

## La cécidomyie orange et le blé dur : Evaluation des risques

**Auteur :** Bughin, Astrid

**Promoteur(s) :** Dumont, Benjamin; 24590

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2023-2024

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/21658>

---

### Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

---

# **LA CÉCIDOMYIE ORANGE ET LE BLÉ DUR : ÉVALUATION DES RISQUES**

**ASTRID BUGHIN**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024**

**CO-PROMOTEURS : BENJAMIN DOMONT ET GUILLAUME JACQUEMIN**



© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

## Remerciements

---

Je voudrais, dans un premier temps, remercier mes deux co-promoteurs, Benjamin Dumont et Guillaume Jacquemin, pour leur suivi et leur encadrement tout au long de ce travail.

Je tenais à exprimer toute ma reconnaissance à Guillaume Jacquemin qui m'a permis de réaliser mon travail de fin d'études au CRA-W, au sien de l'unité de sélection des céréales. Un tout grand merci de m'avoir trouvé un sujet passionnant et de m'avoir consacré beaucoup de temps. J'ai énormément appris durant ces derniers mois à vos côtés. Votre travail passionné et vos connaissances agronomiques sont des sources d'inspiration.

Je remercie également Monsieur Dumont pour son aide, ses explications et ses nombreux conseils qui m'ont permis d'orienter au mieux ce travail.

Un incommensurable merci à Justine Gruntowy pour son appui et son soutien apportés tout au long de mon travail. Merci de m'avoir consacré du temps, d'avoir toujours su m'aiguiller et d'avoir toujours fait en sorte que mes expérimentations se déroulent au mieux. Les journées passées en ta compagnie ont été agréables et très enrichissantes.

Je remercie ensuite les équipes du CRAW. Merci à l'Unité 2 : Justine V. qui est devenue une amie, Axel avec qui j'ai partagé de nombreux fous rires et qui mériterait un paragraphe de remerciement à lui seul, Jérôme, Benoît V., Léon. Merci à tous pour le renfort lors des semis, de l'installation des serres, du bâchage, de l'entretien, etc. Merci à l'Unité 3 de François Henriët pour leur accueil, leurs conseils, leur bonne humeur et les agréables temps de midi.

Je tenais également à remercier les professeurs François Verheggen et Yves Brostaux ainsi que Christophe Lacroix, doctorant en phytotechnie, pour leur éclaircissement et leur aide apportés à mes analyses statistiques.

Merci à ma famille : Papa pour ton soutien, ton écoute, tes conseils et pour l'exemple que tu me donnes au quotidien ; Maman pour ton aide, tes encouragements et ton soutien durant mes études ; Claire et Éléonore, merci d'avoir toujours su rendre les moments difficiles beaucoup plus légers avec à vos bêtises et vos rires ; merci aussi à Parrain, Papy et Mamy.

Un tout grand merci à mes ami.e.s qui ont rendu ces 6 dernières années inoubliables. Merci aux acolytes TFistes du BV. Merci à Élodie et Agtahe pour leurs encouragements. Merci Anne-So pour ces longues heures de travail acharnées (on y sera arrivée !) et pour tous les moments incroyables passés ensemble.

Merci à Élisabeth d'être à mes côtés depuis si longtemps. Tu as été ma bulle d'oxygène dans les moments les plus difficiles.

Merci à Jean. Pour tout ! Ton aide, ton soutien, ton humour, ta patience mais surtout, merci d'avoir cru en moi.

## Résumé

---

La cécidomyie orange, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin), est un ravageur du blé qui peut provoquer des pertes importantes de rendement. Les dégâts sont à constater lors de la coïncidence des émergences des adultes et de l'épiaison des blés. Même si ces dernières années n'ont pas été favorables au développement de l'insecte, il n'en reste pas moins important de poursuivre les recherches sur son développement et la sélection de variétés résistantes.

Deux expérimentations ont été menées pour ce travail.

La première est consacrée à l'évolution des stades de développement de la cécidomyie orange dans le sol. Pour ce faire, des bacs de terre inoculés de larves ont été placés aux pieds d'une station météorologique. Durant seize semaines, l'échantillonnage et le comptage des individus ont permis de suivre l'évolution des stades et d'observer la dynamique des populations confrontées au modèle prévisionnel d'émergence. Les pics d'émergences ont été anticipés par le modèle. Plusieurs hypothèses ont pu être émises par rapport au développement des pupes. Par ailleurs, la présence de cocons allongés résultant d'une reformation de cocon au printemps a été mise en évidence. Jusqu'à présent, cette forme était peu documentée, car assez rare et ne survenant qu'en conditions non optimales.

La deuxième expérience consistait à tester une grande diversité de blés durs afin d'observer les caractères résistants ou sensibles des variétés. Nonante-et-une variétés ont été implantées au champ après un semis en serre. À l'épiaison des blés durs, les lâchers de cécidomyie ont eu lieu dans des volières. Des degrés divers de tolérance et/ou de résistance ont pu être relevés.

**Mots-clés :** Cécidomyie orange, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin), cocon allongé, pupaison, larve, blé dur, résistance variétale.

## Abstract

---

The orange midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin), is a wheat pest that can cause significant yield losses. Damage is most likely to be seen when the adults emerge at the same time as the wheat heads. Although recent years have not been favourable for the development of this insect, it is nonetheless important to continue research into its development and the selection of resistant varieties.

Two experiments were carried out for this work.

The first was devoted to the evolution of the development stages of the orange midge in the soil. To do this, trays of soil inoculated with larvae were placed at the foot of a weather station. Over a sixteen-week period, sampling and counting of individuals made it possible to monitor the development of stages and observe population dynamics, which were compared with the forecast emergence model. The emergence peaks were anticipated by the model. Several hypotheses were put forward concerning the development of pupae. In addition, the presence of elongated cocoons resulting from cocoon reformation in the spring was highlighted. Until now, this form had been little documented, as it was fairly rare and only occurred in non-optimal conditions.

The second experiment consisted of testing a wide range of durum wheat varieties in order to observe whether they were resistant or susceptible. Ninety-one varieties were planted in the

field after sowing in the greenhouse. Midge releases were carried out in aviaries at hard wheat heading. Various degrees of tolerance and/or resistance have been demonstrated.

**Keywords :** Orange midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin), elongated cocoon, pupation, larva, durum wheat, varietal resistance.

## Table des matières

1	Introduction.....	1
2	État de l’art : la cécidomyie orange du blé et le blé dur .....	3
2.1	La cécidomyie orange .....	3
2.1.1	Diversité .....	3
2.1.2	Classification et répartition géographique.....	3
2.1.3	Morphologie .....	4
2.1.3.1	Œuf.....	4
2.1.3.2	Larve.....	4
2.1.3.3	Pupe .....	5
2.1.3.4	Adulte .....	5
2.1.4	Cycle de développement .....	6
2.1.4.1	Diapause .....	6
2.1.4.2	Pupaison .....	7
2.1.4.3	Émergence et accouplement .....	7
2.1.4.4	Vol et ponte.....	7
2.1.4.5	Développement larvaire .....	8
2.1.4.6	Migration larvaire.....	8
2.1.5	Dégâts.....	8
2.1.6	Moyens de lutte .....	9
2.1.6.1	Traitement.....	9
2.1.6.2	Modèle prévisionnel .....	9
2.1.7	Résistance variétale .....	10
2.1.8	Maladies des épis .....	11
2.2	Le blé dur .....	12
2.2.1	Origine.....	12
2.2.2	Classification .....	12
2.2.3	Production et filière .....	12
2.2.4	Facteurs influençant la croissance.....	13
2.2.5	Facteurs influençant la qualité.....	14
3	Objectifs de ce travail .....	15
4	Méthodologie .....	16
4.1	Dynamique de développement et d’émergence de la cécidomyie orange.....	16
4.1.1	Site de l’essai.....	16
4.1.2	Dispositifs expérimentaux .....	16



4.1.3	Observations et variables mesurées.....	17
4.1.3.1	Semaine .....	17
4.1.3.2	Fraction.....	17
4.1.3.3	Strate.....	18
4.1.3.4	Stades de développement .....	19
4.1.3.5	Émergence .....	19
4.1.3.6	Modèle prévisionnel .....	19
4.2	Résistance du blé dur.....	19
4.2.1	Description du site expérimentale .....	19
4.2.2	Conditions climatiques .....	20
4.2.3	Implantation initiale de l'essai et adaptation du protocole aux dégâts post semis.....	20
4.2.4	L'expérimentation .....	21
4.2.4.1	Facteur variété .....	21
4.2.4.2	Facteur serre .....	21
4.2.5	Observations et variables mesurées.....	23
4.2.5.1	Stade de la culture .....	23
4.2.5.2	Nombre d'épis par serre .....	23
4.2.5.3	Cécidomyies .....	23
4.3	Analyse des données .....	25
4.3.1	Dynamique de développement et d'émergence de la cécidomyie orange.....	26
4.3.2	Résistance variétale du blé dur .....	26
4.3.2.1	Sensibilité variétale .....	27
4.3.2.2	Précocité et cumul des lâchers .....	28
4.3.2.3	Cotation de la résistance variétale .....	28
5	Résultats et discussion .....	29
5.1	Dynamique de développement et d'émergence de la cécidomyie orange.....	29
5.1.1	Strate.....	29
5.1.2	Observation des stades et dynamique de population.....	29
5.1.3	Terrines.....	33
5.1.4	Suivi des conditions climatiques et des émergences .....	35
5.2	Résistance variétale .....	37
5.2.1	Suivi temporel .....	37
5.2.2	Émergence en milieu contrôlé.....	39
5.2.3	Sensibilité variétale .....	40
5.2.4	Précocité .....	40

5.2.5	Cumul des lâchers .....	41
5.2.6	Cotation de la résistance variétale .....	42
5.2.7	Caractérisation variétale .....	43
6	Contribution personnelle.....	46
7	Conclusion et perspective .....	47
8	Bibliographie.....	48
9	Annexe .....	54

## Table des figures

<b>Figure 1</b> : Cécidomyie équestre.....	3
<b>Figure 2</b> : Mouche de Hesse. ....	3
<b>Figure 3</b> : Cécidomyies jaunes. ....	3
<b>Figure 4</b> : Cécidomyie orange. ....	3
<b>Figure 5</b> : Nombres d'espèces de cécidomyies décrites par zone zoogéographique. ....	4
<b>Figure 6</b> : Arbre taxonomique des Cecidomyiinae. ....	4
<b>Figure 7</b> : Larve en L3 en vue ventrale.....	5
<b>Figure 8</b> : Vue dorsale des papilles terminales des larves en L3 . ....	5
<b>Figure 9</b> : Vue ventrale de la spatule sternale des larves en L3.....	5
<b>Figure 10</b> : 3 <sup>ème</sup> flagellomère de l'antenne mâle formé de deux nodules et d'un étranglement ..... 5	5
<b>Figure 11</b> : 3 <sup>ème</sup> flagellomère de l'antenne femelle ..... 5	5
<b>Figure 12</b> : Appareil génital mâle en vue dorsale..... 6	6
<b>Figure 13</b> : Ovipositeur femelle en vue latérale . .... 6	6
<b>Figure 14</b> : Cycle biologique de la cécidomyie orange (Sitodiplosis mosellana). .... 6	6
<b>Figure 15</b> : Femelle déposant ces œufs entre les glumes d'un épillet..... 8	8
<b>Figure 16</b> : Schéma du modèle prévisionnel d'émergences de la cécidomyie orange du blé..... 10	10
<b>Figure 17</b> : Niveau de résistance au froid et de variabilité génétique de différentes espèces..... 13	13
<b>Figure 18</b> : Vue aérienne de l'emplacement de l'expérimentation. .... 16	16
<b>Figure 19</b> : Emplacement des terrines aux pieds de la station météorologique..... 17	17
<b>Figure 20</b> : Schématisation des subdivisions des terrines..... 17	17
<b>Figure 21</b> : Planning de prélèvement des fractions des terrines. .... 17	17
<b>Figure 22</b> : Extraction d'une fraction de terre d'une terrine..... 18	18
<b>Figure 23</b> : Une fraction de terre divisée en trois strates..... 18	18
<b>Figure 24</b> : Nettoyage des échantillons de terre. .... 18	18
<b>Figure 25</b> : Cocon. .... 19	19
<b>Figure 26</b> : Larve..... 19	19
<b>Figure 27</b> : Pupa. .... 19	19
<b>Figure 28</b> : Piège à phéromone..... 19	19
<b>Figure 29</b> : Vue aérienne de l'emplacement de l'expérimentation et caractérisation du sol. .... 20	20
<b>Figure 30</b> : Pluviométries et températures de la saison culturale. .... 20	20
<b>Figure 31</b> : Conditions d'implantation difficiles avec des sols très humides, phénomène de battance et semis non levés..... 21	21
<b>Figure 32</b> : Semis en pot dans les serres du CRA-W, repiquage des variétés et céréales au stade montaison. .... 21	21
<b>Figure 33</b> : Schématisation de la disposition des variétés dans la première serre. .... 22	22
<b>Figure 34</b> : Schématisation de la disposition des variétés dans la première serre. .... 22	22
<b>Figure 35</b> : Installation des serres et des voiles au-dessus des parcelles d'essai. .... 23	23
<b>Figure 36</b> : Lâchers de cécidomyies dans les serres. .... 23	23
<b>Figure 37</b> : Bac d'immersion des terrines pour simuler la pluie, caisse voilée disposée sur les terrines, pot de collecte à cécidomyies..... 25	25
<b>Figure 38</b> : Récolte des épis, dispositif d'extraction, simulation de la pluie par aspersion, comptage des larves..... 25	25
<b>Figure 39</b> : Schéma des caractéristiques variétales étudiées. .... 27	27
<b>Figure 40</b> : Pourcentage de cécidomyies présentes dans les trois strates. 1 : 0-4 cm ; 2 : 4-8 cm ; 3 : 8-12 cm..... 29	29

<b>Figure 41</b> : Évolution des proportions des différents stades de développement de la cécidomyie orange au cours des seize semaines de comptage. ....	29
<b>Figure 42</b> : Cocons allongés. ....	30
<b>Figure 43</b> : Différence de taille entre pupes. ....	31
<b>Figure 44</b> : Pupes avec différentes nuances de couleurs au niveau des yeux. ....	31
<b>Figure 45</b> : Pupa dont les pattes et les ailes se noircissent. ....	31
<b>Figure 46</b> : Pupa avant l'émergence. ....	31
<b>Figure 47</b> : Pupa endommagée lors de son extraction du cocon. ....	32
<b>Figure 48</b> : <i>Cocons allongés et ecdysies nymphales sur la surface du sol.</i> ....	32
<b>Figure 49</b> : Suivi de la population de la terrine A. ....	33
<b>Figure 50</b> : Suivi de la population de la terrine B. ....	33
<b>Figure 51</b> : Suivi de la population de la terrine C. ....	33
<b>Figure 52</b> : Suivi de la population de la terrine D. ....	33
<b>Figure 53</b> : Larves mortes présentant une excroissance. ....	34
<b>Figure 54</b> : Comparaison de larves mortes et d'une larve saine. ....	34
<b>Figure 55</b> : Comparaison de larves et de cocons morts avec des cécidomyies saines. ....	34
<b>Figure 56</b> : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine A. ....	35
<b>Figure 57</b> : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine B. ....	35
<b>Figure 58</b> : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine C. ....	35
<b>Figure 59</b> : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine D. ....	35
<b>Figure 60</b> : Schéma de l'activité des mâles en fonction des conditions climatiques. ....	36
<b>Figure 61</b> : Schéma de l'activité des mâles en fonction des conditions climatiques dans la région de Gembloux. ....	37
<b>Figure 62</b> : Nombre de variété au stade sensible (Stade BBCH 51). ....	37
<b>Figure 63</b> : Lâchers de cécidomyies orange. ....	38
<b>Figure 64</b> : Pression des lâchers de cécidomyies subie par les variétés au stade épiaison. ....	38
<b>Figure 65</b> : Émergence des cécidomyies par terrine. ....	39
<b>Figure 66</b> : Boxplot du nombre de larves observées par variété. ....	40
<b>Figure 67</b> : Boxplot du nombre de larves observées par épi en fonction de la précocité. ....	40
<b>Figure 68</b> : Relation entre le nombre de larves par épi et le cumul des lâchers dans les serres 1 et 2. ....	41
<b>Légende</b> : Une version agrandie se trouve en Annexe 14. ....	41
<b>Figure 69</b> : Classement des variétés de la serre 1 en fonction de leur précocité, du cumul des lâchers et du nombre de larves observées. ....	41
<b>Figure 70</b> : Classement des variétés de la serre 2 en fonction de leur précocité, du cumul des lâchers et du nombre de larves observées. ....	42

