



HAL
open science

Étude de l'impact de la lumière sur les insectes ravageurs

Fanny Ublet

► **To cite this version:**

Fanny Ublet. Étude de l'impact de la lumière sur les insectes ravageurs. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03579431

HAL Id: dumas-03579431

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03579431v1>

Submitted on 18 Feb 2022

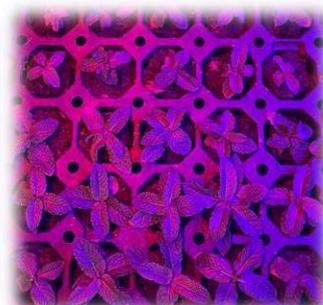
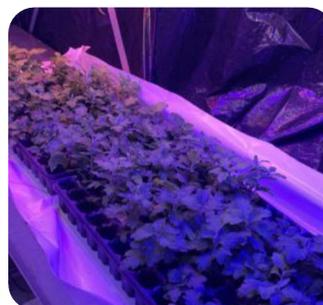
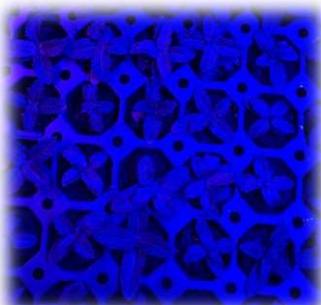
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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

<p>AGROCAMPUS OUEST</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CFR Angers <input type="checkbox"/> CFR Rennes</p> <p>l'institut Agro agriculture • alimentation • environnement</p> 	 université angers  UNIVERSITÉ DE NANTES	 ASTREDHOR Institut technique de l'horticulture
<p>Année universitaire : 2020 - 2021</p> <p>Mention : Biologie végétale</p> <p>Parcours : Filières de l'horticulture et Innovations (FHI)</p>	<p>Mémoire de Fin d'Études</p> <p><input type="checkbox"/> d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>	

Etude de l'impact de la lumière sur les insectes ravageurs

Par : Fanny UBLET



Soutenu à Angers le 09/09/2021

Devant le jury composé de :

Présidente : Béatrice TEULAT

Maître de stage : Alain FERRE

Enseignant référent : Yann TRICAULT

Responsable de parcours FHI : Emmanuel GEOFFRIAU

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



Remerciements

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon maître de stage, Alain FERRE, pour sa confiance, sa disponibilité, et toutes les connaissances qu'il a su me transmettre.

Je tiens également à remercier tous les membres de l'équipe de la station Arexhor PL pour leur accueil chaleureux.

Je remercie également Yann TRICAULT, maître de conférence à Agrocampus Ouest, pour ses conseils sur la rédaction de mon mémoire.

Enfin, je remercie chaleureusement l'équipe enseignante du parcours I2PH d'Agrocampus Ouest pour leur engagement et le soutien qu'ils ont su apporté à leurs étudiants pendant cette année scolaire dans un contexte sanitaire compliqué.

Liste des abréviations

AA = Acides Aminés

DLI = Daily Light Integral

LEDs = Light Emitting Diodes

ET = Ethylène

JA = Acide Jasmonique

PPFD = Photon Flux Density

R/B = Rouge/Bleu

SA = Acide Salicylique

UV = Ultra Violet

HIPVs = Herbivore-Induced Plant Volatiles

SDP = Stimulateur de Défenses des Plantes

Table des figures

Figure 1 : spectres d'absorption des photorécepteurs des plantes (Battle et al., 2020).....	1
Figure 2 : photographie et schéma d'une LED (Light Emitting Diode) [1].....	1
Figure 3 : lumière et photorécepteurs impliqués dans les voies de signalisation de l'acide salicylique et de l'acide jasmonique (Roeber et al., 2021).....	3
Figure 4 : syndrome de l'évitement de l'ombre généré par le rouge lointain chez <i>Arabidopsis thaliana</i> : lumière blanche (B), lumière blanche + rouge lointain (B+RL) (Pantazopoulou et al., 2017).....	3
Figure 5 : nombre de thrips (<i>Frankliniella occidentalis</i>) par feuille sur chrysanthème sous lumière blanche (control) et UV-B (UV) en fonction du temps (Escobar-Bravo et al., 2019).....	5
Figure 6 : Mécanismes de résistance des plantes (War et al., 2012).....	5
Figure 7 : voies de signalisation de la lumière chez la drosophile (Lazopulo et al., 2019).....	6
Figure 8 : taux de mortalité des pupes de drosophiles sous différentes longueurs d'onde (Hori et al., 2015).....	6
Figure 9 : attractivités des HIPVs émis par les insectes ravageurs et leurs prédateurs ou parasitoïdes associés (Gebrezihier et al., 2018).....	7
Figure 10 : sensibilité de menthes aux thrips californiens suivant l'éclairage reçu (tests statistiques : test du Chi ² au seuil $\alpha=0,05$). Éclairage "SDP" à dominante bleu (60 B / 8 V / 32 R) ; éclairage "Neutre" équilibré entre le bleu et le rouge : (48 B / 6 V / 46 R); spectre "sensibilisant" à dominante rouge (31 B / 14 V / 55 R) (AREXHOR PL, 2018).....	9
Figure 11 : nombre moyen de feuilles par apex infestées par <i>Myzus persicae</i> . Notation le 18/03/20, 3 mois après la mise en place. Test statistique : Anova, $\alpha=0,05$, $p=0,0056$, groupes construit par test de Student 2 à 2.....	9
Figure 12 : schéma du modèle explicatif : mécanismes impliqués dans la régulation des insectes ravageurs.....	11
Figure 13 : courbe théorique du modèle avec le facteur « qualité sève » prépondérant sous dominante rouge.....	11
Figure 14 : courbe théorique du modèle avec le facteur SDP prépondérant.....	12
Figure 15 : courbe théorique du modèle avec le facteur effarouchement prépondérant.....	12
Figure 16: schéma du dispositif lumineux en chambre de culture, vu de face.....	13
Figure 17: photo du dispositif en chambre de culture.....	13
Figure 18 : ratios R/B du dispositif en chambre de culture utilisés pour les couples menthe/puceron et poivron/puceon.....	13
Figure 19 : ratios R/B du dispositif en chambre de culture utilisés pour le couple chrysanthème/thrips.....	13
Figure 20 : schéma du dispositif lumineux en conditions de production sous tunnel, vu de face.....	14
Figure 22 : ratio R/B de l'essai sous tunnel pour le couple népéta/aleurode et népéta/cicadelle. Les nombres sur l'histogramme correspondent aux intensités en PPFD ($\mu\text{mol/m/s}$).....	14
Figure 21 : ratios R/B de l'essai sous tunnel pour le couple menthe/puceron (<i>Ovatus mentarius</i>). Les nombres sur l'histogramme correspondent aux intensités en PPFD ($\mu\text{mol/m/s}$).....	14
Figure 23 : photographie du dispositif sous tunnel lors de la mise en place des boutures de menthe.....	15
Figure 24 : photographie des chrysanthèmes sous dispositif en chambre de culture.....	15
Figure 25 : photographie du dispositif à la mise en place des boutures de menthe et du semis de poivron en chambre de culture.....	15
Figure 26 : photographie des menthes lors de la notation nombre de puceron sous rouge (à gauche) et sous bleu (à droite).....	15
Figure 27: mise en place des népétas sous le dispositif en condition de production.....	15
Figure 28 : transformation logarithmique du nombre moyen de puceron (<i>Ovatus mentarius</i>) en fonction du ratio R/B sur feuilles de menthe. Notation réalisée le 27/05/2021. Essai en chambre de culture.....	17
Figure 29 : transformation logarithmique du nombre moyen de puceron (<i>Aulacorthum solani</i>) en fonction du ratio R/B par cotylédon de poivron. Notation le 02/06/2021. Essai en chambre de culture.....	18
Figure 30 : pourcentage de dégâts de thrips (courbe noire) en fonction du ratio R/B et nombre de larve de thrips (battons) en fonction du ratio R/B. Essai en chambre de culture. Notation le 04/08/2021.....	18
Figure 31: transformation logarithmique du nombre moyen de puceron (<i>Ovatus mentarius</i>) en fonction du ratio R/B par feuilles de menthe. Notation réalisée le 04/06/2021. Essai sous tunnel.....	20
Figure 32 : transformation logarithmique du nombre moyen de larves d'aleurode (<i>Bemisia tabaci</i>) sur népétas en fonction du ratio R/B. Notation réalisée le 21/06/2021. Essai sous tunnel.....	21
Figure 33 : % de feuilles avec dégâts (étages 3 à 5) de Cicadelle (<i>Eupteryx decemnotata</i>) sur népétas en fonction du ratio R/B. Notation réalisée le 05/07/21. Essai sous tunnel.....	21
Figure 34 : Spectre à dominante bleue 0+60/8/32+0.....	22
Figure 35 : Spectre équilibré 0+48/6/46+0.....	22
Figure 36 : Spectre à dominante rouge 0+28/10/62+0.....	22
Figure 37 : plan de l'essai en chambre de culture pour les couples menthe/puceron (<i>Ovatus mentarius</i>) et poivron/puceron (<i>Aulacorthum solani</i>).....	24
Figure 38 : plan de l'essai en chambre de culture pour le couple chrysanthème/thrips (<i>Frankliniella occidentalis</i>).....	24
Figure 39 : plan de l'essai en conditions de production (tunnel) pour le couple menthe/puceron (<i>Ovatus mentarius</i>).....	25
Figure 40 : plan de l'essai en conditions de production (tunnel) pour le couple népéta/aleurode (<i>Bemisia tabaci</i>) et népéta/cicadelle (<i>Eupteryx decemnotata</i>).....	25

Liste des annexes

Annexe 1 : glossaire technique (essais 2019-2020)

Annexe 2 : plan des essais 2021

Liste des tableaux

Tableau 1 : résultats des essais 2019-2020 sur thrips (<i>Frankliniella occidentalis</i>) et pucerons (<i>Myzus persicae</i>).....	10
Tableau 2 : calendrier des interventions pour l'essai mené en conditions contrôlées (chambre de culture).....	15
Tableau 3 : calendrier des interventions pour l'essai mené en conditions de production (tunnel).....	15
Tableau 4 : résultats des tests statistiques de Pearson pour le couple menthe/puceron en conditions contrôlées (log nombre de puceron/plante +1).....	18
Tableau 5 : résultats des tests statistiques de Pearson pour le couple poivron/puceron (<i>Aulacorthum solani</i>) en conditions contrôlées (log nombre de puceron/cotylédon +1).....	19
Tableau 6 : résultats des tests statistiques de Pearson pour le couple chrysanthème/thrips en conditions contrôlées (nombre de larves de thrips/plante).....	20
Tableau 7 : résultats du test statistique de Pearson pour le couple menthe/puceron (<i>Ovatus mentarius</i>) en condition de production sous tunnel (log nombre de puceron/plante +1).....	19
Tableau 8 : résultats du test statistique de Pearson pour le couple népéta/aleurode en conditions de production sous tunnel (log nombre de larve d'aleurode/plante +1).....	20
Tableau 9 : résultats du test statistique de Pearson pour le couple népéta/cicadelle en conditions de production sous tunnel (% de feuilles avec dégâts de cicadelle).....	23
Tableau 10 : synthèse des résultats obtenus ; significativité de l'impact du spectre sur l'infestation (Test de Pearson, $\alpha = 0,05$) NS = Non significatif ; S = Significatif.....	24
Tableau 11 : modalités pour l'essai sur <i>Arabidopsis thaliana</i>	25

Tables des matières

I.	Introduction	1
II.	Etude bibliographique	2
II.1	Lumière, photorécepteurs, et effet SDP	2
II.2	Synthèse de l'effets SDP de la lumière contre les insectes et méthode d'évaluation	5
II.3	Effets directs de la lumière sur les insectes ravageurs : effarouchement, attraction, fitness	5
II.4	Effets directs de la lumière sur le comportement des auxiliaires	7
II.5	Effets de la lumière sur le comportement des auxiliaires via les plantes	7
II.6	Synthèse des effets directs de la lumière sur les insectes ravageurs et effets sur les auxiliaires.	8
III.	Contexte du stage	9
III.1	Essais précédents (2019-2020)	9
III.1.1	Essai sur thrips	9
III.1.2	Essais sur puceron	9
III.2	Sujets d'études 2021	11
III.3	Modèles explicatifs testés	11
III.3.1	Qualité sève	11
III.3.2	SDP	12
III.3.3	Effarouchement	12
III.3.4	Synergie SDP-effarouchement	12
IV.	Matériels et méthodes	13
IV.1	Couples plantes / ravageurs testés	13
IV.2	Dispositifs et spectres lumineux utilisés	13
IV.2.1	Essai en conditions contrôlées (chambre de culture)	13
IV.2.2	Essai en conditions de production	14
IV.3	I.1 Critères de notations	14
IV.4	Calendrier des interventions	15
IV.5	Analyse statistique des résultats	16
IV.5.1	Transformation logarithmique des données d'infestation	16
IV.5.2	Méthode d'analyse descriptive	16
IV.5.3	Méthode d'analyse statistique	16
V.	Résultats	17
V.1	Essai en conditions contrôlées	17
V.1.1	Menthe / puceron (<i>Ovatus mentarius</i>)	17
V.1.2	Poivron / puceron (<i>Aulacorthum solani</i>)	18
V.1.3	Chrysanthème / thrips (<i>Frankliniella occidentalis</i>)	18
V.2	Essai en conditions de production	20
V.2.1	Menthe / puceron (<i>Ovatus mentarius</i>)	20
V.2.2	Népéta / aleurode (<i>Bemisia tabaci</i>)	21
V.2.3	Népéta / Cicadelle (<i>Eupteryx decemnotata</i>)	21
VI.	Discussion	22
VI.1	Dispositif expérimental utilisé	23
VI.2	Révision du modèle	23
VI.3	Discrimination de l'effet SDP et effarouchement	25
VII.	Conclusion	26
VIII.	Bibliographie	26
IX.	Sitographie	31

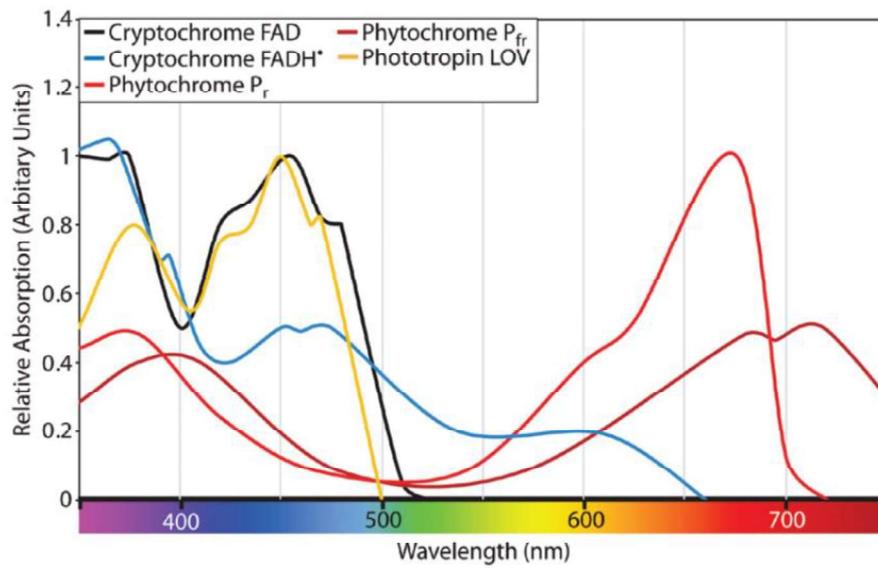


Figure 1 : spectres d'absorption des photorécepteurs des plantes (Battle et al., 2020)

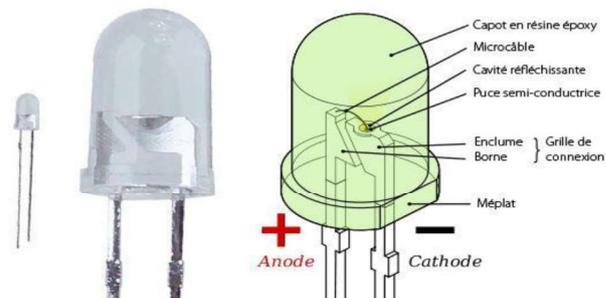


Figure 2 : photographie et schéma d'une LED (Light Emitting Diode) [1]

I. Introduction

Les plantes utilisent la lumière comme source d'énergie pour la photosynthèse. La lumière est aussi un signal qui induit diverses réponses physiologiques ; la composition du spectre lumineux influence et oriente la croissance et le développement des plantes. Le processus impliqué est appelé photomorphogénèse. Les plantes perçoivent les conditions de leur environnement par de nombreux photorécepteurs. Ils captent la lumière au niveau de quatre plages de longueur d'onde. Les phytochromes captent le rouge clair (R=660 nm) et le rouge lointain (RL=740 nm). Les cryptochromes, phototropines, ZTL etc. absorbent des UVA au bleu (pics d'absorption à 365 et 450nm). Les UVR8 absorbent les UV-B (290-300nm). La figure 1 regroupe les spectres d'absorption des différents photorécepteurs. Suivant l'intensité reçue pour une longueur d'onde donnée ou le rapport d'intensité entre deux longueurs d'onde, les plantes vont réagir spécifiquement. Par exemple, si le ratio Rouge/Rouge lointain est élevé alors les plantes arrêtent leur croissance apicale, se ramifient et les feuilles deviennent plus foncées (Battle *et al.*, 2020).

Aujourd'hui dans les serres de productions horticoles, le spectre et l'intensité de l'éclairage peuvent être en partie contrôlés par l'utilisation de LEDs (Light-Emitting diodes) (figure 2). Ces éclairages LEDs sont une révolution car ils permettent aux producteurs d'utiliser n'importe quel spectre pour éclairer leurs cultures. Ainsi, ils peuvent orienter la croissance et le développement de leurs cultures en fonction de leurs objectifs de production (produire des sujets fleuris, trapus, des boutures etc.) (Lazzarin *et al.*, 2020).

Par des observations antérieures en chambre de culture, les ingénieurs de l'Arexhor PL ont remarqué que, dans certaines conditions d'éclairage LEDs, certains ravageurs étaient fortement limités dans leur développement. Ces observations ont été confirmées par des expérimentations en 2019 et 2020 au travers du projet *Phybi* (résultats page n°9). Ce projet, mené par l'Arexhor PL, explore de nouveaux moyens pour contrôler les ravageurs sans usage de pesticides. Les résultats de ces expérimentations montrent un taux d'infestation du thrips divisé par quatre sous spectre à dominante bleu comparé à un spectre à dominante rouge sur chrysanthème.

Ce levier est très prometteur pour contrôler le développement des bioagresseurs sans produits phytosanitaires. En effet, les réglementations gouvernementales actuelles (directive européenne 2009/128/CE), ainsi que les attentes sociétales, visent à réduire la liste des produits insecticides autorisés pour limiter l'impact négatif de l'agriculture sur l'environnement et sur la santé humaine (plan Ecophyto I, II, et II+). Dans cette optique, les professionnels sont

encouragés à réduire leur consommation de produits phytopharmaceutiques. En parallèle, ils sont incités à utiliser des moyens de lutte alternatifs aux produits phytosanitaires. Or, pour certaines espèces de ravageurs, les méthodes alternatives « classiques », comme les lâchers d'auxiliaires, fonctionnent assez mal. C'est le cas pour les thrips, les cicadelles et certains pucerons, qui sont des ravageurs majoritaires en production horticole sous serre. Ces ravageurs causent des dégâts relativement importants sur les cultures et entraînent des pertes économiques importantes pour les producteurs et les autres acteurs de la filière.

L'utilisation de la lumière comme méthode de lutte pourrait donc être une solution à cette problématique. Le premier mécanisme supposé par les chercheurs de l'Arexhor PL serait un effet indirect d'activation des défenses des plantes par la lumière, appelé effet stimulateur de défense des plantes (SDP). En effet, certains spectres pourraient stimuler la production de molécules de défenses des plantes qui nuisent aux insectes ravageurs.

