



HAL
open science

Méthodes alternatives au désherbage chimique : essais de paillages et couverts végétaux en pépinière plein champ de production d'arbres fruitiers et d'ornement

Floriane Jacquelin

► **To cite this version:**

Floriane Jacquelin. Méthodes alternatives au désherbage chimique : essais de paillages et couverts végétaux en pépinière plein champ de production d'arbres fruitiers et d'ornement. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02331876

HAL Id: dumas-02331876

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02331876>

Submitted on 24 Oct 2019

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.



AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers
2, rue André Le Nôtre
49045 ANGERS Cedex 01
Tel : 02 41 22 54 54



Pépinières Chargé

8, chemin de l'abreuvoir
49700 Louresse-Rochemenier
Tel : 02 41 59 13 02

Mémoire de fin d'études

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences
Agronomiques, Agroalimentaires Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : 2018 - 2019

Spécialité et Spécialisation : Horticulture - Protection des Plantes et Environnement en Horticulture

**Méthodes alternatives au désherbage chimique : essais de paillages et
couverts végétaux en pépinière plein champ de production d'arbres
fruitiers et d'ornement**

Par : Floriane JACQUELIN

Soutenu à Angers le 4 septembre 2019

Devant le jury composé de :

Président : Mme LE CLERC Valérie

Maître de stage : M. CHARGE Christophe

Enseignant référent : Mme LE CORFF Josiane

Autre membre du jury :

M. LEMARQUAND Arnaud, directeur de
l'unité horticole de l'INRA de Beaucouzé

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



TSFA : Tableau Stratégique des Formations par Apprentissage en Horticulture

Lieu d'acquisition :

entreprise	école	école et ou entreprise
------------	-------	------------------------

Domaine	Compétence	Composantes	Semestres d'acquisition				
			S5	S6	S7	S8	S9
1. Compétences scientifiques et techniques	11. Connaître l'entreprise et son environnement	111. Intégrer l'entreprise	validée				
		112. Découvrir les services/ les produits de l'entreprise		validée	validée		
		113. Découvrir les différents services et leurs connexions	validée	validée			
		114. Rencontrer le personnel	validée				
		115. Découvrir l'environnement professionnel de l'entreprise	validée	validée			
		116. Connaître et prendre en compte les valeurs et les normes de l'organisation et de l'entreprise	validée	validée			
	12. Poser et résoudre un problème complexe, selon une démarche scientifique	121. Analyser un problème en lien avec un contexte donné (dimensions institutionnelle, économique, technologique, commerciale, humaine, ...) et en identifier les enjeux			validée		validée
		122. Adopter une approche systémique, identifier les composantes du système					validée
		123. Mettre en œuvre une démarche stratégique du traitement de la problématique					validée
		124. Concevoir, élaborer et évaluer les réponses innovantes mises en œuvre					validée
		125. Mettre en œuvre des expérimentations, modifier.					validée
	13. Conduire un projet	131. Identifier et caractériser un besoin, analyser une demande					non validée
		132. Concevoir un projet, en développant une approche globale prenant en compte le cadre légal et politique, la dimension scientifique ou technique, la logique économique ou financière, la dimension humaine.					validée
		133. Planifier les différentes étapes du déroulement du projet					validée
134. Utiliser des outils de gestion de projets (plans, plannings, allocations de ressources, études de faisabilité, ...)						non validée	
135. Suivre, piloter, contrôler régulièrement l'avancement du projet						validée	
136. Respecter les critères de coûts, de délais et de qualité						non validée	
137. Ajuster et réorienter le projet, concevoir, élaborer et évaluer de nouvelles solutions						validée	
138. Gérer plusieurs projets en même temps							
139. Décider : analyser, évaluer, choisir et assumer les risques						validée	
140. Exploiter ses connaissances scientifiques et techniques							
2. Compétences d'organisation et de communication	21. Gérer son organisation	141. Mobiliser ses connaissances et les adapter à l'entreprise	validée	validée	validée	validée	validée
		142. Améliorer ses connaissances en utilisant les outils de veille		validée		validée	
		211. Définir ses objectifs d'activité	validée		validée	validée	validée
		212. Planifier les échéances, définir ses priorités			validée	validée	validée
	22. Travailler en équipe, en réseau - Jouer un rôle d'interface	213. Gérer et respecter son planning			validée	validée	validée
		214. Analyser une situation problématique et anticiper				validée	validée
		215. Gérer les imprévus			validée	validée	validée
		216. Simplifier personnellement			validée	validée	validée
		221. S'adapter à la culture d'entreprise	validée	validée			
		222. Respecter les consignes			validée	validée	validée
		223. Coordonner son action avec celle des autres				validée	validée
		224. Rendre compte de son activité à son supérieur hiérarchique et à ses collaborateurs			validée	validée	validée
		225. Ecouter, s'ouvrir à la problématique de l'autre			validée	validée	validée
		226. Faire preuve de disponibilité			validée	validée	validée
23. Manager une équipe	226. Savoir convaincre, argumenter					validée	
	231. Définir les objectifs d'activité de l'équipe					validée	
	232. Planifier l'activité (élaborer la démarche de progression vers l'objectif visé, répartir l'activité entre les membres de l'équipe, gérer le planning, anticiper les pics d'activité)					validée	
	233. Piloter l'activité (mobiliser les ressources nécessaires à l'atteinte de l'objectif, fixer les points de contrôle et d'évaluation)					validée	
	234. Déléguer					validée	
	235. Responsabiliser, identifier le potentiel de chaque membre de l'équipe					validée	
	236. Motiver une équipe						
	237. Animer un groupe de travail ou une réunion d'équipe					non validée	
	238. Faire preuve d'autorité / prendre des décisions						
	239. Evaluer/recruter un collaborateur						
3. Compétences relationnelles et sociales	24. Communiquer	241. Utiliser différents moyens de communication (tant internes qu'externes)	validée	validée			
		242. Communiquer en groupe				validée	
	31. Négocier - Débattre	243. Utiliser l'anglais en situation professionnelle				validée	
		312. Conduire une négociation en s'adaptant aux interlocuteurs				non validée	validée
		313. Adopter une attitude d'écoute active et de respect de l'autre				non validée	validée
	32. Se connaître - avoir confiance en soi	314. Faire preuve de fermeté tout en acceptant des compromis				non validée	validée
		315. Accepter et dépasser l'échec				non validée	validée
		321. Connaître ses points faibles et ses points forts			validée	validée	validée
		322. Evaluer les compétences exigées par une situation donnée				validée	
		323. Trouver les modalités de compensation/contournement de ses points faibles			validée	validée	
		324. Assumer les désaccords et les conflits				validée	
		325. Accepter ses erreurs			validée	validée	validée
		326. Savoir prendre des risques			validée	validée	validée
		331. Respecter l'autre	validée	validée	validée	validée	validée
33. Faire preuve d'intégrité		332. Faire preuve d'objectivité - prendre du recul			validée	validée	
	333. Assumer responsabilité et engagement professionnels				validée		
4. Compétences d'adaptation	41. S'adapter aux évolutions du métier d'ingénieur	411. Avoir un regard critique sur son activité, savoir analyser et discuter ses méthodes de travail, prendre du recul				validée	
		412. Anticiper, innover, créer					
		413. Accepter et initier le changement					
	42. S'adapter aux évolutions de l'environnement	421. Connaître et savoir caractériser les secteurs d'activité, les fonctions et les métiers dans les organisations, les territoires			validée		validée
		422. Adopter une démarche de veille stratégique : évolutions des marchés, de la concurrence					non validée
		423. Travailler dans un contexte international (langues étrangères, ouverture culturelle, adaptation aux contextes internationaux)					non validée
43. Se former	424. Travailler à différentes échelles d'intervention (territoires, filières, organisations, ...)					non validée	
	431. Participer à des formations ou séminaires de réflexion			validée	validée		
	432. Engager des actions d'auto-formation			validée	validée		

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble du personnel des pépinières Chargé, et plus particulièrement Christophe et Carole Chargé pour m'avoir accueillie pendant mes 3 années d'apprentissage au cours desquelles ils m'ont transmis leur savoir-faire technique et de nombreuses connaissances de la pépinière pleine terre, milieu dans lequel je n'avais jamais évolué auparavant.

Je remercie également Mme Josiane Le Corff, tutrice de stage, pour son accompagnement tout au long du stage et les conseils apportés dans la mise en œuvre de cette étude, ainsi que Mme Macherel pour son suivi en tant que tutrice d'apprentissage tout au long de ces trois ans.

Mes remerciements vont également à ma famille et mes amis pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce stage.

Liste des annexes

ANNEXE I : Molécules du glyphosate, des composés aromatiques et des substances allélopathiques

ANNEXE II : Script R

ANNEXE III : Résultats statistiques de l'influence des modalités sur le recouvrement aux deux dates

ANNEXE IV : Résultats statistiques de l'influence des modalités sur la taille des arbres, avec et sans témoin

ANNEXE V : Illustration de la majorité des adventices rencontrées avant et pendant l'expérimentation

Liste des illustrations

Figure 1 : Voies possibles pour la libération des composés allélopathiques dans l'environnement par une plante donneuse selon Kobayashi (2004), (Gfeller et Wirth, 2017)

Figure 2 : Paillage avec la paille à la mise en place

Figure 3 : Paillage avec le miscanthus à la mise en place

Figure 4 : Mélange AGRO-FIX 2 un mois après le semis

Figure 5 : Caméline un mois après le semis

Figure 6 : Micro-trèfle un mois après le semis

Figure 7 : Doigts Kress (K.U.L.T.)

Figure 8 : Plan d'expérimentation

Figure 9 : Boxplot du recouvrement suivant la modalité aux deux dates

Figure 10 : Boxplot des tailles variétés confondues par modalité

Figure 11 : Boxplot des tailles variétés confondues, par modalité + témoin rajouté

Figure 12 : Evolution du recouvrement des couverts végétaux aux deux relevés

Figure 13 : Recouvrement par le mélange AGRO-FIX 2 au 21 juin

Figure 14 : Recouvrement par la caméline au 21 juin

Figure 15 : Recouvrement par le micro-trèfle au 21 juin

Figure 16 : Pailleuse distributrice EUROMARK

Figure 17 : Désileuse pailleuse EUROMARK

Figure 18 : Arbre de décision du choix de la méthode à mettre en place

Figure 19 : Bourdon observé sur la phacélie (mélange AGRO-FIX 2)

Liste des tableaux

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des méthodes alternatives

Tableau 2 : Critères de choix des différentes méthodes

Tableau 3 : Regroupement des modalités par classes de recouvrement au 6 juin

Tableau 4 : Regroupement des modalités par classes de recouvrement au 21 juin

Tableau 5 : Regroupement des modalités + témoin par classes de taille des arbres au 11 juillet

Tableau 6 : Illustrations des adventices majoritairement présentes au cours de l'essai

Tableau 7 : Analyse économique des coûts directs de chaque méthode

Tableau 8 : Rejets de CO2 imputés à la mise en place de chaque méthode

Table des matières

I. Introduction

A.	Présentation de l'entreprise.....	1
B.	Contexte de l'étude	1
1.	Evolution de la réglementation	2
2.	Pratiques de désherbage en cultures pérennes	3
C.	Etat de l'art des méthodes alternatives au désherbage chimique.....	4
1.	Raisonnement d'une stratégie de désherbage	4
2.	Désherbage mécanique	5
3.	Paillages	5
4.	Couverts végétaux.....	7
5.	Plantes allélopathiques.....	8
6.	Principaux mécanismes mis en jeu... ..	11
D.	Pratiques actuelles de désherbage dans l'entreprise	14

II. Matériels et méthodes

A.	Critères de choix des méthodes.....	16
B.	Dispositif expérimental et modalités	16
C.	Mise en place de l'expérimentation	17
D.	Mesures et relevés des données	18
E.	Outils statistiques	19

III. Résultats

A.	Analyses statistiques des données.....	20
1.	Relevés des adventices.....	20
2.	Taille des arbres	20
B.	Espèces présentes.....	21
C.	Vitesse d'installation des couverts végétaux	21
D.	Analyse technique de faisabilité	22
E.	Analyse économique	22
F.	Analyse environnementale	23
G.	Mise en place d'un outil d'aide à la décision (OAD)	23

IV. Discussion

A.	Mise en place des solutions alternatives et biais expérimentaux	25
1.	Actions précédentes sur la culture	25
2.	Importance du sol.....	25
3.	Conditions climatiques	25
4.	Mécanisation de la mise en place du paillage.....	26
5.	Difficultés à faire les mesures.....	26
B.	Objectifs : comment choisir la méthode à mettre en place ?	26
1.	Importance des critères de décision	26
2.	Conséquences observables de chaque méthode.....	28
3.	Gestion des adventices par l'allélopathie.....	29
4.	Perspectives à long terme de chaque méthode.....	30

V.	Conclusion	31
-----------	-------------------------	-----------

Bibliographie

Sitographie

ANNEXES

I. Introduction

A. Présentation de l'entreprise

Les pépinières Chargé existent depuis quatre générations et sont situées au cœur de l'Anjou entre Angers et Saumur. La région regorge de pépinières et la commune de Louresse-Rochemenier en compte quatre. Cette entreprise familiale est spécialisée dans la production de jeunes arbres fruitiers et d'ornement. En proposant de nombreuses espèces à la vente avec des quantités faibles pour certaines, l'entreprise a fait un choix de diversification tout en axant sa production sur des plantes phares : pommiers à cidre, pommiers à couteau, scions pour l'arboriculture fruitière et cidricole, palmettes verriers, Albizia, Catalpa, Morus, Acer... La large gamme proposée lui permet d'étendre son réseau de vente à de nombreuses régions. La vente est exclusivement indirecte et vise les professionnels de l'arboriculture, du paysage et les pépiniéristes souhaitant revendre les arbres après les avoir rempotés ou non. C'est une petite PME regroupant 6 ETP (Equivalents Temps Plein) en plus des gérants.

Les nombreux investissements (bac phyto et tracteur avec système GPS en 2017) témoignent d'une recherche de progrès et d'une dynamique que l'on retrouve en observant le chiffre d'affaires de 834 600 € en constante augmentation. Un excédent brut d'exploitation de 206 700 € vient confirmer la bonne gestion de l'entreprise.

B. Contexte de l'étude

A l'origine non-compétitrices, les adventices annuelles sont opportunistes : elles s'installent où elles trouvent de la place et profitent de milieux ouverts pour s'implanter. A l'inverse, les adventices géophytes (vivaces) peuvent se développer à partir des organes souterrains et n'ont pas besoin d'un milieu ouvert pour se développer. Elles sont en concurrence avec les cultures vis-à-vis de la lumière et des ressources en eau et nutriments du sol notamment de l'azote (Doré et al., 2006). Cette pression exercée par les adventices dépend de leur densité et de leurs caractéristiques physiques, et moins de leur biomasse aérienne (Abouziena et al., 2014). Au-delà de cela, elles ont pour inconvénient d'attirer la faune nuisible en plus de la faune auxiliaire. Si rien n'est fait pour ralentir leur progression, la montée à graines conduit à une multiplication rapide possiblement croissante d'une année à l'autre, du moins pour les espèces annuelles et bisannuelles qui se reproduisent généralement par voie sexuée. Chez certaines espèces, un cycle de vie peut être réalisé en moins de six semaines (Aldrich et Kremer, 1997), conduisant à la production de milliers de graines par plante. Les espèces vivaces peuvent quant à elles se reproduire par voie sexuée ou asexuée rendant encore plus difficile leur gestion, d'autant plus que leurs caractéristiques physiques leur permettent de survivre plus facilement à la sécheresse que les annuelles (Abouziena et al., 2014). Les adventices sont à l'origine des pertes principales des cultures (jusqu'à 34% des pertes) devant les pertes dues aux autres bioagresseurs (Oerke, 2006).

Le désherbage est une pratique ancrée dans l'agriculture et jugée indispensable par la plupart des producteurs et agriculteurs. La lutte contre les adventices est une pratique coûteuse et gourmande en main d'œuvre (Kristiansen, 2003). Autrefois réalisé à la main, ce procédé s'est modernisé avec l'apparition de nouvelles techniques de désherbage mécanique depuis le milieu du XIXème siècle, suivies rapidement par le développement du désherbage chimique. Le travail est ainsi devenu moins pénible et moins long (et moins coûteux),

permettant de libérer du temps à la réalisation d'autres tâches [1]. En 2014, la France se plaçait au 2ème rang européen concernant les quantités de substances actives vendues avec plus de 66 000 tonnes [2]. Parmi les solutions de protection des cultures, les herbicides sont les plus utilisés avec 43,8 % des ventes de produits phytosanitaires (UIPP, 2017). Ils peuvent appartenir à différentes catégories, qu'ils agissent sur les plantules tout juste développées ou sur la plante plus âgée, qu'ils soient de contact ou systémiques. Ils peuvent agir sur différents mécanismes physiologiques de la plante comme par exemples la photosynthèse ou la synthèse des acides aminés.

L'herbicide de post-levée le plus utilisé est le glyphosate et il représente à lui seul 15 % de la consommation de produits phytosanitaires en France [1]. Le glyphosate est une molécule (ANNEXE I) tombée dans le domaine public depuis plus de vingt ans, après que Monsanto ait obtenu la première mise en marché pour les professionnels en 1974 sous la dénomination commerciale de Roundup® (Perry et al., 2019). Fabriquée et commercialisée sous la forme de plusieurs centaines de spécialités par près de 40 sociétés, elle permet à l'agriculture de produire à des coûts extrêmement compétitifs. Elle a connu un grand succès grâce à ses propriétés intrinsèques. Son mode d'action lui confère une bonne régularité d'action : le produit pénètre par voie foliaire après pulvérisation puis se répand vers les zones en croissance par la sève pour se diriger jusqu'aux organes souterrains. C'est un herbicide systémique qui permet de réguler toutes les adventices qu'elles soient annuelles ou vivaces, monocotylédones ou dicotylédones. Son mécanisme d'action consiste en l'inhibition de l'activité de l'enzyme 5-enolpyruvoyl-shikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) (Picque, 2016). Tout comme son produit de dégradation (AMPA, ANNEXE I), le glyphosate induit un dysfonctionnement de la photosynthèse. Cette perturbation est due à la diminution de la synthèse des acides aminés aromatiques comme la phénylalanine, la tyrosine et le tryptophane (Picque, 2016, Nandula et al., 2005, ANNEXE I). Ces acides aminés participent à la synthèse des protéines, des vitamines, de la chlorophylle, des hormones végétales et des métabolites secondaires (dont les phytoalexines antimicrobiennes qui permettent de défendre la plante contre les agents pathogènes (Van Bruggen et al., 2018)), nécessaires à la survie de la plante. Cette inhibition de la biosynthèse des acides aminés conduit donc à de nombreuses perturbations métaboliques. Au-delà d'être très efficace, le prix du glyphosate dépasse toute concurrence avec un coût moyen de 3 à 5€/ha.