## Table des tableaux

---

<b>Tableau 1</b> : Taxonomie du blé dur (Inventaire national du patrimoine naturel, 2024) .....	12
<b>Tableau 2</b> : Planning des opérations de manipulation des terrines.....	24
<b>Tableau 3</b> : Données, facteurs et variables utilisés dans les modèles statistiques. ....	26
<b>Tableau 4</b> : Équations statistiques utilisées sur RStudio .....	26
<b>Tableau 5</b> : Données, facteurs et variables analysés par les modèles statistiques. ....	27
<b>Tableau 6</b> : Équations statistiques des différents modèles utilisés sur RStudio .....	27
<b>Tableau 7</b> : Résumé des caractéristiques des premières pupes observées. ....	32
<b>Tableau 8</b> : Émergences observées pour chaque terrine. ....	34
<b>Tableau 9</b> : Estimation du nombre de cécidomyies femelles lâchées.....	38
<b>Tableau 10</b> : Intervalle de temps entre l'arrosage et les émergences prévues et observées. ....	39
<b>Tableau 11</b> : Caractérisation variétale, cote de résistance et résultats d'analyses. ....	45

## Table des annexes

<b>Annexe 1</b> : Liste des variétés .....	54
<b>Annexe 2</b> : Echelle BBCH améliorée .....	58
<b>Annexe 3</b> : Suivi de la population de la terrine A .....	62
<b>Annexe 4</b> : Suivi de la population de la terrine B .....	62
<b>Annexe 5</b> : Suivi de la population de la terrine C .....	63
<b>Annexe 6</b> : Suivi de la population de la terrine D .....	63
<b>Annexe 7</b> : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine A .....	64
<b>Annexe 8</b> : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine B .....	64
<b>Annexe 9</b> : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine C .....	65
<b>Annexe 10</b> : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine D .....	65
<b>Annexe 11</b> : Schéma de l'activité des mâles en fonction des conditions climatiques .....	66
<b>Annexe 12</b> : Schéma de l'activité des mâles en fonction des conditions climatiques dans la région de Gembloux .....	67
<b>Annexe 13</b> : Boxplot du nombre de larves observées par variété. ....	68
<b>Annexe 14</b> : Relation entre le nombre de larves par épi et le cumul des lâchers dans les serres 1 et 2 .....	69
<b>Annexe 15</b> : Classement des variétés de la serre 1 en fonction de leur précocité, du cumul des lâchers et du nombre de larves observées. ....	70
<b>Annexe 16</b> : Classement des variétés de la serre 2 en fonction de leur précocité, du cumul des lâchers et du nombre de larves observées. ....	71
<b>Annexe 17</b> : Résultats obtenus par le modèle de cotation .....	72

# 1 Introduction

---

Face aux changements climatiques, notre agriculture traditionnelle et nos modes de productions sont mis à rudes épreuves. L'occurrence d'épisodes climatiques extrêmes a déjà provoqué de nombreux dommages, laissant une marque dans l'esprit collectif (Minne, 2020). Parmi ces dégâts, la pression des ravageurs des cultures, et en particulier des insectes, pourrait s'accroître. En effet, les caractéristiques biologiques des insectes sont principalement influencées par les températures. L'observation de modifications physiologiques et comportementales est donc à prévoir tels que le nombre de cycles saisonniers, le taux de reproduction, le taux de prédation et de parasitisme, l'extension des aires de répartition et l'augmentation de la diversité des ressources consommées (Moiroux et al., 2014).

De plus, la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, appuyée par les politiques, encourage l'emploi de méthodes alternatives et de substitution. Au niveau européen, la Commission européenne ambitionne de réduire de 50%, d'ici 2030, l'utilisation des pesticides chimiques les plus dangereux (« Pesticides - Commission européenne » 2024). La politique agricole commune (PAC) est notamment construite dans le but de promouvoir une agriculture raisonnée et durable. En Wallonie, la quantité de substances actives vendues chaque année a diminué d'environ deux tonnes entre 1995 et 2020 (SPW, 2023).

La cécidomyie orange, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin), est reconnue comme étant un ravageur du blé (Wright and Doane 1987 ; Lamb et al. 2000b) présent dans l'ensemble des régions céréalières de l'hémisphère nord. Les dégâts aux cultures qu'elle provoque, ont longtemps été sous-estimés. En effet, la présence discrète et les effectifs variables de cécidomyies orange la rendent difficilement détectable.

Malgré cela, les dégâts provoqués par la cécidomyie orange sont observés dans de nombreux pays et peuvent engendrer d'importantes pertes financières, comme ce fut le cas au Royaume-Uni (Oakley, 1995 et 2005), en Allemagne (Gaafar and Volkmar, 2010), en France (Rouillon et al., 2006), en Finlande (Kurppa, 1989), en Asie (Duan et al., 2013), au Canada (Olfert et al., 1985, Lamb et al., 1999, Doane et Olfert, 2008) et aux États-Unis (Knodel et Ganahiarachchi, 2008).

La Belgique a également été témoin des pullulations de cécidomyies (Jacquemin et al., 2014), notamment en 1999 où des pertes de rendement ont été constatées (De Proft et Latteur, 2000). C'est surtout en 2008 et 2018 que l'insecte s'est révélé particulièrement nuisible (Jacquemin, 2014 ; Avertissements Cepicop 69, 24/05/2018 ; Avertissements Cepicop 72, 29/05/2018 ; Livre Blanc « Céréales » - Septembre 2018). Les infestations atteignant des records de 60 larves par épi en 2018.

Ce petit insecte, longtemps mal compris, est sujet à de nombreuses recherches (Jacquemin, 2014). Aujourd'hui, la cécidomyie orange est surveillée par différents modèles prévisionnels de l'émergence des adultes (Basedow et Gillich, 1982 ; Oakley et al., 1998 ; Kurpa, 1989). Cependant, ceux-ci se basaient principalement sur l'accumulation de degré jour. Or, l'étude de Jacquemin et al. (2014) a révélé que le déclenchement de l'émergence était beaucoup plus complexe et reposait sur une succession de conditions météorologiques. En Belgique, un outil d'aide à la décision, un OAD, nommé CECIBLE, a donc été élaboré afin de prévoir les dates d'émergences de la cécidomyie grâce à un suivi précis des données météorologiques spatialisées à l'ensemble du territoire wallon (Rosillon et al., 2020).

Le combat contre la cécidomyie a longtemps été synonyme de l'application systématique d'insecticides (Jacquemin, 2014). Aujourd'hui, grâce au modèle CECIBLE, il est possible de réduire ces traitements et d'agir de manière raisonnée. La sélection variétale joue également un rôle dans cette lutte intégrée. En blé tendre, la recherche et la sélection sont permis de repérer des variétés résistantes puis à les intégrer dans de nouveaux croisements afin de créer de nouvelles variétés à la fois résistantes et performantes agronomiquement (Chavalle et al., 2015). L'intérêt du développement de celles-ci est aussi bien de protéger les récoltes et de maîtriser la multiplication de l'insecte en évitant les traitements insecticides, sachant que la cécidomyie passe souvent inaperçue et s'avère incontrôlable une fois les larves observées dans les épis.

En ce qui concerne le blé dur, aucune variété commercialisée n'est réputée résistante à la cécidomyie. Néanmoins, depuis l'automne 2020, de plus en plus d'agriculteurs optent pour la culture de blé dur, jusque-là inconnue de nos campagnes belges. Au Centre de Recherche Agronomique Wallon, le blé dur est étudié au champ depuis 2018 (Le Sillon Belge, mars 2021).

Ce travail regroupera donc une analyse de l'évolution des différents stades de développement de la cécidomyie dans le sol ainsi qu'une recherche de variétés résistantes de blé dur par exposition des plantes aux pontes en conditions semi-contrôlées.



## 2 État de l'art : la cécidomyie orange du blé et le blé dur

---

### 2.1 La cécidomyie orange

#### 2.1.1 Diversité

Quatre espèces de cécidomyies sont identifiées comme ravageur du froment :

- La cécidomyie équestre (*Haplodiplosis marginata* (Von Roser)) ;
- La mouche de Hesse (*Mayetiola destructor* (Say)) ;
- La cécidomyie jaune (*Contarinia tritici* (Kirby)) ;
- La cécidomyie orange (*Sitodiplosis mosellana* (Géhin)).

Les larves des deux premières se nourrissent de la tige alors que les deux autres se développent sur les organes floraux et les grains en formation.



**Figure 1 : Cécidomyie équestre**  
(Sources : Archive CRA-W).



**Figure 2 : Mouche de Hesse**  
(Source : IRIIS phytoprotection.).



**Figure 3 : Cécidomyies jaunes**  
(Source : Perspectives Agricoles, 2024).

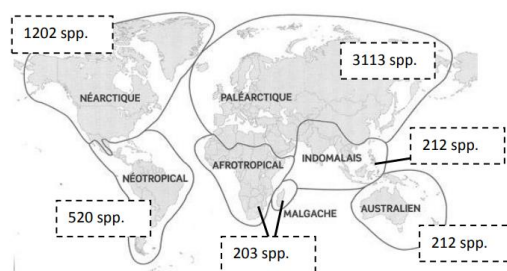


**Figure 4 : Cécidomyie orange**  
(Source : Archive CRA-W).

#### 2.1.2 Classification et répartition géographique

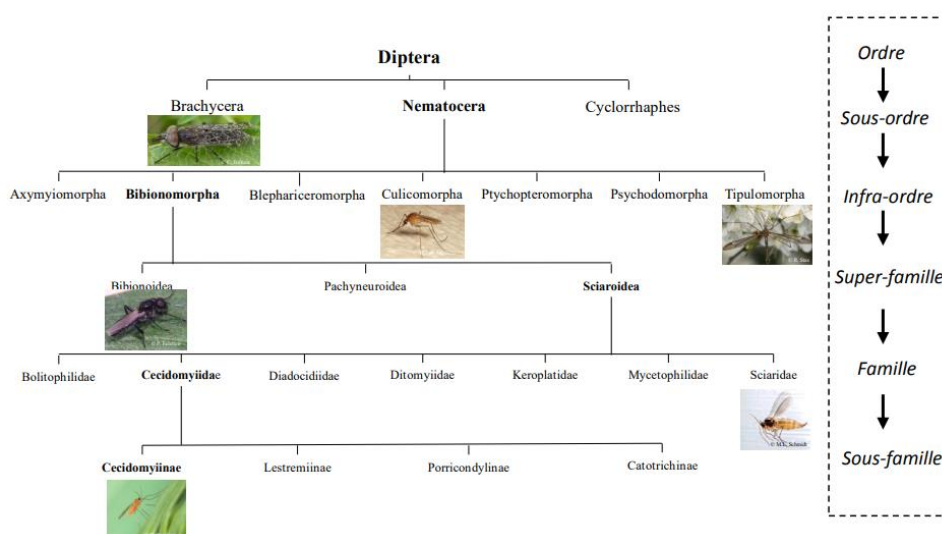
En 1857, en France, J.B. Géhin décrit pour la première fois la cécidomyie orange (Géhin, 1857).

La cécidomyie orange est un petit diptère appartenant à une des plus abondantes familles de cet ordre, les Cecidomyiidae. Cette famille ne dénombre pas moins de 5700 espèces, réparties dans l'ensemble des régions du monde. L'hémisphère nord abrite la majorité des espèces dont la répartition est généralement limitée à une région zoogéographique. (Skuhrava 2006).



**Figure 5 :** Nombres d'espèces de cécidomyies décrites par zone zoogéographique (Skuhrava 2006).

La famille des Cecidomyiidae comprendrait quatre sous-familles et daterait, sur base de fossiles, d'au moins 150 millions d'années (Dorchin 2008).



**Figure 6 :** Arbre taxonomique des Cecidomyiinae (Source : Jacquemin 2014).

### 2.1.3 Morphologie

Au cours de son développement, la cécidomyie traverse quatre stades : œuf, larve, pupa et adulte.

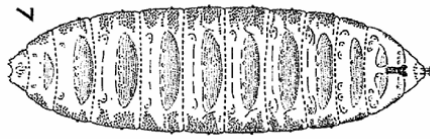
#### 2.1.3.1 Œuf

La cécidomyie orange pond des œufs de type bacilliforme, d'abord translucides puis de couleur rougeâtre, avec une surface lisse et brillante. Les œufs mesurent 0,35 mm de long et 0,09 mm de large (Speyer, 1957).

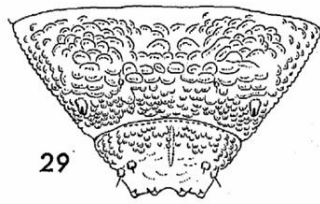
#### 2.1.3.2 Larve

Le stade larvaire a été décrit par Gagné et Doane (1999). La cécidomyie orange passe par trois stades larvaires (L1, L2 et L3). En L1, la larve mesure de 0,45 à 1,05 mm et est de couleur blanchâtre. Une première mue a lieu après deux ou trois jours. En L2, la couleur devient de plus en plus orange et la taille varie entre 1,05 et 3,3 mm, selon la disponibilité des éléments nutritifs (Smith et Lamb, 2004). Lors de la deuxième mue, la larve L3 conserve l'ecdysie comme enveloppe temporaire. La larve atteint alors 2,8 à 3,2 mm et une spatule sternale, partie sclérifiée en forme de clou de girofle, est observable sur la face ventrale du prothorax et permet à la larve de se déplacer dans le sol. Cette spatule ainsi que les papilles terminales, ébauches des organes reproducteurs, permettent de distinguer les espèces de cécidomyies entre elles (Skuhrava, 1997 ; Gagné et Doane, 1999). Une différence de poids se marque déjà entre les

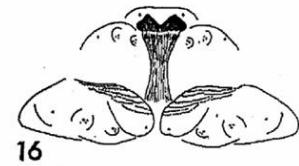
mâles et les femelles. Celles-ci sont d'ailleurs jusqu'à 80% plus lourdes que les mâles (Smith et Lamb, 2004). Pour passer l'hiver, la larve se recroqueville en « C » et se fabrique un cocon sphérique de 0,7 à 2 mm de diamètre.



**Figure 7 :** Larve en L3 en vue ventrale  
(Source : Harris, 1966).



**Figure 8 :** Vue dorsale des papilles terminales des larves en L3  
(Source : Harris, 1966).



**Figure 9 :** Vue ventrale de la spatule sternale des larves en L3  
(Source : Harris, 1966).

#### 2.1.3.3 Pupe

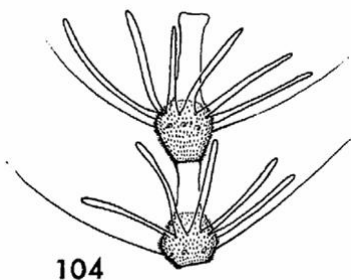
Au stade puppe, les cécidomyies sont orange et mesurent 2 mm. Lors de la pupaison, les pattes, les ailes et les yeux se noircissent progressivement.

#### 2.1.3.4 Adulte

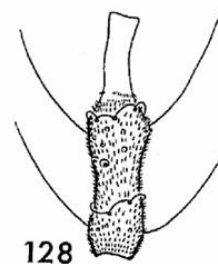
La cécidomyie a l'apparence d'un petit moustique. Elle mesure de 1,5 à 3 mm et est de couleur rouge-orangée. Ses longues antennes sont moniliformes et présentent 12 articles. Le reste de son corps comprend des yeux noirs ainsi que des pattes longues fines (Affolter, 1990).

Les mâles se distinguent des femelles par de nombreux caractères :

- La **taille** des mâles est plus petite : 1,5 à 2,5 mm contre 2 à 3 mm pour les femelles.
- Un dimorphisme sexuel est observé sur les **antennes** (Barnes 1928). En effet, les mâles possèdent des antennes plus longues et plus plumeuses que celles des femelles. Les flagellomères des femelles sont cylindriques tandis que ceux des mâles sont constitués d'un étranglement allongé qui divise le flagellomère en deux nodules. Les antennes possèdent quatre types de sensilles dont les quantités diffèrent selon le sexe de l'insecte (Affolter, 1990 ; Wang et al. 2016).