Le second mécanisme supposé serait un effet d'effarouchement direct des insectes par certaines longueurs d'onde.

Le troisième effet supposé correspondrait à l'amélioration de l'appétence des végétaux pour les insectes sous certains spectres (amélioration de la couleur, de la texture des tissus, du taux de sucre de la sève, etc.) ou *a contrario*, une réduction de l'appétence.

Les mécanismes physiologiques et/ou comportementaux qui sous-tendent les effets observés étant encore mal connus, il est nécessaire de mettre en place de nouveaux essais cette année 2021 à l'AREXHOR PL, pour à terme, proposer cette méthode de gestion innovante aux producteurs.

Ce travail tentera de répondre aux problématiques suivantes : les spectres à dominante bleue permettent-ils vraiment de limiter les infestations par les insectes ravageurs ? Quels sont les mécanismes impliqués ?

II. Etude bibliographique

II.1 Lumière, photorécepteurs, et effet SDP

Dans la bibliographie, l'effet de la lumière sur les insectes porte essentiellement sur le rapport rouge/rouge lointain et sur l'intensité en bleu, violet et UV-B.

Concernant le **Rouge/Rouge Lointain**, les études montrent qu'un rapport faible limite la résistance des plantes via une réduction de la production d'acide jasmonique et de l'expression des défenses liées à l'acide jasmonique (Ballaré *et al.*, 2012 ; De Wit *et al.*, 2013 ; Cargnel *et al.*, 2014 ; Roeber *et al.*, 2021) (figure 3).

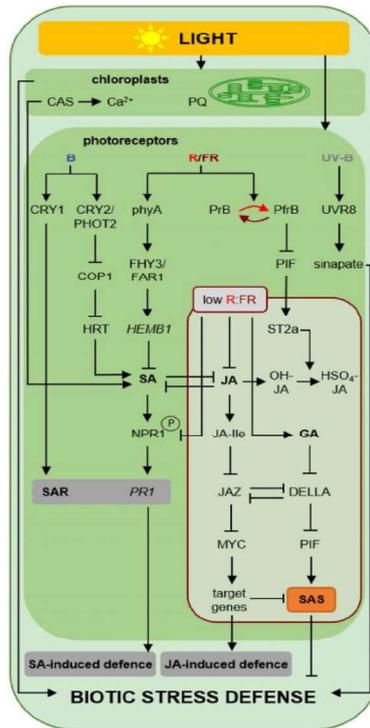


Figure 3 : lumière et photorécepteurs impliqués dans les voies de signalisation de l'acide salicylique et de l'acide jasmonique (Roeber et al., 2021)

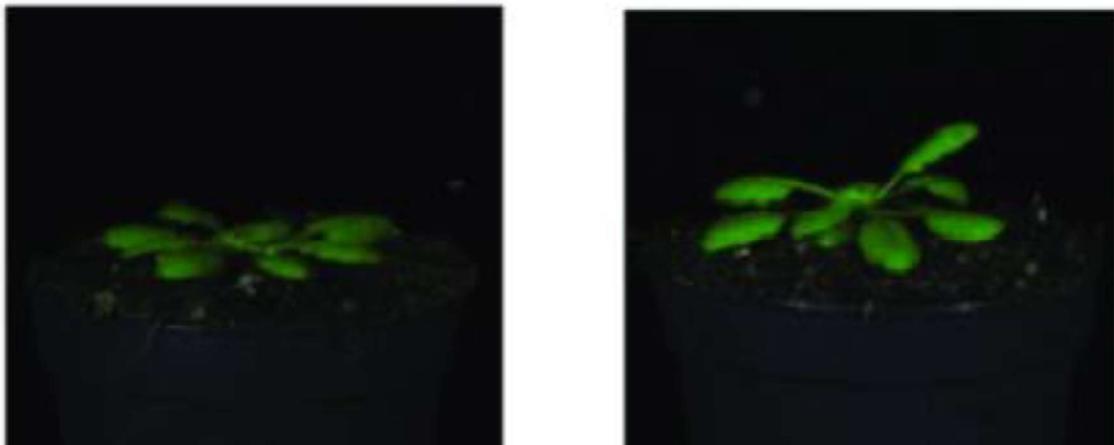


Figure 4 : syndrome de l'évitement de l'ombre généré par le rouge lointain chez Arabidopsis thaliana : lumière blanche (B), lumière blanche + rouge lointain (B+RL) (Pantazopoulou et al., 2017)

De nombreux autres articles montrent l'effet "sensibilisateur" d'un ratio R/RL faible contre *Botrytis cinerea* pour *Arabidopsis thaliana* (Xiang *et al.*, 2020 ; Cargnel *et al.*, 2014; De Wit *et al.*, 2013), fraise (Meng *et al.*, 2020) et tomate (Courbier *et al.*, 2020 ; Xu *et al.*, 2016). Aucun article montrant un effet du rapport R/RL sur le développement des insectes ravageurs n'a été trouvé pendant ce travail de recherche bibliographique. Cependant, par extension des résultats précédents, il semble possible d'émettre l'hypothèse qu'ils affectent aussi le développement des phytophages.

Un rapport R/RL faible provoque chez les plantes des réactions physiologiques qui correspondent au syndrome de l'évitement de l'ombre (figure 4). En effet, les rayonnements du rouge lointain sont ceux des endroits ombragés par d'autres plantes. Lorsqu'une plante capte ce rapport, la priorité pour la plante est alors d'optimiser son exposition à la lumière, en augmentant sa croissance en hauteur (phénomène d'étiollement). Les autres mécanismes physiologiques, comme la mise en place des mécanismes de défense, sont alors négligés. Il est démontré qu'une plante avec un syndrome de l'évitement de l'ombre est plus sensible aux bio-agresseurs (Izaguirre *et al.*, 2006 ; De Wit *et al.*, 2013 ; Ballaré 2009). Cette régulation passe par la répression du phytochrome-interacting factors (PIFs) qui réduit la sensibilité au jasmonate.

Concernant l'impact d'un **éclairage bleu** sur la résistance des plantes, les mécanismes sont de mieux en mieux connus. Jeong et ses collègues ont montré en 2010 que les récepteurs du bleu cryptochrome 2 et phototropine 2 sont nécessaires à la stabilité des protéines R qui améliore la résistance au virus TCV. L'article de Wu et Yang paru en 2010, montre que le cryptochrome 1 est impliqué dans la régulation des protéines R qui induisent la résistance des *Arabidopsis* au *Pseudomonas syringae*. La réponse à la lumière bleue est également corrélée à l'état des phytochromes donc à la lumière rouge (El-Esawi *et al.*, 2017). Ce dernier article montre que l'activation du cry1 entraîne une surproduction de ROS qui elle-même améliore la résistance des plantes et par une boucle de rétroaction désactive cry1. D'autre part, Lazzarin et ses collègues ont montré en 2020 qu'un éclairage bleu favorise la production de l'acide salicylique et l'expression des défenses liées à cet acide. La figure 3 explique la chaîne physiologique qui relie l'éclairage bleu et les effets SDP.

Concernant le ratio **Rouge/Bleu**, un ratio faible (=0,5) stimule la production de métabolites secondaires, comme l'ascorbate et les anthocyanes (Zha *et al.*, 2020 ; Pennisi *et al.*, 2019 ; Spalholz *et al.*, 2020 ; Kim *et al.*, 2021) et augmente l'activité antioxydante des cellules végétales (Kim *et al.*, 2021). Ce ratio augmente également l'assimilation de CO₂ en stimulant l'ouverture des stomates (Piovene *et al.*, 2015). La teneur en matière fraîche quant à elle, décroît sous un ratio R/B faible. Le nombre de feuilles par plante diminue, la surface foliaire

augmente sous ce ratio chez la laitue, la coriandre et la fraise. En effet, le bleu en importante quantité augmente la taille des feuilles (Naznin *et al.*, 2016 ; Spalholz *et al.*, 2020). Un ratio Rouge/Bleu élevé (=3) augmente la teneur en matière fraîche, le nombre de feuille, la teneur en chlorophylle et améliore l'efficacité liée à l'utilisation de l'eau et des nutriments (Pennisi *et al.*, 2019 ; Spalholz). Cependant, la teneur en métabolites secondaires diminue sous un ratio élevé (Zha *et al.*, 2020). Durant ces recherches bibliographiques, aucun article n'a été trouvé concernant l'impact du ratio Rouge/Bleu sur le développement des insectes ravageurs. Cependant, l'hypothèse serait que ce ratio a un effet sur l'infestation par les insectes ravageurs, grâce au bleu, qui lui a un effet avéré sur la production de métabolites secondaires impliquées dans les défenses des plantes (Spalholz *et al.*, 2020).

Pour l'instant, aucun récepteur spécifique à la **lumière verte** n'a été identifié, cependant, il a été démontré que les longueurs d'onde correspondant au vert agissent et peuvent être absorbées par certaines formes de récepteurs du bleu, en particulier les cryptochromes FADH. Une étude de 2015 réalisée par Sato et ses collègues, montre qu'un éclairage de 2h la nuit avec de la lumière verte ou de la lumière bleue entraîne des effets similaires sur la morphologie de l'arabette (réduction de la longueur des racines et de l'hypocotyle). Ces éclairages entraînent également une surproduction d'acide jasmonique et d'acide salicylique. En plus, l'éclairage avec le vert serait plus efficace avec des taux deux fois supérieurs à l'éclairage bleu. Un éclairage vert+bleu réduit entièrement le FADH alors qu'un éclairage uniquement bleu passe le FAD de sa forme oxydée à sa forme neutre (Battle *et al.*, 2020 ; Hammad *et al.*, 2019). La lumière verte interagit également avec les phytochromes en augmentant l'intensité du syndrome d'évitement de l'ombre sous R/RL faible (Battle *et al.*, 2020). Ainsi, par extrapolation, un éclairage riche en vert peut nuire aux défenses des plantes si le ratio R/RL n'est pas élevé. En revanche, s'il l'est, alors la réponse sera optimisée par la forte production de SA et JA.

Les effets actuellement connus d'un éclairage riche en **UV-B** en relation avec la résistance des plantes repose sur l'augmentation de la production de flavonoïdes, pigments protégeant l'intégrité cellulaires contre les UV-B et UV-C (Jenkins, 2009 ; Ballaré *et al.*, 2012 ; Timbrook *et al.*, 2013). L'exposition aux UV-B permet également une amélioration de la résistance aux bioagresseurs (Ballaré *et al.*, 2012 ; Tilbrook *et al.*, 2013 ; Escobar-Bravo *et al.*, 2017 ; Escobar-Bravo *et al.*, 2019) par interaction avec les voies de signalisation SA et JA, provoquant notamment l'accumulation de produits phénoliques, voie du métabolisme secondaire génératrice de composés de défense vis-à-vis de stress biotiques et abiotiques (Ballaré *et al.*, 2014). Escobar-Bravo et ses collègues montrent en 2019 une résistance des chrysanthèmes aux thrips californiens sous éclairage UV-B via une surproduction de JA et de

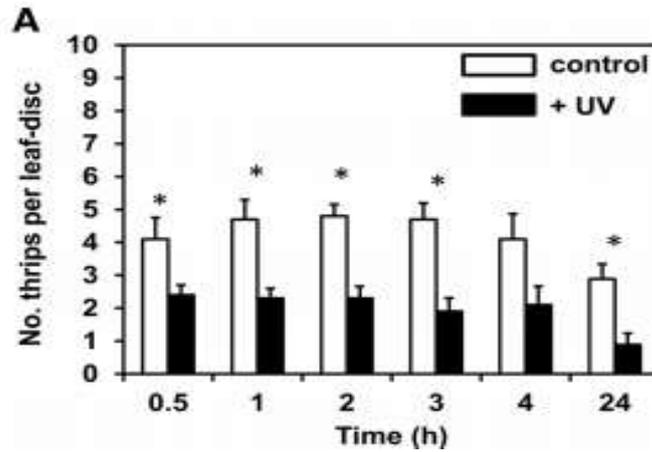


Figure 5 : nombre de thrips (*Frankliniella occidentalis*) par feuille sur chrysanthème sous lumière blanche (control) et UV-B (UV) en fonction du temps (Escobar-Bravo et al., 2019)

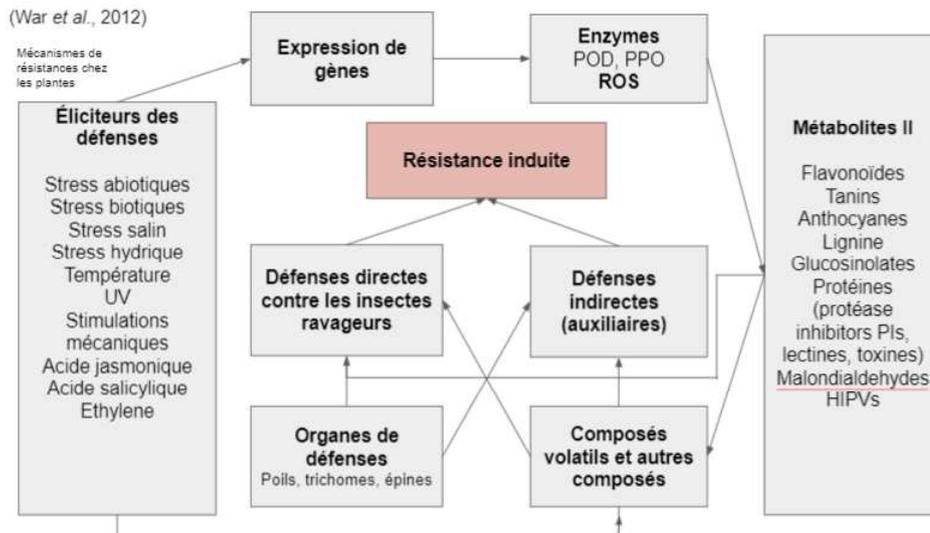


Figure 6 : Mécanismes de résistance des plantes (War et al., 2012)

SA (figure 5). Ils permettent également un renforcement pariétal à différents niveaux (lignine, hémicellulose, cellulose) (Le Gall *et al.*, 2015), une résistance aux stress hydriques (Escobar-Bravo *et al.*, 2017), une résistance aux fortes températures (Escobar-Bravo *et al.*, 2017) ainsi qu'une tolérance accrue aux fortes intensités lumineuses (Roeber *et al.*, 2021)

Ainsi, l'intensité en UV-B, rouge lointain, rouge clair, vert, et bleu, y compris les ratios d'intensité entre ces couleurs jouent des rôles importants dans l'activation des défenses des plantes. Davantage de recherches sont nécessaires pour connaître les intensités qui permettent d'optimiser l'effet SDP supposé (Lazzarin *et al.*, 2020).

II.2 Synthèse de l'effets SDP de la lumière contre les insectes et méthode d'évaluation

Le système immunitaire des plantes recouvre des protéines de perception des bioagresseurs (protéines R ou PR), des voies de signalisation hormonales (principalement acide salicylique ou SA, acide jasmonique ou JA et éthylène ou ET) et mécanismes avals conduisant à la synthèse de métabolites, protéines, macromolécules impliquées dans l'élaboration de barrières chimiques (antimicrobiennes et insecticides) ou physiques (renforcement pariétal). La figure 6 illustre ces différents mécanismes. Comme développé précédemment, des effets significatifs des différents signaux lumineux perçus par les photorécepteurs sur l'expression des défenses des plantes ont déjà été démontrés. Stratégique pour la plante pour réguler le compromis croissance/défense, les signaux lumineux semblent selon les cas activer directement les défenses ou mettre simplement la plante en état de se défendre, en levant des répressions.

II.3 Effets directs de la lumière sur les insectes ravageurs : effarouchement, attraction, fitness

La plupart des insectes, tels que pucerons et thrips, et les hyménoptères parasitoïdes, ont une vision trichromatique avec des récepteurs sensibles au vert, bleu et UV-A et, ainsi, ils sont capables de différencier ces couleurs (Briscoe *et al.*, 2001 ; Yaku *et al.*, 2007). Une étude récente (Lazopulo *et al.*, 2019) a montré que les drosophiles évitent la lumière bleue. Cette étude met en évidence les mécanismes sous-jacents. Le signal est reçu au niveau des neurones multidendritiques de l'abdomen par la rhodopsine 7 qui active la voie "*Painless*", une voie induite en cas de conditions défavorables à l'insecte, comme la chaleur, la sécheresse, ou des *stimuli* mécaniques ou chimiques. En d'autres termes, la voie *Painless* est une voie de nociception, la lumière bleue est détectée comme nocive et les drosophiles l'évitent. Contrairement à l'évitement de la lumière bleue, une préférence pour la lumière verte pendant certains moments de la journée est observée chez les drosophiles. Une préférence

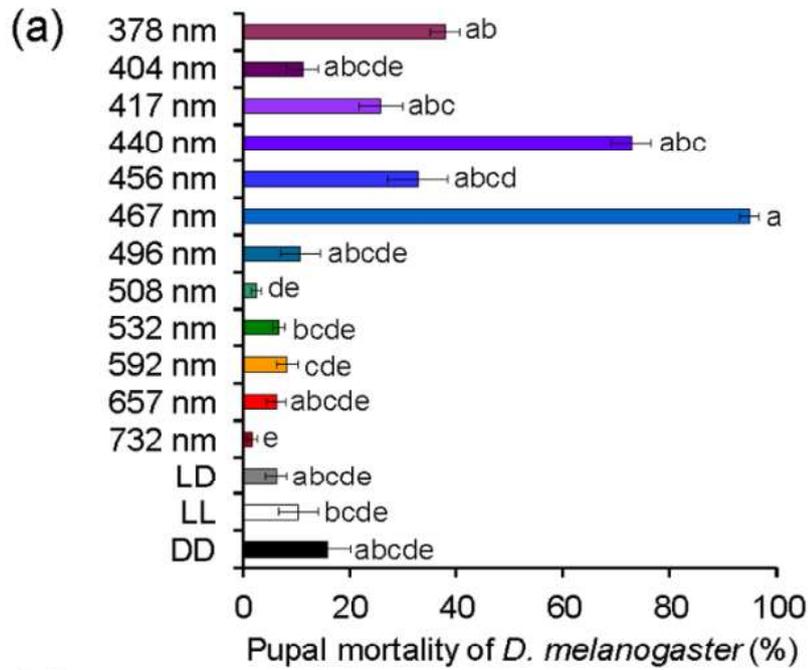


Figure 7 : voies de signalisation de la lumière chez la drosophile (Lazopulo et al., 2019).

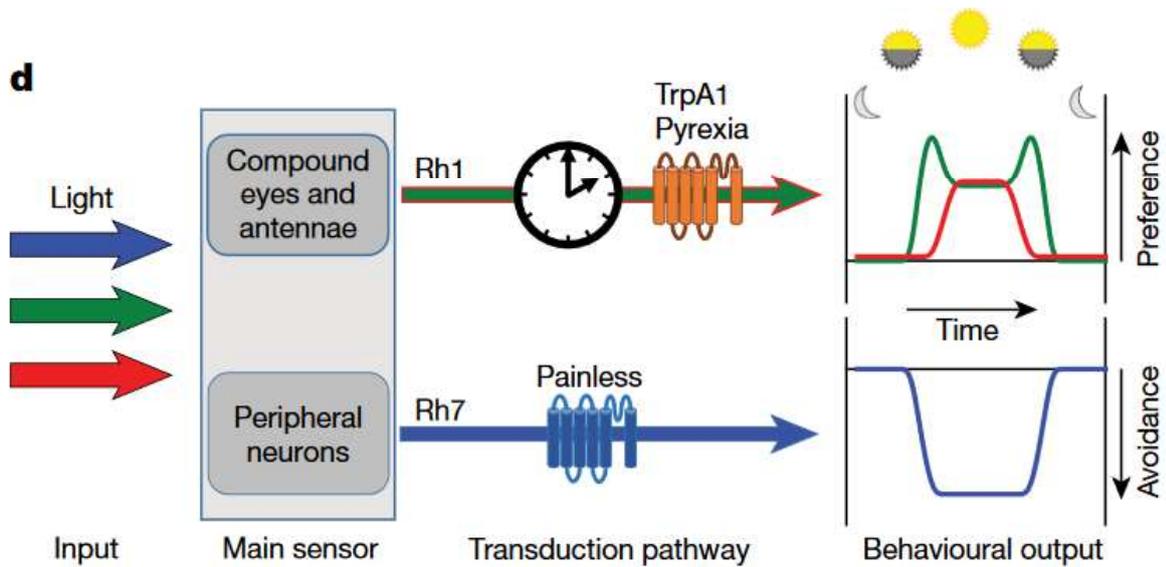


Figure 8 : taux de mortalité des pupes de drosophiles sous différentes longueurs d'onde (Hori et al., 2015)

pour des zones ombragées au milieu de la journée est probablement associée avec une prise de nourriture. Contrairement aux mécanismes de perception de la lumière bleue, la lumière verte est perçue par la rhodopsine 1 au niveau des yeux et des antennes, qui active les voies TrpA1 (Transient receptor potential A1) et Pyrexia, régulées par les gènes du rythme circadien. La figure 7 résume le modèle de réponse comportementale des drosophiles à la lumière.

