

<p>L'Institut Agro Rennes-Angers <input checked="" type="checkbox"/> Site d'Angers <input type="checkbox"/> Site de Rennes</p>	<p> L'INSTITUT agro Rennes Angers</p> <p> agroParisTech <small>INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES</small></p>	<p> LIÈGE université Gembloux Agro-Bio Tech</p> <p> Interreg North-West Europe GROOF</p> <p> Centre de Recherches en Agriculture Urbaine</p> <p> SMART CITY INSTITUTE FORWARD SUSTAINABILITY</p> <p> MIPX www.enmieux.ca</p> <p> FEDER UNION EUROPÉENNE</p> <p> Région Wallonne LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL ET LA WALLONIE INVESTISSENT DANS VOTRE AVENIR</p>
<p>Année universitaire : 2021-2022 Spécialité : Paysage Spécialisation (et option éventuelle) : IEVU agriculture urbaine</p>		<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>

Étude technico-économique sur l'itinéraire cultural de deux variétés de chanvre industriel pour la production de CBD et CBG

Par : Arthur LIBAULT



Soutenu à Angers le 14 Octobre 2022

Devant le jury composé de :

Président : Gilles Galopin

Maître de stage : Professeur Haissam Jijakli, Nicolas Ancion et Françoise Bafort

Enseignant référent : Soulaïman Sakr

Autres membres du jury :

Frédéric Lota, expert extérieur

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité
de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers*



Résumé

Le chanvre (*Cannabis sativa sativa*) est une plante très utilisée par l'Homme dans l'histoire. Cette plante est entièrement valorisable dans plusieurs domaines d'activité et présente de nombreux avantages agronomiques. L'utilisation de ses fleurs, très réglementé, trouve sa place progressivement dans le domaine médical en démontrant son utilité pour plusieurs pathologies. Dans le cadre de la production de cette plante en Belgique, nous étudions plusieurs itinéraires de culture afin d'appréhender la rentabilité de ces techniques et leur impact sur la qualité de la production. En serre sur toiture ou culture au champ traditionnelle, différents sites sont étudiés. L'effet d'un régulateur de croissance, l'éthéphon, est étudié dans la solution nutritive hydroponique en serre. Trois doses du régulateur de croissance sont testées. Les meilleurs effets sur la réduction de la taille ainsi que sur la concentration en métabolites d'intérêts - le CBG de la variété Santhica 27 et le CBD de la variété Féline 32 - ont été observés pour les deux plus fortes doses d'éthéphon. C'est au champ que nous retrouvons les plus fortes concentrations en CBD chez Féline 32. Chez Santhica 27, les concentrations en CBG au champ sont semblables à celles de la dose d'éthéphon la plus forte en serre. L'étude économique témoigne de la nécessité d'améliorer l'itinéraire technique en serre et de diminuer le temps de travail lié à la récolte.

Abstract

Hemp (*Cannabis sativa sativa*) is a plant that has been used extensively by humans throughout history. This plant can be used in many fields of activity and has many agronomic advantages. The use of its flowers, which is highly regulated, is gradually finding its place in the medical field by demonstrating its usefulness for several pathologies. Within the framework of the production of this plant in Belgium, we are studying several cultivation itineraries in order to understand the profitability of these techniques and their impact on the quality of the production. Various sites are being studied, one in the greenhouse and a second one in a traditional field. The effect of a growth regulator, ethephon, is studied in the greenhouse hydroponic nutrient solution. Three doses of the growth regulator are tested. The best effects on size reduction and on the concentration of metabolites of interest - CBG in the Santhica 27 variety and CBD in the Felina 32 variety - were observed for the two highest doses of ethephon. The highest CBD concentrations were found in the field with Felina 32. In Santhica 27, the CBG concentrations in the field are similar to those of the highest ethephon dose in the greenhouse. The economic study shows that it is necessary to improve the cropping patterns in the greenhouse and to reduce the time spent on harvesting.

Remerciements

Je souhaite dans un premier temps remercier les personnes m'ayant permis de mener à bien ce stage de fin d'études. Françoise Bafort et Nicolas Ancion pour leur accompagnement et leur aide dans les différentes étapes de ce travail, ainsi que le professeur Haissam Jijakli pour la supervision et les opportunités offertes. Au sein du laboratoire de phytopathologie intégrée et urbaine, je souhaite aussi remercier tous les collègues et stagiaires qui ont créé un environnement de travail sain et convivial. Je remercie aussi Yves Brostaux pour son aide sur le choix des modèles statistiques.

Je remercie particulièrement Jimmy et Sam pour leur aide technique tout au long de la culture du chanvre.

Je remercie toute l'équipe enseignante de l'Institut Agro centre d'Angers, pour la qualité de la formation continue.

Je tiens à remercier également Soulayman Sakr pour l'accompagnement sur ce travail et sa bienveillance.

Je remercie tous mes amis qui ont plus que participé à rendre ces 5 années d'études inoubliables !

Enfin, je te remercie toi, Kenza, qui m'accompagne depuis plusieurs années maintenant, pour ton aide au quotidien et tout l'amour que tu me donnes.

Sommaire

Résumé	2
Abstract	2
Remerciements	3
Table des figures	6
Table des tableaux	7
Liste de abréviations	7
1. Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 L'histoire du chanvre	2
1.3 La filière chanvre	3
1.3.1 Sa structure	3
1.3.2 Les produits du chanvre	3
1.4 Législation des produits	4
1.4.1 Les métabolites secondaires	4
1.4.2 Les effets sur l'Humain	4
1.4.3 La réglementation	5
2. État de l'art	6
2.1 La culture en pleine terre	6
2.1.1 Historique et évolution	6
2.1.2 Le chanvre en pleine terre	7
2.2 La culture hydroponique	7
2.2.1 Historique	7
2.2.2 Des facteurs controlés	8
2.2.3 Le substrat	9
2.2.4 Les systèmes de cultures	9
2.2.5 Le chanvre en hydroponie	10
2.2.6 L'éthéphon	10
2.2.7 Éthylène	11
2.2.8 Effet sur la production des métabolites secondaires	11
2.3 La formation des cannabinoïdes	12
2.3.1 Les principaux cannabinoïdes	12
2.3.2 Méthode de quantification des cannabinoïdes	13
2.4 Les variétés de chanvre et leurs usages	13
2.5 Rentabilité de cette culture	14
2.5.1 Le marché des fibres et des graines	14
2.5.6 Le marché des fleurs	14
2.6 Conclusion	14
CHAPITRE I. Test préliminaire : Dose d'Éthéphon	15
1. Matériel et méthode	15
1.1 Culture et paramètres mesurés	15
1.2 Récolte	15
1.3 Hypothèses	16
1.4 Analyse des résultats	16
2. Résultats	17
2.1 Données de la croissance	17
2.2 Données de la récolte	18
3. Discussion	19
CHAPITRE II. Effet agronomique des itinéraires culturaux	20

1. Matériel et méthode	20
1.1 Chanvre en terre	20
1.1.1 Structuration de la parcelle	20
1.1.2 Mise en place	20
1.1.3 Méthode de relevé des données	20
1.1.4 Analyse des résultats	20
1.2 Chanvre en hydroponie	21
1.2.1 Localisation	21
1.2.2 Disposition	21
1.2.3 Méthode de relevé des données	21
1.2.4 Analyse des résultats	21
2. Résultats	22
2.1. Effet du système de culture : Champ / serre hors-sol	22
2.1.1 Conditions de cultures	22
2.1.2 Homogénéité au champ	23
2.1.3 Comparaison des systèmes de culture	24
2.2 Effet de l'éthéphon (serre)	27
2.3 Informations complémentaires	29
2.3.1 Taux de croissance	29
2.3.2 Masse racinaire en serre	30
3. Discussion	30
3.1. Effet de l'itinéraire cultural	30
3.2 Effet de l'éthéphon	31
CHAPITRE III. Effet métabolique des itinéraires culturaux	32
1. Matériel et méthode	32
1.1 Récolte	32
1.2 Passage à l'étuve	32
1.3 Préparation des échantillons	32
1.4 Analyses de laboratoire au Celabor	32
2. Résultats	33
2.1 Récolte	33
2.1.1 Suivi de l'état des trichomes	33
2.1.2 masses fraîches et sèches des fleurs	34
2.2 Analyses de laboratoire	34
2.3 Production en cannabinoïdes	35
3. Discussion	35
CHAPITRE IV. Analyse économique	36
1. Matériel et méthode	36
1.1 Fixation d'un prix de revient	36
1.2 Entretiens avec les professionnels du secteur	36
2. Résultats	37
2.1 Prix de revient	37
2.1.1 Monitoring Serr'ure	37
2.1.2 Monitoring champ	38
2.1.3 Bilan	38
2.2 Entretiens avec les professionnels	39
3. Discussion	39
V. Conclusion	40
Bibliographie	41
Annexes	46

Table des figures

Figure 1 : Photographies aérienne de la Serr'ure et des parcelles de chanvre cultivées (crédit : Arthur Libault)

Figure 2 : Schéma des débouchés du chanvre et de l'utilisation des différentes fractions

Figure 3 : Évolution du nombre de publications relatives au cannabis médical d'après Aliferis, Bernard-Perron 2020

Figure 4 : Système de culture hydroponique goutte-à-goutte par J.HUETE international

Figure 5 : Schéma simplifié de la chaîne de la transformation des principaux cannabinoïdes (d'après la description de Fournier & al, 2003)

Figure 6 : Répartition des plants dans les systèmes NFT

Figure 7 : Hypothèses sur le développement des plants suite au traitement

Figure 8 : Boxplots des 3 facteurs étudiés par le modèle linéaire mixte sur F32 (les abscisses sont composés des dates pour chacun des systèmes de culture)

Figure 9 : Boxplots des 3 facteurs étudiés par le modèle linéaire mixte sur S27 (les abscisses sont composés des dates pour chacun des systèmes de culture)

Figure 10 : Test ANOVA appliqué aux données de la récolte pour les 4 paramètres mesurés

Figure 11 : Test de Tukey appliqué aux données de la récolte (l'axe des ordonnées représentent les interactions 2 à 2 des systèmes)

Figure 12 : Schéma des parcelles de la culture en terre

Figure 13 : Photo du semis au champ (crédit : Arthur Libault)

Figure 14 : Schéma de culture en hydroponie (modèle de la table 1)

Figure 15 : Schéma de culture général

Figure 16 : Graphique d'évolution des température intérieure et extérieure obtenues par la station météo de la Serr'ure

Figure 17 : Graphique de l'évolution des paramètres des solutions hydroponiques de la Serr'ure au cours de la culture

Figure 18 : Boxplot du modèle linéaire mixte appliqué aux données temporelles de Santhica 27 au champs (30 plantes) et en serre (7 plantes) pour les 3 paramètres contrôlés, uniquement sur les dates communes

Figure 19 : Boxplot du modèle linéaire mixte appliqué aux données temporelles de Féлина 32 au champs (30 plantes) et en serre (7 plantes) pour les 3 paramètres contrôlés, uniquement sur les dates communes

Figure 20 : Barplot des données des récolte de Féлина 32 et Santhica 27 au champ (30 plantes) et en serre (7 plantes) pour les 4 paramètres supplémentaires (variétés non-comparables entre-elles avec les lettres)

Figure 21 : Courbes d'évolution des p-valeurs des 3 paramètres mesurés dans le temps (taille, nombre de neoud et longueur de l'entre-nœud) pour F32 (à gauche) et S27 (à droite)

Figure 22 : Barplot de l'effet de la dose d'éthéphon sur les 4 paramètres supplémentaires mesurés à la récolte pour F32 et S27

Figure 23 : Courbes des taux de croissance (taille en cm) par semaine de culture dans les différents contextes de production, pour les 2 variétés

Figure 24 : Graphique des masses racinaire sèche moyenne par plant de chaque gouttière pour la Serr'ure

Figure 25 : Barplot des concentrations en CBG des plants de Santhica 27 dans les différents systèmes de culture étudiés (CBG total = CBG + CBGA)

Figure 26 : Barplot des concentrations en CBD des plants de F32 dans les systèmes de culture (CBD total = CBD + CBDA)

Figure 27 : Schéma pour le monitoring du chanvre 2022

Figure 28 : Schéma de la chaîne de valeur des fleurs de chanvre et des acteurs interrogés

Figure 29 : Somme du temps de travail technicien pour la culture de chanvre détaillé par variété

Figure 30 : Répartition des volumes de travail par tâche détaillé pour la Serr'ure

Figure 31 : Volumes d'intrants consommés par système de culture de la Serr'ure

Figure 32 : Répartition des volumes de travail par tâche pour le champ

Table des tableaux

Tableau n°1 : Principaux effets du THC et du CBD (Benhaberou-Brun, 2019)

Tableau n°2 : Synthèse des fiches techniques sur la culture du chanvre industriel

Tableau n°3 : Conditions de culture du Cannabis indoor

Tableau n°4 : Caractéristiques des variétés de chanvre industriel disponibles chez Hemp-it

Tableau n°5 : Tableau des densités de culture

Tableau n°6 : p-valeur issues de tests ANOVA sur les données de récolte de S27 sur les 3 paramètres contrôlés entre les 2 quadrats de chaque parcelle (p-valeur < 0,05 présentées en couleur)

Tableau n°7 : p-valeur issues de tests ANOVA sur les données de récolte de F32 sur les 3 paramètres contrôlés entre les 2 quadrats de chaque parcelle (p-valeur < 0,05 présentées en couleur)

Tableau n°8 : Tableau des p-valeurs obtenues par test ANOVA sur les 7 paramètres contrôlés à la récolte de S27 et F32 (facteur dose)

Tableau n°9 : Tableau des masses fraîche et sèche de la récolte pour chaque variété dans les différents systèmes de culture

Tableau n°10 : Tableau des taux moyen en cannabinoïdes d'intérêt et de la production totale en gramme de cannabinoïdes par m²

Liste de abréviations

CBG : Cannabigérol, précurseur chimique de nombreux cannabinoïdes.

CBD : Cannabidiol

CBN : Cannabinol

THC : delta-9-tétrahydrocannabinol est un cannabinoïde psychotrope du cannabis.

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

FNCP : Fédération Nationale des Producteurs de Chanvre

CCPSC : Coopérative des Producteurs de Semences de Chanvre

CVO : Cotisations Volontaires Obligatoires

HPS : Lampes au sodium à haute pression

NFT : Nutrimet film technique, la technique sur film nutritif est une méthodes de culture hydroponique.

DWC : Deep Water Culture, culture en eau profonde est un des nombreux systèmes hydroponique.

HPLC : Chromatographie en phase liquide.

S27 : Santhica 27

F32 : Féline 32

1. Introduction

1.1 Contexte

Ce mémoire de fin d'étude représente l'aboutissement de 5 années à l'Agrocampus-ouest d'Angers (Institut Agro Rennes-Angers). Dans le cadre du cursus de Paysage, d'une spécialisation en IEVU (Ingénierie des Espaces Végétalisés Urbains) et d'une sous-spécialisation en agriculture urbaine réalisée à AgroParis Tech, j'ai voulu réaliser un stage en lien avec l'innovation en agriculture urbaine.

Ce travail de 7 mois a été réalisé en Belgique, au sein du Centre de Recherche en Agriculture Urbaine (C-RAU) de la faculté d'agronomie de Gembloux AgroBio-Tech, Université de Liège.

L'étude porte sur la rentabilité d'une production de chanvre suivant différents itinéraires de culture. À travers les processus et techniques utilisés mais aussi par le lieu de production, nous chercherons à mieux comprendre les opportunités de ce marché en pleine expansion. Ce projet s'inscrit dans plusieurs projets du centre de recherche. Tout d'abord, le projet GROOF (Greenhouses to Reduce CO2 On roofFs) est un projet qui réunit plusieurs serres pilotes en Europe (Belgique, Luxembourg, France et Allemagne) afin de partager les données collectés sur les effets des serres dans différents contextes. Cette étude s'intègre également dans le projet OPTIBIOMASSE qui vise à étudier et optimiser la production à grande échelle de biomasse végétale dans le cadre de l'exploitation de molécules d'intérêt pharmaceutique (conteneurs de production).



Figure 1 : Photographies aérienne de la Serr'ure et des parcelles de chanvre cultivées
(crédit : Arthur Libault)

1.2 L'histoire du chanvre

Le chanvre (*Cannabis sativa*) est une plante annuelle de la famille des CANNABACEAE et décrite par L. Lamarck en 1785 (Hillig, 2005). Ses premières utilisations remonteraient à -500 av JC en Chine, où sa résine était utilisée comme excitant, inhibiteur de souffrance et coupe-faim. Elle était donc cultivée comme plante fétiche et médicinale (Chevalier, 1944). C'est plus tard que son utilisation s'étendra au textile et à l'huile.

Le *Cannabis sativa* se détache en 2 sous-catégories selon ses origines. On parle alors des chanvres « russes » et « tropicaux ». Puisqu'ils se sont développés dans des conditions climatiques et géographiques différentes, les plants issus de ces 2 catégories se distinguent par leur concentration en delta-9-tétrahydrocannabinol (Δ -9-THC). Les chanvres « russes » se caractérisent par des taux avoisinants les 0,5 %, c'est le *Cannabis sativa sativa*. Les espèces dites « tropicales », ont souvent un taux de Δ -9-THC entre 2 et 5 %, c'est le *Cannabis sativa indica* (Bertucelli, 2015).

Les chanvres sont aussi très utiles pour leurs fibres très résistantes, notamment utilisées dans la navigation pour les voilures et cordages (Plateau & Holzemer, 2016). Mais avec le développement massif des industries de la pétrochimie, les fibres végétales laissent très rapidement leur place aux fibres synthétiques plastiques qui sont souvent moins chères et plus facilement industrialisables (Géradon & al, 2021). Dans les années 1990, l'usage du chanvre s'ouvre à de nouveaux marchés notamment celui de la construction. Dans une démarche de réduction des consommations énergétiques liées à la fabrication des produits du bâtiment, les matériaux à base végétale et recyclables permettent d'aboutir à un bilan carbone négatif (Plateau & Holzemer, 2016). Dans leur dossier de presse de 2020, Hemp-it une entreprise de semences de chanvre, note 8 axes d'utilisation du chanvre : le bâtiment et la construction, l'industrie ferroviaire, l'agroalimentaire, l'industrie automobile (tableaux de bord en composites renforcés avec fibres de chanvre), la mode (lunettes en fibre de chanvre), la gastronomie, la nutrition (compléments alimentaires à base d'huile de graine), et la parapharmacie avec déjà des résultats concernant l'effet des produits dermatologiques sur les rougeurs, l'eczéma ou encore le psoriasis (Cavaro & al, 2020). Les domaines du bâtiment, des transports, et récemment des sports de loisirs ainsi que le marché du luxe sont les principaux domaines de développement des fibres lin et chanvre pour leur « performance mécanique, de légèreté, d'amortissement des vibrations, d'isolation thermique ou phonique, d'absorption/désorption ou de bilan écologique » (Bono & al, 2015).

D'après le sixième rapport du GIEC (deuxième version), les enjeux climatiques actuels sont aussi un point majeur pouvant permettre le retour du chanvre dans notre quotidien. En raison de la vulnérabilité de près de la moitié de la population mondiale au changement climatique, de la perte de 8 % des terres agricoles d'ici 2100 ou encore de l'impact sur la biodiversité (Lautre, 2022), il est vital de réfléchir à des solutions durables pour limiter les effets négatifs de l'Homme sur l'équilibre climatique. D'après le plan filière d'interchanvre de 2017, le chanvre a un rôle de structuration du sol par ses racines, de captation massive de CO₂ (« 1 ha de chanvre absorbe autant de CO₂ qu'1 ha de forêt, soit 15 tonnes »), et dans le cas du béton de chanvre c'est 48Kg d'équivalent CO₂ qui sont stockés par m² de mur. La présence de la culture de chanvre dans une rotation permet un gain de 5 à 10% du rendement de la culture céréalière ainsi qu'une réduction de la présence d'adventices graminées même si elle favoriserait la présence de rongeurs. (Peschaud, 2015). Enfin, cette plante n'a ni besoin d'arrosage ni d'utilisation de produits phytosanitaires, et la filière est maîtrisée et 100% française avec des processus de transformation mécaniques (Interchanvre, Plan Filière, 2017).

Au travers de ses multiples usages, le chanvre semble pouvoir avoir, à son échelle, une place importante dans l'évolution des pratiques agricoles, industrielles et sanitaires.

Les axes de développements de la filière chanvre sont de plus en plus nombreux et suscitent de nombreuses recherches. Pour suivre toutes ses activités, la filière doit être organisée à différentes échelles.

1.3 La filière chanvre

1.3.1 Sa structure

« La filière du chanvre industriel est d'une dimension économique faible, sans être dans le champ de la microéconomie » (**Bertucelli, 2015**).

L'Europe était le 2ème plus gros producteur de chanvre en 2016 avec 33 300 ha, derrière la Chine (45 000 ha). La France se place au premier rang de producteur en Europe avec plus de la moitié des surfaces exploitées. Sur le territoire français, il existe 6 chanvrières employant 121 salariés auprès de 1414 producteurs en 2016 (**Interchanvre, Plan Filière, 2017**).

La Fédération Nationale des Producteurs de Chanvre (FNPC) a été créée en 1932 afin de regrouper les syndicats des producteurs de chanvre français. La FNPC ainsi que la Coopérative des Producteurs de Semences de Chanvre (CCPSC) fondée en 1965, se sont réorganisées en 2018 afin d'avancer dans la sélection variétale pour répondre aux évolutions rapides du marché sur les taux de fibres, la taille des graines de chanvre, composition oléique et le taux de protéines (**Interchanvre, Plan Filière, 2017**). La filière fixe des Cotisations Volontaires Obligatoires (CVO) sur la base d'un accord interprofessionnel. Avec ces CVO, Interchanvre peut réaliser des actions de développement et de représentation, en partenariat avec Terres Inovia (**Bertucelli, 2015**). L'institut technique Terre Inovia est missionné par l'interprofession InterChanvre pour contribuer à la recherche agronomique sur le chanvre à différents niveaux (itinéraire technique, observatoire...) (**Interchanvre, Plan Filière, 2017**). Il est possible d'avoir accès à une subvention de 240 €/ha de chanvre accordé par la PAC dans le cadre des MAEC (Mesures Agro Environnementales et climatiques) (**NatAgriWal, 2022**).

1.3.2 Les produits du chanvre

Comme le montre la **figure 2**, toutes les parties dans cette plante sont exploitables dans des fractions différentes et pour des usages parfois spécifiques.

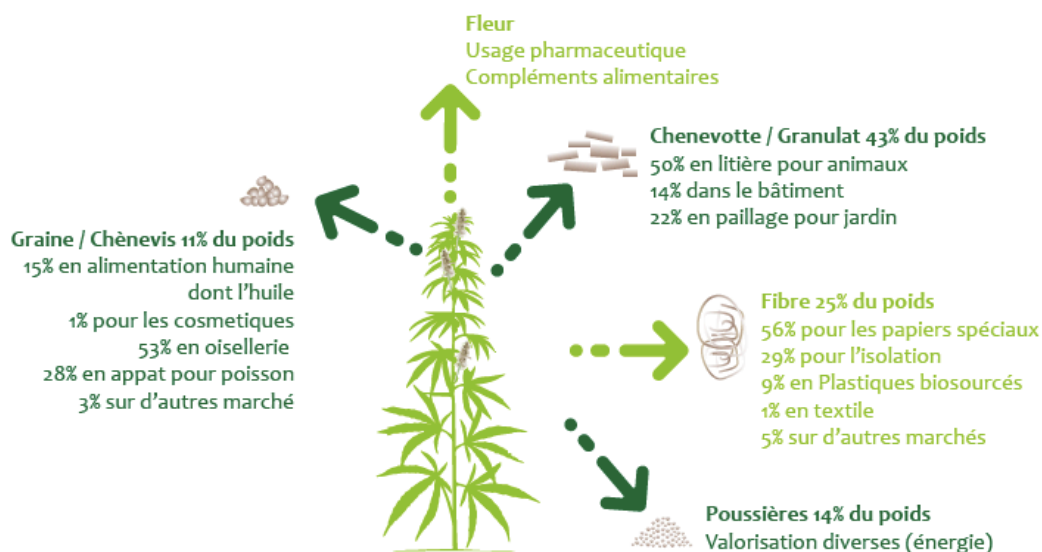


Figure 2 : Schéma des débouchés du chanvre et de l'utilisation des différentes fractions (**Interchanvre, Plan Filière, 2017**)

Le processus générique d'extraction des fibres végétales se décompose en 3 phases qui s'effectuent après une étape de rouissage au champ. La décortication consiste à séparer la matière ligneuse (ou moelle) de la fibre libérienne. La séparation consiste à séparer les différentes fractions végétales obtenues. L'affinage se focalise sur les fibres jusqu'à éventuellement l'obtention de fibres élémentaires **(Meirhaeghe, 2011)**.

La deuxième étape permet l'obtention de la chènevotte d'un côté et de la fibre de l'autre, les poussières représentent les parties détruites par l'effort mécanique des 3 étapes. Les différentes fractions ainsi obtenues seront utilisées dans les domaines précédemment décrits.

La graine se positionne sur le marché mondial. En effet, cette graine oléagineuse, appelée chènevis est particulièrement utilisée dans l'alimentation des oiseaux et de plus en plus dans l'alimentation humaine dans l'Europe du Nord et l'Amérique du Nord. Malgré encore quelques freins pour l'alimentation animale d'élevage, cette graine trouve progressivement sa place. Elle présente un équilibre Omega 6 / Omega 3 (4/1) très proche du ratio idéal de 5/1. Dans les pays riches, le ratio des graisses pour l'alimentation humaine est de 20/1, et de 10/1 en France **(Bertucelli, 2015)**.

