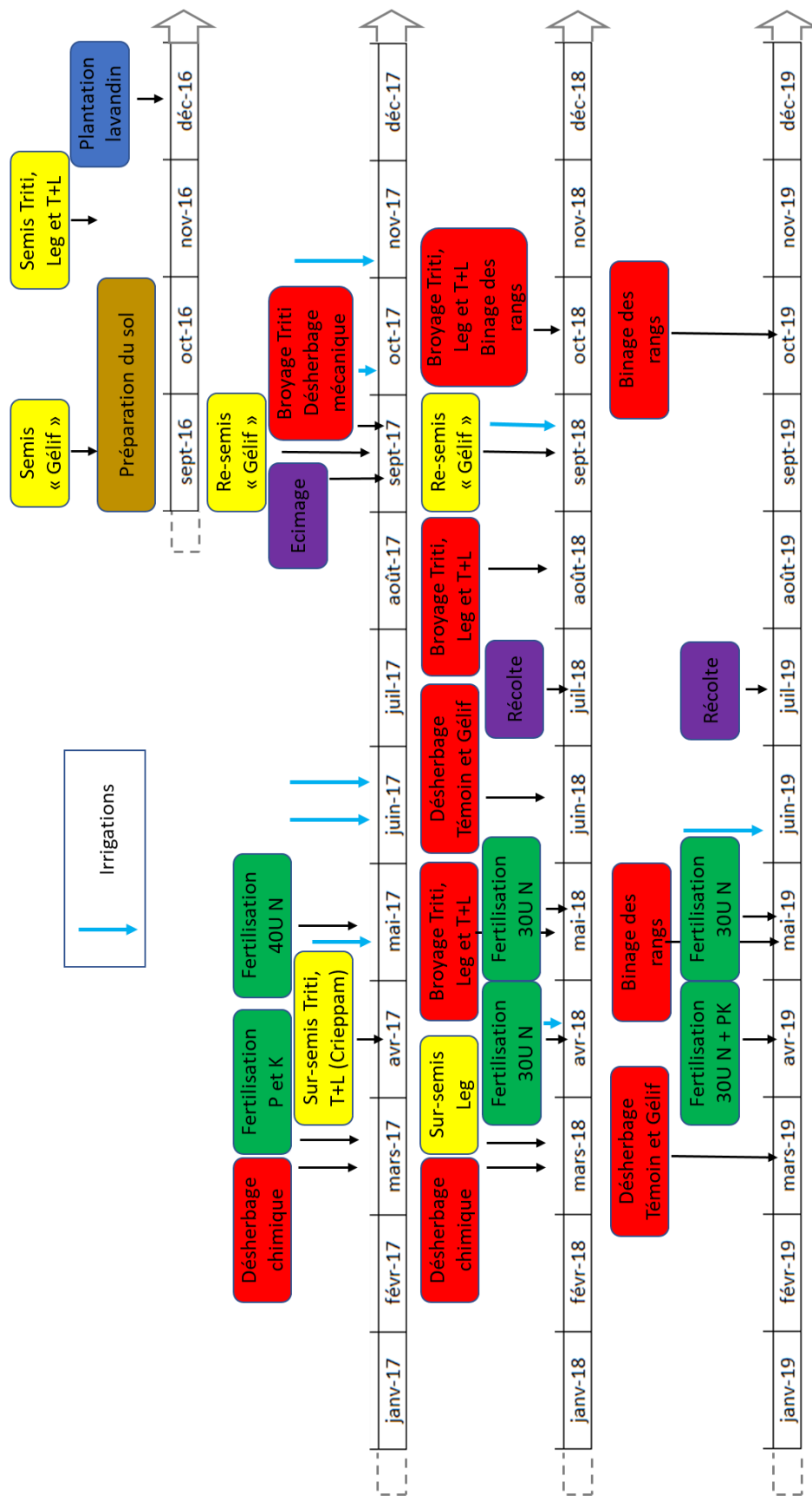


Figure 13 : Itinéraire technique simplifié mis en place sur les parcelles expérimentales

## 4.2 – Les variables suivies

### 4.2.1 – Le rendement

Plusieurs indicateurs de rendements ont été mesurés lors des récoltes 2018 et 2019 : la masse de matière fraîche de hampes, la masse de matière sèche des épis, la teneur en huile essentielle des épis et la quantité d'huile essentielle produite. La masse de matière fraîche des hampes a été obtenue sur 10 mètres de lavandin récolté. Ensuite, sur un échantillon de hampes florales, les épis ont été séparés des hampes et ont été pesés pour obtenir une masse de matière sèche d'épis sur 10 mètres. La teneur en huile essentielle des épis a été issue de la quantité d'huile essentielle (mL) obtenue pour 100g de matière sèche d'épis. Enfin, la quantité d'huile essentielle produite sur 10 mètres a été obtenue par le produit de la teneur en huile essentielle des épis et la quantité de matière sèche d'épis produite sur 10 mètres (Annexe 3). Pour chacune des 10 sous-modalités nous disposons de 3 répétitions de ces indicateurs de rendement.

### 4.2.2 – Le dépérissement

Pour tester l'efficacité des couverts végétaux vis-à-vis du dépérissement à Stolbur, des notations sur l'ensemble des plants du rang central de chaque modalité ont été effectuées 1 à 2 fois par an. Les notations se font généralement au printemps après la 1<sup>ère</sup> reprise végétative ou en pleine floraison. Nous attribuons à chaque plant une note de dépérissement allant de 1 à 4 selon les caractéristiques suivantes (Figure 14 et Figure 15) :

- 1 : la plante est saine, aucun symptôme du dépérissement à Stolbur
- 2 : petite perte de vigueur sur l'ensemble du plant, plus faible proportion de hampes florales, les tiges et les feuilles peuvent être plus fines, léger jaunissement possible
- 3 : forte perte de vigueur, jaunissement du plant, très peu ou absence de hampes florales, des parties de la plante ne redémarrent plus
- 4 : la plante est morte



Figure 14 : Illustration des symptômes associés à chaque note de dépérissement à Stolbur lors de la pleine floraison, par Thomas COSTES



Figure 15 : Echelle de notation du dépérissement à Stolbur

Pour chaque modalité nous avons calculé la proportion d'individus appartenant à chaque note. Nous avons cherché à déterminer si une modalité de couverture végétale ou de fertilisation azotée était responsable de la modification de la distribution des effectifs dans chacune des notes. Pour simplifier les analyses, nous avons regroupé les plants ayant eu une note de 2, 3 et 4 dans une nouvelle classe nommée « plants contaminés » et nous avons constitué un groupe avec les plants de note 1 nommé « plants sains ». En effet, de cette manière nous connaissons directement la proportion d'individus touchés par le phytoplasme du Stolbur. Nous avons considéré que dès l'obtention d'une note de 2, le plant de lavandin subi une petite perte de rendement puisque le plant est moins vigoureux et qu'il dispose de moins de hampes florales. Pour les plants de note 3 et 4, la perte de rendement est évidente.

#### 4.2.3 – Le suivi de *Hyalesthes obsoletus*

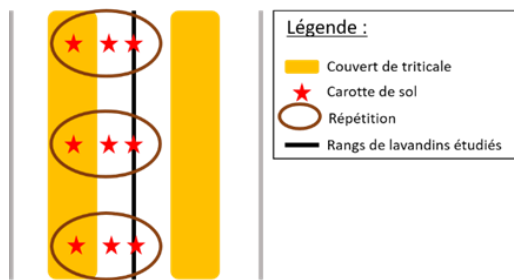
Le suivi de *H. obsoletus* a été réalisé pour évaluer la capacité des couverts inter-rang à modifier la pression exercée par ce ravageur. Sur chacune des sous-modalités 3 pièges collants transparents ont été mis en place. Le suivi des pièges et le comptage hebdomadaire a été réalisé sur l'ensemble de la période de vol de *H. obsoletus* (juillet-août). La somme d'individus par piège sur chaque saison de vol a été calculée pour éviter la non-indépendance des données mesurées chaque semaine. Les 3 pièges de chaque sous-modalité correspondent à 3 répétitions de la mesure des individus capturés.

#### 4.2.4 – Le recouvrement de l'inter-rang

Le recouvrement de l'inter-rang a été mesuré pour évaluer la croissance et la capacité de chaque couvert à se développer et à lutter contre les adventices sur la zone de semis. Nous avons procédé à des mesures de recouvrement de l'inter-rang par le couvert lui-même, par les adventices et par un mulch issu des résidus des couverts et des adventices. Ce recouvrement est exprimé en pourcentage de surface de sol occupé. Cette mesure a été réalisée 2 à 3 fois en 2017, 2018 et 2019 sur l'ensemble des 10 sous-modalités. Lors de chaque relevé, les mesures de recouvrements ont été réalisées entre 5 et 10 fois par sous-modalité selon l'année à l'aide de quadrats (50 x 50 cm) placés aléatoirement le long de la sous-modalité.

#### 4.2.5 – L'évolution de l'azote minéral dans le sol

La quantité d'azote minéral du sol a été mesurée environ tous les mois depuis février 2017 et jusqu'à décembre 2019. Cette quantité de nitrate a été relevée sur les 10 sous-modalités, et en effectuant 3 répétitions de la mesure à des emplacements différents pour prendre en compte une éventuelle hétérogénéité spatiale. Enfin pour chaque répétition, 3 carottes de sol (0 - 30 cm) ont été prélevées et mélangées : une carotte sur le rang, une sur l'inter-rang et une dans la zone intermédiaire aux deux précédentes (Figure 16).



La concentration de nitrates (en ppm) a été mesurée à l'aide de l'appareil « Nitrachek 404 » selon la méthode « Nitratest » développée par Challenge Agriculture (Challenge Agriculture).

Figure 16 : Zones de prélèvement des échantillons d'azote du sol pour une modalité. D'après rapport de stage Robin

#### 4.2.6 – L'évolution de l'azote foliaire du lavandin

Pour connaître l'état azoté des plants tout au long de la croissance du lavandin, nous avons réalisé 5 relevés d'azote foliaire par an, basés sur des stades phénologiques. Les relevés ont été faits avant la reprise végétative (mi-Mars), pendant la reprise végétative (mi-Avril), pendant le virage floral (mi-Mai), après la récolte (mi-Juillet) et lors de la reprise de végétation automnale (Octobre/Novembre). Pour cela, 15 feuilles matures ont été prélevées aléatoirement sur chacun des plants des 10 sous-modalité pour obtenir une quantité suffisante de feuilles. Ensuite, la quantité d'azote total a été déterminée par combustion selon la méthode Dumas. Ainsi, nous avons obtenu une unique valeur d'azote total (g/kg de matière sèche) des feuilles par date de relevé : il n'y a aucune répétition de cette mesure. Le but est ici d'identifier si certaines modalités sont déficitaires en azote par rapport à d'autres, et de suivre l'état azoté des plantes au cours des différents stades phénologiques.

#### 4.2.7 – Le volume des plants

Pour évaluer et mettre en évidence des éventuelles concurrences entre le lavandin et les couverts mis en place, nous avons mesuré le volume des plants (Celette et al. 2005; Ripoche et al. 2010). Le volume de tous les plants de chacune des 10 sous-modalités a été mesuré une fois en fin d'hiver (février) et une fois après récolte (en juillet), en 2018 et 2019. Il y a autant de répétitions de la mesure du volume des plants que de plants présents dans chaque sous-modalité (environ 60). Le volume d'un plant résulte du calcul du demi-volume d'un ellipsoïde : pour cela nous avons besoin de la hauteur, la largeur et la longueur de chaque plant.

#### 4.2.8 – Le gain de diamètre des tiges de lavandin

La mesure en continue des variations très précises du diamètre des tiges de lavandin assure à la fois un suivi de la croissance des plants et un suivi de l'état physiologique du lavandin. En plus d'avoir une donnée brute de croissance radiale, l'allure de la variation de diamètre nous renseigne sur plusieurs événements physiologiques comme la transpiration, la fermeture stomatique, les arrêts de croissance ou les périodes de stress. Ces données ont été mesurées à l'aide de dendromètres « PépiPIAF », développés par l'UMR PIAF de l'INRAE (Adam, Ameglio, et Coste 2013).

Sur la parcelle du CRIEPPAM, 9 PépiPIAFs ont été placés sur la modalité « Témoin – Fertilisation azotée » et 9 autres sur la modalité « Légumineuses – Fertilisation azotée ». A l'ITEIPMAI, les modalités concernées par ces dispositifs sont les modalités « Témoin – Fertilisation azotée » et « T+L – Fertilisation azotée ».

#### 4.2.9 – L'humidité et la température du sol

L'humidité ainsi que la température du sol ont été mesurées uniquement sur la partie « fertilisation azotée » des deux sites expérimentaux. Pour cela, sur chaque parcelle, deux stations « HOBO U30 » possédant chacune 15 sondes ont été mises en place. Sur chaque sous-

modalité de couvert inter-rang (partie « fertilisation azotée ») il y avait donc 3 sondes dédiées à la mesure de la température (°C) à 15 cm de profondeur et 3 sondes capacitives mesurant l'humidité volumique (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) à 30 cm de profondeur. Les sondes ont été disposées sur le rang de lavandin. Ces indicateurs ont été mesurés tous les deux toutes les 30 minutes depuis le mois de février 2017 et jusqu'à décembre 2019. Mais plusieurs problèmes ont empêché l'enregistrement normal des données. Après avoir retiré les données aberrantes, une moyenne par modalité de la température et de l'humidité du sol a été calculée respectivement avec les répétitions disponibles. Ces moyennes nous ont permis de visualiser l'évolution de la température et de l'humidité du sol au cours du temps. Cependant, nous avons uniquement retenu les périodes pendant lesquelles les 5 modalités de couvert inter-rang présentaient une valeur moyenne de l'humidité ou de température du sol (Tableau 1). Ces périodes sont les mêmes pour l'humidité et la température du sol.

Tableau 1 : Périodes pendant lesquelles les 5 modalités de couvert inter-rang possèdent au moins une répétition des données d'humidité et de température.

2018	Criep	01-avr ↔ 16-mai		28-juin ↔ 05-juil
	Iteip		18-mai ↔ 26-juin	
2019	Criep	01-avr ↔ 10-avr		
	Iteip	01-avr		10-juil

#### 4.3 – Stratégies d'analyses des données

L'ensemble des analyses ont été réalisé avec le logiciel R (version 3.6.1 (2019-07-05) - "Action of the Toes").

##### 4.3.1 – Caractérisation des couverts inter-rang et de la fertilisation azotée

Pour identifier l'effet d'un traitement sur une variable mesurée, des regroupements de modalités ont été réalisés : lorsque que nous avons étudié l'effet du couvert inter-rang (respectivement l'effet de la fertilisation azotée) sur une variable, nous avons regroupés les 2 modalités de fertilisation azotée (respectivement les 5 modalités de couverture inter-rang). Les effets « site » et « date » n'ont jamais été inclus dans l'analyse des différentes variables.

Pour les variables relatives aux indicateurs du rendement, au volume des plants et aux variables de recouvrement de l'inter-rang, nous avons réalisé des analyses de variance (ANOVA) pour caractériser les différents couverts inter-rang ainsi que la fertilisation azotée. Pour tester les effets des facteurs de l'ANOVA (couverture végétale inter-rang ou fertilisation azotée), on considère un risque alpha de 5 %. A chaque fois, les hypothèses d'utilisation de l'ANOVA ont été testées par des analyses graphiques et complétées par un test de Shapiro-Wilk pour la normalité des résidus et un test de Bartlett pour l'homoscédasticité des résidus. Lorsque les conditions de réalisation de l'ANOVA n'étaient pas satisfaites, nous avons réalisé un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis. Enfin, des tests post-hoc de Tukey ont été réalisés pour déterminer les différences entre modalités de chaque traitement. Les analyses ont alors été réalisées pour chaque site et à chaque date d'intérêt : 2018 et 2019 pour les variables de rendement, 8 dates entre 2017 et 2019 pour le recouvrement de l'inter-rang par les couverts et les adventices et février 2018 et 2019 pour le volume des plants. Dans ces analyses, nous avons testés l'effet des traitements « couvert inter-rang », « fertilisation azotée » et de leur interaction.

Ensuite, pour analyser les notations de dépérissement à Stolbur, nous avons réalisés des tests de distribution des effectifs de plants appartenant aux classes « plants sains » et « plants contaminé ». Pour cela nous avons regroupé les effectifs par traitement puis utilisé

des tests exacts de Fisher au seuil alpha de 5%, pour chaque site et à chaque date de relevé du dépérissement.

Les données de comptages de *H. obsoletus* sont modélisées par une loi de Poisson à un facteur (le facteur « couverture du sol » ou le facteur « fertilisation azotée ») site par site et année par année pour éviter les biais liés aux différences de pression annuelles et de localité de ce ravageur. Puis pour identifier les différences entre modalités d'un traitement, un test du  $\chi^2$  a été réalisé au seuil alpha de 5%, suivi d'un test post-hoc de Tukey. Nous avons aussi créé un modèle non-linéaire qui explique les données de comptage de *H. obsoletus* de 2018 à l'aide des données de recouvrement de l'inter-rang par les couverts le 19/07/2018.

En revanche, pour les variables de l'azote, de l'humidité et de la température du sol, de l'azote foliaire et du gain de diamètre des tiges de lavandin, aucun test statistique n'a été réalisé pour comparer des modalités entre elles : nous avons simplement suivi l'évolution de la moyenne de ces variables au cours du temps pour chacune des modalités.

Pour finir, nous avons graphiquement fait coïncider les données d'évolution du diamètre des tiges de lavandin avec les données moyennes d'humidité du sol pour essayer d'identifier un seuil de stress hydrique à partir des modalités de couvert qui possèdent des dendromètres. Nous avons dans un 1<sup>er</sup> temps recalibré les données des sondes capacitives pour que les points caractéristiques du point de flétrissement permanent ( $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^3$  au CRIEPPAM et  $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$  à l'ITEIPMAI) et de la capacité au champ ( $0,24 \text{ m}^3/\text{m}^3$  au CRIEPPAM et  $0,19 \text{ m}^3/\text{m}^3$  à l'ITEIPMAI) correspondent aux valeurs réelles du type de sol dont nous disposons. Ensuite, pour estimer la valeur du seuil de stress hydrique chez le lavandin (avant récolte), nous avons identifié les valeurs atteintes par les sondes capacitives lorsque les dendromètres indiquent des arrêts de gain de diamètre des tiges. Cette mise en relation des données d'humidité du sol et des données PépiPIAF n'a pas été réalisée en 2018 et sur la modalité « Témoin » en 2019 à l'ITEIPMAI à cause de données manquantes d'humidité du sol.