Hori et ses collègues ont mené en 2015 une étude sur l'impact de la lumière sur la drosophile (*Drosophila melanogaster*), le moustique (*Culex pipiens*) et tribolion de la farine (*Tribolium confusum*). Cette étude montre un taux de mortalité des pupes de drosophiles plus important sous lumière bleue (90% de mortalité à 467 nm) que sous des longueurs d'ondes correspondant au vert (5% de mortalité à 532 nm) ou au rouge (5% de mortalité à 657 nm) (figure 8). Sous les longueurs d'ondes les plus létales, plus l'intensité augmente, plus le taux de mortalité est élevé. Il y aurait donc un impact du spectre et de l'intensité sur la mortalité de ces insectes. A 467 nm (bleu), on observe aussi une diminution du nombre d'œufs pondus par les drosophiles adultes. Le spectre aurait donc aussi une influence sur la fécondité des insectes. Pour le moustique et le tribolion de la farine, les résultats sont comparables à ceux observés chez la drosophile. Cependant, le spectre le plus léthal est décalé de quelques nanomètres en fonction de l'espèce, mais concerne toujours les longueurs d'ondes correspondant au bleu (417 nm pour le moustique, de 404 à 467 pour le tribolion de la farine) (Hori *et al.*, 2015).

La vision des couleurs des insectes phytophages a été proposée comme méthode de lutte dans le passé. Une hypothèse intéressante est qu'un changement de couleur des feuilles de la plante du vert vers une autre couleur indiquerait une baisse de qualité nutritive de la plante due à la production conjointe de pigments et de substances à effets anti-appétants ou même toxiques (Schaefer *et al.*, 2006). L'évitement de certaines couleurs par les herbivores semble donc adaptatif. Pour profiter de ce comportement, un traitement de feuilles avec des couleurs non-vertes ou l'utilisation de variétés naturellement colorées a été proposé pour limiter les attaques de ravageurs (Döring *et al.*, 2014). Concernant l'utilisation de la vision des couleurs des insectes phytophages, elle est notamment exploitée pour les techniques de piégeage. La couleur ayant le plus fort pouvoir attractif pour les aleurodes est la couleur jaune. C'est donc la couleur qui est préférentiellement utilisée pour les pièges englués. Cependant, le jaune attire aussi fortement les insectes parasitoïdes. Les expériences de Johansen *et al.* montrent que l'ajout d'un spectre ayant un pic à 530 nm, aux pièges englués jaunes, permet d'augmenter de manière significative le piégeage de *B. tabaci* mais pas de ses parasitoïdes. La lumière peut aussi avoir un effet sur les comportements liés aux vols des insectes

Table 1. Attractiveness of volatiles emitted from herbivore-infested plants to predators or parasitoids in laboratory experiments

Infested plants (Source of HIPVs)	Herbivores	Attracted natural enemies	References
Lima bean (<i>Phaseolus lunatus</i>)	<i>Tetranychus urticae</i>	<i>Phytoseiulus persimilis</i> ¹	Dicke and Sabelis, 1988; Dicke et al., 1990a, b; Margolies et al., 1997
Corn (<i>Zea mays</i>)	<i>Spodoptera exigua</i>	<i>Cotesia marginiventris</i> ²	Turlings et al., 1990; Turlings et al., 1991; Turlings and Tumlinson, 1992
Brussels sprouts (<i>Brassica oleracea</i>)	<i>Pieris brassicae</i>	<i>Cotesia glomerata</i> ²	Mattiacci et al., 1994
Broad bean (<i>Vicia faba</i>)	<i>Acyrtosiphon pisum</i>	<i>Aphidius ervi</i> ²	Guerrieri et al., 1999
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>T. urticae</i>	<i>Amblyseius womersleyi</i> - Kyoto ¹	Maeda et al., 1999
Cucumber	<i>T. urticae</i> or <i>Frankliniella occidentalis</i>	<i>Orius laevigatus</i> ¹	Venzon et al., 1999
Pear	<i>Cacopsylla pyricola</i>	<i>Anthocoris nemoralis</i> ¹	Drukker et al., 2000a, b
<i>Arabidopsis thaliana</i>	<i>Pieris rapae</i>	<i>Cotesia rubecula</i> ²	Van Poecke et al., 2001
Barley plant (<i>Hordeum vulgare</i>)	<i>Rhopalosiphum padi</i>	<i>Coccinella septempunctata</i> ¹	Ninkovic et al., 2001
<i>Vicia faba</i> or <i>Phaseolus vulgaris</i>	Feeding plus oviposition by <i>Nezara viridula</i>	<i>Trissolcus basalis</i> ²	Colazza et al., 2004
Strawberry	<i>T. urticae</i>	<i>Phytoseiulus macropilis</i> ¹	Fadini et al., 2010
Cucumber	<i>Thrips tabaci</i>	<i>Orius strigicollis</i> ¹ <i>P. persimilis</i> ¹	Tatemoto and Shimoda, 2008
Cotton	<i>Helicoverpa armigera</i>	<i>Microplitis mediator</i> ²	Yu et al., 2010

¹Predators, ²parasitoids

Figure 9 : attractivités des HIPVs émis par les insectes ravageurs et leurs prédateurs ou parasitoïdes associés (Gebreziher et al., 2018)

ravageurs. Chez les pucerons, la lumière verte-jaune provoque l'arrêt des vols et la recherche d'une plante hôte. L'intensité lumineuse a aussi un impact sur la physiologie des insectes et notamment sur leur activité de reproduction. Sous faible intensité, le nombre de larves de puceron diminue. La photopériode est également un facteur agissant sur la physiologie des insectes ravageurs. La lumière continue provoque chez certains lépidoptères (*S.littoralis*) une diminution de la fertilité des mâles et par conséquent une diminution du nombre d'œufs pondus (Johansen *et al.*, 2011).

II.4 Effets directs de la lumière sur le comportement des auxiliaires

Les éclairages utilisés pour étendre la photopériode sous abri provoque une diminution du nombre de parasitoïdes. Aussi, un fort ratio de lumière rouge par rapport au bleu cause une prédominance de mâles baissant potentiellement l'efficacité du contrôle biologique par la diminution du nombre de pontes (Cochard *et al.*, 2019). L'intensité lumineuse affecte également le comportement des insectes auxiliaires. Une forte intensité augmente les pontes de l'acarien *Neoseiulus cucumeris*, prédateur du thrips (Johansen *et al.*, 2011).

II.5 Effets de la lumière sur le comportement des auxiliaires via les plantes

Il existe également des interactions directes entre les plantes et les auxiliaires des cultures. Les composés émis suite à une attaque sont appelés HIPVs (Herbivore-induced plant volatiles). Il s'agit principalement de composés dérivés d'acides gras, de terpénoïdes et de phénylpropanoïdes benzonoïdes. Ces composés attirent les insectes prédateurs et les parasitoïdes. Par exemple, les composés volatils émis par les feuilles de pommiers infestées par l'acarien ravageur *Tetranychus urticae* attirent le prédateur *Phytoseiulus persimilis*. Davantage d'exemples d'attraction de prédateurs et de parasitoïdes par les HIPVs sont listés en figure 9 (Gebreziher *et al.*, 2018).

La revue de Lazzarin *et al.* montre qu'une lumière à dominante rouge et bleue augmente les émissions de HIPVs. Le rouge lointain a deux effets. Il réduit les émissions totales de HIPVs et change la composition du cocktail de molécules émises en diminuant la proportion d'homoterpènes qui sont des molécules impliquées dans l'attraction des auxiliaires. Cette revue indique également que sous éclairage bleu, les trichomes des feuilles sont plus développés, ce qui améliore la diffusion des molécules (Lazzarin *et al.*, 2020).

II.6 Synthèse des effets directs de la lumière sur les insectes ravageurs et effets sur les auxiliaires.

La plupart des insectes ravageurs d'intérêts perçoivent la couleur jaune, verte, et bleue grâce à des récepteurs. La couleur rouge est quant à elle imperceptible par ces insectes. La couleur verte est perçue comme appétente. *A contrario*, il a été découvert récemment que la couleur bleue est perçue comme nocive par certains insectes. L'exposition à la lumière bleue (entre 410 et 470 nm) provoque même des taux mortalités supérieurs à l'exposition d'autres longueurs d'ondes chez la drosophile et le moustique. Ce phénomène d'augmentation de la mortalité sous spectre bleu n'a pas encore été démontré sur les insectes ravageurs. Certaines techniques liées aux effets indirects de la lumière sur les insectes ravageurs sont aujourd'hui exploitées pour limiter leur développement, tel que le piégeage. Néanmoins des recherches récentes montrent un effet de la lumière sur le vol et la fécondité, idem pour les insectes auxiliaires.

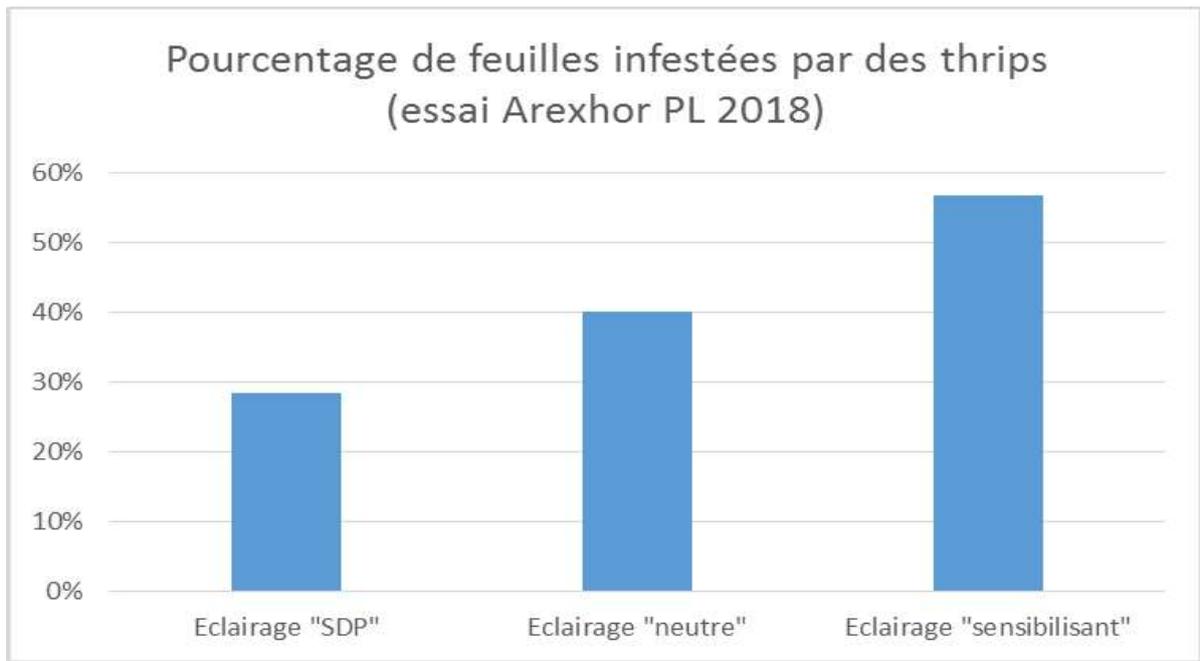


Figure 10 : sensibilité de menthes aux thrips californiens suivant l'éclairage reçu (tests statistiques : test du Chi² au seuil $\alpha=0,05$). Éclairage "SDP" à dominante bleu (60 B / 8 V / 32 R) ; éclairage "Neutre" équilibré entre le bleu et le rouge : (48 B / 6 V / 46 R) ; spectre "sensibilisant" à dominante rouge (31 B / 14 V / 55 R) (AREXHOR PL, 2018)

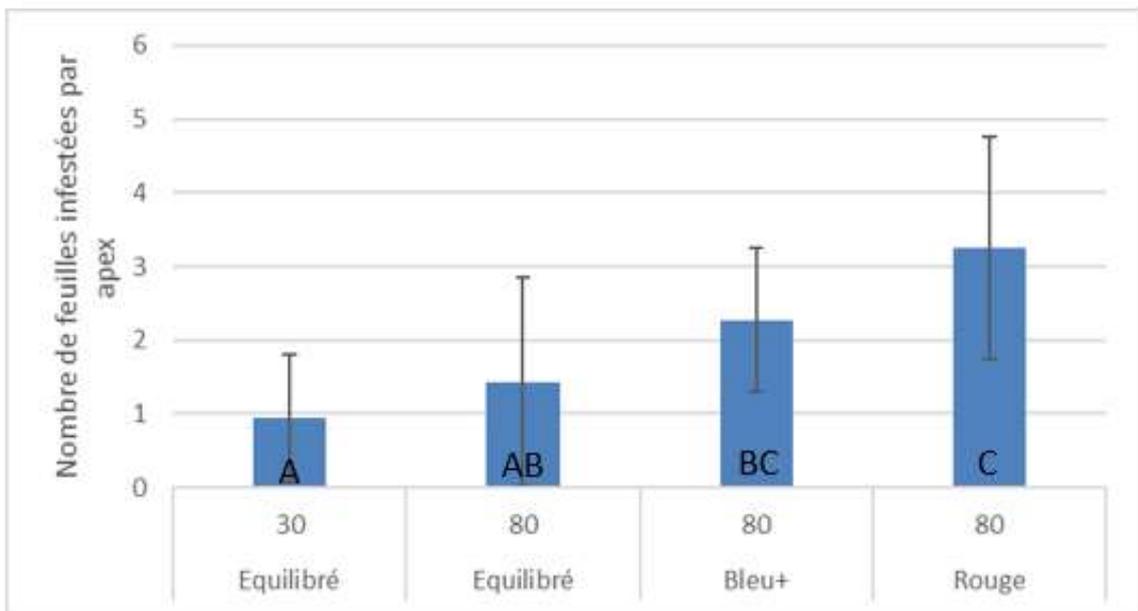


Figure 11 : nombre moyen de feuilles par apex infestées par *Myzus persicae*. Notation le 18/03/20, 3 mois après la mise en place. Test statistique : Anova, $\alpha=0.05$, $p=0.0056$, groupes construits par test de Student 2 à 2

III. Contexte du stage

III.1 Essais précédents (2019-2020)

NB : Pour cette partie, se référer au glossaire technique présent en Annexe n°1.

Pour les premiers essais lumière-ravageurs menés à l'Arexhor PL dans le cadre du projet *Phybi*, quatre éclairages distincts ont été testés : un éclairage à dominante bleu, un éclairage à dominante rouge, et un éclairage avec autant de bleu que de rouge appelé « spectre équilibré ». Pour ce spectre équilibré, deux intensités différentes étaient testées, soit forte = 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, soit faible = 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. L'objectif était d'étudier les taux d'infestation des plantes par les insectes ravageurs sous ces différents types d'éclairage.

III.1.1 Essai sur thrips

Les résultats obtenus en conditions contrôlées confirment que l'exposition à la lumière bleue nuit au thrips californien *Frankliniella occidentalis* avec par ordre de développement : Bleu < Équilibré < Rouge (figure 10) sur menthe et chrysanthème. Ils ont également montré que plus l'intensité lumineuse est élevée, plus les plantes sont attaquées par les insectes ravageurs.

III.1.2 Essais sur puceron

L'expérimentation menée sur le puceron *Myzus persicae*, montre un ordre de sensibilité des plantes différent. Pour le puceron, l'ordre de développement est le suivant : Équilibré 30 < Équilibré 80 < Bleu 80 < Rouge 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (figure 11). En effet ici, l'état de résistance des plantes face au puceron correspond au spectre équilibré faible intensité, et non au bleu. Ces résultats sont étonnants car ils ne sont en partie inversés avec ceux qui ont été trouvés pour le thrips californien (Bleu < Équilibré < Rouge).

Ces résultats pourraient être expliqués par l'impact de facteurs, tels que :

- Le mode alimentaire qui diffère entre ces ravageurs : videurs de cellule (thrips) vs piqueurs suceurs (pucerons). L'hypothèse serait qu'ils ne sont pas exposés de la même manière aux molécules de défenses (nature et concentration).
- La qualité de leur alimentation (sève élaborée vs cytoplasme) peut différer pour un même éclairage. Le puceron pourrait être défavorisé par des éclairages qui diminuent la qualité de la sève (taux de sucre, concentration en AA) donc qui diminue la photosynthèse (faible intensité, rouge lointain, bleu) (Nowak *et al.*, 2010). Quant à lui, le thrips est un videur de cellule qui pourrait être défavorisé par les éclairages qui rendent le contenu cellulaire plus toxique (bleu, UV-B, forte intensité).

- L'existence de résistances de ces ravageurs aux molécules de défenses des plantes.
- Des biais pendant la réalisation des essais qui aurait pu amener à ces résultats comme par exemple des différences de températures entre les modalités (provoquant des différences d'infestation), des infestations non contrôlées et non remarquées par les observateurs (lots infestés avant la mise en place de l'essai) ou encore l'absence de prise en compte du rôle des prédateurs.

Il est donc nécessaire cette année de réaliser une nouvelle série d'essais en chambre de culture pour connaître l'effet de la lumière sur les insectes piqueurs-suceurs avant de débiter des essais en conditions de production. Pour le thrips, les résultats obtenus sont satisfaisants et permettent de réaliser des séries d'essais en conditions de production sous tunnel pour savoir si ce levier peut être appliqué chez les producteurs.

Les résultats d'essais 2019-2020 sont résumés dans le tableau 1 suivant :

Tableau 1 : résultats des essais 2019-2020 sur thrips (Frankliniella occidentalis) et pucerons (Myzus persicae)

Type de ravageur	Espèce de ravageur	Plante	Résultats 2019/2020 (du + infesté au – infesté)	Résultats pertinents	Perspectives pour 2021
Thrips	<i>Frankliniella occidentalis</i>	Chrysanthème et menthe	R > E > B	OUI <i>Significatifs et cohérents avec la bibliographie, pas d'erreurs de protocole</i>	Essai en conditions de production
Puceron	<i>Myzus persicae</i>	<i>Viburnum tinus</i>	R > B > E	NON <i>Résultats incohérents avec la bibliographie et les observations sur thrips</i>	Refaire sous conditions contrôlées (CDC)

Au sein de ces ordres d'infestation, il existe également un impact de l'intensité lumineuse totale, avec davantage d'infestation sur les intensités les plus hautes (=80 $\mu\text{mol/m/s}$) contrairement aux intensités les plus basses (=30 $\mu\text{mol/m/s}$) (figure 11).