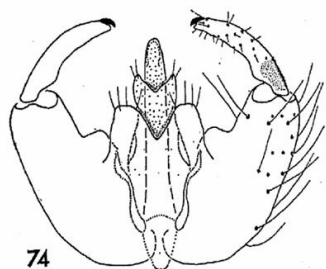


**Figure 10 :** 3<sup>ème</sup> flagellomère de l'antenne mâle formé de deux nodules et d'un étranglement  
(Source : Harris, 1966).

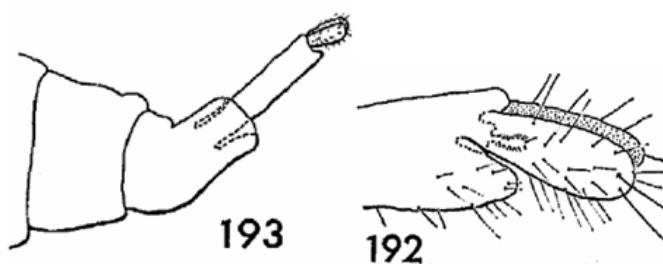


**Figure 11 :** 3<sup>ème</sup> flagellomère de l'antenne femelle  
(Source : Harris, 1966).

- L'**appareil génitale** des mâles est composé d'une large pince et d'un gonocoxite qui semble écorné. Les femelles possèdent un ovipositeur formé d'une tarière rétractile et de deux lobes elliptiques (Affolter 1990).



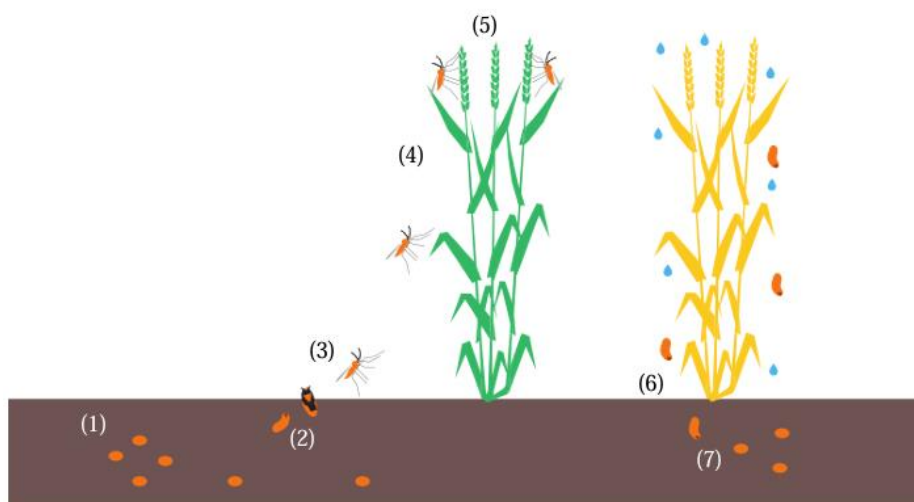
**Figure 12 :** Appareil génital mâle en vue dorsale (Source : Harris, 1966).



**Figure 13 :** Ovipositeur femelle en vue latérale (Sources : Harris, 1966).

#### 2.1.4 Cycle de développement

La cécidomyie est un insecte univoltin, caractère fixé par le besoin d'une période de froid. La larve protégée par un cocon passe l'hiver dans le sol (1). Au printemps, elle quitte son cocon et migre vers la surface où s'accomplira la pupaison (2). Les accouplements ont lieu dès l'éclosion (3). La femelle recherche ensuite une plante-hôte pour y pondre ses œufs (4). Après l'éclosion, les larves se développent dans les épis, en se nourrissant au détriment du grain en formation (5). Une fois la phase alimentaire terminée, les larves sortent des épis, se laissent tomber sur le sol (6) et entre en diapause après s'être fabriqué un cocon (7).



**Figure 14 :** Cycle biologique de la cécidomyie orange (*Sitodiplosis mosellana*).  
(1) Diapause ; (2) Pupa ; (3) Émergence et accouplement ; (4) Vol et ponte ; (5) Développement larvaire ; (6) Migration larvaire dans le sol ; (7) Diapause. (Source : Chavalle, 2018)

##### 2.1.4.1 Diapause

Avant l'entrée en diapause, la larve se tisse un cocon sphérique et passe l'hiver dans le sol. Le cocon protège la larve de la sécheresse, de l'eau et du froid (Barnes, 1956). La levée de diapause se déroule sous deux conditions. La première est l'exposition suffisante au froid, à des températures inférieures à 10°C pendant au minimum 70 jours (Oakley, 1994). La deuxième est l'accumulation de chaleur calculée sous forme de degrés-jours à partir du 1<sup>er</sup> janvier, date qui suppose la première condition remplie (Jacquemin, 2014). Durant quelques semaines, la larve est capable de percevoir des stimuli de température et d'humidité, la poussant à sortir de son cocon et à remonter vers la surface du sol (à 1cm de la surface), afin d'entamer la pupaison (Basedow, 1977a ; Jacquemin, 2014 ; Oakley, 1994). En cas de conditions défavorables, toutes

les cécidomyies n'émergeront pas. Certaines subiront une super-diapause et resteront dans le sol en cocon jusqu'au printemps suivant (Affolter, 1990). Les larves peuvent survivre et émerger jusqu'à 12 ans après leur enfouissement dans le sol (Barnes, 1952a). Cachés, ces cocons constituent une réserve importante de ravageurs.

#### 2.1.4.2 Pupaion

La pupaion se produit dans les premiers centimètres de terre et dure entre 8 et 21 jours (Golightly, 1952). Les pupes sont généralement nues et traversent la surface du sol avant l'émergence des adultes. Il est possible d'observer l'ecdysie nymphale à la surface du sol après l'émergence (Affolter, 1990).

#### 2.1.4.3 Émergence et accouplement

La période d'émergence survient au printemps. D'année en année, les dates peuvent différer de plus de 40 jours, d'avril à juin, en fonction des conditions météorologiques (Chavalle et al., 2016). Pivnick et Labbé (1992) ont observé la précocité d'émergence des mâles par rapport aux femelles en se concentrant sur le jour et l'heure d'émergence de l'insecte. Selon les études, la proportion de cécidomyies émergées varie de 10 à 95% (Basedow et Schütte, 1982 ; Wise et Lamb, 2004). L'accouplement a lieu sur le site d'émergence (Oakley, 1994). Une phéromone sexuelle produite par les femelles après leur émergence a en effet été identifiée. Il s'agit du (2S,7S)-2,7-nonanediyl dibutyrate qui a pour fonction d'attirer les mâles (Pivnick et Labbé 1992; Pivnick 1993; Gries et al. 2000).

#### 2.1.4.4 Vol et ponte

Les premiers vols sont généralement observés début juin, au crépuscule, en moyenne de 75 minutes avant le coucher du soleil à 30 minutes après, et dure quelques semaines (Pivnick et Labbé 1993 ; Jacquemin, 2014). Les conditions de températures minimales pour le vol et la ponte sont respectivement de 14-15°C et de 10-11°C. Le vent supérieur à 10 km/h, la pluie, la luminosité et la sécheresse sont d'autres paramètres qui affectent l'activité des adultes (Ellis et al., 2009 ; Pivnick and Labbé, 1993).

Les femelles fécondées, en quête de plantes-hôtes, volent face au vent et s'orientent via des stimuli olfactifs (Ganehachari and Harris, 2007 et 2009 ; Oakley, 1994). Ceux-ci sont des substances volatiles émises par les épis durant l'épiaison, entre le stade de développement BBCH 53 à 58 (Ding et Lamb, 1999 ; Smith et Lamb, 2001). Durant le troisième jour de vie des femelles, la majorité des œufs sont pondus, pouvant atteindre un total d'environ 80 œufs sur toute la période de ponte (Pivnick et Labbé 1993). Ceux-ci sont disposés dans les épillets, entre les glumes, de la partie émergée de l'épi, individuellement ou par groupe de deux ou trois (Affolter, 1990; Smith and Lamb, 2001). La cécidomyie orange ne dépose généralement pas plus de deux œufs par grain et un maximum de trois œufs par épi (Smith and Lamb, 2001 et 2004). Plusieurs femelles peuvent pondre sur le même épillet (Affolter, 1990). Certains facteurs inhibent la ponte dans les épillets, les œufs sont alors pondus sur le rachis ou sur la face extérieure des glumes ce qui réduit considérablement leur chance de survie, en les exposant à la dessiccation et aux prédateurs (Lamb et al., 2003).





*Figure 15 : Femelle déposant ces œufs entre les glumes d'un épillet.  
(Sources : Archives CRA-W)*

Les mâles sont beaucoup moins mobiles que les femelles et restent principalement sur le site d'émergence si la végétation est suffisante pour s'y abriter (Affolter, 1990; Jacquemin, 2014).

Les cécidomyies adultes ont généralement une faible espérance de vie qui est comprise entre 2 et 7 jours mais qui peut atteindre de 17 à 24 jours, dans de meilleures conditions (Jacquemin, 2014 ; Pivnick and Labbé, 1993, 1992).

#### 2.1.4.5 Développement larvaire

L'éclosion survient entre 4 jours après la ponte à une température de 20°C et 10 jours à 15°C (Oakley, 1994). Durant la phase alimentaire, la larve se nourrit du grain en formation pendant 2 à 4 semaines, en fonction des températures, ce qui rend le grain rabougri et ratatiné (Skuhrava & al., 1984 ; Affolter, 1990). Elle entre ensuite en phase de quiescence, arrêtant de se nourrir jusqu'à une forte pluie. Plusieurs larves peuvent se développer sur le même grain (Lamb et al. 2000b).

#### 2.1.4.6 Migration larvaire

La migration des larves hors des épis est déclenchée par une pluie abondante. Une fois sur le sol, les larves pénètrent y au moyen de leur spatule sternale et s'enfoncent à 5-10 cm de profondeur avant de former un cocon et d'entrer en diapause (Affolter 1990, Golightly, 1952). En cas de période estivale sèche, les larves restent sur les épis avant d'être séparées du grain et de tomber au sol lors du battage, elles peuvent survivre en quiescence de 1 à 2 mois (Affolter, 1990). Cependant en cas de fortes températures, il arrive qu'elles meurent alors dans les épis comme cela s'est produit lors de l'été 2018 (Livre Blanc « Céréales » - Septembre 2018).

#### 2.1.5 Dégâts

Les dégâts occasionnés par la cécidomyie orange sont observés dans de nombreux pays européens et engendrent parfois d'importantes pertes financières. Ce fut notamment le cas au Royaume-Uni (Oakley, 2005), en Allemagne (Gaafar and Volkmar, 2010), en France (Rouillon et al. 2006) et en Belgique (Jacquemin, 2014).

Il est certain que la difficulté de détection et l'irrégularité des pullulations entre les champs et les années entraînent une sous-estimation des pertes causées par la cécidomyie.

En effet, les dégâts ne sont observables qu'à la récolte (Affolter, 1990) et lors de la coïncidence de trois événements (Oakley, 1998 et Basedow and Gillich, 1982) :

- L'émergence de l'insecte
- La **phase sensible du blé** :  
Cette phase s'étend de l'épiaison à la floraison, ce qui correspond aux stades 51 – 69 de l'échelle BBCH (**Annexe 2**). Les femelles cécidomyies n'ont qu'une petite fenêtre

pour pondre qui dure de 6 à 7 jours. Après l'anthèse, le développement et la survie des larves sont fortement réduits (Ding et Lamb, 1999).

- Les **conditions climatiques** favorables :

Le levé et la déclinaison de la lumière du jour sont respectivement à l'origine de l'arrêt et du déclenchement du comportement de ponte chez les femelles. La présence de nuages peut également influencer le début de la ponte en soirée. Les températures, la pluie et le vent jouent également un rôle important dans l'activité et le vol des adultes (Pivnick et Labbé, 1993).

Les dégâts sont plus forts si les épis sont exposés à la ponte durant l'épiaison (stades 51-59 de l'échelle Zadoks) que durant la floraison (stades 61-69) (Zadoks et al., 1974 ; Elliott et Mann, 1996).

Plusieurs études ont tenté de chiffrer les pertes de rendements en blé tendre. Oakley et al. (1998) parlent d'une réduction de 68 kg/ha pour une infestation d'une larve par épi. En France, Rouillon et al. (2006) ont évalué les dommages aux environs de 100 kg/ha pour une larve par épi. En parallèle à ces deux études, Jacquemin (2014) a chiffré les pertes à 1% par hectare pour une larve par épi.

#### 2.1.6 Moyens de lutte

##### 2.1.6.1 Traitement

Par manque de suivis et de connaissances, le seul moyen de lutter contre la cécidomyie a longtemps été le recours systématique aux insecticides, à base de pyréthrinoides. Ceux-ci ne sont pas sélectifs et impactent donc l'ensemble de l'entomofaune. De plus, les traitements systématiques sont souvent inefficaces et injustifiés. En effet, le traitement n'est pertinent que si la phase vulnérable du froment coïncide avec l'émergence des adultes. Sans cela, il n'existe aucun risque d'observer des dégâts (Jacquemin, 2014).

L'établissement d'un modèle de prédiction et d'un réseau d'alerte permet à la fois de réduire le nombre de traitements appliqués systématiquement, mais également de participer à la lutte intégrée de ce ravageur (Jacquemin et al., 2014).

##### 2.1.6.2 Modèle prévisionnel

En Belgique, Jacquemin et al. (2014) ont construit un modèle de prévision de l'émergence des cécidomyies, qui repose sur la coïncidence de l'apparition des celles-ci et des épis de blé. Ce modèle est composé de quatre phases :

- Vernalisation

La vernalisation correspond au besoin en froid qui se traduit par une accumulation de jours sous les 10°C. Cette condition est nécessaire à la levée de la diapause (Oakley et al., 1998). La satisfaction de cette exigence est supposée remplie durant le mois de novembre et décembre.

- Première accumulation de température

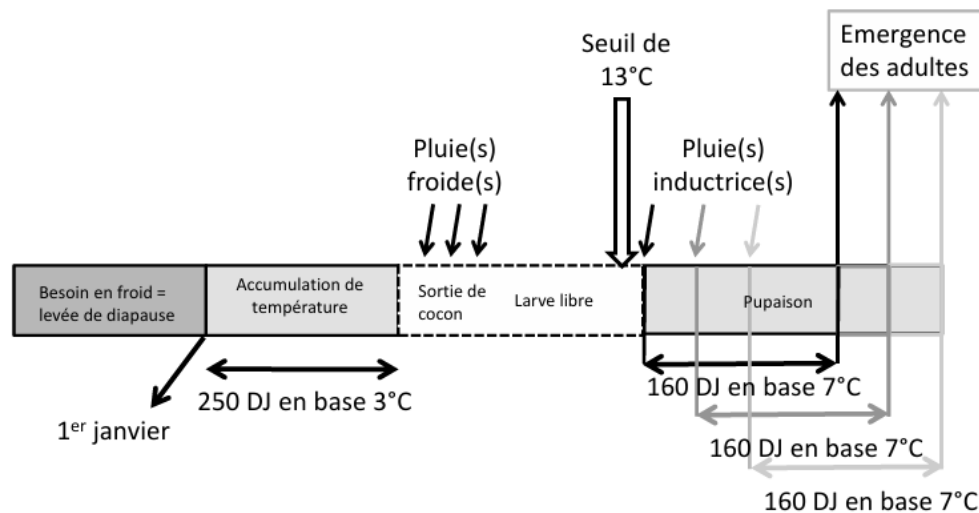
C'est le 1<sup>er</sup> janvier que débute la première phase d'accumulation de température. Celle-ci doit atteindre 250 degrés-jour (DJ), calculés en base 3°C. Cette phase s'étend généralement jusqu'au mois de mars ou avril. Une période humide appelée pluies froides, précédée de la première accumulation de DJ, est nécessaire aux larves pour quitter de leur cocon. Une fois sorties, les larves se dirigent vers la surface du sol.

- Double signal

Une fois en surface, la phase d'attente d'un double signal débute. Ce double signal reprend à la fois l'élévation de la température moyenne journalière à 13°C, mais aussi le suivi des pluies indicatrices. L'intervalle entre la sortie des cocons, la migration en surface, le réchauffement des températures du sol ainsi que les pluies indicatrices, constitue une phase de durée variable. C'est au moment où les conditions du double signal sont réunies que commence la deuxième accumulation de température.