#### 4.3.2 – Identification des facteurs limitant la production d'huile essentielle de lavandin

Nous avons calculé les corrélations entre les variables de rendement et l'ensemble des autres variables mesurées à des dates différentes afin d'identifier les variables et les instants les plus pertinents à conserver dans les analyses. Les variables mesurées ne présentent pas toutes le même nombre de répétitions et ces répétitions entre variables ne sont pas placées au même endroit au sein des modalités. Pour s'assurer d'étudier des corrélations entre des données qui sont spatialement liées, nous avons calculé pour chaque variable une moyenne par sous-modalité. Pour chaque site et chaque année de production, nous avons donc étudié des corrélations entre variables de rendement et variables explicatives sur seulement 10 points. Selon la normalité des données, nous avons calculé une corrélation de Pearson ou de Spearman et réalisé un test de significativité de cette corrélation.

L'humidité et la température du sol ont été corrélées au rendement en huile essentielle selon la durée passée de chaque modalité de couvert inter-rang fertilisée au-dessus ou en-dessous d'un seuil d'humidité ou de température du sol que l'on a fait varier. Nous nous sommes uniquement intéressés à la période allant du 1<sup>er</sup> avril jusqu'à la récolte début juillet des années 2018 et 2019. L'objectif a été de déterminer l'effet de la durée du stress ou du confort hydrique et thermique sur le rendement en huile essentielle. Ces études de corrélation ont été réalisées sur l'ensemble de la période disponible entre avril et début juillet pour l'humidité du sol. Mais pour la température du sol, les corrélations ont été étudiées

séparément aux mois d’avril, de mai et de juin/début juillet, qui correspondent à des stades phénologiques différents du lavandin (Figure 17). Pour chaque site et année de production, ces corrélations ont été réalisées sur 5 points car nous possédons des données moyennes d’humidité et de température seulement pour les modalités de couvert inter-rang fertilisées.

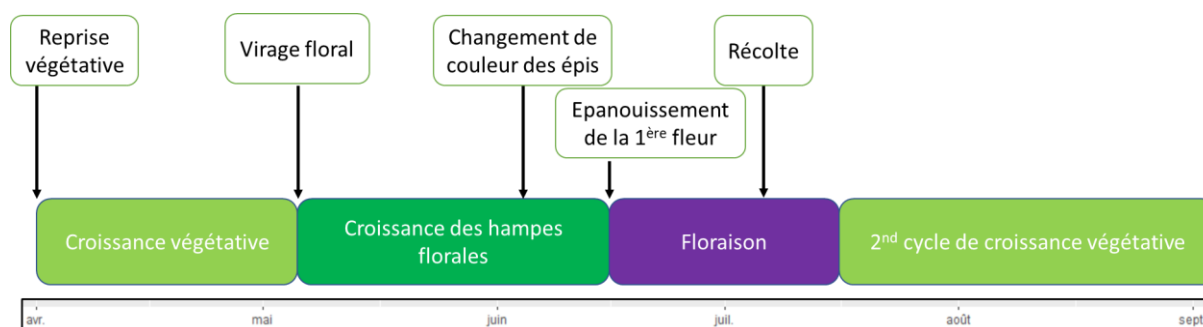


Figure 17 : Stades phénologiques et étapes importantes du développement du lavandin. Source personnelle

#### 4.3.3 – Elaboration d’un modèle explicatif du rendement en huile essentielle de lavandin

L’utilisation d’un modèle linéaire à effets mixtes a été retenue pour l’élaboration d’un modèle explicatif du rendement en huile essentielle de lavandin. Pour cela, nous avons utilisé les packages R « nlme », « dominanceanalysis » et « MuMin ». Pour que la prédiction du rendement en huile essentielle soit généralisable aux deux sites et aux deux années de production, nous avons identifié les variables explicatives du rendement les plus pertinentes à l’aide des études de corrélation. Nous avons alors retenu le cumul du volume des plants (qui est plus précis que la moyenne du volume des plants) au mois de février et l’azote foliaire mesurée au mois de juin (Annexe 5). Ces deux variables explicatives ont été placées en effets fixes du modèle, et seule la variable « année d’étude » (2018 ou 2019) a été placée en effet aléatoire (l’effet site n’apportait aucune explication supplémentaire). L’effet de l’interaction entre le cumul du volume et l’azote foliaire a pu être retiré car il était non-significatif. Ce modèle linéaire mixte est basé sur 40 observations des variables utilisées : en effet nous avons utilisé les moyennes de ces variables pour les 10 sous-modalités, en 2018 et 2019 et pour les 2 sites. Le modèle est le suivant :

$$\text{Rendement}_{ijk} \sim U + A * \text{Cumul\_volume\_fevrier}_{ijk} + B * \text{Azote\_foliaire\_juin}_{ijk} + U_j + \epsilon_{ijk}$$

Avec « i » la sous-modalité « couvert » \* « fertilisation », « j » l’année d’étude (2018 ou 2019), « k » le site et  $\epsilon$  le résidu. U, A et B ont été estimés.

## 5 – Résultats

### 5.1 – Caractérisation des couverts inter-rang et de la fertilisation azotée

#### 5.1.1 – Des rendements en huile essentielle différents

L’effet de l’interaction « Couvert\*Fertilisation » n’est jamais significatif pour l’ensemble des analyses des variables du rendement selon le couvert inter-rang et la fertilisation azotée (Tableau 2). Au CRIEPPAM, les modalités « Témoin » et « Gélif » ont des rendements en huile essentielle significativement plus élevés que les modalités « Triti », « Leg » et « T+L » (Figure 18). Ce résultat est le même pour 2018 et 2019. A l’ITEIPMAI, les différences de rendement entre les modalités couvertes (« Triti », « Leg » et « T+L ») et nues (« Témoin » et « Gélif ») sont moins nettes. Sur le cumul des 2 années, la modalité « Triti » n’a pas un rendement moyen différent des modalités nues. Cependant, les modalités « Leg » et

« T+L » ont un rendement inférieur aux modalités nues. Ces résultats mettent donc en évidence une perte de rendement significative par rapport au témoin sol nu lorsque l'on met en place une couverture végétale inter-rang de légumineuses ou d'un mélange de triticale et de légumineuses (4 cas sur 4). En revanche, cette perte de rendement par rapport au témoin se vérifie uniquement dans 2 cas sur 4 pour le couvert de triticale.

Tableau 2 : Synthèse des p-value obtenues pour chaque facteur de l'ANOVA « Variable rendement ~ Couvert \* Fertilisation »

		Couvert inter-rang	Fertilisation	Couvert*Fertilisation
Quantité d'huile essentielle	CRIEPPAM 2018	<b>1,8*10<sup>-5</sup></b>	<b>0,016</b>	0,42
	CRIEPPAM 2019	<b>6,5*10<sup>-4</sup></b>	0,28	0,99
	ITEIPMAI 2018	<b>1,9*10<sup>-5</sup></b>	<b>2,1*10<sup>-4</sup></b>	0,32
	ITEIPMAI 2019	<b>1,2*10<sup>-4</sup></b>	0,31	0,92
Matière sèche des épis	CRIEPPAM 2018	<b>3,1*10<sup>-7</sup></b>	<b>5,4*10<sup>-4</sup></b>	0,22
	CRIEPPAM 2019	<b>2,2*10<sup>-4</sup></b>	0,99	0,83
	ITEIPMAI 2018	<b>4,5*10<sup>-5</sup></b>	<b>7,0*10<sup>-4</sup></b>	0,28
	ITEIPMAI 2019	<b>7,0*10<sup>-6</sup></b>	0,90	0,70
Teneur en huile essentielle des épis	CRIEPPAM 2018	0,14	0,14	0,23
	CRIEPPAM 2019	0,71	<b>5,4*10<sup>-5</sup></b>	0,16
	ITEIPMAI 2018	0,13	<b>0,015</b>	0,64
	ITEIPMAI 2019	<b>8,4*10<sup>-3</sup></b>	0,16	0,078

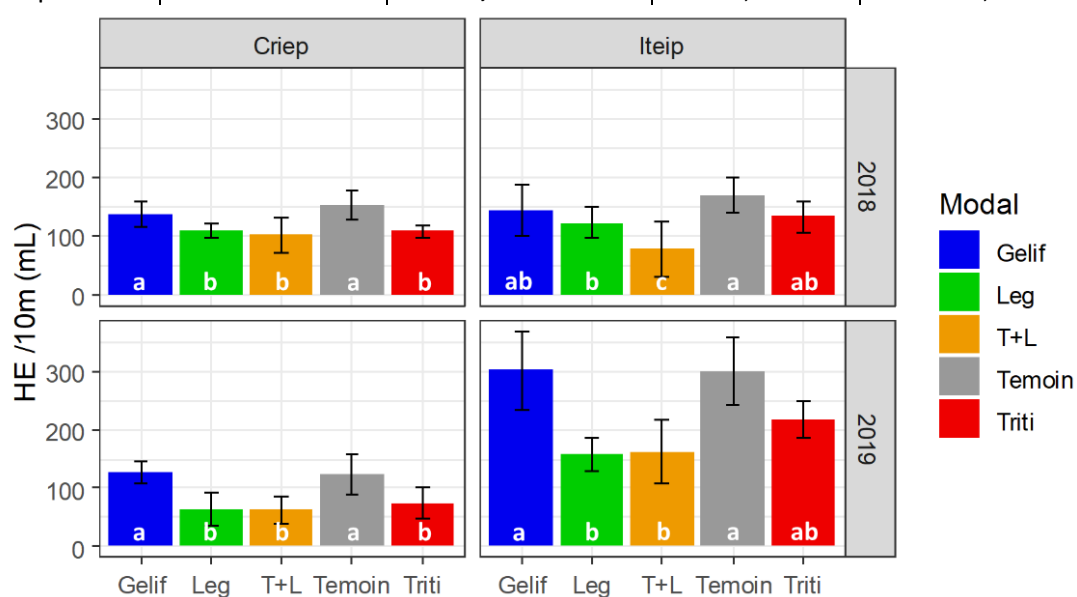


Figure 18 : Récapitulatif des rendements moyens obtenus sur chaque modalité de couvert inter-rang, pour chaque site et année. Les barres d'erreur représentent les écarts-types et les lettres des groupes constitués par différences significatives au seuil alpha = 5 %. Moyennes et écarts-types calculés indépendamment des modalités de fertilisation azotée.

Quant à la fertilisation azotée, il n'y a pas d'effet global de la présence ou de l'absence de la fertilisation azotée sur le rendement en huile essentielle (Figure 19). Les seules différences observables se trouvent en 2018, mais avec des résultats contradictoires entre les sites expérimentaux du CRIEPPAM et de l'ITEIPMAI. Au CRIEPPAM, la fertilisation azotée permet de gagner quelques points de rendement alors qu'à l'ITEIPMAI, la fertilisation fait perdre du rendement.



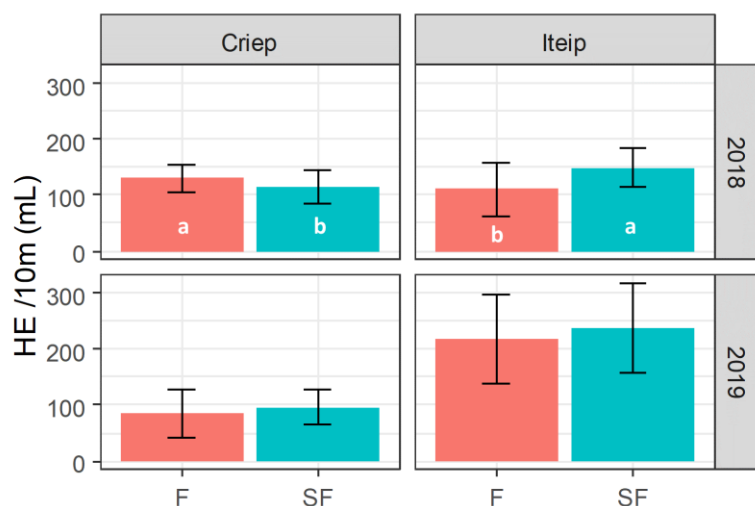


Figure 19 : Récapitulatif des rendements moyens obtenus sur chaque modalité de fertilisation azotée, pour chaque site et année. Moyennes et écarts-types calculés indépendamment des modalités de couvert inter-rang.

Les différences de matière sèche d'épis sont très similaires aux différences observées de quantité d'huile essentielle : au CRIEPPAM les modalités couvertes produisent moins de matière sèche que les modalités nues (Figure 20 A). A l'ITEIPMAI, le couvert de triticale produit moins de matière sèche que le témoin en 2019 mais pas en 2018. Pour la teneur en huile essentielle, nous observons des différences significatives seulement à l'ITEIPMAI en 2019 : le couvert de triticale a permis une teneur en huile plus élevée que le témoin, alors que les couverts « T+L » et « Leg » ne sont pas différents du témoin (Figure 20 B).

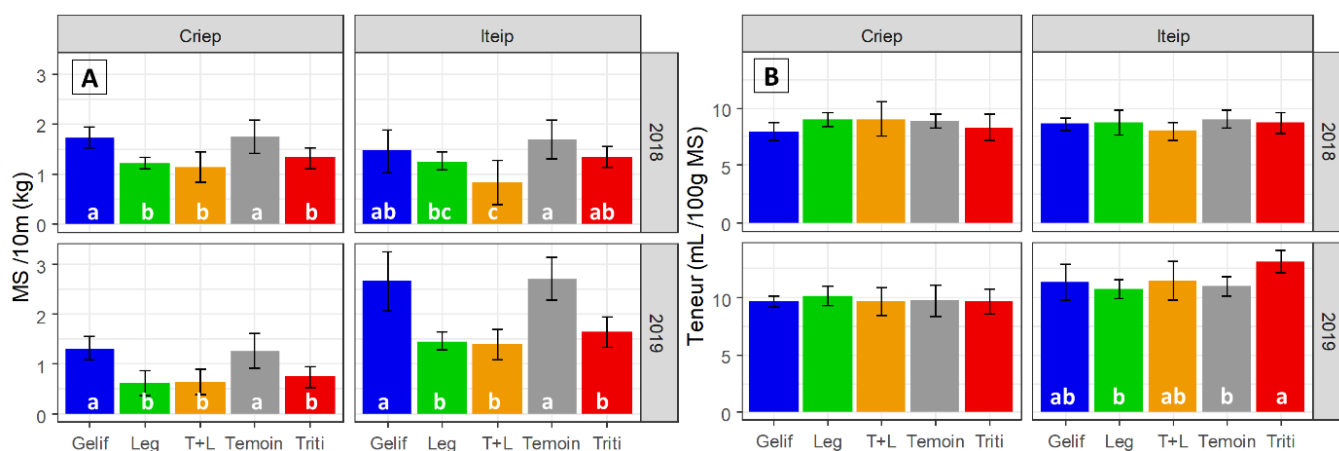


Figure 20 : Matière sèche des épis (A) et teneur en huile des épis (B) selon la modalité de couvert en place.

La fertilisation azotée a diminué la teneur en huile essentielle dans seulement 2 cas sur 4 : à l'ITEIPMAI en 2018 et au CRIEPPAM en 2019 (Figure 21 B). Et, les différences de matière sèche d'épis produite par les modalités de fertilisation azotée sont les mêmes que les rendements en huile (Figure 21 A). A ce stade nous remarquons que le facteur le plus déterminant dans la quantité d'huile essentielle produite est la quantité de matière sèche des épis, plutôt que la teneur en huile des épis. En effet l'allure des graphiques de ces 2 variables sont très similaires.

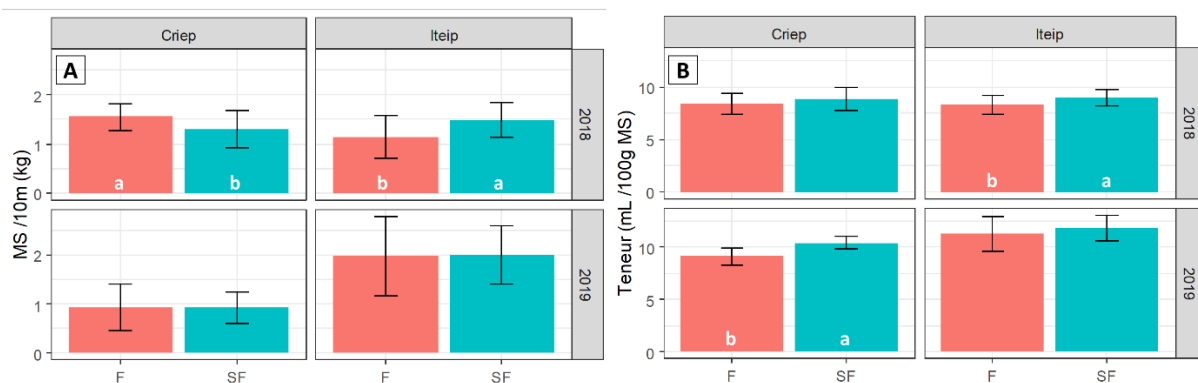


Figure 21 : Matière sèche des épis (A) et teneur en huile des épis (B) selon la modalité de fertilisation azotée en place.

### 5.1.2 – Le dépérissement à Stolbur

Tableau 3 : Synthèse des p-value obtenues pour chaque test exact de Fisher, testant les facteurs « couvert » et « fertilisation » indépendamment.

	Date	Couvert inter-rang	Fertilisation
CRIEPPAM	23/05/2018	0,2	0,21
	12/07/2019	0,22	0,66
	16/07/2020	0,48	0,58
ITEIPMAI	18/05/2018	1	1
	05/11/2018	0,1	1
	15/05/2019	<b>0,05</b>	1
	30/07/2019	<b>0,027</b>	<b>5,8*10<sup>-4</sup></b>

Pour le site du CRIEPPAM, nous n’observons aucune différence significative entre modalités de couverts inter-rang et entre modalités de fertilisation azotée (Tableau 3, Figure 22). La fertilisation azotée n’a pas d’effet sur la proportion d’individus touchée par le dépérissement à Stolbur (Figure 23).