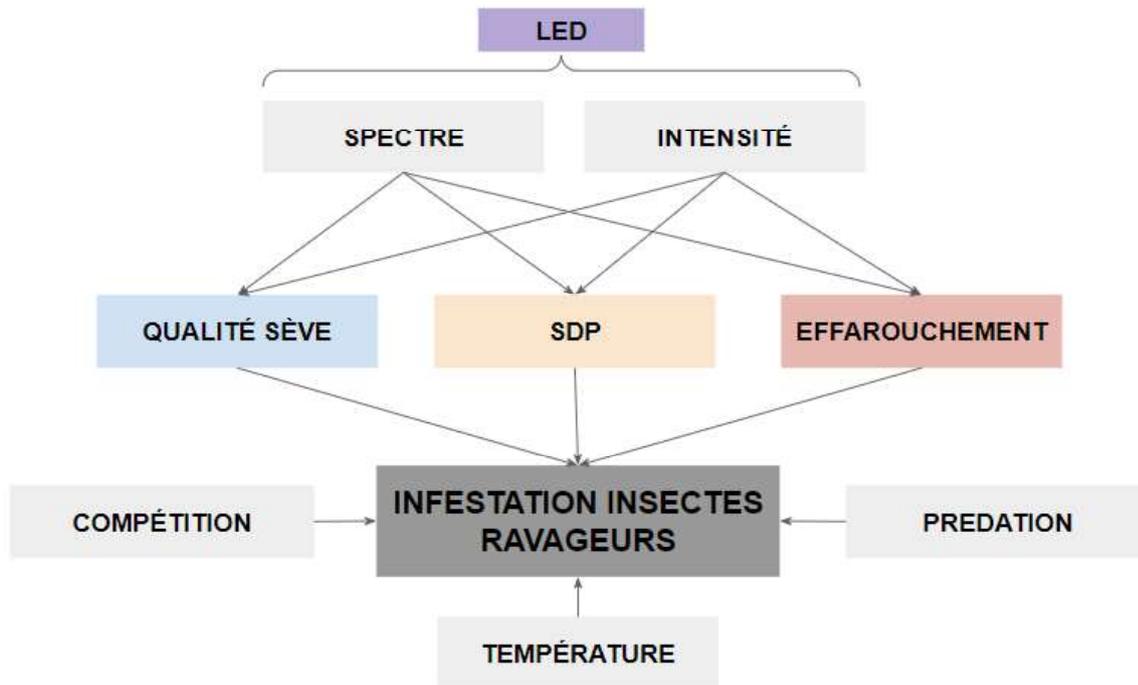


Figure 12 : schéma du modèle explicatif : mécanismes impliqués dans la régulation des insectes ravageurs

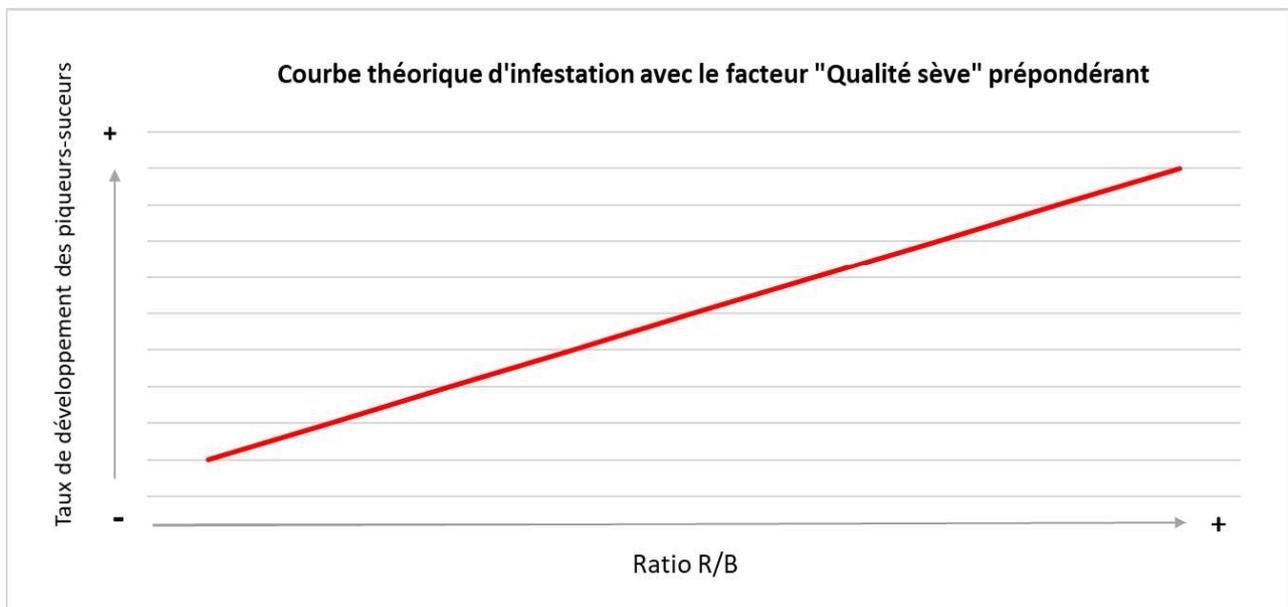


Figure 13 : courbe théorique du modèle avec le facteur « qualité sève » prépondérant sous dominante rouge

III.2 Sujets d'études 2021

Dans la continuité des essais réalisés en 2019 et 2020, l'étude conduite pendant ce stage avait pour but de répondre aux objectifs suivants :

- Confirmer que le bleu permet de limiter l'infestation du thrips et autres viedeurs de cellule, en condition de production.
- Préciser l'effet réel de l'éclairage bleu sur les insectes piqueurs suceurs et notamment le puceron.
- Préciser l'effet réel de l'éclairage rouge sur les insectes piqueurs suceurs et apporter des réponses quant à l'effet « qualité sève ».
- Connaître les ratio R/B permettant de limiter au maximum les infestations.

Pour répondre à ces objectifs, deux essais, ont été mis en place cette année 2021 :

1. Un essai en conditions de production sur thrips
2. Un essai en chambre de culture sur insectes piqueurs-suceurs (sur puceron et incluant une modalité avec thrips comme témoin positif)

III.3 Modèles explicatifs testés

Grâce à l'étude bibliographique et aux résultats des essais précédents (2019-2020), il est possible d'établir un modèle détaillant les mécanismes impliqués dans la régulation des insectes ravageurs (figure 12). L'équation du modèle qui rassemble l'ensemble des facteurs liés au spectre et pouvant jouer sur l'infestation est présentée ci-dessous :

Infestation par les insectes ravageurs = ratio R/B (effet SDP via les interactions phytochromes/cryptochromes + intensité en rouge (effet qualité sève) + intensité en bleu (effet SDP via phytochrome et effet effarouchement)

III.3.1 Qualité sève

Les longueurs d'ondes reçues par les photorécepteurs jouent un rôle dans les mécanismes physiologiques chez les plantes et peuvent induire à terme des qualités de sève élaborée variables (concentrations en acides aminés, taux de sucre...). Ce phénomène pourrait expliquer par exemple que les piqueurs-suceurs se développent davantage sous spectre rouge car celui-ci augmente la photosynthèse et donc les sucres produits dans la sève. Ainsi, si cette hypothèse est vraie, le nombre de pucerons sous dominante rouge doit augmenter avec

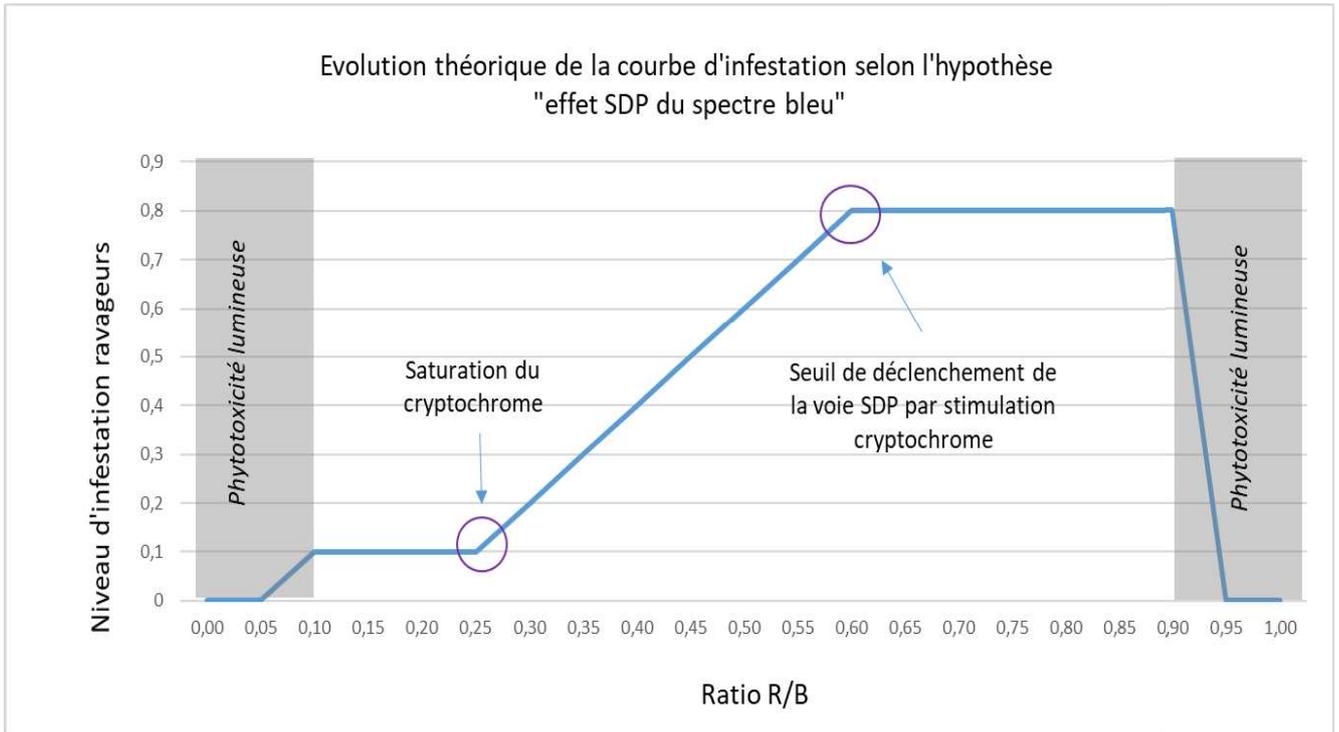


Figure 14 : courbe théorique du modèle avec le facteur SDP prépondérant

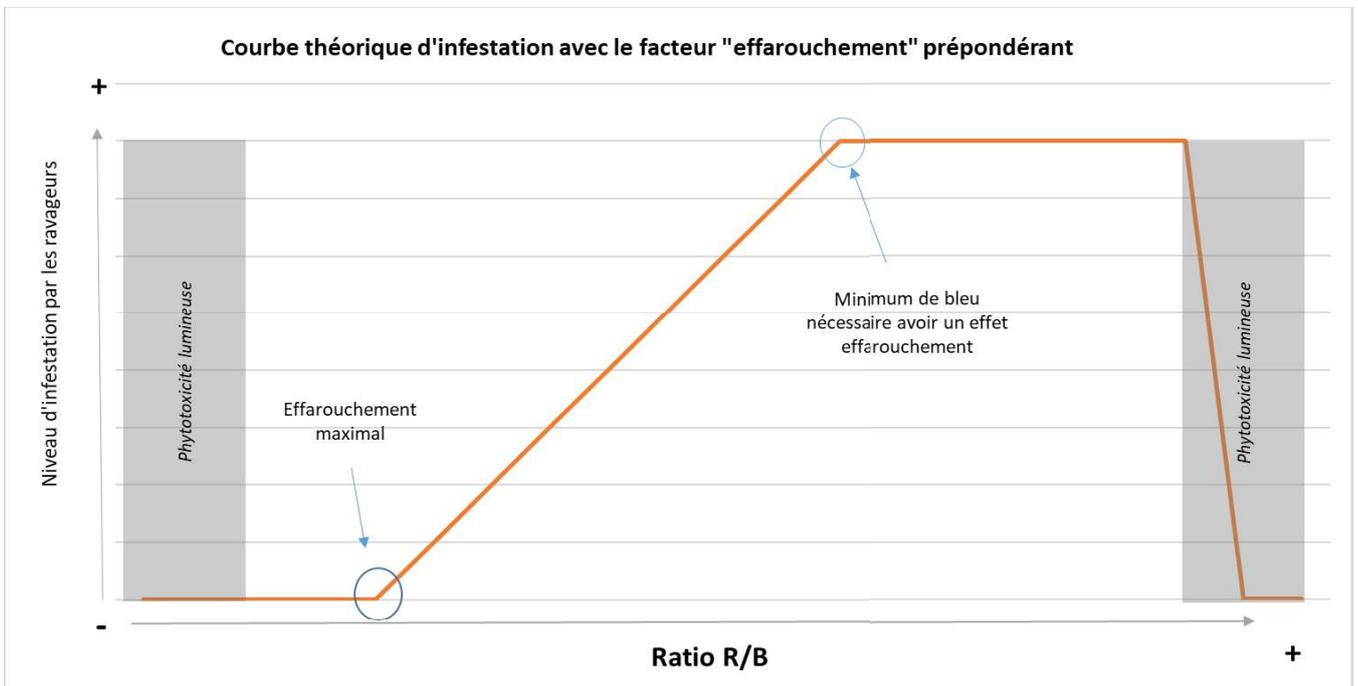


Figure 15 : courbe théorique du modèle avec le facteur effarouchement prépondérant

la quantité et l'intensité en rouge dans le spectre (figure 13). Si l'infestation stagne avec l'augmentation de l'intensité en rouge, alors cette hypothèse pourra être invalidée.

III.3.2 SDP

D'après la bibliographie et les travaux précédents (essais 2019-2020), une seconde hypothèse est que le bleu permet de limiter les infestations par les insectes ravageurs grâce à l'induction des défenses des plantes (effet SDP). Si les récepteurs du bleu (notamment cryptochromes) sont suffisamment excités, alors une chaîne de réactions physiologiques se met en place et permet de synthétiser des molécules de défenses qui limitent les infestations. Si cette hypothèse est vraie, alors la courbe d'infestation (figure 14) devrait diminuer quand la quantité de bleu augmente. Cependant sous dominante rouge, il est probable d'observer une plage de stagnation de l'infestation (phase plateau) à partir du ratio (R/B 2) où il n'y a plus assez de bleu pour stimuler le cryptochrome et induire les réactions de défenses sous-jacentes. A l'inverse, il est probable d'observer une seconde plage de stagnation quand la quantité de bleu (R/B 1) va au-delà de la quantité absorbable par le cryptochrome, auquel cas il a atteint son niveau maximal d'excitation (la quantité de molécules de défenses synthétisée est donc également au maximum).

III.3.3 Effarouchement

La troisième hypothèse repose sur l'effarouchement des insectes ravageurs par le changement de couleur du feuillage dû à l'éclairage. Les insectes ne voyant généralement pas le rouge, c'est l'intensité en bleu qui peut avoir un effet effarouchement. A des ratios R/B supérieurs au ratio naturel, l'insecte ne verra pas la différence, la courbe d'infestation sur cette plage de ratio devrait être plate (figure 15). A des ratios inférieurs au ratio naturel, la quantité de bleu réfléchi par les feuilles est plus importante et à partir d'un certain niveau les insectes se détourneront progressivement des plantes jusqu'à un effarouchement total où l'infestation est à 0.

III.3.4 Synergie SDP-effarouchement

Les deux courbes hypothétiques sont superposables (figure 14 ; figure 15). Si les courbes d'infestations obtenues par les essais ont cette forme en S alors il est impossible de savoir si le résultat est provoqué par l'effet SDP ou effarouchement. Les deux facteurs SDP et effarouchement ne devront donc pas être dissociés. Ils formeront le facteur SDP-effarouchement dans le modèle.

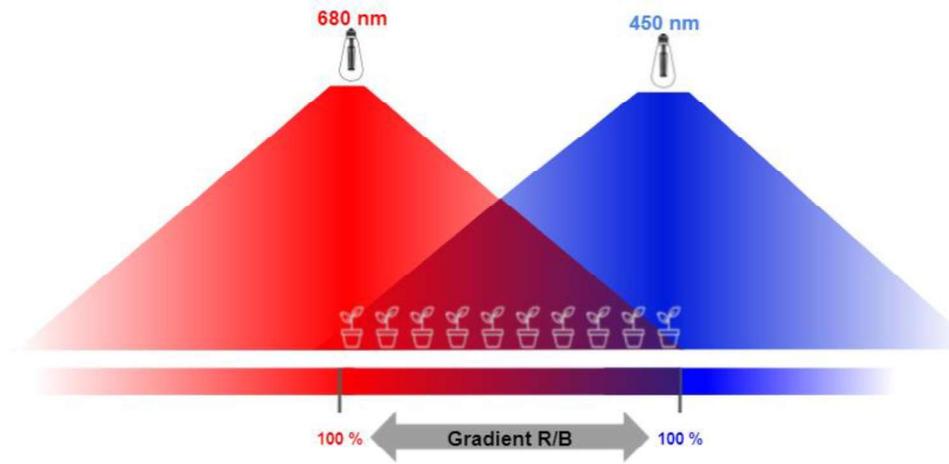


Figure 16: schéma du dispositif lumineux en chambre de culture, vu de face



Figure 17: photo du dispositif en chambre de culture

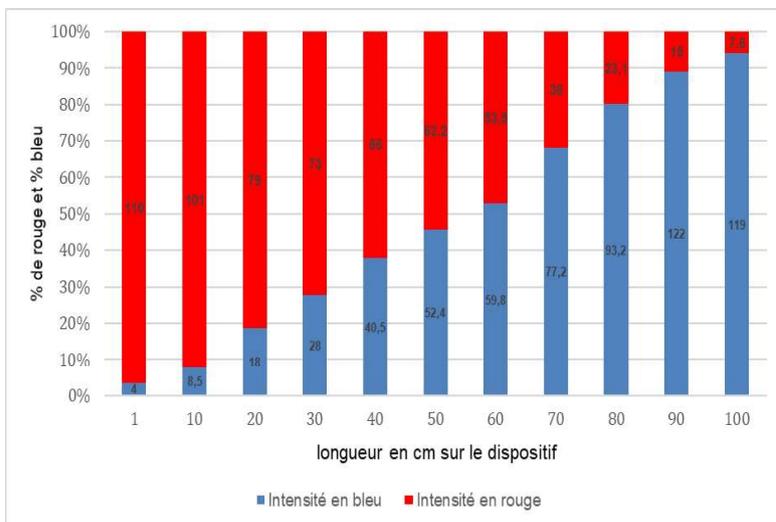


Figure 18 : ratios R/B du dispositif en chambre de culture utilisés pour les couples menthe/puceron et poivron/puceron. Les nombres sur l'histogramme correspondent aux intensités en PPFd ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

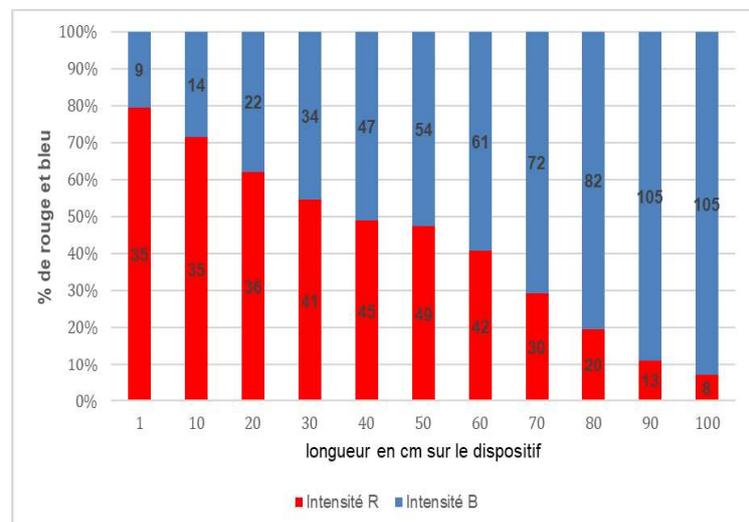


Figure 19 : ratios R/B du dispositif en chambre de culture utilisés pour le couple chrysanthème/thrips. Un tube leds blanc chaud a été ajouté et une réglette rouge retirée. Les nombres sur l'histogramme correspondent aux intensités en PPFd ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

IV. Matériels et méthodes

IV.1 Couples plantes / ravageurs testés

Les plantes modèles ont été choisies pour remplir plusieurs critères qui sécurisent l'obtention de résultats exploitables. Leur physiologie étaient bien connus par les expérimentateurs. Aussi, elles correspondent à des plantes hébergeant au moins 2 des ravageurs étudiés. Ces plantes étaient économiquement importantes et attaquées par des ravageurs ne pouvant pas être contrôlés, ou difficilement, sans produits phytosanitaires de synthèse. Elles présentent un développement rapide et leur morphologie permet de retracer l'historique des infestations.