- Dernière accumulation de température

Durant cette dernière période, la cécidomyie accumule 160 DJ en base 7°C et entame sa pupaison avant d'émerger.



**Figure 16 :** Schéma du modèle prévisionnel d'émergences de la cécidomyie orange du blé (Source : Jacquemin, 2014).

Ce modèle a été élaboré durant quatre années, de 2007 à 2010, puis réévalué chaque année depuis. Il repose essentiellement sur les conditions météorologiques et atteint un degré de précision de l'ordre d'un ou deux jours.

### 2.1.7 Résistance variétale

Les variétés de blé tendre montrent différents degrés de sensibilité à la cécidomyie, certaines plus vulnérables et d'autres plus résistantes.

Oakley et al. (2005) ont évalué différentes variétés par rapport à leurs niveaux de vulnérabilité, de tolérance et de résistance. La vulnérabilité est définie « en termes de nombre de larves produites par une infestation donnée de femelles de cécidomyies orange ». La tolérance est présentée comme le maintien du rendement face à l'alimentation des larves. La résistance est évaluée par le degré de développement des larves et est définie comme « l'incapacité des larves à se développer jusqu'au deuxième ou troisième stade [et à atteindre] une taille complète dans les 21 jours suivant la ponte des œufs ».

Des variétés de froment résistantes à la cécidomyie orange ont pu être obtenues au Canada par croisement entre des variétés d'hiver et des variétés de printemps. Une suppression de 58 à 100% des larves a été observée (Lamb et al., 2000a).



Deux mécanismes sont associés à la résistance variétale du blé à la cécidomyie :

- L'antixénose est la dissuasion ou l'inhibition de la ponte. Ce mécanisme réduit les densités d'œufs pondus et donc l'infestation des grains. Ce processus a notamment été observé chez certaines variétés de blé tendre et de blé dur (Lamb et al., 2001 et 2003). L'absence de stimuli olfactifs ou la présence de répulsifs pourraient être les causes de réduction de ponte. L'antixénose est un caractère héréditaire qui serait régi par plusieurs gènes, étant donné l'existence de plusieurs niveaux de dissuasion (Lamb et al. 2001 ; Gharalari et al. 2009a). Les facteurs environnementaux, comme la température, ont également une forte interaction avec l'antixénose puisqu'ils influencent l'expression phénotypique des blés (Gharalari et al., 2009).
- L'antibiose est l'inhibition de l'alimentation des larves par la présence d'acides phénoliques (Ding et al. 2000). La production par le blé d'acides phénoliques, principalement le *p*-coumaric et l'acide férulique, entraîne un retard de développement et la mort des larves. Cette réponse du blé est une réaction d'hypersensibilité qui a lieu à la surface du grain lorsque la larve commence à se nourrir (Ding et al. 2000, Lamb et al. 2000a).

Le gène *Sm 1*, couplé à d'autres gènes, serait à l'origine de cette production d'acides phénoliques (McKenzie et al., 2002 ; Ellis et al., 2009). Les individus hétérozygotes affichent des niveaux intermédiaires qui se situent entre les homozygotes sensibles et résistants, témoignant ainsi le caractère partiellement dominant du gène (McKenzie et al., 2002 ; Thomas et al., 2005). L'interaction de plusieurs gènes a pour conséquence l'expression de différents niveaux de résistance, marqués par des taux de production et des types d'acides différents (Ding et al., 2000). La dominance partielle est fortement employée dans les programmes de sélection variétale (Lamb et al., 2015 ; McKenzie et al., 2002).

Une résistance multigénique chez la plante est un avantage qui diminue les risques de contournement de résistance par les ravageurs. En effet, à la place de devoir contourner un seul gène, le ravageur fait face à plusieurs gènes de résistance complémentaires, ce qui rend la résistance plus stable et le contournement plus difficile.

Aujourd'hui, différentes variétés de blé tendre sont disponibles sur le marché (Chavalle et al., 2014b et 2017a ; Jacquemin, 2014 ; Vera et al. 2013).

#### 2.1.8 Maladies des épis

La cécidomyie jouerait un rôle dans la dissémination des maladies fongiques, à savoir la fusariose (*Fusarium* et *Microdochium*) et la septoriose de l'épi (*Septoria nodorum*).

Une corrélation positive a été démontrée entre l'abondance de larves par épi et l'infection par *Fusarium graminearum* (Couture et al., 1995 ; Mongrain et al., 1997) et par *S. nodorum* (Wellso and Freed, 1982).

De plus, les cécidomyies femelles adultes transporteraient des conidies ainsi que des fragments de mycélium (Mongrain et al., 2000). Cependant, il semble peu probable que la cécidomyie soit considérée comme un vecteur de la fusariose de l'épis et, par extension, influence sa dissémination. En effet, c'est au moment de l'épiaison et de la floraison que s'observe la

cécidomyie. Or, durant cette période, la fusariose se transmet naturellement via le vent et la pluie sous sa forme sexuée, les ascospores. Les conidies correspondent à la forme asexuée du champignon et n'apparaissent qu'en juillet, lorsque les cécidomyies adultes ne sont plus observées. De surcroît, il n'existe aucune description, dans la littérature, de la corrélation entre *Fusarium spp.* et la cécidomyie. Il pourrait autant s'agir de la transmission d'un agent pathogène que du développement de la maladie suite aux dommages causés par l'alimentation des larves (Drakulic et al., 2017).

Concernant la fusariose, *Michrodotium nivale*, et la septoriose, *Septoria nodorum*, qui contaminent à la fois les feuilles et les épis, des conidies sont présentes durant l'épiaison et la floraison. La cécidomyie pourrait donc favoriser la dissémination de cette forme de la maladie (Guillaume Jacquemin, communication personnelle).

## 2.2 Le blé dur

### 2.2.1 Origine

Le Croissant fertile dont la Mésopotamie constitue le berceau des blés. L'hybridation naturelle de *Triticum urartu* (génome A) et de *Aegilops speltoides* (génome B) a donné l'amidonnier sauvage (*Triticum dicoccoides*, AB). La domestication de ce blé tétraploïde au grain vêtu suivie d'une mutation naturelle donnant un blé à grain nu a permis l'apparition du blé dur, environ 7000 ans avant JC. Ce blé dur est à l'origine du blé dur actuel (*Triticum turgidum durum*) et semble être un des parents possibles du blé tendre (*Triticum aestivum*). L'hybridation supplémentaire à *Aegilops tauschii* (génome D), absente chez le blé dur, confère au blé tendre une meilleure adaptation aux hivers froids et aux étés humides (Arvalis, 2017).

### 2.2.2 Classification

Le blé est une céréale de la famille des Poaceae et du genre *Triticum*. Le blé tendre (*Triticum aestivum*) et le blé dur (*Triticum turgidum durum*) font parties des céréales les plus cultivées dans le monde et se différencient notamment par leur degré de ploïdie, le blé tendre étant hexaploïde et le blé dur tétraploïde (Feillet, 2000).

**Tableau 1 :** Taxonomie du blé dur (Inventaire national du patrimoine naturel, 2024)

<b>Règne</b>	Plantae
<b>Sous-Règne</b>	Viridaplantae
<b>Classe</b>	Equisetopsida
<b>Sous-Classe</b>	Magnoliidae
<b>Super-Ordre</b>	Lilianae
<b>Ordre</b>	Poales
<b>Famille</b>	Poaceae
<b>Genre</b>	<i>Triticum</i> L.
<b>Espèce</b>	<i>Triticum turgidum</i> L., 1753
<b>Sous-Espèce</b>	<i>Triticum turgidum subsp. durum</i> (Desf.) Husn., 1899

### 2.2.3 Production et filière

Le blé dur est la sixième céréale la plus produite dans le monde (Arvalis, 2017), avec 32,9 millions de tonnes en 2022-2023 (Agreste, 2023). Le maïs grain, avec 1187,8 millions de tonnes

en 2022-2023, et le blé tendre, avec 770,8 millions de tonnes en 2022-2023, arrivent à la tête de la production de céréales (Statista Research Department, 2023).

Six pays assurent 50% de la production mondiale, l'Italie et le Canada constituant ensemble 25% des récoltes. Les États-Unis, le Mexique, le Kazakhstan, la Turquie, le Maghreb et l'Australie font aussi partie des plus grands producteurs de blé dur. Le marché mondial est approvisionné essentiellement par le Canada, avec 56% des exports et 15 % par le Mexique (Arvalis, 2017).

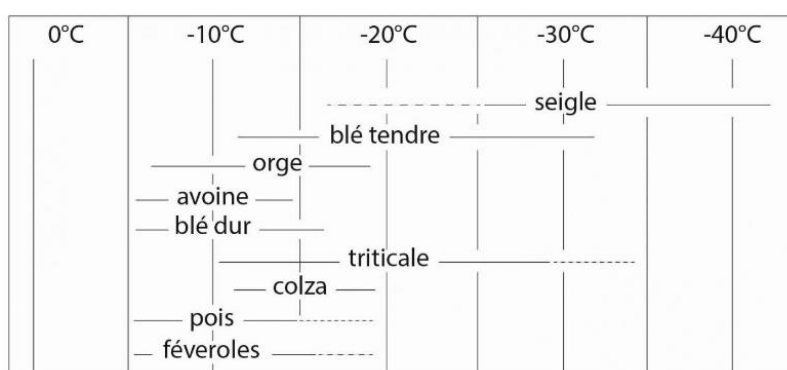
Au niveau européen, le blé dur est cultivé dans les régions chaudes et sèches du pourtour de la Méditerranée et employé dans la fabrication de pâtes, semoules et biscuits. 90% de la production européenne est assurée par l'Italie, la France, l'Espagne et la Grèce qui représenterait 7,75 millions de tonnes recensées en 2019 (Meza Morales, W. R., 2021). L'Allemagne, la Hongrie et la Roumanie figurent également parmi des pays producteurs (FranceAgriMer, 2022).

En Belgique, aucune filière de blé dur n'existe. De nombreuses recherches sont réalisées sur cette culture, notamment au CRA-W afin d'évaluer la possibilité de développer la filière, mais aussi de caractériser les variétés existantes et leur adaptation aux conditions locales (Rabier, 2023 ; Meza Morales, W. R., 2021).

#### 2.2.4 Facteurs influençant la croissance

Historiquement, le blé dur n'est pas une céréale adaptée à la Belgique. En effet, sa tolérance face aux contraintes du sol et du climat est plus faible que celle du blé tendre.

En tant que céréales de printemps, le blé dur a un faible besoin en vernalisation et une tolérance au froid limitée (Arvalis, 2017). Selon l'Institut français Arvalis, la résistance au froid du blé dur serait équivalente à celle du pois, de la féverole et de l'avoine. Il pourrait résister en moyenne à -10°C, selon les variétés (Le Sillon Belge, mars 2021). Une meilleure résistance au froid est observée lorsque les températures diminuent progressivement, ce qui permet à la plante de s'endurcir. La neige sert également d'isolant en permettant une résistance aux températures plus froides. Les successions de gel et de dégel pluvieux engendrent les dégâts les plus importants.



**Figure 17 :** Niveau de résistance au froid et de variabilité génétique de différentes espèces (Sources : Arvalis, 2022).

Le blé dur est également sensible à l'asphyxie, à l'engorgement et au tassement des sols. Son enracinement moins dense par rapport à celui du blé tendre, pourrait expliquer ces sensibilités (Arvalis, 2017).

La sensibilité aux maladies est aussi un facteur justifiant l'absence de blé dur en Belgique.

### 2.2.5 Facteurs influençant la qualité

La culture de blé dur est exclusivement destinée à l'alimentation humaine et possède des normes de qualité exigeantes et indispensables pour une bonne transformation.

La germination sur pied est un facteur qui réduit la qualité des grains. Le blé dur y est sensible, car la graine est peu dormante et donc plus susceptible à une levée de dormance en période de récolte fraîche et humide (Arvalis, 2017).

Le blé dur est également sensible aux maladies d'épi, telle que la fusariose qui est induite par un climat pluvieux et peut provoquer l'apparition de mycotoxine. Les pertes de rendement provoquées par cette maladie peuvent être deux à trois fois plus importantes qu'en blé tendre. (Arvalis, 2017).

La qualité du grain se dégrade aussi lors de précipitations avant la récolte en raison de l'augmentation du taux de mitadinage. Un millimètre de pluie augmente de 1% le mitadinage. Le mitadinage est une altération du grain qui se caractérise par la présence de parties blanchâtres qui diminuent la vitrosité de l'albumen. Lors du broyage des grains mitadinés, moins de semoules et plus de farines sont produites. Le mitadinage est également influencé par la teneur en protéines des grains et par la variété. (Arvalis, 2017).

### 3 Objectifs de ce travail

---

La cécidomyie orange est certes étudiée depuis de nombreuses années, mais elle n'en reste pas moins un ravageur important des blés lorsqu'elle rencontre des conditions idéales à son développement, comme ce fût le cas en 2018 (Avertissements Cepicop 69, 24/05/2018 ; Avertissements Cepicop 72, 29/05/2018 ; Livre Blanc « Céréales » - Septembre 2018).

La poursuite des recherches est indispensable, notamment pour comprendre en profondeur les différentes étapes de son cycle biologique. En effet, le dérèglement climatique a des répercussions sur nos pratiques agricoles qui peuvent avoir un impact sur la dynamique de population, mais également sur le cycle de développement de la cécidomyie basé sur une accumulation de degré jour (DJ) et sur des événements pluvieux (Climat.be, juin 2024).

Le blé dur est une culture de plus en plus implantée dans nos campagnes (Le Sillon Belge, mars 2021). La hausse des températures et la raréfaction des épisodes de gel offrent de nouvelles opportunités aux agriculteurs (Climat.be, juin 2024). Les cultures historiquement produites dans des régions plus chaudes peuvent plus facilement s'implanter dans nos régions. La sélection joue également un rôle important dans l'obtention de variétés adaptées à nos contextes climatiques et aux différentes pressions de ravageurs.

L'objectif de ce travail est donc double :

- L'observation de l'évolution des différents stades de développement de la cécidomyie orange dans le sol. Cette recherche exploratoire aura pour but de confronter le modèle de prédiction et d'induire de nouvelles recherches et hypothèses à explorer les années suivantes.
- La caractérisation du comportement résistant ou sensible de plusieurs variétés de blé dur face à la cécidomyie orange, et ce en conditions semi-contrôlées.

## 4 Méthodologie

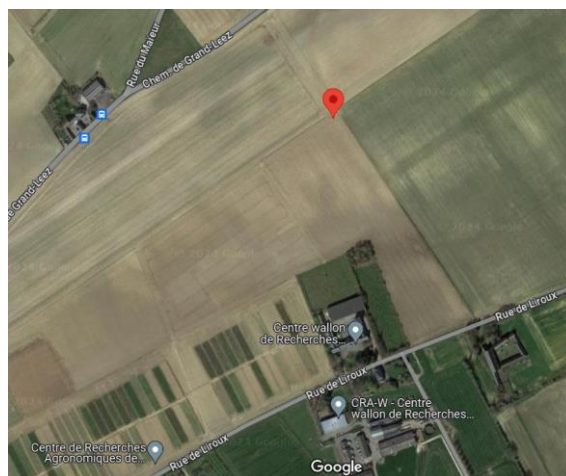
---

Ce travail est composé de deux expériences : l'une sur le développement de la cécidomyie orange dans le sol et sur la confirmation du modèle de prédiction et l'autre sur l'évaluation de résistances variétales du blé dur à la cécidomyie. La première expérience est nommée « Dynamique de développement et d'émergence de la cécidomyie orange » et la deuxième « Résistance variétale du blé dur ».

### 4.1 Dynamique de développement et d'émergence de la cécidomyie orange

#### 4.1.1 Site de l'essai

L'expérimentation s'est déroulée aux pieds de la station météorologique du CRA-W à Gembloux (50°34'13.1"N, 4°43'28.0"E, Gembloux, Belgique). Cette station a nouvellement été installée et permet de suivre les différents paramètres météorologiques indispensables à la poursuite de ce travail.