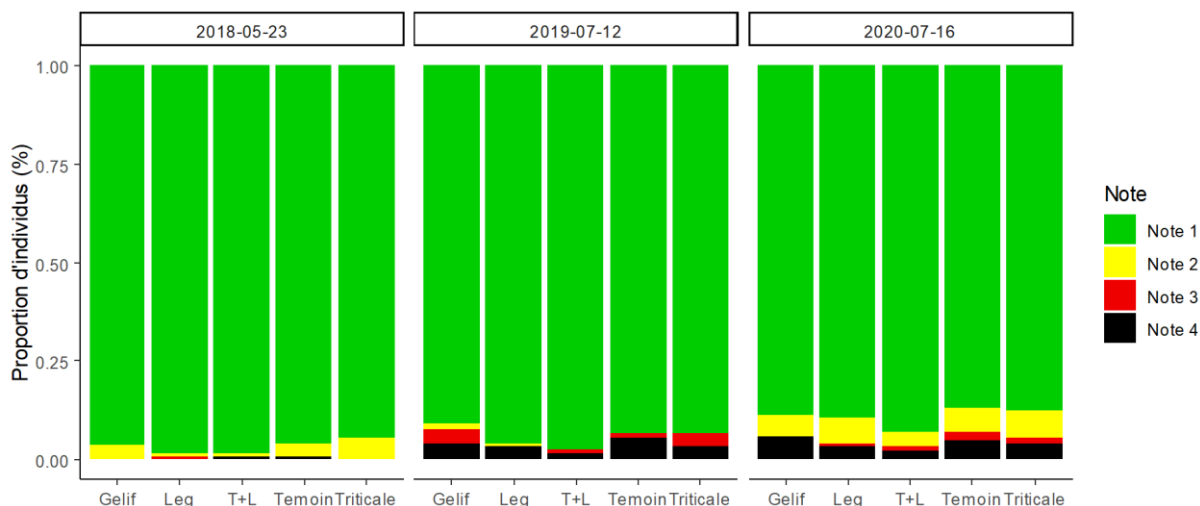


Figure 22 : Evolution des proportions d’individus appartenant à chaque classe de sévérité des symptômes de dépérissement selon les modalités de couvert, au CRIEPPAM.

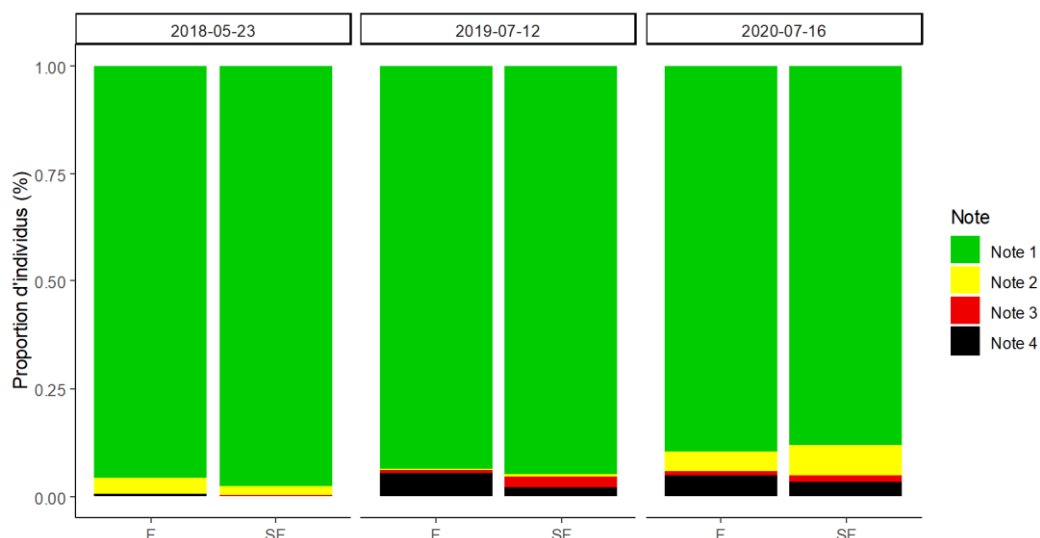


Figure 23 : Evolution des proportions d'individus appartenant à chaque classe de sévérité des symptômes de dépérissement selon les modalités de fertilisation azotée, au CRIEPPAM.

Sur le site de l'ITEIPMAI, à partir de l'année 2019 des résultats significatifs sont présents mais il nous est impossible de déterminer les différences entre couverts deux à deux par manque de puissance statistique. Le couvert « Témoin » semble plus touché par le dépérissement en mai 2019 que les autres modalités (Figure 24). En juillet 2019, mis à part les notes de 2, si on regarde uniquement les plants morts (note 4), les modalités « T+L » et « Triti » n'en présentent pas. On peut donc émettre l'hypothèse que les couverts « Triti » et « T+L » (couvert « Leg » aussi, sur le site du CRIEPPAM) sont efficaces pour lutter contre le dépérissement à Stolbur.



Figure 24 : Evolution des proportions d'individus appartenant à chaque classe de sévérité des symptômes de dépérissement selon les modalités de couvert, à l'ITEIPMAI.

Sur le site de l'ITEIPMAI, l'utilisation d'une fertilisation azotée permet de réduire significativement la proportion de plants contaminés à partir de juillet 2019 (Figure 25).

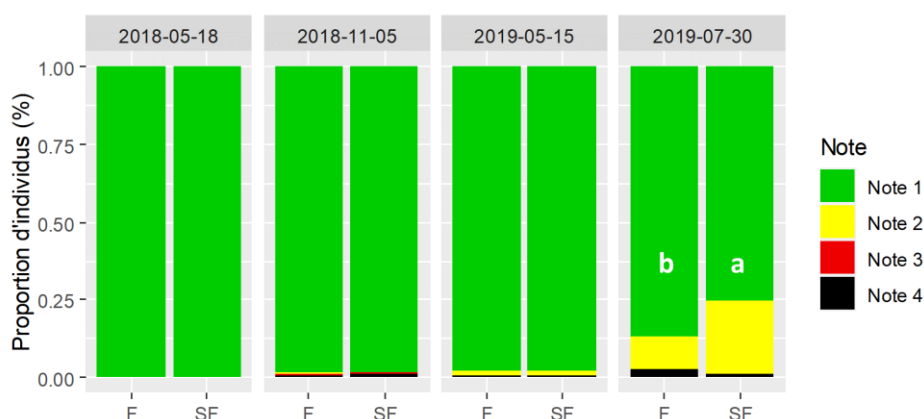


Figure 25 : Evolution des proportions d'individus appartenant à chaque classe de sévérité des symptômes de dépérissement selon les modalités de fertilisation azotée, à l'ITEIPMAI.

### 5.1.3 – Le suivi de *Hyalesthes obsoletus*

En calculant le cumul hebdomadaire des individus piégés sur l'ensemble de chaque site expérimental, on peut en estimer la pression annuelle exercée de *H. obsoletus* sur les deux sites expérimentaux. On voit qu'en 2018, la population de *H. obsoletus* est beaucoup plus importante qu'en 2017 et 2019 (Figure 26). De manière générale, il y a 3 fois plus d'individus au CRIEPPAM qu'à l'ITEIPMAI. Le pic de vol de *H. obsoletus* se fait au mois de juillet de chaque année.

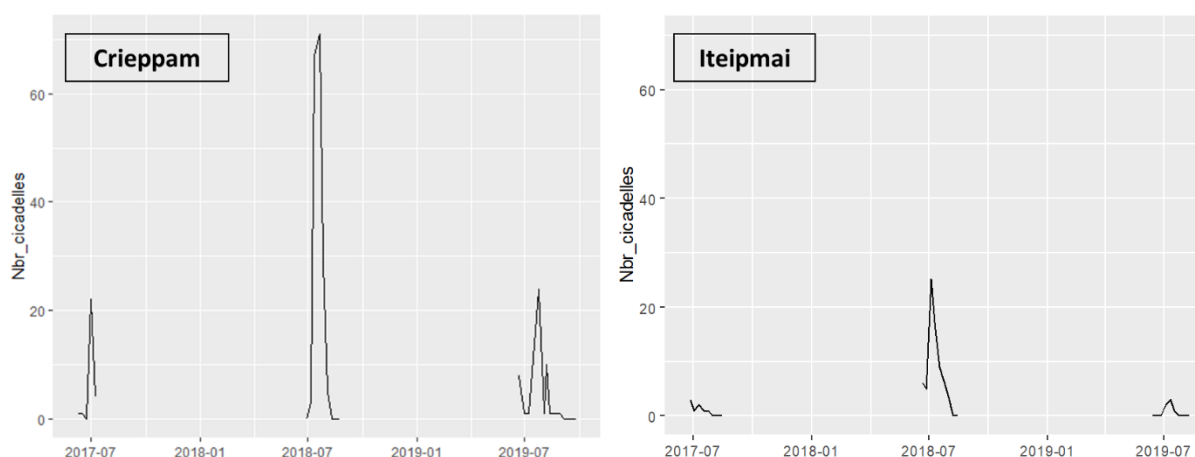


Figure 26 : Cumul hebdomadaire du nombre de *H. obsoletus* capturé par site de 2017 à 2019.

Aucun effet du facteur « Fertilisation azotée » et de l'interaction « Couvert \* Fertilisation » n'a été identifié sur les données de comptage de *H. obsoletus* (Tableau 4).

Tableau 4 : Synthèse des p-value obtenues pour les  $\chi^2$  testant l'effet de chaque facteur de la loi de Poisson « Nombre de *H. obsoletus* ~ Couvert \* Fertilisation ». Les « / » indiquent un manque de données pour les modalités « sans fertilisation azotée »

		Couvert inter-rang	Fertilisation	Couvert*Fertilisation
CRIEPPAM	2017	0,1	/	/
	2018	<b>2,5*10-5</b>	0,33	0,8
	2019	0,88	0,053	0,87
ITEIPMAI	2017	0,17	/	/
	2018	<b>1,4*10-5</b>	/	/
	2019	0,064	0,41	0,72

Lorsque l'on regroupe les données par type de couvert, les modalités de couvert inter-rang ont un effet sur le nombre de *H. obsoletus* capturé seulement en 2018 (Figure 27). Sur le site du CRIEPPAM seulement le couvert de légumineuses présente significativement moins de *H. obsoletus* capturés que les modalités « Gélif », « Témoin » et « Triti ». Sur le site de l'ITEIPMAI, ce sont les 3 modalités « Leg », « Triti » et « T+L » qui présentent significativement moins d'individus que les couverts « Témoin » et « Gélif ». En revanche, la fertilisation azotée n'a aucun effet sur le piégeage de *H. obsoletus* (Figure 28).

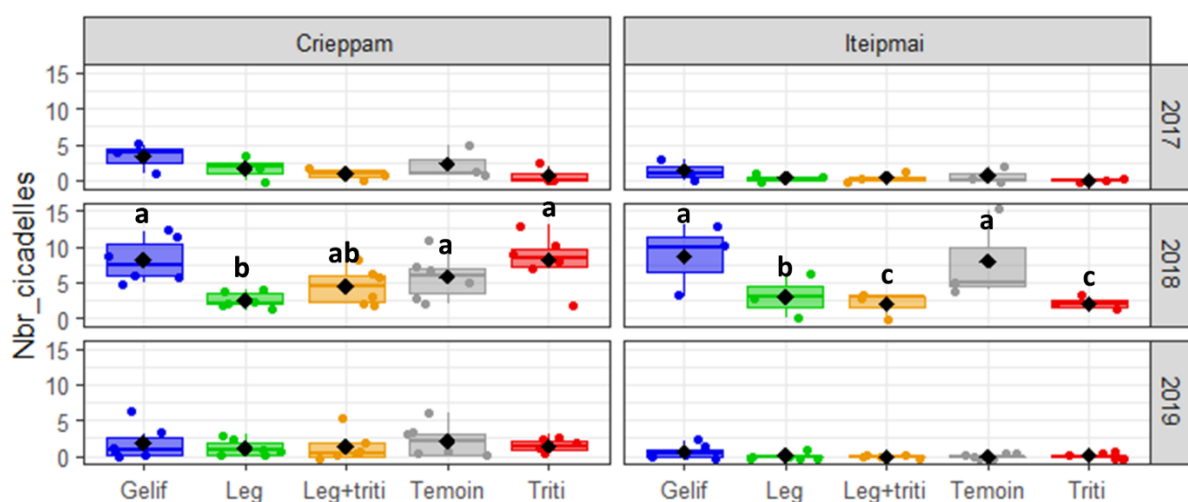


Figure 27 : Cumul du nombre total de *H. obsoletus* capturé par piège, par année et par site selon le couvert inter-rang. Chaque point représente un piège, et le losange noir correspond à la moyenne par modalité de couvert.

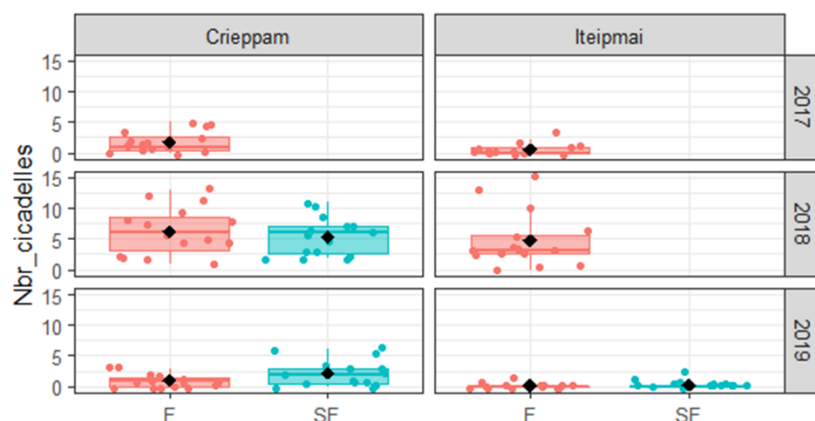


Figure 28 : Cumul du nombre total de *H. obsoletus* capturé par piège, par année et par site selon la fertilisation azotée. Chaque point représente un piège, et le losange noir correspond à la moyenne par modalité de fertilisation.

#### 5.1.4 – Le recouvrement de l'inter-rang

Le couvert « Gélif » a très peu poussé, même après avoir été semé à chaque automne le recouvrement est très faible voire inexistant (Figure 29). On remarque que sur le site de l'ITEIPMAI le recouvrement de couvert et d'adventices est plus importante qu'au CRIEPPAM. Les couverts « Leg » et « T+L » ont une bonne reprise en 2018 et recouvrent encore bien l'inter-rang sur les 2 sites. Ces deux types de couverts sont donc jugés être les plus faciles à implanter. Cependant, le couvert « Triti » ne réalise aucune repousse fin 2017 au Crieppam, alors qu'il se resème très bien après broyage à l'ITEIPMAI et recouvre encore le sol en 2018. Ce couvert de triticales est moins pérenne que les couverts à base de légumineuses.

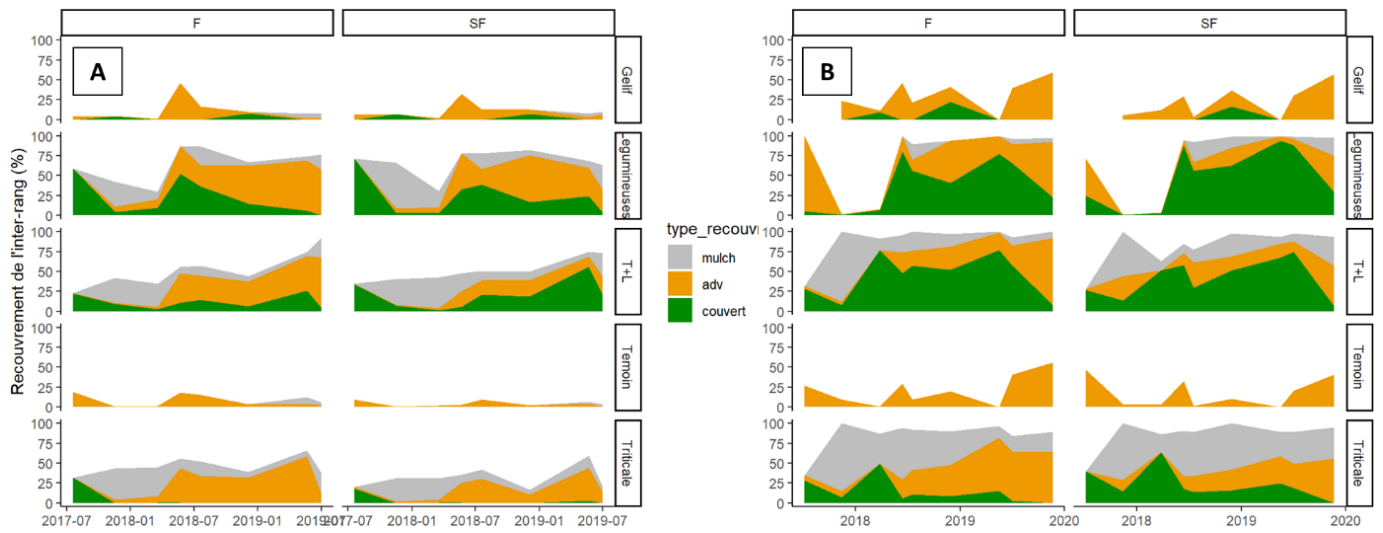


Figure 29 : Suivi du pourcentage de recouvrement par les différents couverts, les adventices et un mulch de biomasse de 2017 à 2019, au CRIEPPAM (A) et à l'ITEIPMAI (B)

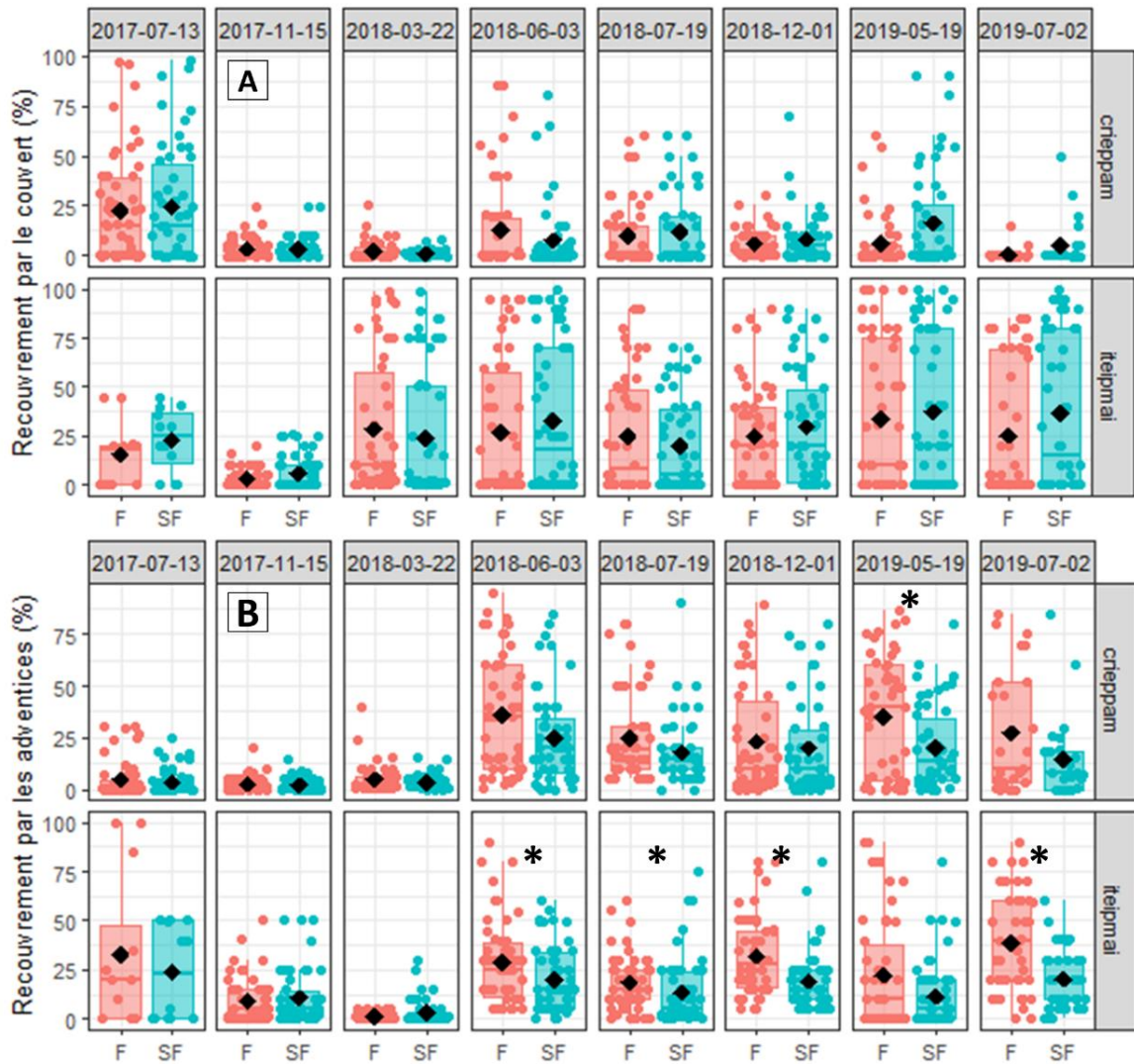


Figure 30 : Variabilité de pourcentage de recouvrement par les couverts (A) et par les adventices (B) selon la fertilisation azotée, de 2017 à 2019, au CRIEPPAM et à l'ITEIPMAI. Les « \* » témoigne d'une différence significative (alpha = 5 %), après un test de Kruskal-Wallis. Les losanges noirs représentent la moyenne de la modalité en question.