Les insectes travaillés (thrips et pucerons) correspondent à des ravageurs causant des dégâts économiques forts et pour lesquels les solutions de contrôle alternatives ne sont pas suffisantes. Les plantes utilisées pour ces essais étaient les suivantes :

- Menthe (*Mentha aquatica*)
- Népéta (*Nepeta cataria*)
- Poivron (*Capsicum annuum*)
- Chrysanthème (*Chrysanthemum hortorum*)

D'autres ravageurs ont pu être étudiés au vu des infestations qui ont été présentes durant ces essais, notamment l'aleurode et la cicadelle.

IV.2 Dispositifs et spectres lumineux utilisés

IV.2.1 Essai en conditions contrôlées (chambre de culture)

Le dispositif en chambre de culture (figure 16 ; figure 17) a été pensé de sorte que les plantes soient exposées à un gradient continu d'un spectre à forte dominante rouge vers un spectre à forte dominante bleu. Ces gradients (figure 18) ont été obtenu en disposant à chaque extrémité du dispositif un éclairage 100% bleu et un éclairage 100% rouge. Le croisement des deux zones éclairées permet l'obtention de ce gradient avec différents ratios d'intensité rouge/bleu. Le ratio R/B était mesuré tous les 10 cm au spectrophotomètre. La courbe obtenue permettait d'identifier le ratio R/B auquel était exposé chaque rang de plante. Chaque rang comportait 6 à 8 plantes (annexe 2).

Les résultats obtenus pour le couple menthe/puceron et poivron/puceron en conditions contrôlées ont montré que les plantes présentent sous 100% bleu et sous 100% rouge ont un taux de mortalité élevé. Cela a pu influencé les premiers résultats et provoqué l'absence de significativité de la première série menthe/puceron. Pour la série suivante sur chrysanthème, des LEDs supplémentaires avec un spectre blanc chaud (BL) ont été ajoutées, donnant de

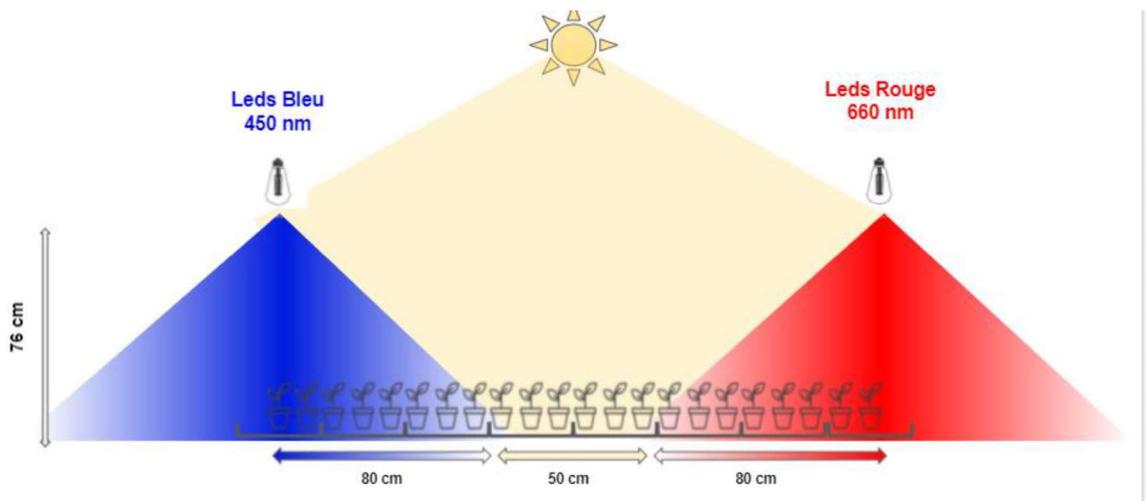


Figure 20 : schéma du dispositif lumineux en conditions de production sous tunnel, vu de face

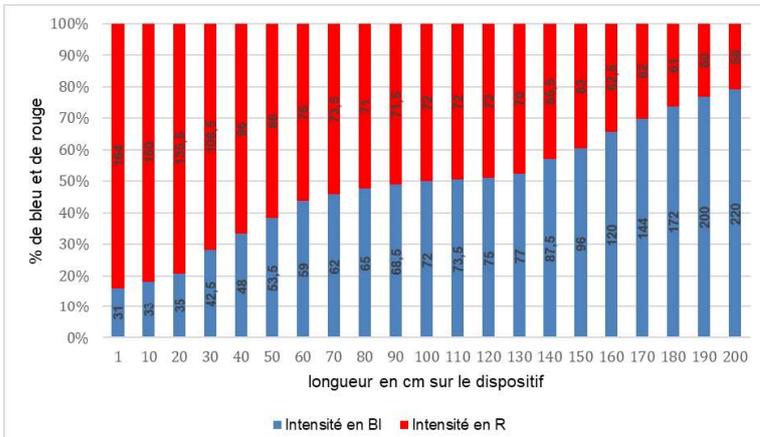


Figure 21 : ratios R/B de l'essai sous tunnel pour le couple menthe/puceron (*Ovatus mentarius*). Les nombres sur l'histogramme correspondent aux intensités en PPFD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

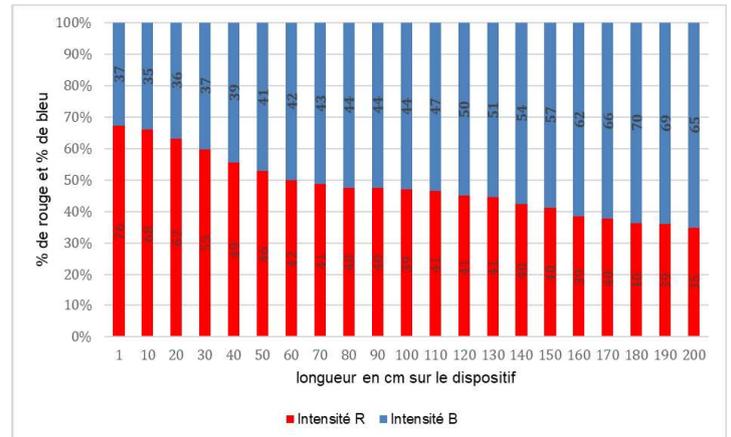


Figure 22 : ratio R/B de l'essai sous tunnel pour le couple népéta/aleurode et népéta/cicadelle. Les nombres sur l'histogramme correspondent aux intensités en PPFD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

nouveaux ratios R/B (figure 19). Cet éclairage a permis d'ajouter un peu de rouge dans le bleu et inversement, pour permettre aux plantes de réaliser correctement les différents mécanismes physiologiques nécessaires à leur survie. L'ajout de blanc chaud a eu un deuxième avantage, celui de permettre aux insectes de percevoir la vraie couleur des feuilles. En effet, lors des observations en chambre de culture, des différences de couleurs des feuilles ont été perçues à l'œil nu. Sous le spectre rouge, les feuilles étaient perçues de couleurs noires par les observateurs. Sous le spectre bleu, les feuilles étaient perçues bleu. Or, pour cette étude, toutes les plantes doivent être perçues le plus possible vertes par les ravageurs afin de minimiser l'effet d'effarouchement (ou d'attraction) et d'isoler au maximum l'effet "SDP".

IV.2.2 Essai en conditions de production

Le dispositif sous tunnel (figure 20) reposait sur le même principe. L'unique différence était que les éclairages étaient plus éloignés l'un de l'autre de sorte qu'il y avait un témoin « lumière naturelle » au milieu. Ce dispositif permet en une seule manipulation de connaître le ratio R/B suffisant pour apporter une protection maximale des plantes face aux ravageurs. Comme dans le précédent dispositif, un ratio R/B a été attribué à chaque rang de plante pour chaque dispositif (figure 21 ; figure 22). Chaque rang comportait également 6 à 8 plantes (Annexe 2).

IV.3 I.1 Critères de notations

De manière générale, les populations d'insectes ont été évaluées par comptage sur les organes préférentiellement infestés. Le comptage prenait soit en compte la plante entière, lorsque l'infestation n'était pas trop importante, soit quelques organes. Par exemple pour le puceron, le comptage reposait sur deux feuilles du même âge par plante. Pour le thrips qui était moins présent, le comptage reposait sur l'ensemble de la plante.

Une autre façon pour mesurer l'infestation a été de compter le nombre de feuilles avec présence de dégâts. Ce critère présentait un fort intérêt lorsque le ravageur en question est très mobile et donc effarouché pendant la notation, comme la cicadelle ou l'aleurode.

D'autres paramètres, pouvant jouer sur l'infestation ont été notés, tels que la température sous les différentes modalités et la présence ou non d'auxiliaires.



Figure 23 : photographie du dispositif à la mise en place des boutures de menthe et du semis de poivron en chambre de culture



Figure 24 : photographie des chrysanthèmes sous dispositif en chambre de culture



Figure 25 : photographie du dispositif sous tunnel lors de la mise en place des boutures de menthe



Figure 26 : photographie des menthes lors de la notation nombre de puceron sous rouge (à gauche) et sous bleu (à droite)

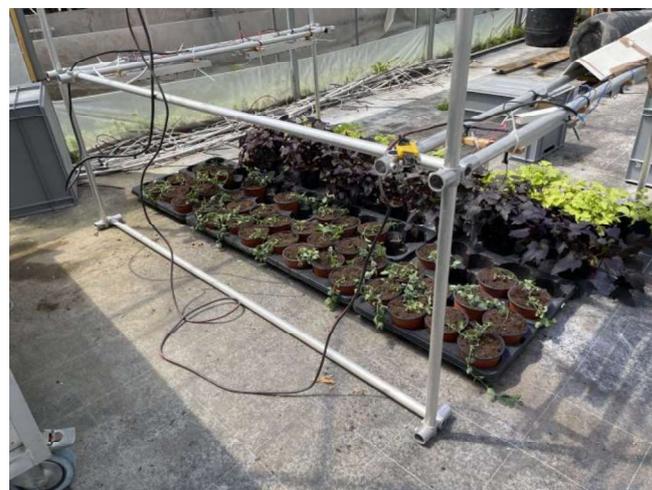


Figure 27 : mise en place des népétas sous le dispositif en condition de production

IV.4 Calendrier des interventions

Tableau 2 : calendrier des interventions pour l'essai mené en conditions contrôlées (chambre de culture)

Date	Interventions
Menthe / Puceron	
29/04/2021	Mise en place des boutures de menthe sous le dispositif (figure 23)
05/06/2021	Lâcher thrips <i>Frankliniella occidentalis</i> : (x2 larves/ ligne + x 20 adultes au milieu du dispositif)
10/05/2021	Lâcher œufs de chrysopes pour lutter contre pucerons (20 oeufs/m ²)
19/05/2021	Traitement savon noir pour lutter contre le puceron
21/05/2021	Lâcher thrips <i>Frankliniella occidentalis</i> : (50 adultes au milieu du dispositif)
26/05/2021	Lâcher œufs de chrysopes pour lutter contre pucerons (20 oeufs/m ²)
27/05/2021	Notation puceron/feuille de menthes
Poivron / Puceron	
29/04/2021	Mise en place semis poivron (figure 23)
02/06/2021	Notation pucerons/cotylédon sur poivrons
Chrysanthème / Thrips	
13/07/2021	Arrêt poivron et mise en place chrysanthème (figure 24)
04/08/2021	Notation nombre de larve de thrips chrysanthème et dégâts thrips

Tableau 3 : calendrier des interventions pour l'essai mené en conditions de production (tunnel)

Date	Interventions
Menthe / Puceron	
29/04/2021	Mise en place des boutures de menthe sous le dispositif (figure 25)
10/05/2021	Lâcher œufs de chrysope pour limiter le développement du puceron (20 oeufs/m ²)
12/05/2021	Lâcher x100 thrips sur le témoin éclairage naturel
19/05/2021	Traitement savon noir pour limiter le développement du puceron
26/05/2021	Lâcher œufs de chrysopes pour limiter le développement du puceron (20 oeufs/m ²)
04/06/2021	Notation nombre de puceron/feuilles sur menthe (figure 26)
Népéta / Aleurode	
10/06/2021	Mise en place dispositif népéta (figure 27)
21/06/2021	Notation nombre de larve d'aleurode/feuille de népéta
23/06/2021	Taille Népéta et fertilisation avec un engrais osmocote (Floramid à 1,5g/pot).
25/06/2021	Lâcher x100 thrips sur le témoin éclairage naturel
01/07/2021	Lâcher x100 thrips sur le témoin éclairage naturel
Népéta / Cicadelle	
05/07/2021	Notation dégâts cicadelle sur feuilles de Népéta

IV.5 Analyse statistique des résultats

IV.5.1 Transformation logarithmique des données d'infestation

Les insectes ravageurs étudiés ont un mode de multiplication se rapprochant d'un modèle exponentiel. N'étant pas linéaire, il est difficile d'interpréter l'évolution du nombre d'individus au cours du temps car une petite différence non significative à T0 devient significative à T+n. Afin d'interpréter correctement la dynamique d'infestation sur les plantes, les données brutes issus des comptages doivent donc subir des transformations logarithmiques. Cela permettra des analyses descriptives et statistiques aisées.

IV.5.2 Méthode d'analyse descriptive

Pour l'interprétation des résultats, la méthode suivie consiste à étudier les données d'infestation en fonction du ratio R/B. Après avoir subi une transformation logarithmique, les données d'infestation sont représentées sous forme d'histogramme, avec en ordonné le taux d'infestation, et abscisse le ratio rouge/bleu associé. Si l'histogramme obtenu suit la courbe de l'un des facteurs présentés en partie III.3, alors les statistiques seront appliquées sur les portions d'histogramme qui ont été définis par la courbe « modèle ». Une fois ces portions identifiées, les statistiques permettent de savoir si la tendance observée (stagnation, augmentation, diminution) est significative et si elle correspond au facteur étudié.

IV.5.3 Méthode d'analyse statistique

Le test statistique utilisé pour cet essai est un test de Pearson. Le coefficient de Pearson ρ est un indice reflétant une relation linéaire entre deux variables continues. Pour cet essai, les deux variables étudiées étaient le ratio R/B et le niveau d'infestation. Les deux hypothèses testées sont :

H0 : « Absence de corrélation entre l'évolution du spectre (ratio R/B) et le niveau d'infestation ».

H1 : « Présence d'une corrélation entre l'évolution du spectre (ratio R/B) et le niveau d'infestation ».

Avec $\alpha=0.05$ le risque de rejeter l'hypothèse nulle (H0) alors que celle-ci est vraie. Ainsi on admettra que :

- Si $p > \alpha$, on accepte H0 et on rejette H1 : « Absence de corrélation entre l'évolution du (ratio R/B) et le niveau d'infestation ».

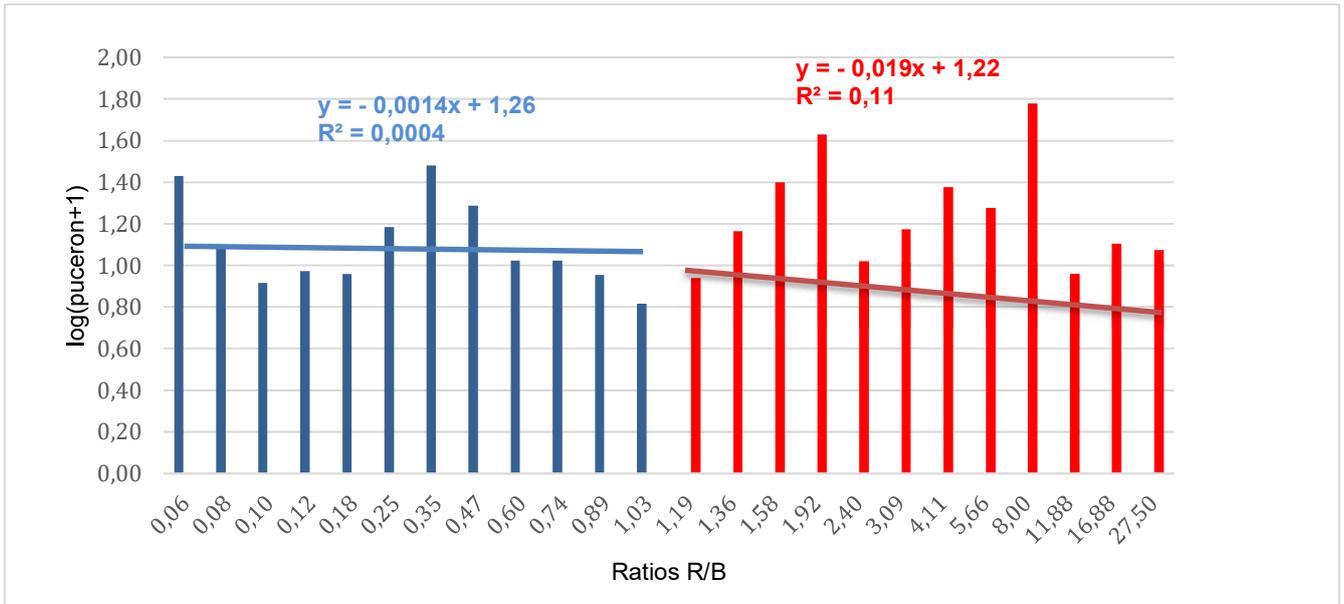


Figure 28 : transformation logarithmique du nombre moyen de puceron (*Ovatus mentarius*) en fonction du ratio R/B sur feuilles de menthe. Notation réalisée le 27/05/2021. Essai en chambre de culture

- Si $p < \alpha$, on rejette H_0 et on accepte H_1 : « Présence de corrélation entre l'évolution du spectre (ratio R/B) et le niveau d'infestation ».

Le coefficient ρ varie entre -1 et +1. La valeur 0 reflète une relation nulle entre les deux variables. Une valeur négative (corrélation négative) signifie que lorsqu'une des variables augmente, l'autre diminue. Tandis qu'une valeur positive (corrélation positive) indique que les deux variables varient ensemble dans le même sens. Ainsi :

- $-1 > \rho > 0$: Corrélation négative, plus le ratio R/B augmente, plus l'infestation diminue. C'est-à-dire que plus la part du bleu diminue, plus l'infestation diminue.
- $\rho = 0$: Absence de corrélation
- $0 > \rho > 1$: Corrélation positive, plus le ratio R/B augmente, plus l'infestation augmente. C'est-à-dire que plus la part du bleu diminue, plus l'infestation augmente.

V. Résultats

V.1 Essai en conditions contrôlées

V.1.1 Menthe / puceron (*Ovatus mentarius*)

Comme évoqué précédemment, le témoin positif menthe/thrips n'a pas pu être validé puisque le thrips ne s'est pas correctement installé. Les résultats d'infestation du 27 mai des menthes par le puceron *Ovatus mentarius* sont présentés figure 28.