**Figure 18 :** Vue aérienne de l'emplacement de l'expérimentation. Source : (« Google Maps », 26-06-2024).

#### 4.1.2 Dispositifs expérimentaux

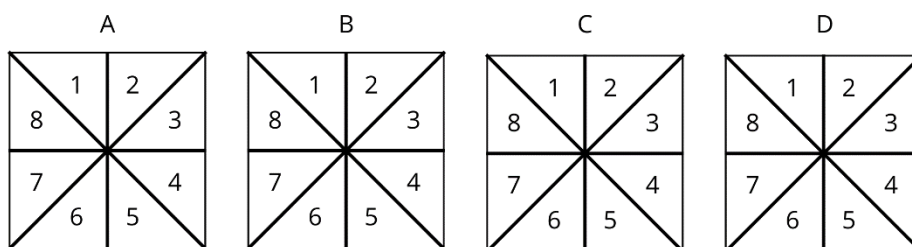
Quatre terrines de terre ont été étudiées durant seize semaines. Chacune des quatre terrines contient environ 3 dm<sup>3</sup> de terre limoneuse sur laquelle a été déposé 5 ml de larves de cécidomyies durant l'été 2023, 1ml contenant 1500 – 1600 larves de cécidomyies. Selon la méthode développée par Chavalle et al. (2015d), les paniers de terre ont été placés à l'extérieur dans une tranchée jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier, puis ont été disposées en chambre froide, à 5°C. Les terrines sont installées le 19 février au champ, au pieds de la station météo de Gembloux et subissent les conditions climatiques extérieures. Cet emplacement permet un suivi régulier et vérifié des données météo.



**Figure 19 :** Emplacement des terrines aux pieds de la station météorologique.

Les quatre terrines sont divisées en huit fractions égales qui constitueront huit prélèvements. Les terrines sont nommées de A à D et les fractions sont numérotées de 1 à 8. La fraction 1 se situe toujours dans le coin supérieur gauche, orientée vers le haut de la parcelle.

### Haut de la parcelle



**Figure 20 :** Schématisation des subdivisions des terrines.

#### 4.1.3 Observations et variables mesurées

##### 4.1.3.1 Semaine

Les prélèvements d'échantillons de terre se sont étalés sur seize semaines. Chaque semaine, une fraction de deux terrines a été prélevée selon le planning suivant :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	29/02	07/03	14/03	21/03	28/03	04/04	11/04	18/04	25/04	02/05	09/05	16/05	23/05	30/05	06/06	13/06
A et C																
B et D																

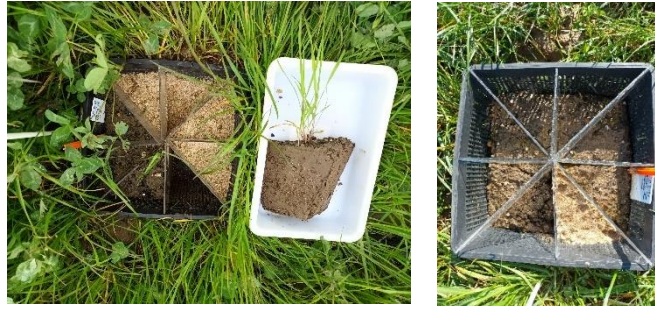
**Figure 21 :** Planning de prélèvement des fractions des terrines.

Cette façon de procéder a permis d'étendre les observations et ainsi de couvrir l'ensemble de la période comprise entre la sortie de diapause et l'émergence des cécidomyies.

##### 4.1.3.2 Fraction

Les fractions des terrines sont considérées comme des unités indépendantes séparées l'une des autres par des plexiglass et contenant initialement une quantité indéterminée de larves de cécidomyies. Une fois la tranche de terre extraite, l'espace créé est ensuite comblé par du sable afin de maintenir les conditions de températures et de lumière dans les fractions adjacentes.

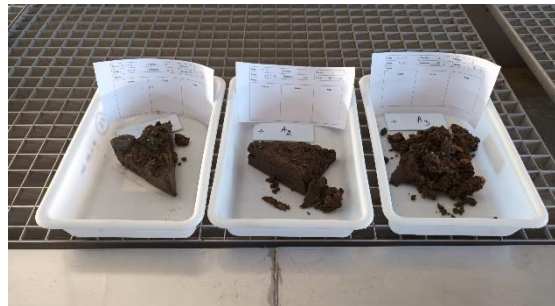




**Figure 22 :** Extraction d'une fraction de terre d'une terrine.

#### 4.1.3.3 Strate

Pour chaque prélèvement, la terre est divisée en trois strates de 4 cm chacune, afin de comparer l'abondance relative des cécidomyies en fonction de la profondeur dans le sol.



**Figure 23 :** Une fraction de terre divisée en trois strates.

Les trois strates sont pesées puis lavées à l'aide de trois tamis superposés de 3mm, 1mm et 300µm. Le premier tamis de 3mm et le deuxième de 1mm permettent de retenir les résidus les plus grossiers tout en laissant passer les cocons et les larves de cécidomyies qui sont retenus dans le dernier tamis de 300µm. D'abord dispersés dans l'eau, les sédiments restés au fond des bacs sont passés sous l'eau en continu au-dessus des tamis, jusqu'à ce que l'ensemble de l'échantillon soit filtré. Le contenu des tamis de 1mm et de 300 µm est récupéré. Cette technique est basée sur celle de Chavalle et al. (2015) qui s'inspire de la méthode décrite par Doane et al. (1987).



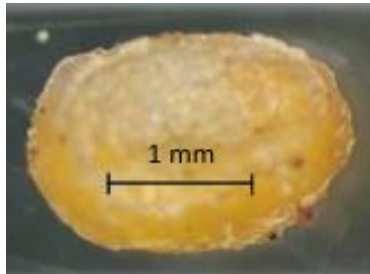
**Figure 24 :** Nettoyage des échantillons de terre.



#### 4.1.3.4 Stades de développement

Le contenu récupéré dans les tamis est analysé à l'aide d'un binoculaire. L'identification des différents stades de développement de la cécidomyie se fait sur base de la couleur et de la morphologie (Harris, 1966).

Les différents stades observés et comptés sont :



**Figure 25 : Cocon**  
(Source : G. Jacquemin, 2014).



**Figure 26 : Larve.**



**Figure 27 : Pupa.**

#### 4.1.3.5 Émergence

Un piège à phéromone a été installé près des terrines afin de surveiller les émergences des cécidomyies orange.



**Figure 28 : Piège à phéromone.**

#### 4.1.3.6 Modèle prévisionnel

Durant la période des prélèvements, les données météo Pameseb, issues de la station de Gembloux, ont été analysées avec le modèle de prévision des émergences développé par Jacquemin (2014).

### 4.2 Résistance du blé dur

#### 4.2.1 Description du site expérimentale

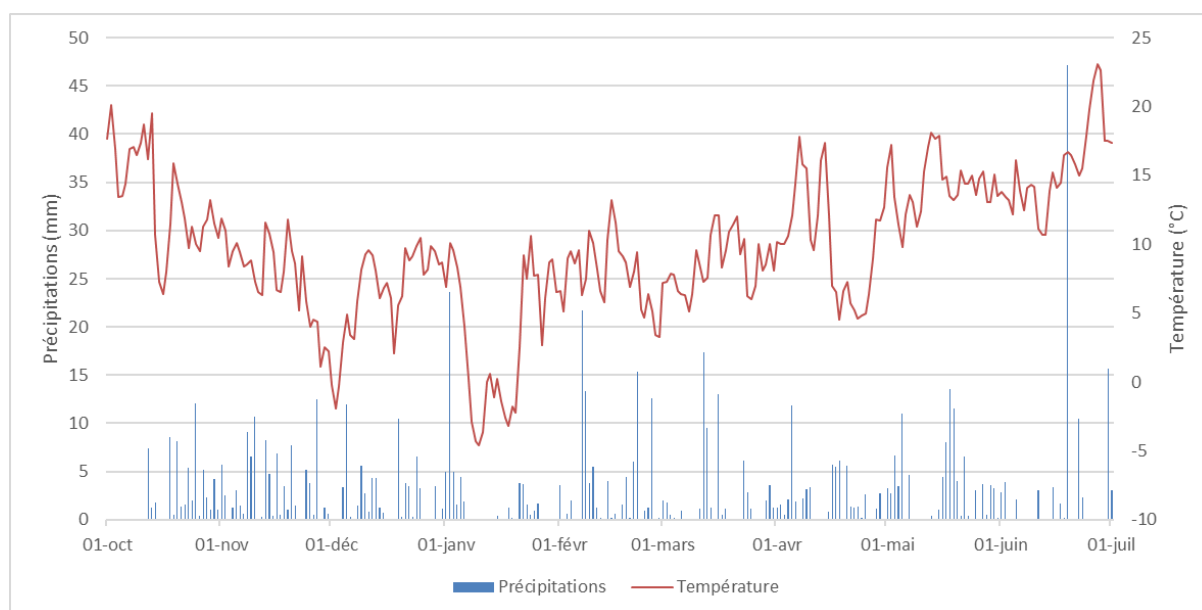
Les parcelles d'essai sont situées à Gembloux du côté de Ernage (50°35'01.8"N, 4°41'20.4"E) et ont été implantées sur une parcelle du CRA-W. Située dans la région limoneuse de Hesbaye, la parcelle est caractérisée par un sol limoneux à drainage naturel favorable (SPW, 26-06-2024).



**Figure 29 :** Vue aérienne de l'emplacement de l'expérimentation et caractérisation du sol.  
Source : (« Google Maps », 26-06-2024 ; SPW, « WalOnMap », 26-06-2024).

#### 4.2.2 Conditions climatiques

Le bilan climatique de la saison culturale est marqué par des températures basses, ne passant que rarement les 20°C, et des précipitations régulières. La seconde moitié de l'automne 2023, du 15 octobre au 30 novembre, a enregistré les nouveaux records de précipitations et de déficit d'ensoleillement. Cette période a également observé des températures supérieures aux normales de saison. Dans la continuité de l'automne, l'hiver 2023-2024 a été le troisième hiver le plus humide et le deuxième hiver le plus sombre et le plus chaud jamais enregistré. Trois jours de gel ont été observés début décembre et quatorze dans le courant du mois de janvier. Le printemps est également renseigné comme humide, chaud et sombre (IRM, 2024).



**Figure 30 :** Pluviométries et températures de la saison culturale.

#### 4.2.3 Implantation initiale de l'essai et adaptation du protocole aux dégâts post semis

Initialement, l'expérimentation devait comprendre deux serres qui viendraient ultérieurement couvrir les semis d'automne, contenant chacune deux répétitions de variétés. Les conditions climatiques très humides repoussant les semis, une petite fenêtre de temps sec a donc permis l'implantation d'un premier semis fin novembre. Les températures basses, descendant sous le zéro, et les précipitations abondantes qui ont suivi le semis, ont empêché la levée du blé dur. Les deux répétitions restantes ont par conséquent été semées en pot avant d'être transplantées au champ à la sortie de l'hiver.



**Figure 31** : Conditions d'implantation difficiles avec des sols très humides, phénomène de battance et semis non levés.

#### 4.2.4 L'expérimentation

##### 4.2.4.1 Facteur variété

Nonante-et-une variétés ont été étudiées pour cette expérimentation (**Annexe 1 : Liste des variétés** Annexe 1). Ces variétés proviennent de différents horizons, France, Allemagne, Italie, Autriche, Hongrie, Pologne, Croatie, Bulgarie, Grèce. Toutes les variétés se trouvent en Annexe X. Quatre d'entre elles n'ont pas poussé dans les deux serres et ont dû être retirées de l'expérience. Ces quatre variétés sont :

- Fulgur SZS
- Maesta
- Farah
- Turanico

Certaines lignées provenant de l'université d'Hohenheim (Stuttgart en Allemagne) et supposées résistantes ont également été testées comme témoin. Celles-ci ne sont pas encore inscrites dans un catalogue national et sont donc nommées par les codes suivants :

- BDHO 4523
- BDHO 4524
- BDHO 4525

Ces lignées résultent de croisements entre un blé tendre, possédant le gène de résistance Sm1, et du blé dur.

##### 4.2.4.2 Facteur serre

En décembre 2023, les variétés présentées au point précédent, ont été semées en pot. Les deux répétitions de variétés ont ensuite été implantées au champ.



**Figure 32** : Semis en pot dans les serres du CRA-W, repiquage des variétés et céréales au stade montaison.

Ces deux répétitions de variétés constituent chacune un dispositif aléatoire complet.

Première répétition :

3 m								1,2 m
84	5	15	27	62	52	31	79	
81	2	71	69	90	14	45	70	
74	64	29	35	3	28	87	42	
66	34	20	17	13	72	41	4	
4,5 m								
73	61	80	58	22	25	7	75	
56	51	77	46	63	83	18	88	
57	85	76	43	38	10	55	86	
96	94	65	32	49	68	22		
39	82	6	1	54	19	93		
8	21	47	91	26	12	59		
24	16	89	95	53	48	30		
92	78	67	60	23	11	36		

**Figure 33** : Schématisation de la disposition des variétés dans la première serre.

Deuxième répétition :

3 m								1,2 m
18	78	83	59	10	30	35	38	
28	16	7	6	41	93	46	27	
86	3	92	67	66	33	15	5	
25	94	26	31	72	91	74	17	
4,5 m								
11	82	62	14	4	84	53	64	
79	13	76	88	85	80	22	19	
34	81	58	71	55	43	60	1	
54	2	57	89	68	47	32		
70	39	69	29	45	48	90		
49	52	42	8	3	21	73		
24	75	95	12	87	96	65		
51	77	20	61	23	63	56		

**Figure 34** : Schématisation de la disposition des variétés dans la première serre.

Deux serres voilées ont été installées sur les parcelles, chaque serre contenant une répétition. Le voile empêche la dispersion des cécidomyies, améliore les conditions de vol et de ponte par réduction du vent et augmente la température (Chavalle et al., 2015d). Une bâche a également été superposée aux voiles, dès les premiers lâchers, pour rendre la serre imperméable aux pluies. Le but est d'éviter l'effet destructeur de la pluie sur les cécidomyies adultes, mais surtout

d'empêcher les larves de se laisser tomber au sol à la première pluie, une fois leur maturité atteinte (Chavalle et al., 2015d).



*Figure 35 : Installation des serres et des voiles au-dessus des parcelles d'essai.*

Lors de l'émergence des cécidomyies et de l'épiaison des variétés, les cécidomyies comptées et collectées dans des pots ont été transportées au champ et lâchées dans les serres. Les lâchers sont effectués tous les jours en pleine épiaison de la serre et un jour sur deux en début et en fin de cette période. Le nombre de cécidomyies lâchées par serre s'est fait en fonction du nombre de variété au stade 51 et en tenant compte de nombre de cécidomyies disponibles, tout en s'efforçant de garder un nombre similaire pour les deux serres.



*Figure 36 : Lâchers de cécidomyies dans les serres.*

#### 4.2.5 Observations et variables mesurées

##### 4.2.5.1 Stade de la culture

###### A. Estimation de la date d'épiaison

L'observation des stades phénologiques du blé dur a été réalisée à deux reprises, le 9 et le 23 avril selon l'échelle BBCH améliorée (**Annexe 2**) après dissection de maître-brins sur des plantes prélevées sur des variétés les plus avancées et les plus fournies en biomasse.

L'objectif de cette mesure est l'estimation de la première date d'épiaison afin de faire coïncider l'épiaison et l'émergence des cécidomyies.

###### B. Relevé du stade BBCH 51

Le stade 51, correspondant au stade de l'épiaison, a été relevé quotidiennement pour chaque variété. La date des premiers blés dur épiés marque le début des lâchers de cécidomyies.

##### 4.2.5.2 Nombre d'épis par serre

Le nombre total d'épis a été compté pour certaines variétés puis extrapolé à l'entièreté de la serre.



#### 4.2.5.3 Cécidomyies

##### A. La production / élevage de cécidomyies

Pour la production de cécidomyies, sept terrines d'élevage de cécidomyies ont été mises à disposition par le CRA-W. Chacune des sept terrines contient environ 3 dm<sup>3</sup> de terre limoneuse sur laquelle a été déposé 5 ml de cécidomyies, 1ml contenant 1500 – 1600 larves de cécidomyies.

Selon la méthode d'élevage de Chavalle, Jacquemin, et De Proft (2015d), basée sur le modèle de prévision d'émergence développée par Jacquemin et al. (2014), les terrines ont subi différents traitements. L'objectif de cette méthode est d'échelonner les émergences d'adultes afin de couvrir l'entièreté de la période d'épiaison des différentes variétés. Dans un premier temps, les paniers de terre ont été placés à l'extérieur dans une tranchée jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier, puis ont été disposés en chambre froide (5°C) dans le but de ralentir la première phase d'accumulation de 250 DJ en base 3°.