La fertilisation azotée a un effet positif sur la croissance des adventices (Figure 30 B). En effet, à partir de juin 2018, la moyenne du recouvrement par les adventices des modalités « Sans Fertilisation azotée » est inférieure à celle des modalités « Fertilisation azotée ». Mais il est difficile de tirer une conclusion, car ce résultat est significatif seulement 5 fois sur 10. Cependant le recouvrement par les couverts n'est pas modifié (Figure 30 A) par la fertilisation azotée : la fertilisation azotée n'a pas d'effet positif sur la croissance des couverts inter-rang.

#### 5.1.5 – Lien entre recouvrement de l'inter-rang et présence de *H. obsoletus*

La régression non-linéaire élaborée des données de capture de *H. obsoletus* en fonction du recouvrement de l'inter-rang par les couverts est une fonction exponentielle décroissante de type  $y = a * \exp(b * x)$  avec  $a = 22$  et  $b = - 0,03$  (Figure 31). Pour un recouvrement par le couvert semé de 23% on divise le nombre de *H. obsoletus* piégé par deux par rapport à un piégeage sur sol nu : on prédit 11 individus capturés avec un tel recouvrement.

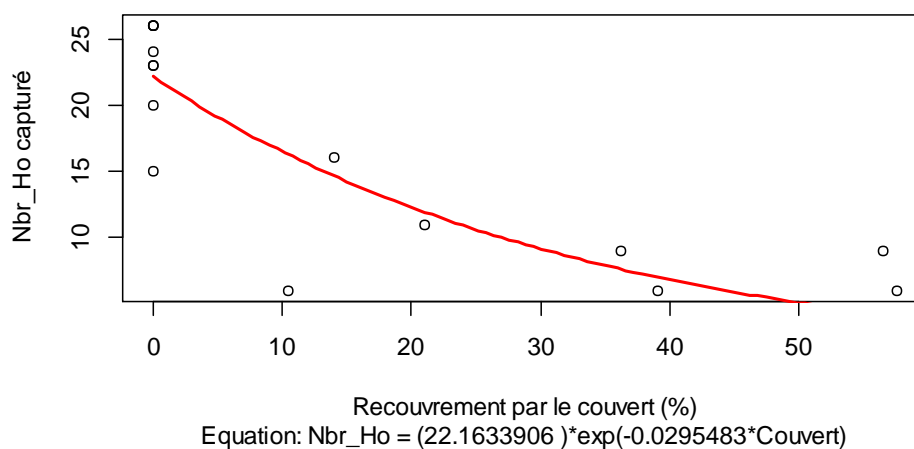


Figure 31 : Régression non-linéaire entre le pourcentage de recouvrement par les couverts en juillet 2018 et le nombre de *H. obsoletus* capturé en 2018 sur chaque modalité de couvert. La courbe rouge correspond à la courbe de régression non-linéaire.

#### 5.1.6 – L'azote du sol

Chaque année, pour les modalités « Fertilisation azotée » on observe un 1<sup>er</sup> pic de nitrates dans le sol aux environs du mois de juin (Figure 32), qui est caractéristique des apports d'azote minéral réalisés en avril et mai de chaque année (40 unités d'azote en 2017 puis 60 unités en 2018 et 2019). De mars à mai, les phénomènes de minéralisation naturelle de la matière organique du sol sont très peu visibles : on n'observe pas de pic de nitrates pour les modalités « SF » durant cette période. Ensuite, en fin d'été ou début d'automne, il y a un 2<sup>nd</sup> pic de nitrates pour l'ensemble des modalités. Ce pic est plus important pour les modalités fertilisées que non-fertilisées et pourrait correspondre à une seconde période de minéralisation de matière organique du sol, dû aux précipitations de fin d'été qui permettent d'humidifier le sol et le bon fonctionnement des micro-organismes du sol. Pour finir, à niveau de fertilisation azotée égal les modalités « Témoin » et « Gelif » possèdent plus de nitrates dans le sol que les autres modalités de couvert la plupart du temps.

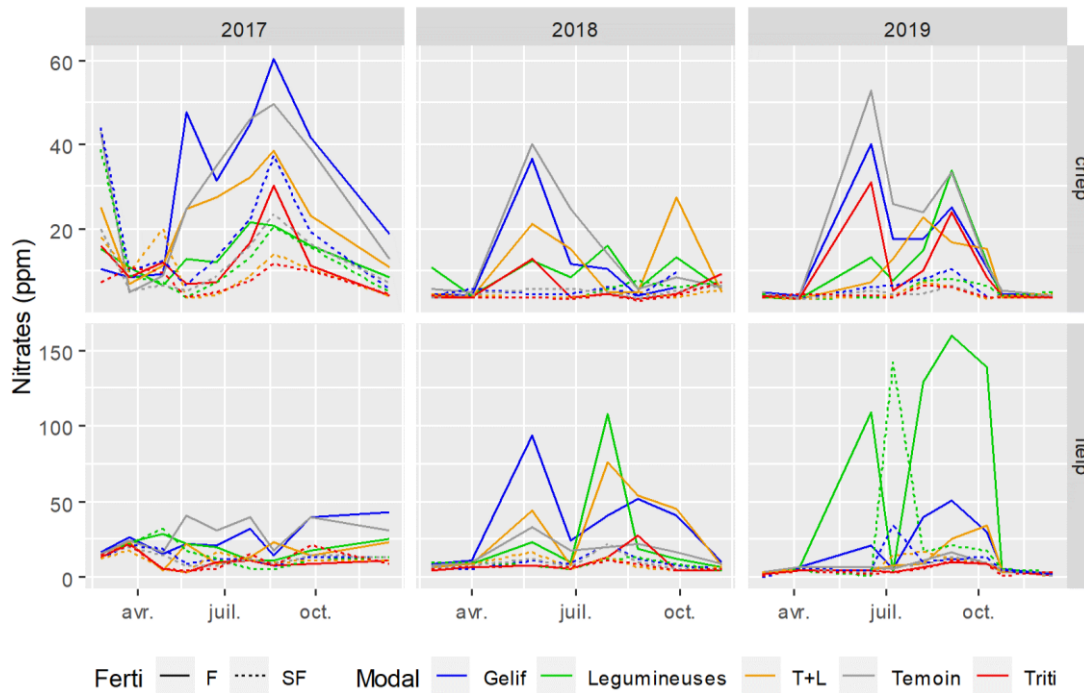


Figure 32 : Evolution de la concentration de nitrate dans le sol des deux sites expérimentaux, de 2017 à 2019, par modalité de couvert et de fertilisation.

#### 5.1.7 – L'azote foliaire

Aux mois d'avril 2018 et 2019, la concentration d'azote foliaire atteint une valeur maximale (Figure 33). Puis au début des mois de juillet 2018 et 2019, la concentration d'azote foliaire est minimale, elle atteint la valeur minimale sur tout le cycle de croissance annuel du lavandin. Et lors du 2<sup>nd</sup> cycle de croissance végétative en fin d'été, cette concentration d'azote foliaire augmente de nouveau.

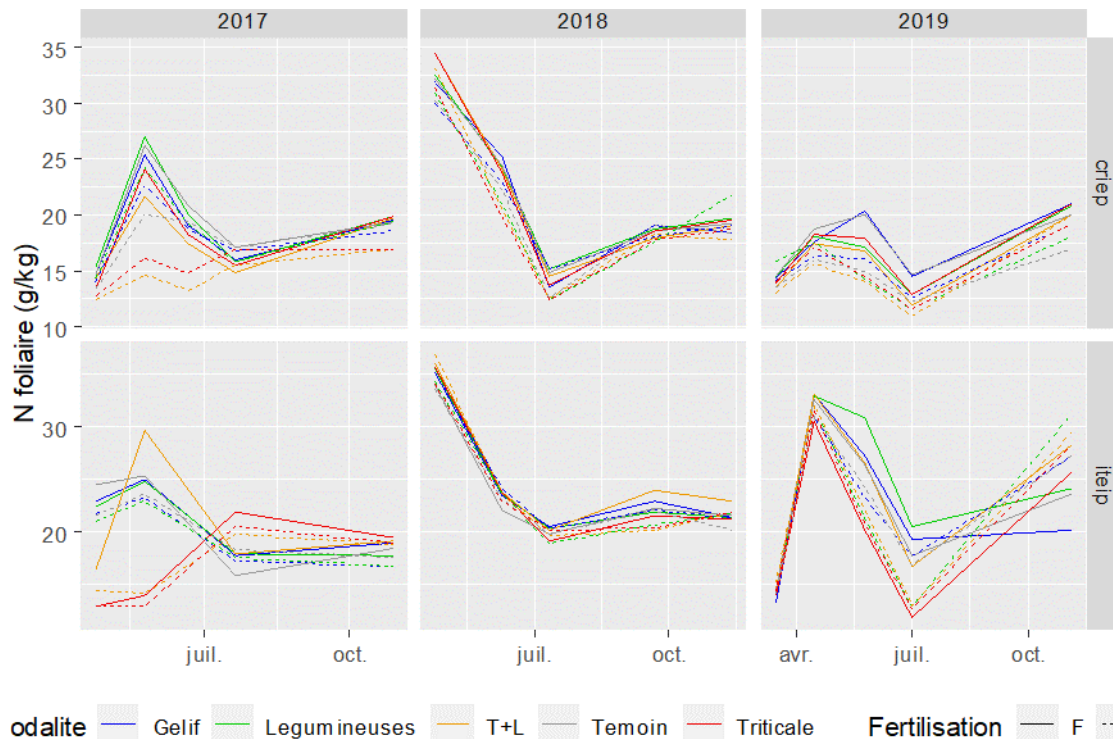


Figure 33 : Evolution de la concentration d'azote foliaire sur les deux sites expérimentaux, de 2017 à 2019, par modalité de couvert et de fertilisation



En 2017 et jusqu'au mois de juillet, chez les modalités non-fertilisées les couverts « Triti » et « T+L » possèdent moins d'azote foliaire que les autres modalités de couvert, ce qui montre une concurrence des couverts « Triti » et « T+L » pour l'azote. Mais plus tard cette observation ne se vérifie pas : exemple en 2018 à l'ITEIPMAI, ces 2 couverts encore présents ne montrent aucun signe d'une concurrence azotée. De plus en 2018 et 2019, il semblerait que les modalités non-fertilisées soient moins pourvues en azote foliaire que les modalités fertilisées.

#### 5.1.8 – Le volume des plants

Seul le volume des plants mesuré en février de chaque année a été analysé statistiquement car ce sont ces données qui sont les mieux corrélées au rendement en huile essentielle (5.2.4 modèle explicatif du rendement). En 2019, les données montrent des différences significatives de volume des plants selon la modalité de couverture végétale inter-rang (Tableau 5). Les modalités « Temoin » et « Gelif » possèdent des plants de volume supérieur aux modalités « Leg », « Triti » et « T+L » (Figure 34). En revanche, la fertilisation azotée n'a pas permis d'obtenir des plants plus volumineux : en 2018 à l'ITEIPMAI les plants non fertilisés sont plus volumineux que les plants fertilisés (Figure 35).

Tableau 5 : Synthèse des p-value obtenues pour chaque facteur de l'ANOVA « Volume des plants ~ Couvert \* Fertilisation ». Toutes les p-values sont issues de tests de Kruskal-Wallis, sauf celles du facteur d'interaction.

		Couvert inter-rang	Fertilisation	Couvert*Fertilisation
CRIEPPAM	2018	0,41	0,06	0,7
	2019	<b>2,2*10<sup>-16</sup></b>	0,29	0,06
ITEIPMAI	2018	<b>3,5*10<sup>-14</sup></b>	<b>1,1*10<sup>-3</sup></b>	0,061
	2019	<b>2,2*10<sup>-16</sup></b>	0,091	<b>3,6*10<sup>-3</sup></b>

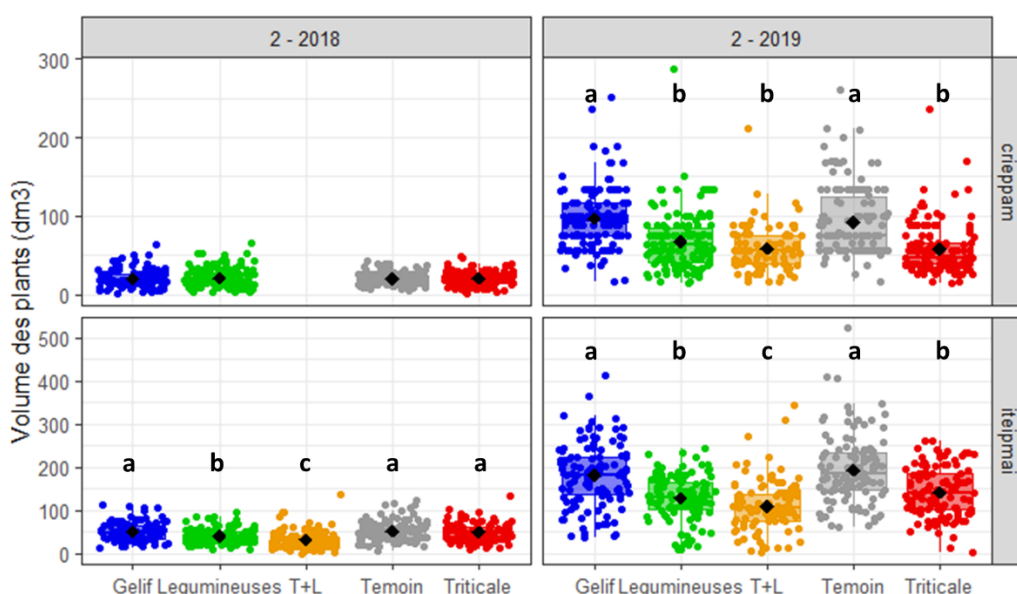


Figure 34 : Volume des plants de lavandin selon le couvert végétal inter-rang. Les différentes lettres forment des groupes significativement différents (au seuil alpha = 5 %). Les losanges noirs représentent la moyenne obtenue pour une modalité de couvert.

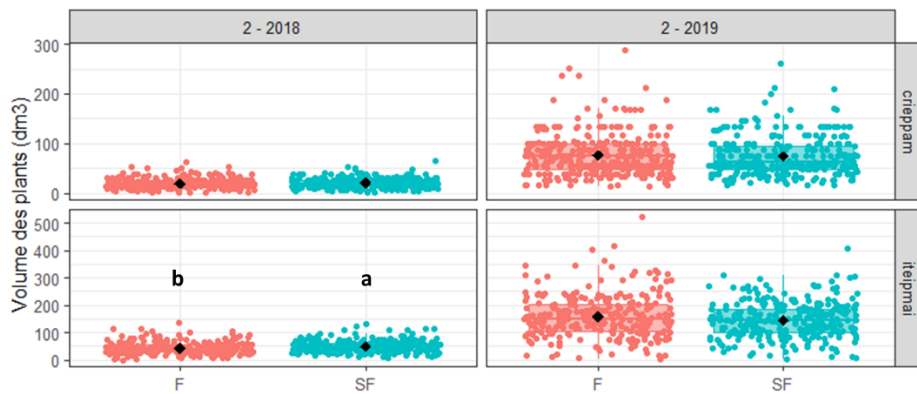


Figure 35 : Volume des plants de lavandin selon le niveau de fertilisation azoté. Les différentes lettres forment des groupes significativement différents (au seuil alpha = 5 %). Les losanges noirs représentent la moyenne obtenue pour une modalité de couvert.

## 5.2 – Les facteurs limitant le rendement

### 5.2.1 – Caractérisation du stress hydrique du lavandin

Les dendromètres « PépiPIAF » nous permettent d’identifier physiologiquement une période de stress hydrique, qui se traduit par une perte du diamètre des tiges, identifiable par le rectangle orange sur la Figure 36 et la Figure 37. L’ensemble des PépiPIAFs d’une même modalité évoluent de la même manière au cours du temps (Annexe 4) : les PépiPIAFs d’une même modalité donnent les mêmes informations.