Même si les dernières études se concluent par la caractérisation non cancérogène du glyphosate, la polémique portée autour de la toxicité de cet herbicide (Van Bruggen et al., 2018) a incité le gouvernement à prendre des mesures.

1. Evolution de la réglementation

Depuis 2008, un plan d'action visant à réduire l'utilisation de produits phytosanitaires a été mis en place avec un objectif initial de réduction de 50% en 10 ans, si possible. Ce plan s'inscrit dans le cadre de la directive européenne 2009/128 d'utilisation des produits phytopharmaceutiques qui oblige les Etats membres à fixer des objectifs de réduction des risques et des effets de l'utilisation des produits phytosanitaires sur l'environnement et la santé humaine. Le bilan de ce plan Ecophyto I fut mitigé avec parfois une augmentation de la consommation des pesticides sur certaines périodes. Un deuxième plan d'action basé sur

six axes vit alors le jour en octobre 2015 avec pour objectifs une réduction de 25% en 2020 et 50% d'ici 2025 [2]. Au-delà des intentions visant les pesticides, un plan d'action global complémentaire du plan Ecophyto II a été engagé par le gouvernement afin de mettre un terme aux principales utilisations du glyphosate. Cette directive du 22 juin 2018 prévoit de supprimer d'ici 2021 ou au plus tard 2023 l'ensemble des usages du glyphosate. Le programme prévoit un accompagnement des agriculteurs avec la création d'un centre de ressources répertoriant les alternatives à l'utilisation de cette molécule. La recherche de nouvelles méthodes de lutte a commencé bien avant la mise en place de la directive. Cependant, un rapport de l'INRA remis en décembre 2017 (Reboud et al., 2017) a démontré que, malgré l'existence de nombreuses alternatives au glyphosate déjà disponibles dans le cadre de l'agroécologie, ces solutions sont peu utilisées car jugées moins efficaces et plus coûteuses. Les alternatives proposées ne peuvent être concurrentielles par rapport aux coût et efficacité du glyphosate mais il est nécessaire d'intensifier leur développement un objectif de précaution contre les risques sur la santé humaine. De plus, l'utilisation répétée et intensive du même herbicide peut parfois conduire à l'apparition de résistances comme c'est déjà le cas partout dans le monde. C'est aux Etats-Unis et en Europe que le plus grand nombre d'espèces d'adventices résistantes aux herbicides a été recensé avec 49 espèces dont la plupart appartiennent aux familles de Poacées, Amaranthacées, Polygonacées et Chénopodiacees (Chodová et Mikulka, 2002). En ce qui concerne le glyphosate, on recense déjà la présence de résistance sur quelques adventices (Nandula et al., 2005). Le premier cas apparu en 1996, 20 ans après l'introduction du glyphosate sur le marché, a vite laissé place à l'apparition d'autres résistances. Certaines adventices sont naturellement résistantes au glyphosate sans même y avoir été exposées ce qui peut conduire à la sélection de populations résistantes au cours du temps suite à l'utilisation intensive du glyphosate (aux Etats-Unis particulièrement).

2. Pratiques de désherbage en cultures pérennes

La structure dans laquelle est menée l'étude étant une pépinière pleine terre, il est important d'examiner quelles sont les pratiques actuelles de désherbage dans des systèmes similaires pour pouvoir par la suite faire un état de l'art des méthodes alternatives applicables en conditions réelles de culture d'arbre en plein champ.

Les pratiques de désherbages en cultures pérennes (arboriculture et viticulture) combinent l'application de produits chimiques et un désherbage mécanique (Cellule d'Animation Nationale DEPHY, 2018). En arboriculture, la lutte chimique représente la méthode de lutte principale contre les adventices. La combinaison de produits à action foliaire et de produits racinaires permet de réguler la pression en adventices. En général, deux traitements (post-levée majoritairement) sont réalisés (une en sortie d'hiver et l'autre en juin). La substance majoritairement utilisée est le glyphosate puisque 80% de itinéraires de culture du réseau arboricole analysés par le réseau DEPHY en 2018 sont conduits avec du glyphosate. L'arrêt du désherbage chimique conduit au développement du désherbage mécanique même si de nombreuses contraintes sont soulevées par les producteurs : topographie des parcelles, présence de cailloux, présence du système d'irrigation au sol et coût plus élevé que le désherbage chimique (investissement dans des machines et temps de passage importants).

En viticulture, le désherbage chimique à base de glyphosate n'est pas le moyen le plus utilisé pour lutter contre les adventices (36% des systèmes suivis par le réseau DEPHY). Le traitement concerne uniquement le rang puisque l'inter-rang est généralement enherbé et fauché. De nombreux viticulteurs ont recours au désherbage mécanique. Plusieurs outils différents peuvent être utilisés [3] avec parfois des variations dans l'efficacité dues au type de sol, au contexte climatique, à la pression en adventices... Dans certains cas (vignobles en forte pente par exemple), le recours au désherbage chimique s'avère bien plus facile à mettre en place et est donc privilégié à un désherbage mécanique. De plus, cette mécanisation représente un coût supplémentaire non négligeable comparé à un désherbage chimique avec une augmentation du nombre d'interventions et des consommations de carburant plus importantes.

C. Etat de l'art des méthodes alternatives au désherbage chimique

Il est important de présenter les techniques alternatives au désherbage chimique déjà existantes ainsi que celles en cours de développement afin de comprendre pourquoi ces techniques ont pu être mises en place lors d'une expérimentation aux pépinières Chargé. Ce travail en amont de la mise en œuvre d'alternatives est indispensable à la réflexion et la compréhension de la logique de décision et des mécanismes mis en jeu derrière chaque technique, peu importe le système étudié.

1. Raisonnement d'une stratégie de désherbage

Il existe plusieurs alternatives au désherbage chimique. Afin de choisir la bonne méthode, il convient de raisonner sur la stratégie à adopter. Tout d'abord, une bonne connaissance de la flore adventice est indispensable : flore présente, flore à venir, nuisibilité des adventices. Il faut ensuite définir ses objectifs de réduction des adventices. Il est en effet possible de choisir de contrôler les adventices sur la totalité de la parcelle (rang et inter-rang) ou uniquement sur le rang de culture. Certaines méthodes vont davantage être adaptées à une gestion partielle des adventices du fait de leur coût trop important pour une mise en place sur la totalité de la parcelle. Certaines méthodes vont être davantage curatives et d'autres préventives. Ces dernières doivent être mise en place avant la colonisation de l'espace par les adventices ce qui nécessite une réflexion en amont. Cette réflexion s'articule également autour des caractéristiques de la parcelle. Il est effectivement primordial de prendre en compte les propriétés du sol, les spécificités de la culture, l'environnement de la parcelle et tous autres caractéristiques pouvant orienter le choix de la méthode. Autre point primordial : le coût. Si aujourd'hui le désherbage chimique semble apporter des solutions efficaces et peu coûteuses, il est difficile de trouver des alternatives répondant exactement aux mêmes critères. Cependant, en faisant varier les deux paramètres (coût et efficacité), il est possible de parvenir à trouver des alternatives ou combinaisons de techniques offrant de nombreux avantages.

Les méthodes alternatives au désherbage chimique présentées ci-après présentent chacune des avantages et des inconvénients qu'il est important de prendre en compte dans le positionnement pour une technique ou une autre (ou la combinaison de plusieurs techniques).

2. Désherbage mécanique

De nombreuses techniques de désherbage mécanique ont déjà été développées en cultures pérennes (viticulture, arboriculture, pépinière). Le rang et l'inter-rang doivent être considérés séparément afin de trouver des solutions répondant aux exigences de ces deux zones. Ce mode de lutte contre les adventices est curatif et est utilisé pendant que la culture est en place et tout au long du cycle de culture.

Si les inter-rangs sont parfois enherbés, les pépiniéristes privilégient encore le travail du sol, plus simple à réaliser et limitant la concurrence entre l'enherbement et les cultures mises en place (Calvarin et Vandernoot, 2018). Le rotovator à fraises est souvent utilisé pour casser la croûte de battance mais ne doit pas être utilisé trop souvent sur les sols limono-argileux sous peine de dégrader la structure et d'augmenter le risque de battance. La bineuse est régulièrement utilisée en complément de cet outil pour désherber et améliorer la structure du sol suivant la taille et la forme des dents choisies. Les passages doivent être effectués lorsque la parcelle n'est pas trop « sale » et les adventices peu développées afin d'assurer une efficacité maximale. Cependant, cela conduit à la nécessité de procéder à des désherbages réguliers.

La bineuse à dents fixes peut être couplée à l'utilisation de la bineuse interceps pour le désherbage du rang. Au contact de l'arbre, un système de palpeurs déclenche le retrait de la bineuse permettant ainsi un désherbage au plus près de l'arbre. Cependant, il est impossible d'utiliser ce type de système sur des plants greffés qui risqueraient d'être cassés au contact des palpeurs. Tout comme la bineuse à dents fixes, ce matériel doit être utilisé régulièrement pour être efficace. Malgré cela, il est souvent indispensable de désherber manuellement les quelques adventices restantes près des troncs, surtout lorsqu'elles sont développées ou ancrées profondément dans le sol.

La bineuse à doigts (Kress) régulièrement utilisée en culture de rosiers ou cultures maraichères peut être utilisée en pépinière. Cet outil permet un désherbage au plus proche de l'arbre sans risquer de le blesser. Il nécessite toutefois un passage avant que les adventices ne soient trop développées. Auquel cas, il est nécessaire de compléter l'utilisation avec une bineuse interceps.

Les progrès de la robotique et la démocratisation de l'utilisation de caméras et systèmes de guidage en agriculture ont conduit à l'apparition de nouvelles techniques : les robots de désherbage sont en voie de développement. Ils permettront un désherbage efficace, pauvre en main d'œuvre et réduisant la pénibilité. Déjà testé en 2016 au sein des pépinières Chargé, le robot de désherbage nécessite quelques améliorations afin de différencier plus finement les jeunes arbres des adventices développées.

3. Paillages

La technique du paillage consiste à recouvrir la surface du sol par un couvert organique (que ce soit un paillis ou un mulch) ou par une toile végétale. L'objectif principal de cette technique est de limiter le développement des adventices avant leur installation. De nombreux types de paillages ont été testés avec plus ou moins d'efficacité et une adaptabilité aux itinéraires de culture différente suivant le secteur (arboriculture, agriculture, horticulture) (Bresch et Marie, 2018). Cette technique possède l'avantage de pouvoir être

mise en place même si la culture est déjà implantée, plutôt en sortie d'hiver/début de printemps afin d'empêcher la colonisation du milieu par les adventices.

a) Généralités sur le paillage organique

Les paillis organiques ont pour propriétés de maintenir l'humidité au niveau du sol en évitant l'évaporation de l'eau de la surface par le rayonnement solaire ou le vent, et en limitant les pertes en eau par ruissellement. La fréquence des irrigations peut être diminuée puisque le terrain reste perméable et aéré : on n'observe pas de phénomène de croute de battance lors du dessèchement du sol. Cependant, malgré la réduction des variations brutales de températures (Goma-Fortin et Chovelon, 2012), une augmentation de la température au niveau du sol peut être observée, pouvant créer, avec le maintien de l'humidité au niveau de la surface, l'apparition de maladies cryptogamiques en cas de fortes pluies. Cela pourrait alors causer des dégâts importants sur de jeunes plants de pépinières ou sur la reprise des greffes. De plus, un paillage appliqué en trop grosse épaisseur devient un abri idéal pour les rongeurs qui peuvent s'y abriter pendant l'hiver et dégrader les jeunes arbres en y rongant l'écorce (dégâts de lapins et lièvres couramment constatés en pépinières mais pas encore de rongeurs).

Afin de limiter la repousse du paillage, celui-ci doit être propre et exempt de graines qui pourraient germer sous peine de réduire l'efficacité vis-à-vis des adventices. De même, le paillage utilisé ne doit pas être traité car certains produits sont rémanents et peuvent avoir un impact sur la plante paillée même plusieurs années après l'application.

Au-delà de l'aspect limitant la croissance des adventices, le paillage possède la propriété de se dégrader au contact du sol. La décomposition d'un produit dépend de plusieurs facteurs comme la nature du sol, le broyage ou non du paillis, la surface de contact avec le sol, le traitement du paillis, son épaisseur... Le rapport C/N (carbone sur azote) d'un paillis est un indicateur de son aptitude à se décomposer dans le temps. Plus ce rapport est élevé, plus il mettra du temps pour se décomposer. Ce rapport varie entre 50 et 150.

b) Paille de blé

Des avantages et des inconvénients ont été recensés à l'utilisation de la paille de blé. Son installation aisée et rapide est plus compliquée lorsque la culture est déjà en place et que la pose doit être effectuée uniquement sur le rang, avec des inter-rangs de largeur restreinte ne permettant pas le passage de tous les outils. De plus, la paille observe un rapport C/N très élevé de 150 qui ne lui permet pourtant pas de rester en place très longtemps. Un renouvellement du paillage est nécessaire tous les six mois à un an suivant la rapidité de sa dégradation et les facteurs cités plus haut. Ce rapport C/N élevé témoigne également du risque de faim d'azote pouvant être imputé à la culture. En effet, la paille de blé pauvre en azote va consommer celui du sol en se dégradant. Le carbone est quant à lui rapidement minéralisé par les micro-organismes (Chambre d'agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011). Les chercheurs ne s'accordent pas sur le sujet puisque les études montrent parfois le déclenchement d'une faim d'azote sur la culture et parfois l'effet contraire : amélioration de la croissance des plantes (Ferre et Hebbinckuys, 2015).

La paille aura tendance à conserver l'humidité au niveau du sol. Les cultures doivent donc pouvoir tolérer l'humidité au niveau du collet.

De nombreux essais ont été menés afin de tester l'efficacité du paillage de paille de blé, que ce soit sous le rang ou l'inter-rang. La paille semble être une bonne alternative au désherbage chimique puisque son utilisation semble être plutôt efficace (Ferre et Hebbinckuys, 2015).

c) *Miscanthus*

Tout comme la paille de blé, de bons résultats ont été observés avec le miscanthus avec toutefois quelques précautions à prendre. Pour les plantes qui ne supportent pas l'humidité au collet, il est préférable d'appliquer le paillis en deux fois (Bresch et Marie, 2018). Aussi, le rapport C/N de 106 du miscanthus est assez élevé ce qui signifie que le couvert consommera de l'azote pour se dégrader. C'est pourquoi il est conseillé d'opérer un surfacage avec un engrais à libération lente avant la mise en place du paillis. Le miscanthus ne conduit pas à une modification du pH du sol qui pourrait poser des problèmes pour les cultures [4].

4. Couverts végétaux

Les couverts végétaux ont pour principe de recouvrir le sol non cultivé en assurant une pression suffisante contre les adventices sans concurrencer la culture principale, tout en observant une période de croissance relativement courte (Robačar et al., 2016). Cette contrainte imposée aux adventices s'explique par la compétition des plantes pour les ressources en eau, en lumière et en nutriments. Les plantes couvre-sol sont généralement peu exigeantes en eau et ont la propriété de se développer assez rapidement, avec des modes d'expansion différents suivant les espèces (Bécart et Coutant, 2018). On distinguera les plantes rampantes s'enracinant aux nœuds, celles à racines pivotantes et au port en coussin dense et celles se multipliant par stolons ou rhizomes. Dans l'essai de Masilionyte et ses collaborateurs (2017), tous systèmes avec les couverts de couverture observaient une biomasse végétale d'adventices et de plantes spontanées plus faible que dans les systèmes agricoles sans couvert végétal, dans des sols à faible et moyenne teneur en humus. Cela confirme l'effet réducteur de la pression en adventices grâce aux couverts végétaux.

Au-delà de la compétition avec les adventices, les couverts végétaux permettent de limiter l'évaporation du sol, limiter le lessivage et l'érosion par la pluie (en réduisant l'énergie cinétique des précipitations) et le vent, faciliter la circulation de l'eau et de l'air grâce au réseau racinaire (Bécart et Coutant, 2018). Par exemple, les crucifères (Brassicacées) et les graminées à croissance plutôt rapide permettent de couvrir rapidement le sol et le protéger du vent et de la pluie (Robačar et al., 2016), conduisant à un étouffement efficace des adventices et des plantes spontanées (Masilionyte et al., 2017).

La qualité du sol est alors améliorée notamment en ce qui concerne ses propriétés chimiques, biologiques et physiques (teneur en carbone, capacité d'échange cationique, stabilité des agrégats...) (Dabney et al., 2001). Les couverts végétaux servent également de refuge pour les insectes auxiliaires des cultures.

Le suivi de tensiomètre montre que, grâce au système racinaire des enherbements, le drainage de l'eau est facilité malgré un assèchement plus rapide du sol (Goma-Fortin et Chovelon, 2012). Les végétaux choisis doivent donc permettre une amélioration de la structure du sol et diminuer le compactage. Ils ne doivent également pas consommer trop d'azote sous-peine d'être concurrentiels pour la culture. Des essais d'enherbement en vigne ont montré que la consommation de l'azote du sol se produisait parfois au détriment de la vigne. Toutefois, rien n'explique si cette observation était due à la consommation du couvert végétal ou à cause des adventices présentes en grand nombre sur la parcelle. Les Fabacées sont mieux adaptées que les céréales aux parcelles à faible teneur en azote puisqu'elles possèdent la capacité de fixer l'azote atmosphérique (Kramberger et al., 2009).

Le choix du couvert apparaît donc primordial. Au-delà des critères déjà énoncés, les couverts végétaux doivent répondre aux exigences suivantes : installation plus rapide que les adventices et impact pendant la période critique d'établissement des adventices (Robačér et al., 2016 ; Charles et al., 2012), exigences faibles en azote et en eau, taille du couvert, système racinaire, semences au coût raisonnable et disponibles sur le marché... La densité de semis est également un critère à déterminer puisqu'elle apparaît importante dans la gestion des adventices et des plantes spontanées (Masilionyte et al., 2017).