Lors de la sortie de la chambre froide, les terrines ont été immergées dans un bac d'eau pendant 5 minutes et disposées dans la pièce d'élevage à cécidomyies (PC), à une température de 17°C en moyenne. Suite à la réévaluation des stades phénologiques du blé dur, certaines terrines sont retournées en chambre froide (CF) afin de ralentir le développement des cécidomyies et retarder leur émergence. En effet, les conditions climatiques entre les deux relevés de stade ont été caractérisées par des températures plus froides et un faible niveau d'ensoleillement. Accélérer le développement des plantes n'est pas possible, le seul moyen de faire coïncider l'épiaison et les émergences est de ralentir le développement des insectes. Certains paniers sont également passés en chambre climatique (CC) dans le but de les disposer dans un environnement à température constante (18°C). Les différences entre les dates d'émergence prévues et celles réellement constatées sont dues aux perturbations provoquées par les changements de températures. Ces changements n'ont généralement pas lieu dans la nature et le modèle de prévision ne parvient donc pas à prendre leur influence en compte.

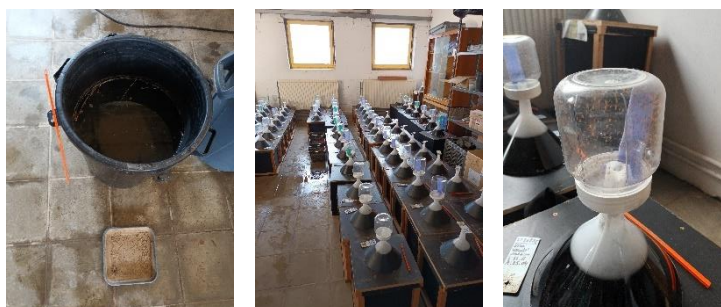
**Tableau 2 :** Planning des opérations de manipulation des terrines.

Terrine	Date d'entrée	Date d'arrosage	Date d'émergence prévue	Date d'émergence observée
A	09/04 CC (12°C)	12/04	14/05	14/05
	12/04 PC (17°C)			
	23/04 CF (5°C)			
	30/04 PC (17°C)			
B	12/04 PC (17°C)	15/04	16/05	14/05
	23/04 CF (5°C)			
	30/04 PC (17°C)			
C	16/04 PC (17°C)	18/04	18/05	17/05
	23/04 CF (5°C)			
	30/04 CC (18°C)			
	14/05 PC (17°C)			
D	18/04 PC (17°C)	22/04	21/05	17/05
	23/04 CF (5°C)			
	30/04 CC (18°C)			
	14/05 PC (17°C)			

E	22/04 PC (17°C)	25/04	17/05	14/05
F	25/04 PC (17°C)	29/04	20/05	16/05
G	29/04 PC (17°C)	02/05	23/05	17/05

**Légende :** Chambre climatique (CC), Pièce d'élevage à cécidomyie (PC), Chambre froide (CF).

Quelques jours avant l'émergence des cécidomyies, une caisse voilée est placée sur la terrine. La partie supérieure de la caisse est constituée d'un entonnoir sur lequel est positionné un pot en plastique. Les cécidomyies attirées par la lumière se dirigeront vers l'entonnoir et seront collectées dans le pot pourvu d'une bande de tissu humide permettant aux cécidomyies de s'abreuver. Les pots sont renouvelés chaque jour et les cécidomyies sont comptées puis lâchées dans les essais.



**Figure 37 :** Bac d'immersion des terrines pour simuler la pluie, caisse voilée disposée sur les terrines, pot de collecte à cécidomyies.

## B. Nombre de larves

Environ un mois après les derniers lâchers, trente épis par variétés ont été récoltés. L'extraction des larves des épis s'est basée sur la méthode d'extraction dite active, développée par Chavalle, Jacquemin, et De Proft (2015). La méthode consiste à disposer les épis dans un entonnoir emmanché sur un tube en verre et à simuler une pluie pendant plusieurs heures pour provoquer la sortie des larves. Dans ce cas, trois épis par entonnoir ont été répartis dans dix tubes et ont été laissés une nuit sous aspersion. Le lendemain, les larves ont été dénombrées dans chaque tubes.



**Figure 38 :** Récolte des épis, dispositif d'extraction, simulation de la pluie par aspersion, comptage des larves.

## 4.3 Analyse des données

Pour les deux expérimentations, à savoir l'étude de l'évolution des différents stades de développement de la cécidomyie orange dans le sol et la recherche de résistances variétales, les

données ont été traitées à l'aide du logiciel statistique RStudio (Version 4.3.3) et du logiciel de tableur Excel. Les fonctions ggplot (package ggplot2) ont permis de réaliser des boxplots.

#### 4.3.1 Dynamique de développement et d'émergence de la cécidomyie orange

Les analyses ont été réalisées sur RStudio avec un modèle linéaire généralisé mixte (GLMM) qui reprend à la fois l'analyse de la variance (ANOVA) et la régression linéaire, en tenant compte des facteurs fixes et aléatoires. Pour ce faire, le package lme4 et la fonction glmer () ont été employés.

Les analyses contiennent les données suivantes :

**Tableau 3 :** Données, facteurs et variables utilisés dans les modèles statistiques.

Éléments	Abréviations	Considérations
Terrines (A, B, C, D)	Terrine	Facteur aléatoire
Degré-jour	Dj	Facteur fixe, numérique
Cocon sphérique	Coconh	Numérique
Larve	Larve	Numérique
Cocon allongé larve	Coconrl	Numérique
Cocon allongé pupa	Coconrp	Numérique
Pupa	Pupa	Numérique

Les différentes équations testées sont les suivantes :

**Tableau 4 :** Équations statistiques utilisées sur RStudio

<b>Poisson</b>	<b>Justification :</b> Données issues de comptages
<pre>glmer_coconh &lt;- glmer(coconh ~ dj + (1 terrines), family = poisson, data = data)</pre>	
<b>Binomial négative</b>	<b>Justification :</b> Sur-dispersion avec la distribution de Poisson
<pre>glmer_coconh &lt;- glmer.nb(coconh ~ dj + (1 terrines), data = data)</pre>	
<b>Quasi-poisson</b>	<b>Justification :</b> Sur-dispersion avec la distribution de Poisson
<pre>glmer_coconh &lt;- glmer(coconh ~ dj + (1 terrines), family = quasipoisson(link = 'log'), data = data)</pre>	

**Légende :** Exemple avec le cas des cocons sphériques.

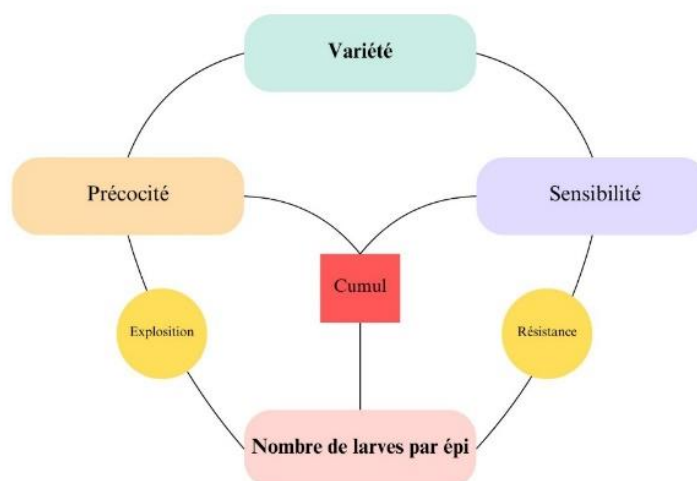
L'analyse de données issues des comptages des stades de développement de la cécidomyie orange des terrines s'est révélée très compliquée. Aucun modèle statistique assez robuste n'a pu être utilisé. La distribution des différents stades n'a pas pu être modélisée et est propre à chaque terrine. Il n'y aura donc aucune conclusion possible à tirer avec le logiciel RStudio. L'ensemble des autres analyses s'est déroulé sur le logiciel Excel.

#### 4.3.2 Résistance variétale du blé dur

Les analyses réalisées dans le cadre de l'étude de la résistance variétale du blé dur se sont concentrées sur le nombre de larves observées par épis pour chaque variété. D'une part, les variétés sont caractérisées par leur sensibilité à la cécidomyie qui se traduit par une forme de tolérance et donc par un nombre de larves observées. D'autre part, les différences de précocité engendrent plusieurs niveaux d'exposition aux cécidomyies, ce qui pourrait avoir un impact sur



le nombre de larves observées sur les variétés. Le cumul correspond au nombre total de cécidomyies lâchées pour chaque variété, de son premier jour d'épiaison à la fin des lâchers. Celui-ci permet ainsi de tester à la fois la précocité des variétés et leur sensibilité. En effet, plus une variété est précoce, plus le cumul de cécidomyies reçues est important et plus ou moins la sensibilité variétale sera marquée, permettant ainsi de distinguer les variétés les plus résistantes et les plus sensibles.



**Figure 39 :** Schéma des caractéristiques variétales étudiées.

Les analyses effectuées contiennent les données suivantes :

**Tableau 5 :** Données, facteurs et variables analysés par les modèles statistiques.

Éléments	Considérations
Serre	Facteur aléatoire
Variétés	Facteur fixe
Précocité	Facteur fixe
Cumul	Covariable, numérique
Épis	Numérique
Larve	Numérique

Les différentes équations testées sont les suivantes :

**Tableau 6 :** Équations statistiques des différents modèles utilisés sur RStudio

Sensibilité variétale
<code>glmer_variete&lt;-glmer.nb(larve ~ variete + (1 serre) + offset(log(epis)), data=Mydata)</code>
Précocité
<code>Mydata\$larve_epis &lt;- Mydata\$larve / Mydata\$epis</code> <code>lme_precocite &lt;- lme(fixed = larve_epis ~ precocite, random = ~ 1   serre, data = Mydata)</code>

#### 4.3.2.1 Sensibilité variétale

La variété allemande BDHO 4524, considérée comme résistante, a été prise comme variété de référence.

Les analyses ont été réalisées grâce au modèle linéaire généralisé mixte (GLMM) qui reprend à la fois l'analyse de la variance (ANOVA) et la régression linéaire, en tenant compte des facteurs fixes et aléatoires. Pour ce faire, le package lme 4 et la fonction glmer () ont été utilisés.

Les données issues de comptages ont été suivies la distribution de Poisson. Le test DHARMA a permis de vérifier les conditions d'application sur les résidus et de la surdispersion a été observée. Pour y remédier, un modèle binomial négatif a été utilisé (Bouche et al., 2009).

Une ANOVA a été réalisée sur le modèle GLMM. Le niveau de signification a été fixé à  $p\text{-valeur} < 0,05$ .

Un test post-hoc a été employé avec la fonction emmeans et les packages emmeans, multcomp et multcompview.

#### 4.3.2.2 Précocité et cumul des lâchers

Pour les analyses sur la précocité, un problème de surdispersion est rencontré avec la distribution de Poisson et un problème de singularité avec le modèle binomial négatif. Un modèle linéaire à effets mixtes a donc été utilisé avec la fonction lme et le package nlme.

Une ANOVA a également été réalisée ainsi qu'un QQplot, pour tester les conditions d'applications, et test post-hoc (emmeans).

#### 4.3.2.3 Cotation de la résistance variétale

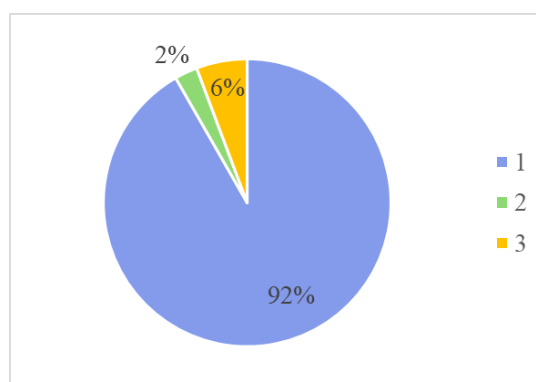
Un modèle développé par Guillaume Jacquemin a permis d'obtenir une cotation de résistance pour chaque variété. Cette cotation de 1 à 9, classe les variétés selon leur degré de sensibilité, comme cela est couramment fait lors de présentation de variétés pour le Livre Blanc ; 1 étant la note pour les variétés les plus sensibles et 9 pour les variétés résistantes. Ce modèle est basé sur l'exposition des variétés à la cécidomyie qui est définie comme le nombre d'œuf théoriquement pondus par épi. Pour quantifier cette exposition, plusieurs facteurs ont été combinés, comme la dynamique de ponte observée par Pivnick et Labbé (1993), le nombre total d'épis présents dans la serre et la durée du stade sensible (Ding et Lamb, 1999). Un degré d'incertitude a également été calculé afin de discuter de la pertinence de la cotation. L'ensemble de résultats obtenus par les analyses statistiques sur RStudio ont ensuite été comparés à ceux obtenus par ce modèle.

## 5 Résultats et discussion

### 5.1 Dynamique de développement et d'émergence de la cécidomyie orange

#### 5.1.1 Strate

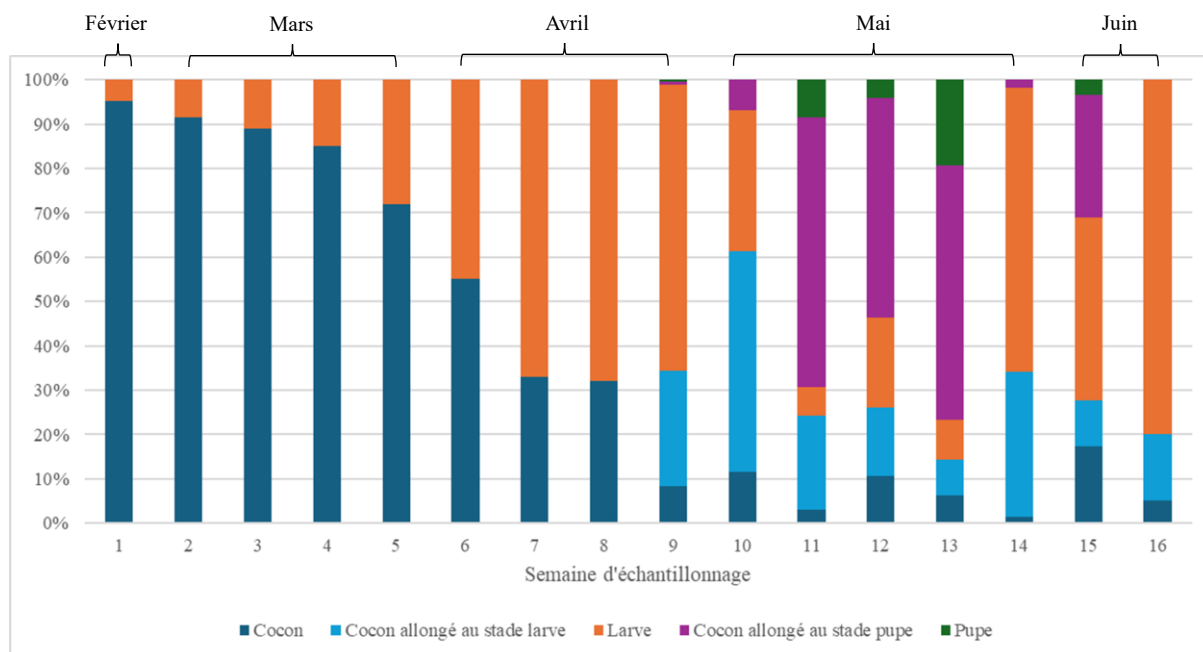
Les données de comptage ont montré que plus de 90% des cécidomyies, tous stades confondus, sont situées dans les quatre premiers centimètres de terre, comme observé par Golightly (1952). Il convient de rappeler que les cécidomyies ont été élevées en milieu contrôlé et qu'elles ont été déposées en surface lors de la saison 2023. La présence de cécidomyies dans la troisième strate, à savoir plus de 8 cm de profondeur, reflète leur capacité naturelle à s'enfuir en profondeur ce calquant ainsi aux observations d'Affolter (1990).