Sur le site du CRIEPPAM, un stress hydrique est identifié du 6/06/2019 au 4/07/2019 pour la modalité « Témoin – Fertilisation azotée » (Figure 36) et du 28/05/2019 au 4/07/2019 pour la modalité « Légumineuses – Fertilisation azotée » (Figure 37). Ce stress hydrique a pris fin à la suite d’une irrigation de 60 mm, qui a été mise en place afin d’éviter une mortalité des plants. La modalité « Légumineuse » a donc été en état de stress hydrique 9 jours plus tôt que la modalité « Témoin ». On observe que ce stress hydrique semble survenir lorsque l’humidité du sol descend en dessous de  $0,15 \text{ m}^3 \text{ d'eau par m}^3 \text{ de sol}$ . Pour le type de sol présent au CRIEPPAM (point de flétrissement permanent de  $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), cette valeur correspondrait à 30 mm d’eau de la réserve utile totale (qui est de 120 mm). Sur la parcelle de l’ITEIPMAI, du fait du type de sol présent, la capacité au champ est de  $0,19 \text{ m}^3/\text{m}^3$  et le point de flétrissement permanent de  $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Sur la base de ces données, la même procédure a été réalisée, et avec les données de la modalité « T+L – Fertilisation azotée » en 2019, nous estimons le seuil de stress hydrique à  $0,13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Ce seuil de stress correspond donc aussi à 30 mm d’eau de la réserve utile totale de la parcelle de l’ITEIPMAI.

Les PépiPIAFs nous permettent aussi d’observer, dès la récolte effectuée, que les variations quotidiennes du gain de diamètre des tiges sont réduites

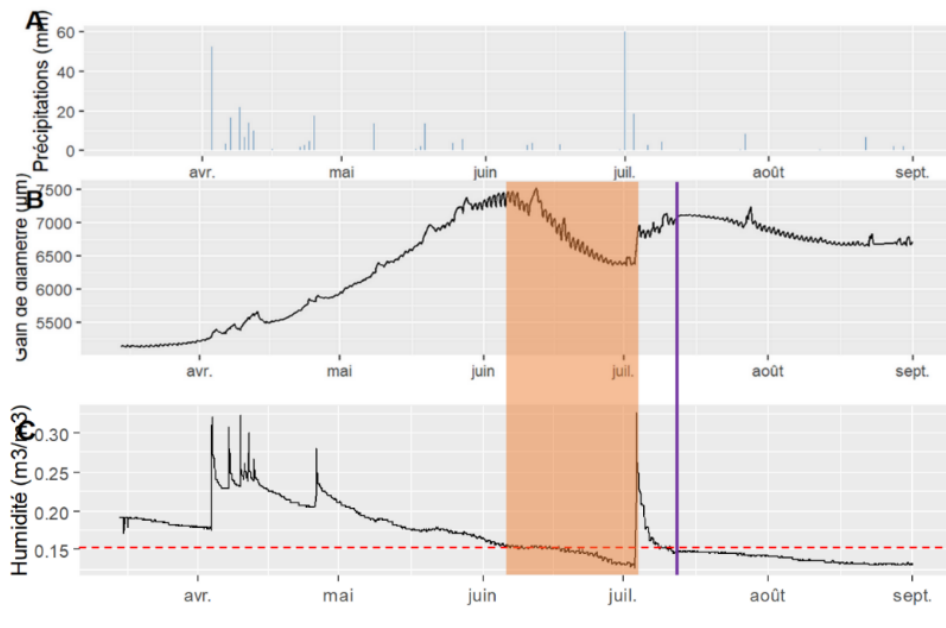


Figure 36 : Mise en relation des données de précipitations (A), de gain de diamètre du tronc d'un lavandin (B) et de l'humidité du sol (C). Toutes ces données concernent la modalité « Témoin – Fertilisation azotée », en 2019. Le rectangle orange représente la période de stress hydrique du lavandin, et la barre verticale violette représente le jour de la récolte.

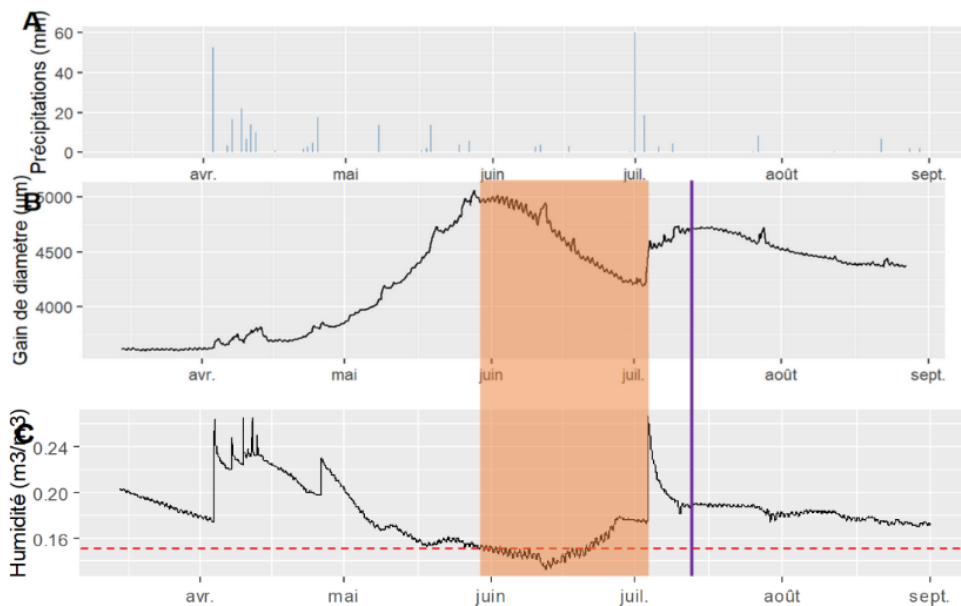


Figure 37 : Mise en relation des données de précipitations (A), de gain de diamètre du tronc d'un lavandin (B) et de l'humidité du sol (C). Toutes ces données concernent la modalité « Légumineuses – Fertilisation azotée », en 2019. Le rectangle orange représente la période de stress hydrique du lavandin, et la barre verticale violette représente le jour de la récolte.

### 5.2.2 – Rendement et humidité du sol

Les périodes d'études sont variables selon les données disponibles pour chaque site et année. On trouve des seuils d'humidité différents selon l'année et le site (Tableau 6) (de 0,15 à 0,21 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) : les rendements en huile essentielle sont corrélés positivement avec la durée passée de chaque modalité de couvert au-dessus des seuils d'humidité de 0,15 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (CRIEPPAM 2019) et de 0,21 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (ITEIPMAI 2018).

Tableau 6 : Synthèse des corrélations établies entre les indicateurs du rendement et la proportion de mesures d'humidité du sol supérieure au seuil d'humidité qui donne la meilleure corrélation, en vert les corrélations significatives et en orange celles qui le sont presque

	Période d'étude	Indicateur de rendement	Seuil d'humidité le mieux corrélé	Corrélation de Pearson	Corrélation de Spearman	p-value
Criep 2018	Trop courte					
Criep 2019	14/04 - 14/06 (Absence de sonde « T+L »)	HE	0,15 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,96		0,039
		MS		0,94		0,058
		Teneur		-0,45		0,55
Iteip 2018	28/05 - 26/06	HE	0,21 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,95		0,012
		MS		0,95		0,012
		Teneur		0,95		0,014
Iteip 2019	24/04 - 27/06	HE	0,19 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,5		0,39
		MS			0,36	0,55
		Teneur		-0,28		0,64

### 5.2.3 – Rendement et température du sol

Pour la température du sol, les résultats sont présentés de manière similaires aux données d'humidité du sol (Tableau 7). Les résultats montrent que pour maximiser la quantité d'huile essentielle, la température du sol doit dépasser un seuil différent selon la période de l'année : 10°C au mois d'avril, 13°C au mois de mai et 17°C au mois de juin.

Tableau 7 : Synthèse des corrélations établies entre les indicateurs du rendement et la proportion de mesures de température du sol selon le seuil de température qui donne la meilleure corrélation, en vert les corrélations significatives et en orange celles qui le sont presque

	Période d'étude	Indicateur de rendement	Seuil de température le mieux corrélé	Corrélation de Pearson	Corrélation de Spearman	p-value
Criep 2018	28/06 - 05/07	HE	>23	0,82		0,089
		Teneur	>21	0,71		0,18
		Teneur	<30	0,78		0,12
Criep 2019	Trop courte					
Iteip 2018	05/06 - 27/06	HE	<28		-0,71	0,18
		MS	<28		-0,73	0,16
		Teneur	<28		-0,71	0,18
Iteip 2019	01/04 - 05/05	HE	>10	0,89		0,04
		MS	>10		0,95	0,014
	05/05 - 05/06	HE	>13	0,91		0,03
		MS	>13		0,87	0,05
	05/06 - 10/07	MS	>17		0,87	0,05
		Teneur	>21		0,82	0,09

### 5.2.4 – Prédiction du rendement

Avec ce modèle mixte, le pourcentage de variance expliquée par les effets fixes (le volume des plants au mois de février et l'azote foliaire au mois de juin) est de 57% et le pourcentage de variance expliquée par les effets fixes et aléatoires (en prenant en compte

l'année d'étude) est de 92%. Et on trouve que la contribution du cumul du volume des plants au moins de février est plus de 3 fois supérieure à la contribution de l'azote foliaire du mois de juin. Ces résultats sont représentés Figure 38 : le modèle prédit assez bien le rendement à l'aide du cumul du volume des plants et beaucoup moins bien avec l'azote foliaire. Cependant, sur ces deux représentations, les prédictions sont assez proches des données observées.

La formule explicative du rendement est la suivante :

$$\text{Rendement}_{ijk} = -16,474 + 2,296 * \text{Cumul\_volume\_fevrier}_{ijk} + 0,026 * \text{Azote\_foliaire\_juin}_{ijk} + u_j + \epsilon_{ijk}$$

Avec i la sous-modalité (couvert x fertilisation), j l'année d'étude (2018 ou 2019), k le site et  $\epsilon$  le résidu.

$$u_{2018} = + 41,54 \text{ et } u_{2019} = - 41,54$$

Aucune autre variable n'a été trouvée comme explicative du rendement mis à part le volume des plants en février qui détermine une grande part du rendement et l'azote foliaire en juin qui est moins importante.

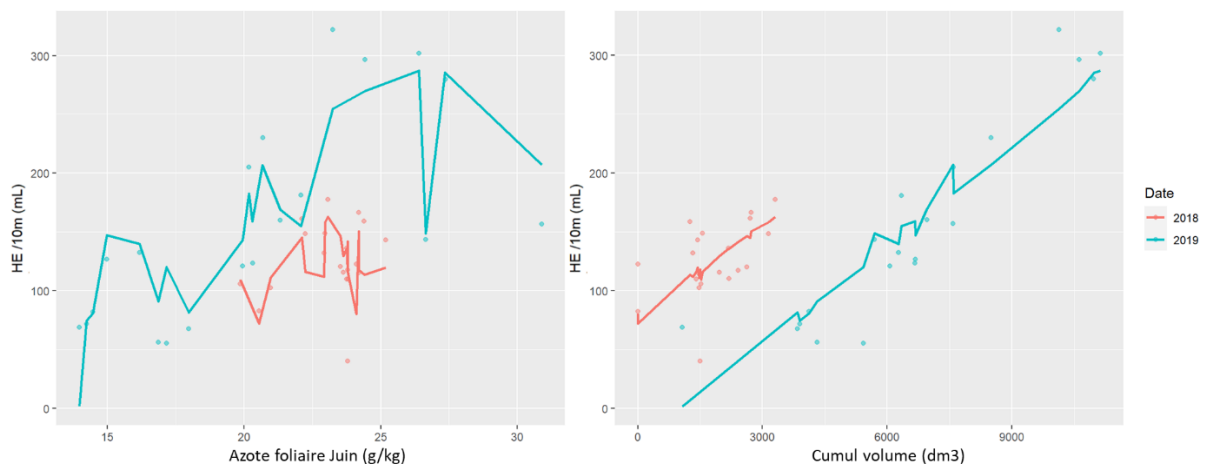


Figure 38 : Confrontation des données réellement observées (les points) avec les données prédites par le modèle explicatif du rendement en huile essentielle (les lignes).

## 6 – Discussion

Cette expérimentation a pour but de déterminer les facteurs qui limitent le rendement en huile essentielle de lavandin

### 6.1 – Les effets des couverts inter-rang et de la fertilisation azotée sur la physiologie du lavandin

#### 6.1.1 – Des rendements en huile essentielle fortement liés à la quantité de matière sèche des épis

Nous avons vu que les différences observées de matières sèche des épis expliquent très bien les différences observées de quantité d'huile essentielle produite. De plus, la teneur en huile essentielle des épis ne varie que très faiblement d'une modalité à l'autre. Cela nous permet d'affirmer que la quantité d'huile essentielle produite est fortement dépendante de la quantité de matière sèche d'épis produite et faiblement dépendante de la teneur en huile essentielle des épis. Or, nous savons que les inflorescences de lavandin ont une croissance indéterminée (Upson et Andrews 2004). Donc le nombre de calices présents par épis

(combinaison du nombre de verticilles par épis et du nombre de calices par verticille) est soumis à des facteurs environnementaux : des bonnes conditions de croissance lors du développement des inflorescences permet un nombre de calices par épis important, et donc permet une grande quantité de matière sèche d'épis.

La teneur en huile essentielle est plus importante pour les modalités non-fertilisées que pour les modalités avec fertilisation azotée. Cette observation est significative dans 2 cas sur 4. Nous pouvons émettre l'hypothèse que la fertilisation azotée « dilue » la quantité d'huile essentielle dans la quantité de matière sèche produite. Ce résultat a été observé dans d'autres cultures comme le lin (Herzog, Anderegg, et Luginbühl 2017).

#### 6.1.2 – Le volume des plants de lavandin traduit une concurrence avec les couverts inter-rang

Les différences de volumes des plants obtenues entre les modalités nues et les modalités couvertes témoignent d'une concurrence pour une ressource entre le lavandin et les espèces semées sur l'inter-rang. Ce constat est le même en viticulture : la croissance de la vigne est plus faible lorsque des couverts inter-rang sont en place (Celette et al. 2005; Ripoché et al. 2010). En faisant la synthèse des 2 sites en 2019, le couvert de mélange de triticale et de légumineuses est le plus concurrentiel, suivi des couverts de légumineuses et de triticale.

#### 6.1.3 – Concurrence pour l'azote et couverture inter-rang

Les modalités non-fertilisées ne présentent pas de pic de nitrate au printemps contrairement aux modalités fertilisées : cela pourrait s'expliquer par le fait que les faibles quantités d'azote qui sont naturellement minéralisées sont tout de suite mobilisées par le lavandin lorsque nous n'appliquons pas de fertilisation azotée. Ce phénomène met en évidence une concurrence précoce (début 2017) pour l'azote du sol entre les couverts inter-rang et le lavandin (Chantelot, Celette, et Wery 2004). Mais cette concurrence précoce dans la vie du lavandin n'est pas directement reliée aux rendements obtenus la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année de récolte car nous n'avons identifié aucune différence de rendement généralisable entre les modalités fertilisées et non-fertilisées. De plus, il est difficile d'identifier que type de couvert est plus concurrentiel pour l'azote du sol car selon l'instant que nous regardons, la position des différentes courbes d'azote du sol n'est pas la même. Mais, la plupart du temps, à niveau de fertilisation azotée égal les modalités « Témoin » et « Gelif » ont plus de nitrates dans le sol que les autres modalités de couvert. On met alors en évidence que les couverts végétaux qui ont poussé prélèvent une certaine quantité d'azote, qui pourrait donc être limitante à la croissance du lavandin ou à la production d'huile essentielle. Or, vu la position des courbes d'azote du sol pour chaque couvert (à fertilisation égale) entre avril 2018 et la récolte 2018 (même constat pour l'année 2019), il est difficile d'affirmer que les nitrates présents dans le sol entre avril et juillet d'une certaine année est un facteur limitant de la quantité d'huile essentielle produite cette même année.

En ce qui concerne l'azote foliaire du lavandin, les phases de croissances uniquement végétatives semblent être des périodes d'accumulation de l'azote dans les feuilles. Alors que la période entre le virage floral et la récolte (Figure 17) correspond à un déstockage de cet azote foliaire. L'hypothèse est que l'azote foliaire est mobilisé pour le développement des inflorescences du lavandin ou pour l'élaboration de l'huile essentielle. En effet, il est déjà connu que l'azote est un élément minéral essentiel à la synthèse de composés organiques chez les plantes aromatiques : l'azote a un rôle clé dans la biosynthèse de nombreux constituants de l'huile essentielle des plantes (Chrysargyris, Panayiotou, et Tzortzakis 2016).

Mais, nous avons déjà vu que les rendements des modalités fertilisées et non-fertilisées n'étaient pas hiérarchisés. De plus en 2018 et 2019, l'azote foliaire de l'ensemble des modalités est très proche. Par conséquent dans les conditions de cette expérimentation, l'azote foliaire n'est pas limitant au rendement en huile essentielle. Si l'azote est limitant, c'est indirectement au début (2017) et cela se répercute sur le volume des plants, puis l'azote foliaire n'est pas limitant dans l'élaboration du rendement (ou alors faiblement limitant).

## 6.2 – Lutte contre *H. obsoletus* et le dépérissement à Stolbur

### 6.2.1 – Un suivi du dépérissement sur les premières années de la durée de vie d'une parcelle de lavandin

Au CRIEPPAM, des tendances semblent se dégager mais les différences ne sont pas significatives : les couverts « Leg » et « T+L » sont touchés moins sévèrement que les modalités « Témoin » et « Gélif » et le couvert de triticales semble intermédiaire. Des résultats non-significatifs peuvent être la conséquence d'effectifs trop faibles par modalité. A l'ITEIPMAI la modalité témoin est la plus touchée par le dépérissement jusqu'en mai 2019. Ensuite, les résultats de fin juillet 2019 sont plus délicats à analyser puisque la grande proportion de « note 2 » est sûrement liée à une autre origine que le dépérissement à Stolbur. En effet, les mois de juin et juillet ont été très chauds en 2019, auxquels s'ajoute de faibles précipitations (Annexe 7). Et nous savons que les effets d'une sécheresse sont cumulatifs avec les effets du dépérissement à Stolbur (Lamacque 2020). Il est donc normal qu'après la récolte du lavandin début juillet, les plants repartent mal du fait des conditions climatiques, ce qui expliquerait cette forte proportion de « 2 ». A partir de cette date-là il est donc difficile de déterminer si les notations de dépérissement correspondent vraiment à une contamination par le phytoplasme du Stolbur ou si cela est dû aux conditions climatiques. Pour les mêmes raisons les différences observées entre les modalités fertilisée et non-fertilisées de juillet 2019 ne sont pas fiables : il y a-t-il vraiment un effet positif de la fertilisation azotée contre le dépérissement ?