5. Plantes allélopathiques

a) Généralités et principes

Bien que ce phénomène soit connu et utilisé en agriculture depuis l'antiquité (Zeng, 2014), la connaissance de l'allélopathie s'est développée à partir des années 1970 pour devenir populaire dans les années 1990. Elle est définie comme un phénomène biologique par lequel un organisme produit des substances biochimiques qui influencent la croissance, la survie, le développement et la reproduction d'autres organismes (Cheng et Cheng, 2015). Ce mécanisme de l'écologie chimique s'intéresse aux effets des produits chimiques produits par les plantes (plantes donneuses). Ces substances peuvent avoir un effet positif comme pour la régulation des adventices (plantes réceptrices). Cependant, il faut prendre garde aux effets négatifs pouvant apparaître avec leur utilisation : auto-toxicité, maladie du sol... Ces composés allélopathiques qui sont en général des métabolites végétaux secondaires sont classés dans 14 catégories en fonction de leur similarité chimique (Rice, 1984). Ils sont capables de perturber la croissance des racines, la germination et même la croissance globale de la plante (longueur des entre-nœuds, hauteur, ...) (Jabran et al., 2015). Divers produits chimiques, tels que les phénols, les flavonoïdes ou les terpénoïdes, possèdent des propriétés allélopathiques (Kunz et al., 2016).

Les effets des composés allélopathiques se font sentir dès leur présence en faibles quantités à conditions qu'elles soient constantes ou croissantes et sur une longue durée (Gfeller et Wirth, 2017). L'intensité des effets est toutefois dépendante de la dose libérée (elle-même dépendante des facteurs environnementaux et de l'état sanitaire de la plante par exemple) et de la combinaison entre plusieurs molécules (Soltys et al., 2013). Que ce soit un seul composé allélopathique ou un mélange de molécules, leurs propriétés chimiques et biologiques changent en pénétrant dans le sol. Si certains composés sont actifs directement sur les plantes dès leur libération, d'autres sont donc modifiés par les micro-organismes ou des conditions environnementales bien spécifiques (pH, humidité, température, lumière,

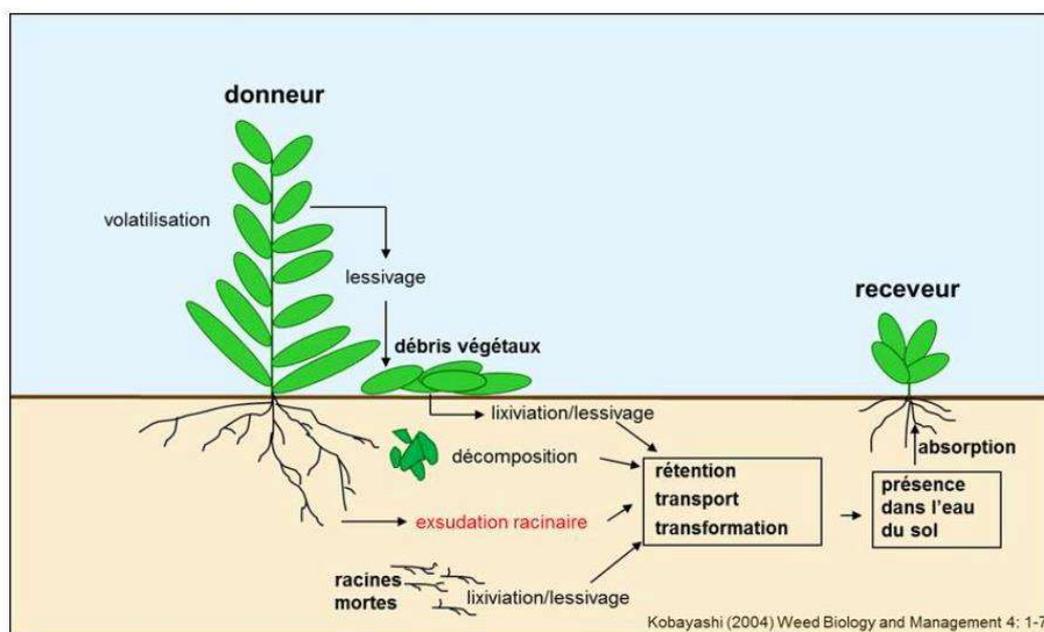


Figure 1 : Voies possibles pour la libération des composés allélopathiques dans l'environnement par une plante donneuse selon Kobayashi (2004), (Gfeller et Wirth, 2017)

oxygène...) pour pouvoir être rendus actifs (Soltys et al., 2013). Les composés allélopathiques sont libérés soit lors de l'implantation du couvert végétal, soit lors de sa dégradation, soit les deux, sous forme de lixiviats ou d'exsudats racinaires, ou par décomposition de la biomasse végétale (Kunz et al., 2016) (Figure 1). La décomposition des résidus végétaux en surface entraîne la libération des substances phytotoxiques (phénomène de l'inhibition allélopathique) (Robačar et al., 2016). Ces phytotoxines sont lessivées jusqu'à 2-3 cm en profondeur, à l'endroit où se situe 90% de la banque de graines d'adventices. Cette zone est appelée « zone allélopathique ». Les graines d'adventices présentes dans cette zone voient leur germination et leur croissance perturbées (Farooq et al., 2011). Ces dérèglements sont dus à la perturbation de différents processus comme la photosynthèse, la respiration, la nutrition, la division cellulaire... (Cheng et Cheng, 2015 ; Soltys et al., 2013). L'inhibition de l'activité enzymatique serait l'explication principale de toutes ces modifications. Il est estimé que les plantes monocotylédones seraient plus résistantes aux composés allélopathiques que les dicotylédones (Soltys et al., 2013). Les plantes peuvent également émettre des composés allélopathiques volatiles, ce qui permet d'élargir le champ d'action des molécules phytotoxiques (Saxena et al., 2016).

Les composés biochimiques jouent donc un rôle majeur dans la régulation des adventices, au-delà des simples couverts végétaux sans propriété allélopathique. Cependant, peu d'études démontrent les effets inhibiteurs des cultures de couverture sur la croissance des adventices (Jabran et al., 2015). Il est en effet difficile d'expliquer si les effets observés sur la réduction de la croissance des adventices sont uniquement dues aux composés allélopathiques ou à la compétition pour les ressources (Gfeller et Wirth, 2017).

Certaines études démontrent tout de même une réduction de l'émergence des adventices en partie due aux effets allélopathiques. Pour une efficacité maximale, Kunz et ses collaborateurs (2016) estiment que les espèces végétales composant le couvert doivent être mélangées pour obtenir une forte concurrence et une suppression biochimique de la croissance des adventices. En effet, les plantes allélopathiques ont un effet sur la régulation des adventices uniquement après leur installation voire leur phase végétative mais pas lors de la phase d'installation du couvert (Bécart et Coutant, 2018). Il faut donc combiner les méthodes et par conséquent avoir recours à des mélanges de plantes. Grâce aux couverts végétaux, on rapporte une suppression des adventices et espèces spontanées allant jusqu'à 90% des espèces émergeant après la récolte des céréales (Jabran et al., 2015) mais il est probable que ces observations soient l'effet d'une combinaison entre compétition pour les ressources et l'allélopathie (Kunz et al., 2016). Il est difficile expérimentalement de démontrer quel phénomène entre en jeu. C'est pourquoi l'importance de l'allélopathie demeure au cœur d'une controverse scientifique (Delabays et al., 2009). L'utilisation de plantes aux propriétés allélopathiques fait donc débat.

Il faut en plus prendre garde aux effets allélopathiques des plantes puisque des problèmes de germination ont déjà été observés après des semis directs à cause des molécules phytotoxiques relâchées par la culture précédente (Delabays et al., 2009). En pépinière d'arbres, comme aucun semis n'est effectué, l'intérêt porté à l'allélopathie concerne surtout la gestion de la flore adventice et spontanée. Pour cela, des programmes d'amélioration génétique sont lancés afin de développer les plantes allélopathiques cultivées. Au-delà de l'installation d'un couvert végétal au pied des cultures spécialisées, comme c'est déjà le cas pour des essais en vignes, l'utilisation de cultures intermédiaires dites « nettoyantes » peut s'avérer utile à intégrer dans la rotation pour lutter contre les adventices (Delabays et al., 2009).

b) Cas particulier des cultures intermédiaires

Les cultures intermédiaires développées dans l'objectif principal de fournir des services agroécologiques aux champs sont peu utilisées pour leurs propriétés allélopathiques dans la réduction des adventices et plantes spontanées puisque l'état actuel des connaissances reste limité. Pourtant, une étude suggère que les cultures intermédiaires permettraient de réguler la pression en adventices grâce à la libération de composés allélopathiques (Gfeller et Wirth, 2017). Pour cela, les chercheurs ont combiné des essais au champ et une approche métabolomique.

Des études ont montré que certaines cultures intermédiaires possèdent un bon potentiel allélopathique comme c'est le cas pour les céréales (dont le sarrasin) et les brassicacées. Il est difficile d'établir une liste exhaustive puisque la nature des molécules étant parfois méconnue, une approche métabolomique large reste coûteuse et compliquée. Les légumineuses seraient susceptibles de posséder un pouvoir allélopathique. Cependant, ce dernier est difficile à démontrer puisque la fixation d'azote pourrait être source d'une augmentation de la compétitivité des plantes cultivées vis-à-vis des adventices. Le potentiel effet allélopathique serait alors masqué.

Un autre facteur rend difficile la mise en évidence d'un effet allélopathique : l'ombrage. Jusque-là considéré comme le facteur principal de suppression des adventices, l'ombrage ne serait pas un facteur limitant puisque les essais ont montré qu'avec un faible ombrage du couvert végétal, la croissance de l'amarante par le sarrasin, le radis fourrager et la moutarde brune était inhibée (Gfeller et Wirth, 2017). D'autres facteurs sont donc responsables de ces observations et l'allélopathie pourrait être un facteur explicatif important. Les racines étant le lieu d'une activité métabolique importante et jouant un rôle primordial dans les interactions avec la rhizosphère, il est donc supposé que les exsudats racinaires jouent un rôle majeur en transportant des composés allélopathiques dans le sol environnant. Des essais au champ reconduits sur trois ans sont venus étayer ces hypothèses. Le sarrasin (variété 'Lileja), la moutarde brune (variété 'Vitasso') et le radis fourrager (variété 'Structurator') ont éliminé respectivement 95%, 91% et 93% des adventices par rapport à un témoin nu sans culture intermédiaire. Le facteur variété est très important puisque les effets allélopathiques sont variables suivant le cultivar (Jabran et al., 2015). Certaines études expliquent la suppression des adventices par la combinaison de l'allélopathie et de la compétitivité pour les ressources. L'effet allélopathique du radis fourrager a été étudié en pot à l'aide d'extraits aqueux de feuilles et racines mais rien n'indique si les quantités de composés allélopathiques produits en plein champ seraient suffisantes pour supprimer efficacement les adventices (Kunz et al., 2016).

Les composés allélopathiques des cultures intermédiaires doivent donc être étudiés pour leur effet suppressif sur les adventices en inter-culture. L'effet allélopathique d'une culture intermédiaire est sûrement moins efficace qu'un herbicide (Gfeller et Wirth, 2017) et il pourrait disparaître après le cycle de culture. Il est donc envisageable d'utiliser des cultures intermédiaires en même temps que la culture (en misant sur un ressemis spontané de la culture en fin de cycle), en prenant garde d'étudier les propriétés de chaque plante pour éviter une compétitivité trop grande pour les ressources avec la culture en place.

6. Principaux mécanismes mis en jeu...

a) Chez les BRASSICACEES

Les Brassicacées sont des plantes reconnues pour être efficaces dès le début de leur cycle dans la lutte contre les adventices (Charles et al., 2012). En effet, leur installation rapide permet une compétition immédiate avec ces dernières. Pourtant, leur utilisation seules ne permet pas de réguler efficacement les adventices sur la durée et il est parfois nécessaire de les associer à d'autres mesures de contrôle.

Les Brassicacées sont de plus en plus développées pour leur émission de glucosinolates. Ces métabolites secondaires soufrés sont caractéristiques de cette famille de plantes. Ils s'accumulent dans les tissus végétaux (feuilles principalement) mais sont également produits par les racines (Gfeller et Wirth, 2017). Si leur activité biologique apparaît limitée, leur hydrolyse (dégradation) par l'enzyme mirosinase (ou thioglucoside glucohydrolase) forme des substances allélopathiques, comme les isothiocyanates et les nitriles (ANNEXE I), qui auraient un rôle dans la régulation des adventices grâce à leur toxicité (Lawley et al., 2012 ; Walsh et al., 2014 ; Gfeller et Wirth, 2017 ; Masilionyte et al., 2017) mais aussi contre les pathogènes, les insectes et les nématodes (Lawley et al., 2012). L'utilisation de la moutarde en biofumigation est un exemple de lutte bien connu contre les maladies du sol. Les isothiocyanates sont des composés volatils qui ont une courte durée de vie dans le sol (Gfeller et Wirth, 2017). Ils agissent sur la germination qu'ils peuvent inhiber (par exemple avec *Sonchus asper* L. (Soltys et al., 2013)) et sur la croissance des semis.

Caméline (*Camelina sativa*)

Walsh et ses collaborateurs (2014) ont monté une expérimentation en quatre parties ayant pour but de démontrer les effets allélopathiques de la caméline sur certaines plantes : la folle avoine (*Avena fatua*), le lin (*Linum usitatissimum*) et le radis (*Raphanus sativus*). Ils ont étudié l'effet des exsudats racinaires, de l'incorporation de résidus frais au sol, du produit de lavage des feuilles et des extraits aqueux de caméline sur ces plantes. Les exsudats racinaires sont difficilement isolables si bien que l'observation de leurs effets est compliquée. En effet, les racines contiennent moins de substances allélopathiques que les feuilles et la quantité de ces substances peut dépendre de plusieurs facteurs (photopériode, température, ...). Dans l'étude, les exsudats racinaires de caméline ont permis de réduire de façon significative le poids frais du lin mais n'ont eu aucun effet sur la folle avoine ou le radis.

L'incorporation des résidus frais de caméline ont conduit à une augmentation de la biomasse du radis. Le lavage des feuilles de caméline a eu le même effet. Ces dernières observations viennent appuyer les conclusions précédentes concernant les effets positifs de la caméline sur certaines plantes. Des hypothèses mentionnent que certains composés volatils des extraits aqueux contiendraient des substances allélochimiques expliquant ces observations. D'autres recherches devront venir confirmer l'activité allélopathique de ces substances.

Les extraits aqueux de caméline ont permis de réduire la germination de ces plantes. Ces observations seraient expliquées par la présence de glucosinolates (de nombreux produits chimiques dont éthanolamine, 3-pentanone, 3-hexène-1-ol et tétrahydrofurane (ANNEXE I) ont été retrouvés dans l'extrait de pousse de caméline). La teneur en glucosinolate (de 18,7 à 36,2 $\mu\text{mol/g}$) est plus faible que celle des graines de canola dont l'effet a également

été étudié dans la même recherche. L'inhibition de la germination par les substances allélopathiques serait due à « de faibles niveaux d'isothiocyanates (produit de dégradation des glucosinolates) qui induisent une dormance secondaire ». Il faut rester prudent avec ces observations car les extraits de plantes ne reflètent pas leur activité réelle en plein champ. Cependant, l'identification des composés actifs peut apporter des éléments de réponse aux observations de réduction de la pression en adventices.

Il est toujours difficile de démontrer la présence de l'activité allélopathique de la caméline dans un contexte de production. Les essais de Walsh et al. (2014) ont démontré une potentielle activité allélopathique chez la caméline mais cette activité semble variable suivant les espèces réceptrices. Il est donc compliqué de démontrer une activité allélopathique réelle et précise jouant un rôle dans la réduction des adventices.

Radis chinois (*Raphanus sativus longipinnatus* 'Structurator')

Le radis chinois aussi appelé radis fourrager a été étudié par plusieurs chercheurs. Des expériences ont été menées à partir d'extraits de radis fourrager pour montrer ses effets sur la germination d'adventices des cultures. Sur les 25 étudiées, 11 ont observé une inhibition de leur germination (*Capsella bursa-pastoris* et *Convolvulus arvensis* L. par exemple) tout comme quelques espèces cultivées (Soltys et al., 2013). L'étude de Kunz et ses collaborateurs (2016) a montré que la variété 'Niger' avait supprimé 62% des adventices par rapport au témoin non traité. Ils expliquent cela par le fait que les produits d'hydrolyse du glucosinolate (comme les isothiocyanates) peuvent inhiber et retarder la germination des adventices. Le radis chinois contient du glucotropaéoline et de la sinigrine (glucosinolates).

Cependant, on ne peut être certain que les effets observés soient dus aux composés allélopathiques : Lawley et al., (2012) ont rapporté de leurs quatre expériences (résidus de culture laissés en place, intégrés au sol ou retirés, et utilisation d'extraits aqueux de résidus de culture) que les résultats observés de suppression des adventices au début printemps étaient uniquement dus à la concurrence entre les adventices et la culture de radis fourrager en place à l'automne. L'utilisation du radis fourrager dans la région mi-atlantique des Etats-Unis a montré qu'il était possible de supprimer les adventices annuelles hivernales de l'automne jusqu'à début avril en semant les graines avant le 1^{er} septembre (Lawley et al., 2012). Il est ainsi possible d'utiliser le radis fourrager en tant que précédent cultural pour bénéficier des avantages de suppression des adventices et, de restructuration et de nutrition du sol. Toutefois, l'effet suppressif des adventices demeure assez court.

b) Chez les FABACEES

Les Fabacées aussi appelées légumineuses possèdent la particularité de pouvoir s'associer à des bactéries du sol qui fixent l'azote atmosphérique (Voisin et al., 2015). Ces plantes ne nécessitent pas d'apport d'azote pour leur culture puisqu'en plus d'absorber l'azote du sol grâce à leurs racines, l'association symbiotique avec les bactéries présentes naturellement dans le sol peut permet de bénéficier d'un apport d'azote supplémentaire. En effet, les bactéries convertissent l'azote de l'air (N₂) en azote ammoniacal (NH₃) à l'aide d'une enzyme bactérienne : la nitrogénase. L'énergie issue de la photosynthèse permet de

fixer cet azote dans le sol (restitution de l'énergie aux bactéries pour la transformation de l'azote). Ce phénomène est ce que l'on appelle la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. L'azote ammoniacal est directement assimilable par les légumineuses pour leur croissance. On dit que ces plantes sont fixatrices d'azote. Une fois la culture détruite, les résidus de culture sont des sources d'azote pour la culture suivante.