Les fleurs sont principalement utilisées dans le domaine de la pharmacologie et leur utilisation se fait en Amérique du Nord et en Chine **(Interchanvre, Plan Filière, 2017)**. En raison des réglementations en place en Europe principalement sur le Δ -9-THC, les acteurs motivés pour vouloir se lancer dans cette activité semblent être découragés par ces difficultés **(Thouminot, 2015)**.

1.4 Législation des produits

1.4.1 Les métabolites secondaires

Les différents produits issus du chanvre sont soumis à différents contrôles. Une part très importante de ceux-ci se concentrent sur les concentrations de certains métabolites secondaires de cette plante, essentiellement le Δ -9-THC. Le Δ 9-tétrahydrocannabinol (THC) est identifié en 1964 par Mechoulam, c'est le principal composé psychoactif du cannabis qui est responsable des effets euphorisants recherchés en contexte récréatif. Ce composé est aussi responsable de plusieurs effets indésirables, particulièrement des effets neuropsychiques et neuro-développementaux **(Pélissier-Alicot & al, 2019)**.

La notion de métabolites secondaires s'oppose à celle de métabolites primaires représentés par les lipides, protides, glucides et acides nucléiques, ayant un rôle essentiel dans le fonctionnement physiologique de la plante. Appartenant à des groupes chimiques variés tels que les terpènes, les alcaloïdes et les composés phénoliques, les métabolites secondaires ne sont pas encore reliés à des fonctions physiologiques précises, et semblent, pour certains végétaux, plutôt intervenir dans leur protection vis-à-vis de leur environnement. Toutefois, il semblerait que le terme « secondaires » soit depuis quelques années à remettre en question, à la suite des résultats obtenus ces vingt dernières années et mettant en évidence des fonctions de ces composés **(MACHEIX & al, 2005)**.

1.4.2 Les effets sur l'Humain

Concernant les propriétés du chanvre sur l'être Humain, nous devons nous intéresser plus particulièrement à ses principaux cannabinoïdes. Cette plante contient plus de 500 ingrédients chimiques dont 120 cannabinoïdes **(Benhabrou-Brun, 2019)**. Le THC ainsi que le CBD (cannabidiol) sont les 2 cannabinoïdes qui suscitent le plus d'intérêts.

Ces 2 principales molécules ont des effets sur le corps Humain à de nombreux niveaux, comme le montre le tableau 1 ci-dessous.

Tableau n°1: Principaux effets du THC et du CBD (**Benhaberou-Brun, 2019**)

SYSTÈMES	EFFETS DU THC	EFFETS DU CBD
Nerveux central	Sédation, analgésie, antimigraineux, antiémétique, stimulation de l'appétit, affaiblissement des réflexes, ralentissement du temps de réaction	Analgésique, anxiolytique, antiépileptique, antipsychotique
Respiratoire	Bronchodilatation	-
Cardiaque	Tachycardie, hypertension	Bradycardie, hypotension
Immunitaire	Diminution de la résistance aux infections (effet chronique)	Immunomodulateur, anti-inflammatoire
Endocrinien	Hypoglycémie	-

Le système endocannabinoïdes agit sur plusieurs fonctions physiologiques telles que les fonctions motrices, la mémoire, la motivation, l'énergie, la douleur et les émotions (**Leleu-Chavain & al, 2013**). Le Dr. Mechoulam a également isolé 2 endocannabinoïdes présents dans le corps humain naturellement, la 2-AG et Anandamide. Cette dernière a un effet similaire au THC lors de sa liaison avec les récepteurs cannabinoïdes et est par ailleurs utilisée dans le chocolat, ce qui explique le plaisir lié à son ingestion (**CBX médical, 2021**).

En 2019, plus de 250 études cliniques contrôlées ont montré les bienfaits du *Cannabis* sur une dizaine de pathologies. Néanmoins, de nombreux auteurs avertissent qu'il ne faut pas négliger la toxicité de cette plante. En raison des effets de ces molécules, la consommation de ces substances n'est pas à combiner avec des activités à risque, en lien avec la sécurité ou encore à la conduite (**Benhaberou-Brun, 2019**). Depuis les années 2000, la France a mis en place une législation permettant de sanctionner l'usage de cannabis au volant grâce à une analyse sanguine. Mura & al proposent également des contrôles auprès des personnes occupant des postes à risque ou de sécurité en entreprise (**Mura & al, 2004**). D'après une étude de 2020 basée sur les effets épigénétiques du cannabis, l'auteur conclut par l'appel au « principe de précaution » en raison des risques sanitaires liés à l'épigénétique en plus de ceux déjà documentés (**Costentin, 2020**). Le CBG a montré des effets anti-inflammatoires sur la colite murine et sur les maladies inflammatoires de l'intestin, ainsi que des effets stimulants sur les comportements alimentaires chez des souris. Ce cannabinoïde a également montré une inhibition de l'aldose réductase, connue pour provoquer une accumulation de sorbitol et une augmentation du taux de glucose dans le sang, ce qui peut conduire au diabète. (**Zagožen & al, 2020**)

1.4.3 La réglementation

C'est au XXe siècle que l'usage du cannabis est interdit par la loi. Le *Cannabis* est un produit illicite, classé comme stupéfiant au niveau international (**Giorgio, 2017**). Suite à cette loi du 31 décembre 1970, acheter, consommer, détenir, revendre, en cultiver (chez soi ou à l'extérieur) sont passibles d'amendes et de peine de prison. Depuis la loi du 3 février 2003, les peines sont de 2 ans d'emprisonnement et de 4 500 € d'amende, les peines sont doublées si le produit à base de cannabis est vendu ou donné à des mineurs (**ofdt, 2020**).

Concernant la réglementation au niveau mondial, plusieurs pays comme le Canada, l'Uruguay et certains états des États-Unis ont légalisé la consommation récréative du cannabis. D'autres l'ont partiellement légalisé, c'est le cas du Népal pour certaines fêtes religieuses et aux Pays-Bas où seule la consommation est autorisée, mais pas la production. Dans une autre mesure, l'Israël a été le premier pays à développer la production et la commercialisation de cannabis thérapeutique. Cette tendance se développe dans la plupart des pays de l'Europe et dans d'autres pays du monde (**CBX médical, 2022**).

En France, il existe un groupe de codes douaniers (NC 5302 et 5302 10 00) qui s'applique au chanvre. Dans ce même document, on retrouve l'article R5132-86 de la santé publique Française traitant de la circulation, de la production et de l'emploi des produits issus du cannabis (résine ou plante). Il existe aussi une rubrique au catalogue communautaire des

espèces de grandes cultures. Toute activité liée à cette plante dépendra d'un statut légal soumis à plusieurs conditions présentées dans ces articles. Une dérogation peut être obtenue ou non en fonction de la variété ou d'un certain usage. **(Bertucelli, 2015)**.

D'après la synthèse de « Pour une réglementation du cannabis en Belgique » de 2020 et du site officiel de CBX médical, il apparaît qu'il existe un « flou juridique » sur ce territoire en raison de textes contradictoires ou sujets à interprétation. Malgré ce manque de précision, il semblerait que le législateur distingue les usages récréatifs (relativement tolérés) des usages thérapeutiques. La réglementation actuelle en Belgique autorise des produits à base de CBD avec moins de 0,2 % de THC. Ce taux passera à 0,3 % en 2023 et est déjà effectif en France **(CBX médical, 2022 ; FEDITO BXL, 2020)**.

Pour entamer la démarche de produire du chanvre en Belgique, plusieurs étapes clés sont à connaître. Toute parcelle de chanvre doit être déclarée dans un formulaire de déclaration de superficie, seules des variétés inscrites au catalogue commun des variétés des espèces agricoles (THC<0,2%), semées au minimum à 30kg/ha peuvent être produites. La dérogation doit être accompagnée d'une copie du bon de commande ou de la facture d'achat, ainsi qu'une copie des étiquettes de certification des semences. Enfin, les parcelles de chanvre peuvent faire l'objet d'un contrôle de terrain avec le prélèvement d'échantillons pour vérifier le taux de THC. L'agriculteur doit conserver les étiquettes de certification des semences au moins 3 ans en cas de contrôle. L'agriculteur doit obligatoirement avertir l'administration au moins 10 jours ouvrables avant le stade floraison **(Gérardon & al, 2020)**.

Depuis quelques années, et compte tenu des effets et du contrôle fait sur cette plante due à la présence du THC, c'est le CBD (non-psychothope), l'autre cannabinoïde principal du chanvre, qui se développe de plus en plus et dont le marché évolue très rapidement **(Thouminot, 2015)**.

2. État de l'art

L'intérêt grandissant autour de cette plante se reflète par le nombre croissant de publications au cours des soixante dernières années **(Figure 3 ci-contre)**.

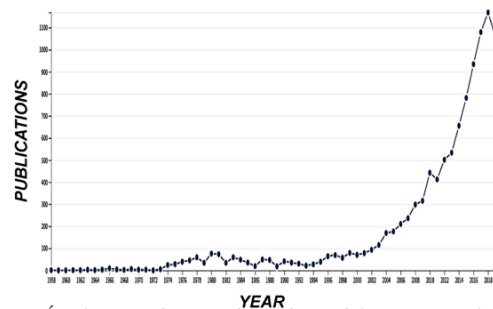


Figure 3 : Évolution du nombre de publications relatives au cannabis médical d'après **Aliferis, Bernard-Perron 2020**

2.1 La culture en pleine terre

2.1.1 Historique et évolution

L'agriculture est née avec la sédentarisation des premiers humains il y a 10 000 ans. C'est la période la plus longue période de l'histoire humaine **(Malassis, 1988)**. Depuis sa naissance, l'agriculture et les pratiques qui l'accompagnent ont énormément évolué au fil du temps afin de répondre aux besoins alimentaires humains.

Depuis la fin du XVIIIe siècle et le début de la révolution industrielle, les innovations dans le domaine de l'agriculture se font plus nombreuses afin de produire plus en raison de la forte augmentation démographique à partir des années 1830 avec l'arrivée des populations dans les villes **(Flamant, 2010)**. Le paysage agricole s'est homogénéisé sur des surfaces de plus en plus grandes et s'est bien souvent hyper-spécialisé selon les territoires.

Aujourd'hui, on note un retour à des pratiques agricoles plus raisonnées et respectueuses de l'environnement. Notamment sur les sujets de l'utilisation des engrais chimiques ou des produits phytosanitaires de synthèse, la société cherche à améliorer cette activité agricole et à la rendre plus durable et diversifiée.

Dans cette partie, nous aborderons les conduites de culture en pleine terre de cette plante qu'est le chanvre. Comme décrit plus haut, avec ses multiples fonctions et ses usages ancestraux, cette plante est en mesure de répondre à de nombreux enjeux actuels.

2.1.2 Le chanvre en pleine terre

Cette partie présente les étapes et bonnes pratiques pour la culture du chanvre. Issues de plusieurs fiches techniques, cette partie ne présente pas précisément l'itinéraire technique pour l'exploitation des fleurs, car celle-ci n'est pas autorisée. La synthèse des fiches techniques présente la culture du chanvre fibre et graine. Les informations contenues dans ce tableau n°2 sont issues des fiches techniques suivantes : **La culture du chanvre agricole (BioWallonie, 2017)**, **Culture du chanvre BIO (Marguerie, 2017)**, **Cultiver le chanvre en agriculture biologique (chambre d'agriculture de l'Aube)**, **Le chanvre fiche technique (CIVAM du Gard)**.

Tableau n°2: Synthèse des fiches techniques sur la culture du chanvre industriel

Paramètres du sol	Semis	Fertilisation	Désherbage	Maladie et ravageurs	Récolte
Profond avec réserve hydrique	Sol ressayé et réchauffé (10-12°C)	Lisier, fientes, compost jeune	Aucun nécessaire si assez dense (200-250 graines/m ²)	<i>Orobrancha Ramosa</i> Dans les régions du nord de l'Europe (Belgique comprise)	Fauche fin aout et rouissage de 15 jours à 1 mois
Tous les sols	30-40 Kg/ha	Entre 100 et 120 U/ha d'azote (max 150 dont 70 disponible max)	Culture étouffante	Aucune maladie	Pressage courant septembre
pH entre 6 et 8	Semoir à céréales entre 12-17 cm	Si impasse sur fertilisation = -40% de rendement	/	Aucun traitements nécessaire	Mi septembre pour fibres et fin septembre pour graines
/	2-3 cm de profondeur	Potasse + Phosphore - Calcium + Magnésium -	/	/	/
/	Roulage possible	/	/	/	/
/	Environ début avril	/	/	/	/

2.2 La culture hydroponique

2.2.1 Historique

Dans les années 50, les techniques de culture hors-sol se sont nettement améliorées aux Pays-Bas, ainsi qu'aux Etats-Unis et en France. En effet, l'armée américaine s'est servie des techniques de culture en hydroponie (hydroponic units) pour alimenter en légume frais les troupes sur les îles sans sols fertiles durant la Seconde Guerre Mondiale. En France, les recherches étaient réalisées par la station d'agronomie INRA du Cap d'Antibes. Les avancées techniques de la première moitié du XXème siècle ont permis de laisser voir le jour aux premières installations d'hydroponie commerciale en 1970 (**prof_gilberto, 2013**). L'hydroponie se développe petit à petit. De grandes recherches sont encore menées au début des années 2000.

Par exemple, William Texier, passionné par ce type de culture, entreprend des recherches en Californie et développe des systèmes aéro-hydroponiques. Il est décrit dans l'introduction d'un de ses ouvrages comme « Pionnier de l'innovation et de la recherche dans

l'industrie hydroponique ». Il a conçu et breveté en 2004 la « bioponie » (l'hydroponie biologique). Fort de trente années d'expérience, il est considéré comme une référence mondiale en la matière **(Texier et al., 2016)**.

Les systèmes commerciaux se développent et les producteurs mettent de plus en plus en place ces systèmes. Les systèmes hydroponiques sont aussi utilisés dans les zones où il y a des problèmes de sol comme des sols non-fertiles, des problèmes liés à des ravageurs ou bien des problèmes d'accès à la ressource en eau telle que sur les îles **(Abusin, Mandikiana, 2020)**. Aujourd'hui, la culture hors-sol est plus que jamais d'actualité. Nombre de start-up se créent afin de développer de nouvelles méthodes de production, comme produire en ville. Le défi est de produire en quantité ainsi qu'en qualité.

2.2.2 Des facteurs contrôlés

Les cultures hors-sols permettent de contrôler un grand nombre de facteurs de l'environnement de la plante et ainsi de garantir une production optimale tout en économisant les intrants. La gestion de ces facteurs de manière précise et réfléchie est importante. Les principaux facteurs et éléments sur lesquels peut jouer l'Homme et qui ont une influence sur la production sont les substrats utilisés, la lumière, la température, la composition de l'air et les nutriments.

L'eau apparaît en culture hors-sol, et particulièrement en hydroponie, comme un élément phare. « L'eau est l'élément vital et indispensable au bon fonctionnement d'un système » **(FAO, 2019)**. Tout d'abord, elle est nécessaire pour le fonctionnement biologique de la plante, mais dans le cas de l'hydroponie, elle permet d'acheminer aux plantes les nutriments nécessaires à leur croissance. L'eau joue également un rôle dans la régulation de la température du milieu ainsi que la mise en réserve de chaleur de la plante. Les besoins en eau diffèrent suivant le stade de la culture et les espèces **(Dunglas, 2018)**. Le recyclage de l'eau utilisée en culture hors-sol est un enjeu à ne pas négliger puisque qu'il peut avoir des répercussions environnementales ainsi qu'économiques **(FAO, 2019)**.

Le pH de l'eau doit être régulé afin de permettre une assimilation correcte des nutriments et doit être adapté à l'espèce. Afin de permettre la croissance des végétaux, la gestion des nutriments doit être faite de manière précise. En culture hydroponique, la concentration de la solution doit être stable et répondre aux besoins des plantes. La dureté de l'eau, indicateur de la minéralisation de l'eau, c'est-à-dire la saturation en ions doit également être régulée **(FAO, 2019)**.

Le milieu de culture doit être maintenue à une température correspondant à l'optimum de croissance de l'espèce mise en culture. Elle peut être modulée en fonction du cycle de la plante. Afin de faire des économies en énergie, il convient d'utiliser les conditions extérieures comme l'ensoleillement. Dans la plupart des cas, les installations fonctionnent à la lumière solaire directe. Celle-ci est plus ou moins atténuée par des rideaux ouvrants. Néanmoins, dans les installations plus complexes et plus coûteuses, des éclairages artificiels sont utilisés. Ainsi, les producteurs peuvent jouer sur la nature des longueurs d'onde, l'intensité de la lumière et sa durée **(Dunglas, 2018)**.

La qualité et la composition de l'air jouent un rôle important sur la culture. La teneur en humidité ainsi qu'en dioxyde de carbone est contrôlée. « La teneur en CO₂ est un élément crucial » **(Dunglas, 2018)**. L'augmentation du taux de CO₂ permet un accroissement des rendements. Ainsi, pour des cultures maraîchères, la concentration optimale varie suivant les espèces de 1 000 à 1 500 ppm contre 400 ppm dans l'atmosphère.

2.2.3 Le substrat

Le substrat joue le rôle du sol en culture hors-sol. Il ne répond qu'à une partie de ses fonctionnalités. Le substrat peut être de différentes origines. Il doit permettre un bon enracinement de la plante, être stable, avoir une bonne porosité assurant un bon rapport entre l'air et l'oxygène au niveau des racines. Les fibres végétales comme la fibre de coco, la fibre de bois, et des mélanges de copeaux de bois ont été comparés à la tourbe et à la laine de roche (**Allaire, 2005**). Le substrat peut être d'origine naturelle (minérale ou organique) ou d'origine industrielle (**Yo, 2017**). Le choix de celui-ci doit être établi en fonction des techniques de culture employées, en fonction des producteurs ainsi que des espèces mises en culture. Le substrat doit permettre à la plante cultivée de recevoir tout ce dont elle a besoin. (**Yo, 2017**).

Parfois, ces substrats ne peuvent pas être recyclés. Par exemple, en culture de tomates hors-sol, les pieds sont plantés dans des pains de laine de roche recouverts de plastique. Une fois la culture terminée, le pain ne peut être recyclé et est donc jeté. Certains substrats usagés comme la coco peuvent être recyclés. Après un à deux ans d'utilisation, les pains de fibre de coco sont desséchés puis épandus dans les champs (**Chambre d'agriculture Pyrénées-Orientales, 2011**). Toutefois, la gestion des substrats usagés pose des problèmes. Cela peut sur le long terme représenter une masse de déchets importante. Certains de ces matériaux peuvent également poser des problèmes sanitaires pour ceux qui les manipulent. Par exemple, la perlite et la laine de roche sont des matériaux également utilisés pour les travaux d'isolation. Ils peuvent engendrer des problèmes de santé notamment à cause des fines poussières irritantes pour les yeux, la gorge, le nez et les voies respiratoires supérieures (**Officiel Prévention santé et sécurité au travail, 2015**).

2.2.4 Les systèmes de cultures

En hydroponie, il existe plusieurs systèmes de culture et leur utilisation varie selon l'espace disponible, les plantes à cultiver ou encore les conditions de culture (bioponie, aquaponie).

Le système de fertirrigation type goutte-à-goutte est constitué de lignes d'arrosages déversant la solution nutritive en petite quantité très régulièrement, voire en continu. Les plants sont disposés le long de ces lignes (Figure 4). Ce système est très répandu pour de nombreuses cultures sous serre sur grandes surfaces. La variabilité de ces systèmes se trouve surtout au niveau du choix du substrat. En effet, les plants peuvent être en pot avec un mélange de terreau divers, ou dans des substrats inertes type laine de roche. Le développement des racines se fait alors entièrement dans ce milieu de culture contrôlé le plus souvent de manière automatisée. (**Lachhab & al, 2007 ; Feyen, 1976**)

Utilisant directement la gravité pour la circulation de la solution nutritive, la méthode NTF (Nutiment Film Technic) est très couramment utilisée dans les cultures hydroponiques car elle nécessite deux espaces indépendants, l'un contenant la solution nutritive qui sera oxygénée avant d'aller dans le conduit d'irrigation, et de l'autre le tube incliné (1% ou 2%) où circule le film nutritif (**Vu, 2018**).

Le système de Deep Water Culture (DWC) consiste en un bac rempli d'eau avec environ 25 cm de profondeur. L'usage d'une pompe n'est pas nécessaire, mais une pompe à air est essentielle pour maintenir un taux d'oxygène dissous assez important pour les plantes.



Figure 4 : Système de culture hydroponique goutte-à-goutte par **J.HUETE international**

L'aéroponie est une technique d'hydroponie qui consiste à pulvériser la solution nutritive au niveau des racines en de fines gouttelettes. Ainsi, l'oxygénation des racines est la plus optimale et permet à la plante de développer au maximum ses caractéristiques génétiques.

L'aéro-hydroponie est une combinaison entre un système DWC et aéroponique. Une gouttière plus profonde que le NFT est alimentée en eau par plusieurs points. Cette « nouveauté » permet d'avoir le confort hydrique du DWC et l'oxygénation optimale des racines de l'aéroponie, tout en utilisant qu'une seule pompe comme pour le NFT (**Sarlé, 2020**).

2.2.5 Le chanvre en hydroponie

Le tableau n°3 ci-dessous reprend les principaux paramètres de la culture de *Cannabis* indoor (**Green & al, 2001 ; Vanhove, 2014 ; Hermant, 2018 ; Fourinier & al, 2011**).

Tableau n°3: Conditions de culture du *Cannabis* indoor

	Température (jours & nuit)	Hygrométrie (jour & nuit)	Intensité lumineuse ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	pH	Nutriments (en dosage de NPK)	EC (mS/cm)	CO ₂ (ppm)	Durée de la phase
Semis	21 - 27 °C & 16 - 21°C	100 %	150 - 200	5,2 - 7	1 - 1 - 1	0,8 - 1	400	1 - 6 semaines
Croissance	26 - 29 °C & 21 - 24 °C	75 - 80 % (début de phase) 55 - 67 % (fin de phase)	200 - 300	5,2 - 7	2 - 1 - 1	1 - 2,5	800 - 900	1 - 3 mois
Pré-floraison	/	/	300 → 450 progressivement	/	/	/	/	1 jour - 2 semaines
Floraison	26 - 29 °C & 21 - 24 °C	55 - 67 % jour et nuit (début de phase) 50 - 62 % jour & 42 - 57 % nuit (fin de phase)	200 - 450	5,2 - 7	1 - 2 - 1	2 - 4	1000 - 1200	8 - 10 semaines
Séchage	15,5 - 21 °C	45 - 55 %	Pas de lumière	/	/	/	/	2 - 3 semaines

Dans le cas d'une multiplication par semis comme exposé dans le tableau ci dessus, il semble préférable de procéder à la scarification des graines avant semis afin d'améliorer la germination (**Green & al, 2001**). De plus, d'après une source interne au groupe Richel, la densité de plant dans ces conditions de culture peut être compris entre 2,5 et 9 pieds au m². (**Herment, 2018**)

La conservation se fait à l'obscurité à une température inférieure à 25 °C. Les échantillons secs peuvent être broyés et conservés pendant 10 semaines dans les mêmes conditions que celles précédemment décrites (**Fournier & al, 2011**).

2.2.6 L'éthéphon

Dans ces systèmes de culture, il est parfois nécessaire d'utiliser des lampes horticoles pour mieux contrôler le cycle du végétal produit. Pour le cannabis, dont la photopériode est un élément régulateur de son développement et de son cycle de floraison, ce système de lumière artificielle peut être envisagé. Néanmoins, lorsqu'il n'est pas possible

(question d'investissement ou d'espace) on peut utiliser des produits permettant la stimulation de la floraison, ce qui peut aussi raccourcir le cycle de culture.

L'éthéphon (R1150, acide 2-chloroéthylphosphonique) est l'un de ces produits. C'est un régulateur de croissance utilisé depuis plusieurs années sur des cultures comme la tomate, la betterave, et même le café pour stimuler le développement et la maturation du fruit. Lors de sa décomposition, cette molécule se transforme en éthylène (molécule gazeuse) ce qui explique ces effets sur les fruits. L'éthéphon est autorisé en Europe depuis août 2007 et est utilisé dans le monde entier (**Phytocontrol, 2022**). L'éthylène est essentiel au fonctionnement métabolique de la plante et est naturellement produit par celle-ci.

2.2.7 Éthylène

L'éthylène est une phytohormone volatile dérivée des atomes C-3 et C-4 de la méthionine (**K. Mattoo et C. Suttle, 1991**). Le système de signalisation de l'éthylène (ET) est un composant important du système immunitaire inné des plantes (**Vidhyasekaran, 2015**). Des études sur la croissance de plants de pois étiolés ont révélé une inhibition de l'élongation, une augmentation du diamètre et une croissance horizontale des pousses. On nomme aujourd'hui ces trois réponses la triple réponse. Ces paramètres sont encore parfois utilisés par les chercheurs pour identifier et mesurer l'action de l'éthylène. L'éthylène a également un effet inhibiteur sur la croissance des racines, cet effet se produisant dans les 20 minutes suivant son application, et la croissance reprend dans les 20 minutes suivant son retrait (**Sisler et Yang, 1984**). L'auxine et l'éthylène agissent en synergie pour inhiber l'élongation des racines (**Zhu et Guo, 2015**). Des cinétiques similaires ont été rapportées pour la croissance des tiges. Chez certains, comme plusieurs variétés de cucurbitacées, l'induction des fleurs femelles par l'éthylène a été démontrée (**Sisler et Yang, 1984**). Cette action d'induction floral femelle serait également liée aux auxines et cytokinines (**Hall et al, 2012**).