Sur des jeunes plantations, comme cela est le cas lors de ce projet CASDAR, la proportion de dépérissement n'a pas pu être reliée au rendement en huile essentielle obtenu. Nous n'avons pas réussi à établir de lien entre les pertes de rendement observées et les notes moyennes de dépérissement avec les données dont nous disposons. Cette absence de lien paraît logique pour le moment car il faut en moyenne entre 1 et 2 ans pour qu'un plant infecté meurt (Yvin et al. 2017). Il est donc encore trop tôt pour visualiser l'efficacité des différents couverts à lutter contre le dépérissement. Par conséquent, dans les années qui suivent, les symptômes de dépérissement continueront à se déclarer et entraîneront la mort d'autres plants. Il faut donc attendre quelques années pour être certain de l'efficacité des couverts testés dans le projet RECITAL vis-à-vis de la réduction du dépérissement. Un suivi du dépérissement sur le long terme serait intéressant pour savoir quelle modalité est la plus intéressante économiquement du fait de durées d'exploitation différentes selon la proportion de dépérissement : une parcelle trop touchée sera arrachée plus tôt qu'une autre (Despinasse 2015).

### 6.2.2 – Des populations de *H. obsoletus* variables

La différence de pression de *H. obsoletus* entre les deux sites expérimentaux est peut-être la conséquence d'une croissance différente des couverts. En effet, 80% de ces insectes volent à moins de 40 cm de hauteur (ITEIPMAI 2012). De plus, le recouvrement du couvert sur le site de l'ITEIPMAI était supérieur à celui du CRIEPPAM (en recouvrement et aussi en

hauteur, mais ce dernier n'a pas été quantifié), ce qui pourrait expliquer cette pression plus faible à l'ITEIPMAI.

On a aussi l'impression que la différence de pression entre années successives est la conséquence d'un effet biannuel dans la dynamique de population : multiplication du nombre d'individus capturés par 3 entre 2017 et 2018 puis division par 3 entre 2018 et 2019. Selon l'année étudiée il est alors difficile de prouver l'efficacité d'un couvert inter-rang pour lutter contre le dépérissement du phytoplasme à Stolbur. Cet effet annuel sur les populations de *H. obsoletus* a déjà été observé et une part de cet effet est expliquée par la pluviométrie annuelle (Panassiti et al. 2013) : il y a une corrélation positive avec la pluviométrie annuelle. L'année 2018 a bien été plus pluvieuse que les années 2017 et 2019.

D'après le modèle non linéaire élaboré entre les captures de ce ravageur et le recouvrement du sol par les couverts semés, nous avons une bonne appréhension de la réduction de pression de *H. obsoletus* en utilisant des couverts inter-rang. Mais ce constat pourrait être plus précis en intégrant la dimension de hauteur des couverts inter-rang. En 2018 au CRIEPPAM, le couvert de triticale n'a pas permis une réduction du piégeage car il était très peu présent en 2018, contrairement à l'ITEIPMAI où le triticale s'est re-semé seul fin 2017. Il serait intéressant d'intégrer à la fois le recouvrement et la hauteur des couverts.

### 6.3 – Des biais liés au dispositif expérimental et matériel et méthodes

Le fait que les modalités de couverts végétaux et de fertilisation azotée ne soient pas disposées aléatoirement au sein de chaque site expérimental est un problème puisqu'en faisant cela les hétérogénéités du sol au sein de chaque site ont une incidence directe sur les modalités testées (Naudin 2007). Par conséquent, il est plus difficile d'identifier l'origine des différences observées : sont-elles la conséquence de l'effet des modalités testées ou de l'hétérogénéité spatiale ? C'est le cas pour les rendements obtenus en 2018 au CRIEPPAM et à l'ITEIPMAI : selon le site expérimental, les modalités fertilisées produisent moins d'huile que les modalités non-fertilisées.

Pour améliorer la précision et la pertinence des résultats, il aurait été intéressant de mesurer rapidement la hauteur de chaque couvert pour identifier si la cause de diminution du piégeage de ce ravageur était dû à une barrière physique créée par le couvert ou d'une autre cause. Ensuite, peut-être que l'intensité des pertes de rendement s'expliquent plus directement à l'aide de données de biomasse produite sur l'inter-rang (la biomasse serait alors estimée par les notions de recouvrement et de hauteur). Or, dans le projet RECITAL nous avons uniquement relevé le pourcentage de recouvrement de l'inter-rang par les couverts semés. Les concurrences hydriques et azotée seraient mieux expliquées par des données de biomasse de couvert produite sur l'inter-rang plutôt que seulement un pourcentage de recouvrement.

De plus, pour déterminer les facteurs limitant le rendement, des moyennes de tous les indicateurs ont été calculées pour chaque sous-modalités car les répétitions des différents indicateurs ne correspondaient pas à la même chose spatialement. Il aurait été mieux d'avoir au sein de chaque modalité autant de répétitions du rendement que de répétitions de tous les autres indicateurs (et situé au même endroit) pour pouvoir faire correspondre une valeur de rendement avec une valeur de chaque indicateur. De ce fait nous aurions eu plus de points pour étudier des corrélations. De la manière dont nous avons fait (en calculant des moyennes par modalité) nous avons perdu de l'information pour expliquer au mieux le rendement.



#### 6.4 – Estimation du stress hydrique et lien avec le rendement

Un seuil de stress hydrique du lavandin a été estimé à 30 mm de réserve utile en eau. Cette estimation a été identifiée sur chaque site expérimental mais elle dépend fortement du recalibrage des sondes capacitatives à l'aide du point de flétrissement permanent et de la capacité au champ qui sont propres à chaque sol. Cette étape de recalibrage des sondes capacitatives est donc très importante. D'ailleurs, à l'aide des sondes capacitatives, nous avons trouvé des seuils d'humidité qui pénalisent le rendement en huile différents selon le site : une simple imprécision sur la correction des sondes capacitatives se retrouve directement dans l'imprécision du seuil de stress annoncé. En 2019 au CRIEPPAM, le seuil de 0,15 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (qui correspond à 30mm de réserve utile en eau) a permis de déterminer la meilleure corrélation entre le rendement 2019 et la durée passée au-dessus de ce seuil entre mi-avril et mi-juin (période juste avant floraison du lavandin). Avec les dispositifs PépiPIAFs nous avons identifié ce même seuil à deux reprises. Cela permet d'annoncer avec plus de confiance que le seuil de stress hydrique du lavandin se situe aux alentours de 30 mm de réserve utile en eau. En revanche, aucun stress thermique ou zone de confort thermique ne peut être annoncée car aucun résultat n'est généralisable entre deux sites ou deux années d'étude.

Une des conclusions à tirer des mesures de l'humidité du sol et des dispositifs PépiPIAF est que les sondes capacitatives ne sont pas assez précises et manquent de fiabilité. En effet, pour être précises, les sondes capacitatives doivent chacune être étalonnées au sol où elles seront placées (Delalande et al. 2017). Or, pour ce projet les sondes de chaque site ont été étalonnées selon un seul échantillon de sol, et l'hétérogénéité du sol n'est donc pas prise en compte. Nous nous retrouvons donc avec des données très hétérogènes d'humidité du sol à un même instant sur les 3 répétitions d'une modalité. La variabilité intra-modalité de couverts inter-rang est supérieure à la variabilité réelle inter-modalité, qui est donc impossible à percevoir. Au contraire, les PépiPIAF mesurent des données très cohérentes d'une répétition à l'autre : il y a une homogénéité de la dynamique de variation de diamètre des tiges (Lamacque 2020). Les périodes de stress hydrique sont plus faciles à identifier : on observe une contraction estivale du diamètre des tiges. Maintenant que l'on est certain que l'ensemble des PépiPIAFs d'une même modalité se comporte de manière similaire, il serait intéressant de placer un dendromètre par modalité de couvert inter-rang pour observer des durées et intensités différentes de stress hydrique qui touchent le lavandin. Et une fois cela fait il sera plus facile de corrélérer cette durée et intensité de stress hydrique avec une perte de rendement. De plus, les facteurs environnementaux comme les précipitations et les températures semblent jouer un rôle dans l'expressions des gènes responsables de la production de certains composés de l'huile essentielle (Hassiotis et al. 2014). Il semble donc pertinent d'étudier une éventuelle relation entre durée et intensité du stress hydrique avec le rendement en huile.

En viticulture, pendant la période qui suit la floraison c'est l'eau qui apparaît le facteur limitant dominant et qui explique le mieux les différences de rendement entre une vigne entretenue avec ou sans couvert végétal inter-rang (Celette et Gary 2013). Chez le lavandin, on pense qu'un stress hydrique identifié pendant la floraison est responsable d'une perte de rendement dans la mesure où ce stress pourrait stopper la croissance indéterminée des épis de lavandin (Upson et Andrews 2004). Lors des différents stades de l'épanouissement des fleurs de lavandin, les facteurs environnementaux comme la température et les précipitations semblent jouer un rôle dans l'accumulation des composés organiques volatiles dans les calices (Guitton et al. 2010a; Hassiotis et al. 2014). C'est pour cela qu'une étude précise des stades

phénologiques associée à la mesure de stress hydrique ou azotée prend entièrement sens pour déterminer le stade phénologique le plus sensible pour l'élaboration du rendement. Ce type d'information serait d'une utilité importante pour déterminer des bonnes stratégies de gestion de l'inter-rang, afin d'obtenir un bon compromis entre concurrences pour les ressources et bénéfiques pour la culture de lavandin (Rapidel et al. 2015). L'idéal serait d'avoir un couvert végétal inter-rang non-concurrentiel lors du développement des inflorescences de lavandin (de fin mai jusqu'à début juillet), mais encore en place lors du vol de *H. obsoletus* (de fin juin jusqu'à mi-août).

Pour identifier avec plus de précision les périodes et seuil de stress hydrique propres à la culture de lavandin, il serait intéressant d'utiliser des méthodes complémentaires à l'utilisation des sondes capacitatives. L'élaboration d'un modèle de bilan hydrique basé sur le partage des ressources entre le lavandin et les couverts inter-rang permettrait de connaître plus précisément la quantité d'eau réellement disponible pour le lavandin. En effet, les racines du lavandin peuvent atteindre une distance horizontale de 87cm sur l'inter-rang (Yvin et al. 2017), ce qui prouve que le lavandin est en concurrence directe pour l'eau avec les couverts inter-rang. La contrainte hydrique subie par le lavandin serait alors simulée pour chacune des modalités (Celette 2007). En viticulture, ces modélisations permettent de bien évaluer les états hydriques (Pellegrino et al. 2006), qui sont liées aux composantes du rendement (Ripoche et al. 2010). On sait aussi que lorsque la vigne est concurrencée par un couvert inter-rang, elle réorganise son système racinaire pour aller chercher l'eau plus en profondeur (Celette, Gaudin, et Gary 2008). En faisant le parallèle avec le lavandin, on peut supposer que la concurrence hydrique provoquée les 1ères années par les couverts inter-rang induit une réorganisation du système racinaire du lavandin. Cette orientation plus en profondeur des racines de lavandin pourrait permettre à cette culture d'être plus résiliente à la sécheresse dans les années suivantes.

Selon une étude sur la concurrence hydrique de différentes espèces de couverts inter-rang (Delabays 2006), les espèces annuelles qui se re-sèment naturellement exercent moins de concurrence hydrique avec la vigne. Cela s'explique par un cycle végétatif du couvert différent par rapport à celui de la vigne. Et, dans notre étude, le couvert de triticales est le couvert qui a permis le minimum de perte de rendement (surtout à l'ITEIPMAI), c'est donc celui qui est jugé le moins concurrentiel. Dans le projet RECITAL, le couvert de triticales a été broyé tardivement après maturité dans le but que les graines tombent au sol et se re-sèment naturellement, chose qui a bien fonctionné à l'ITEIPMAI. De plus, en parcelles de producteurs où un couvert de triticales a été testé, il n'a pas forcément été observé une diminution de rendement (COSTES, communication personnelle).

Pour finir sur l'importance du stress hydrique pendant la floraison dans l'élaboration du rendement, il faudrait avoir plus d'années d'expérimentations car nous disposons ici uniquement de 2 années. En 2018, les rendements sont du même ordre de grandeur sur les 2 sites, et la pluviométrie sur le dernier mois avant récolte est presque similaire. En 2019, le rendement est nettement supérieur à l'ITEIPMAI qu'au CRIEPPAM et cela pourrait s'expliquer par la localisation des précipitations dans le temps (Annexe 6 et 7) : à l'ITEIPMAI il tombe 60 mm contre 10 mm au CRIEPPAM au mois de juin. Les pluies positionnées dans le dernier mois avant la récolte sont très importantes dans le rendement en huile essentielle (Candaele, communication personnelle).

## 6.5 – Stress azoté et rendement

La compétition pour les ressources du sol entre la vigne et les couverts végétaux inter-rang se révèle par la limitation de la croissance des deux cultures (Celette, Findeling, et Gary 2009; Celette, Gaudin, et Gary 2008). Dans notre expérimentation de mise en place de couverts végétaux en inter-rang de lavandin, où nous avons aussi testé l'effet d'une fertilisation azotée, un apport d'azote n'a pas eu d'effet sur le volume des plants. Le fait que l'azote ne semble pas limitant du rendement dans cette expérimentation a été évoqué plusieurs fois. Au niveau de la concentration de nitrate dans le sol et la concentration d'azote foliaire, on observe quelques différences de tendance, mais nous n'avons pas pu expliquer les différences de production d'huile essentielle par ces différences de concentrations. Cela voudrait dire que dans les conditions de l'expérience, les concentrations d'azotes du sol ne sont pas limitantes. Même s'il existe une concurrence azotée entre les couverts inter-rang et le lavandin, elle n'est pas assez intense pour pénaliser la croissance des plants ou la production d'huile. Seule l'azote foliaire au moins de juin semble avoir une faible importance dans l'élaboration du rendement, mais la contribution de l'azote foliaire à cette date est bien moins importante que le volume des plants. En vigne, l'azote foliaire au moment de la véraison participe au stockage d'azote dans les baies et le bois (Chantelot, Celette, et Wery 2004). Cette information nous laisse penser que lorsque l'état azoté du lavandin est bon alors le fonctionnement physiologique du lavandin est bon lui aussi, ce qui pourrait se traduire par une accumulation accrue d'huile essentielle dans les trichomes glandulaires.

En 2019, le volume des plants est significativement différent entre les modalités nues (« Témoin » et « Gelif ») et les modalités couvertes (« Triti », « Legumineuses » et « T+L »). Ce qui met en évidence une forme de concurrence pour une autre ressource que l'azote. Lors d'une expérimentation sur de la Lavande Vraie, il a été trouvé que la quantité d'azote apportée n'avait pas d'effet sur le rendement en huile essentielle, alors que la quantité de phosphore a un effet positif sur le rendement (Chrysargyris, Panayiotou, et Tzortzakis 2016). Par conséquent, les différences observées de volumes des plants ainsi que de rendements sont influencées par une autre variable que la concentration d'azote du sol comme l'état hydrique du sol.

## 6.6 – Le modèle explicatif du rendement en huile essentielle

Il a été identifié que le volume des plants au mois de février était le facteur dominant pour l'élaboration du rendement en huile essentielle de lavandin. L'hypothèse qui découle de ce résultat est que le volume de végétation mesuré lors du repos végétatif hivernal détermine un potentiel de production pour l'année en cours. Et que selon les conditions pédoclimatiques de l'année, ce potentiel de rendement serait pénalisé lors de phases précises comme un stress hydrique lors de la formation des épis de lavandin. Ce sont justement ces conditions qui se « cachent » derrière le facteur « année » placé en effet aléatoire dans le modèle. Le 2<sup>nd</sup> facteur explicatif identifié dans une moindre importance dans l'élaboration du rendement est l'azote foliaire du lavandin mesuré au mois de juin.

Nous avons vu plus tôt que les modalités de couvert inter-rang étaient responsables de volumes de plants différents. Il faudrait donc maintenant expliquer comment le volume des plants est élaboré : pourquoi dans certains cas avons-nous des plants plus gros ou plus petits ? Mais malheureusement, aucune relation n'a été identifiée entre les variables dont nous disposons et le volume des plants. Nous avons pour hypothèse qu'un stress (hydrique ou azoté) lors de la 1<sup>ère</sup> année après plantation induit une faible croissance des plants.

## 7 – Conclusion

L'action N°2 de ce projet RECITAL a pour ambition d'identifier les modes de gestion de l'inter-rang les mieux adaptés en culture lavandicole. Les multiples objectifs sont de garantir une résilience des cultures face au climat, de garantir un état hydrique et azoté propice au bon développement du lavandin, de limiter la propagation du phytoplasme du Stolbur par *H. obsoletus* et enfin d'assurer une bonne gestion des adventices. Pour identifier la meilleure gestion de l'inter-rang, on teste l'effet de 4 couvertures végétales inter-rang et l'effet d'une fertilisation azotée.

Pour commencer, le couvert constitué d'espèces gélives n'est absolument pas une réussite car les semis ne sont jamais concluants et le couvert se développe très mal. Ce mode de gestion se comporte pareil qu'un témoin sol nu. En revanche, les couverts de triticale, légumineuses et de mélange de triticale et de légumineuses sont plus faciles à implanter et possèdent un bon pouvoir couvrant. Lors des premières années de croissance du lavandin, on observe une concurrence évidente entre les couverts inter-rang et le lavandin. Cette concurrence se traduit par une baisse de rendement en huile essentielle souvent significativement différente des modalités témoin et gélive ainsi que d'une diminution du volume moyen des plants. Mais, un des objectifs principaux est atteint : en mettant en place des couverts végétaux inter-rang, on diminue la présence de *H. obsoletus* de moitié lorsque le pourcentage de recouvrement par le couvert est d'au moins 25 %. Cette diminution de présence de ce ravageur est un des leviers agronomiques qui permet de diminuer la proportion de plants infectés par le phytoplasme du Stolbur. Actuellement, sur le projet RECITAL les résultats montrent une diminution de la proportion des plants infectés lorsqu'un couvert est présent par rapport à un sol nu, mais cette tendance est rarement significative. L'objectif est de maintenir une proportion de dépérissement assez faible, pour que la baisse de rendement due à cette maladie soit la plus faible possible et que la parcelle reste en place le plus longtemps possible. L'utilisation de couvert-inter rang se révèle donc pénalisante les 1ères années et potentiellement intéressante pour les années suivantes.