Fenugrec (*Trigonella foenum-graecum*), FABACEES

Le fenugrec n'est pas connu pour ses propriétés allélopathiques, mais est une légumineuse réputée pour son adaptation aux fortes températures et à la sécheresse [5]. Son démarrage rapide et son importante production de biomasse seront des éléments utiles à la compétition contre les adventices. La biomasse produite permet une production importante d'azote utile à la culture en place. Sa racine pivotante permet de restructurer le premier horizon du sol, favorisant ainsi le décompactage.

Trèfle (*Trifolium repens* 'Pipolina'), FABACEES

Le micro-trèfle 'Pipolina' est le plus petit trèfle blanc disponible sur le marché [6]. Sa faible taille permet de ne pas gêner la culture en place dans sa croissance en exerçant une compétition pour la lumière. Sa faible concurrence avec la culture permet de ne pas impacter la croissance de la culture. Par exemple, des essais réalisés sur une production d'aubergine ont montré que le trèfle blanc n'avait pas influencé le rendement qui était similaire à celui des parcelles recouvertes avec du paillage plastique noir (Masilionyte et al., 2017). Son important pouvoir couvrant et son adaptation à tous les types de sols en font un couvert particulièrement intéressant dans la régulation des adventices. La colonisation du sol par les adventices se trouve donc entravée rapidement. La durée de vie du trèfle (5 ans et plus) permet de conserver ce couvert végétal pendant toute la durée du cycle en pépinière.

Le trèfle (*Trifolium spp.*) produit des composés allélopathiques comme les phénols (Bhowmik et Inderjit, 2003). Ces métabolites secondaires sont à l'origine de plusieurs phénomènes observables chez les plantes.

Les composés phénoliques peuvent accroître la perméabilité de la membrane cellulaire des plantes, conduisant ainsi à une mort lente des tissus végétaux ou au moins à un ralentissement de leur croissance (Li et al., 2010). Cette croissance peut également être perturbée par l'entrave à l'absorption des nutriments. Cette absorption est contrariée par l'action des composés phénoliques sur l'allongement des racines de la plante et par conséquent son développement. D'autres impacts de ces composés sur la plante ont été recensés même si tous ne concernent pas le trèfle (respiration des plantes et photosynthèse perturbées, action sur des fonctions enzymatiques, sur la synthèse des hormones, sur la synthèse des protéines).

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des méthodes alternatives

	Avantages	Inconvénients
Désherbage mécanique	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne efficacité - Plusieurs outils différents disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> - Outils différents pour la gestion du rang et de l'inter-rang - Investissement dans du matériel - Passages réguliers
Paillage	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation des pertes en eau - Installation facile pour les paillis en vrac - Très bonne efficacité 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût important : paillage du rang uniquement, renouvellement régulier - Le paillage doit être exempt de graines
Couvert végétal	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation des pertes en eau, de l'érosion - Amélioration de la qualité du sol - Refuge pour les insectes auxiliaires - Recouvrement total possible 	<ul style="list-style-type: none"> - Recouvrement plus ou moins rapide - Mise en place avant l'implantation de la culture - Efficacité variable
Couvert végétal allélopathique	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation des pertes en eau, de l'érosion - Amélioration de la qualité du sol - Refuge pour les insectes auxiliaires - Recouvrement total possible - Effets encore visibles après la destruction de la culture - Nombreux mécanismes explicables 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en place avant l'implantation de la culture - Efficacité variable - Difficulté à montrer si les couverts sont vraiment allélopathiques

c) *Autres plantes*

Phacélie (*Phacelia tanacetifolia*), HYDROPHYLLACEES

Généralement utilisée en tant que culture intermédiaire, la phacélie possède un développement très rapide qui lui permet de concurrencer les adventices dans la disponibilité des ressources, en particulier grâce à son importante production de biomasse. Mellifère, elle attire les pollinisateurs et les insectes auxiliaires, utiles pour la culture et permettant d'augmenter le contrôle biologique des ravageurs de la culture [7]. Elle est également connue pour fixer l'azote atmosphérique et le restituer à la culture. Sa racine pivotante permet une restructuration du sol et une compétition accrue avec les adventices (action physique). Cette plante posséderait également un effet favorable sur la croissance des jeunes pommiers.

Alpiste des oiseaux (*Phalaris canariensis*), POACEES

Les Poacées sont définies comme des plantes compétitrices avec une intensité supérieure aux Brassicacées et aux Fabacées (Charles et al., 2012). La plupart du temps, elles sont utilisées sous la forme de mulch pour leur efficacité contre les adventices.

L'alpiste est une plante qui s'adapte facilement aux terrains secs et aux températures élevées. Elle se plaît dans les sols sablonneux et convient très bien à la culture en mélange [8].

Les méthodes décrites présentent toutes des avantages et inconvénients qui sont synthétisés dans le tableau 1.

D. Pratiques actuelles de désherbage dans l'entreprise

Le désherbage des cultures est actuellement réalisé de plusieurs façons complémentaires au sein des pépinières. La stratégie de gestion consiste en une observation visuelle du taux de recouvrement des adventices. Un désherbage systémique à base de glyphosate est réalisé en janvier ou début février (18 janvier dans la parcelle expérimentale de palmettes pour cette année) à faible dose (1 ou 2L/ha suivant la quantité d'adventices) puis un anti-germinatif est pulvérisé en mars ou avril à raison de 6L/ha. Le produit antigerminatif utilisé actuellement est le Pendulum. Son usage a été retiré le 14 août 2018. Si sa distribution s'est arrêtée le 31 janvier 2019, il est possible de l'utiliser et terminer les bidons jusqu'au 31 janvier 2020. Un équivalent dont seul le nom commercial diffère est disponible sur le marché et pourra donc remplacer le Pendulum en janvier prochain. De nombreux produits phytosanitaires se voient retirés du marché. Il convient donc de s'anticiper et trouver des solutions permettant de pouvoir se passer de ces produits à long terme.

Les traitements réalisés permettent de commencer la saison sur une base « propre » avec une parcelle dénuée d'adventices. Ensuite, au cours de l'année et au fil du recouvrement de la parcelle par les adventices, un désherbage mécanique est effectué. Une bineuse est utilisée sur l'entre-rang ainsi qu'un palpeur lorsque les plantes indésirables sont peu développées. Un désherbage manuel à l'aide de pioches est réalisé pour retirer toutes les adventices restantes, ou non retirées par un désherbage mécanique. Ce dernier peut parfois être inefficace car positionné trop tard ou non adapté au sol.

Le désherbage actuel suit un schéma classique de culture pérenne, et ne s'inscrit pas dans une démarche d'adaptation aux nouvelles contraintes (évolution de la réglementation par exemple). Compte-tenu du contexte réglementaire, technique et scientifique, il est indispensable de développer de nouveaux moyens de lutte contre les adventices comme présentés auparavant (désherbage mécanique, paillages organiques, couverts végétaux), qui pourraient remplacer le désherbage chimique de manière durable.

Plusieurs hypothèses apparaissent alors :

- il existe des méthodes alternatives permettant de réguler efficacement les populations d'adventices
- ces méthodes sont adaptables aux contraintes du système
- elles sont indépendantes du facteur variétal de la culture en place, mais non pas des espèces et variétés choisies pour l'implantation de couverts végétaux
- ces techniques peuvent avoir un impact sur la croissance de la culture en place

Le mémoire a pour but de mettre en lumière les résultats obtenus lors des essais de plusieurs méthodes alternatives au désherbage chimique. Ces méthodes seront présentées dans un premier temps, puis les résultats seront exposés et analysés, participant ainsi à la création d'un Outil d'Aide à la Décision. Ces observations seront ensuite critiquées dans un objectif d'amélioration de la méthode de travail et d'ouverture vers d'autres perspectives.

Tableau 2 : Critères de choix des différentes méthodes

Modalités testées	Critères de choix
Paille	Facilité d'obtention
Miscanthus	Paillage déjà disponible et non utilisé à l'entreprise
AGROFIX-2	Plantes complémentaires, facilité d'implantation, propriétés allélopathiques, faible coût
Camelina sativa	Propriétés allélopathiques, faible coût, hauteur moyenne
Micro-trèfle 'Pipolina'	Rapidité d'installation, faible hauteur
Bineuse Kress	Adaptation aux outils existants dans l'entreprise

II. Matériels et méthodes

A. Critères de choix des méthodes

Les différentes méthodes qui sont testées répondent à un certain nombre de critères qui sont spécifiques à l'entreprise. Le coût des intrants est un élément essentiel pour le choix de la méthode mais il faudra aussi prendre en compte les coûts environnementaux inhérents à la mise en œuvre des alternatives.

L'essai se déroule en pleine terre sur une parcelle de poiriers greffés l'année précédente à 5 cm du sol. Les sujets espacés de 60 cm sont disposés sur des rangs espacés de 1,50 m. L'âge des sujets et leur stade physiologique sont à prendre en compte lors de la mise en place de l'essai. La largeur de l'inter-rang est également un critère qu'il faut considérer pour déterminer la largeur sur laquelle les essais pourront être conduits puisque le passage des outils sur le rang doit être permis tout au long de la culture, y compris celui du tracteur pour le désherbage mécanique de l'inter-rang. Il est également envisageable d'utiliser le matériel déjà existant pour effectuer un désherbage mécanique du rang (plus efficace que le palpeur actuel utilisé).

Concernant l'implantation de couverts végétaux, ceux-ci doivent répondre à des critères bien spécifiques, que ce soit pour les conditions du semis ou dans le choix des espèces en lui-même. La période de semis doit être située de mars à début mai et la profondeur de semis doit être faible puisque la culture est déjà en place et que par conséquent seul un travail du sol superficiel est envisageable. Les plantes semées doivent être compatibles avec les caractéristiques pédologiques du sol (en l'occurrence sol limono-argilo-sableux) et s'installer rapidement pour couvrir le sol en un temps assez court pour concurrencer la croissance des adventices. Les espèces implantées sont choisies pour leurs propriétés que ce soit leur rôle dans la concurrence des adventives, leur taille, leur système racinaire... Le tableau 2 répertorie les principaux critères de choix de chaque méthode. Il faut rajouter à cela un autre paramètre : la capacité de ressemis spontané. En effet, il est préférable de privilégier des plantes qui pourront se ressemer toutes seules, évitant ainsi d'avoir à intervenir de nouveau sur la culture. Le fournisseur du mélange AGRO-FIX 2 recommande l'utilisation de glyphosate pour sa destruction. Dans notre cas, il est tout à fait intéressant de ne pas détruire ce couvert végétal pour profiter de son action le maximum de temps possible. Il en est de même avec la caméline qui possède un cycle court et doit absolument se ressemer spontanément pour que la solution soit viable économiquement.

B. Dispositif expérimental et modalités

La gestion du désherbage sur le rang et l'inter-rang est différente. En effet, le désherbage de l'inter-rang est effectué indépendamment : le désherbage mécanique actuel ne pose aucun problème et est bien géré au sein de l'entreprise. Le passage entre les rangs doit rester libre pour permettre le passage des outils agricoles (tracteur, arracheuse, nacelle) tout au long de la saison. La mise en place de plantes couvre-sol n'est donc pas envisageable à cet endroit. Il en est de même pour le paillage : la quantité nécessaire d'intrants serait beaucoup trop importante pour pouvoir couvrir toute une parcelle et extrêmement coûteuse. Les paillages et plantes pour contrôler les adventices ne seront donc mis en place que sur le rang et non sur l'inter-rang qui sera géré de la même façon qu'actuellement : passage du tracteur équipé



Figure 2 : Paillage avec la paille à la mise en place



Figure 3 : Paillage avec le miscanthus à la mise en place



Figure 4 : Mélange AGRO-FIX 2 un mois après le semis



Figure 5 : Caméline un mois après le semis



Figure 6 : Micro-trèfle un mois après le semis



Figure 7 : Doigts Kress (K.U.L.T.)

d'une bineuse. Cela implique l'installation d'un paillage assez fin qui ne gênera pas le passage des outils (« qui risquent de se prendre dedans »).

L'expérimentation est mise en place sur une parcelle de poiriers greffés en chip-budding en août 2018 sur BA29. Les rangs sur lesquels les variétés de poiriers ont été greffées en grande quantité sont marqués et non traités au glyphosate comme les autres rangs. Ainsi deux rangs de chaque variété ('Doyenné du Comice', 'William' et 'Conférence') sont réservés pour l'expérimentation. 7 modalités sont testées :

- Paillage paille (M1) (Figure 2)
- Paillage miscanthus (M2) (Figure 3)
- Semis du mélange AGRO-FIX 2 (mélange de phacélie (*Phacelia tanacetifolia*), radis chinois (*Raphanus sativus longipinnatus* 'Structurator'), fenugrec (*Trigonella foenum-graecum*) et alpiste (*Phalaris canariensis*), M3) (Figure 4)
- Semis de caméline (*Camelina sativa* M4) (Figure 5)
- Semis de micro-trèfle (*Trifolium repens* 'Pipolina' M5) (Figure 6)
- Désherbage mécanique avec la bineuse à doigts Kress (M6) (Figure 7)
- Témoin (M7)

Des calculs ont été effectués afin de maximiser la taille des unités expérimentales et le nombre de répétitions sur les rangs de longueurs différentes. Les rangs étant de longueurs différentes, l'essai possède donc 6 répétitions par modalité pour la variété 'Conférence', 4 répétitions pour la variété 'Williams' et 4 répétitions également pour la variété 'Doyenné du Comice'. L'espace entre chaque arbre est de 0,60 m et chaque unité expérimentale mesure 4,8 m (8 arbres) sur 20 cm de large ce qui correspond à une unité expérimentale de 0,96 m².

Les deux rangs de chaque variété sont traités parallèlement puisque le travail s'effectue pour deux rangs consécutifs en pépinière. Les modalités sont disposées en randomisation totale au sein de chaque paire de rangs (Figure 8). Les arbres supplémentaires hors-essai sont les plus proches du bois et zone tampon. Ils seront paillés pour ne pas être laissés sans traitement mais ne seront pas pris en compte dans les mesures.

C. Mise en place de l'expérimentation

La mise en place de l'expérimentation a lieu le 12 avril 2019. Les rangs ont préalablement été désherbés mécaniquement et manuellement afin de démarrer l'expérimentation sur une parcelle saine puis le sol décompacté à l'aide d'un râteau au moment de la mise en place. Les rangs adjacents dans la parcelle ont été traités chimiquement avec l'utilisation de buses anti-dérive. L'espacement de 1,50 m entre les rangs permet donc d'éviter toute interaction entre les traitements et l'expérimentation.

Les densités de semis sont basées sur les données commerciales. Comme il est complexe de peser d'infimes quantités de semences nécessaires pour chaque unité expérimentale, la quantité nécessaire pour les 14 unités par modalité a été calculée (soit pour $0,96 \times 14 = 13,44\text{m}^2$).

Il a donc nécessité 8 g de *Camelina sativa* (6 kg/ha), 67 g de micro-trèfle (5 g/m²) et 27 g du mélange AGRO-FIX 2 (20 kg/ha). Ces quantités ont été mélangées à du sable puis divisées en 14 parts égales. Les semis ont été effectués à la volée puis recouverts avec un râteau.

Longueur du rang	Variété
67,2 m	Comice
67,8 m	

M1 7	M3 35	M5 63	M2 21	M4 49	M2 23	M7 91	M6 77	M1 9	M3 37	M6 79	M4 51	M5 65	M7 93	1 arbre	n° ID
M1 8	M3 36	M5 64	M2 22	M4 50	M2 24	M7 92	M6 78	M1 10	M3 38	M6 80	M4 52	M5 66	M7 94		

76,2 m	William	8 arbres	M5 67	M6 81	M3 39	M4 53	M1 11	M6 83	M3 41	M7 95	M2 25	M5 69	M1 13	M7 97	M4 55	M2 27	7 arbres	n° ID
79,2 m		8 arbres	M5 68	M6 82	M3 40	M4 54	M1 12	M6 84	M3 42	M7 96	M2 26	M5 70	M1 14	M7 98	M4 56	M2 28	12 arbres	

100,8 m	Conférence	M3 29	M6 71	M1 1	M2 15	M7 85	M3 31	M5 57	M4 43	M1 3	M7 87	M4 45	M6 73	M2 17	M3 33	M5 59	M6 75	M1 5	M5 61	M7 89	M2 19	M4 47	n° ID
100,8 m		M3 30	M6 72	M1 2	M2 16	M7 86	M3 32	M5 58	M4 44	M1 4	M7 88	M4 46	M6 74	M2 18	M3 34	M5 60	M6 76	M1 6	M5 62	M7 90	M2 20	M4 48	

Modalité	Quantité semée	
M1	paillage paille	
M2	paillage miscanthus	
M3	AGRO-FIX 2	20 kg/ha 25g pour les 14 UE
M4	Camelina sativa	6 kg/ha 8 g pour les 14 UE
M5	Micro-trèfle Pipolina	5 g/m ² 27 g pour les 14 UE
M6	bineuse Kress	
M7	témoin	

1 UE = 8 arbres x 20 cm = 4,8 m x 0,20 m = 0,96 m²

arbres hors essai

Figure 8 : Plan d'expérimentation

L'apparition des premières pousses a eu lieu deux semaines après les semis. Le taux de germination du mélange AGRO-FIX 2 n'étant pas suffisant et le semis non homogène, un semis de rattrapage a été effectué le 7 mai 2019 suivant le même procédé.

Le paillage de miscanthus en vrac et la paille en petite botte de 6kg ont été disposés manuellement sur une épaisseur de 5 cm environ (chiffre approximatif pour la paille à cause de l'hétérogénéité des brins de paille). Cette épaisseur a été déterminée par la hauteur de greffe des pieds. En effet, les greffes ne doivent pas être recouvertes par le paillage pour maximiser le succès du greffage.

Pour ce qui concerne le désherbage mécanique, il est important de positionner les interventions au bon moment pour obtenir une efficacité optimale tout en ayant le moins de passages possible. Ils seront donc effectués lorsque la présence d'adventices sera jugée préjudiciable pour la culture. Le passage de la Kress ne devra pas non plus interagir avec les modalités adjacentes ce qui demande une grande précision dans le maniement de l'outil. Ce dernier ayant été livré trop tard, aucun désherbage mécanique n'a été effectué mais il est tout de même possible de positionner les interventions pour déterminer le nombre de passages : le rang doit être désherbé au stade plantules, c'est-à-dire au même moment que le passage de la houe rotative pour le désherbage de l'inter-rang. Les modalités 6 et 7 seront donc similaires dans l'exploitation des données car ayant subi le même traitement.