2.2.8 Effet sur la production des métabolites secondaires

L'éthylène induit plusieurs réponses physiologiques dans la plante, elles peuvent être inhibées ou stimulées par leur dosage ou en combinant des phytohormones. L'article de Fang et al. dresse les effets entre phytohormones et métabolites secondaires chez différents végétaux. Leurs résultats mettent l'accent sur les effets multiples de ces interactions dû aux réponses apportées par les plantes dans des situations de stress physiologiques (**Fang et al; 2014**). Une étude de 2013 révélait l'effet de l'éthéphon, appliqué en pulvérisation, sur l'augmentation en cannabinoïdes et d' α -tocophérol pendant la phase productive dans les plants de cannabis (**Mansouri & al, 2013**). Les mêmes auteurs ont précisé plus tard qu'avec des concentrations d'éthéphon de 1 et 100 μM ($\mu\text{mol/l}$) on obtenait de plus fortes teneurs en THC dans les plantes. De plus, le taux de CBD augmentait avec une concentration d'éthéphon de 10 μM , mais baissait lorsque la concentration était de 5 et 100 μM (**Mansouri & al, 2016**).

Plus récemment, un article suggère que les plants de chanvre étaient traités 7 à 14 jours après la formation des primordiaux floraux à 500 mg/l pour induire la formation de fleurs femelles sur les plants mâles (**Moon & al, 2020**).

Cette molécule semble également avoir un effet significatif sur la hauteur de la culture de blé (**Brown & Earley, 1973**).

Cependant, une étude sur l'effet de différents stress appliqués sur la plante de cannabis a vu le jour en 2021. Cet article conclut que rien n'indique que l'un ou l'autre de ces stress (inondation, éthéphon à 75mM, oïdium, herbicide et blessures physiques) ait entraîné une augmentation de la concentration de THC ou du rapport entre THC et CBD au moment de la récolte (**Toth & al, 2021**).

Un bilan assez mitigé du point de vue des conclusions, mais des effets potentiellement pertinents pour la culture à grande échelle. On peut aussi noter que la dose appliquée dans cette dernière étude se situe dans l'intervalle identifiée sans effet important par Mansouri & al en 2020.

En 2021, au sein de Gembloux Agro-Bio Tech, un essai expérimental sur le chanvre en hydroponie a utilisé l'éthéphon dans la solution nutritive pendant 15 jours. Les systèmes utilisés étaient des NFT et DWC. Lors de l'étude 2021, la dose s'est avérée trop forte pour une utilisation en solution mais que la production de CBD était plus importante en hydroponie par rapport à la culture en pleine terre. D'autres expérimentations à Gembloux Agro-Bio Tech de culture hors-sol de chanvre en chambre de culture avec une culture en pot contenant du terreau et un arrosage manuel ont également mis en évidence l'efficacité du produit en pulvérisation foliaire pour la réduction de la taille du chanvre.

2.3 La formation des cannabinoïdes

2.3.1 Les principaux cannabinoïdes

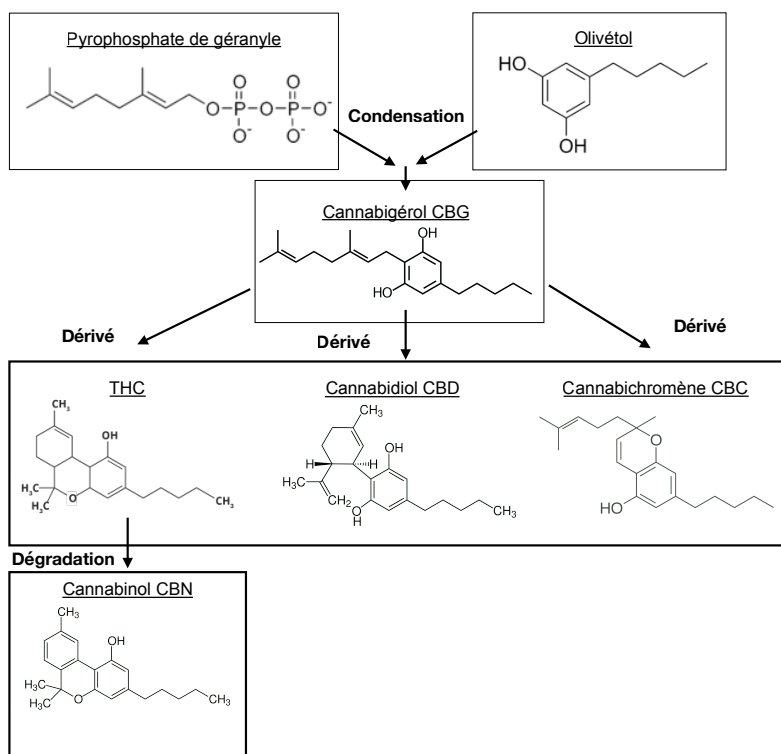


Figure 5 : Schéma simplifié de la chaîne de la transformation des principaux cannabinoïdes (d'après la description de Fournier & al, 2003)

Le schéma ci-dessus (Figure 5) présente de manière non-exhaustive les étapes de transformations pour obtenir les cannabinoïdes d'intérêt. Le cannabigérol est donc un précurseur des autres cannabinoïdes tel que le CBD, le THC ou le CBC. Le cannabinol (CBN) n'est pas issu du CBG directement, son apparition résulte de la dégradation du THC. De plus, le CBG fait apparaître principalement les formes acides des cannabinoïdes, celles-ci se transforment en forme neutre (comme sur le schéma) lors du séchage des fleurs (Fournier & al, 2003). Plusieurs rapports ont été proposés pour permettre une caractérisation des chémotypes des chanvres :

- (D-9-THC + CBN) / CBD : > 1 = phénotype drogue ; < 1 = phénotype fibre.

- D-9-THC / CBD et CBN / CBD : rapports > 1 = chanvre à résine ; rapports < 1 = chanvre textile (**Fournier & al, 2003 & 2008**).

Le CBG a montré son utilité thérapeutique sur un modèle in-vitro de neuroinflammation ainsi que sur le traitement du cancer colorectal, prometteur en préventif et curatif (**Gugliandolo et al, 2018 ; Borrelli, 2014**). De plus, une étude de Tamara T.lah comparait plusieurs effets du CBG, CBD et THC sur les cellules souches et tumorales de glioblastome. Or, il semblerait que la combinaison CBD avec le CBG ait été plus efficace que le THC (**T.lah, 2021**).

2.3.2 Méthode de quantification des cannabinoïdes

Les méthodes d'analyse sont largement représentées par des techniques chromatographiques. Avec des chromatographies en phase liquide, gazeuse ou sur couche mince (HPLC, GC et CCM), on peut identifier des pics chromatographiques caractéristiques de la présence de certains composés du cannabis (**Raharjo & al, 2004**). Dans cette étude, c'est la UPLC qui sera utilisée (Ultrapformance liquide chromatography).

Les protocoles expérimentaux seront décrits dans la partie matériels et méthodes de l'analyse en laboratoire des échantillons.

2.4 Les variétés de chanvre et leurs usages

Le tableau ci-dessous (Tableau n° 4) a été construit d'après le catalogue des semences de Hemp-it (producteur de semences de chanvre industriel).

Tableau n°4: Caractéristiques des variétés de chanvre industriel disponibles chez Hemp-it

Variétés	Période de pleine floraison	Faculté germinative minimale (%)	Sensibilité à l'orobanche	Usage en Wallonie	Durée du cycle total (Jours)	Type sexuel
Félinea 32	Mi-Août	90,2	Faible	Paille et CBD	133 - 138	Monoïque
USO 31	Début Août	86,2	Moyenne	Mixte	122 - 127	Monoïque
Fédora 17	Mi-Août	91,8	Moyenne	Mixte et CBD	129 - 134	Monoïque
Futura 75	Mi à fin Août	89,4	Faible	Paille et CBD	97 - 102	Monoïque
Futura 83	Fin Août	/	Faible	Paille	112 - 117	Monoïque
Dioïca 88	Début septembre	/	Moyenne	Paille et CBD	120 - 125	Dioïque
Férimon	Mi-Août	88,2	Moyenne	Mixte	129 - 134	Monoïque
Orion 33	Mi à fin Août	/	Faible	Paille	138 - 143	Monoïque
Santhica 27	Mi-Août	84,4	Moyenne	Fibre	90 - 95	Monoïque
Santhica 70	Mi à fin Août	89,6	Moyenne	Fibre	97 - 102	Monoïque
Fibror 79	Fin Août	85,9	Faible	Fibre	101 - 106	Monoïque
Muka 76	Fin Août	83	Moyenne	Fibre	102 - 108	Monoïque
Earlina 8 FC	Fin Juillet	94	Moyenne	Graine	115 - 120	Monoïque

Le taux de CBD dans certaines de ces variétés est déjà identifié comme intéressant. Les variétés Fédora 17 ainsi que Futura 75 semblent assez sensible à l'orobanche (**Thouminot, 2015**). La variété Dioïca 88, seule variété dioïque, avait eu de mauvais taux de germination et des hauteur beaucoup trop importantes lors d'études précédentes à

Gembloux (source interne). Pour l'étude du taux de CBD, c'est la variété Féлина 32 qui se détache par ses caractéristiques (taux de CBD avoisinant les 1,5% selon **Thouminot**).

Le cannabinoïde précurseur du THC et du CBD, le CBG, est un composé identifié en concentration notable dans la variété Santhica 27 (**Stambouli & al, 2011**). C'est le cas également de Santhica 70, mais à cause de son caractère légèrement plus tardif, Santhica 27 lui sera préférée (taux de CBG entre 1% et 1,2% chez S27 d'après l'étude de **Fournier & al, 2004**).

2.5 Rentabilité de cette culture

2.5.1 Le marché des fibres et des graines

En prenant en compte l'exploitation de la paille et du chènevis de chanvre, on obtient une marge semi-nette comprise entre 183 et 538 €, avec une moyenne habituelle de 383 € / ha. Ces chiffres sont obtenus avec une variation de rendement paille de 4 à 6T / ha et de 0,8 à 1,1 T / ha de chènevis. À titre de comparaison le blé a en moyenne une marge semi-nette de 610 € / ha et le colza de 694 € / ha (**Interchanvre, Plan Filière, 2017**).

Le prix de vente des graines est estimé à environ 1400 €/T avec une production à l'hectare d'environ 500 Kg de graines et de 4 tonnes de paille (d'après la fiche technique de la **Culture du chanvre BIO (Bio Provence)**). La marge semi-nette à l'hectare est donc environ 2 fois supérieur à celle habituelle pour la paille et le chènevis. Néanmoins, la production de graine occupe la parcelle plus longtemps.

2.5.6 Le marché des fleurs

Le marché des fleurs de chanvre est encore assez instable et propose des produits importés, peu contrôlés à des prix entre 7 et 12 € le gramme selon la variété du chanvre vendu pour son taux de CBD variable de 8 à 14 %. Dans le marché illégal en Belgique, le prix du gramme variait entre 3 et 4,25 € en 2012. À cette période, les prix ont plutôt eu tendance à augmenter (**Vanhove & al, 2012**), mais depuis 2019, avec le passage du CBD comme produit de tabac, les prix sur le marché du CBD ont tendance à baisser. Le passage au cannabis légal au Canada peut servir d'exemple, et aujourd'hui il est observé que les prix des fleurs légales sont plus élevés que le prix de ces fleurs sur le marché illégal (**Wadsworth & al, 2022**).

2.6 Conclusion

Dans cette première partie, nous avons constaté les nombreux enjeux qui entourent cette plante : ses intérêts agronomiques, ses multiples utilisations et les nombreuses recherches dont elle fait l'objet dans le domaine médical. L'utilisation en hydroponie de cette plante est plutôt pour un usage récréatif, mais tend à s'industrialiser pour maîtriser des processus de culture adaptés aux exigences du marché médical. Les cultures en terre continuent pour des usages paille, graine et fibre principalement, mais pourraient devenir à terme une ressource de fleurs également. Dans le cadre d'une possible utilisation du CBD et du CBG dans différents domaines, à partir de variétés de chanvre industriel, quelle serait la conduite de culture la plus adaptée ?

Dans un premier temps, cette étude vise à étudier l'effet de deux conduites de cultures, une en pleine terre et l'autre en hydroponie minérale. En parallèle, sera menée une expérience visant à étudier l'effet du régulateur de croissance, l'éthéphon, mis en solution dans le système hydroponique. Cette étude s'effectue sur 2 variétés présentées précédemment, la Féлина 32, intéressante pour son taux de CBD et la Santhica 27 intéressante pour son taux de CBG et sa précocité. Enfin, l'objectif final de cette étude est

d'observer dans quelles conditions la production de ces métabolites secondaires du chanvre sont les plus rentables économiquement.

CHAPITRE I. Test préliminaire : Dose d'Éthéphon

1. Matériel et méthode

Cette expérience préliminaire a pour objectif d'évaluer l'effet de la dose du régulateur de croissance, Éthéphon, incorporée à la solution nutritive hydroponique afin d'observer son effet sur la taille des plants de chanvre. En effet, nous avons vu dans la bibliographie que celui-ci avait un effet sur la taille d'autres cultures. Le chanvre est une plante pouvant mesurer entre 2 et 5 mètres de hauteur. Dans le cas de l'exploitation des fleurs et non des fibres, cette taille importante peut être problématique et le choix des infrastructures utilisables pour la culture est ainsi limité. Ce test vise à pré-évaluer les effets possibles du produits en solution sur les facteurs de croissances agronomique. L'analyse et la quantification des métabolites est réalisé sur le test suivant.

1.1 Culture et paramètres mesurés

Sur une période de 6 semaines après la mise en système, nous étudions le développement des plants de chanvre dans 3 systèmes hydroponique NFT reliés chacun à une cuve de 400 litres. Les apports d'engrais minéraux, de base et d'acide sont effectués par un ordinateur. Cette installation est située dans une serre en verre équipée de lampes horticoles HPS qui sont utilisées pour favoriser le développement des plants les 2 premières semaines. Nous relèverons deux fois par semaine la taille des plants, leur nombre de noeuds, ainsi que les paramètres des systèmes (l'électroconductivité (EC), le pH et la température de l'eau). Après la mise en solution du produit (après 14 jours dans le système), trois relevés par semaine sont pratiqués. Le produit est conservé 2 semaines en solution. De plus, par division de la taille totale par le nombre de noeud, nous obtenons également la longueur moyenne d'un entre-noeud.

Il y aura 3 doses étudiées, une par système (ordre décroissant de concentration) :

- Système n°1 (dose 1)
- Système n°2 (dose 2)
- Système n°3 (dose 3)

Chaque système sera composé de 8 plants de chanvre de 2 variétés (Féline 32 et Santhica 27). Il y aura 16 plants de chanvre par système soit, environ 4 plants par mètre carré. (figure 6)

Le pH est maintenu entre 5,5 et 6,5 et l'EC est de 1000 μ S/cm puis, après 14 jours de 1500 μ S/cm puis de 2000 μ S/cm encore 14 jours plus tard. Cette évolution de la concentration des nutriments suit le développement végétatif de la plante. L'éthéphon est ajouté 14 jours après la mise en système des plants et est retiré 2 semaines après.

1.2 Récolte

Après 36 jours de culture en hydroponie les plants ne sont plus adaptés aux systèmes NFT classique (développement racinaire trop important pour les NFT). Le test préliminaire prend fin. Nous relevons lors de la récolte la masse de la plante, le nombre de fleurs (s'il y a eu induction de floraison), la masse des fleurs, ainsi que les 2 noeuds entre lesquels on observe un raccourcissement des entre-noeuds.

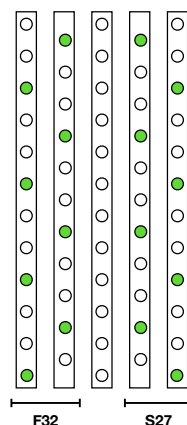


Figure 6 : Répartition des plants dans les systèmes NFT

1.3 Hypothèses

Concernant l'effet de ce produit sur la taille de la plante, nous avons posé les différentes hypothèses présentées en figure 7. L'éthylène ne devrait pas faire varier le nombre de noeuds observés. Dans les hypothèses ci-dessous et pour les plantes dont le développement serait complet (4 mois de culture), le nombre de noeuds ne sera pas variable.

À gauche, un plant de chanvre témoin est représenté. Ensuite, de gauche à droite, nous avons, un plant dont la croissance aurait été stoppée suite à l'application du produit. Ensuite, un plant dont la taille globale aurait été stoppée mais avec un décalage avec la date d'application. Le quatrième serait le résultat plus intéressant pour notre usage, avec réduction de la taille et autant de noeuds que le témoin donc une réduction de la longueur moyenne de l'entre-noeud. Le suivant montre un plant avec une entre-noeud plus court mais avec un arrêt de croissance avant la fin du développement. Enfin, le dernier n'aurait pas d'effet sur la taille finale ni le nombre de noeuds, mais aurait eu un passage où la longueur de l'entre-noeud se serait raccourcit.

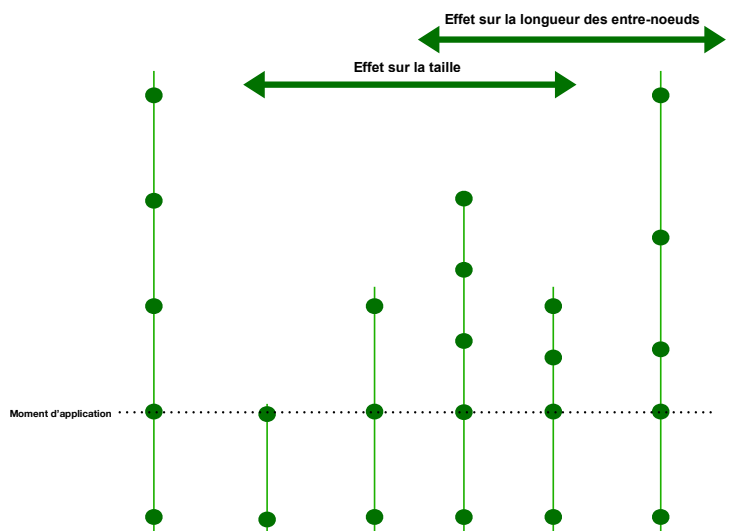


Figure 7 : Hypothèses sur le développement des plants suite au traitement

1.4 Analyse des résultats

Dans ce premier test nous regardons l'effet de la dose de produit (le système '1', '2' ou '3') et de la variété sur différentes variables. La taille, le nombre de noeud, la longueur moyenne d'un entre-noeud et la biomasse sont les 4 paramètres qui sont sujet à une analyse statistique. Les 3 premiers de ces paramètres sont des mesures répétées au cours du temps. Afin d'inclure ce facteur temps, nous utilisons un modèle mixte pour étudier les données récoltées au cours de la culture.

En ce qui concerne les données obtenues lors de la récolte des plants (4 paramètres), il s'agit de données ponctuelles ne faisant pas intervenir la notion de temps. Par conséquent, une anova est ici appropriée. Enfin, le test de Tukey sera utilisé pour chaque variété pour comparer 2 à 2 les systèmes. Les scripts des 3 tests statistiques sont présentés en annexe n°1.

2. Résultats

2.1 Données de la croissance

Afin de prendre en compte la notion de temps dans l'analyse des résultats obtenus pendant la culture, nous utilisons un modèle mixte. Cette analyse étudie les 3 paramètres suivis (taille, nombre de noeuds et la longueur de l'entre-noeud).

Ce test confirme qu'il existe un effet de la dose d'éthéphon sur ces 3 paramètres. Cependant en étudiant les systèmes 2 à 2, on observe que les principales différences significatives sont entre la dose 1 et 3 ainsi qu'entre la dose 2 et 3 pour la taille et la longueur de l'entre-noeud (figure 8 et 9). De plus, on peut noter qu'il existe une différence importante du nombre de noeud entre la dose 1 et 2 seulement chez la variété F32 (figure 8).

Dans les autres paramètres, l'effet des 2 plus fortes doses (1 et 2) peut être qualifié de semblable pour les 2 variétés.

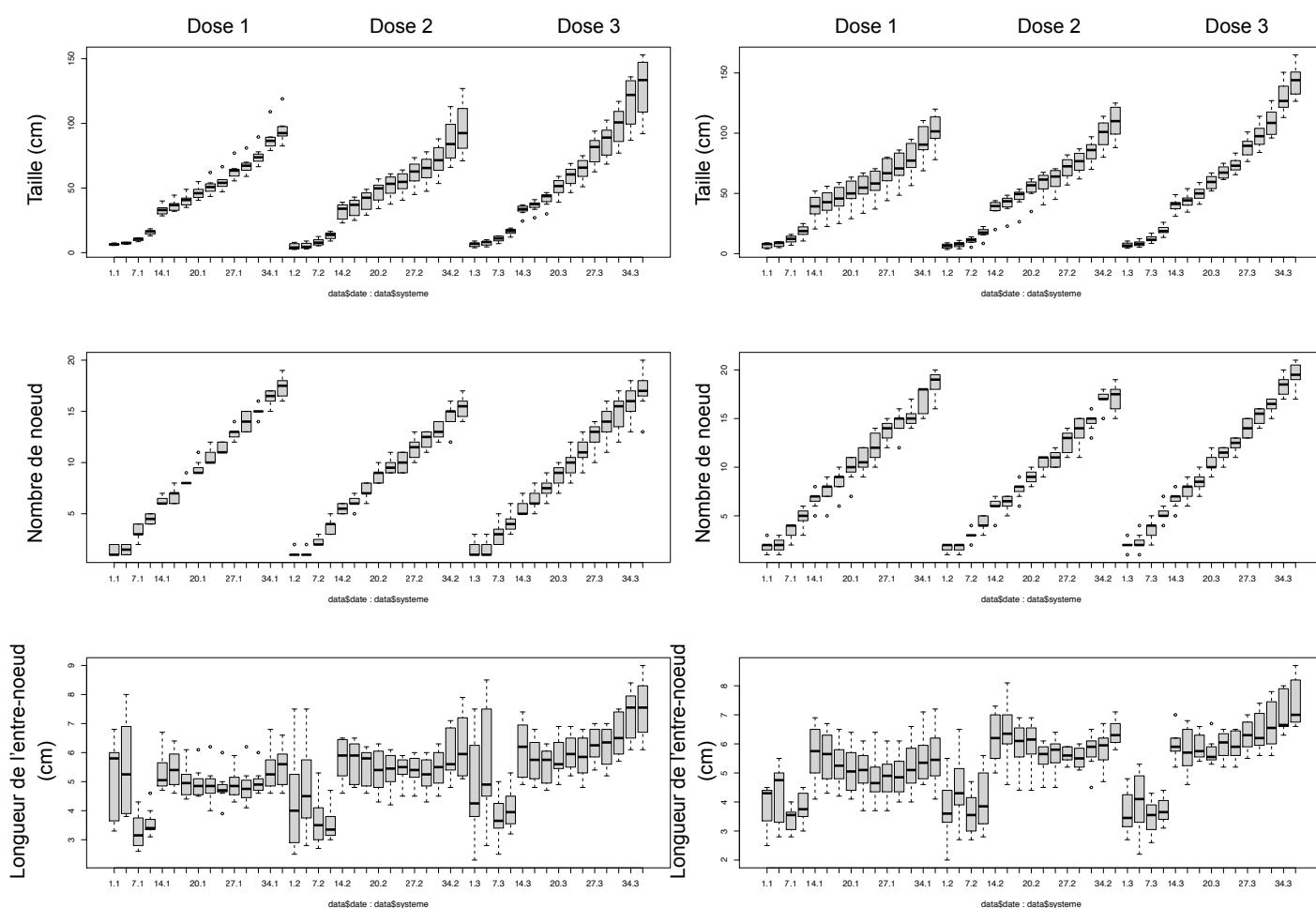


Figure 8 : Boxplots des 3 facteurs étudiés par le modèle linéaire mixte sur F32 (les abscisses sont composés des dates pour chacun des systèmes de culture)

Figure 9 : Boxplots des 3 facteurs étudiés par le modèle linéaire mixte sur S27 (les abscisses sont composés des dates pour chacun des systèmes de culture)

2.2 Données de la récolte

Les paramètres étudiés au cours du temps dans le paragraphe précédent sont également étudiés ponctuellement, à la fin de l'expérience

Avec ce premier test, nous pouvons évaluer l'effet du produit 36 jours après la mise en système des plantes. La taille, le nombre de noeuds, la longueur de l'entre-noeud et la masse de la plante sont étudiés à la fin de l'expérience. Les résultats sont présentés en figure 10. L'anova ainsi réalisée témoigne de l'effet de la dose de l'éthéphon sur tous les paramètres étudiés pour les 2 variétés de chanvre.

Le test de TukeyHSD présenté en figure 11 nous montre que la taille est semblable pour la dose 1 et 2 (les plus concentrées) mais sont différentes avec la dose 3 (la plus faible). Le même schéma est observable pour les 2 variétés. La dose 2 semble avoir un effet plus important sur la diminution du nombre de noeud, mais n'est significativement différent que de la dose 1 pour la variété F32 et de la dose 3 pour la variété S27.

La longueur moyenne de l'entre-noeud traduit les mêmes résultats que pour la taille. La plus faible dose a un effet significativement plus faible sur la diminution de la longueur de l'entre-noeud.

Concernant la biomasse fraîche, la différence est prouvée entre la dose 1 et 3 pour Féлина 32 et entre 3 et 1 et entre 3 et 2 par Santhica 27. Il existe une différence significative entre les 2 variétés seulement sur le nombre de noeud pour les systèmes 2 et 3 (doses 2 et 3).