L'azote contenu dans le sol et dans les feuilles de lavandin n'a pas été déterminé comme un facteur limitant du rendement puisque les modalités fertilisées et non-fertilisées ne présentent aucune différence de rendement. Cependant, une concurrence hydrique semble évidente. Nous avons estimé qu'en dessous de 30 mm de réserve utile en eau, le lavandin est en état de stress hydrique. Et en accord avec les premiers résultats probants de variation du diamètre des tiges de lavandin, on pense que le stress hydrique survient une dizaine de jours plus tôt lorsque l'inter-rang est couvert. Ce stress hydrique identifié lors de l'épanouissement et la floraison des épis pourrait directement expliquer les pertes de rendements obtenus. Quant aux conditions de température du sol, aucune tendance générale n'a été identifiée.

Pour terminer, le volume moyen des plants atteint en sortie d'hiver d'une année détermine le potentiel de production d'huile essentielle de lavandin cette même année. Ce potentiel est ensuite diminué selon les conditions respectives influencées par chaque couvert. Par exemple l'état azoté des plants au mois de juin explique une faible proportion du rendement.

Pour mieux comprendre l'élaboration du rendement en huile essentielle, il nous reste à déterminer plus précisément le lien entre état hydrique du sol et développement des inflorescences de lavandin.

## Références bibliographiques

- Adam, Boris, Thierry Ameglio, et Didier Coste. 2013. « Système PépiPIAF ». <https://www6.ara.inrae.fr/piaf/Methodes-et-Modeles/PepiPIAF>.
- Baumgartner, Kendra, Kerri L. Steenwerth, et Lissa Veilleux. 2008. « Cover-Crop Systems Affect Weed Communities in a California Vineyard ». *Weed Science* 56(4): 596-605.
- Beizhou, Song et al. 2012. « Intercropping With Aromatic Plants Decreases Herbivore Abundance, Species Richness, and Shifts Arthropod Community Trophic Structure ». *Environmental Entomology* 41(4): 872-79.
- Cavanagh, H. M. A., et J. M. Wilkinson. 2002. « Biological Activities of Lavender Essential Oil ». *Phytotherapy Research* 16(4): 301-8.
- Celette, Florian et al. 2005. « Belowground Interactions in a Vine (*Vitis Vinifera* L.)-Tall Fescue (*Festuca Arundinacea* Shreb.) Intercropping System: Water Relations and Growth ». *Plant and Soil* 276(1-2): 205-17.
- . 2007. « Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté dans une vigne enherbée sous le climat méditerranéen ».
- Celette, Florian, Antoine Findeling, et Christian Gary. 2009. « Competition for Nitrogen in an Unfertilized Intercropping System: The Case of an Association of Grapevine and Grass Cover in a Mediterranean Climate ». *European Journal of Agronomy* 30(1): 41-51.
- Celette, Florian, et Christian Gary. 2013. « Dynamics of Water and Nitrogen Stress along the Grapevine Cycle as Affected by Cover Cropping ». *European Journal of Agronomy* 45: 142-52.
- Celette, Florian, Rémi Gaudin, et Christian Gary. 2008. « Spatial and Temporal Changes to the Water Regime of a Mediterranean Vineyard Due to the Adoption of Cover Cropping ». *European Journal of Agronomy* 29(4): 153-62.
- Chailan. 2013. « Production et marchés des huiles essentielles de lavandes et lavandins. » : 1-14.
- Chaisse, E. et al. 2014. « Le bulletin technique et économique de la filière plantes à parfum ». *L'essentiel*: 1-8.
- Chaisse, E., B. Candaele, et S. Taquin. 2013. « Dépérissement de la lavande: une histoire ancienne. » *L'essentiel* (72): 7.
- Chaisse, E., M. Fontaine, et B. Candaele. 2014. « Les données 2014 du CIHEF ».
- Challenge Agriculture. « Nitrachek® ». <https://www.challenge-agriculture.fr/materiel/nitrachek/>.
- Chantelot, Eric, Florian Celette, et Jacques Wery. 2004. « Concurrence pour les ressources hydriques et azotées entre vigne et enherbement en milieu méditerranéen ». : 13.
- Chrysargyris, Antonios, Christakis Panayiotou, et Nikos Tzortzakis. 2016. « Nitrogen and Phosphorus Levels Affected Plant Growth, Essential Oil Composition and Antioxidant Status of Lavender Plant (*Lavandula Angustifolia* Mill.) ». *Industrial Crops and Products* 83: 577-86.
- CIHEF. 2018. « Évolution de la répartition variétale des lavandes en France de 2014 à 2018 ».

- . « Un peu d’histoire - Filière des huiles essentielles françaises de lavande et lavandin. » *Censo*. <http://www.censo-lavande.fr/une-filiere-essentielle/une-filiere-essentielle-114.html>.
- Cimerman, Agnès et al. 2009. « Striking Diversity of Vmp1, a Variable Gene Encoding a Putative Membrane Protein of the Stolbur Phytoplasma ». *Applied and Environmental Microbiology* 75(9): 2951-57.
- Costes, Thomas. 2020. « Couverture végétale inter-rangs en lavanderaies ».
- Couëdel, Antoine, Lionel Alletto, Hélène Tribouillois, et Éric Justes. 2018. « Cover Crop Crucifer-Legume Mixtures Provide Effective Nitrate Catch Crop and Nitrogen Green Manure Ecosystem Services ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 254: 50-59.
- CRIEPPAM. 2014a. « La Mise en place de couverts végétaux dans les parcelles de lavande et lavandin : une technique innovante et tournée vers l’avenir. » (75): 4-5.
- . 2014b. « Limitation de la colonisation de jeunes parcelles de plants sains par les adultes de *Hyalesthes obsoletus*. » *Compte-rendu technique 2013 du Programme Casdar IP n°1104*: 87-93.
- . 2016. « Plants sains certifiés ». <http://www.crieppam.fr/centre-regionalise-experimentation-ppam/agronomie-machinisme-transformation-communication/plants-sains>.
- Delabays, N. 2006. « Essai d’enherbement de la vigne avec des espèces peu concurrentielles: aspects botaniques et malherbologiques ». *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 38: 12.
- Delalande, Magalie et al. 2017. « Mesure de l’eau du sol : questions, méthodes et outils Exemples d’application sur deux plateformes champs du réseau « PHENOME » ». : 32.
- Delpuech, X. 2013. « Screening of weakly competitive species for cover cropping in Mediterranean vineyards. » 28: 305-10.
- Despinasse, Yolande. 2015. « Diversité chimique et caractérisation de l’impact du stress hydrique chez les lavandes ». : 181.
- Durán Zuazo, Víctor Hugo, et Carmen Rocío Rodríguez Pleguezuelo. 2008. « Soil-Erosion and Runoff Prevention by Plant Covers. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 28(1): 65-86.
- Ferrero, A., B. Usowicz, et J. Lipiec. 2005. « Effects of Tractor Traffic on Spatial Variability of Soil Strength and Water Content in Grass Covered and Cultivated Sloping Vineyard ». *Soil and Tillage Research* 84(2): 127-38.
- Fiedler, Anna K., Doug A. Landis, et Steve D. Wratten. 2008. « Maximizing Ecosystem Services from Conservation Biological Control: The Role of Habitat Management ». *Biological Control* 45(2): 254-71.
- Finney, Denise M., Charles M. White, et Jason P. Kaye. 2016. « Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures ». *Agronomy Journal* 108(1): 39-52.

- FranceAgriMer. 2018. « Marché des plantes à parfum, aromatiques et médicinales - Panorama 2018 ».
- . 2019. « Point sur la conjoncture PPAM - Bilan 1er semestre 2019. » : 1-4.
- Gaudin, Rémi, Florian Celette, et Christian Gary. 2010. « Contribution of Runoff to Incomplete off Season Soil Water Refilling in a Mediterranean Vineyard ». *Agricultural Water Management* 97(10): 1534-40.
- Giorgi, Filippo, et Piero Lionello. 2008. « Climate Change Projections for the Mediterranean Region ». *Global and Planetary Change* 63(2-3): 90-104.
- Guilpart, Nicolas, Aurélie Metay, et Christian Gary. 2014. « Grapevine Bud Fertility and Number of Berries per Bunch Are Determined by Water and Nitrogen Stress around Flowering in the Previous Year ». *European Journal of Agronomy* 54: 9-20.
- Guitton, Yann et al. 2010a. « Differential Accumulation of Volatile Terpene and Terpene Synthase MRNAs during Lavender ( *Lavandula Angustifolia* and *L. x Intermedia* ) Inflorescence Development ». *Physiologia Plantarum* 138(2): 150-63.
- . 2010b. « Lavender Inflorescence: A Model to Study Regulation of Terpenes Synthesis ». *Plant Signaling & Behavior* 5(6): 749-51.
- Hassiotis, C.N. et al. 2014. « Environmental and Developmental Factors Affect Essential Oil Production and Quality of *Lavandula Angustifolia* during Flowering Period ». *Industrial Crops and Products* 62: 359-66.
- Herzog, Christine, Jonas Anderegg, et Carolin Luginbühl. 2017. « La fumure azotée du lin oléagineux influence le rendement en graines et la qualité de l'huile ». : 8.
- Iriti, Marcello et al. 2006. « Histo-Cytochemistry and Scanning Electron Microscopy of Lavender Glandular Trichomes Following Conventional and Microwave-Assisted Hydrodistillation of Essential Oils: A Comparative Study ». *Flavour and Fragrance Journal* 21(4): 704-12.
- ITEIPMAI. 2012. « Evaluation de la hauteur maximale de vol des adultes de *Hyalesthes obsoletus*. » *Compte-rendu d'activité technique 2011*: 328-30.
- Jullien, Frédéric et al. 2014. « Isolation and Functional Characterization of a  $\tau$ -Cadinol Synthase, a New Sesquiterpene Synthase from *Lavandula Angustifolia* ». *Plant Molecular Biology* 84(1-2): 227-41.
- Kessler, Sébastien, Patrik Kehrl, et Santiago Schaerer. 2010. « *Hyalesthes obsoletus*, vecteur du bois noir de la vigne: ses plantes hôtes en Suisse ». (42): 190–196.
- Lamacque, Lia. 2020. « Caractérisation physiologique de la réponse à la sécheresse de la Lavande et du Lavandin : impact de la culture inter-rang ». Clermont-Auvergne.
- Le Bissonnais, Y, et P Andrieux. 2007. « Impact des modes d'entretien de la vigne sur le ruissellement, l'érosion et la structure des sols : Mécanismes et résultats expérimentaux. » *Progrès Agricole et Viticole* 124(10): 191-96.
- Lelièvre, F, S Sala, F Ruget, et F Volaire. 2011. « Evolution climatique du Sud de la France 1950-2009. Proj. CLIMFOUREL PSDR-3, Régions LR, MP, RA ».

- Letourmy, Philippe. 1999. « Expérimentation agronomique planifiée ». : 50.
- Lis-Balchin, Maria. 2002. *Lavander. The genus Lavandula, Taylor&Francis. ed, Medicinal and aromatic plants - industrial profils.*
- Lou, Yi, Adam S. Davis, et Anthony C. Yannarell. 2016. « Interactions between Allelochemicals and the Microbial Community Affect Weed Suppression Following Cover Crop Residue Incorporation into Soil ». *Plant and Soil* 399(1-2): 357-71.
- Migléc, Tamás et al. 2015. « Establishment of Three Cover Crop Mixtures in Vineyards ». *Scientia Horticulturae* 197: 117-23.
- Naudin, Krishna. 2007. « Expérimentations agronomiques Conduites et plans des essais ». : 19.
- Panassiti, Bernd, Michael Breuer, Stacey Marquardt, et Robert Biedermann. 2013. « Influence of Environment and Climate on Occurrence of the Cixiid Planthopper *Hyalesthes Obsoletus*, the Vector of the Grapevine Disease 'Bois Noir' ». *Bulletin of Entomological Research* 103(6): 621-33.
- Pellegrino, A., E. Gozé, E. Lebon, et J. Wery. 2006. « A Model-Based Diagnosis Tool to Evaluate the Water Stress Experienced by Grapevine in Field Sites ». *European Journal of Agronomy* 25(1): 49-59.
- Perrin, A., et M. Colson. 1986. « L'appareil sécréteur des lavandes et des lavandins. » *Parfums Cosmétiques Arômes* 69: 61-63.
- Polge de Combret - Champart, L. et al. 2013. « Determinants of the Degradation of Soil Structure in Vineyards with a View to Conversion to Organic Farming ». *Soil Use and Management* 29(4): 557-66.
- PPAM de France. « Les plantes à parfum - PPAM de France. » *PPAM de France.*  
<https://www.ppamdefrance.com/les-plantes-a-parfum/>.
- Quaglino, Fabio et al. 2013. « ' Candidatus Phytoplasma Solani', a Novel Taxon Associated with Stolbur- and Bois Noir-Related Diseases of Plants ». *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 63(Pt\_8): 2879-94.
- Rapidel, Bruno et al. 2015. « Analysis of Ecosystem Services Trade-Offs to Design Agroecosystems with Perennial Crops ». *Agronomy for Sustainable Development* 35(4): 1373-90.
- Ripoche, Aude et al. 2011. « Modelling Adaptive Management of Intercropping in Vineyards to Satisfy Agronomic and Environmental Performances under Mediterranean Climate ». *Environmental Modelling & Software* 26(12): 1467-80.
- Ripoche, Aude, Florian Celette, Jean-Pierre Cinna, et Christian Gary. 2010. « Design of Intercrop Management Plans to Fulfil Production and Environmental Objectives in Vineyards ». *European Journal of Agronomy* 32(1): 30-39.
- Schmid, Rudolf, K. (Klaus) Kubitzki, K. (Klaus) Kubitzki, et J. (Joachim) W. Kadereit. 2005. « The Families and Genera of Vascular Plants - Flowering Plants. Dicotyledons: Lamiales ». *Taxon* 54(2): 574.



Sforza, René, Thierry Bourgoïn, Stephen W Wilson, et Elisabeth Boudon-Padieu. 1999. « Field Observations, Laboratory Rearing and Descriptions of Immatures of the Planthopper *Hyalesthes Obsoletus* (Hemiptera: Cixiidae) ». (96): 409-18.

Tardy, Florence, Gaëlle Damour, Marc Dorel, et Delphine Moreau. 2017. « Trait-Based Characterisation of Soil Exploitation Strategies of Banana, Weeds and Cover Plant Species » éd. Jose Luis Gonzalez-Andujar. *PLOS ONE* 12(3): 17.

Tribouillois, Hélène, Jean-Pierre Cohan, et Eric Justes. 2016. « Cover Crop Mixtures Including Legume Produce Ecosystem Services of Nitrate Capture and Green Manuring: Assessment Combining Experimentation and Modelling ». *Plant and Soil* 401(1-2): 347-64.

Upton, T, et S Andrews. 2004. *The Genus Lavandula*.

Yvin, C. et al. 2017. « Dépérissement de la lavande et du lavandin : mise en oeuvre d'un programme de recherches appliquées afin d'apporter des solutions de lutte aux producteurs ». *Innovations Agronomiques* 55: 107-20.

Zhang, Wei et al. 2007. « Ecosystem Services and Dis-Services to Agriculture ». *Ecological Economics* 64(2): 253-60.

# Annexes

## Annexe 1 : Analyse de sol de la parcelle du CRIEPPAM



### RAPPORT D'ESSAIS N° 2494491 ANALYSE DE TERRE

Laboratoire d'essais accrédité par le COFRAC sous le numéro 1-6071 pour les essais du programme 96 ci-dessous référencés



Portée disponible sur le site www.cofrac.fr

N° adhérent : 2339642 Nom client : CRIEPPAM Adresse : LES QUINTARNS 04100 MANOSQUE Organisme : CELESTA LAB Identification de l'échantillon : 1646-017 STATION	Coordonnées GPS : Latitude : N 43° 51' 7.6" Longitude : E 5° 49' 43.8"	Date de prélèvement : Date de réception : 23/11/2016 Date du début de l'essai : 23/11/2016 N° laboratoire : 2494491 Délai de conservation de l'échantillon : 2 mois sur Sec Préleveur :
--	--	--

#### Analyse physico constitutive

	Détermination	Norme méthode	Résultats	Incertitude	Unité
Granulométrie sans décarbonatation	Argile ( $\leq 2 \mu\text{m}$ )	NF X 31 -107	26.8		% TFS
	Limons fins (2 - 20 $\mu\text{m}$ )	NF X 31 -107	23.52		% TFS
	Limons grossiers (20 - 50 $\mu\text{m}$ )	NF X 31 -107	15.12		% TFS
	Sables fins (50 - 200 $\mu\text{m}$ )	NF X 31 -107	18.01		% TFS
	Sables grossiers (200 - 2000)	NF X 31 -107	15.29		% TFS
	* Calcaire - $\text{CaCO}_3$ total	Méthode interne selon NF ISO 10693	37.1	$\pm 2$	% TFS
	* Matière organique	Méthode interne selon NF ISO 14235	1.26	$\pm 0.15$	% TFS
	* Carbone organique	Méthode interne selon NF ISO 14235	0.73	$\pm 0.086$	% TFS
	* Azote total (combustion sèche)	Méthode interne selon NF ISO 13878	---	---	% TFS
	Rapport C/N	Calcul	---	---	
* CEC Metson	Méthode interne selon NF X31-130	10.7	$\pm 1$	meq / 100 g TFS	
* CEC cobaltihexammine	Méthode interne selon NF ISO 23470	---	---	meq / 100 g TFS	

#### Analyse chimique - Valeur agronomique

	Détermination	Norme méthode	Résultats	Incertitude	Unité
Cations échangeables acétate d' $\text{NH}_4$	* pH $\text{H}_2\text{O}$	Méthode interne selon NF ISO 10390	8.4	$\pm 0.1$	
	* pH KCl	Méthode interne selon NF ISO 10390	7.9	$\pm 0.1$	
	* $\text{P}_2\text{O}_5$ Olsen	Méthode interne selon NF ISO 11263	---	---	mg / kg TFS
	* $\text{P}_2\text{O}_5$ Joret-Hébert	Méthode interne selon NF X31-161	0.249	$\pm 0.022$	% TFS
	* $\text{K}_2\text{O}$ échangeable	Méthode interne selon NF X31-108	0.35	$\pm 0.019$	% TFS
	* $\text{MgO}$ échangeable	Méthode interne selon NF X31-108	0.312	$\pm 0.02$	% TFS
	* $\text{CaO}$ échangeable	Méthode interne selon NF X31-108	12.69	$\pm 0.9$	% TFS
	* $\text{Na}_2\text{O}$ échangeable	Méthode interne selon NF X31-108	0.0766	$\pm 0.0075$	% TFS
	* Cu EDTA	Méthode interne selon NF X31-120	7.26	$\pm 0.43$	mg / kg TFS
	* Zn EDTA	Méthode interne selon NF X31-120	5.09	$\pm 0.53$	mg / kg TFS
Oligos bio disponibles	* Mn EDTA	Méthode interne selon NF X31-120	4.2	$\pm 1.3$	mg / kg TFS
	* Fe EDTA	Méthode interne selon NF X31-120	<9.99	---	mg / kg TFS
	* Bore eau bouillante	Méthode interne selon NF X31122	---	---	mg / kg TFS

#### Éléments traces métalliques totaux

	Détermination	Norme méthode	Résultats	Incertitude	Unité
ETM totaux extraits à l'eau régale	* Mercure	Méthode interne selon NF EN 12338	---	---	mg / kg TFS
	* Cadmium	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS
	* Chrome	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS
	* Cuivre	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS
	* Nickel	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS
	* Plomb	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS
	* Zinc	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS

#### Oligo-éléments totaux

	Détermination	Norme méthode	Résultats	Incertitude	Unité
Oligos totaux extraits à l'eau régale	Bore total	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS
	Cobalt	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS
	Fer total	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	% TFS
	Manganèse total	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS
	Molybdène	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF ISO 22036	---	---	mg / kg TFS
	Sélénium	Méth. interne selon NF ISO 11466 / NF EN ISO 15586	---	---	mg / kg TFS

Analyses réalisées sur terre fine sèche (TFS) préparée selon la norme NF ISO 11464.