D. Mesures et relevés des données

Différentes notations sont effectuées au sein de la parcelle. La flore adventice est composée de plusieurs espèces qui ne se développent pas aux mêmes périodes (conditions climatiques différentes). Un comparatif est donc effectué entre les adventices présentes sur la parcelle avant le début de l'essai et celles présentes dans chaque modalité afin de déterminer la disparition potentielle de certaines espèces pouvant être due aux techniques mises en place. Pour cela, un relevé d'identification préalable à la mise en place de l'expérimentation a été effectué. Ensuite, le même travail entre les modalités et la modalité témoin (M7) est réalisé afin d'observer s'il y a une différence des espèces d'adventices présentes (qui ne pouvaient pas être présentes avant la mise en place de l'essai).

L'essai étant conduit sur une largeur restreinte de 20 cm, une notation du recouvrement total d'adventices est effectuée. En plus de leur identification, les adventices seront comptées toutes espèces confondues dans un premier temps (pour le premier relevé uniquement), puis un taux de recouvrement sera établi. Il en sera de même pour les couverts végétaux où un taux de recouvrement sera déterminé afin d'évaluer leur vitesse d'installation et de recouvrement qui est un critère essentiel dans le choix de la méthode alternative au désherbage chimique à mettre en place au sein des pépinières. Les relevés doivent être effectués toutes les deux semaines à partir de la semaine 23 (6 juin). Suite à une erreur humaine, seuls deux relevés ont été effectués (6 juin et 21 juin) avant l'arrêt définitif de l'expérimentation. Les arbres ont été mesurés le 11 juillet lorsque la croissance était terminée afin de déterminer si les couverts ou les adventices présentes ont pu avoir une influence sur la croissance des arbres.

E. Outils statistiques

Les données à exploiter ne suivant pas une loi normale, il est donc impératif de procéder à des tests non paramétriques. Pour comparer plus de deux échantillons, il est convenu d'utiliser le test de Kruskal-Wallis complété par un test de Dunn permettant de comparer les groupes deux à deux de données quantitatives. Les données récoltées permettent la création de différents groupes (a,b, ...). Le test est basé sur l'inégalité de Bonferonni et inclut celui de Kruskal-Wallis. Pour réaliser les analyses nécessaires à la compréhension des résultats, le logiciel RStudio 1.2.1335 est utilisé et permet d'édition de graphiques (script en ANNEXE II). Le logiciel Excel est également utilisé pour effectuer divers calculs et réaliser des graphiques.

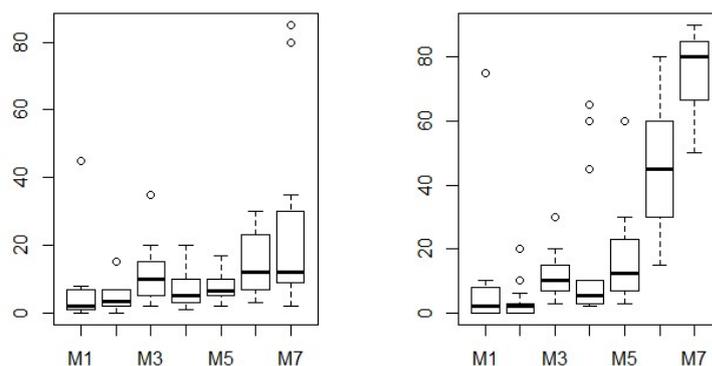


Figure 9 : Boxplot du recouvrement suivant la modalité aux deux dates

Tableau 3 : Regroupement des modalités par classes de recouvrement au 6 juin

Modalité	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Classe	a	a	ab	ab	ab	b	b

Tableau 4 : Regroupement des modalités par classes de recouvrement au 21 juin

Modalité	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Classe	a	a	ab	ab	ab	bc	c

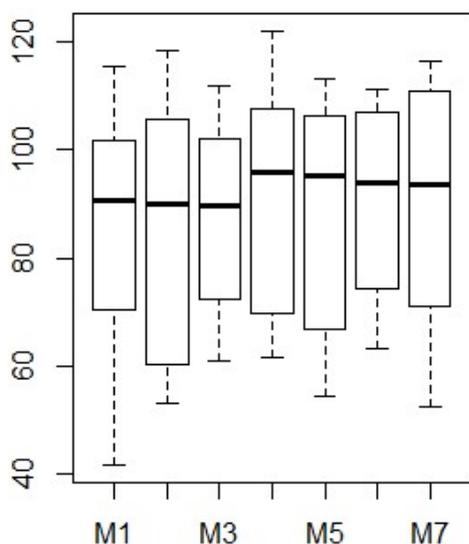


Figure 10 : Boxplot des tailles variétés confondues par modalité

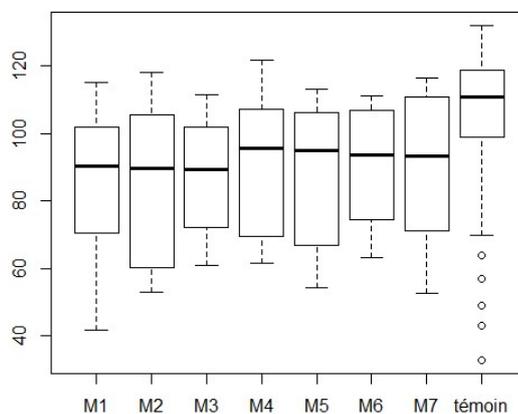


Figure 11 : Boxplot des tailles variétés confondues, par modalité + témoin rajouté

Tableau 5 : Regroupement des modalités + témoin par classes de taille des arbres au 11 juillet

Modalité	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	Témoin
Classe	a	a	a	ab	a	ab	ab	b

III. Résultats

A. Analyses statistiques des données

1. Relevés des adventices

a) *Influence de la variété sur le recouvrement en adventices*

L'expérimentation a été menée sur plusieurs variétés afin de confirmer l'hypothèse selon laquelle la variété n'influence en rien le recouvrement en adventices. Pour vérifier cette hypothèse, la modalité M1 de la variété 'Conférence' a été comparée à la M1 'William' et M1 'Comice'. Il en a été de même pour les autres modalités. On pose les hypothèses : H0 : « La variété n'a pas d'impact sur le recouvrement en adventices. » et H1 : « La variété a un impact sur le recouvrement en adventices ». Pour les deux dates, deux modalités apparaissent significatives : M4 et M6. On rejette donc H0 pour ces deux modalités. Cependant, comme la modalité M6 n'a observé aucun traitement (à l'identique de M7), on suppose que la significativité observée est seulement due au hasard, à la répartition des adventices avant la mise en place de l'expérimentation, ou à l'hétérogénéité du sol. De plus, comme la majorité des résultats indiquent que la variété n'a pas d'impact sur le recouvrement en adventices, il est raisonnable de partir du postulat que celui-ci n'est pas influencé par la variété pour la suite des analyses.

b) *Influence de la modalité testée sur le recouvrement en adventices*

L'influence de la modalité sur le recouvrement en adventices a été étudiée aux deux dates de relevés (Figure 9). Pour la date 1, la p-valeur=0,077, ce qui signifie que l'on rejette H0. L'analyse multivariée (Dunn) conduit à la mise en évidence de deux groupes significativement différents. Les modalités 1 et 2 semblent permettre une réduction de la couverture en adventices par rapport aux modalités 6 et 7 (ANNEXE III, Tableau 3). Les paillages organiques seraient donc des solutions efficaces en début de culture.

Pour la date 2, la p-valeur est de 0,041 : on rejette également H0. Plusieurs classes se distinguent notamment celle contenant les modalités M1 et M2, significativement différente de celle de la modalité M7 (ANNEXE III). M6 ayant suivi le même traitement que M7, il est possible de réunir ces deux modalités dans la même classe (Tableau 4). Les modalités M1 à M5 seraient alors toutes différentes des modalités M6 et M7 (ou seulement M7 si on s'arrête aux résultats stricts) ce qui démontre une régulation des adventices par les cinq premières modalités. Des observations supplémentaires (en fin de saison, avant l'automne) seraient nécessaires pour conclure à la réelle efficacité d'un traitement.

2. Taille des arbres

Influence de la modalité testée sur la taille des arbres

Deux comparaisons ont été effectuées pour déterminer si les modalités avaient un impact sur la croissance des arbres (Figures 10 et 11). La première s'en tient aux modalités testées. La p-valeur de 0,96 indique qu'elles n'ont pas d'influence sur la croissance des arbres (ANNEXE IV).

Tableau 6 : Illustrations des adventices majoritairement présentes au cours de l'essai

Adventices	Illustrations	
<i>Sonchus asper</i>		
<i>Sonchus oleraceus</i>		
<i>Erigeron sumatrensis</i>		
<i>Chenopodium album</i>		
<i>Convolvulus arvensis</i>		

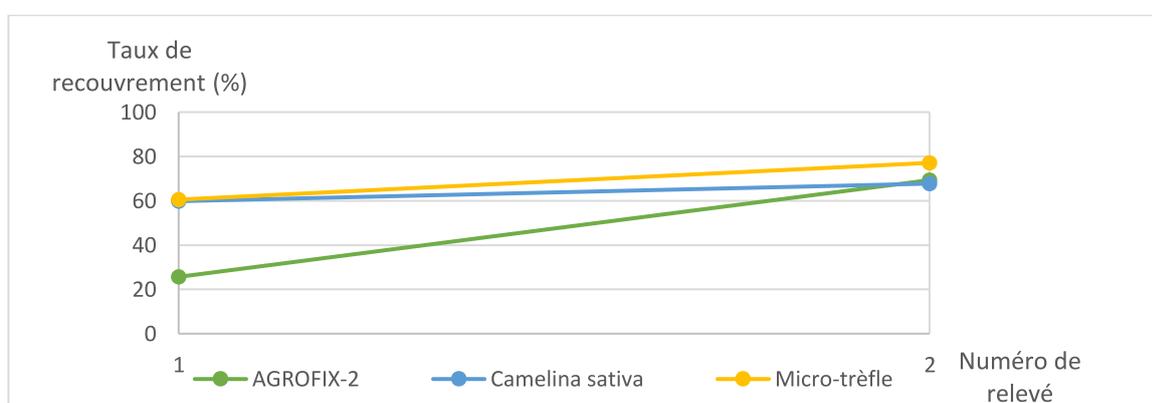


Figure 12 : Evolution du recouvrement des couverts végétaux aux deux relevés

Afin de mettre en évidence une possible différence avec le traitement actuel du champ (désherbage chimique), les arbres du rang jouxtant les 'Conférence' ont été mesurés pour les trois variétés étudiées. Un désherbage chimique n'était pas possible au sein des rangs testés puisque les risques d'interactions avec les modalités voisines étaient trop importants (traitement non précis). Malgré l'absence de répétitions, un grand nombre d'arbres a été mesuré permettant une comparaison avec les modalités testées. L'analyse statistique des données démontre une différence de taille des arbres entre M1, M2, M3 et M5 et la modalité désherbage chimique (ANNEXE IV et Tableau 5). Ce dernier permettrait une meilleure croissance de l'arbre.

B. Espèces présentes

La notation des espèces à chaque relevé a permis de mettre en évidence l'évolution des présences/absences des adventices. Toutes les adventices rencontrées au cours de l'essai sont répertoriées en ANNEXE V. Avec le temps, certaines adventices ont disparu entre le premier et le deuxième relevé (*Papaver rhoeas*, *Aphanes arvensis*, *Veronica persica* et *Chichorium intibus*,). Elles ne représentent pas un grand intérêt dans l'observation car elles sont présentes en petite quantité et de faible taille. De façon globale, la majorité des adventices présentes dans les modalités M6 et M7 le sont également dans les modalités M3, M4 et M5. Certaines espèces ne sont quant-à-elles pas présentes dans les modalités M1 et M2 : *Portulaca oleracea*, *Amaranthus retroflexus*, *Lactuca serriola*, *Helminthoeca echinoides*, *Hypochaeris radicata*, *Euphorbia helioscopia*, *Sonchus asper*. On suppose que ces espèces ne sont pas capables de germer à travers le paillage.

Certaines adventices apparaissent préjudiciables car elles possèdent un fort développement qui pourrait concurrencer la culture (*Sonchus asper*, *Sonchus oleraceus*, *Erigeron sumatrensis*, ...) (Tableau 6). D'autres ont un développement plus restreint mais sont présentes en grand nombre comme *Chenopodium album*. Enfin, au-delà des espèces annuelles, une espèce vivace a été recensée : *Convolvulus arvensis* (liseron). Cette dernière est particulièrement gênante puisqu'elle ne disparaît pas en hiver, et ne semble être régulée par aucune des modalités testées. Son développement assez rapide lui permet de coloniser la surface du sol. Elle s'étend rapidement sur le sol et grimpe aux arbres en s'enroulant. En plus d'exercer une concurrence pour les ressources, elle peut donc empêcher l'arbre de se développer correctement et impose une réelle contrainte lors de l'arrachage des arbres à l'automne.

C. Vitesse d'installation des couverts végétaux

Le taux de recouvrement des couverts végétaux a été estimé aux deux dates des relevés (Figure 12). On note un taux de recouvrement faible (25,7%) du mélange AGROFIX-2 lors du premier relevé réalisé 55 jours après le premier semis, et ce malgré un deuxième semis 30 jours plus tôt. Cependant, lors du deuxième relevé le 21 juin (Figure 13), on relève un taux de recouvrement de 69,3% rejoignant les valeurs similaires des autres couverts végétaux. Cela signifie que le mélange nécessite une durée de croissance plus longue, avec des espèces germant et se développant plus ou moins vite. Le micro-trèfle et la caméline ont eu pour effets de recouvrir assez rapidement de sol avec 60% de recouvrement dès la première mesure. Malgré cela, la caméline arrivée à graines donc en fin de cycle le 21 juin



Figure 13 : Recouvrement par le mélange AGRO-FIX 2 au 21 juin



Figure 14 : Recouvrement par la caméline au 21 juin



Figure 15 : Recouvrement par le micro-trèfle au 21 juin



Figure 16 : Pailleuse distributrice EUROMARK



Figure 17 : Désileuse pailleuse EUROMARK

(Figure 14) ne pourra pas recouvrir davantage que 67,7% du sol. Il faut compter sur un semis spontané des graines pour recouvrir à nouveau le sol lors d'un prochain cycle. A l'inverse, le micro-trèfle (Figure 15) peut continuer à davantage recouvrir le sol au fil du temps. 70 jours après le semis, il recouvre déjà 77% du sol. Espèce vivace, il pourra s'expanser au fil du temps de façon à approcher les 100% de recouvrement. Seule une expérimentation plus longue avec davantage de relevés permettraient de répondre à cette question.

D. Analyse technique de faisabilité

La mise en place du paillage a été effectuée manuellement pour l'expérimentation mais il est impossible d'avoir recours à cette technique en conditions réelles de travail puisque cela demanderait trop de temps et de main d'œuvre et ne serait donc pas viable économiquement. Il existe plusieurs machines permettant de pailler. Si ces machines sont en général utilisées pour le paillage des étables en élevage, il est toutefois possible d'envisager une utilisation pour couvrir le sol en culture. La pailleuse à disques permet un paillage sur une grande largeur. Cependant, dans un souci d'économie et de praticité (passage des engins toute l'année sur les inter-rangs), cette machine ne convient pas pour pailler uniquement les rangs. Les pailleuses distributrices (EUROMARK par exemple, Figure 16) semblent plus adaptées au paillage en rang avec de la paille, même si un remplacement manuel de la paille peut être nécessaire. Tractée par un tracteur, cette machine doit être utilisée avant l'implantation de la culture afin de permettre un passage tous les 1,50 m. Si le paillage est disposé une fois les arbres plantés, il faut alors s'assurer que les arbres ne soient pas hauts de façon à pouvoir passer sous la machine. Un tel équipement représente un investissement mais de nombreuses machines d'occasion sont disponibles à la vente.

Le paillage de miscanthus reçu en vrac peut quant à lui être distribué à l'aide d'une désileuse pailleuse (Figure 17).

Concernant le semis des espèces, celui-ci ne peut être réalisé manuellement dans des conditions de travail. Il faudrait avoir recours à l'utilisation d'un semoir. Pour cela, il faudrait procéder au semis avant l'implantation de la culture afin de permettre un passage aisé des outils agricoles sur la parcelle.

E. Analyse économique

Une analyse économique des différentes techniques mise en place doit être précise et complète. Elle inclut les coûts des intrants mais également les coûts imputés à leur mise en place : main d'œuvre, utilisation d'outil agricole, carburant (Tableau 7). Le coût d'investissement dans des machines permettant de disposer le paillage ou semer les couverts végétaux n'est pas pris en compte dans cette étude. Certains outils sont déjà disponibles au sein de l'entreprise (semoir) ou peuvent être acquis d'occasion (pailleuse, désileuse pailleuse). Seuls les coûts engendrés directement par la mise en place des techniques sont pris en compte.

Le carburant utilisé pour le tracteur (ou autre engin agricole) est du GNR (Gazole Non Routier). Moins polluant que le fioul, ce carburant est réservé aux véhicules non routiers, en particulier les tracteurs. Son coût qui fluctue assez régulièrement est situé autour de

Tableau 7 : Analyse économique des coûts directs de chaque méthode

Implantation / couvert	Quantité nécessaire	Coûts des intrants	Coût des intrants à l'hectare	Main d'œuvre	Carburant	Investissement dans une machine	Total (en €)
Camelina sativa	6 kg/ha	7,10€/kg	5,54€ pour couvrir les rangs sur 20cm de large 42,60€ pour une couverture complète	1h/ha * 1 personne = 20€	GNR : 10L/ha = 9,41€/ha	Semoir	72,01
Micro-trèfle	5 g/m²	0,0365€/g	47,45€ pour couvrir les rangs sur 20cm de large 365€ pour une couverture complète	1h/ha * 1 personne = 20€	GNR : 10L/ha = 9,41€/ha	Semoir	394,41
AGRO-FIX-2	12kg/ha	3,32€/kg	5,18€ pour couvrir les rangs sur 20cm 39,84€ pour une couverture complète	1h/ha * 1 personne = 20€	GNR : 10L/ha = 9,41€/ha	Semoir	69,25
Paille	5417 kg	15€ la balle ronde de 300kg 17€ la balle rectangulaire de 360kg	135,41€ pour couvrir les rangs sur 20cm de large et 5cm d'épaisseur	25h/ha * 1 personne = 500€	GNR : 10L/ha = 9,41€/ha	Pailleuse distributrice	644,82
Miscanthus	130 m3	25,50€/m3	1657,50€ pour couvrir les rangs sur 20cm de large et 5cm d'épaisseur	25h/ha * 1 personne = 500€	GNR : 10L/ha = 9,41€/ha	Désileuse pailleuse	2166,91
Passages bineuse doigts Kress	2 fraises	1600€ la paire		2h/ha * 1 personne * 4 passages = 160€	GNR : 7L/ha * 4 passages = 26,35€	Doigts Kress jaunes	186,35
Désherbage chimique	Gallup® Xtra 450 : 1 à 2L/ha Pendulum : 6L/ha	Gallup® Xtra 450 : 4,61€/L Pendulum (spécialité identique= Xanadon) : 9,48€/L	66,10 €	1h/ha * 1 personne * 2 passages = 40€	Essence, 1,5L/ha * 2 passages = 2,8€	-----	535,25
Désherbage mécanique de l'inter-rang	-----	-----	-----	2h/ha * 1 personne * 4 passages = 160€	GNR : 7L/ha * 4 passages = 26,35€	-----	
Désherbage manuel	-----	-----	-----	Très variable 3h/ha * 4 personnes = 240 €	-----	-----	

941€/1000L en région Pays-de-la-Loire (au 27 juillet 2019). Les coûts de carburant calculés sont donc susceptibles d'évoluer suivant le cours du GNR.