Tableau 4 : résultats des tests statistiques de Pearson pour le couple menthe/puceron en conditions contrôlées (log nombre de puceron/plante +1)

Modalités	p-value	Coefficient de Pearson ρ
Dominante Bleue (R/B \leq 1)	0,229	NA*
Dominante Rouge (R/B $>$ 1)	0,466	NA*

*Non attribué

Ici, les données sont étonnantes. Cette série ne montre aucun effet de l'évolution du spectre sur l'infestation (p-value bleu =0,229 et p-value rouge =0,0466). Ce résultat peut être expliqué par le fait que le puceron *Ovatus mentarius* s'est très vite développé avant la notation. S'il s'est développé préférentiellement sur une zone (par exemple sous dominante rouge), il s'est peut-être répandu sous l'autre zone pour pouvoir s'alimenter suffisamment, ne trouvant plus de nourriture ou d'espace sur la première zone infestée. Les pucerons ont pu se déplacer vers les plantes sous dominante bleu pour s'alimenter. De fait, l'infestation sera homogène pour

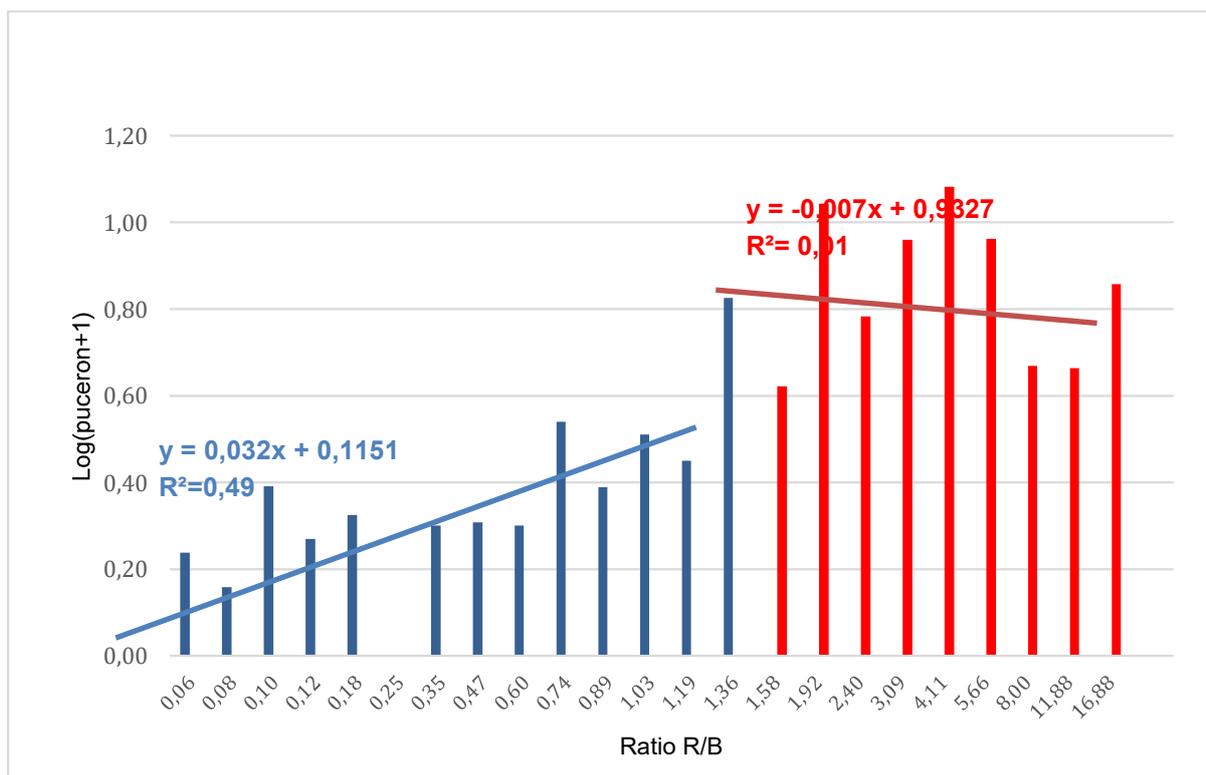


Figure 29 : transformation logarithmique du nombre moyen de puceron (*Aulacorthum solani*) en fonction du ratio R/B par cotylédon de poivron. Notation le 02/06/2021. Essai en chambre de culture

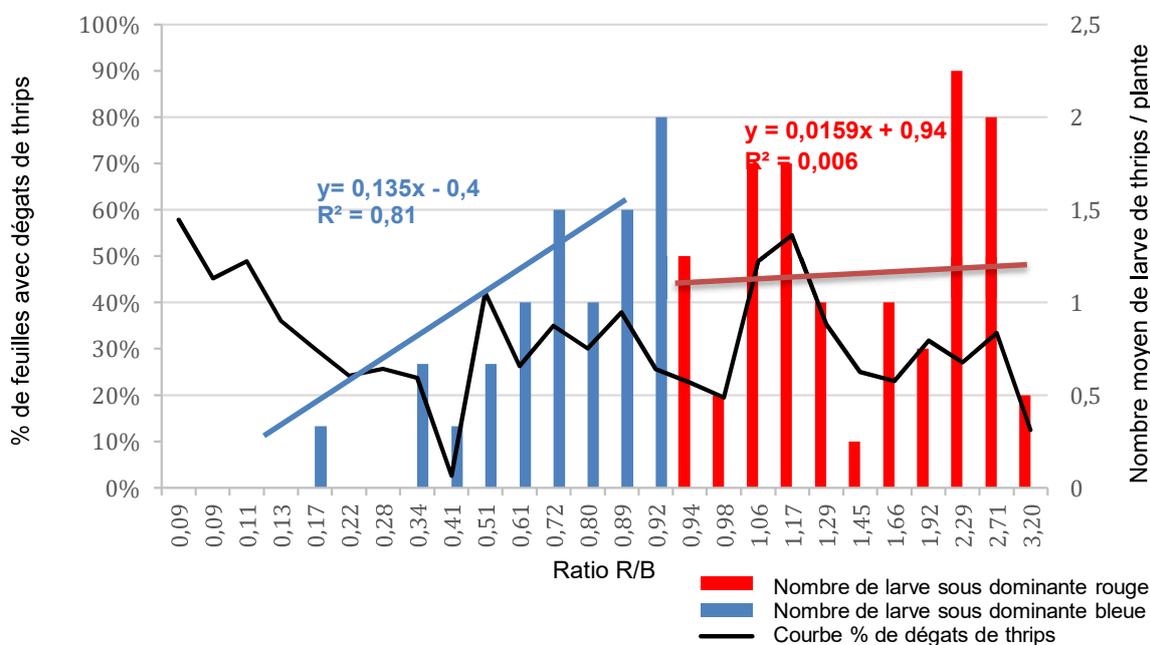


Figure 30 : pourcentage de dégâts de thrips (courbe noire) en fonction du ratio R/B et nombre de larve de thrips (battons) en fonction du ratio R/B. Essai en chambre de culture. Notation le 04/08/2021

l'ensemble des spectres. Cette observation met en lumière le fait que sous bleu, les pucerons se développent quand même.

V.1.2 Poivron / puceron (*Aulacorthum solani*)

Les résultats du 02 juin pour le couple poivron/puceron (*Aulacorthum solani*) sont présentés en figure 29. Les données d'infestation des rangs n°1 et 15 ont été invalidés puisque le taux de germination était faible (moins de 4 poivrons germés sur 7).

Sur l'histogramme obtenu, une tendance a été observé sous les ratios à dominante bleu jusqu'à un point d'inflexion (ou points « pivot ») situé aux alentours de R/B=1,58, après lequel il est probable d'observer une phase de stagnation. Les statistiques ont donc été réalisées avant ce point (spectres à dominante bleu) et après ce point (spectres à dominante rouge).

Tableau 5 : résultats des tests statistiques de Pearson pour le couple poivron/puceron (*Aulacorthum solani*) en conditions contrôlées (log nombre de puceron/cotylédon +1)

Modalités	p-value	Coefficient de Pearson ρ
Dominante Bleue (R/B<1,58)	0,001	0,77
Dominante Rouge (R/B≥1,58)	0,55	NA*

*Non attribué

Sous spectres à dominante bleue, il y a impact significatif du spectre sur l'infestation des poivrons par le puceron (p-value=0,001). Le coefficient de Pearson est positif (=0,77) et indique donc que plus le ratio R/B augmente plus l'infestation par le puceron augmente.

Sous dominante rouge, à partir de R/B≥1,58 il n'y a plus d'impact du spectre sur l'infestation (p-value=0,55).

L'infestation présente une phase d'augmentation significative lorsque le ratio R/B augmente pour atteindre un plateau à partir d'environ R/B=1,58 et correspondrait donc au facteur « SDP-effarouchement ». La phase plateau sous dominante rouge permet de rejeter l'hypothèse qui suit le facteur « qualité sève ». En effet, l'augmentation de la qualité de la sève par l'augmentation du ratio R/B n'a pas d'impact significatif sur l'infestation par le puceron.

V.1.3 Chrysanthème / thrips (*Frankliniella occidentalis*)

La notation réalisée le 04 août (figure 30) sur les chrysanthèmes comportait deux critères : le pourcentage de feuilles avec dégâts de thrips et le nombre de larves de thrips (*Frankliniella occidentalis*) par plante.

Comme sur le précédent histogramme obtenu, une tendance a été observé sous les ratios à dominante bleu jusqu'à un point d'inflexion, cette fois si situé aux alentours de R/B=0,94. Après ce point, il est probable d'observer une phase de stagnation. Les statistiques ont donc été réalisés avant ce point (spectres à dominante bleu) et après ce point (spectres à dominante rouge).

Tableau 6 : résultats des tests statistiques de Pearson pour le couple chrysanthème/thrips en conditions contrôlées (nombre de larves de thrips/plante)

Modalités	p-value	Coefficient de Pearson ρ
Dominante Bleue (R/B<0,94)	$1,6 \cdot 10^{-7}$	0,94
Dominante Rouge (R/B \geq 0,94)	0,73	NA*

*NA = Non attribué

Les dégâts de thrips sont homogènes sur l'ensemble de l'essai, alors que les larves sont significativement plus présentes sous spectres à dominante rouge (R/B>0,94). Cette apparente contradiction peut facilement s'expliquer par le fait que les dégâts observés auraient été provoqués par une première génération larvaire présente dès la mise en place de l'essai. Une fois leur cycle larvaire achevé, les adultes se sont déplacés vers leur environnement préféré et y ont généré un gradient dans la répartition actuelle des larves.

Jusqu'aux alentours de R/B=0,94, les résultats statistiques montrent la même tendance que pour couple poivron/puceron : plus la ratio R/B augmente, plus l'infestation par les larves diminue, avec un coefficient de Pearson encore plus élevé ($\rho=0,94$). Ensuite, les résultats montrent, comme précédemment, une phase significative de stagnation de l'infestation sous spectres à dominante rouge (pas d'impact des spectres rouges sur l'infestation p-value=0,73). Ici aussi, les résultats obtenus correspondraient au facteur « SDP-effarouchement ».

A la prochaine notation, il est fortement probable que la répartition des dégâts corresponde à la répartition des larves.

Pour les couples poivrons/pucerons et chrysanthème/thrips, les résultats statistiques obtenus en chambre de culture révèlent des tendances d'infestation identiques en fonction du ratio R/B. Lorsque le ratio R/B augmente sous les spectres à dominante bleu, l'infestation augmente significativement, pour atteindre une phase plateau sous spectres à dominante rouge. Cela correspond au facteur « SDP-effarouchement ». Néanmoins, le ratio « pivot » à partir duquel le taux d'infestation stagne à un niveau élevé (sous spectres à dominante rouge) n'est pas exactement le même en fonction du couple plante/ravageur. La phase plateau

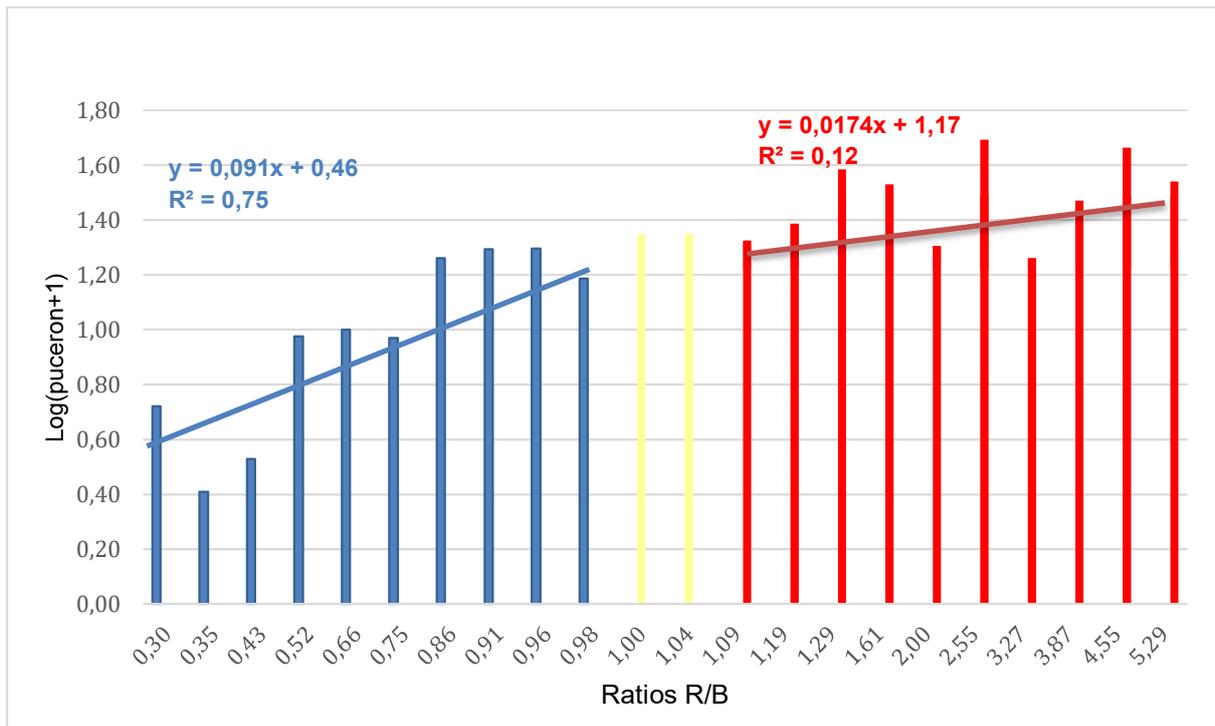


Figure 31: transformation logarithmique du nombre moyen de puceron (*Ovatus mentarius*) en fonction du ratio R/B par feuilles de menthe. Notation réalisée le 04/06/2021. Essai sous tunnel

d'infestation présente sous dominante rouge pour le couple poivron/puceron permet de rejeter l'hypothèse qui suit le facteur « qualité sève ».

Les résultats des séries en conditions de production permettront de savoir si la lumière naturelle impacte la dynamique d'infestation ou s'il est possible d'observer des similitudes en comparant avec les résultats obtenus sous conditions contrôlées (tendances, ratio « pivot » ...).

V.2 Essai en conditions de production

V.2.1 Menthe / puceron (*Ovatus mentarius*)

Malgré plusieurs lâchers sur le témoin éclairage naturel, le thrips ne s'est pas installé sur les menthes.

Le puceron, *Ovatus mentarius*, s'y est installé. Une notation a été réalisé le 04 juin. Les résultats (figure 31) montrent une infestation plus élevée sous spectre à dominante rouge que sous spectre à dominance bleu (figure 26).

Encore une fois, une tendance a été observé sous les ratios à dominante bleu jusqu'à un point d'inflexion R/B=0,98.

Après R/B=1,09, il est probable d'observer une phase de stagnation. Les statistiques ont donc été réalisés avant ce point (spectres à dominante bleu) et après ce point (spectres à dominante rouge).

Tableau 7 : résultats du test statistique de Pearson pour le couple menthe/puceron (*Ovatus mentarius*) en condition de production sous tunnel (log nombre de puceron/plante +1)

Modalités	p-value	Coefficient de Pearson ρ
Dominante Bleue (R/B \leq 0,98)	0,002	0,894
Dominante Rouge (R/B \geq 1,09)	0,792	NA*

*Non attribué

Comme précédemment, lorsque le R/B augmente sous dominante bleu (\leq 0,98) l'infestation augmente de manière significative (p-value=0,002 ; $\rho =0,89$) jusqu'à une phase plateau sous dominante rouge (R/B \geq 1,09), qui intègre les spectres correspondants à la lumière naturelle.

Ainsi, les résultats de cette première série sous tunnel montrent bien une phase de diminution de l'infestation avec la diminution du R/B sous spectres à dominante bleu et une phase plateau sous dominante rouge et suit donc le facteur « SDP-effarouchement ». La phase plateau sous dominante rouge permet de rejeter l'hypothèse « qualité sève ».

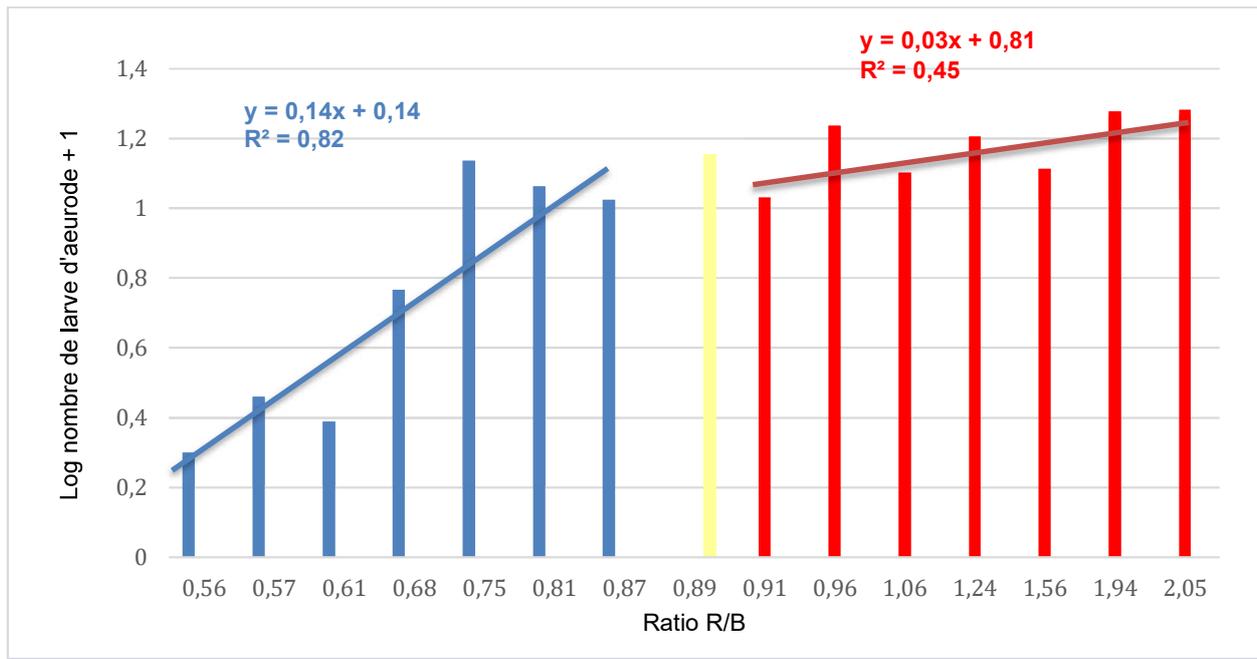


Figure 32 : transformation logarithmique du nombre moyen de larves d'aleurode (*Bemisia tabaci*) sur népétas en fonction du ratio R/B. Notation réalisée le 21/06/2021. Essai sous tunnel

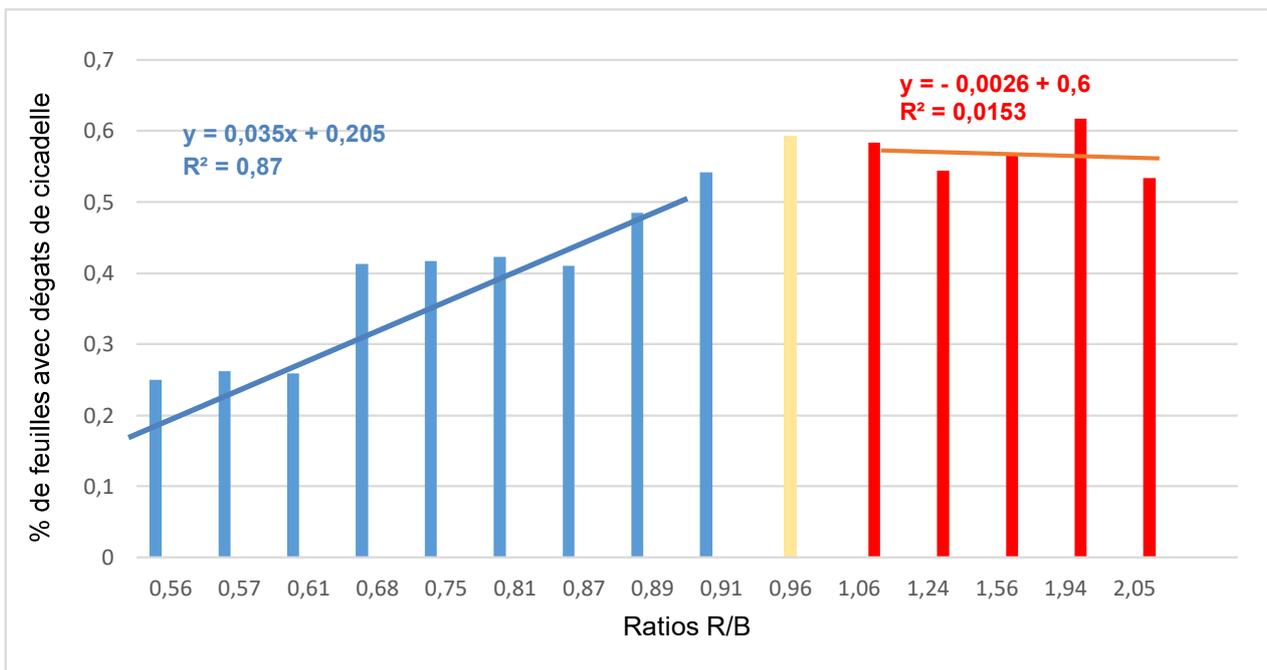


Figure 33 : % de feuilles avec dégâts (étages 3 à 5) de Cicadelle (*Eupteryx decemnotata*) sur népétas en fonction du ratio R/B. Notation réalisée le 05/07/21. Essai sous tunnel

V.2.2 Népéta / aleurode (*Bemisia tabaci*)

Les Népétas ont tout d'abord été infestées par l'aleurode *Bemisia tabaci*. Les résultats (figure 32) montrent des infestations deux fois plus importantes sous spectres à dominante rouge que sous spectres à dominante bleue.