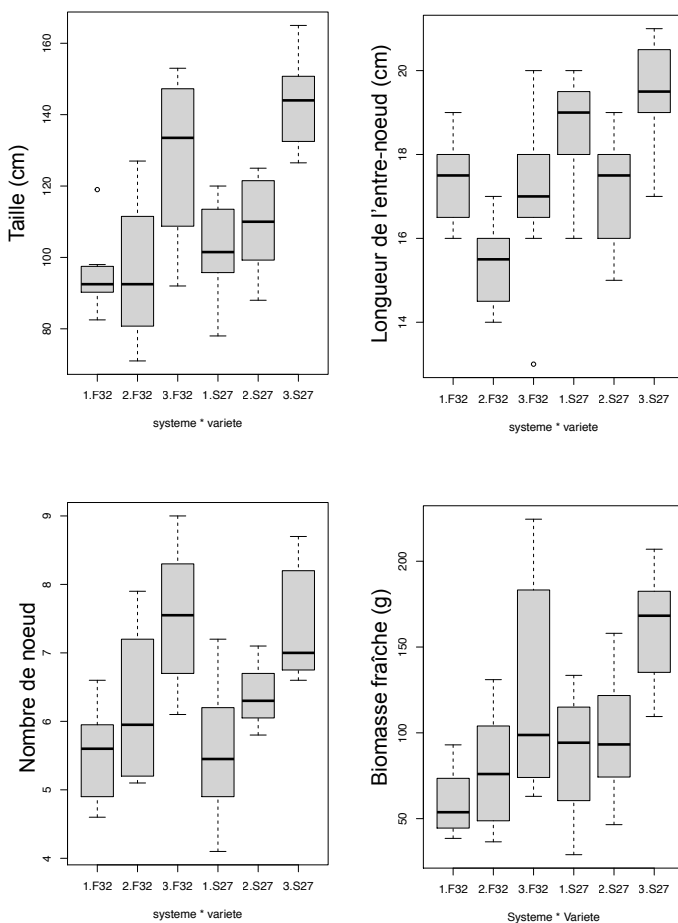


Figure 10 : Test ANOVA appliqué aux données de la récolte pour les 4 paramètres mesurés

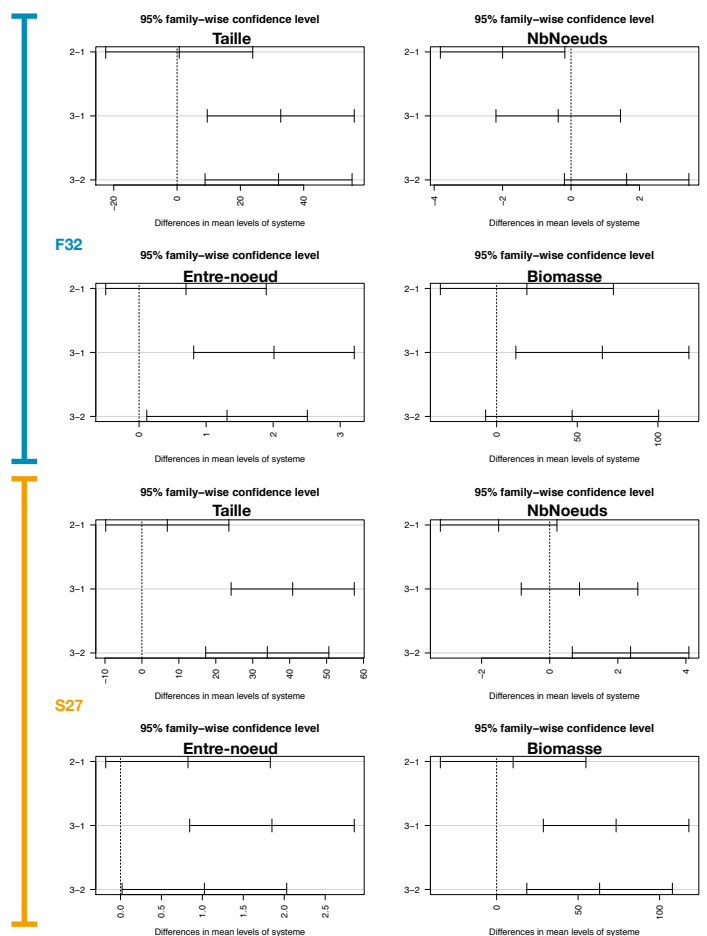


Figure 11 : Test de Tukey appliqué aux données de la récolte (l'axe des ordonnées représentent les interactions 2 à 2 des systèmes)

3. Discussion

Cette première expérience nous permet d'appréhender l'effet du produit sur les plantes ainsi que sur le développement général de celle-ci en hydroponie. Ce test préliminaire présente 36 jours de culture hydroponique ce qui reflète environ un quart du cycle de culture total. Le système utilisé dans cette première étude laisse les racines des plantes se développer directement dans la solution après leur sortie du petit bloc de laine de roche de semis. Un système à plus grande échelle pourrait utiliser un support de culture plus épais au travers duquel les racines doivent passer avant de baigner dans la solution. Comme pour les tomates, la laine de roche est souvent utilisée.

Cette première expérience nous permet de confirmer que l'éthéphon en solution pendant 2 semaines a des effets sur l'élongation des cellules (effet sur la taille et la longueur de l'entre-noeud). Un effet sur la quantité de noeuds semble exister, ce qui est surprenant car l'éthylène n'a pas cette fonction. Néanmoins, cet effet est peut être visible sur ce temps de culture mais se dissiperait par la suite. Cet effet possible serait à confirmer par la suite. La plus forte dose a causé un stress important mais pas létal pour les plantes et les 2 autres doses ont eu des effets plus limités sur la taille. Cependant, ces 3 doses pourraient s'avérer intéressantes concernant l'effet sur les concentrations en métabolites d'intérêt.

Dans le cadre de l'expérience à plus grande échelle, des modifications devront être apportées pour améliorer l'analyse de l'effet de ce produit en solution. Elles sont présentés dans la partie suivante.

CHAPITRE II. Effet agronomique des itinéraires culturaux

1. Matériel et méthode

1.1 Chanvre en terre

1.1.1 Structuration de la parcelle

Dans l'objectif de comparer le développement des plants de chanvre entre la pleine terre et le hors-sol, nous installons une culture sur une parcelle située à 600 mètres de la serre ce qui nous assure un contexte climatique extérieur similaire et des ensoleillements comparables.

La parcelle est découpée en sous-parcelles appelées « bloc ». Il y a au total 6 blocs cultivés, 3 pour chaque variété étudiée (Félina 32 et Santhica 27). Les variétés sont alternées un bloc sur 2 afin de ne pas avoir d'effet de l'exposition au soleil au cours de la journée (Bloc 202, 302..., 702). Chaque bloc mesure 2 mètres par 8, mais avec les passages, on notera une surface cultivée par bloc de 14,76m² (Figure 12). Les 6 blocs ainsi disposés sont entourés de blocs supplémentaires disposés de la même manière afin d'éliminer tout effet de bordure et de contact avec des cultures adjacentes.

1.1.2 Mise en place

Le semis s'effectue après les saintes glaces avec un sol réchauffé entre 10 et 12°C (figure 13). Cette année, le semis a lieu au 10 mai avec une densité de 40Kg/ha. Une fumure post-semis est effectuée (100kg/ha azote, N27% amonitrate).

Aucune autre intervention ne sera nécessaire durant la culture (arrosage, désherbage ou traitement).

1.1.3 Méthode de relevé des données

Afin d'étudier le développement des plants tout au long de la culture, nous examinons des plants de chaque bloc dans un quadrat. Chaque quadrat fait 50cm par 50cm soit 0,25m² et est disposé aléatoirement dans le bloc, hors périphéries. Chaque semaine, la taille et le nombre de noeuds sont mesurés sur 10 plants de chaque quadrat étiquetés dès la disposition du quadrat après l'installation des plants (**Annexe n°2**). Ils sont suivis durant toute la culture jusqu'à la récolte.

1.1.4 Analyse des résultats

Pour cette étude au champ, nous prélevons un échantillon (quadrat) qui représentera la population des plants présents sur la parcelle. Compte tenu des mesures répétées à différentes dates, et des 3 parcelles par variété, nous utilisons un modèle statistique mixte ainsi que des anova. De plus, le test de Tukey nous permettra de visualiser la similarité des blocs d'une même variété. Nous suivons la même démarche que pour la partie précédente. Les données acquises seront comparées à celles de la table témoin de la serre (décrite dans la partie suivante) afin de juger de l'effet de l'itinéraire cultural.



Figure 12 : Schéma des parcelles de la culture en terre



Figure 13 : Photo du semis au champ (crédit : Arthur Libault)

1.2 Chanvre en hydroponie

1.2.1 Localisation

La modalité de culture hors-sol s'effectue dans une serre bioclimatique demi-chapelle située sur la toiture du bâtiment de recherche « TERRA ». Cette serre offre une exposition similaire à la culture au champ, tout en optimisant les conditions de températures intérieures par la récupération des pertes de chaleur du bâtiment.

1.2.2 Disposition

Dans cet espace, des gouttières Goponic® multifonctions sont utilisées en NFT sur pain de laine de roche comme sur la figure 14. Ces gouttières sont disposées par 5, le bloc ainsi construit mesure 3 mètres de longueur pour 1,23 m de large et est composé de 14 trous par gouttière, soit 70 emplacements au total. Afin de respecter des faibles densités de cultures et d'avoir un espacement homogène entre les plants, entre 3 et 4 plantes sont disposées par gouttière, soit 14 plantes par bloc de culture (soit 56 plantes en hydroponie). Nous avons à notre disposition 4 blocs de cultures qui constituent 4 modalités :

1. Dose N°1
2. Dose N°2
3. Dose N°3
4. Témoin sans éthéphon

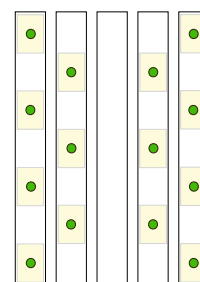


Figure 14 : Schéma de culture en hydroponie (modèle sur 1 table)

Dans chacun des blocs, chaque plante est considérée comme une répétition. Les 4 gouttières d'un même bloc étant reliées au même bassin, il n'y a donc pas d'indépendance (figure 15). La gouttière centrale n'est pas exploitée. Les bassins de chaque bloc font 100 L. La régulation des paramètres des systèmes se fait de manière automatique via un ordinateur de contrôle et ajuste les engrais et le pH de chaque bloc de culture hydroponique. L'éthéphon est mis en solution à J21 et enlevé 2 semaines plus tard.

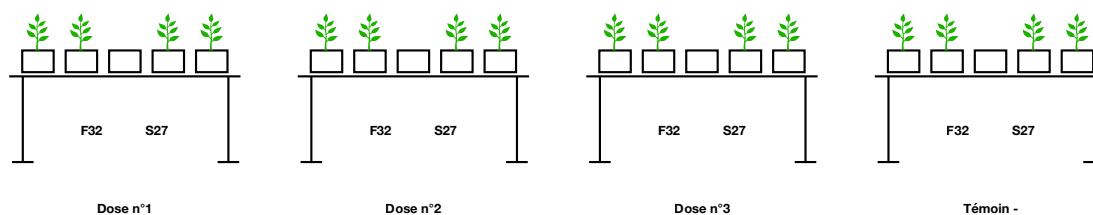


Figure 15 : Schéma de culture général

1.2.3 Méthode de relevé des données

Nous contrôlons les mêmes paramètres que pour le test préliminaire sur la dose d'éthéphon. Tailles et nombre de noeuds sont mesurées chaque semaine sur les plantes. La longueur de l'entre-noeud est calculée à partir des 2 paramètres précédents. La biomasse, le nombre de fleurs ainsi que leur masse sont acquises lors de la récolte en fin de culture avec en plus la circonférence de la tige qui sera mesuré.

1.2.4 Analyse des résultats

Dans cette situation, toutes les plantes font l'objet d'une analyse individuelle. Chaque plante est considérée comme une répétition, il y a donc 7 répétitions pour chaque variété de chaque système. Néanmoins, nous ne sommes pas dans un système où les répétitions sont indépendantes. Compte tenu de ces différentes contraintes, nous utilisons un modèle

statistique mixte qui nous permet de valider la significativité des résultats obtenus sur toute la durée de la culture.

2. Résultats

2.1. Effet du système de culture : Champ / serre hors-sol

2.1.1 Conditions de cultures

Tableau n°5 : Tableau des densités de culture

	F32.202	S27.302	F32.402	S27.502	F32.602	S27.702	Serre
Densité moyenne (plant/m2)	154	114	148	142	172	180	4,7

Le tableau n°5 présente les densités de culture du champ et en serre. La densité au champ est presque 30 fois supérieure à celle de la serre.

Grâce aux équipements présents sur le toit et à l'intérieur de la serre, plusieurs paramètres climatiques sont suivis. Le taux de CO2 dans la serre était en moyenne de 437,1ppm avec de faibles variations au cours de la culture. L'ombrage de la serre est réglé pour se déclencher au-delà d'un ensoleillement supérieur à 450W/m2. Sur la figure 16 nous observons les courbes de températures intérieures (en bleu) et extérieures (en gris). Le système de la serre déclenche un chauffage pour conserver la température intérieure à 20°C minimum. Lorsque les températures descendent, la serre est souvent 5°C ou plus au-dessus de la température extérieure, et lorsque la température augmente la serre s'ouvre pour diminuer l'écart entre les 2 températures.

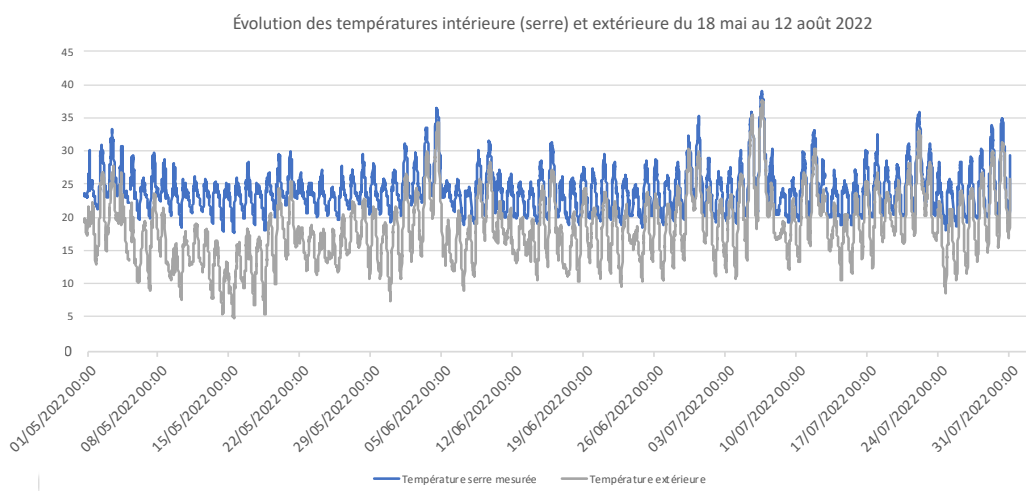


Figure 16 : Graphique d'évolution des températures intérieure et extérieure obtenu par la station météo de la serr'ure

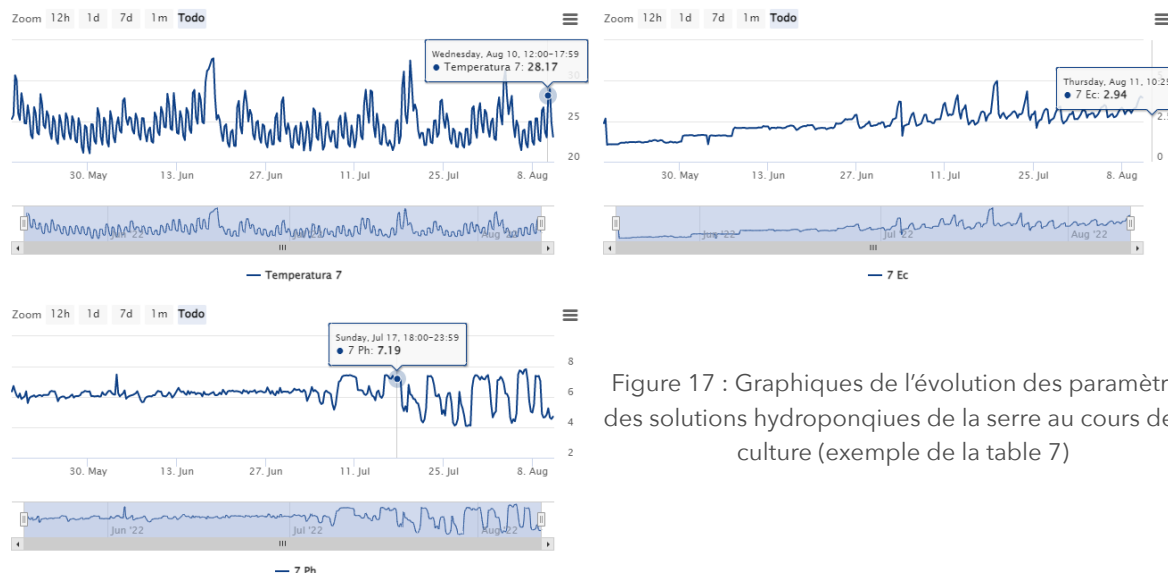


Figure 17 : Graphiques de l'évolution des paramètres des solutions hydroponiques de la serre au cours de la culture (exemple de la table 7)

Concernant les systèmes de cultures de la serre, les courbes de la table n°7 (dose 1) sont présentées ci-dessus en figure 17. Les tables sont très semblables entre elles. On remarque dans la figure 17 que la température de l'eau des bacs de cultures suit la température dans la serre. Au cours du mois de mai et de juin, l'électroconductivité (EC) a été augmentée 3 fois (paliers visibles sur la figure 17 2ème graphique). Le pH des solutions était compris entre 5,5 et 6,5 et on observe que sur la figure 17, le pH est bien stable vers 6 sur une majeure partie de la culture. Cependant, pour l'EC et le pH, on observe une perte de la stabilité des conditions avec des fluctuations très importantes sur le dernier mois et demi de culture.

2.1.2 Homogénéité au champ

Dans cette partie, nous testons l'homogénéité des blocs cultivés au champ.

2.1.2.1 Données de croissances

Concernant la variété S27 et d'après un test statistique (modèle mixte), nous pouvons dire qu'il existe un effet sur la taille et sur la longueur de l'entre-noeud. Aucune différence n'est identifiable concernant le nombre de noeud. C'est la parcelle 302 qui se différencie à chaque fois des 2 autres parcelles. On remarque que la parcelle 302 présente la plus grande variabilité de valeur avec des minimums très bas et des maximums proches des autres parcelles.

Pour féline 32, c'est le bloc 602 qui se distingue au niveau des entre-noeuds avec une longueur moyenne significativement plus importante que les autres blocs de cette variété.

2.1.2.2 Données de récolte

Au moment de la récolte, nous prélevons également un autre quadrat précédemment délimité et choisi aléatoirement (cf figure 12). Celui suivi au cours de la culture sera le n°1 et le n°2 permettra d'évaluer les effets éventuels des mesures hebdomadaires réalisés sur le premier quadrat, mais aussi d'évaluer la variabilité intra-bloc. Avec un test anova, nous obtenons le tableau n°6 ci-dessous.

Dans le tableau n°6, pour la parcelle 302, on remarque que les deux quadrats sont significativement différents pour les 3 paramètres : les plantes du second quadrat ont une taille moyenne plus importante que le n°1. Pour la parcelle 502, il n'existe pas de différence concernant la longueur de l'entre-noeud, mais existe pour la taille et le nombre de noeuds.

Tableau n°6 : p-valeur issues de tests ANOVA sur les données de récolte de S27 sur les 3 paramètres contrôlés entre les 2 quadrats de chaque parcelle (p-valeur < 0,05 présentées en couleur)

Parcelle / Paramètre	Taille	Nombre de noeud	Longueur de l'entre-noeud	Commentaire
302	3,825E-05	1,486E-04	0,03314	N°2 plus grand
502	0,002668	0,02081	0,06446	N°1 plus grand
702	0,7581	0,428	0,3927	Pas de différences

Cependant, pour la 502, c'est la taille moyenne du quadrat n°1 qui est la plus grande. Enfin, pour la 702, on considère que les 2 quadrats sont semblables selon ce test statistique.

Concernant la féline 32 (Tableau n°7), on observe aucune différence significative entre les 2 quadrats des parcelles 202 et 402. Il semble cependant y avoir une différence entre les 2 quadrats de la parcelle 602 sur le paramètre longueur de l'entre-noeud, où le quadrat n°1 montre des longueurs plus importantes que le second quadrat

Tableau n°7 : p-valeur issues de tests ANOVA sur les données de récolte de F32 sur les 3 paramètres contrôlés entre les 2 quadrats de chaque parcelle (p-valeur < 0,05 présentées en couleur)

Parcelle / Paramètre	Taille	Nombre de noeud	Longueur de l'entre-noeud	Commentaire
202	0,8904	0,4562	0,1323	Pas de différences
402	0,2851	0,917	0,8138	Pas de différences
602	0,7719	0,2521	0,02726	N°1 plus grand

2.1.3 Comparaison des systèmes de culture

2.1.3.1 Données de croissances S27

Ici, nous étudions l'effet de l'itinéraire technique (Serre hors-sol / champ). Les données du champ sont décrites par 30 plantes et celles de la serre par 7 plantes dont les 3 paramètres présentés en figure 18 ont été mesurés. Le modèle statistique utilisé ici est effectué sur les données entre les jours 42 et 63 (temps commun des mesures entre les 2 systèmes). Pour chacun des 3 paramètres, on remarque une différence significative entre les 2 systèmes de cultures. Le système serre hors-sol a permis de favoriser la taille et le nombre de noeuds. La longueur moyenne de l'entre-noeud est plus faible que pour les données du champ (graphique C de la figure 18).

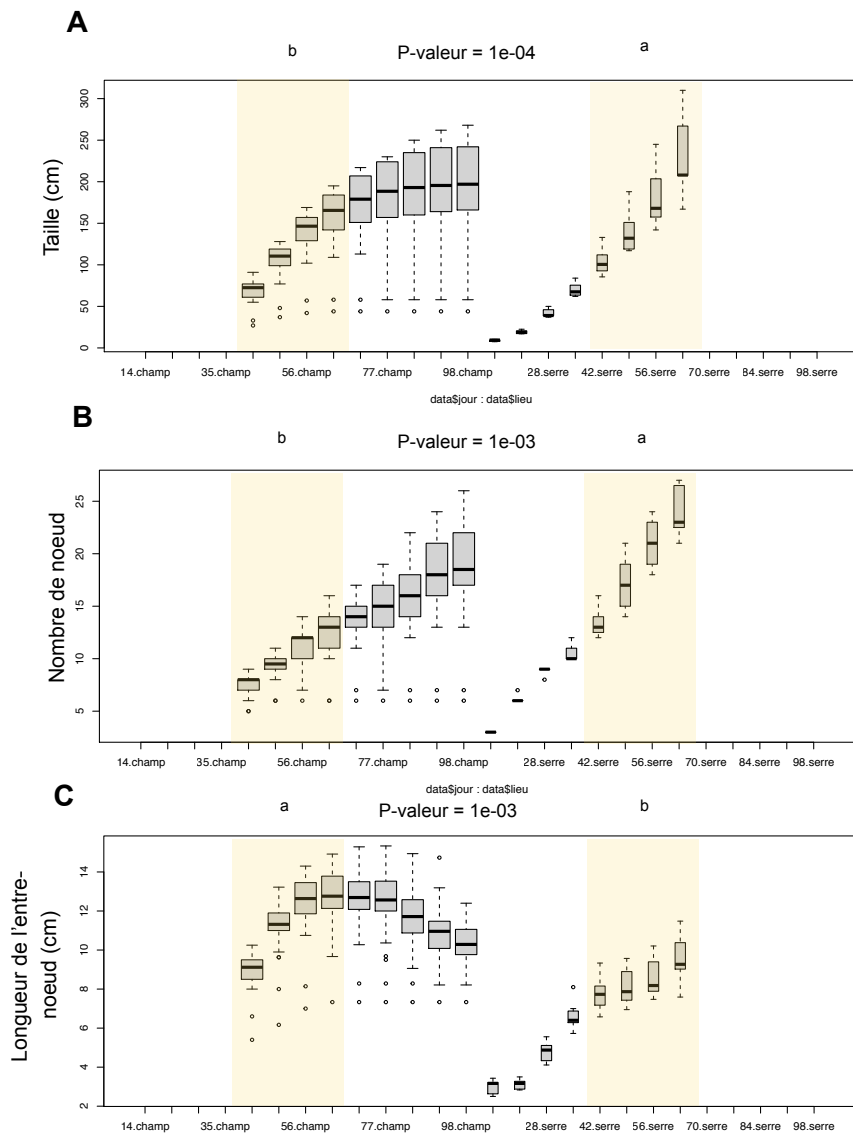


Figure 18 : Boxplot du modèle linéaire mixte appliqué aux données temporelles de Santhica 27 au champs (30 plantes) et en serre (7 plantes) pour les 3 paramètres contrôlés, uniquement sur les dates communes

2.1.3.2 Données de récolte S27

En utilisant les données totales acquises lors de la récolte des S27 (218 plants au champ et les 7 plants témoin de la serre), nous obtenons les résultats suivants. Il existe une différence significative sur tous les paramètres étudiés. La serre présente une taille et un nombre de noeud plus important que le champ (p -valeur taille = $2,007e-13$; p -valeur nbnoeud = $2,2e-16$). Mais la longueur moyenne de l'entre-noeud est significativement plus courte en serre. Avec les données des plantes échantillonnées (30 plantes au champ et 7 en serre) nous étudions des paramètres supplémentaires présentés sur le figure 20. La biomasse fraîche, la masse des fleurs fraîche, le pourcentage de fleur (issu d'un calcul des 2 précédents paramètres) et la circonférence de la tige sont mesurés sur ces 37 plantes. Les tests statistiques effectués nous présentent une différence significative marquée pour chacun de ces paramètres.

2.1.3.3 Données de croissances F32

Pour la variété Féлина 32, le système de culture semble avoir un effet semblable à celui sur la variété précédente. Le modèle statistique a été appliqué sur les données de croissance (30 plantes au champ et 7 plantes en serre) entre les dates 42 et 63 (zones jaunes sur la figure 19). En comparant ces zones entre elles pour chaque paramètre suivi, nous pouvons dire que l'environnement serre et le système de production hors-sol a permis de favoriser le développement végétatif des plantes (effet significatif pour chacun des 3 paramètres).