Les coûts sont calculés pour la mise en place. Le coût d'installation du micro-trèfle peut paraître élevé (394,41€) mais cette action est réalisée seulement une seule fois sur les 4 ans de culture ce qui diminue considérablement les coûts (qui se retrouvent divisés par 4). A l'inverse, la dégradation de la paille et du miscanthus oblige à faire des apports deux fois dans l'année, ou à multiplier les doses apportées par deux. Les coûts se retrouvent alors maximisés et dépassent largement ceux du désherbage actuel calculés pour un an. Concernant le mélange AGRO-FIX 2 et la caméline, nous misons sur un ressemis spontané. Si cela ne se produit pas et qu'il faut procéder à un autre semis, des coûts supplémentaires devront être calculés. Dans tous les cas, les semences présentent un coût relativement faible. La main d'œuvre représente, pour la majorité des modalités (sauf le miscanthus), la principale composante du prix de mise en place.

F. Analyse environnementale

Il est difficile de réaliser une analyse environnementale précise. Si des outils développés par l'ADEME existent pour estimer les rejets de CO₂ (ClimAgri®, Bilan carbone®), ils sont réservés à un panel d'experts. Les coûts environnementaux présentés (Tableau 8) sont approximatifs mais permettent de mettre en évidence des critères de choix des méthodes mises en place dans l'expérimentation suivant les objectifs de production définis.

La consommation en carburant est dépendante de nombreux facteurs (Gaviglio C. et al., 2009). La vitesse de passage, la nature de l'outil utilisé, le type de sol, la profondeur de travail, ... sont des facteurs de variations difficilement mesurables. Les données présentées sont approximatives et sont susceptibles d'être affinées. Pour calculer les émissions de CO₂, un barème proposé par l'ADEME a été utilisé [9]. Les résultats mettent en évidence des rejets de CO₂ plus élevés pour les modalités ayant recours au désherbage mécanique. De plus, comme déjà annoncé lors de l'analyse économique, les émissions de CO₂ sont à diviser par 4 pour le micro-trèfle (et la caméline et le mélange AGRO-FIX 2 si ressemis spontané) puisqu'il reste en place tout le temps de la culture. Les autres coûts devront être multipliés afin d'obtenir un total sur les 4 ans de culture (ou plus suivant la culture mise en place).

G. Mise en place d'un outil d'aide à la décision (OAD)

Les analyses réalisées doivent permettre de souligner les avantages et inconvénients de chaque méthode suivant les bénéfices apportés et les contraintes rencontrées. Afin de savoir dans quelles conditions utiliser chaque technique et pouvoir se positionner sur une ou plusieurs solutions à mettre en place au sein de chaque pépinière, il est important de pouvoir créer un outil ayant pour objectif de faciliter la prise de décision.

La mise en place d'un OAD permet de se positionner sur une technique s'adaptant au système de culture. Les solutions proposées peuvent être choisies suivant les objectifs fixés. Les contraintes sont différentes pour chacun des systèmes et c'est pourquoi il faut adapter chaque solution au cas par cas. Dans le cas présent de la pépinière pleine terre, les critères importants ont été regroupés sous la forme d'un arbre de décision avec pour sorties les solutions alternatives testées au cours de l'essai (Figure 18). Cet arbre permet d'opter pour

Tableau 8 : Rejets de CO2 imputés à la mise en place de chaque méthode

	Implantation / couvert	Action culturale	Rejet de CO2	Total
	Camelina sativa	Semis	31,7kg	31,7kg
	Micro-trèfle	Semis	31,7kg	31,7kg
	AGRO-FIX-2	Semis	31,7kg	31,7kg
	Paille	Paillage	31,7kg	31,7kg
	Miscanthus	Paillage	31,7kg	31,7kg
	Passages bineuse doigts Kress	Passage de la houe rotative + bineuse Kress	88,76kg	88,76kg
Méthode actuelle de désherbage	Désherbage chimique	Passage du quad	9,51kg	98,27kg
	Désherbage mécanique de l'inter-rang	Passage de la herse / palpeur	88,76kg	

une technique ou une autre en se basant sur les résultats observés avec pour entrées les critères suivants : objectif de suppression des adventices, émissions en CO₂, coût financier et impact sur la croissance des arbres. Ces solutions ont été testées en culture plein champ sur un sol à tendance sableuse. Pour étendre cet arbre au système pleine terre dans son intégralité, il faudrait rajouter des critères tel que la composition du sol par exemple.

De nombreux essais extérieurs ont concerné les alternatives au désherbage chimique dans de nombreux systèmes de culture différents (culture pérenne type vigne ou verger, culture hors-sol sous abri, maraichage). Des arbres similaires à celui construit pourraient être réalisés mais seraient difficilement lisibles compte-tenu du nombre important de critères à prendre en compte. Après un travail approfondi de bibliographie lors d'un projet futur, il serait utile de créer un OAD sous forme d'une base de données permettant d'afficher les résultats suivant les critères choisis.

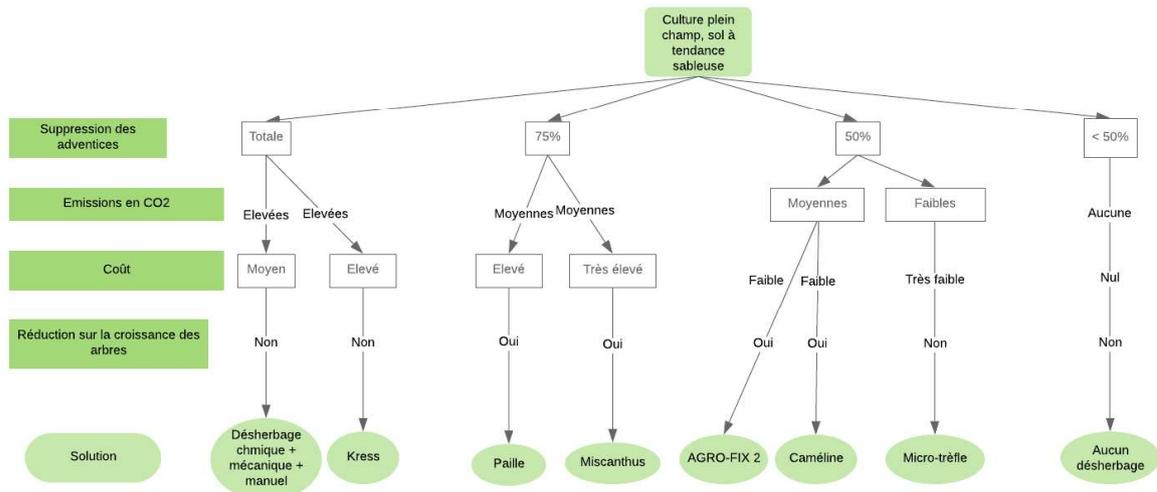


Figure 18 : Arbre de décision du choix de la méthode à mettre en place

IV. Discussion

A. Mise en place des solutions alternatives et biais expérimentaux

1. Actions précédentes sur la culture

Certains paramètres n'ont pas pu être contrôlés avant la mise en place de l'expérimentation. En effet, les observations du recouvrement en adventices peuvent avoir été influencées par les actions précédant l'essai. Habituellement avant l'implantation d'une culture, la parcelle est ensemencée avec de la luzerne ce qui permet de nettoyer le sol. En effet, la luzerne émet des composés allélopathiques appelés saponines qui permettent de réduire de façon conséquente la présence des adventices (Charles et al., 2012). Elle permet également d'améliorer la structure du sol grâce à sa racine pivot très profonde, qui en se décomposant, fournit un apport d'azote important (présence de nodosités sur les racines) (Bourgeois, 2010). Cet apport provoque des effets positifs sur la culture suivante pendant un voire deux ans.

La parcelle expérimentale a subi un labour profond avant l'implantation de la culture en 2018. Pour la mise en place de l'expérimentation, le désherbage a été effectué manuellement à l'aide de pioches. Certaines adventices ont été mal enlevées ou la racine coupée ce qui a induit leur repousse plus rapide. Le facteur humain est donc à l'origine d'une variabilité dans la pression en adventices. D'autres facteurs peuvent influencer l'abondance des adventices et plantes spontanées : la présence d'une haie dans le fond de la parcelle (proche des rangs de 'Comice' et 'Williams'), une hétérogénéité du sol et la présence de bord de parcelle non fauché (proche 'Conférence'). La banque de graines du sol doit donc également être influencée par tous ces facteurs.

2. Importance du sol

Le sol à tendance sableuse observe une hétérogénéité de texture sur la parcelle avec des parties plus ou moins sableuses donc retenant plus ou moins l'eau. Cela peut donc provoquer des différences dans la nature des adventices présentes et influencer leur développement. La nature du sol est également importante dans le choix du couvert végétal à planter puisque les espèces doivent s'adapter au type de sol et être tolérantes à la sécheresse (réserve utile faible). Même s'il est possible d'irriguer la parcelle (présence d'un forage), il est préférable d'exploiter des plantes qui pourront s'adapter à un sol difficile pour pouvoir utiliser les résultats de cette expérimentation dans d'autres conditions.

3. Conditions climatiques

Les conditions climatiques ont été particulièrement sèches cette année. En effet, les précipitations se sont faites rares et les températures ont été élevées, avec notamment la manifestation de deux épisodes caniculaires. Les plantes choisies pour l'implantation de couverts végétaux sont adaptées aux terrains secs mais les conditions de cette année particulièrement intenses ont tout de même impacté l'état sanitaire des plantes. En effet, le mélange AGRO-FIX 2 a souffert du manque d'eau, et l'irrigation insuffisante pour des semis n'a pas suffi à maintenir le couvert entièrement assez résistant. Le trèfle a quant-à-lui résisté aux conditions sèches. La caméline étant arrivée à graines lors de l'apparition des épisodes

de chaleur, elle n'a pas semblé être impactée par les conditions climatiques. Cependant, ces conditions peuvent entraver une possible germination après semis spontané des graines de caméline.

4. Mécanisation de la mise en place du paillage

La mise en place du paillage a été effectuée manuellement. Cependant, dans un objectif de production et de rentabilisation, il est nécessaire de pouvoir mécaniser cette action. Quelques machines sont disponibles (utilisées en élevage) mais elles ne sont pas adaptées à la largeur de l'inter-rang, c'est-à-dire 1,50 m. Pour pouvoir mécaniser la mise en place du paillage ou le semis, il serait idéal de pouvoir mettre en place ces modalités avant la plantation de la culture (pour le semis) ou au plus tard avant que les sujets ne soient trop hauts et empêchent une machine de passer au-dessus (paillage). Dans les cas où il faut refaire un semis ou remettre du paillage, il est compliqué d'imaginer comment mécaniser ces actions.

5. Difficultés à faire les mesures

Les mesures réalisées au cours de l'expérimentation ont été complexes à effectuer en raison de la difficile différenciation entre le rang et l'inter-rang. En effet, le désherbage mécanique de l'inter-rang manque parfois de précision avec des mouvements sur la gauche ou sur la droite, laissant ainsi une partie non désherbée en bordure de l'essai. Pour les mesures, il a donc fallu ne pas prendre en compte cette partie non désherbée, souvent difficile à distinguer. De plus, les taux de recouvrement en adventices et d'enherbement des couverts végétaux sont des appréciations visuelles qui peuvent varier suivant l'observateur.

Afin de réduire cette variabilité, plusieurs observateurs (deux en général) seraient préférables. Pour régler le problème de trajectoire du tracteur lors du désherbage mécanique de l'inter-rang, l'utilisation du GPS (déjà en possession et utilisé au sein de l'entreprise) permettrait une précision du guidage. La largeur de l'essai pourrait être un peu plus importante : en superposant les zones d'actions du désherbage de l'inter-rang et du traitement du rang (peu importe la méthode), cela permettrait de n'avoir aucune zone non traitée où des adventices seraient « oubliées ».

Au-delà des biais expérimentaux qui peuvent exister et des contraintes de mise en place, des premiers résultats ont été obtenus et peuvent être discutés.

B. Objectifs : comment choisir la méthode à mettre en place ?

1. Importance des critères de décision

Si les tendances sont à la préservation de l'environnement, il n'est parfois pas toujours évident de prioriser une méthode au faible coût environnemental si le coût économique est élevé. Le choix d'une méthode doit faire intervenir de nombreux facteurs qui ne sont pas toujours compatibles. Il n'existe pas de solution idéale permettant de réunir tous les critères choisis. Par exemple, le miscanthus observe de très bons résultats dans la régulation des

adventices, mais son coût financier explose par rapport aux autres alternatives testées. Si le matériau semble être un bon choix du point de vue efficacité, peut-être que son conditionnement et ses modalités d'application doivent être optimisées. En effet, le conditionnement en vrac exige davantage de manutention, et son épandage répété est compliqué lorsque les plantes empêchent le passage d'un outil sur l'inter-rang. C'est en majorité pour ces raisons que le chanvre n'a pas été testé au sein de cette expérimentation. Il existe pourtant une solution à base de chanvre proposée par la société Géochanvre. En effet, cette entreprise propose des paillages intissés en fibres végétales entièrement biodégradables. Le produit LongProtect est une toile de paillage composée à 100% de chanvre. Sa présentation sous forme de rouleau permet une mise en place simple à l'aide d'une dérouleuse. Possédant une couche inférieure polymère en amidon de maïs, sa durée de vie atteint 3 à 4 ans, permettant ainsi de réduire les actions sur la culture tout au long du cycle. Son coût reste cependant élevé avec 1,30€ du m², soit environ 1335€ par an installation comprise (main d'œuvre, carburant) pour une durée de vie de 4 ans. Cette solution assez coûteuse serait pourtant moins chère que l'utilisation de paille ou le recouvrement avec du miscanthus. Il faudrait tester cette alternative pour observer si les effets sont les mêmes que les modalités M1 et M2. Pour cette solution ainsi que ces deux modalités, il faut tenir compte que le recouvrement concerne uniquement le rang. Un désherbage de l'inter-rang serait donc indispensable en complément. Il est toutefois possible d'imaginer ne pas désherber l'inter-rang, de façon à observer le comportement des adventices en conditions sèches sur, comme on le rappelle, un sol à tendance sableuse donc drainant. Le réchauffement climatique prenant de plus en plus d'ampleur, les épisodes caniculaires et les conditions de sécheresse sont amenés à se multiplier (fin juin et mi-juillet en 2019). Même si les pépinières possèdent un forage permettant d'irriguer toutes les parcelles, des mesures de restrictions d'eau peuvent être prises. Dans ce cas, il serait mieux de privilégier des alternatives ne nécessitant pas d'arrosage, c'est-à-dire exclure les semis. Quand bien même les plantes seraient plutôt résistantes aux conditions sèches, elles exigent un minimum d'eau, besoin supérieur à celui de la culture mise en place. Si on s'en tient aux besoins de cette culture, les couverts végétaux ne seront pas irrigués suffisamment.

Les couverts végétaux testés observent des résultats intermédiaires en terme de régulation des adventices. Ils sont toutefois plus efficaces que la modalité sans aucun désherbage et les arbres, bien que plus petits qu'avec un désherbage chimique, ne se trouvent pas tellement concernés par une réduction de la croissance (lorsque l'on compare toutes les modalités entre-elles sans un témoin chimique). Au-delà de posséder un coût faible, les couverts végétaux sont le lieu de vie de nombreux insectes auxiliaires (Figure 19). Si aucun bioagresseur n'a été observé cette année sur les poiriers, on est en droit de se demander si les couverts végétaux ne permettraient pas une régulation du taux d'agression en cas d'infestation. Il faudrait reconduire l'expérimentation sur plusieurs années afin d'observer un réel impact sur la faune auxiliaire et les taux d'infestation. De même, il est connu que les paillages (paille et miscanthus) et couverts végétaux concentrent l'humidité au collet de la plante, ce qui peut impacter les sujets, en particulier les plantes greffées sur table dont la greffe n'est pas encore gommée ou les greffes en chip-budding réalisées en août qui pourraient ne pas prendre. La saison ayant été très sèche, nous n'avons pas observé de maladie. Les résultats de cet essai seraient à comparer avec une année humide, ou les risques de maladies cryptogamiques sont plus importants.

Si le désherbage mécanique prévu à l'origine dans l'expérimentation n'a pas été pratiqué, il est tout de même possible de tirer des conclusions quant à son utilisation. En effet, il est

reconnu que l'emploi de la bineuse à doigts Kress observe de bons résultats sur la suppression des adventices, mais uniquement lorsqu'elles sont au stade plantules. Les passages doivent donc être répétés ce qui entraîne des coûts conséquents et n'entre pas en accord avec une dynamique de conservation des sols, autre critère important dans la prise de décision.

Entre efficacité sur la régulation des adventices, coût économique ou environnemental, objectif de réduction des adventices, préservation du sol, ... nombreux sont les critères à prendre en compte dans le choix de la méthode. Les objectifs fixés par les dirigeants de l'entreprise doivent permettre de se positionner sur une technique en utilisant l'arbre de décision créé. Cet outil d'aide à la décision est incomplet mais constitue une base qui peut être élargie avec les études menées en parallèle en arboriculture et viticulture, tout en tenant compte des spécificités de chaque système. Des expérimentations sont menées et doivent continuer pour intensifier les recherches d'alternatives.

Si les impacts directs de chaque méthode sur la réduction de la pression en adventices sont importants, les conséquences à plus long terme de la mise en place de chaque technique doivent être étudiées afin d'avoir tous les éléments nécessaires à la bonne connaissance des outils.