#### Commentaires :

La détermination CEC a fait l'objet d'une vérification

Fait à Ardon, le 08/12/2016 - GARNIER Danièle  
Responsable technique, service Terres.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral. Il comporte 1 page. L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation. Le rapport ne doit pas être reproduit partiellement sans l'accord du laboratoire. Les résultats exprimés et les incertitudes associées ne concernent que les échantillons soumis à essai. Les paramètres avec un astérisque sont couverts par notre accréditation COFRAC. Les résultats obtenus par le laboratoire ne concernent que l'objet soumis à essai. Ils sont émis avec toutes les réserves que requiert l'absence de maîtrise par le laboratoire des conditions de prélèvement, de stockage et de transport de l'objet soumis à essai.

## Annexe 2 : Analyse de sol de la parcelle de l'ITEIPMAI



Laboratoire agréé par le Ministère de l'Agriculture



ANALYSE de TERRE  
Vos résultats & conseils

Numéro d'Analyse **1609027**

du type **T1G4BNCEC**  
Echantillon reçu le 01/09/2016  
Edition du 09/09/2016

### Parcelle

Surface Ha

### Echantillon Nord Lavandin

Précédent

Culture en place

Culture prévue

### Exploitant

ITEIPMAI SUD EST

### Conseiller

### Destinataire

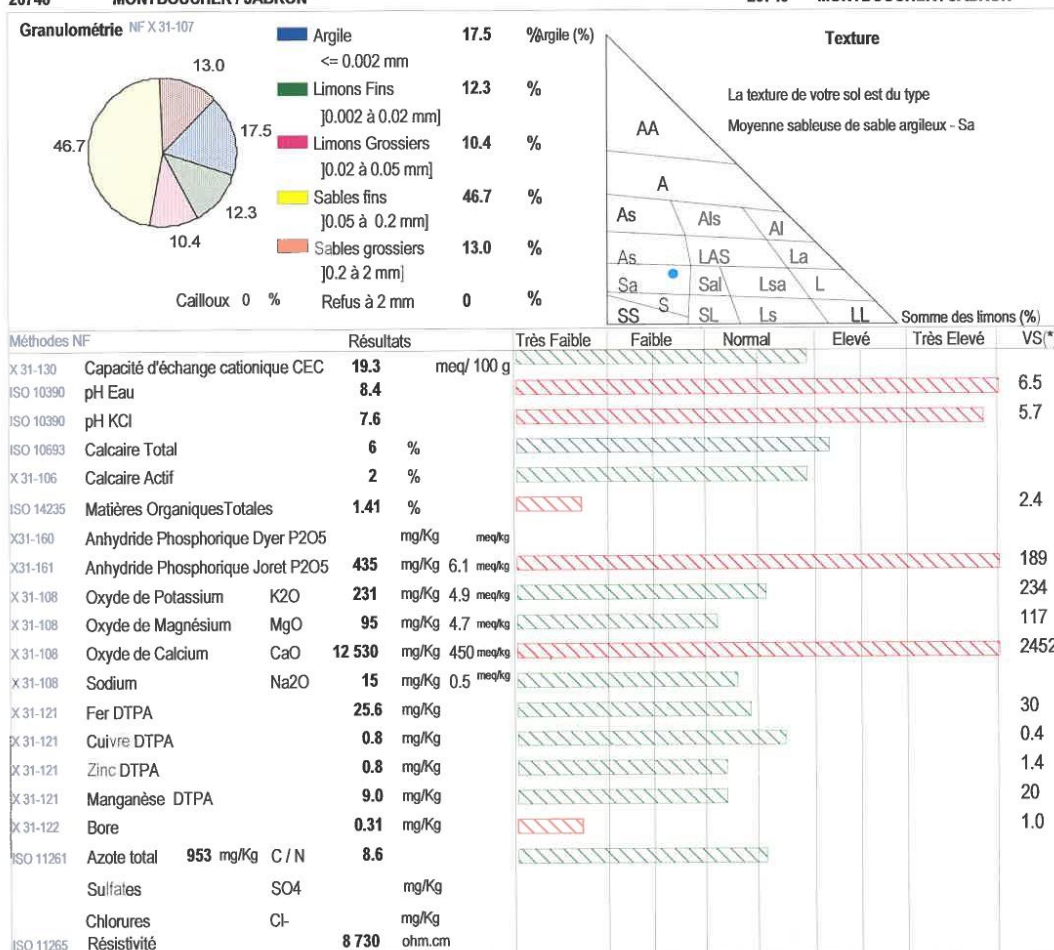
ITEIPMAI SUD EST

Domaine de la Vesc

Domaine de la Vesc

26740 MONTBOUCHER / JABRON

26740 MONTBOUCHER / JABRON



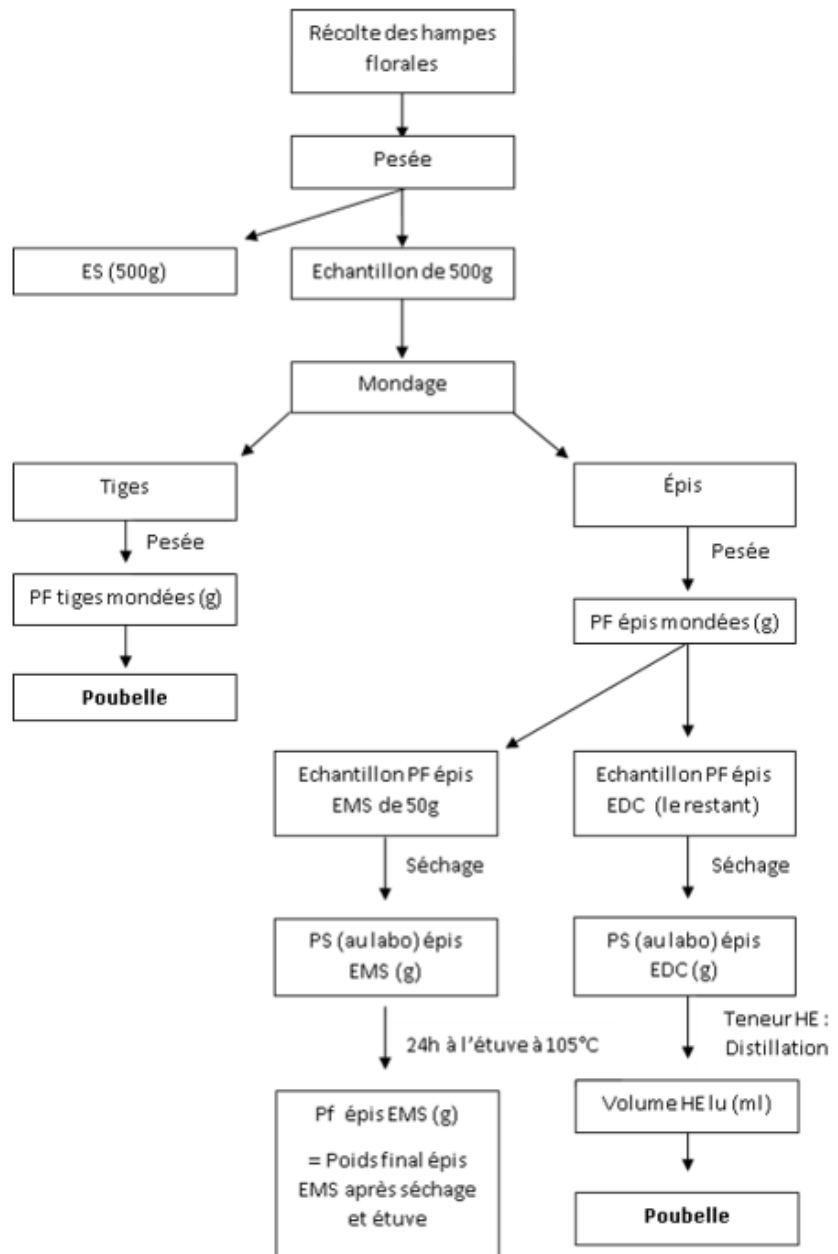
INDICE DE POUVOIR CHLOROSANT IPC = 1  
 Certains de ces éléments peuvent poser problèmes, actions si possible  
 Eléments plus ou moins corrects, à surveiller ou à améliorer si possible  
 Eléments se situant à un bon niveau pour ce type de sol, à préserver

(\*)VS = Valeurs théoriquement souhaitables pour votre sol, fonction de nombreux paramètres, elles sont à prendre avec réserve et prudence.

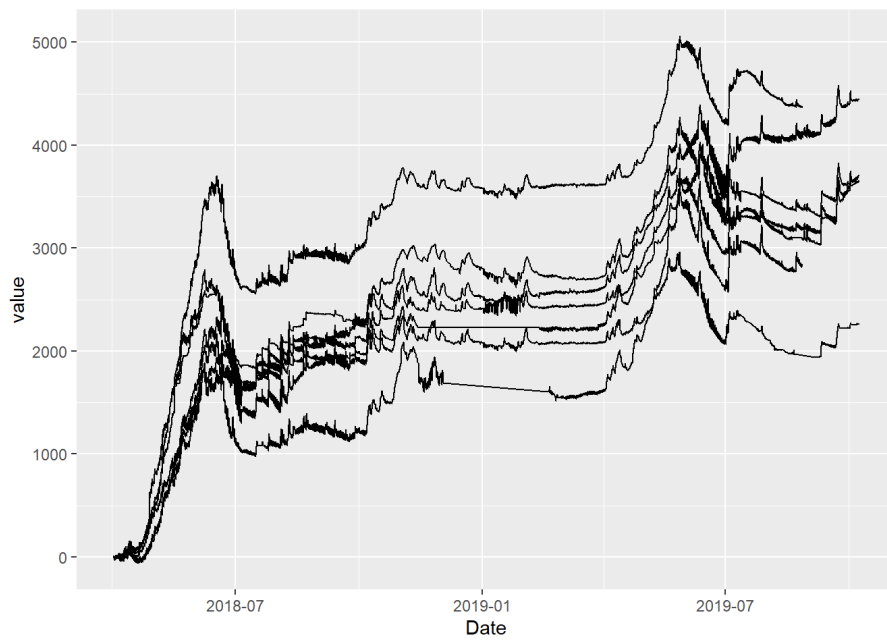
### Annexe 3 : Protocole de mesure des différents indicateurs de rendement

Abréviations :

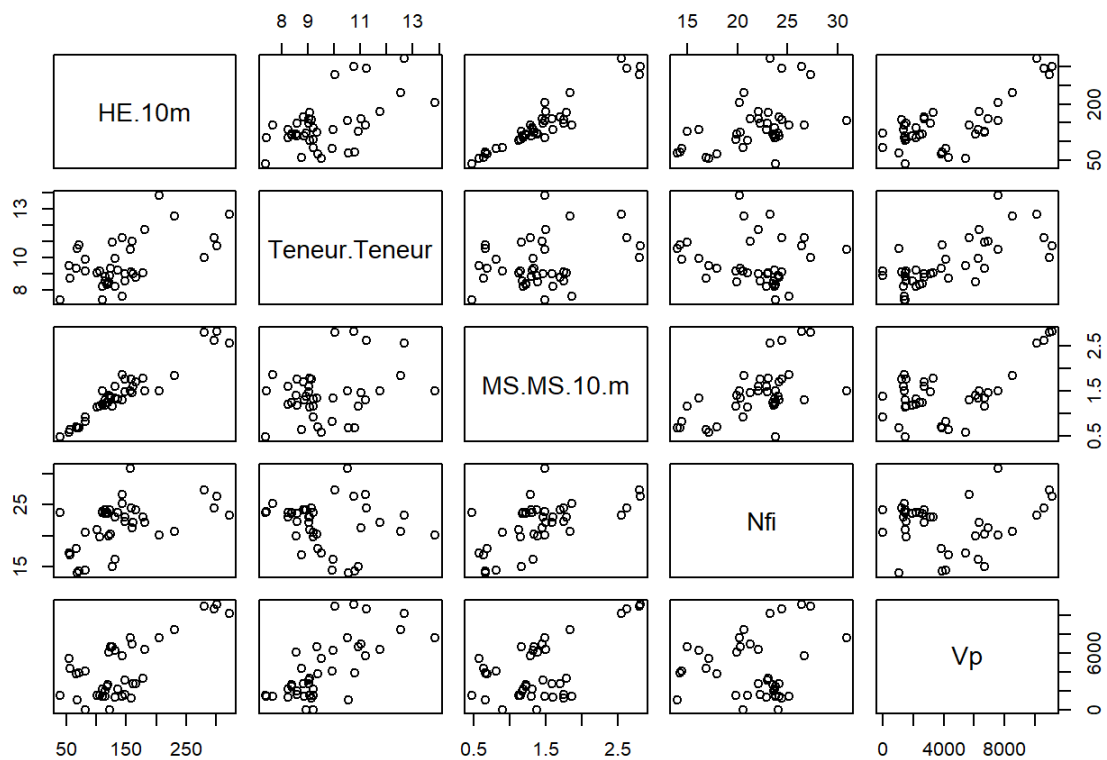
- ES : Echantillon de Secours
- PF : Poids Frais
- EMS : Echantillon pour Matière Sèche
- EDC : Echantillon De Codex
- PS : Poids Sec
- HE : Huile Essentielle



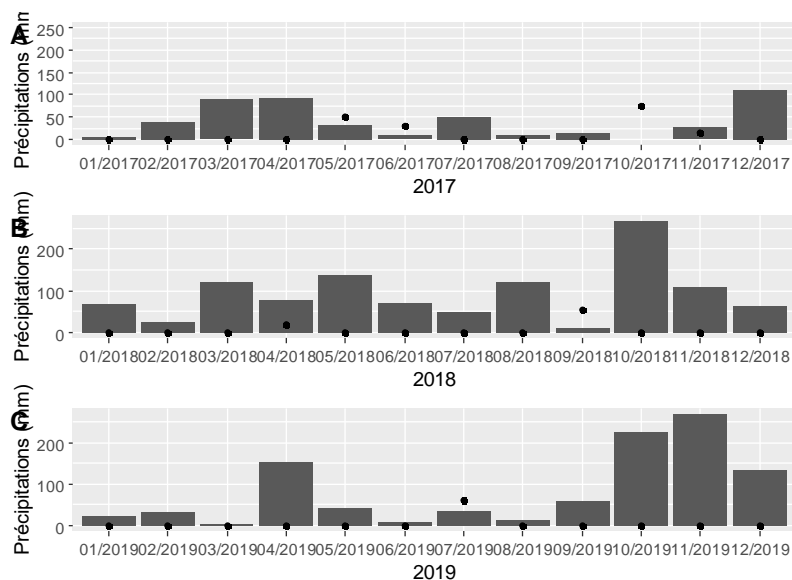
**Annexe 4 : PépiPIAFs Crieppam 2018-2019, modalité « Légumineuses – Fertilisation azotée »**



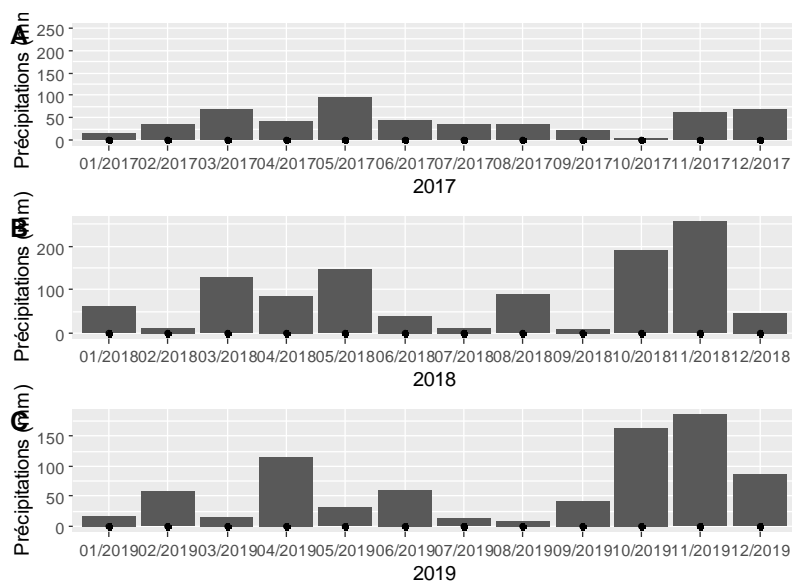
**Annexe 5 : Représentation graphique 2 à 2 de variables prédictrices du rendement**



**Annexe 6 : Précipitations (barres grises) et irrigations (points noirs) mensuelles de 2017 à 2019 au CRIEPPAM.**



**Annexe 7 : Précipitations (barres grises) et irrigations (points noirs) mensuelles de 2017 à 2019 à l'ITEIPMAI.**



**Annexe 8 : Photo de la parcelle de RECITAL en 2017, avec à gauche le couvert Triticale + Légumineuses, à droite le couvert de légumineuses et au centre le témoin. Partie non fertilisée au premier plan.**