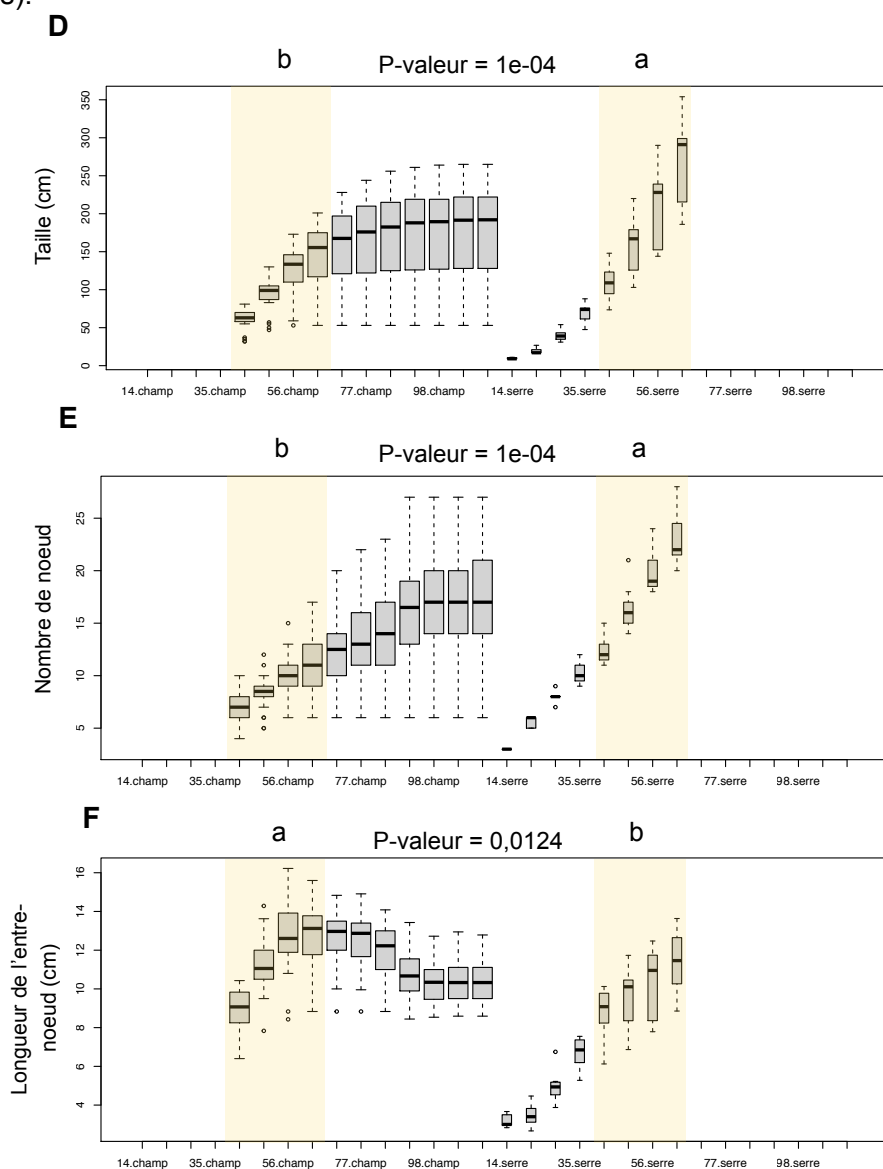


Figure 19 : Boxplot du modèle linéaire mixte appliqué aux données temporelles de Féлина 32 au champs (30 plantes) et en serre (7 plantes) pour les 3 paramètres contrôlés, uniquement sur les dates communes 25

2.1.3.4 Données de récolte F32

En utilisant les données de la récolte pour féлина 32 (237 plantes pour le champ et 7 en serre) on obtient un effet significatif pour le paramètre 'taille' et 'nombre de noeud'. Avec, comme exprimé avec le modèle mixte, des valeurs plus élevées pour les plantes dans le système serre. Néanmoins, il n'existe pas d'effet sur la longueur de l'entre-noeud qui est semblable entre les 2 systèmes de culture, contrairement aux observations faites sur la variété S27.

En ce qui concerne les données des échantillons (30 plantes au champ et les 7 de la serre), où nous avons mesuré d'autres paramètres, on obtient les histogrammes présentés en figure 20. Ce test anova sur les valeurs échantillonnées montre également l'absence d'effet sur la longueur de l'entre-noeud ainsi que sur le paramètre 'pourcentage de fleur' (rapport entre la masse de fleur et la biomasse totale de la plante) (voir graphique du même nom en figure 20). Les paramètres 'biomasse' (matière fraîche), 'masse des fleurs fraîches' et 'circonférence de la tige' montrent d'importantes différences entre les 2 systèmes de production, avec toujours, des valeurs plus importantes pour la culture sous serre.

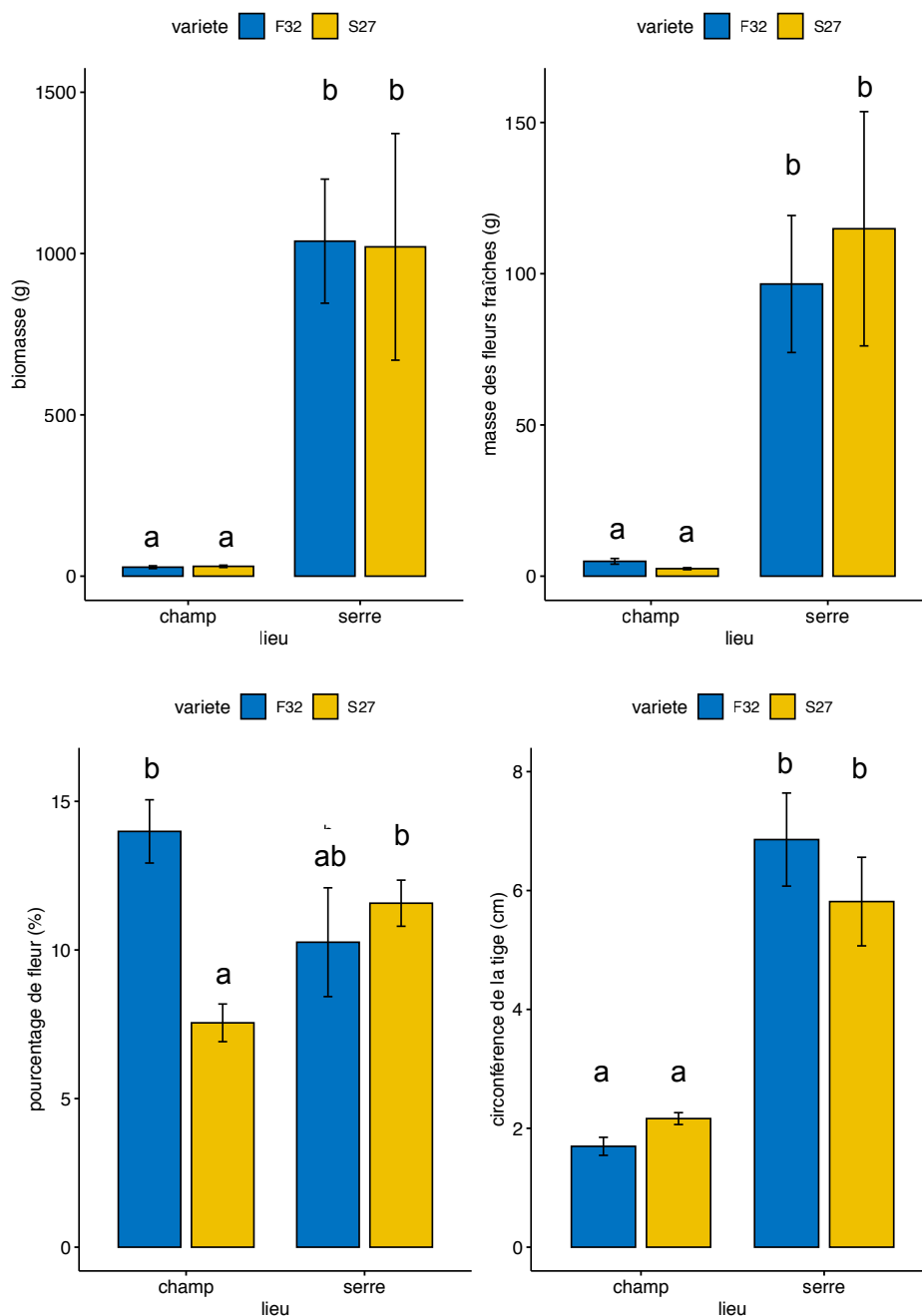


Figure 20 : Barplot des données des récolte de Féлина 32 et Santhica 27 au champ (30 plantes) et en serre (7 plantes) pour les 4 paramètres supplémentaires

2.2 Effet de l'éthéphon (serre)

2.2.1 Données de croissance

Dans la serre, un test ANOVA sur les données du jour 14 nous permet de montrer l'homogénéité des plants avant l'application de l'éthéphon. La taille et le nombre de noeud sont semblables entre les tables de culture. Ce test nous montre néanmoins qu'il existe une légère différence significative (p -valeur = 0,04888) sur le paramètre longueur de l'entre-noeud de la plante sur la variété F32 uniquement. Cependant, en effectuant une comparaison 2 à 2, on remarque que le plus grand écart se situe entre la dose 1 et 3, mais que la valeur n'est pas significative. Nous pouvons donc poursuivre en considérant une bonne homogénéité des tables entre elles avant l'application de l'éthéphon. Il en est de même pour le jour 21 (jour de l'application de l'éthéphon en pointillés gris), nous considérons que les tables sont semblables.

Au cours de la culture, les plantes ont atteint une taille tellement importante qu'elles se sont retrouvées contraintes par la hauteur de la serre. Ce facteur limitant jouant sur la croissance globale de la plante, nous ne pouvons pas analyser les données récoltées après le contact avec les parois de la serre pour interpréter l'effet physiologique de l'éthéphon. Nous effectuons une ANOVA sur les données du jour 63 pour tester l'homogénéité entre les tables de la même manière que pour le jour 14. Ce test nous témoigne qu'il n'existe plus de différences significatives entre les tables de culture au jour 63. Nous pouvons dire que les doses appliquées n'ont plus d'influence au jour 63. Pour la suite, nous utilisons les données antérieures à cette date.

La figure 21 présente l'évolution des p -values issues des anova du modèle mixte appliqué aux données (la ligne pointillée rouge représente le seuil de significativité des résultats à 5%). La première différence visible est observée au J28, soit une semaine après la mise en solution de l'éthéphon. L'effet est visible pour les deux variétés.

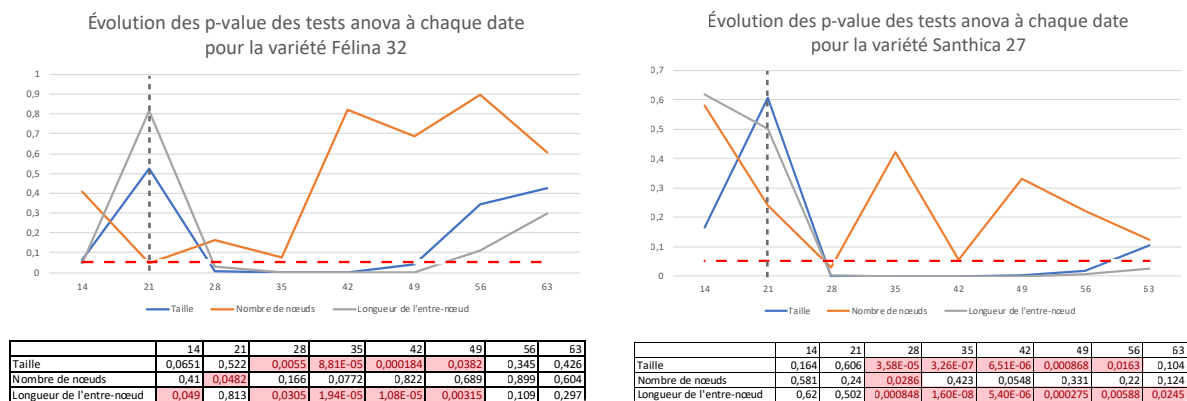


Figure 21 : Courbes d'évolution des p -valeurs des 3 paramètres mesurés dans le temps (taille, nombre de noeud et longueur de l'entre-noeud) pour F32 (à gauche) et S27 (à droite) (la ligne verticale grise montre le jour d'application du produit)

Grâce au test de comparaison 2 à 2 de Tukey nous constatons que la différence de croissance se situe entre la plus forte dose (n°1) et le témoin, et confirme un effet sur la taille et la longueur de l'entre-noeud pour les 2 variétés. Cependant la variété S27 présente aussi un effet sur le nombre de noeuds. Cet effet n'est plus visible par la suite et ne concernait que la comparaison entre la dose 2 et le témoin. L'optimum de différence est atteint pour les 2 facteurs (taille et longueur de l'entre-noeud) à J35, soit deux semaines après l'application du produit, pour Féлина 32. Pour la taille chez Santhica 27, l'optimum est également atteint à J35, et à J42 pour la longueur de l'entre-noeud. L'effet s'estompe à partir de cette période et nous n'observons plus de différences à partir de J56 pour F32. Les tables de cultures

semblent homogènes. Pour S27, l'effet est visible sur la taille une semaine de plus, et 2 semaines de plus pour l'effet sur la longueur de l'entre-noeud. L'éthéphon semble avoir eu des effets sur ces 2 derniers facteurs, mais pas sur le nombre de noeuds. En solution, ce produit semble avoir eu un effet sur près de 4 semaines.

Si on se concentre sur le jour 35 (date d'optimum des différences) pour F32, on observe que les différences sont marquées entre certaines doses. Grâce au test de TukeyHSD du J35, on peut dire que le témoin est significativement plus grand que les doses 1 et 2. De même pour la longueur de l'entre-noeud. Il existe même une différence entre la dose 1 et 3. Ces résultats sont semblables pour les 2 variétés.

2.2.2 Données de récolte

Concernant les données acquises au moment de la récolte, un test anova pour chaque paramètre suivi est effectué. Le tableau n°8 nous donne les p-valeur associées à chacun des tests.

Tableau n° 8 : Tableau des p-valeurs obtenues par test ANOVA sur les 7 paramètres contrôlés à la récolte de S27 et F32 (facteur dose)

Paramètre	Taille	Nombre de noeud	Longueur de l'entre-noeud	Biomasse	Masse florale sèche (MfS)	% de fleur	Circonférence de la tige
p-valeur S27	0,4455	0,2635	0,4905	0,702	0,0289	7,162E-06	0,4532
p-valeur F32	0,7209	0,4194	0,4909	0,01454	0,06705	0,01889	0,0378

Pour Santhica 27, la figure ci-contre nous montre que les 2 gouttières de chaque table sont semblables à l'exception de la table témoin. Cette différence marquée entre ces 2 gouttières ne nous permet pas d'effectuer de tests pour comparer les tables entre elles. Seules les tables 1, 2 et 3 peuvent être comparées. Pour le pourcentage de fleurs, la table 1 montre des résultats différents des tables 2 et 3. Les tables 2 et 3 montrent des pourcentages semblables, plus faibles que la table 1.

À l'échelle de la culture, les doses d'éthéphon appliquées sur les plantes en début de culture n'ont pas permis d'avoir d'effet sur la biomasse produite ou sur la circonférence de la tige pour S27.

Pour F32, le tableau n°8 nous montre qu'il existe un effet de la dose sur la biomasse, le pourcentage de fleur et la circonférence de la tige. Dans le détail, pour la biomasse, la différence est entre la dose 2 et 3, pour le pourcentage de fleur entre la dose 1 et 2 et entre la dose 1 et 3. Enfin, pour la circonférence de la tige la différence se situe entre la dose 3 et 2. Aucune différence significative

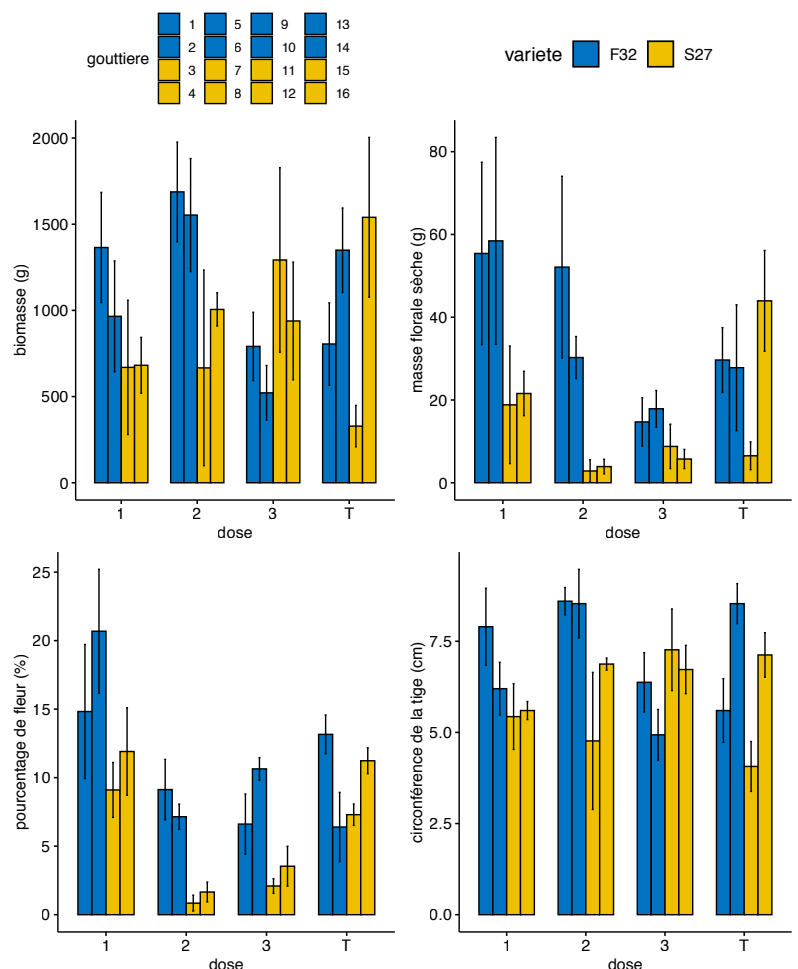


Figure 22: Barplot de l'effet de la dose d'éthéphon sur les 4 paramètres supplémentaires mesurés à la récolte pour F32 et S27

n'est identifiée avec le témoin.

2.3 Informations complémentaires

2.3.1 Taux de croissance

La figure 23 montre le taux de croissance des plants dans les différents systèmes de culture précédemment présentés. Ces taux de croissance sont obtenus en réalisant, pour chaque jour, un pourcentage de la taille des plants par rapport à la semaine précédente. Grâce à ces graphiques, nous nous rendons compte qu'après l'application de l'éthéphon, seule la table témoin a eu une croissance ayant plus que doublé (107% pour F32) la semaine suivante. Le taux de croissance des autres systèmes de culture a chuté directement. Pour S27, les plantes en contact avec la dose 3 se sont comportés de la même manière que les plants témoins, à savoir, une légère augmentation une semaine après l'application, puis une chute au même niveau que le témoin. On remarque que pour les 2 plus fortes doses (1 et 2), et pour les 2 variétés, un « sursaut de croissance » est visible vers J49 soit 4 semaines après l'application du produit. Date concordante avec les observations de la partie « 2.2 effet de l'éthéphon » qui concluait sur un effet de l'éthéphon pendant 4 semaines.

On observe que les données au champ, au même jour de culture, montrent des taux de croissance relativement semblable à ceux de la serre.

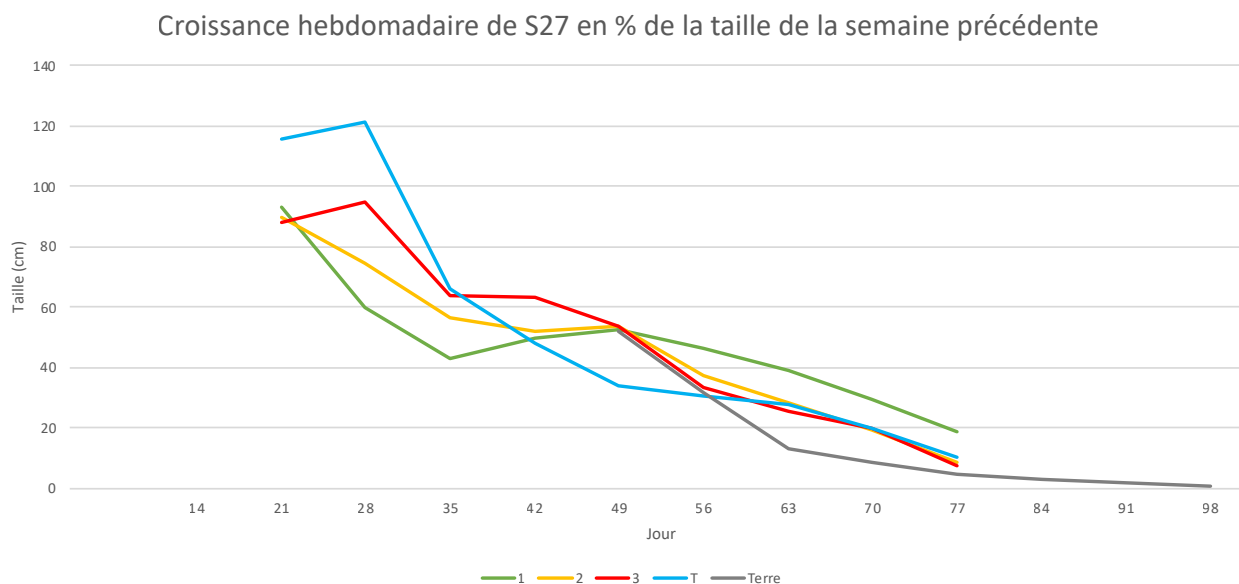
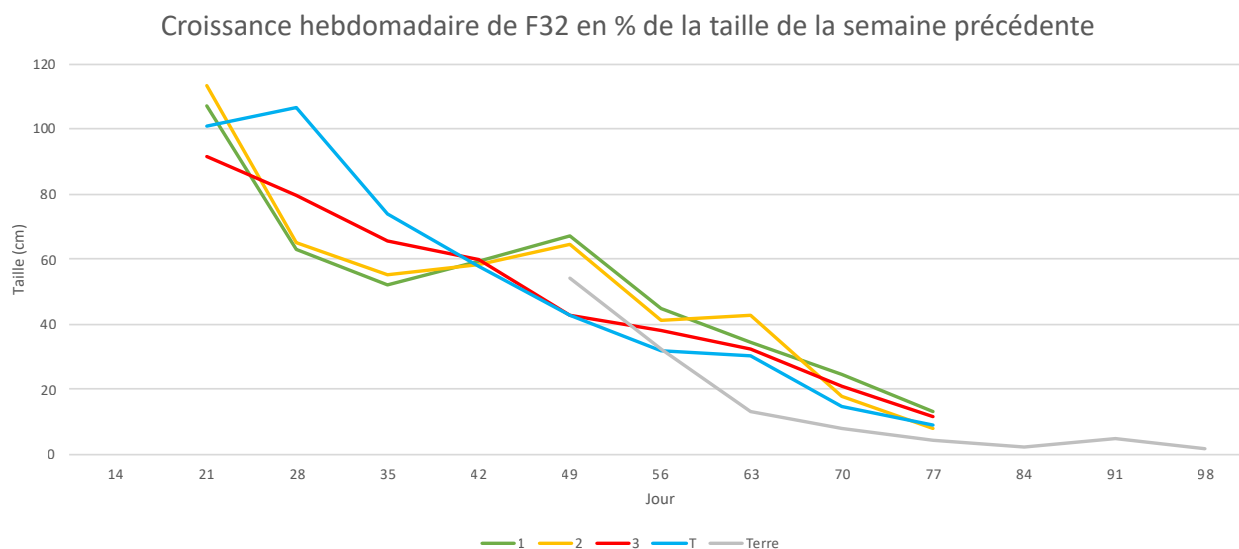


Figure 23: Courbes des taux de croissance (taille en cm) par semaine de culture dans les différents contextes de production, pour les 2 variétés

2.3.2 Masse racinaire en serre

Lors de la récolte en serre, nous avons également prélevé les racines dans chacune des gouttières de culture pour chacune des 2 variétés. Chaque gouttière ayant 3 ou 4 plantes, nous divisons la masse racinaire sèche obtenue par le nombre de plantes présentes dans la gouttière étudiée afin d'obtenir une moyenne. Nous obtenons la figure 24, qui montre la masse racinaire sèche moyenne par plante pour chacune des gouttières cultivées.