2. Conséquences observables de chaque méthode

a) *Paillages et leurs conséquences observées sur la culture*

Une durée plus longue de l'expérimentation avec des relevés plus nombreux serait nécessaire afin de visualiser les réelles conséquences des paillages sur la culture. On peut toutefois remarquer que les arbres paillés avec la paille et le miscanthus sont de plus petites tailles que les arbres des autres modalités avec pourtant moins d'adventices présentes. Cela peut être dû à la consommation de l'azote par les matières végétales pour leur dégradation. Une partie des paillages avait d'ailleurs commencé à être dégradée lors du dernier relevé le 21 juin.

Les conséquences des alternatives testées ont été observées sur une durée restreinte. Même si on observe déjà les impacts de certaines techniques, sur la croissance des arbres par exemple, rien ne dit que ces observations ne vont pas s'atténuer au fil du temps, ou au contraire se renforcer. Par exemple, il est connu que les paillages consomment de l'azote pour se dégrader. Si la réduction de la croissance des arbres apparaît faible pour le moment et non préjudiciable pour la culture, rien ne dit que les impacts pourraient être désastreux sur un cycle complet de culture (3 à 5 ans en pépinière).

b) *Importance de la taille du couvert végétal*

Si le désherbage de l'inter-rang n'a pas posé de problème au début de l'expérimentation, son arrêt provoqué par une erreur humaine doit servir d'enseignement dans le choix des techniques à mettre en place. En effet, lors du désherbage mécanique de l'inter-rang, un passage trop rapide a conduit à un déplacement de terre et à un recouvrement du rang. Les paillages organiques et les couverts végétaux les plus bas (comme le trèfle) sont recouverts sous une couche de terre, engendrant ainsi la perte des propriétés des couverts et leur inutilité. Il convient donc, en cas de désherbage mécanique de l'inter-rang, de prévoir un



Figure 19 : Bourdon observé sur la phacélie (mélange AGRO-FIX 2)

passage moins rapide ou d'opter pour des couverts végétaux plus hauts, qui ne seraient alors pas recouverts par un passage rapide. Dans le cas d'un désherbage mécanique du rang, un passage rapide aura tendance à retirer la terre du rang alors que celle de l'inter-rang serait reportée sur le rang. Les effets seraient alors contrebalancés.

La taille des couverts végétaux en fonction de celle de la culture est également un critère important dans la décision. En effet, un couvert végétal qui sera à terme plus haut que la culture en place peut concurrencer cette dernière pour l'accès à la lumière, contraignant ainsi sa croissance. Dans le cas de l'expérimentation, des actions culturales doivent être réalisées sur les poiriers (retirer les repousses du porte-greffe, enlever les anticipés en dessous de 30 cm, réfléchir les arbres si besoin). Un couvert végétal trop haut complique la réalisation des actions culturales et, comme observé dans le cas présent, conduit parfois à des oublis.

c) Impact sur la taille des arbres

La croissance des arbres semble avoir été impactée légèrement dans les modalités M3, M4 et M5. Les couverts végétaux peuvent être à l'origine des tailles plus faibles des arbres. Des observations sur une durée plus longue pourraient permettre de déterminer si la compétition s'intensifie et conduit à une réduction de la croissance des arbres, ou si au contraire elle s'atténue. Cependant, les plantes choisies pour les couverts végétaux n'apportent pour la plupart que peu de compétition. Aussi, le recouvrement en adventices a été plus important sur ces modalités. Il se peut donc que les différences de tailles soient uniquement dues aux adventices qui entrent en compétition avec la culture. Il est difficile de déterminer à quoi sont dues ces perturbations dans la croissance des poiriers. Il faut toutefois noter que les poiriers mesurés sont destinés à devenir des palmettes, et que ces arbres seront taillés à 50 cm du point de greffe environ. Il n'est donc pas nécessaire d'obtenir des arbres d'une taille supérieure à celle-ci pour cette culture. Cependant, si ces techniques doivent être élargies à d'autres cultures, l'impact sur la croissance pourrait représenter un sérieux problème.

3. Gestion des adventices par l'allélopathie

Il est compliqué de déterminer si les couverts allélopathiques ont eu de réels effets sur la régulation des adventices en raison de l'émission de composés allélopathiques. Si les adventices ont été quelque peu contrôlées, cela peut être dû à la compétition pour les ressources. Les informations relatives au fonctionnement de l'allélopathie demeurent assez insuffisantes. En effet, il est difficile de mettre en évidence un réel rôle de l'allélopathie en conditions naturelles puisque de nombreux facteurs influencent la libération des molécules allélopathiques : conditions environnementales, état phytosanitaire de la plante, interactions biotiques et abiotiques du sol... (Gfeller et Wirth, 2017). De plus, lorsque des effets du couvert sont mis en évidence, il reste difficile d'estimer si ces effets sont dus seulement à la libération de molécules allélopathiques, ou s'ils sont le fruit d'une compétition pour les ressources entre le couvre-sol ou les adventices. Les couverts exercent une réponse spécifique sur les adventices (Charles et al., 2012) mais aucune n'a pu être mise en évidence avec les couverts végétaux mis en place. En effet, les adventices retrouvées dans ces modalités (M3, M4 et M5) étaient les mêmes que dans les modalités M6 et M7, sans traitement. Des observations plus longues et répétées pourraient mettre en évidence l'effet

d'un couvert sur une adventice s'il en existe un. Les couverts de printemps auraient surtout un impact sur la germination des adventices (Charles et al., 2012). Il se peut donc que l'expérimentation ait été mise en place trop tard, et qu'une installation plus précoce des couverts végétaux aurait pu impacter plus efficacement la germination des adventices, mettant alors en avant des propriétés allélopathiques. Les couverts présents en automne permettraient de réduire la croissance des adventices et leur production de graines, impactant alors la banque de graines présentes dans le sol et pouvant germer au printemps suivant. Il est donc intéressant de se diriger vers un couvert pouvant perdurer toute la saison, ou une culture pouvant se ressemer spontanément, de façon à conserver un sol couvert du printemps à la fin de l'automne.

4. Perspectives à long terme de chaque méthode

L'expérimentation ayant été écourtée, il est complexe d'obtenir des résultats plus complets permettant de conclure sur la durabilité de chaque technique mise en place. Cependant, les premières conclusions permettent de différencier les alternatives en fonction de plusieurs critères. Les paillages organiques, bien qu'entraînant une bonne efficacité dans la régulation des adventices, sont des solutions difficiles à mettre en place et extrêmement coûteuses. Les couverts végétaux offrent une alternative intermédiaire dans la régulation des adventices par rapport à des parcelles non traitées. Ils possèdent un coût de mise en place raisonnable. Cependant, les propriétés de chaque couvert sont différentes et doivent s'adapter aux contraintes du système et de la culture pour envisager à long terme implanter des cultures de couverture. Dans tous les cas, la régulation des adventices a été observée sur les espèces annuelles et non sur les espèces vivaces comme le liseron (*Convolvulus arvensis*) qui posent de réels problèmes de gestion. Il est possible de se demander si en installant les couverts après un travail profond du sol et avant la mise en place de la culture, il est possible de réguler ces espèces problématiques.

L'expérimentation a pour but d'être reconduite afin de pouvoir développer les premières conclusions et d'être élargie à d'autres alternatives afin d'enrichir les perspectives de lutte durable contre les adventices.

V. Conclusion

Développer des solutions alternatives au désherbage chimique s'inscrit dans une démarche d'adaptation aux contraintes réglementaires, techniques et scientifiques. Les herbicides sont les produits phytosanitaires les plus utilisés en France et il est indispensable de développer des solutions permettant de réduire voire même arrêter leur utilisation.

Si de nombreuses techniques existent actuellement sur le marché ou sont phases de recherches, la gestion des adventices par les paillages organiques et les couverts végétaux s'avère prometteuse. Ces alternatives testées au sein des pépinières Chargé ont permis de mettre en lumière l'efficacité dans la réduction du recouvrement en adventices, en particulier pour la paille et le miscanthus avec cependant des difficultés d'application, obligeant à adapter chaque solution au système de culture. L'hypothèse de départ concernant l'exclusion de l'influence du facteur variétal de la culture en place sur le recouvrement en adventices a été confirmée. L'impact sur la croissance des arbres n'apparaît pas préjudiciable dans le cas de la production de palmettes mais représente un risque pour l'élevage d'arbres tiges.

De futures expérimentations doivent être mises en place afin de confirmer ou d'infirmer les premières conclusions de cette étude. Les difficultés rencontrées au cours de cette expérimentation permettront d'établir un protocole plus précis et une mise en œuvre complète, avec une durée d'observation plus longue. Des limites apparaissent en conditions réelles d'expérimentation plein champ. En effet, il est difficile de mettre en évidence les effets des plantes allélopathiques et de déterminer si les observations sont dues à la libération de composés allélopathiques. Des essais en conditions de laboratoire seraient davantage appropriés pour répondre aux questions sur l'allélopathie.

La question du désherbage mécanique n'a été que peu traitée en raison de contraintes de temps et délais trop courts entre la prise de décision et la mise en place. Une telle technique est complexe à mettre en place expérimentalement sur de petites unités expérimentales compte-tenu de la précision nécessaire.

La mise en place de méthodes efficaces et durables est un moyen de s'affranchir de l'utilisation des herbicides qui devient de plus en plus contrôlée, et est davantage décriée par la société actuelle. L'image de l'entreprise ne peut en être que valorisée, que ce soit auprès des fournisseurs, de la population mais surtout des clients. La caractérisation de la propreté des parcelles doit évoluer au fil du temps, en revoyant les objectifs de suppression des adventices à la baisse. Ces dernières ne représentent pas toujours un risque pour la culture en place. Ainsi, en ayant une meilleure connaissance de cette flore spontanée, il serait possible d'envisager de tolérer une partie des adventices au sein des cultures, et pourquoi pas même les exploiter pour leurs propriétés tapissantes.

Bibliographie

ABOUZIENA H., EL-SAEID M., AHMED A. et AMIN E.-L., 2014. Water loss by weeds: A review. In : *International Journal of ChemTech Research*. Vol. 7, p. 974-4290.

ALDRICH R.J. et KREMER R.J., 1997. *Principles in weed management*. 2nd ed. Ames : Iowa State University Press. ISBN 978-0-8138-2023-1.

BÉCART P. et COUTANT J., 2018. Plantes couvre-sol et valorisation des effets allélopathiques. In : *Méthodes alternatives en protection des plantes*. ASTREDHOR. p. 97-104.

BHOWMIK P.C. et INDERJIT, 2003. Challenges and opportunities in implementing allelopathy for natural weed management. In : *Crop Protection*. Vol. 22, n° 4, p. 661-671. DOI 10.1016/S0261-2194(02)00242-9.

BOURGEOIS S., 2010. LA LUZERNE, REINE DES FOURRAGÈRES. In : *Réussir bovins viande*. n° 167, p. 14-17.

BRESCH S. et MARIE A., 2018. Les techniques de paillage des végétaux horticoles. In : *Méthodes alternatives en protection des plantes*. ASTREDHOR. p. 81-89.

CALVARIN V. et VANDERNOOT I., 2018. Méthodes physiques de désherbage : désherbage mécanique. In : *Méthodes alternatives en protection des plantes*. p. 91-96.

CELLULE D'ANIMATION NATIONALE DEPHY, 2018. *Le glyphosate dans le réseau DEPHY FERME : Etat des lieux des usages, des freins et des alternatives*.

CHAMBRE D'AGRICULTURE DU LANGUEDOC-ROUSSILLON, 2011. Tome I, Chapitre 2 : Les matières organiques du sol. In : *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon*. p. 17-28.

CHARLES R., MONFORT F. et SARTHOU J.-P., 2012. Effets biotiques des cultures intermédiaires sur les adventices, la microflore et la faune. In : *Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques*. INRA. p. 193-261.

CHENG F. et CHENG Z., 2015. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy. In : *Frontiers in Plant Science*. Vol. 6, p. 16. DOI 10.3389/fpls.2015.01020.

CHODOVÁ D. et MIKULKA J., 2002. Herbicide-resistant weeds - present state of research. In : *AF CZU Prague*. Vol. 9, p. 69.

DABNEY S.M., DELGADO J. A. et REEVES D. W., 2001. Using Winter Cover Crops to Improve Soil and Water Quality. In : *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Vol. 32, n° 7-8, p. 1221-1250. DOI 10.1081/CSS-100104110.

DELABAYS N., WIRTH J. et BOHREN C., 2009. L'allélopathie: un phénomène controversé, mais prometteur. In : *Revue Suisse d'Agriculture*. Vol. 41, n° 6, p. 313-319.

- DORÉ T., LE BAIL M., MARTIN P., NEY B., ROGER-ESTRADE J.-R. et SEBILLOTTE M., 2006. *L'agronomie aujourd'hui*. Quae. ISBN 978-2-7592-0000-9.
- FAROOQ M., JABRAN K., CHEEMA Z.A., WAHID A. et SIDDIQUE K.H.M., 2011. The role of allelopathy in agricultural pest management. In : *Pest Management Science*. Vol. 67, n° 5, p. 493-506. DOI 10.1002/ps.2091.
- FERRE A. et HEBBINCKUYS T., 2015. Contrôler les adventices en pleine terre avec...de la paille. In : *Phytoma*. n° 681, p. 26-31.
- GAVIGLIO C., SACCHARIN P. et BARTHES N., 2009. *Etudes des performances énergétiques des matériels viticoles*. Institut Français de la Vigne et du Vin.
- GFELLER A. et WIRTH J., 2017. Les cultures intermédiaires allélopathiques : un moyen de lutte contre les adventices ? In : *Innovations Agronomiques*. Vol. 62, p. 33-41.
- GOMA-FORTIN N. et CHOVELON M., 2012. Paillage et enherbement sur le rang en viticulture : In : *Alter Agri*. n° 112, p. 22-24.
- JABRAN K., MAHAJAN G., SARDANA V. et CHAUHAN B.S., 2015. Allelopathy for weed control in agricultural systems. In : *Crop Protection*. Vol. 72, p. 57-65. DOI 10.1016/j.cropro.2015.03.004.
- KRAMBERGER B., GSELMAN A., JANZEKOVIC M., KALIGARIC M. et BRACKO B., 2009. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. In : *European Journal of Agronomy*. Vol. 31, n° 2, p. 103-109. DOI 10.1016/j.eja.2009.05.006.
- KRISTIANSEN P.E., 2003. *Sustainable Weed Management in Organic Herb and Vegetable Production*. Thèse de doctorat en physiologie. University of England, School of Rural Science and Agriculture.
- KUNZ C., STURM D.J., VARNHOLT D., WALKER F. et GERHARDS R., 2016. Allelopathic effects and weed suppressive ability of cover crops. In : *Plant, Soil and Environment*. Vol. 62, n° No. 2, p. 60-66. DOI 10.17221/612/2015-PSE.
- LAWLEY Y.E., TEASDALE J.R. et WEIL R.R., 2012. The Mechanism for Weed Suppression by a Forage Radish Cover Crop. In : *Agronomy Journal*. Vol. 104, n° 2, p. 205. DOI 10.2134/agronj2011.0128.
- LI Z.-H., WANG Q., RUAN X., PAN C.-D. et JIANG D.-A., 2010. Phenolics and Plant Allelopathy. In : *Molecules*. Vol. 15, n° 12, p. 8933-8952. DOI 10.3390/molecules15128933.
- MASILIONYTE L., MAIKSTENIENE S., KRIAUCIUNIENE Z., JABLONSKYTE-RASCE D., ZOU L. et SARAUSKIS E., 2017. Effect of cover crops in smothering weeds and volunteer plants in alternative farming systems. In : *Crop Protection*. Vol. 91, p. 74-81. DOI 10.1016/j.cropro.2016.09.016.

- NANDULA V.K., REDDY K.N., DUKE S.O. et POSTON D.H., 2005. Glyphosate-Resistant Weeds: Current Status and Future Outlook. In : *Outlooks on Pest Management*. Vol. 16, n° 4, p. 183-187. DOI 10.1564/16aug11.
- OERKE E.-C., 2006. Crop losses to pests. In : *The Journal of Agricultural Science*. Vol. 144, n° 1, p. 31-43. DOI 10.1017/S0021859605005708.
- PERRY E.D., HENNESSY D.A. et MOSCHINI G.C., 2019. Product concentration and usage: Behavioral effects in the glyphosate market. In : *Journal of Economic Behavior & Organization*. Vol. 158, p. 543-559. DOI 10.1016/j.jebo.2018.12.027.
- PICQUE A., 2016. *Evaluation des impacts du Glyphosate sur la santé humaine*. Thèse pour le Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie. UFR de Pharmacie d'Amiens : Université de Picardie Jules Verne.
- REBOUD, Xavier, BLANK, Maud, AUBERTOT, Jean-Noël et JEUFFROY, Marie-Hélène, 2017. *Usages et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française*.
- RICE E.L., 1984. *Allelopathy*. 2nd edition. New York : Academic Press.
- ROBAČER M., CANALI S., KRISTENSEN H.L., BAVEC F., MLAKAR S.G., JAKOP M. et BAVEC M., 2016. Cover crops in organic field vegetable production. In : *Scientia Horticulturae*. Vol. 208, p. 104-110. DOI 10.1016/j.scienta.2015.12.029.
- SAXENA R., TOMAR R.S. et KUMAR M., 2016. Allelopathy: A Green Approach for Weed Management and Crop Production. In : *International Journal of Current Research in Biosciences and Plant Biology*. Vol. 3, n° 4, p. 43-50. DOI 10.20546/ijcrbp.2016.304.008.
- SOLTYS D., KRASUSKA U., BOGATEK R. et GNIAZDOWSK A., 2013. Allelochemicals as Bioherbicides — Present and Perspectives. In : PRICE, Andrew (éd.), *Herbicides - Current Research and Case Studies in Use*. InTech. ISBN 978-953-51-1112-2.
- UIPP, 2017. *Repères d'activités 2017 - 2018*.
- VAN BRUGGEN A.H.-C., HE M., SHIN K., MAI V., JEONG K.C., FINCKH M.R. et MORRIS J., 2018. Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. In : *Science of The Total Environment*. Vol. 616-617, p. 255-268. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.10.309.
- VOISIN A.-S., CELLIER P. et JEUFFROY M.-H., 2015. Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines : Impacts Agronomiques et Environnementaux. In : *Innovations Agronomiques*. Vol. 43, p. 139-160.
- WALSH K.D., SANDERSON D., HALL L.M., MUGO S. et HILLS M.J., 2014. Allelopathic effects of camelina (*Camelina sativa*) and canola (*Brassica napus*) on wild oat, flax and radish. In : *Allelopathy Journal*. Vol. 33, n° 1, p. 83-96.
- ZENG R.S., 2014. Allelopathy - the solution is indirect. In : *Journal of Chemical Ecology*. Vol. 40, n° 6, p. 515-516. DOI 10.1007/s10886-014-0464-7.