Pour ce couple plante/ravageur, une tendance a été observé sous les ratios à dominante bleu jusqu'à un point d'inflexion R/B=0,87.

Après R/B = 0,91, il est probable d'observer une phase de stagnation. Comme précédemment, les statistiques ont donc été réalisés avant ce point (spectres à dominante bleu) et après ce point (spectres à dominante rouge).

Tableau 8 : résultats du test statistique de Pearson pour le couple népéta/aleurode en conditions de production sous tunnel (log nombre de larve d'aleurode/plante +1)

Modalité	p-value	Coefficient de Pearson ρ
Dominante Bleue (R/B \leq 0,87)	0,003	0,94
Dominante Rouge (R/B \geq 0,91)	0,27	NA*

*Non attribué

Encore une fois, il un impact significatif du spectre sur l'infestation (p-value=0,003) pour les ratios à dominante bleu (\leq 0,87). Le coefficient de Pearson est très proche de 1 (=0,94), ce qui indique une corrélation forte entre l'augmentation du ratio R/B et l'augmentation du nombre de larve d'aleurode. Au-delà de R/B=0,91, il n'y a pas d'impact significatif des ratios à dominante rouge sur l'infestation (p-value=0,27), l'infestation stagne. Il est ici possible de rejeter le facteur « Qualité sève » car l'aleurode est un piqueurs-suceurs comme le puceron. Elle n'est pas favorisée par des spectres (rouge) qui augmente la qualité de la sève.

Comme pour les autres tests en chambre de culture, ces résultats suivent le facteur « SDP-effarouchement ».

V.2.3 Népéta / Cicadelle (*Eupteryx decemnotata*)

L'infestation par les aleurodes a été suivi par une attaque de cicadelles *Eupteryx decemnotata*, les résultats (figure 33) montrent qu'il y a moins de dégâts sous les spectres à dominante bleue jusqu'à un R/B aux alentours de 0,91.

Tableau 9 : résultats du test statistique de Pearson pour le couple népéta/cicadelle en conditions de production sous tunnel (% de feuilles avec dégâts de cicadelle)

Modalité	p-value	Coefficient de Pearson ρ
Dominante Bleue (R/B \leq 0,91)	3.10^{-4}	0,93
Dominante Rouge (R/B \geq 1,06)	0,95	NA*

*Non attribué

Comme pour les séries précédentes, les spectres à dominante bleue ont un impact significatif sur l'infestation par les cicadelles ($p\text{-value}=3.10^{-4}$), en la faisant diminuer lorsque R/B diminue ($\rho=0,93$). Les résultats correspondent encore ici au facteur « SDP-effarouchement ».

Sous spectres à dominante rouge, il n'y a pas d'impact significatif ($p\text{-value}=0,95$) du spectre sur l'infestation.

Les résultats obtenus en conditions contrôlées sont transposables à ceux obtenus en conditions de production. Ce constat est encourageant car cette méthode pourrait ainsi permettre de réduire les infestations sous serres et sous tunnel chez les producteurs.

VI. Discussion

L'objectif de ces essais était de vérifier la validité des trois facteurs constitutifs du modèle. Ces facteurs découlent des hypothèses qui ont été déduites de la bibliographie et des résultats obtenus les années passées. Le premier facteur « qualité de la sève » permettait d'expliquer pourquoi les piqueurs-suceurs étaient plus présents sous le spectre à dominante rouge que sous le spectre à dominante bleu lors des essais précédents. L'hypothèse sous-jacente reposait sur l'amélioration de la qualité de la sève par les spectres à dominante rouge. Cependant, ce facteur ne permettait pas d'expliquer pourquoi les viduels de cellule (thrips) étaient plus présents sous rouge que sous bleu. Le deuxième et troisième facteur « SDP » et « effarouchement » permettaient d'expliquer ces deux observations par l'effet protecteur du bleu qui permettrait soit de stimuler la production de molécules de défenses soit d'effaroucher les insectes ravageurs. La méthode d'expérimentation utilisée ne permet pas de discriminer l'effet SDP de l'effet effarouchement car les dynamiques d'infestation attendues sont les mêmes (moins de ravageurs sous spectres à dominante bleu jusqu'à un palier sous rouge).

VI.1 Dispositif expérimental utilisé

Contrairement au dispositif utilisé lors des essais 2019-2020 où les ratios R/B étaient séparés entre eux, pouvant occasionner de petites différences climatiques entre les modalités, le dispositif de cette année a permis de comparer une infinité de ratio R/B avec des conditions climatiques strictement identiques et ainsi d'obtenir des courbes d'infestation uniquement liées aux ratio R/B, sans biais. Il a ainsi permis de préciser les effets du ratio sur l'infestation et de déterminer les ratios remarquables qui permettent de caractériser le modèle.

VI.2 Révision du modèle

Il est possible de vérifier la cohérence de tous les résultats en les comparant pour identifier des similitudes ou des divergences pour ensuite identifier les facteurs prépondérants.

Tableau 10 : synthèse des résultats obtenus ; significativité de l'impact du spectre sur l'infestation (Test de Pearson, $\alpha = 0,05$) NS = Non significatif ; S = Significatif

Conditions	Couple plante/ravageur	Spectres dominante bleue	Point R/B A	Spectres dominante rouge	Facteur suivi	Facteur rejeté
Contrôlées (chambre de culture)	Menthe / Puceron	NS	-	NS	Aucun	Aucun
	Poivron / Puceron	S	1,03 - 1,58	NS	SDP-effarouchement	Qualité sève
	Chrysanthème / Thrips	S	0,80 - 0,94	NS	SDP-effarouchement	Aucun
Production (Tunnel)	Menthe / Puceron	S	0,98- 1,09	NS	SDP-effarouchement	Qualité sève
	Népéta / Aleurode	S	0,87- 0,91	NS	SDP-effarouchement	Qualité sève
	Népéta / Cicadelle	S	0,91- 1,06	NS	SDP-effarouchement	Aucun

*Plage R/B à partir de laquelle l'effet protecteur du bleu n'est plus significatif

Les résultats de cette année montrent majoritairement (5 cas sur 6) que les spectres à dominante bleue diminuent de manière significative les infestations par le puceron, le thrips, l'aleurode et la cicadelle en suivant le modèle à « SDP-effarouchement » prépondérant. Cependant, le ratio R/B à partir duquel le bleu a un effet protecteur n'est pas le même selon le type de ravageur ou l'espèce végétale. Pour cette série d'essais, ce ratio varie entre 0,8 et 1,58 et se trouve donc de manière générale aux alentours de 1. Il semblerait tout de même judicieux de tester d'autres couples plantes/ravageurs pour savoir si ce ratio s'éloigne de 1 ou si celui-ci peut servir de « référence » applicable en production pour l'ensemble des couples plantes/ravageurs. Le ratio R/B adapté aux cultures sera celui qui se trouve suffisamment en dessous de 1 pour atteindre un bon niveau de protection face aux insectes ravageurs et qui permet d'atteindre une croissance compatible avec les objectifs de production (la quantité de bleu impactant l'architecture et la vitesse de croissance).

Pour le puceron par exemple, la plage de ratio à partir de laquelle l'intensité en bleu n'a plus d'effet protecteur semblerait plus élevée que pour les autres ravageurs. Ainsi, les hypothèses sous-jacente seraient soit que le puceron est plus sensible aux molécules défenses si l'effet SDP est vrai, soit qu'il est effarouché avec une plus petite intensité en bleu que les autres ravageurs.

Pour la série poivron/puceron et chrysanthème/thrips en chambre de culture, il semblerait très probable que le facteur prépondérant jouant sur l'infestation soit l'effet SDP-effarouchement. Les résultats d'infestation pour les premiers ratios (0,10 à 0,47 pour les poivrons ; 0,17 à 0,34 pour les chrysanthèmes, ressemblent à une phase plateau. Cette phase plateau pourrait correspondre à la saturation du cryptochrome (entraînant la production maximale de molécules de défenses donc la protection maximale). Cette phase est la seule qui permettrait de discriminer les deux facteurs.

Contrairement aux résultats des essais 2019-2020, les résultats de cette année montrent que les spectres à dominante rouge ($R/B > 0,98$) n'ont pas d'impacts significatifs sur le niveau d'infestation. En effet, le test de Pearson permet de mettre en évidence une phase de stagnation de l'infestation sous spectre à dominante rouge. La quantité de rouge ne semble donc pas augmenter la sensibilité des plantes face aux ravageurs et notamment des piqueurs-suceurs (pucerons et aleurodes). Ces résultats permettent ainsi de rejeter l'hypothèse issue des résultats des essais 2019-2020 qui reposait sur l'effet sensibilisateur du rouge par l'augmentation de la qualité de la sève.

L'intensité totale n'a pas eu d'impact sur l'infestation. En effet, en conditions de production, les plantes les plus proches des éclairages leds ont reçus des intensités lumineuses plus fortes que les plantes sans éclairage leds. Or, sous spectres à dominante rouge, les infestations ne sont pas plus importantes lorsque l'intensité est plus forte. Pour pouvoir vraiment conclure, il faudrait tester différentes intensités avec le même spectre à $R/B > 1$.

Les résultats d'infestation ne correspondent ni au modèle « intensité » ni au modèle « qualité sève ». Ce sont les facteurs SDP et effarouchement (figure 14) qui sont prépondérants et qui à eux seuls constituent le modèle puisque les autres potentiels facteurs sont négligeables devant eux.

VI.3 Discrimination de l'effet SDP et effarouchement

Afin de pouvoir quantifier l'importance relative de chacune des voies (SDP et effarouchement) pour les deux ravageurs modèles (thrips et pucerons), un essai pourra être mené en utilisant un mutant d'*Arabidopsis thaliana* ayant sa voie SDP altérée. Le modèle servant à l'interprétation est le suivant :

Taux d'infestation (%age d'infestation) = **développement sans contrainte - effet voie « SDP » - effet voie « Effarouchement »**

En combinant judicieusement les facteurs et les mutants, il sera possible de quantifier l'effet de chaque voie. Le tableau suivant présente les modalités et le raisonnement aboutissant à la quantification de chaque voie.

Tableau 11 : modalités utilisant *Arabidopsis thaliana* mutant permettant la discrimination de l'effet SDP et Effarouchement

Plante	Eclairage	Effet voie "SDP"	Effet voie "effarouchement"	Codage
Sauvage	Bleu	Présent	Présent	(1)
Mutant SDP	Bleu	Absent	Présent	(2)
Mutant SDP	Rouge	Absent	Absent	(3)
Sauvage	Rouge	Absent	Absent	(4)

Ainsi (3) correspond au développement sans contrainte (lumière neutre sur la plante et l'insecte).

En réalisant (3) - (2) on obtient la réduction d'infestation due à la voie « effarouchement ».

En soustrayant (2) - (1) on obtient la réduction due à la voie « SDP ». On peut ainsi calculer le pourcentage « d'efficacité » de chaque voie et son importance relative.

La modalité 4 sert à vérifier que le mutant n'altère pas la capacité des ravageurs à s'y développer par d'autres moyens que la voie SDP. Si une différence est constatée entre (3) et (4) alors, les données de (2) pourront être corrigées pour permettre sa comparaison avec (1).

Le dispositif à utiliser sera celui utilisé cette année en mettant côte à côte deux rangées de plantes, l'une mutante l'autre sauvage, éclairées à une extrémité par du bleu et à l'autre par du rouge.

VII. Conclusion

Ce projet visait à évaluer l'effet de différents spectres lumineux sur le développement des ravageurs. Le but est de proposer des éclairages à installer sous abri pour avoir des productions plus résistantes et donc plus qualitatives en réduisant l'usage d'insecticides.

Les essais menés cette année ont montré que la qualité du spectre lumineux influence fortement le développement des ravageurs et que le bleu a un effet protecteur, et ceci, pour l'ensemble des couples plantes/ravageurs testés. *A contrario*, les piqueurs-suceurs ne sont pas favorisés par des éclairages à dominante rouge qui augmente la photosynthèse donc la qualité de la sève. Les résultats de cette année montrent également que l'intensité lumineuse totale, aux niveaux testés, a un effet négligeable sur l'infestation. La réduction des infestations est permise par l'intensité en bleu et le ratio R/B. En effet, quand ce ratio est inférieur à 1, l'infestation diminue de manière significative. Le processus impliqué serait soit l'effet effarouchement soit l'effet SDP du bleu, même si les résultats obtenus laissent penser que c'est à la voie SDP qui est majoritairement impliquée. Les prochains essais permettront de discriminer l'importance de chacune de ces voies par l'utilisation d'un mutant d'*Arabidopsis thaliana* ayant la voie SDP altérée.

VIII. Bibliographie

Ballaré, C. L. (2009). Illuminated behaviour: phytochrome as a key regulator of light foraging and plant anti-herbivore defence. *Plant, Cell & Environment*, 32(6), 713-725.

Ballaré, C. L., Mazza, C. A., Austin, A. T., & Pierik, R., (2012). Canopy light and plant health. *Plant Physiology*, 160(1), 145-155.

Ballaré, C. L. (2014). Light Regulation of Plant Defense. *Annual Review of Plant Biology*, 65(1), 335–363.

Battle, M. W., & Jones, M. A. (2020). Cryptochromes integrate green light signals into the circadian system. *Plant, cell & environment*, 43(1), 16-27.

Briscoe, A. D., & Chittka, L. (2001). The evolution of color vision in insects. *Annual review of entomology*, 46(1), 471-510.

Cargnel M. D., Demkura P. V., Ballaré C. L., 2014. Linking phytochrome to plant immunity: low red : far-red ratios increase Arabidopsis susceptibility to Botrytis cinerea by reducing the biosynthesis of indolic glucosinolates and camalexin. *New phytologist* (2014) 204: 342-354

Chen, M. S. (2008). Inducible direct plant defense against insect herbivores: a review. *Insect science*, 15(2), 101-114.

Courbier, S., Grevink, S., Sluijs, E., Bonhomme, P. O., Kajala, K., Van Wees, S. C., & Pierik, R. (2020). Far-red light promotes Botrytis cinerea disease development in tomato leaves via jasmonate-dependent modulation of soluble sugars. *Plant, cell & environment*, 43(11), 2769-2781.

De Wit M., Spoel S.H., Sanchez-Perez G. F., Gommers C. M. M., Pieterse C. M., Voeselek L. A. C. J. and PIERIK R., 2013. Perception of low red:far-red ratio compromises both salicylic acid- and jasmonic acid-dependent pathogen defences in Arabidopsis. *The Plant Journal* (2013) 75, 90-103.02

Döring, T. F. (2014). How aphids find their host plants, and how they don't. *Annals of Applied Biology*, 165(1), 3-26.

El-Esawi, M., Arthaut, L. D., Jourdan, N., d'Harlingue, A., Link, J., Martino, C. F., & Ahmad, M. (2017). Blue-light induced biosynthesis of ROS contributes to the signaling mechanism of Arabidopsis cryptochrome. *Scientific reports*, 7(1), 1-9.

Escobar-Bravo, R., Klinkhamer, P. G., & Leiss, K. A. (2017). Interactive effects of UV-B light with abiotic factors on plant growth and chemistry, and their consequences for defense against arthropod herbivores. *Frontiers in Plant Science*, 8, 278.

Escobar-Bravo, R., Nederpel, C., Naranjo, S., Kim, H. K., Rodríguez-López, M. J., Chen, G., ... & Klinkhamer, P. G. (2019). Ultraviolet radiation modulates both constitutive and inducible plant defenses against thrips but is dose and plant genotype dependent. *Journal of Pest Science*, 1-13.

Gebreziher, H. G. (2018). The role of herbivore-induced plant volatiles (HIPVs) as indirect plant defense mechanism in a diverse plant and herbivore species; a review. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 2(4), 139-147.

Hori, M., Shibuya, K., Sato, M., & Saito, Y. (2014). Lethal effects of short-wavelength visible light on insects. *Scientific reports*, 4(1), 1-6.

Izaguirre, M. M., Mazza, C. A., Biondini, M., Baldwin, I. T., & Ballaré, C. L. (2006). Remote sensing of future competitors: impacts on plant defenses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(18), 7170-7174.

Jenkins GI, (2009). Signal transduction in responses to UV-B radiation. *Ann. Rev. Plant Biol.* 60: 407-31.

Johansen, N. S., Vänninen, I., Pinto, D. M., Nissinen, A. I., & Shipp, L. (2011). In the light of new greenhouse technologies: 2. Direct effects of artificial lighting on arthropods and integrated pest management in greenhouse crops. *Annals of Applied Biology*, 159(1), 1-27.

Kim, Y. J., Kim, H. M., Kim, H. M., Lee, H. R., Jeong, B. R., Lee, H. J., ... & Hwang, S. J. (2021). Growth and phytochemicals of ice plant (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) as affected by various combined ratios of red and blue LEDs in a closed-type plant production system. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 20, 100267.

Lazzarin, M., Meisenburg, M., Meijer, D., van Ieperen, W., Marcelis, L. F. M., Kappers, I. F., Dicke, M. (2020). LEDs Make It Resilient: Effects on Plant Growth and Defense. *Trends in Plant Science*.

Le Gall, H., Philippe, F., Domon, J. M., Gillet, F., Pelloux, J., & Rayon, C. (2015). Cell wall metabolism in response to abiotic stress. *Plants*, 4(1), 112-166.

Meng, L., Van Labeke, M. C., & Höfte, M. (2020). Timing of light quality affects susceptibility to *Botrytis cinerea* in strawberry leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 211, 111988.

Mithöfer, A., & Boland, W. (2012). Plant defense against herbivores: chemical aspects. *Annual review of plant biology*, 63, 431-450.