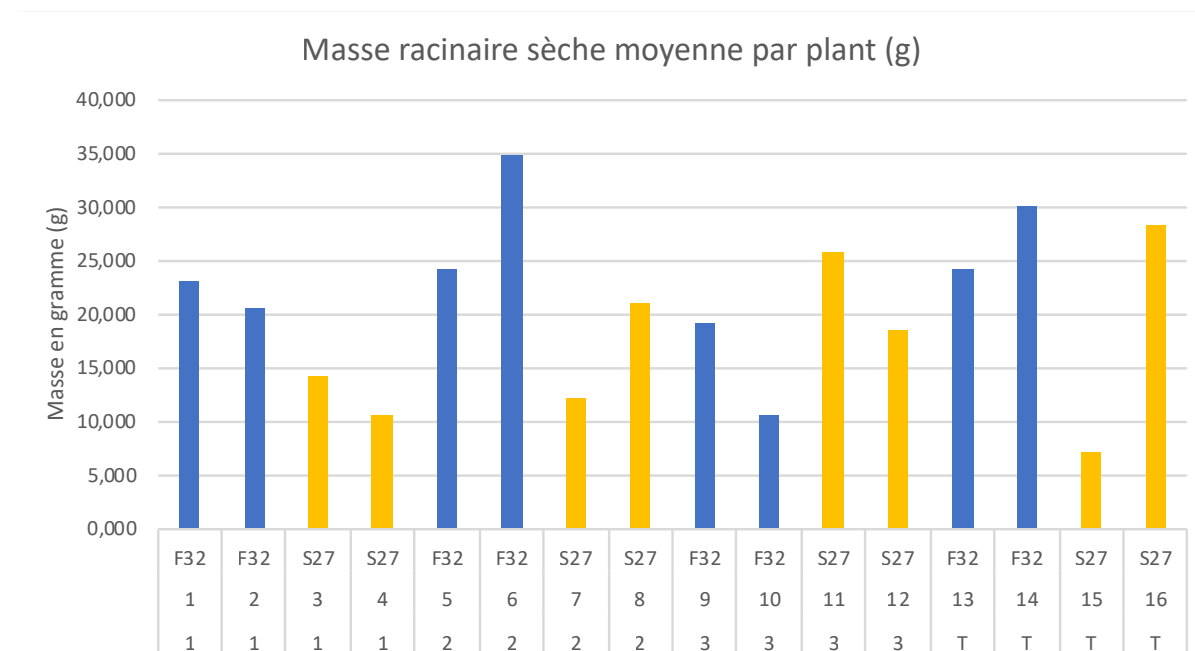


Figure 24 : Graphique des masses racinaire sèche moyenne par plant de chaque gouttière pour la Serr'ure

On observe que sur la table témoin pour S27 les 2 gouttières présentent des masses très différentes. Cela montre un lien avec les remarques observées dans la partie « 2.2.2 données de récolte » qui témoignait de différences significatives concernant la 'biomasse', la 'masse florale sèche', le 'pourcentage de fleur' et la 'circonférence de la tige'.

3. Discussion

3.1. Effet de l'itinéraire culturel

Le premier test effectué concernait l'homogénéité des parcelles, les différences observées sont assez faibles, mais tout de même significatives. À la suite d'observations des parcelles avec un drone, nous avons observé que 2 grands arbres à proximité de la parcelle jetaient leurs ombres sur certaines parcelles au cours de la journée. Nous pouvons supposer qu'il y ait pu avoir un effet des ombres sur la croissance des plantes. De plus, l'échantillonnage étant aléatoire, certaines plantes identifiées pour être suivie se sont trouvées étouffées par d'autres. Pour la parcelle 302 de S27, il y avait plusieurs plantes très petites, ce qui nous donne des résultats avec de grandes variances. Néanmoins, cette sélection aléatoire permet de dire qu'il ne semble pas y avoir eu d'effet de nos mesures sur les plantes.

La différence importante observée entre le système serre et le système champ s'explique par plusieurs facteurs (valeurs plus importantes en serre). En effet, la serre se différencie par la densité de culture 30 fois inférieure à celle du champ, par l'absence de stress lié aux intempéries et au vent, un ombrage régulier en cas de forte exposition, ainsi que par la nutrition minérale par solution hydroponique. Ces facteurs sont tous responsables d'effet sur l'évolution de la taille d'un végétal.

3.2 Effet de l'éthéphon

Dans la Serr'ure, les équipements en place nous ont permis d'effectuer un travail homogène entre les tables de culture. Cependant, les conditions fixées pour l'activation des toiles d'ombrage n'étaient peut-être pas les plus optimaux pour la plante de cannabis. Nous savons que le chanvre est sensible à la photopériode pour l'induction de la floraison et leur formation. Il semble possible que les va-et-vient de l'ombre produite par les toiles d'ombrage aient impacté le cycle de la plante. Les plantes ayant eu un fort développement végétatif, la consommation d'eau amenait à remplir plusieurs fois par semaine les bassins lors des fortes chaleurs. Avec l'ajout d'eau de ville, les sondes détectaient de fortes variations de pH et d'EC dans les solutions à chaque remplissage. Pour des plantes avec un tel développement, des bassins plus grands seraient un bon moyen de limiter cet effet. À l'échelle industrielle, une méthode de remplissage automatique serait adoptée.

Les résultats sur l'effet de l'éthéphon sur les 3 paramètres suivis nous permettent de quantifier l'effet de ce produit dans la solution. Son effet entre les différentes doses s'observe jusqu'à 4 à 5 semaines après l'application du produit selon la variété. Plus précisément, on remarque que l'effet augmente au cours des 2 premières semaines (temps de conservation du produit dans la solution) avant de diminuer progressivement pendant 2 semaines également. Comme expliqué dans la partie état de l'art, l'éthéphon se dégrade en éthylène une fois dilué dans l'eau et appliqué sur le végétal. Néanmoins, celle-ci témoignait d'un effet rapide qui s'estompait rapidement également. Concernant notre étude, le temps d'efficacité du produit semble bien plus long.

Dans les résultats issus des données de la récolte, nous avons observé de faibles valeurs pour les tables 2 et 3 sur plusieurs paramètres étudiés. Au moment de la récolte, il n'existait plus d'effet de la dose d'éthéphon, cependant ces 2 tables centrales surprennent par leurs faibles valeurs. En effet, une mauvaise exposition à la lumière pourrait expliquer cet effet. Nous avons aussi constaté un foyer de puceron très développé sur ces tables. Par le stress supplémentaire apporté aux plantes, les variations observées peuvent être en partie expliquées par ces conditions de culture.

CHAPITRE III. Effet métabolique des itinéraires culturaux

1. Matériel et méthode

1.1 Récolte

L'étape de récolte des plants a lieu au stade où les pistils sont entièrement brunis et où les trichomes passent de translucides à laiteux (voir annexe n°3 pour exemple). Une fois cette étape de développement atteinte, nous procédons à la récolte des plants.

Nous effectuons tout d'abord la pesée totale des plants afin de comparer leur biomasse. Chaque plant étant préalablement numéroté, nous reportons les valeurs directement dans des tableaux construits antérieurement.

Nous pesons ensuite les inflorescences de la plante, pour obtenir leur masse fraîche, puis nous les disposons dans des rapiers (petits récipients adaptés au passage en étuve).

1.2 Passage à l'étuve

Une fois tous les rapiers préparés, nous pouvons les placer dans une étuve maintenue à 65°C pendant 72h afin de sécher toutes les inflorescences.

Après trois jours de séchage, nous pesons une seconde fois les rapiers afin d'obtenir les masses sèches des inflorescences.

1.3 Préparation des échantillons

Une fois les fleurs séchées, nous utilisons un broyeur réglé à 0,75mm. Nous obtenons une poudre que nous passons au tamis de 0,25mm juste après. Un tube Falcon® est utilisé par plante pour déposer 300mg (\pm 5mg) de la poudre à 0,25mm. Pour cela, nous utilisons une balance de précision. Toutes les masses d'échantillon déposées dans les Falcon® sont également relevées.

1.4 Analyses de laboratoire au Celabor

Dans les 3 jours qui suivent les étapes précédentes, les échantillons ainsi préparés sont amenés au Celabor, un laboratoire d'analyses. Sur place, nous préparons la mise en place d'une analyse UPLC (Ultra Performing Liquid Chromatography).

Nous ajoutons 30ml de solvant (éthanol absolu 99,97%) dans le Falcon avec l'échantillon et nous mélangeons quelques secondes au vortex. Ensuite, l'échantillon est passé au bain à ultra son 3 fois 5 minutes, avec un passage au vortex entre les répétitions. Pendant cette étape, nous préparons trois vials par échantillons et les numérotons. Le premier vial est rempli avec une pipette équipée d'un filtre de 0,22mm pour ne pas laisser passer les particules. Les 2 autres vials sont des dilutions de référence pour la machine d'analyse.

1 = 100% solution initiale

2 = dilution : 1450 μ L de solvant + 50 μ L de la solution 1

3 = dilution : 1450 μ L de solvant + 50 μ L de la solution 2

Enfin, nous disposons les vials dans un réceptacle prévu pour la suite de l'analyse qui sera réalisée par le laboratoire.

2. Résultats

2.1 Récolte

2.1.1 Suivi de l'état des trichomes

Un contrôle régulier de l'état des trichomes est effectué à partir de la période annoncée de pleine floraison. Pour les 2 variétés, cette étape doit arriver vers mi-août à la latitude du Mans. Nous observons cette étape à cette période. En annexe n°3 sont présentées les photographies des trichomes à différentes dates. L'objectif étant de repérer le moment de transition de couleur des trichomes (passage de translucide à laiteux) et du brunissement des pistils pour programmer la récolte des plants dans la semaine. Pour la variété Santhica 27, la transition s'est observée vers le 12 août pour le champ et la récolte a eu lieu le 16 août, et pour la serre le 18 août avec une récolte le lendemain. Concernant la Féлина 32, nous n'avons pas constaté une transition complète. Pressés par le temps, la récolte a eu lieu lorsque les trichomes n'étaient pas encore complètement laiteux. Dans l'ensemble, la serre a présenté une très grande variabilité de maturité des fleurs avec même certaines plantes sans aucune fleur récoltable.

Tableau n° 9 : Tableau des masses fraîche et sèche de la récolte pour chaque variété dans les différents systèmes de culture

Système de culture	Variété	Masse florale fraîche (g)	Masse florale sèche (g)	Taux de matière conservée (%)
202.1	F32	160,3	80,85	50,44
202.2	F32	97,25	32,9	33,83
402.1	F32	85,15	44,05	51,73
402.2	F32	103,15	32,5	31,51
602.1	F32	116	49	42,24
602.2	F32	135,45	40,2	29,68
Dose 1	F32	1285,5	397	30,88
Dose 2	F32	1006,9	299,25	29,72
Dose 3	F32	350,8	112,5	32,07
Témoin	F32	676,2	202,05	29,88
302.1	S27	57,5	16,5	28,70
302.2	S27	72,8	20,3	27,88
502.1	S27	81,85	14,55	17,78
502.2	S27	52,95	23,6	44,57
702.1	S27	68,3	19,95	29,21
702.2	S27	73,4	19,85	27,04
Dose 1	S27	528,65	142,8	27,01
Dose 2	S27	101,6	24,2	23,82
Dose 3	S27	182,8	49,3	26,97
Témoin	S27	740,35	195,4	26,39

2.1.2 masses fraîches et sèches des fleurs

Les masses de matières conservées après séchage pour F32 est d'environ 30% pour chacun des systèmes de la serre et légèrement supérieures pour le champ avec 40%. Pour S27 les masses conservées sont plus faibles avec environ 25% de matière pour la serre et de 29% pour le champ. Les pourcentages plus importants au champ s'expliquent par la conservation de plus grandes sections de tige au niveau des inflorescences (dû aux inflorescences plus massives)

2.2 Analyses de laboratoire

2.2.1 *Santhica 27*

Les résultats de l'UPLC réalisée sur les échantillons des plants de S27 ont montré des taux de CBD et de THC nuls. La figure 25 présente les résultats des concentrations en CBG dans les différents systèmes de culture étudiés. Les tests statistiques ont montré des différences significatives. En effet, c'est le champ qui présente les taux les plus élevés suivit de la dose la plus forte d'éthéphon. De plus, les doses 2, 3 et témoin sont semblables entre elles et la dose 1 et 2 ne sont pas considérées comme significativement différentes (p -valeur = 0,06). Dans le cadre de ces tests, nous avons supprimé 3 lignes de données car aucune fleur n'avait pu être récolté.

2.2.1 *Félina 32*

Pour la variété Félina 32 (figure 26), on remarque que les résultats suivent les mêmes tendances que la variété précédente sur le CBG. Ici, le champ présente des taux de CBD significativement plus important que la serre. En serre les taux décroissent de la dose 1 à 3 et le témoin est semblable à la dose 1 et 2. En annexe n°4, les taux de THC, CBG et

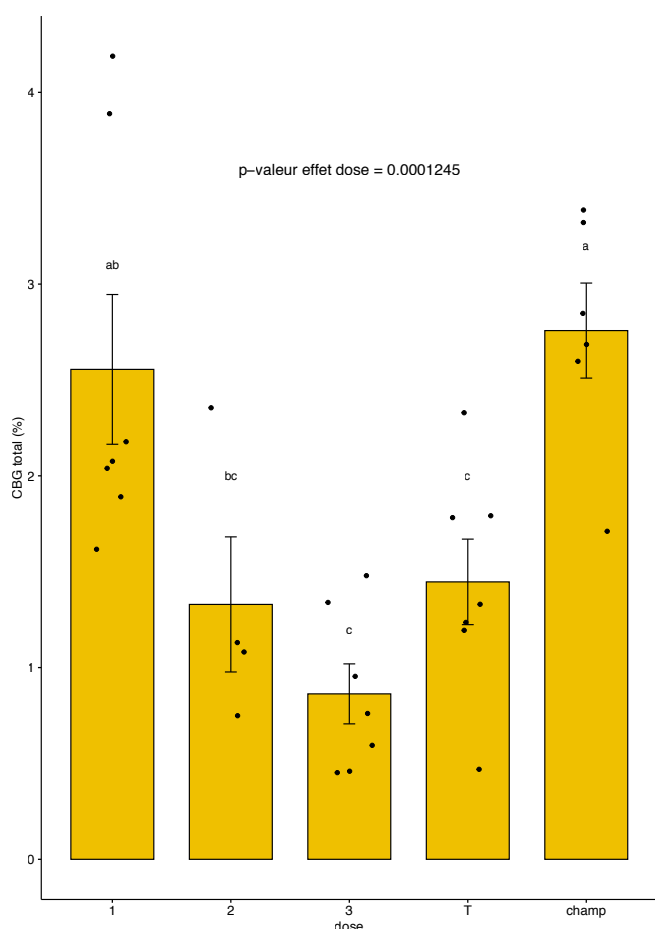


Figure 25: Barplot des concentrations en CBG des plants de Santhica 27 dans les différents systèmes de culture étudiés (CBG total = CBG + CBGA)

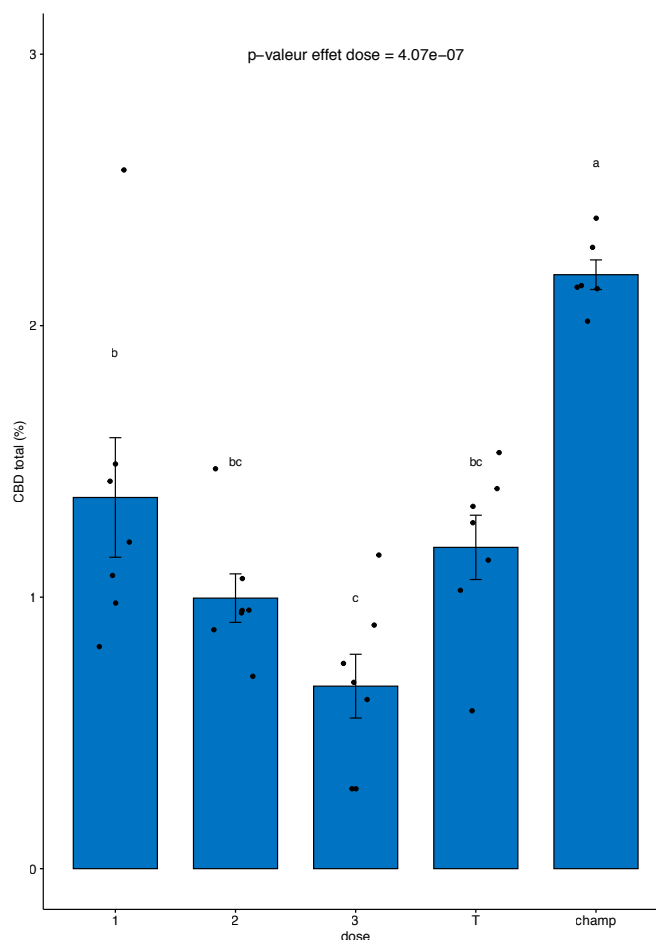


Figure 26: Barplot des concentrations en CBD des plants de F32 dans les systèmes de culture (CBD total = CBD + CBDA)

CBN sont présentés. Les taux de THC et de CBN suivent les mêmes tendances que le CBD. Les taux de CBG sont caractérisés par des taux plus élevés au champ.

2.3 Production en cannabinoïdes

Le tableau n°10 présente les taux moyen en cannabinoïdes d'intérêt, ainsi que la production de gramme de CBG et CBD par mètre carré selon l'itinéraire de culture choisi.

Tableau n° 10 : Tableau des taux moyen en cannabinoïdes d'intérêt et de la production totale en gramme de cannabinoïdes par m²

Systèmes de culture	1	2	3	T	Champ
Taux de CBG moyen	2,55	1,39	0,86	1,45	2,76
Production de CBG par culture (gCBG / m ²)	2,023	0,187	0,236	1,574	2,111
Taux de CBD moyen	1,367	0,996	0,672	1,183	2,188
Production de CBD par culture (gCBD / m ²)	3,015	1,656	0,420	1,328	4,077

Les taux de cannabinoïdes obtenus dans la partie précédente sont mis en relation avec le volume de fleurs sèche produites par mètre carré (partie 2.1.2 masses fraîche et sèche des fleurs). On remarque que les productions les plus élevés sont observés sur la dose 1 en serre et sur le champ. On arrive à produire plus de 2,5g de CBG/m² en serre et au champ, et plus de 3g de CBD/m² en serre et 4 grammes au champ.

3. Discussion

Les taux de matière conservés élevés sont dû à l'importante quantité de graines dans ces échantillons, de plus, pour le champ, d'avantage de tiges étaient gardées en raison des inflorescences plus massives.

Pour la variété Santhica 27 caractérisée par son taux intéressant de CBG, on observe qu'il existe un effet de la dose d'éthéphon sur la concentration en CBG dans les plantes. En effet, il est possible que le stress induit en début de culture ait un impact sur la réponse de la plante dans la durée et donc produire des métabolites tout au long de sa culture. La dose 1 en serre montre des résultats semblable au champ. En effet, au champ, les stress étaient différents (vent, intempérie....) mais ils ont pu avoir un rôle similaire sur la concentration en CBG dans les plantes. En mettant en parallèle les concentrations en CBG et la biomasse florale produite, on remarque que les tables avec les concentrations les plus faibles sont aussi celles avec le moins de biomasse florale récoltée. Les stress induits par les doses associées (2 et 3) n'ont pas stimulé l'apparition de fleurs. À ceci, s'ajoute la présence de pucerons principalement sur ces tables qui ont pu stresser d'avantages les plantes et ainsi freiner voir empêcher une floraison optimale.

Concernant la variété Féline 32 intéressante pour son taux de CBD, on notera que la récolte n'a pas pu être effectuée au moment optimal de maturité des trichomes, ce qui a pu engendrer des concentrations plus faibles. Néanmoins, on obtient des concentrations semblables à ce qui avait été identifiées dans la bibliographie. De plus, la dose semble, ici aussi, avoir eu un effet qui a favorisé des concentrations plus importantes en CBD avec les doses les plus fortes, même si les plantes du champ ont des concentrations presque 1,5 fois supérieure. Nous avons observé moins de pucerons sur cette variété, pourtant, les tendances sont semblables avec la variété S27. Lorsqu'on regarde les quantités produites au mètre carré, on obtient toujours les mêmes tendances.

CHAPITRE IV. Analyse économique

1. Matériel et méthode

1.1 Fixation d'un prix de revient

Durant toute la période de culture au champ et sous serre, nous relevons les volumes d'intrants utilisés pour la production (eau, engrais, acide et base) ainsi que le temps de travail humain en plusieurs catégories (semis, plantation, entretien serre, entretien végétaux, irrigation, traitement, encodage données, récolte, post-récolte, analyse laboratoire et les actions du champ). Avec le bilan de ces informations, nous obtenons le temps de travail humain nécessaire pour les 2 itinéraires culturaux. En ramenant cette information au coût d'un employé et aux volumes de production obtenus dans la partie précédente, nous fixons un prix de revient opérationnel (figure 27).

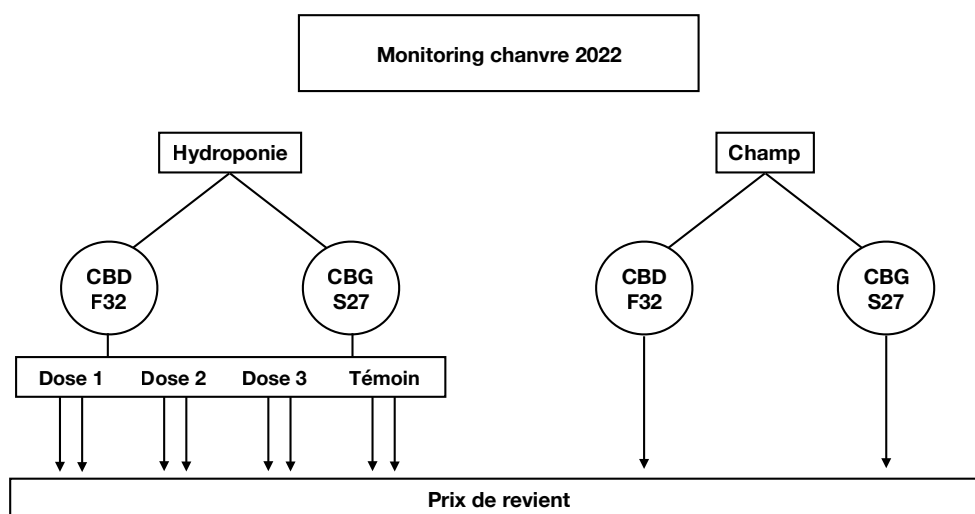


Figure 27 : Schéma pour le monitoring du chanvre 2022

1.2 Entretiens avec les professionnels du secteur

Cette partie consiste à interroger et rencontrer des professionnels déjà implantés dans le marché du chanvre à travers différentes activités économiques liées à la fleur. Les répondants sont les suivants : CBx Medical (Flora Mer) / Canbe (Tanguy de Monceau) / Buddy Belgium (Samuel Bermann). (figure 28)

L'objectif principal est de connaître les prix des produits vendus, les coûts et processus d'extraction. Nous avons besoin de ces informations afin que nos estimations soient les plus représentatives du marché existant.

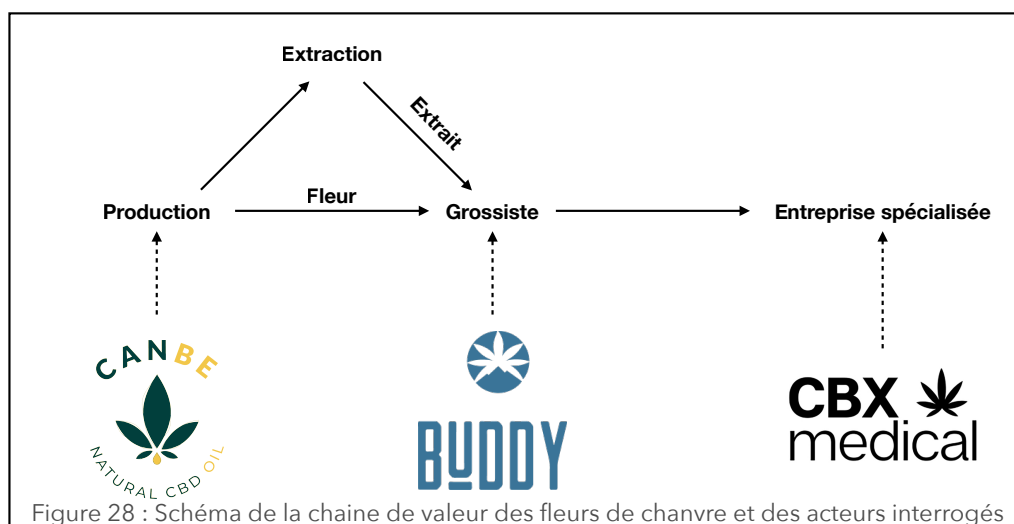


Figure 28 : Schéma de la chaîne de valeur des fleurs de chanvre et des acteurs interrogés

2. Résultats

2.1 Prix de revient

2.1.1 Monitoring Serr'ure

Le monitoring de la culture de chanvre nous permet de quantifier les coûts de production à travers différents itinéraires de culture. Pour la culture en serre, plusieurs

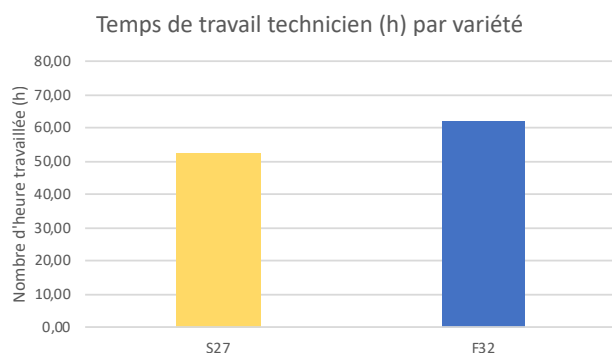


Figure 29 : Somme du temps de travail technicien pour la culture de chanvre détaillé par variété

catégories de tâches nous permettent de visualiser quels aspects de la production seraient à améliorer. Les différentes catégories sont les suivantes : semis / plantation / entretien serre/ entretien végétaux / irrigation / traitement / récolte / post-récolte / encodage données. La figure 29 représente la somme des heures travaillées pour l'ensemble des catégories précédentes. Soit un total de 52 heures pour Santhica 27 et de 62,225 heures pour Féline 32. La différence est directement liée à la culture plus longue chez F32.

Pour les 2 variétés cumulées, le temps passé sur l'étape de post-récolte représente près de 60% du temps total dédié à la culture (figure 30). L'activité sous-jacente à cette étape est la préparation des fleurs au séchage (manucure) qui consiste à retirer les feuilles pour conserver uniquement les sommités florales. Le temps de remplissage des bassins représente aussi une grande partie du travail réalisé.