Sitographie

- [1] FONDATION CONCORDE, 2017. Produits phytosanitaires dans l'agriculture : l'urgence d'une approche dépassionnée et rationnelle. [en ligne]. 2017. [Consulté le 8 mai 2019]. Disponible à l'adresse : <https://fondationconcorde.com/wp-content/uploads/2017/07/Rapport-Glyphosate-version-finale-juillet-2017.pdf>
- [2] PLAN ECOPHYTO II, 2015. Plan Ecophyto II. [en ligne]. 2015. [Consulté le 8 mai 2019]. Disponible à l'adresse : https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/151022_ecophyto.pdf
- [3] HIRSCHY M. et GAVIGLIO C., 2019. Désherber mécaniquement l'intercept. In : *GECO Ecophytopic* [en ligne]. 2019. [Consulté le 17 août 2019]. Disponible à l'adresse : https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253A%252F%252Fwww%252Egeco%252Eecophytopic%252Efr%252Fgeco%252Fconcept%252FDesherber_Mecanique L_Intercept
- [4] CHAMBRE SYNDICALE DES AMÉLIORANTS ORGANIQUES ET SUPPORTS DE CULTURE, 2017. Caractéristiques techniques des principaux paillages. In : *AFAÏA* [en ligne]. 2017. [Consulté le 15 août 2019]. Disponible à l'adresse : <http://www.afaia.fr/wp-content/uploads/2017/05/caracteristiques-techniques.pdf>
- [5] SEM-PARTNERS, 2017. Fénugrec fourrager FENU-FIX. [en ligne]. 2017. [Consulté le 30 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <http://www.sem-partners.com/doc/ftech/fenufix.pdf>
- [6] LG - SEMENCES HYBRIDES ET FOURRAGÈRES, 2018. Fiche technique fourragères - PIPOLINA. In : *LG seeds* [en ligne]. 2018. [Consulté le 3 août 2019]. Disponible à l'adresse : https://www.lgseeds.fr/data/medias/2164/style/default/Fiche_technique_fourrageres_PIPOLINA.PDF
- [7] AGRO-BIO, 1992. La phacélie. In : *Ecological Agriculture Project* [en ligne]. 1992. [Consulté le 3 août 2019]. Disponible à l'adresse : <https://eap.mcgill.ca/agrobio/ab350-03.htm#Comme%20engrais%20vert>
- [8] SEM-PARTNERS, 2016. Alpiste des Canaries - LIZARD. [en ligne]. 2016. [Consulté le 30 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <http://www.sem-partners.com/doc/ftech/lizard.pdf>
- [9] ADEME, 2016. Référentiel des facteurs d'émissions 2016 : programme objectif CO2. [en ligne]. 2016. [Consulté le 27 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : http://www.objectifco2.fr/docs/upload/52/ObjectifCO2_R%C3%A9f%C3%A9rentiel%20facteurs%20d%27%C3%A9missions_2016.pdf



AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers
2, rue André Le Nôtre
49045 ANGERS Cedex 01
Tel : 02 41 22 54 54



Pépinières Chargé
8, chemin de l'abreuvoir
49700 Louresse-Rochemenier
Tel : 02 41 59 13 02

Mémoire de fin d'études

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences
Agronomiques, Agroalimentaires Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : 2018 - 2019

Spécialité et Spécialisation : Horticulture - Protection des Plantes et Environnement en Horticulture

**Méthodes alternatives au désherbage chimique : essais de paillages et
couverts végétaux en pépinière plein champ de production d'arbres
fruitiers et d'ornement**

ANNEXES

Par : Floriane JACQUELIN

Soutenu à Angers le 4 septembre 2019

Devant le jury composé de :

Président : Mme LE CLERC Valérie

Maître de stage : M. CHARGE Christophe

Enseignant référent : Mme LE CORFF Josiane

Autre membre du jury :

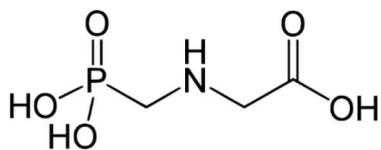
M. LEMARQUAND Arnaud, directeur de
l'unité horticole de l'INRA de Beaucouzé

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

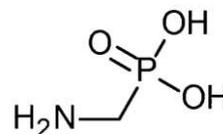
Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



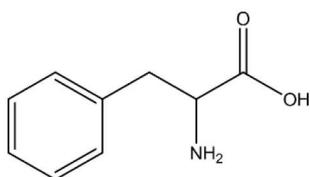
ANNEXE I : Molécules du glyphosate, des composés aromatiques et des substances allélopathiques



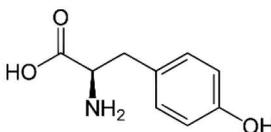
Molécule du glyphosate



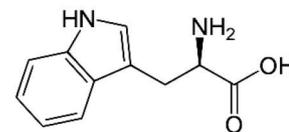
Molécule de l'AMPA



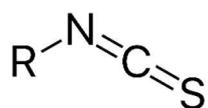
phénylalanine



tyrosine



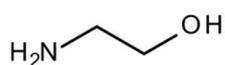
tryptophane



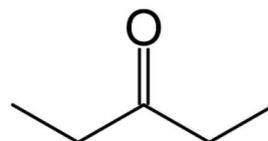
Isothiocyanates



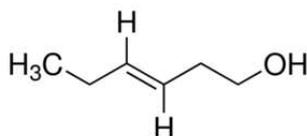
Nitriles



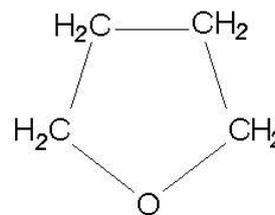
éthanolamine



3-pentanone



3-hexen-1-ol



tétrahydrofuranne

ANNEXE II : Script R

#Question 1 : Influence de la variété

```
data0<-read.table("infvar1.txt", header = TRUE)
attach(data0)
summary(data0)
library(dunn.test)
dunn.test(R1,M1,method = "bonferroni")
dunn.test(R2,M2,method = "bonferroni")
dunn.test(R3,M3,method = "bonferroni")
dunn.test(R4,M4,method = "bonferroni")
dunn.test(R5,M5,method = "bonferroni")
dunn.test(R6,M6,method = "bonferroni")
dunn.test(R7,M7,method = "bonferroni")
```

```
detach(data0)
data1<-read.table("infvar2.txt", header = TRUE)
attach(data1)
summary(data1)
library(dunn.test)
dunn.test(R1,M1,method = "bonferroni")
dunn.test(R2,M2,method = "bonferroni")
dunn.test(R3,M3,method = "bonferroni")
dunn.test(R4,M4,method = "bonferroni")
dunn.test(R5,M5,method = "bonferroni")
dunn.test(R6,M6,method = "bonferroni")
dunn.test(R7,M7,method = "bonferroni")
```

#Question 2 : Est-ce que le recouvrement en adventices est influencé par le couvert végétal ?

```
detach(data1)
data2<-read.csv("infvar.csv", header = TRUE, sep = ";", dec = ",", row.names = 1)
attach(data2)
summary(data2)
```

```
par(mfrow=c(1, 2))
boxplot(Recouvrement1~Modalité)
boxplot(Recouvrement2~Modalité)
```

```
library(stats)
kruskal.test(Recouvrement1~Variété)
kruskal.test(Recouvrement2~Variété)
```

```
library(dunn.test)
dunn.test(Recouvrement1, Modalité, method="bonferroni")
dunn.test(Recouvrement2, Modalité, method="bonferroni")
```

```
#Question 3 : est-ce que la modalité influence la croissance des arbres ?
detach(data2)
data3<-read.csv("Taille.csv", header = TRUE, sep = ";", row.names = 1, dec = ",")

table1<-data3
attach(data3)
summary(data3)

hist(Taille~Modalité, xlab = "Taille (cm)")
boxplot(Taille~Modalité)

hist(Taille)
hist(Taille~Variété)
boxplot(Taille~Modalité)

dunn.test(Taille, Modalité, method="bonferroni")

detach(data3)
data4<-read.table("Tailleavectémoin.txt", header = TRUE, dec = ",")
attach(data4)
summary(data4)
hist(Tail~Mod, xlab = "Tail (cm)")
boxplot(Tail~Mod)

hist(Tail)
hist(Tail~Var)
boxplot(Tail~Mod)
dunn.test(Tail,Mod,method="bonferroni")
```

ANNEXE III : Résultats statistiques de l'influence des modalités sur le recouvrement aux deux dates

Kruskal-wallis rank sum test

data: Recouvrement1 and Modalité
Kruskal-wallis chi-squared = 27.7703, df = 6, p-value = 0

Comparison of Recouvrement1 by Modalité
(Bonferroni)

Col Mean- Row Mean	M1	M2	M3	M4	M5	M6
M2	-0.450605 1.0000					
M3	-2.953971 0.0329	-2.503365 0.1292				
M4	-1.772382 0.8015	-1.321776 1.0000	1.181588 1.0000			
M5	-1.922584 0.5726	-1.471978 1.0000	1.031386 1.0000	-0.150201 1.0000		
M6	-3.594401 0.0034*	-3.152219 0.0170*	-0.695650 1.0000	-1.855150 0.6675	-1.707756 0.9207	
M7	-4.005054 0.0007*	-3.546745 0.0041*	-1.000584 1.0000	-2.202372 0.2902	-2.049603 0.4242	-0.274163 1.0000

alpha = 0.05
Reject Ho if p <= alpha/2

Influence de la modalité au 6 juin

Kruskal-wallis rank sum test

data: Recouvrement2 and Modalité
Kruskal-wallis chi-squared = 63.9464, df = 6, p-value = 0

Comparison of Recouvrement2 by Modalité
(Bonferroni)

Col Mean- Row Mean	M1	M2	M3	M4	M5	M6
M2	0.442963 1.0000					
M3	-2.021647 0.4537	-2.464611 0.1440				
M4	-1.398833 1.0000	-1.841797 0.6878	0.622813 1.0000			
M5	-2.427975 0.1594	-2.870938 0.0430	-0.406327 1.0000	-1.029141 1.0000		
M6	-4.383288 0.0001*	-4.817972 0.0000*	-2.399432 0.1724	-3.010604 0.0274	-2.000700 0.4770	
M7	-6.002862 0.0000*	-6.453398 0.0000*	-3.946654 0.0008*	-4.580115 0.0000*	-3.533380 0.0043*	-1.431513 1.0000

alpha = 0.05
Reject Ho if p <= alpha/2

Influence de la modalité au 21 juin

ANNEXE IV : Résultats statistiques de l'influence des modalités sur la taille des arbres, avec et sans témoin

Kruskal-wallis chi-squared = 1.5062, df = 6, p-value = 0.96

Comparison of Taille by Modalité
(Bonferroni)

Col Mean- Row Mean	M1	M2	M3	M4	M5	M6
M2	0.056494 1.0000					
M3	-0.166159 1.0000	-0.222653 1.0000				
M4	-0.804211 1.0000	-0.860706 1.0000	-0.638052 1.0000			
M5	-0.279147 1.0000	-0.335642 1.0000	-0.112988 1.0000	0.525063 1.0000		
M6	-0.694546 1.0000	-0.751040 1.0000	-0.528387 1.0000	0.109665 1.0000	-0.415398 1.0000	
M7	-0.671284 1.0000	-0.727778 1.0000	-0.505124 1.0000	0.132927 1.0000	-0.392136 1.0000	0.023262 1.0000

alpha = 0.05
Reject Ho if p <= alpha/2

Statistique des tailles par modalité

Kruskal-wallis chi-squared = 37.4431, df = 7, p-value = 0

Comparison of Tail by Mod
(Bonferroni)

Col Mean- Row Mean	M1	M2	M3	M4	M5	M6
M2	-0.084301 1.0000					
M3	-0.037666 1.0000	0.046634 1.0000				
M4	-0.744365 1.0000	-0.660063 1.0000	-0.706698 1.0000			
M5	-0.215238 1.0000	-0.130936 1.0000	-0.177571 1.0000	0.529126 1.0000		
M6	-0.532714 1.0000	-0.448412 1.0000	-0.495047 1.0000	0.211650 1.0000	-0.317476 1.0000	
M7	-0.649301 1.0000	-0.564999 1.0000	-0.611634 1.0000	0.095063 1.0000	-0.434063 1.0000	-0.116587 1.0000
témoin	-3.525791 0.0059*	-3.415414 0.0089*	-3.476474 0.0071*	-2.551188 0.1503	-3.243978 0.0165*	-2.828304 0.0655
Col Mean- Row Mean	M7					
témoin	-2.675656 0.1044					

alpha = 0.05
Reject Ho if p <= alpha/2

Statistique des tailles par modalité avec témoin rajouté

ANNEXE V : Illustration de la majorité des adventices rencontrées avant et pendant l'expérimentation

Adventices	Illustrations
<i>Amaranthus retroflexus</i>	 A photograph of a young <i>Amaranthus retroflexus</i> plant with several large, green, ovate leaves and a reddish stem, growing in a field.
<i>Chenopodium album</i>	 A photograph of a young <i>Chenopodium album</i> plant with several green, ovate leaves and a reddish stem, growing in a field with wood chip mulch.
<i>Erigeron sumatrensis</i>	 A photograph of a young <i>Erigeron sumatrensis</i> plant with several green, lanceolate leaves and a reddish stem, growing in a field.
<i>Erodium cicutarium</i>	 A photograph of a young <i>Erodium cicutarium</i> plant with several green, finely divided leaves and a reddish stem, growing in a field.
<i>Euphorbia helioscopia</i>	 A photograph of a young <i>Euphorbia helioscopia</i> plant with several green, lanceolate leaves and a reddish stem, growing in a field.

Helminthocea echioides



Hypochaeris radicata



Lactuca serriola



Malva sylvestris



Mercurialis annua



<p><i>Papaver rhoeas</i></p>	
<p><i>Polygonum aviculare</i></p>	
<p><i>Ranunculus parviflorus</i></p>	
<p><i>Silene latifolia</i></p>	
<p><i>Sonchus asper</i></p>	

<p><i>Sonchus oleraceus</i></p>	 A photograph of a Sonchus oleraceus plant, showing its characteristic green, lanceolate leaves with serrated margins and a central rosette growth habit.
<p><i>Liseron</i></p>	 A photograph of a Liseron plant, characterized by its dark green, rounded leaves and a creeping growth habit.
<p><i>Stellaria media</i></p>	 A photograph of a Stellaria media plant, showing its dense, upright growth habit with numerous small, green, lanceolate leaves.
<p><i>Aphanes arvensis</i></p>	 A photograph of an Aphanes arvensis plant, showing its low-growing habit with finely divided, fern-like leaves.
<p><i>Capsella bursa pastoris</i></p>	 A photograph of a Capsella bursa pastoris plant, showing its upright growth habit with small, white flowers and a central rosette.
<p><i>Fallopia convolvulus</i></p>	 A photograph of a Fallopia convolvulus plant, showing its large, heart-shaped leaves and a creeping growth habit.



Diplôme : Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires Horticoles et du Paysage

Spécialité : Horticulture

Spécialisation / option : Protection des Plantes et Environnement en Horticulture

Enseignant référent : Mme LE CORFF Josiane

Auteur : Floriane JACQUELIN

Date de naissance : 14/10/1996

Nb pages : 31 **Annexes :** 5

Année de soutenance : 2019

Organisme d'accueil : Pépinières Chargé

Adresse :

8, chemin de l'abreuvoir

49700 Louresse-Rochemenier

Maître de stage : M. CHARGE Christophe

Titre français : Méthodes alternatives au désherbage chimique : essais de paillages et couverts végétaux en pépinière plein champ de production d'arbres fruitiers et d'ornement

Titre anglais : Alternative methods to chemical weeding : trials of mulching and plant cover in fruit tree and ornamental open field nurseries

Résumé :

Face aux évolutions réglementaires et aux plans d'action mis en place pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires, il est important de développer de nouveaux moyens de lutte contre les adventices. Les contraintes techniques de chaque système viennent complexifier les recherches d'alternatives qui s'intensifient pourtant. C'est dans ce contexte que des essais ont été mis en place au sein des pépinières Chargé, entreprise de production d'arbres tiges en pleine terre. L'expérimentation porté sur le développement du désherbage mécanique, de l'utilisation de paillages organiques et de couverts végétaux, aux propriétés allélopathiques ou non.

Les différents essais ont montré des résultats variables suivant la technique utilisée, avec une meilleure régulation des adventices pour les paillages organiques (paille et miscanthus). Ces alternatives comportent toutefois des contraintes, de coûts notamment, que l'on ne retrouve pas avec l'implantation de couverts végétaux (allélopathiques ou non). Ces derniers apparaissent moins efficaces dans la régulation des adventices mais possèdent de nombreux autres intérêts. Si chaque technique comporte des avantages et des inconvénients, il est nécessaire de choisir la méthode qui convient le mieux au système de culture et aux objectifs de réduction des adventices fixés.

Le but de ces essais est de proposer aux pépiniéristes des alternatives durables au désherbage chimique, avec la création d'un outil facilitant la prise de décision.

Abstract :

In the context of regulatory changes and action plans to reduce the use of plant protection products, it is important to develop new ways of controlling weeds. The technical specifications of each system complicate the research for alternatives, which are nevertheless intensifying. It is in this context that experiments have been set up in the pépinières Chargé, a company that produces trees in the full ground. The experiment focused on the development of mechanical weeding, the use of organic mulching and plant cover, with or without allelopathic properties.

The various tests showed variable results depending on the technique used, with better weed control for organic mulches (straw and miscanthus). However, these alternatives have constraints, particularly in terms of costs, that are not found with the installation of plant cover (allelopathic or not). Those ones appear to be less effective in regulating weeds but have many other interests. If each technique has advantages and disadvantages, it is necessary to choose the method that best suits the growing system and weed control goals.

The aim of these tests is to propose sustainable alternatives to weed chemical control to nurseries, with the creation of a tool to facilitate decision-making.

Mots-clés : pépinière, adventices, alternative, couvert végétal, paillage, allélopathie, désherbage

Key Words: tree nursery, weeds, alternative, plant cover, mulching, allelopathy, weeding