**Figure 40 :** Pourcentage de cécidomyies présentes dans les trois strates.  
1 : 0-4 cm ; 2 : 4-8 cm ; 3 : 8-12 cm

#### 5.1.2 Observation des stades et dynamique de population

La **Figure 41** présente l'évolution en proportion des différents stades de développement de la cécidomyie orange, observés au cours des seize semaines de prélèvements.



**Figure 41 :** Évolution des proportions des différents stades de développement de la cécidomyie orange au cours des seize semaines de comptage.

De février à début avril, la quantité de cocons ne cesse de diminuer au profit du nombre de larves. À partir de la 4<sup>ème</sup> semaine, la proportion de cocons diminue plus fortement. Selon le modèle de Jacquemin et al. (2014), cette situation correspond à la fin de la première accumulation de températures en base 3°C, après laquelle les pluies froides poussent les larves à s'extraire de leur cocon et à se diriger vers la surface. La sortie des cocons s'est étalée sur neuf semaines environ.

Vers la mi-avril, la proportion de cocons et de larves reste constante. Lors du comptage de la 9<sup>ème</sup> semaine d'échantillonnage, cette proportion de larves libres et de cocons ne suit pas la tendance attendue puisque la quantité de cocons a augmenté par rapport à la semaine précédente. Ceci est la conséquence de l'apparition d'une seconde forme de cocon, plus allongée et déjà présent en nombre faible les deux semaines précédentes. À cette période de l'année, il aurait été logique de commencer à observer des pupes, et la quantité de cocon aurait dû soit continuer à diminuer soit se stabiliser. Une distinction a par conséquent été réalisée entre les cocons.

Certaines études mentionnent un stade intermédiaire caractérisé par un cocon de forme allongée. Affolter (1990) explique qu'il s'agirait d'un cocon de protection lorsque les conditions du sol seraient trop sèches. Le cocon permettrait donc de maintenir une humidité suffisante durant la pupaison. La présence de cocons allongés a également été renseignée chez d'autres espèces de cécidomyies, comme chez la cécidomyie équestre et la cécidomyie du chou-fleur (Readshaw, 1966 ; Censier et al., 2014). Dans ces deux derniers cas, le cocon a également été tissé par la larve avant la pupaison, en raison de la sécheresse du sol.

Cependant, les prélèvements réalisés pour ce présent travail se sont régulièrement déroulés sous la pluie. En effet, le mois d'avril 2024 comptabilise 22 jours de pluie et est le 7<sup>ème</sup> mois consécutif avec des précipitations supérieures à la moyenne de saison. La sécheresse du sol n'est donc pas un argument valable pour expliquer le déroulement de la pupaison dans un cocon allongé. Une explication acceptable serait la fabrication d'un cocon par la larve de cécidomyie dans le but de se protéger des conditions très humides du sol et des températures basses enregistrées durant la deuxième moitié du mois d'avril.



*Figure 42 : Cocons allongés.*

L'observation des larves lors des comptages n'a apporté aucun élément supplémentaire, hormis le fait qu'elles soient très mobiles. Une différence de taille a également été constatée, comme chez Smith et Lamb (2004). Aucune différence morphologique n'a pu être établie entre une

larve n'ayant pas été induite par la pluie et une larve avant sa pupaison. Les transformations subies avant la pupaison doivent être de l'ordre physiologique (hormonal).



*Figure 43 : Différence de taille entre pupes.*

La pupaison se déroule en plusieurs étapes. Les premières distinctions observables chez les pupes sont les antennes. Les ailes et les pattes, situées sur la face ventrale de la cécidomyie, sont translucides et difficilement discernables dans un premier temps (**Figure 43**). Ensuite, les antennes et les yeux se foncent de plus en plus jusqu'à devenir bruns (**Figure 44**). Peu de temps avant l'émergence, les pattes et les ailes se colorent également (**Figure 45**). Juste avant d'émerger, la pupa ressemble à l'adulte (**Figure 46**).



*Figure 44 : Pupes avec différentes nuances de couleurs au niveau des yeux.*



*Figure 45 : Pupa dont les pattes et les ailes se noircissent.*



*Figure 46 : Pupa avant l'émergence.*

Les pupes sont très fragiles. Lors de leur observation en laboratoire et de leur extraction forcée des cocons, de nombreuses pupes éclataient au cours de la manipulation. Ce caractère fragile pourrait également expliquer les faibles émergences observées dans les champs lors des printemps durant lesquels les semis ont été tardifs (Avertissements Cepicop 1107, 09/05/2023 ; Jacquemin, 2014). En effet, le travail mécanique du sol pendant la préparation des semis de betteraves et de maïs a pu endommager les pupes ou réduire leur taux de survie en les enfouissant.



**Figure 47 :** *Pupe endommagée lors de son extraction du cocon.*

Les premières pupes ont été observées la 9<sup>ème</sup> semaine, soit 22 jours après la première pluie inductrice, ce qui correspond à une accumulation de 80 DJ en base 7. La première pluie inductrice s'est produite le 3 avril, soit 13 jours après l'accumulation de 250 DJ en base 3 depuis le 1<sup>er</sup> janvier. Ces premières pupes ont donc accumulé 80 DJ supplémentaires avant d'émerger.

**Tableau 7 :** *Résumé des caractéristiques des premières pupes observées.*

Observation de pupes		Pluie inductrice		
<i>Date</i>	<i>Somme des DJ en base 7</i>	<i>Date</i>	<i>Somme des DJ en base 3</i>	<i>Temp d'attente</i>
25 avril	80	3 avril (2mm)	328	13 jours

L'observation des ecdysies nymphales à la surface du sol après les émergences permet de conclure l'extraction de la pupa, dans un premier temps, de son cocon allongé et dans un second temps de son ecdysie. La sortie du cocon n'est pas totale, comme observée sur la **Figure 48**, l'extrémité de la pupa reste dans le cocon et l'adulte s'extirpe par la partie supérieure de l'ecdysie.



**Figure 48 :** *Cocons allongés et ecdysies nymphales sur la surface du sol.*

La durée du stade cocon allongé est imprécise. En effet, l'observation de cocons allongés a débuté lors des 7<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> semaines de comptage. Seulement, ceux-ci n'ont pas été répertoriés séparément de cocon rond, du fait de leur faible proportion. La question de la distinction des deux types de cocons s'est posée lors de la 9<sup>ème</sup> semaine, lorsque la dissection des cocons allongés a permis d'identifier des pupes. L'estimation de la durée de ce stade supplémentaire

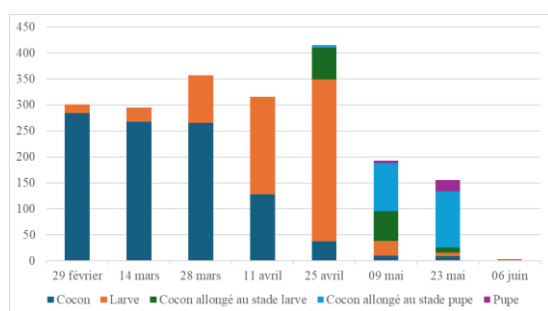
est donc de quatre semaines et couvre toute la période de pupaison, de la fabrication du second cocon par la larve jusqu'à l'émergence de l'adulte.

### 5.1.3 Terrines

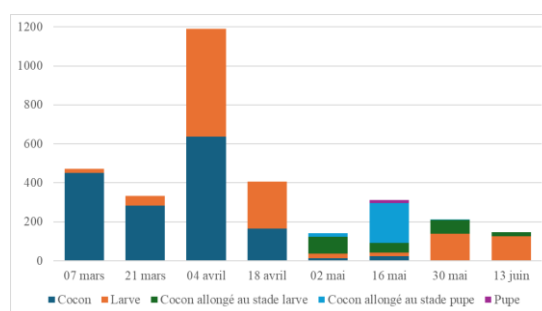
Les terrines sont les quatre blocs expérimentaux et doivent être considérées séparément. Aucun modèle statistique n'a pu les comparer de manière robuste. Une possible explication serait que la quantité initiale de larves inoculées est différente pour chaque terrine et que la répartition de ces larves au sein d'une même terrine n'était pas homogène.

En effet, comme observée sur les **Figure 49**, **Figure 50**, **Figure 51** et **Figure 52**, la taille des populations est différente pour les quatre terrines. Par exemple, la terrine A n'a jamais dépassé les 450 individus alors que la terrine C dépasse les 1600 individus.

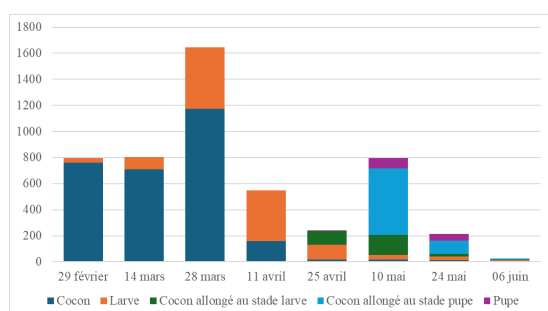
D'autre part, la population totale observée chaque semaine est très variable. Si la répartition des larves de cécidomyie était homogène dans la terrine, le nombre total d'individus observés les cinq premières semaines avant l'émergence devrait être constant. L'hétérogénéité se marque explicitement dans les terrines B (**Figure 50**) et C (**Figure 51**). Les deux premières semaines d'échantillonnage montrent des résultats comparables, tandis que le nombre de cécidomyies recensées double au cours de la troisième semaine.



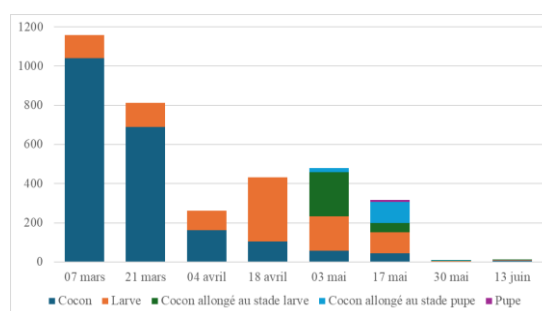
**Figure 49 :** Suivi de la population de la terrine A.



**Figure 50 :** Suivi de la population de la terrine B.



**Figure 51 :** Suivi de la population de la terrine C.



**Figure 52 :** Suivi de la population de la terrine D.

**Légende :** Une version agrandie se trouve en Annexes 3, 4, 5 et 6.

Le comportement observé pour la terrine A (**Figure 49**) correspond à celui qui serait attendu. Le nombre d'individus reste relativement stable durant les cinq premières semaines, puis diminue au fil des dernières semaines, une tendance qui est expliquée par les émergences qui ont débuté le 9 mai.

Les proportions d'insectes émergés, calculées sur base de la moyenne du nombre d'individus des cinq premières semaines et des dernières semaines, ont été importantes pour les terrines A, C et D. La terrine B constate le moins d'insectes ayant atteint le stade adulte. Le taux



d'émergence classiquement observé dans la littérature se situe entre 10 et 95% (Basedow et Schütte, 1982 ; Wise et Lamb, 2004). Les meilleurs résultats obtenus pour trois des quatre terrines se justifient par le fait que les terrines proviennent d'un élevage, où les cécidomyies étaient situées à de faibles profondeurs, les rendant plus sensibles aux variations de températures. En revanche, dans les champs, le travail du sol enfuit les cécidomyies à des profondeurs plus importantes, les isolants ainsi davantage des conditions climatiques.

**Tableau 8 :** Émergences observées pour chaque terrine.

Terrine A	Terrine B	Terrine C	Terrine D
99 %	64 %	97%	98%

Les résultats d'émergence plus faibles de la terrine B contrastent avec ceux des autres terrines. Ces résultats ne peuvent être expliqués par le phénomène de super-diapause. Effectivement, les quatre terrines, ayant subi les mêmes traitements et les mêmes conditions, devraient observer le même taux d'émergence. Un autre paramètre à prendre en compte est le taux de mortalité des différents stades. Au cours des deux et trois dernières semaines de comptage pour, respectivement, les terrines A/C et B/D, un nombre important de cécidomyies mortes ont été observées, particulièrement dans la terrine B. Comme constaté sur les **Figure 53**, **Figure 54** et **Figure 55**, une excroissance est apparue sur les larves, qu'elles soient libres ou dans un cocon allongé. L'état inerte est aussi marqué par la décoloration et la rigidité des larves. Ces larves mortes ont été recensées et représentent 60 à 99% des individus comptabilisés les dernières semaines. Des pertes ont également été observées chez les cocons ronds et les pupes avec les mêmes symptômes de décoloration ou de rigidité.

Les raisons possibles de cette mortalité pourraient être dues à l'infestation d'un champignon pathogène et/ou aux conditions humides exceptionnellement humides de l'hiver 2023 et du printemps 2024.



**Figure 53 :** Larves mortes présentant une excroissance.



**Figure 54 :** Comparaison de larves mortes et d'une larve saine.

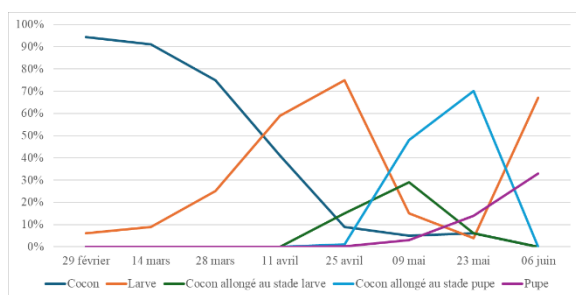


**Figure 55 :** Comparaison de larves et de cocons morts avec des cécidomyies saines.

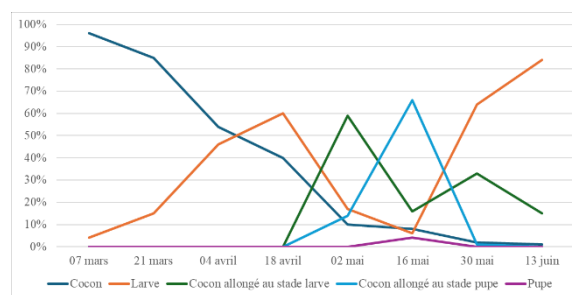
La dynamique des différents stades de développement de la cécidomyie pour chaque terrine est illustrée dans les **Figure 56**, **Figure 57**, **Figure 58** et **Figure 59**. Chaque terrine possède sa propre dynamique, mais toutes partagent la même tendance. Tout d'abord, la proportion de cocon évolue selon une sigmoïde décroissante tandis qu'au même moment la quantité de larves observées augmente. Cette période correspond à la sortie des larves de leur cocon hivernal. Par la suite, un pic de larve libre est atteint. Lors de la diminution des observations de larve,



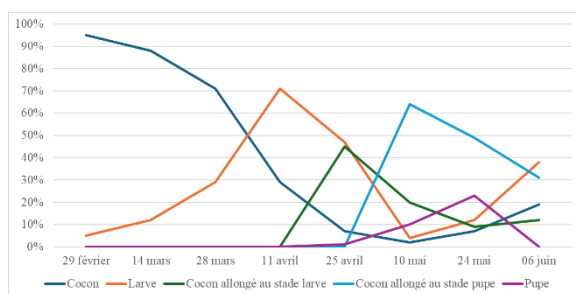
l'apparition de cocon allongé est constatée. Comme développé précédemment, la larve aurait fabriqué un second cocon, dans le but de se protéger des conditions environnementales durant la pupaison. C'est pour cette raison qu'apparaissent rapidement des pupes dans les cocons allongés. Un pic est également atteint, d'abord pour les cocons avec des larves, ensuite pour les cocons contenant des pupes. La stade pue libre est resté marginal. Celui-ci est remarqué en fin de saison et pourrait correspondre aux larves induites par les dernières pluies, celles tombées le 06 mai. Les conditions climatiques ont été plus favorables et moins pluvieuses les semaines suivantes (Voir 355.1.4, point suivant). Les deux dernières semaines sont marquées par la chute du nombre de cocons allongés au stade pue. C'est à ce moment qu'ont eu lieu les principales émergences. L'augmentation des larves et des cocons sphériques ou allongés au stade larve indique simplement les différents stades restant après les émergences. Les unités employées pour les graphiques (**Figure 56**, **Figure 57**, **Figure 58** et **Figure 59**) sont des proportions et ne reflètent pas la faible abondance d'individus, comme illustré en valeurs absolues par les **Figure 49**, **Figure 50**, **Figure 51** et **Figure 52**.