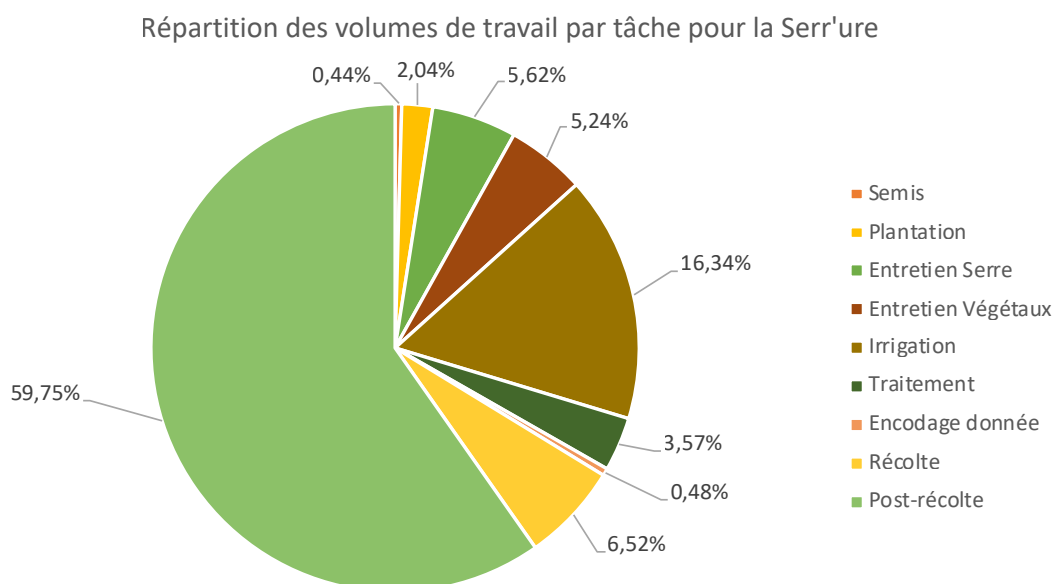


Figure 30 : Répartition des volumes de travail par tâche détaillé pour la Serr'ure

La figure 31 nous présente les volumes d'intrants consommés par les variétés produites au cours de la culture. La consommation la plus importante concerne l'acide. Régulateur de pH des solutions hydroponique, l'acide est ajouté à la solution par le système de monitoring des solutions après chaque remplissage des cuves. En effet l'eau de ville utilisée pour remplir les bacs étant assez basique, il est nécessaire d'ajouter de l'acide pour

réguler le pH entre 5,5 et 6,6. Les différentes modalités de culture ne montrent pas de grandes différences de consommation. Environ 4 litres d'acide, 1,5 litres de base, 1 litre de chaque engrais et un peu plus de 1 mètre cube d'eau consommé pour 4 mois de culture.

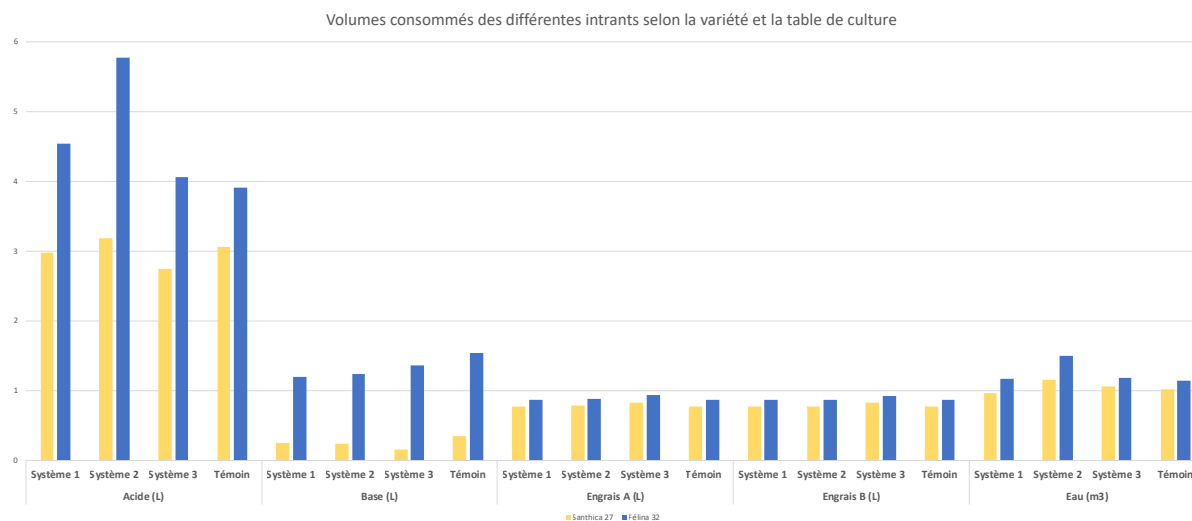


Figure 31 : Volumes d'intrants consommés par système de culture de la Serr'ure

2.1.2 Monitoring champ

Concernant le suivi au champ, le travail est beaucoup plus mécanisé, les différentes activités constituent quelques minutes de travail à l'échelle de la parcelle étudiée (384m²). Le temps total consacré aux activités agricoles sur cette parcelle représente 3,83 heures. Sans prendre en compte le temps dédié à la récolte (48 heures à la main) et au post-récolte de la surface totale (768 heures = 93% du temps) nous obtenons la figure 32.

Répartition des volumes de travail par tâche pour le champ (sans post-récolte)

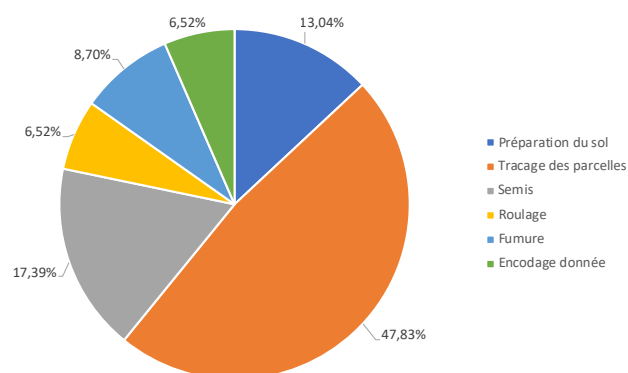


Figure 32 : Répartition des volumes de travail par tâche pour le champ

2.1.3 Bilan

L'annexe n°5 est un tableau synthèse qui reprend la totalité des actions réalisées, les temps de travail associés ainsi que les coûts induits pour chaque catégorie. Dans la partie dédiée à la variété S27, la table témoin a montré une importante différence entre ces 2 gouttières sur la masse florale produite par plante, nous avons donc réalisé les calculs pour l'une et l'autre des gouttières afin de présenter une estimation basse et haute de production possible sur la table témoin. L'avant-dernière ligne de ce tableau présente le prix de revient d'un gramme de matière sèche issus des différents itinéraires de culture. Le calcul du prix de revient ne prend pas en considération l'amortissement des CAPEX (coûts d'investissements), car étant dans le cas d'une serre de recherche, la rentabilité sur la production n'était pas l'objectif. Le prix de revient le plus faible pour la serre est de 1,98 €/gramme de matière sèche (€/gMS) et est issu de la première table (dose 1) sur la variété de Féline 32. Pour S27, c'est la table témoin (2ème gouttière) qui présenterait le prix de revient le plus faible (3,96 €/gMS) suivit de la table n°1 (4,88 €/gMS). Cependant, c'est bien la culture au champ qui offre le prix de revient le plus faible pour les 2 variétés avec 0,14 €/gMS pour F32 et 0,28 €/gMS pour S27.

La dernière ligne de ce tableau propose une estimation de la production possible de matière sèche par mètre carré et par an en considérant qu'avec l'installation de lampes horticoles, 3 cycles de cultures seraient possibles par an dans la serre. Dans ce cas de figure, la serre permettrait de produire des volumes plus importants au mètre carré que pour le champ. Néanmoins, les investissements nécessaires à ce type de culture devront être pris en compte pour aller plus loin.

2.2 Entretiens avec les professionnels

Les entretiens menés avec les répondants nous ont permis de mieux comprendre les pratiques et les différentes activités liées à la fleur de chanvre en Belgique. Les informations obtenues nous permettraient d'effectuer un exercice d'extrapolation économique pour quantifier de manière plus précise la rentabilité de cette culture dans différents contextes. En annexe n°6, les 3 fiches d'identités des entreprises interrogées sont présentées avec des informations sur leurs activités et leurs besoins.

3. Discussion

Cette étude économique a permis d'analyser toutes les étapes de la production du chanvre pour l'utilisation de sa fleur et permet de quantifier les opportunités économiques à l'échelle de la serre sur toiture de Gembloux AgroBio-Tech université de Liège (Serr'ure). Les différents systèmes de culture ont montré des résultats très variables et pas directement lié au régulateur de croissance utilisé. Néanmoins, certains scénarios montrent que des prix de revient assez faibles peuvent être obtenus. Il serait pertinent d'évaluer les opportunités économiques en reliant ce travail aux taux de cannabinoïdes obtenus dans la partie précédente. De plus, il faudrait effectuer une extrapolation sur des coûts réels d'investissements avec une serre plus grande dédiée à un usage productif type tomates avec potentiellement l'ajout de lampes horticole pour maximiser le nombre de cycles possible sur l'année.

De plus, certaines missions très gourmandes en temps dans notre étude comme l'étape de post-récolte et d'irrigation pourraient être mécanisées et automatisées afin de limiter le coût de production. Par la suite un calcul du temps nécessaire à l'amortissement des investissements devra être réalisé.

V. Conclusion

En ce qui concerne l'effet du système de culture, le système serre nous permet un contrôle de plusieurs paramètres ainsi que la mise en sécurité des cultures, mais apporte une contrainte majeure concernant les investissements importants en matériel et en temps humain nécessaire à la gestion des installations. De plus, les différences observées entre le champ et la serre sur les concentrations en métabolites témoignent d'un intérêt à combiner la culture du chanvre pour sa tige et pour sa fleur de manière coordonnée.

L'étude de l'effet de l'éthéphon en serre nous donne des conclusions intéressantes pour les fortes doses ainsi que sur leurs impacts sur la totalité de la culture. En effet, les doses 1 et 2 ont présenté les meilleurs potentiels de réduction de croissance et de production en métabolites d'intérêt. Le produit a eu un effet sur 3 à 4 semaines, ce qui représente un peu moins d'un quart du temps de production total. La dose 3 et le témoin sans éthéphon sont semblables dans la plupart des tests effectués et sensiblement différents des 2 premières doses. Enfin, la dose du régulateur de croissance n'a pas eu d'effet sur le nombre de noeud de la plante.

Les doses d'éthéphon ont impacté de façon similaire les concentrations des différents cannabinoïdes étudiés (sauf pour le CBG chez Féline 32). En serre les plus hautes concentrations sont obtenues avec la dose la plus forte pour les 2 variétés. Mais c'est au champ que les concentrations sont les plus élevées de manière générale.

Le monitoring économique des itinéraires de culture témoigne de coûts d'investissements très élevés pour le système serre. Pour atteindre une rentabilité en serre, il faudrait créer une plus-value des produits et des taux plus importants. Les volumes produits au m² sont plus importants en serre, mais peuvent encore être augmentés. Le peu d'intervention au champ lui permet d'être un système de production rentable rapidement, seule la notion de protection de la culture (sécurité) serait en plus à prendre en compte dans le cas d'une culture plus importante. Le temps de travail mérite d'être optimisé et certaines tâches mécanisées.

Bibliographie

- Abusin, Sana A. A., et Brian W. Mandikiana. « Towards Sustainable Food Production Systems in Qatar: Assessment of the Viability of Aquaponics ». *Global Food Security* 25 (1 juin 2020): 100349. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100349>.
- AgriExpo. « Système de micro irrigation pour la culture hydroponique by J.HUETE | AgriExpo », 2022. <https://www.agriexpo.online/fr/prod/jhuete/product-184466-102191.html>.
- Aliferis, Konstantinos A., et David Bernard-Perron. « Cannabinomics: Application of Metabolomics in Cannabis (*Cannabis sativa* L.) Research and Development ». *Frontiers in Plant Science* 11 (2020). <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2020.00554>.
- Allaire, Suzanne E., Jean Caron, Claudine Ménard, et Martine Dorais. « Potential Replacements for Rockwool as Growing Substrate for Greenhouse Tomato ». *Canadian Journal of Soil Science* 85, no 1 (1 février 2005): 67–74. <https://doi.org/10.4141/S04-026>.
- Benhaberou-Brun, Dalila. « Le cannabis et ses effets psychotropes ». *Perspective infirmière: revue officielle de l'Ordre des infirmières et infirmiers du Québec* 16 (14 novembre 2019): 65–67.
- Bertucelli, Sylvestre. « La filière du chanvre industriel, éléments de compréhension macroéconomiques ». *OCL* 22, no 6 (1 novembre 2015): D602. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015047>.
- BioWallonie. « La culture du chanvre agricole », 2017. <https://www.biowallonie.com/wp-content/uploads/2017/08/Montage-Fiche-technique-chanvre-HD.pdf>.
- Bono, Pierre, Anne Le Duc, Marie Lozachmeur, et Arnaud Day. « Matériaux : les nouveaux champs de recherche et développement pour la valorisation des fibres végétales techniques (lin fibres et chanvre) ». *OCL* 22, no 6 (novembre 2015): D613. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015041>.
- Borrelli, Francesca, Ester Pagano, Barbara Romano, Stefania Panzera, Francesco Maiello, Diana Coppola, Luciano De Petrocellis, Lorena Buono, Pierangelo Orlando, et Angelo A. Izzo. « Colon carcinogenesis is inhibited by the TRPM8 antagonist cannabigerol, a Cannabis-derived non-psychotropic cannabinoid ». *Carcinogenesis* 35, no 12 (1 décembre 2014): 2787–97. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgu205>.
- Brown, C. M., et E. B. Earley. « Response on One Winter Wheat and Two Spring Oat Varieties to Foliar Applications of 2-Chloroethyl Phosphonic Acid (Ethrel)¹ ». *Agronomy Journal* 65, no 5 (1973): 829–32. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500050046x>.
- Cavaro, Marjorie, et Fabienne Mathis. « Dossier de presse Hemp-it », 2020. <https://www.nouvelle-usine-chanvre-2021.fr/wp-content/uploads/2020/09/200810-Dossier-de-presse-240x160-2020.pdf>.
- CBX Médical. « Les législations du cannabis | CBX Medical », 2022. <https://www.cbxmedical.com/articles/legislation-du-cannabis>.
- . « Votre corps produit des cannabinoïdes | CBX Medical », 2021. <https://www.cbxmedical.com/articles/votre-corps-produit-des-cannabinoïdes>.
- Chambre d'agriculture de l'Aube - Ardennes - Marne - Haute-Marne. « Cultiver le chanvre en agriculture biologique ». Consulté le 4 avril 2022. https://aube.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/046_Inst_Aube/Interface/RUB_techniques_et_innovation/Cultures/guide_technique_bio/Cultures_d_%C3%A9t%C3%A9/320_Chanvre.pdf.
- Chambre d'agriculture d'Occitanie. « Les substrats usagés des serres hors-sol », 2011. https://aveyron.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/GuidePO_Tome2_substrats.pdf.

Chevalier, Auguste. « Histoire de deux plantes cultivées d'importance primordiale. Le Lin et le Chanvre. » *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* 24, no 269 (1944): 51–71. <https://doi.org/10.3406/jatba.1944.6107>.

Costentin, Jean. « Les effets épigénétiques du cannabis/THC et leurs méfaits ». *La Presse Médicale Formation* 1, no 3 (1 septembre 2020): 271–77. <https://doi.org/10.1016/j.lpmfor.2020.05.023>.

Dunglas, Jean. « Production agricole en milieu fermé, artificialisé et isolé », 14 juin 2018, 22.

Fang, Rongjun, Hua Zhao, Yonghui Liao, Chengyi Tang, Fengyao Wu, Yu Zhu, Yanjun Pang, et al. « Dual Regulating Effects of Ethylene on the Formation of Plant Secondary Metabolites ». *Chinese Bulletin of Botany* 49, no 5 (1 septembre 2014): 626. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1259.2014.00626>.

FAO. « TECA », 2021. <https://www.fao.org/teca/new-search-result/technology-detail/en/?uid=8630>.

FD CIVAM du Gard. « Le Chanvre : Fiche technique ». Consulté le 4 avril 2022. <http://www.civamgard.fr/civam-bio-pdf/Fichestechchanvreweb.pdf>.

FEDITO BXL. « Pour une réglementation du cannabis en Belgique ». FEDITO BXL asbl, 3 décembre 2020. <https://feditobxl.be/fr/pour-une-reglementation-du-cannabis-en-belgique/>.

Feyen, J. « Irrigation goutte à goutte pour vergers », 1976, 15.

Flamant, Jean-Claude. « Une brève histoire des transformations de l'agriculture au 20^è siècle », 2010, 20.

Fournier, Gilbert, Jocelyne Bausset, Alexandre Maciuk, Olivier Beherec, Maud Desvals, et Sylvestre Bertucelli. « Bilan de huit années de contrôle des cultures de chanvre industriel ». *Annales de Toxicologie Analytique* 20, no 4 (2008): 217–21. <https://doi.org/10.1051/ata/2009025>.

Fournier, Gilbert, Jocelyne Bausset, Alexandre Maciuk, Claire Thouminot, et Olivier Beherec. « Influence des conditions de séchage et de conservation des échantillons de chanvre prélevés dans les cultures industrielles afin d'en déterminer réglementairement la teneur en Δ -9-THC ». *Annales de Toxicologie Analytique* 23, no 2 (2011): 101–4. <https://doi.org/10.1051/ata/2011112>.

Fournier, Gilbert, Olivier Beherec, et Sylvestre Bertucelli. « Intérêt du rapport Δ -9-THC / CBD dans le contrôle des cultures de chanvre industriel ». *Annales de Toxicologie Analytique* 15, no 4 (2003): 250–59. <https://doi.org/10.1051/ata/2003003>.

———. « Santhica 23 et 27 : deux variétés de chanvre (*Cannabis sativa* L.) sans Δ -9-THC ». *Annales de Toxicologie Analytique* 16, no 2 (2004): 128–32. <https://doi.org/10.1051/ata/2004017>.

Géradon, Céline. « Quelles sont les législations en vigueur pour la production et la commercialisation des produits du chanvre ? », 30 avril 2020. http://valbiom.be/files/library/Presentations_Events/200512_ValBiom_Chanvre_Synthese-de-la-legislation.pdf.

Géradon, Céline, Olivier Fain, et Valentine Donck. « Panorama des fibres végétales en Europe et en Wallonie - édition 2021 | valbiomag.labiomasseenwallonie.be », 2021. <https://valbiomag.labiomasseenwallonie.be/news/panorama-des-fibres-vegetales-en-europe-et-en-wallonie-edition-2021>.

Giorgio, Marie-Thérèse. « Cannabis : les textes | AtouSante », 27 février 2017. <https://www.atousante.com/apptitude-inapptitude/apptitude-travail-pathologie/cannabis-travail/cannabis-textes/>.

Gugliandolo, Agnese, Federica Pollastro, Gianpaolo Grassi, Placido Bramanti, et Emanuela Mazzon. « In Vitro Model of Neuroinflammation: Efficacy of Cannabigerol, a Non-

Psychoactive Cannabinoid ». *International Journal of Molecular Sciences* 19, no 7 (juillet 2018): 1992. <https://doi.org/10.3390/ijms19071992>.

Hall, Jack, Surya P. Bhattarai, et David J. Midmore. « Review of Flowering Control in Industrial Hemp ». *Journal of Natural Fibers* 9, no 1 (1 janvier 2012): 23–36. <https://doi.org/10.1080/15440478.2012.651848>.

Hemp-it. « Variété Technique ». HEMP IT (blog), 2022. <https://www.hemp-it.coop/variete-technique/>.

———. « Variétés Premium ». HEMP IT (blog), 2022. <https://www.hemp-it.coop/varietes-premium/>.

Herment, Paul. « Synthèse_1_ITK_cannabis », 2018.

Hillig, Karl W. « Genetic Evidence for Speciation in Cannabis (Cannabaceae) ». *Genetic Resources and Crop Evolution* 52, no 2 (mars 2005): 161–80. <https://doi.org/10.1007/s10722-003-4452-y>.

Interchanvre. « Plan filière de l'interprofession du chanvre », 2017. [file:///Users/arthurlibault/Downloads/planfiliere_chanvre_interchanvre_02%20\(1\).pdf](file:///Users/arthurlibault/Downloads/planfiliere_chanvre_interchanvre_02%20(1).pdf).

K.Mattoo, Autar, et Jeffrey C.Suttle. « The Plant Hormone Ethylene ». Routledge & CRC Press, 1991. <https://www.routledge.com/The-Plant-Hormone-Ethylene/Mattoo/p/book/9781315896663>.

Lachhab, Abdeslam, A. Eddahhak, Samir Didi, Latifa Ezzine, Jose Salinas, Francisco García-Lagos, Miguel Atencia, et Benachir Bouchikhi. *Mise au Point d'un Systeme de Controle et de Supervision du Climat et de la Fertirrigation Goutte-a-Goutte Sous Serre*, 2007. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3362.9923>.

Lah, Tamara T., Metka Novak, Milagros A. Pena Almidon, Oliviero Marinelli, Barbara Žvar Baškovič, Bernarda Majc, Mateja Mlinar, et al. « Cannabigerol Is a Potential Therapeutic Agent in a Novel Combined Therapy for Glioblastoma ». *Cells* 10, no 2 (février 2021): 340. <https://doi.org/10.3390/cells10020340>.

Lautre, Yonne. « Les dix chiffres clés du dernier rapport du Giec sur le changement climatique en une infographie », 2022. <https://www.novethic.fr/actualite/infographies/isr-rse/les-dix-chiffres-cles-du-dernier-rapport-du-giec-sur-le-changement-climatique-150640.html>.

Leleu-Chavain, Natascha, Christophe Biot, Philippe Chavatte, et Régis Millet. « Du cannabis aux agonistes sélectifs du récepteur CB 2: Des molécules aux nombreuses vertus thérapeutiques ». *médecine/sciences* 29, no 5 (mai 2013): 523–28. <https://doi.org/10.1051/medsci/2013295016>.

Macheix, Jean-Jacques, Annie Fleuriet, et Christian Jay-Allemand. *Les composés phénoliques des végétaux: un exemple de métabolites secondaires d'importance économique*. PUR presses polytechniques, 2005. https://books.google.be/books?hl=fr&lr=&id=i9vvtEn8EcUC&oi=fnd&pg=PR7&dq=les+m%C3%A9tabolites+secondaires+&ots=48knv3wJie&sig=YSBf_yIDBxE09tkEz_ilocSWmXk&redir_esc=y#v=onepage&q=les%20m%C3%A9tabolites%20secondaires&f=false.

Malassis, Louis. « Histoire de l'agriculture, histoire de l'alimentation, histoire générale ». *Économie rurale* 184, no 1 (1988): 192–98. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1988.3911>.

Mansouri, Hakimeh, Fatemeh Salari, et Zahra Asrar. « Ethephon Application Stimulats Cannabinoids and Plastidic Terpenoids Production in Cannabis Sativa at Flowering Stage ». *Industrial Crops and Products* 46 (1 avril 2013): 269–73. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.01.025>.

Mansouri, Hakimeh, Fatemeh Salari, Zahra Asrar, et Fatemeh Nasibi. « Effects of Ethephon on Terpenoids in Cannabis sativa L. in Vegetative Stage ». *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 19, no 1 (2 janvier 2016): 94–102. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2015.1004122>.

Marguerie, Mathieu. « Culture du chanvre en BIO », 2017. https://www.bio-provence.org/IMG/pdf/bio_de_paca_chanvre.pdf.

Meirhaeghe, Clément, et Hilaire Bewa. « Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France », 2011, 84.

Moon, Youn-Ho, Yoon Jeong Lee, Sung Cheol Koo, Mok Hur, Yun Chan Huh, Jae-Ki Chang, et Woo Tae Park. « Effect of Timing of Ethephon Treatment on the Formation of Female Flowers and Seeds from Male Plant of Hemp (*Cannabis Sativa* L.) ». *Korean Journal of Plant Resources* 33, no 6 (1 décembre 2020): 682–88. <https://doi.org/10.7732/KJPR.2020.33.6.682>.

Mura, Patrick, Bertrand Brunet, Yves Papet, et Thierry Hauet. « Cannabis sativa var. indica : une plante complexe aux effets pervers ». *Annales de Toxicologie Analytique* 16, no 1 (2004): 7–17. <https://doi.org/10.1051/ata/2004028>.

NatAgriWal. « Mesures agro-environnementales et climatiques ». Text. Natagriwal, 2022. <https://www.natagriwal.be/fr/mesures-agro-environnementales/liste-des-mae/fiches/details/340>.

ofdt. « Synthèse thématique : Cannabis », 2020. <https://www.ofdt.fr/produits-et-addictions/de-z/cannabis/#lp>.

Pélissier-Alicot, A. -L., et O. -J. Manzoni. « Le THC : une vieille molécule, de nouvelles perspectives ». *Toxicologie Analytique et Clinique, Joint Meeting SFTA - STC - SoHT – BLT Congrès SFTA - STC - SoHT – BLT Lille, 21-24 May 2019*, 31, no 2, Supplement (1 mai 2019): S46–47. <https://doi.org/10.1016/j.toxac.2019.03.064>.

Peschaud, Mathieu. « Réussir sa transition en agriculture de conservation des sols », 2015, 33.

Phytocontrol. « Ethéphon ». *Phytocontrol*, 2022. <https://www.phytocontrol.com/nos-analyses/residus-de-pesticides/etefon/>.

Planet-info. « Présentation de la culture hors sol », 18 septembre 2007. https://www.notre-planete.info/actualites/1337-culture_hors_sol.

Plateau, Lou, et Laurence Holzemer. « La filière éco-construction », 2016. https://www.iew-test.be/wp-content/uploads/2016/06/ccfiliere_ecoconst.pdf.