Naznin, M. T., Lefsrud, M., Gravel, V., & Hao, X. (2016). Different ratios of red and blue LED light effects on coriander productivity and antioxidant properties. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134* (pp. 223-230).

Naznin, M. T., Lefsrud, M., Gravel, V., & Hao, X. (2016). Using different ratios of red and blue LEDs to improve the growth of strawberry plants. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134* (pp. 125-130).

Nowak, H., & Komor, E. (2010). How aphids decide what is good for them: experiments to test aphid feeding behaviour on *Tanacetum vulgare* (L.) using different nitrogen regimes. *Oecologia*, *163*(4), 973-984.

Ogino, T., Uehara, T., Muraji, M., Yamaguchi, T., Ichihashi, T., Suzuki, T., ... & Shimoda, M. (2016). Violet LED light enhances the recruitment of a thrip predator in open fields. *Scientific reports*, *6*(1), 1-10.

Pantazopoulou, C. K., Bongers, F. J., Küpers, J. J., Reinen, E., Das, D., Evers, J. B., ... & Pierik, R. (2017). Neighbor detection at the leaf tip adaptively regulates upward leaf movement through spatial auxin dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(28), 7450-7455.

Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, I., ... & Gianquinto, G. (2019). Unraveling the role of red: blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil. *Frontiers in plant science*, *10*, 305.

Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S., Cellini, A., Crepaldi, A., Braschi, I., ... & Marcelis, L. F. (2019). Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red: blue ratio provided by LED lighting. *Scientific reports*, *9*(1), 1-11.

Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G., & Gianquinto, G. (2015). Optimal red: blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae*, *193*, 202-208.

Roeber, V. M., Bajaj, I., Rohde, M., Schmülling, T., & Cortleven, A. (2021). Light acts as a stressor and influences abiotic and biotic stress responses in plants. *Plant, Cell & Environment*, 44(3), 645-664.

Schaefer, H. M., & Rolshausen, G. (2006). Plants on red alert: do insects pay attention?. *BioEssays*, 28(1), 65-71.

Spalholz, H., Perkins-Veazie, P., & Hernández, R. (2020). Impact of sun-simulated white light and varied blue: red spectrums on the growth, morphology, development, and phytochemical content of green-and red-leaf lettuce at different growth stages. *Scientia Horticulturae*, 264, 109195.

Vandenbussche, F., Yu, N., Li, W., Vanhaelewyn, L., Hamshou, M., Van Der Straeten, D., & Smaghe, G. (2018). An ultraviolet B condition that affects growth and defense in Arabidopsis. *Plant science*, 268, 54-63.

War, A. R., Paulraj, M. G., Ahmad, T., Buhroo, A. A., Hussain, B., Ignacimuthu, S., & Sharma, H. C. (2012). Mechanisms of plant defense against insect herbivores. *Plant signaling & behavior*, 7(10), 1306-1320.

War, A. R., Taggar, G. K., Hussain, B., Taggar, M. S., Nair, R. M., & Sharma, H. C. (2018). Plant defence against herbivory and insect adaptations. *AoB Plants*, 10(4), ply037.

Wu, L., & Yang, H. Q. (2010). CRYPTOCHROME 1 is implicated in promoting R protein-mediated plant resistance to *Pseudomonas syringae* in Arabidopsis. *Molecular plant*, 3(3), 539-548.

Xiang, S., Wu, S., Zhang, H., Mou, M., Chen, Y., Li, D., ... & Yu, D. (2020). The PIFs redundantly control plant defense response against *Botrytis cinerea* in Arabidopsis. *Plants*, 9(9), 1246

Yaku, A., Walter, G. H., & Najar-Rodriguez, A. J. (2007). Thrips see red—flower colour and the host relationships of a polyphagous anthophilic thrips. *Ecological Entomology*, 32(5), 527-535.

Zha, L., Liu, W., Yang, Q., Zhang, Y., Zhou, C., & Shao, M. (2020). Regulation of ascorbate accumulation and metabolism in lettuce by the red: blue ratio of continuous light using LEDs. *Frontiers in plant science*, 11, 704.

Zhang, Y., Kaiser, E., Zhang, Y., Yang, Q., & Li, T. (2019). Red/blue light ratio strongly affects steady-state photosynthesis, but hardly affects photosynthetic induction in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Physiologia plantarum*, 167(2), 144-158.

IX. Sitographie

[1] : <https://universal-led.com/infos-led/principe>

ANNEXE 1

GLOSSAIRE TECHNIQUE

Essais 2019/2020

Les spectres utilisés :

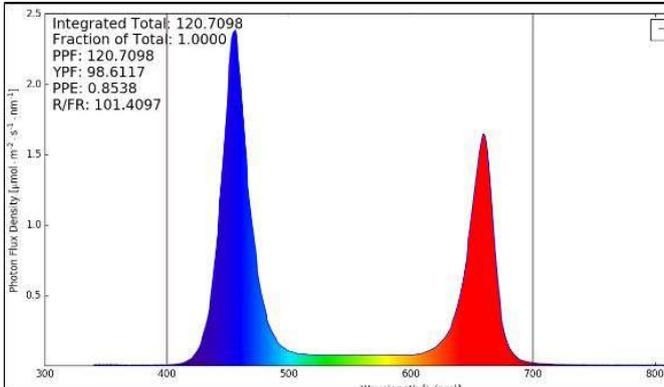


Figure 34 : Spectre à dominante bleue 0+60/8/32+0

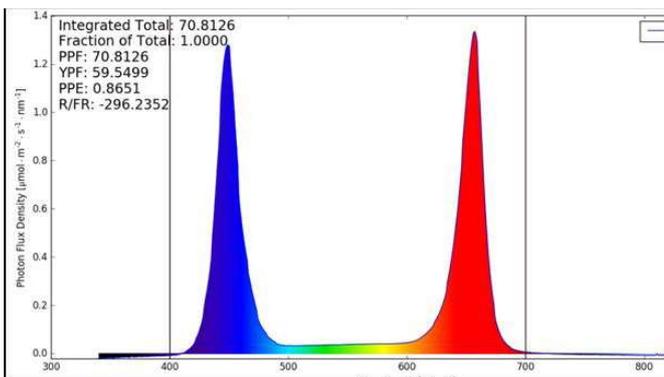


Figure 35 : Spectre équilibré 0+48/6/46+0

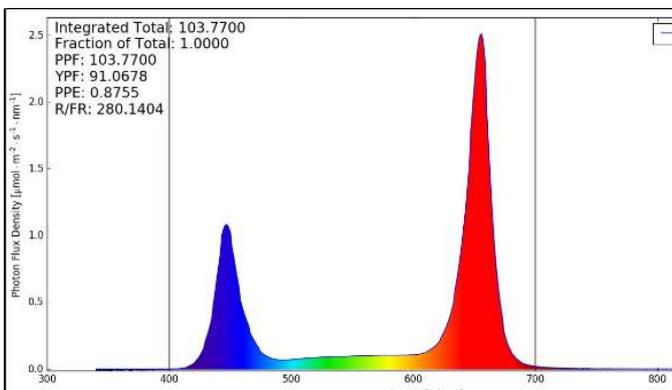


Figure 36 : Spectre à dominante rouge 0+28/10/62+0

Les intensités utilisées :

- PPF_D = 30 μmol/m²/s (=faible intensité)
- PPF_D = 80 μmol/m²/s (=forte intensité).

Par exemple E80 = spectre équilibré 80 μmol/m²/s

NB : Les spectres sont décrits en pourcentage de l'intensité comprise entre 400 et 700 nm (PAR) des longueurs d'onde « bleues » (de 340 à 500 nm), « vertes et jaunes » (de 500 à 610) et « rouges » (de 610 à 690). Les plages pour caractériser le « bleu » et le « rouge » sont issus des spectres d'absorption du cryptochrome pour le bleu et de la chlorophylle a et du phytochrome pour le rouge. Si le spectre contient des UV-B (280 à 310 nm) ou du rouge lointain (710 à 770 nm), ils seront précisés en plus en pourcentage de l'intensité comprise entre 400 et 700 nm.

Abréviation décrivant le spectre en Figure 1 : 0 % UVB + 60 % B / 8 % V / 32 % R + 0 % RL

ANNEXE 2 PLAN DES ESSAIS 2021

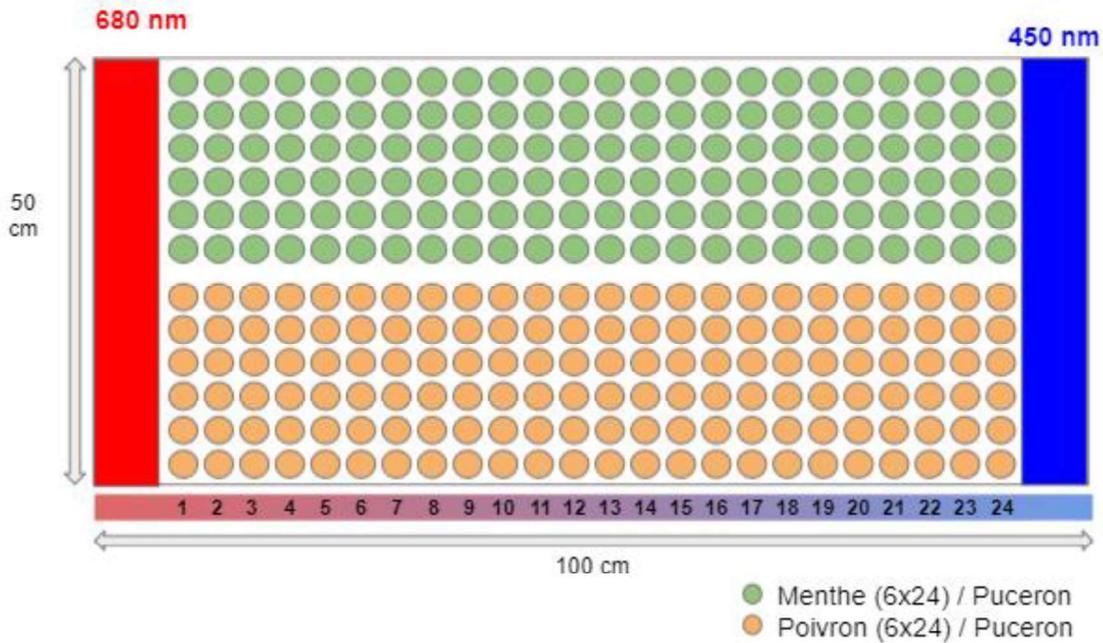


Figure 3718 : plan de l'essai en chambre de culture pour les couples menthe/puceron (*Ovatus mentarius*) et poivron/puceron (*Aulacorthum solani*)

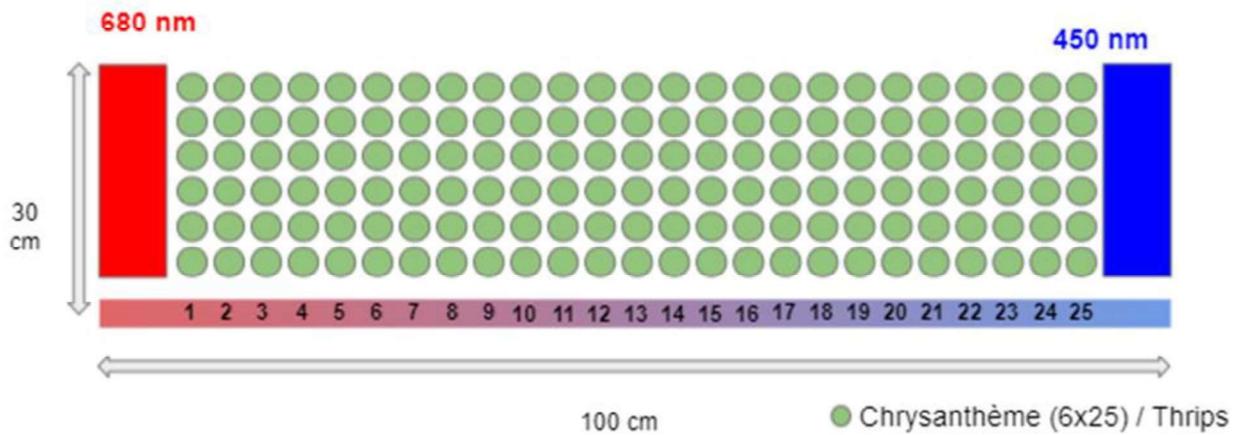


Figure 38 : plan de l'essai en chambre de culture pour le couple chrysanthème/thrips (*Frankliniella occidentalis*)

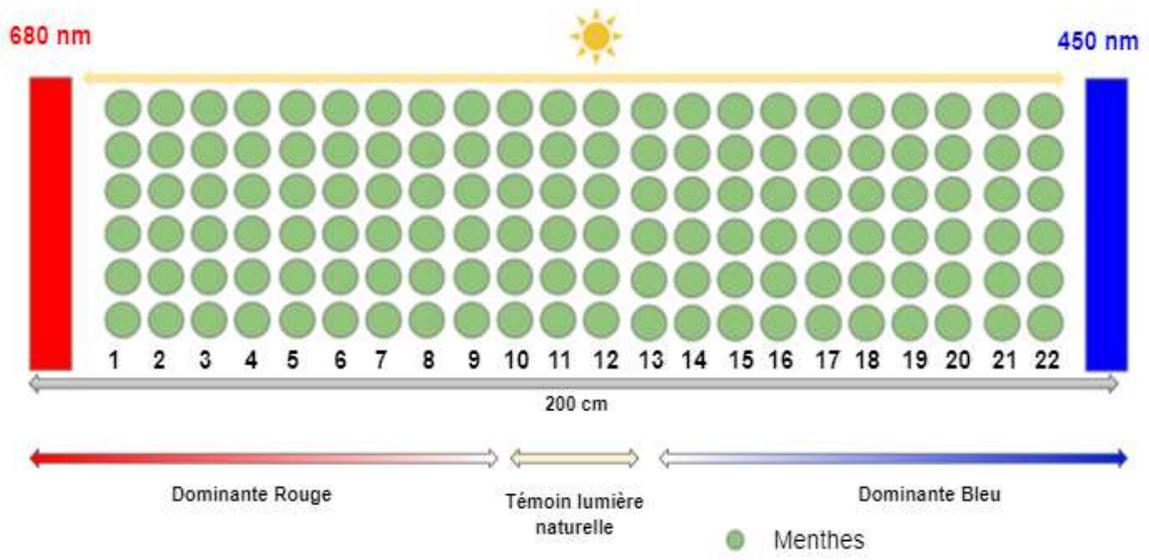


Figure 39 : plan de l'essai en conditions de production (tunnel) pour le couple menthe/puceron (*Ovatus mentarius*)

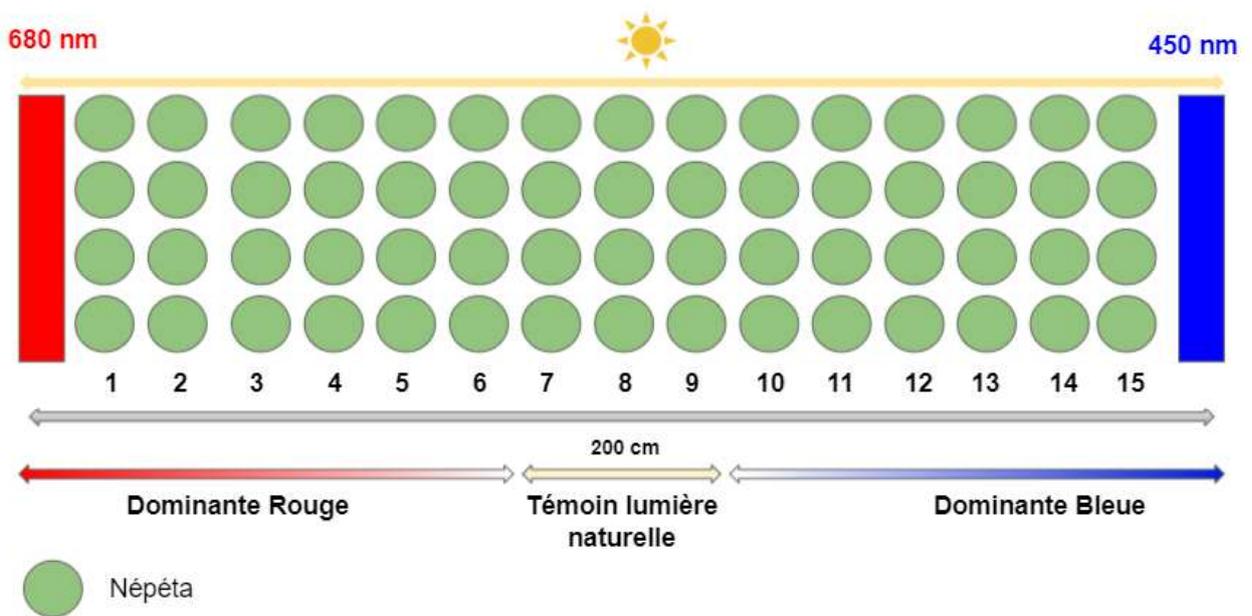


Figure 19 : plan de l'essai en conditions de production (tunnel) pour le couple népéta/aleurode (*Bemisia tabaci*) et népéta/cicadelle (*Eupteryx decemnotata*)

 agriculture • alimentation • environnement   université angers  UNIVERSITÉ DE NANTES	Diplôme: Master Mention : Biologie Végétale (BV) Parcours : Filières de l'horticulture et Innovations (FHI)
Auteur(s) : Fanny UBLET Date de naissance* : 04/10/1997	Organisme d'accueil : AREXHOR PL Adresse : 2 rue des Magnolias
Nb pages : 30 Annexe(s) : 2	49130 Les-Ponts-De-C�
Année de soutenance : 2021	Maître de stage : Alain FERRE
<p>Etude de l'impact de la lumière sur les insectes ravageurs</p> <p>Study of the impact of light on insect pests</p>	
<p>Résumé : Par des observations antérieures en chambre de culture, les ingénieurs de l'Arexhor PL ont remarqué que, dans certaines conditions d'éclairage LEDs, certains ravageurs étaient fortement limités dans leur développement. Ces observations ont été confirmées par des expérimentations en 2019 et 2020. Les résultats de ces expérimentations montrent un taux d'infestation du thrips divisé par quatre sous spectre à dominante bleu comparé à un spectre à dominante rouge sur chrysanthème. Gr�ce à de nouveaux essais, l'étude 2021 a permis d'apporter des réponses sur les différents mécanismes impliqués permettant de limiter les infestations grâce au bleu et cela, dans le but de pouvoir proposer cette méthode en production. Le premier mécanisme impliqué serait un effet indirect d'activation des défenses des plantes par la lumière, appelé effet stimulateur de défense des plantes (SDP). En effet, certains spectres pourraient stimuler la production de molécules de défenses des plantes qui nuisent aux insectes ravageurs. Le second mécanisme impliqué serait un effet d'effarouchement direct des insectes par certaines longueurs d'onde.</p>	
<p>Abstract : From previous observations growing rooms, the engineers of Arexhor PL noticed that under certain LED lighting conditions, some pests were severely restricted in their development. These observations were confirmed by experiments in 2019 and 2020. The results of these experiments show a thrips infestation rate divided by four sub-spectrum predominantly blue compared to a spectrum predominantly red on chrysanthemum. Thanks to new trials, the 2021 study made it possible to provide answers on the various mechanisms involved in limiting infestations thanks to blue, with the aim of being able to offer this method in production. The first mechanism involved is an indirect effect of activation of plant defenses by light, called the plant defense stimulator effect (SDP). Indeed, certain spectra could stimulate the production of plant defense molecules that harm insect pests. The second mechanism involved would be a direct scaring effect of insects at certain wavelengths.</p>	
<p>Mots-clés : stimulateur de défenses, insectes ravageurs, horticulture, LEDs,</p> <p>Key Words: defense stimulator, insect pests, horticulture, LEDs,</p>	