Prevention Officiel. « La prévention des risques professionnels des nouveaux matériaux de construction et d'isolation », 2015. <https://www.officiel-prevention.com/dossier/formation/securite-btp/la-prevention-des-risques-professionnels-des-nouveaux-materiaux-de-construction-et-disolation>.

Professeur CBD. « Différences entre THC et CBD - Professeur-CBD.com », 2022. <https://professeur-cbd.com/apprendre/difference-thc-cbd>.

PROF_Gilberto. « La culture Hydroponique : définition et histoire », 2013. <http://hydroponie.fr/culture-hydroponiquedefinition-histoire/>.

Raharjo, Tri J., et Robert Verpoorte. « Methods for the Analysis of Cannabinoids in Biological Materials: A Review ». *Phytochemical Analysis* 15, no 2 (2004): 79–94. <https://doi.org/10.1002/pca.753>.

Ramina, Angelo, et Caren Chang, éd. *Advances in Plant Ethylene Research: Proceedings of the 7th International Symposium on the Plant Hormone Ethylene ; [Held in Pisa (Italy), June 18 - 22, 2006]*/ Ed. by Angelo Ramina. Dordrecht: Springer, 2007.

Sarlé, Marion. *Monter sa micro-ferme en hydroponie, bioponie et aquaponie*. Lagraulet-du-Gers, 2020. www.lessourciers.com.

Sisler, Edward C., et Shang Fa Yang. « Ethylene, the Gaseous Plant Hormone ». *BioScience* 34, no 4 (1 avril 1984): 234–38. <https://doi.org/10.2307/1309461>.

- Stambouli, Hamid, Aziz El Bouri, Taoufiq Bouayoun, Naima El Karni, Z. Naciri, Aziz Johar, Amal Saoura, et Seddik Saidi. « Expérimentation de la culture de chanvre industriel à fibres au Maroc ». *Annales de Toxicologie Analytique* 23, no 1 (2011): 15–20. <https://doi.org/10.1051/ata/2011105>.
- Texier, William, Lorient Verlomme, et Olivier Verbrugge. *L'hydroponie pour tous: les dix clés de l'horticulture à la maison*. Paris, 2016.
- Thouminot, Claire. « La sélection française du chanvre : panorama et perspectives ». *OCL* 22, no 6 (novembre 2015): D603. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015044>.
- Toth, Jacob A., Lawrence B. Smart, Christine D. Smart, George M. Stack, Craig H. Carlson, Glenn Philippe, et Jocelyn K. C. Rose. « Limited Effect of Environmental Stress on Cannabinoid Profiles in High-Cannabidiol Hemp (*Cannabis Sativa* L.) ». *GCB Bioenergy* 13, no 10 (2021): 1666–74. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12880>.
- Vanhove, Wouter, Tim Surmont, Patrick Van Damme, et Brice De Ruyver. « Yield and Turnover of Illicit Indoor Cannabis (*Cannabis* Spp.) Plantations in Belgium ». *Forensic Science International* 220, no 1 (10 juillet 2012): 265–70. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.03.013>.
- Vidhyasekaran, P. *Plant Hormone Signaling Systems in Plant Innate Immunity*. Vol. 2. *Signaling and Communication in Plants*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9285-1>.
- Vu, Thi Dao. « Effet de l'environnement sur la croissance et l'accumulation de métabolites secondaires chez *Datura innoxia* Mill. cultivé en conditions hors sol; impact des facteurs biotiques et abiotiques », 2018.
- Wadsworth, Elle, Pete Driezen, Rosalie Liccardo Pacula, et David Hammond. « Cannabis Flower Prices and Transitions to Legal Sources after Legalization in Canada, 2019–2020 ». *Drug and Alcohol Dependence* 231 (1 février 2022): 109262. <https://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2021.109262>.
- Zagožen, Marjeta, Andreja Čerenak, et Samo Kreft. « Cannabigerol and Cannabichromene in *L.* ». *Acta Pharmaceutica* 71, no 3 (1 septembre 2021): 355–64. <https://doi.org/10.2478/acph-2021-0021>.
- Zhu, Ziqiang, et Hongwei Guo. « Interactions of Ethylene and Other Signals ». In *Ethylene in Plants*, édité par Chi-Kuang Wen, 135–52. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9484-8_8.

<p>L'Institut Agro Rennes-Angers <input checked="" type="checkbox"/> Site d'Angers <input type="checkbox"/> Site de Rennes</p>	 	      
<p>Année universitaire : 2021-2022 Spécialité : Paysage Spécialisation (et option éventuelle) : IEVU agriculture urbaine</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>	

Étude technico-économique sur l'itinéraire cultural de deux variétés de chanvre industriel pour la production de CBD et CBG

Par : Arthur LIBAULT

Annexes

Soutenu à Angers le 14 Octobre 2022

Devant le jury composé de :

Président :

Maître de stage : Professeur Haissam Jijakli, Nicolas Ancion et Françoise Bafort

Enseignant référent : Soulaïman Sakr

Autres membres du jury :

Frédéric Lota, expert extérieur

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers



Annexe n°1 : Script des tests statistiques (ANOVA / LME / TUKEY)

title: "Scripts R mémoire"

author: "Arthur Libault"

date: "22/09/2022"

#SCRIPT R ANOVA 2 FACTEURS POUR "TEST PRÉLIMINAIRE"

#Détermination des facteurs

```
data$Systeme <- as.factor(data$Systeme)
```

```
data$Variete <- as.factor(data$Variete)
```

#MODELISATION STATISTIQUE (exemple pour le paramètre taille)

#On écrit le modèle complet : contenant l'ensemble des effets à tester

#L'interaction n'étant pas significative on la retire du modèle

```
mod1 <- lm(data$Taille ~ data$Systeme + data$Variete)
```

```
drop1(mod1, test='F')
```

```
summary(mod1)
```

#FIN DU TEST ANOVA

#TEST LME

```
data$date <- factor(data$date)
```

#MODELISATION STATISTIQUE

```
library(nlme)
```

#nlme : modèle linéaire général mixte

```
mod <- lme(taille ~ systeme * date, random = ~1 | plant, data = data)
```

#random lui indique quel effet est aléatoire : on met en aléatoire la variable où il y a dépendance, ici les individus car on fait plusieurs mesures sur un même individu

```
anova(mod)
```

```
summary(mod)
```

```
intervals(mod)
```

#Si cet intervalle exclut la valeur 0 alors il indique la significativité du facteur à effet aléatoire : les plantes sont donc différentes dans leur réponse.

#FIN DU TEST LME

#TEST TUKEY

```
data$systeme <- as.factor(data$systeme)
```

```
model <- aov(formula = taille ~ systeme, data = data)
```

```
summary(model)
```

```
TukeyHSD(model, conf.level = .95)
```

#Tukey multiple comparisons of means

#95% family-wise confidence level

```
plot(TukeyHSD(model, conf.level = .95), las = 2)
```

#FIN TEST TUKEY

Annexe n°2 : Sélection aléatoire des 10 plants suivis

Tirage aléatoire des quadrats pour chaque parcelle de chanvre

	1	15	
	2	16	
	3	17	
	4	18	
	5	19	
	6	20	
	7	21	
	8	22	
	9	23	
	10	24	
	11	25	
	12	26	
	13	27	
	14	28	

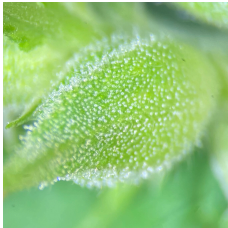

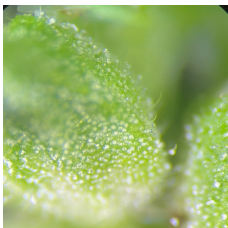
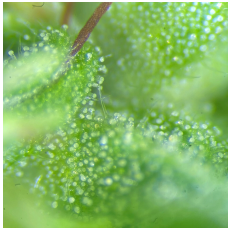
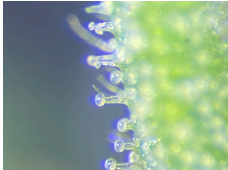



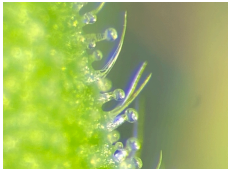


Tirage aléatoire des sous-quadrats

1	6	11	16	21
2	7	12	17	22
3	8	13	18	23
4	9	14	19	24
5	10	15	20	25

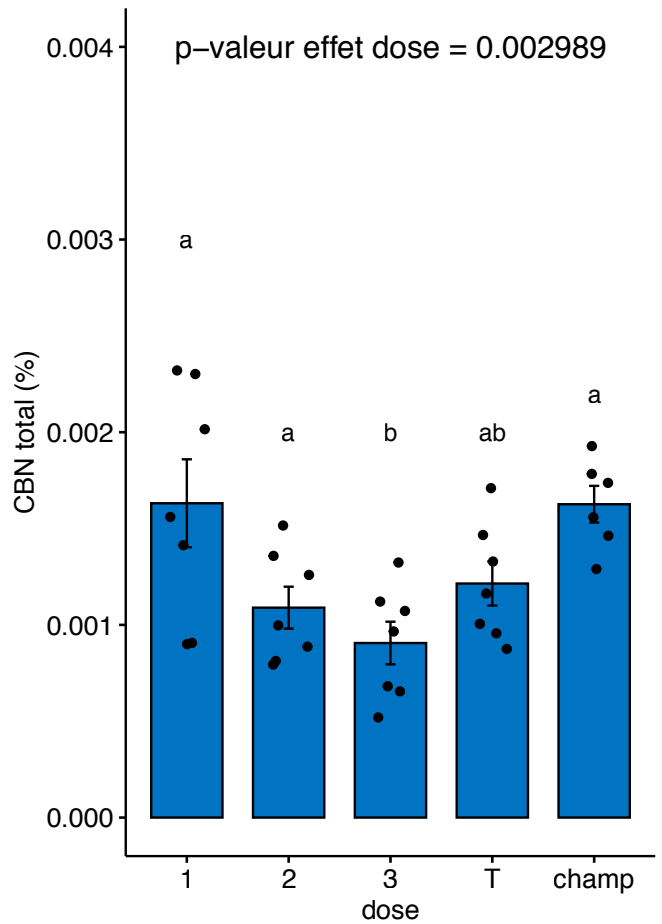
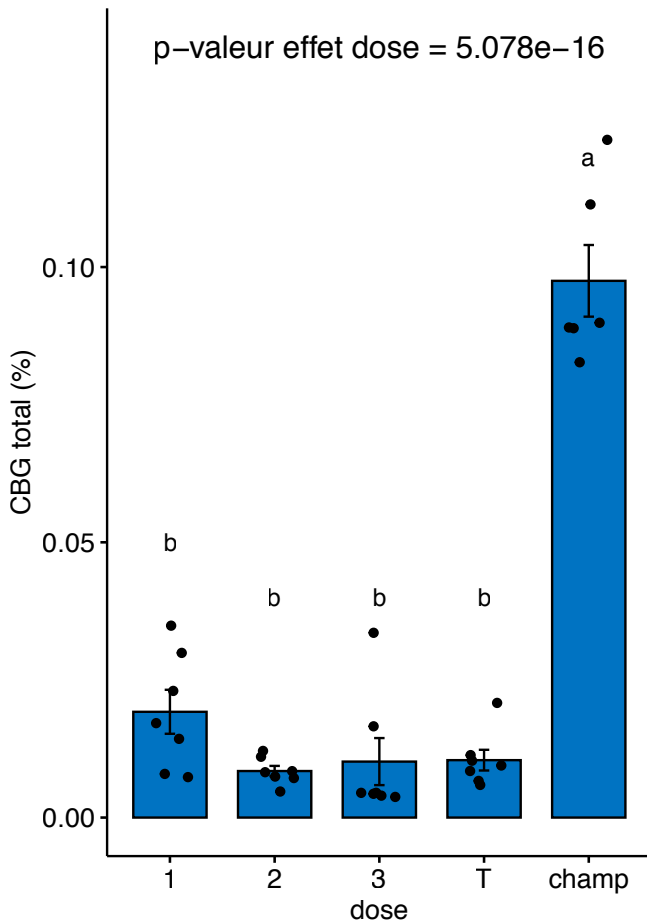
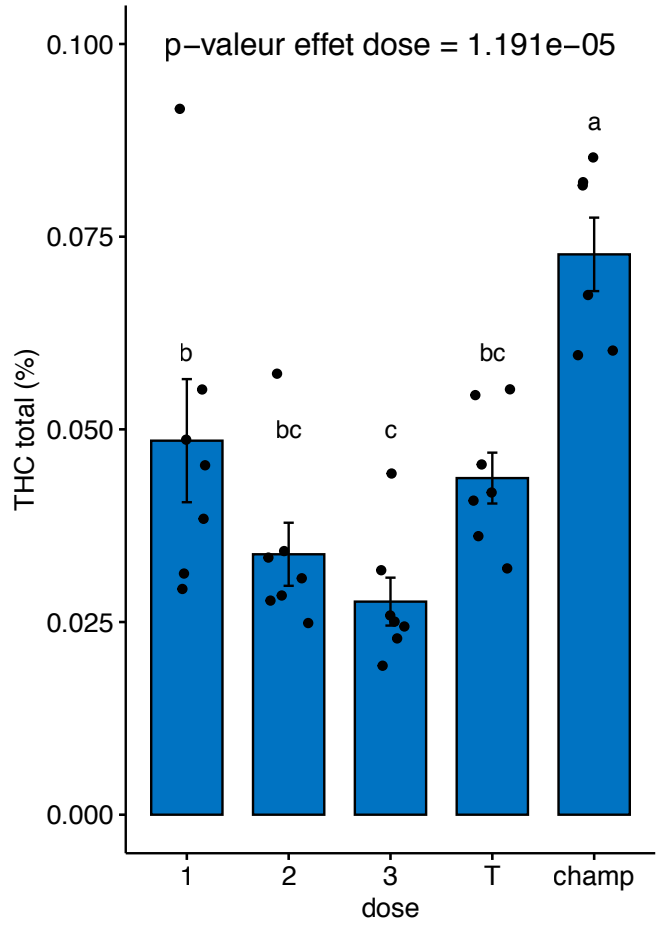
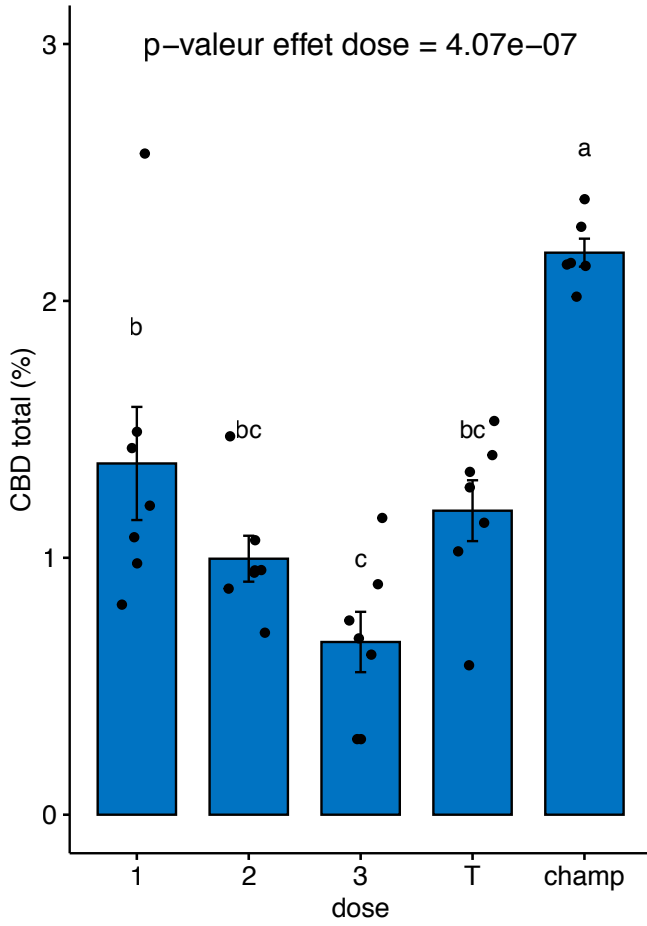
Sélection d'un plant par sous-quadrat et numérotation des plants

2		1		
10	5	8		
4				
	3		6	9
				7

Annexe n°3 : Suivi de la maturité des trichomes

	Félina 32		Santhica 27	
	Serre	Champ	Serre	Champ
9 Août				
12 Août				
18 Août			 récolte le 19 Août	Récolté le 16 Août
22 Août				
29 Août	 Récolte le 2 septembre	 Récolte le 5 septembre		

Annexe n°4 : Barplot des taux de cannabinoïdes pour la variété Féлина 32



Annexe n°5 : Tableau bilan du monitoring économique

Crop	(unité)	Cannabis sativa Félicia 32					Cannabis sativa Santhica 27							
		1	2	3	Témoïn	Champ	1	2	3	Témoïn*	Champ			
Itinéraire de culture														
Biomasse fraîche par culture (MIF)	g	1285,05	1006,90	35,80	676,20	92315,40	528,65	101,60	182,80	76 - 665	53412,60			
Biomasse sèche par culture (MS)	g	399,00	299,25	112,50	202,05	47550,60	142,80	24,20	49,30	20 - 176	16921,80			
Lieu de culture	/	Serre	Serre	Serre	Serre	Extérieur	Serre	Serre	Serre	Extérieur				
Surface totale	m2	25,00					192,00	25,00						
Surface utile	m2	1,80	1,80	1,80	1,80	177,12	1,80	1,80	1,80	0,9	177,12			
Densité	plant/m2	4,70	4,70	4,70	4,70	158,00	4,70	4,70	4,70	4,70	145,00			
PRODUCTION	gMS/m2	221,67	166,25	62,50	112,25	268,47	79,33	13,44	27,39	22 - 195	95,54			
Volumes consommés														
Temps technicien	h	15,56	15,56	15,56	15,56	252,00	13,00	13,00	13,00	13,00	164,00			
Temps ingénieur	h	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00			
Electricité	kWh	155,13	155,13	155,13	155,13	150,00	140,75	140,75	140,75	140,75	150,00			
Eau	m3	1,17	1,50	1,18	1,14	0,00	0,97	1,16	13,65	1,02	0,00			
Semences	g	0,13	0,13	0,13	0,13	1416,96	0,11	0,11	0,11	0,11	1416,96			
Éthéphon	mL	2,18	1,09	0,44	0,00	0,00	2,18	1,09	0,44	0,00	0,00			
Engrais	L	1,75	1,77	1,87	1,74	0,00	1,55	1,57	1,67	1,54	0,00			
Acide	L	4,54	5,78	4,06	3,91	0,00	2,99	3,18	2,74	3,06	0,00			
Base	L	1,20	1,24	1,36	1,55	0,00	0,25	0,24	0,16	0,35	0,00			
OPEX														
Prestations agricoles	EUR	0,00	0,00	0,00	0,00	1050,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1050,00			
Technicien à 20,375€/h brut	EUR	317,04	317,04	317,04	317,04	5134,50	264,88	264,88	264,88	264,88	3341,50			
Ingénieur à 30,75€/h brut	EUR	276,75	276,75	276,75	276,75	78,75	246,00	246,00	246,00	246,00	70,00			
Electricité à 0,29€/kWh	EUR	55,87	55,87	55,87	55,87	43,50	51,70	51,70	51,70	51,70	43,50			
Eau à 5,053€/m3	EUR	5,91	7,59	5,97	5,78	0,00	4,90	5,85	68,97	5,15	0,00			
Semences	EUR	0,00716	0,00716	0,00716	0,00716	79,07	0,00471	0,00471	0,00471	0,00471	58,10			
Éthéphon	EUR	0,08	0,04	0,01	0,00	0,00	0,08	0,04	0,01	0,00	0,00			
Engrais	EUR	11,38	11,47	12,12	11,31	0,00	10,08	10,17	10,82	10,01	0,00			
Substrat (Laine de roche)	EUR	14,57	14,57	14,57	14,57	0,00	14,57	14,57	14,57	14,57	0,00			
Acide	EUR	5,52	7,03	4,94	4,76	0,00	3,63	3,87	3,34	3,72	0,00			
Base	EUR	0,67	0,69	0,76	0,86	0,00	0,14	0,13	0,09	0,19	0,00			
Nettoyage systèmes	EUR	0,73	0,73	0,73	0,73	0,00	0,73	0,73	0,73	0,73	0,00			
Analyse HPLC	EUR	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00			
TOTAL / MS = Prix de revient opérationnel	EUR/gMS	1,98	2,65	7,01	3,90	0,14	4,88	28,84	15,44	34,85 - 3,96	0,28			
Production totale	kgMS / m2 / an	0,665	0,499	0,188	0,337	0,268	0,238	0,040	0,082	0,07 - 0,59	0,096			



HISTOIRE :

Date de création : Juillet 2020
Nombre de salariés : 2,5
Nombre de produits : 6
Mode de vente : B2B et B2C
Site de production : Europe

ACTIVITÉ :

Activité exprimée : Développer l'usage médical du *Cannabis*
Produit phare : Huiles et CanFlex
Partenaires clé : Producteurs étrangers / Pharmacies et médecins / unité de production

Ambition : Devenir leader Européen des produits à base de cannabinoïdes vendus en pharmacie

<https://www.cbxmedical.com>

Contact :
Flora Mer



BUDDY

HISTOIRE :

Date de création : 2018
Nombre de produits : 24 (fleurs, résines & extraits)
Mode de vente : B2B
Volume de production : 5T de fleurs en 2021
Sites de production : 7 (Italie, Suisse, Macédoine)
Mode de production : Sol / Serre / Hors-sol

ACTIVITÉ :

Activité exprimée : Distributeur et transformateur
Produit phare : Fleurs à fumer
Partenaire clé : Producteurs hors Belgique

Ambition : Développement sur le marché mondial

<https://www.buddybelgium.com>

Contact :
Samuel Bermann



HISTOIRE :

Date de création : 2018
Objectif : Santé bien être
Nombre de produits : 2
Mode de vente : B2C et B2B
Surface de production : 2-5 ha
Volume de production : 50L/an
Mode de production : Sol

ACTIVITÉ :

Activité exprimée : Producteur de chanvre CBD
Transformation : À l'étranger
Produit phare : Huile de CBD
Partenaire clé : Extracteur à l'étranger

Ambition : Atteindre la rentabilité d'ici 2024

<https://www.canbe.farm/fr/>

Contact :
Tanguy De Monceau

Annexe n°6 : Fiches d'identité des entreprises interrogées

	Diplôme : Ingénieur en Paysage Spécialité : IEVU Spécialisation / option : Agriculture Urbaine Enseignant référent : Soulayman Sakr
Auteur(s) : Arthur Libault Date de naissance* : 4 Juillet 1999	Organisme d'accueil : Gembloux Agrobio-Tech, Université de Liège
Année de soutenance : 2022	Adresse : 13 Av. du Maréchal Juin, Bât.47, 5030, Gembloux, Belgique
Nb pages : 60 Annexe(s) : 6	Maître de stage : Professeur M.H. Jijakli, N. Ancion et F. Bafort
Titre français : Étude technico-économique sur l'itinéraire cultural de 2 variétés de chanvre industriel pour la production de CBD et CBG	
Titre anglais : Technical and economic study on the cultivation of two industrial hemp varieties for CBD and CBG production	
Résumé (1600 caractères maximum) :	
<p>Le chanvre (<i>Cannabis sativa sativa</i>) est une plante très utilisée par l'Homme dans l'histoire. Cette plante est entièrement valorisable dans plusieurs domaines d'activité et présente de nombreux avantages agronomiques. L'utilisation de ses fleurs, très règlementé, trouve sa place progressivement dans le domaine médical en démontrant son utilité pour plusieurs pathologies. Dans le cadre de la production de cette plante en Belgique, nous étudions plusieurs itinéraires de culture afin d'appréhender la rentabilité de ces techniques et de leur impact sur la qualité de la production. En serre sur toiture ou culture au champ traditionnelle, différents sites sont étudiés. L'effet d'un régulateur de croissance, l'éthéphon, est étudié dans la solution nutritive hydroponique en serre. Trois doses du régulateur de croissance sont testées. Les meilleurs effets sur la réduction de la taille ainsi que sur la concentration en métabolites d'intérêts - le CBG de la variété Santhica 27 et le CBD de la variété Féline 32 - ont été observés pour les deux plus fortes doses d'éthéphon. C'est au champ que nous retrouvons les plus fortes concentrations en CBD chez Féline 32. Chez Santhica 27, les concentrations en CBG au champ sont semblables à celles de la dose d'éthéphon la plus forte en serre. L'étude économique témoigne de la nécessité d'améliorer l'itinéraire technique en serre et de diminuer le temps de travail lié à la récolte.</p>	
Abstract (1600 caractères maximum) :	
<p>Hemp (<i>Cannabis sativa sativa</i>) is a plant that has been used extensively by humans throughout history. This plant can be used in many fields of activity and has many agronomic advantages. The use of its flowers, which is highly regulated, is gradually finding its place in the medical field by demonstrating its usefulness for several pathologies. Within the framework of the production of this plant in Belgium, we are studying several cultivation itineraries in order to understand the profitability of these techniques and their impact on the quality of the production. Various sites are being studied, one in the greenhouse and a second one in a traditional field. The effect of a growth regulator, ethephon, is studied in the greenhouse hydroponic nutrient solution. Three doses of the growth regulator are tested. The best effects on size reduction and on the concentration of metabolites of interest - CBG in the Santhica 27 variety and CBD in the Felina 32 variety - were observed for the two highest doses of ethephon. The highest CBD concentrations were found in the field with Felina 32. In Santhica 27, the CBG concentrations in the field are similar to those of the highest ethephon dose in the greenhouse. The economic study shows that it is necessary to improve the cropping patterns in the greenhouse and to reduce the time spent on harvesting.</p>	
Mots-clés : Chanvre / Hydroponie / Itinéraire cultural / Éthylène / CBD / CBG Key Words: Hemp / Hydroponic / Cropping partterns / Ethylene / CBD / CBG	