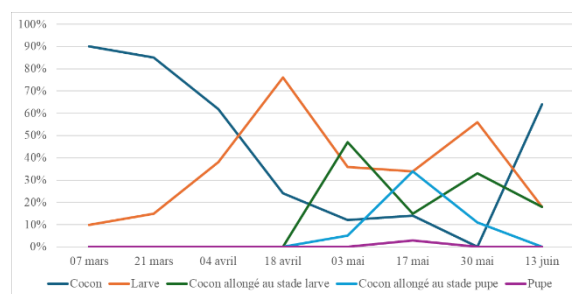
**Figure 56 :** Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine A.



**Figure 57 :** Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine B.



**Figure 58 :** Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine C.



**Figure 59 :** Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine D.

**Légende :** Une version agrandie se trouve en Annexes 7, 8, 9 et 10.

#### 5.1.4 Suivi des conditions climatiques et des émergences

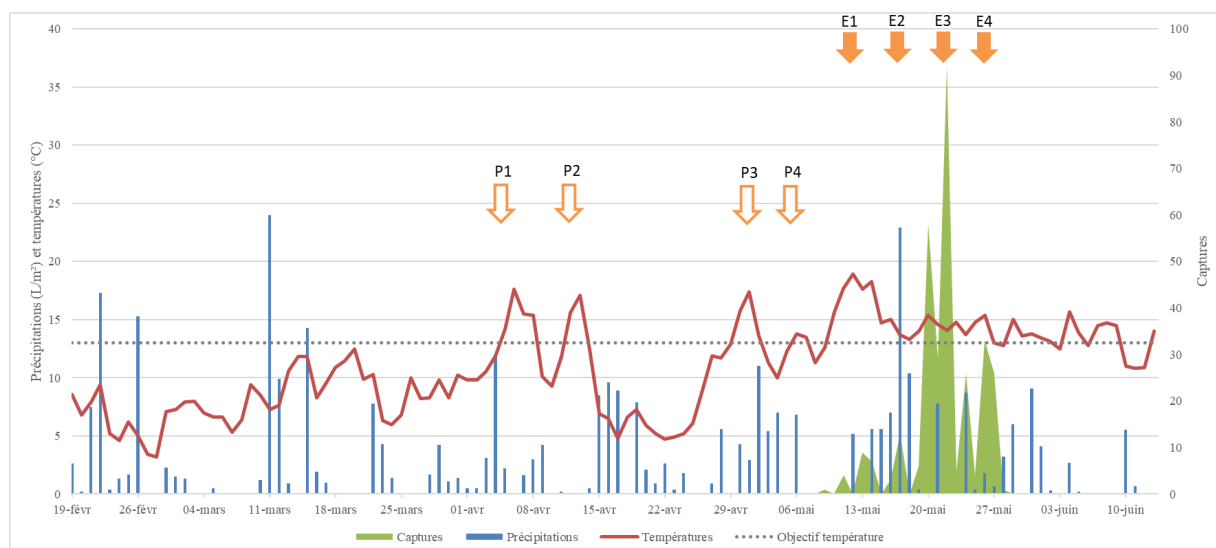
Le profil de capture des quatre terrines est présenté en **Figure 60**, et celui de la région de Gembloux en **Figure 61**. Les vols ont été observés du 09 mai au 27 mai et suivent globalement la même tendance. L'activité des vols peut être divisée en quatre moments d'émergence.

Le premier moment correspond aux vols observés entre le 09 et le 14 mai. Plusieurs pics ont eu lieu en faible intensité, le 9, le 11 et le 13. Ces trois dates ont été anticipées par le modèle conçu par Jacquemin et al. (2014). Les pluies indicatrices de ces trois pics sont survenues entre le 03 et le 08 avril. Cette période correspond au premier dépassement des 13°C.

Le deuxième moment est celui du 17 mai, également prévue par le modèle. La pluie indicatrice est tombée le 14 avril, en très faible quantité.

Le troisième évènement, situé entre le 19 mai et le 25 mai, a été induit par les pluies du 30 avril au 02 mai. Les trois jours de pluie à une température supérieure à 13°C ont initié les trois pics du 20, 22 et 24 mai.

Enfin, le quatrième épisode d'émergence a eu lieu du 26 au 27 mai et correspond à la pluie inductrice du 06 mai.



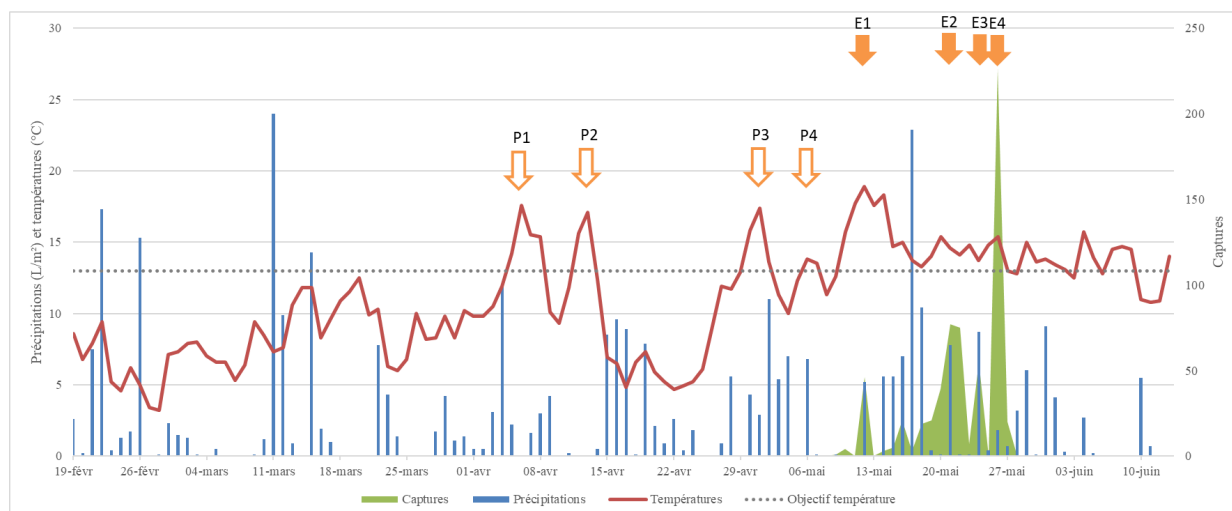
**Figure 60 :** Schéma de l'activité des mâles en fonction des conditions climatiques.

**Légende :** Une version agrandie se trouve en Annexe 11.

Les émergences survenues dans la région de Gembloux constatent, de manière globale, les mêmes pics, le 10, 12, 16, 21, 24 et 26 (**Figure 61**). Les différences observées proviennent des phénomènes météorologiques survenus localement. En effet, les quatre terrines ont été disposées au pied de la station météorologique de Gembloux. Les prévisions du modèle ont donc été très précises puisque chaque évènement climatique a été enregistré.

Un très bon exemple est le cas du 26 mai. Le pic prévu par le modèle a été observé sur le terrain, seulement son intensité est différente selon le lieu. La quantité de précipitations ayant eu lieu

ailleurs dans la région de Gembloux ont certainement été plus importante. Ce constat a été établi par Jacquemin et al. (2014).

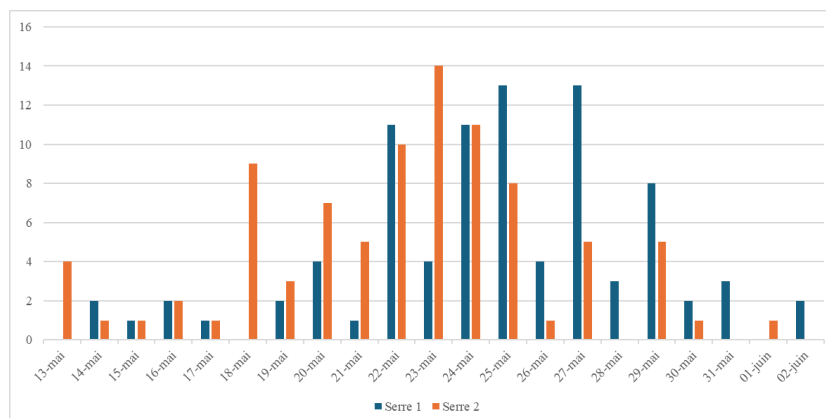


**Figure 61 :** Schéma de l'activité des mâles en fonction des conditions climatiques dans la région de Gembloux.  
**Légende :** Une version agrandie se trouve en Annexe 12.

## 5.2 Résistance variétale

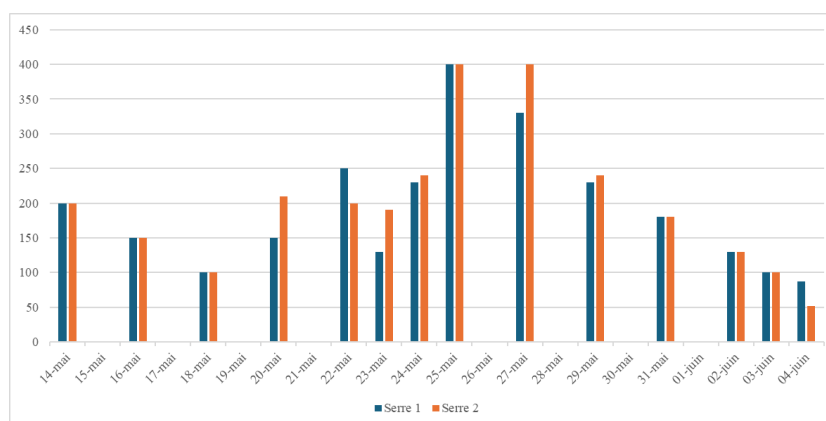
### 5.2.1 Suivi temporel

L'épiaison des blés durs a débuté le 13 mai et s'est étalée sur 21 jours. La phase sensible des blés à couvrir a donc été longue. Les variétés de la serre n° 2 ont atteint le stade 51 deux à trois jours en moyenne avant la serre n° 1. Ce retard dans la première serre est certainement dû à une reprise de croissance plus lente après le repiquage.



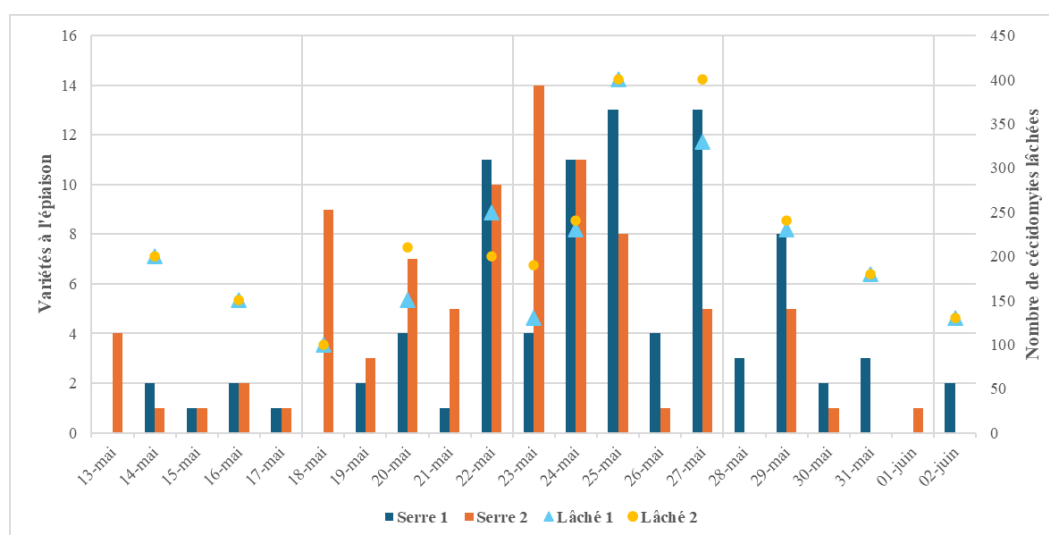
**Figure 62 :** Nombre de variété au stade sensible (Stade BBCH 51).

La distribution des lâchers de cécidomyies orange dans les serres suit celle des variétés au stade sensible. Les cécidomyies ont été lâchées tous les deux jours, avec des lâchers plus rapprochés au pic d'épiaison des variétés. Le nombre total de lâchers est quasiment équivalent dans les deux serres. Seulement, un nombre plus important de cécidomyies a été répandu dans la deuxième serre. Le retard de croissance observé dans la serre n°1 se marque également par un nombre réduit d'épis par rapport à la serre n°2. La quantité de cécidomyies a, par conséquent, été adaptée. Pour pouvoir comparer les différentes variétés entre elles, ce nombre d'épis aurait idéalement dû être identique pour chaque variété et pour chaque serre.



**Figure 63 :** Lâchers de cécidomyies orange.

La **Figure 64** montre que les lâchers ont été réalisés durant toute la période sensible des variétés étudiées. Le nombre de variétés au stade sensible associé aux lâchers de cécidomyies sont deux caractéristiques qui permettent de définir la pression subie par les variétés.



**Figure 64 :** Pression des lâchers de cécidomyies subie par les variétés au stade épiaison.

Cette pression dépend également du nombre d'épis dans la serre et de femelles prêtes à pondre par épi. En supposant un ratio d'une femelle pour un mâle à chaque lâcher et l'estimation du nombre total d'épis présent dans la serre, un femelle a été lâchée pour trois épis.

**Tableau 9 :** Estimation du nombre de cécidomyies femelles lâchées.

Serre 1		Serre 2	
<i>Total d'épis</i>	3439	<i>Total d'épis</i>	4115
<i>Total de cécidomyies</i>	2667	<i>Total de cécidomyies</i>	2792
<i>Nombre de femelles par épi</i>	0,4	<i>Nombre de femelles par épi</i>	0,3
<i>Nombre d'épis par femelle</i>	2,6	<i>Nombre d'épis par femelle</i>	2,9
Une femelle pour 3 épis			

### 5.2.2 Émergence en milieu contrôlé

Comme mentionné au point précédent, la période sensible, durant laquelle les lâchers de cécidomyies doivent être effectués, a été longue et s'est étalée sur 21 jours.

Les terrines d'élevage ont été conditionnées différemment afin de couvrir au maximum l'épiaison des blés (Voir 4.2.5.3 Cécidomyies).

La production d'insectes d'élevage des terrines consacrées à cette expérimentation n'a pas été suffisante. Les courbes d'émergences de la **Figure 65** montrent que la période couverte s'étend du 16 au 28 mai. Les lâchers de cécidomyies, en dehors de cet intervalle, ont pu être réalisés avec les insectes d'un autre élevage du CRA-W.

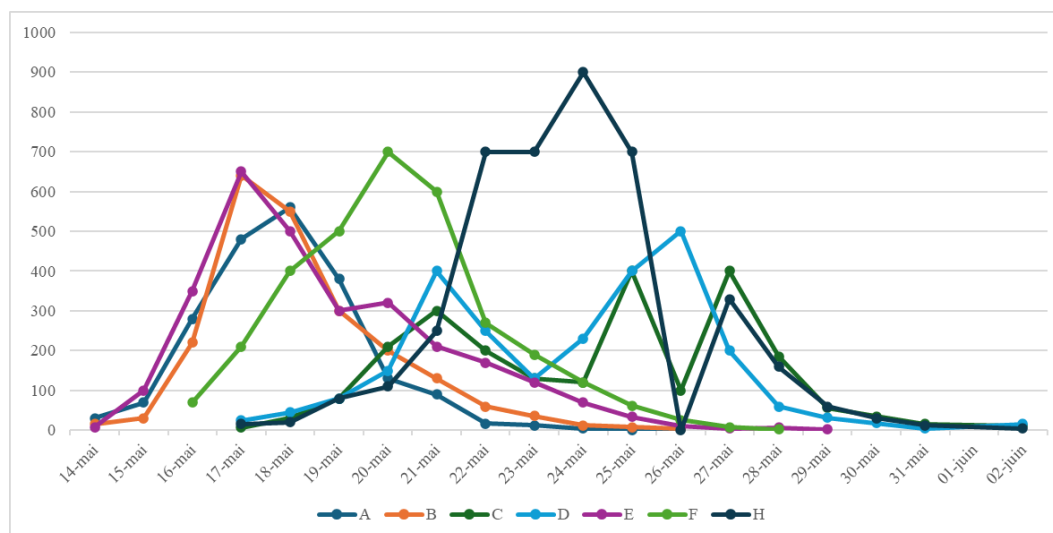


Figure 65 : Émergence des cécidomyies par terrine.

L'observation des courbes de dynamique d'émergences montre que les terrines, ayant subi les mêmes conditions, affichent la même tendance.

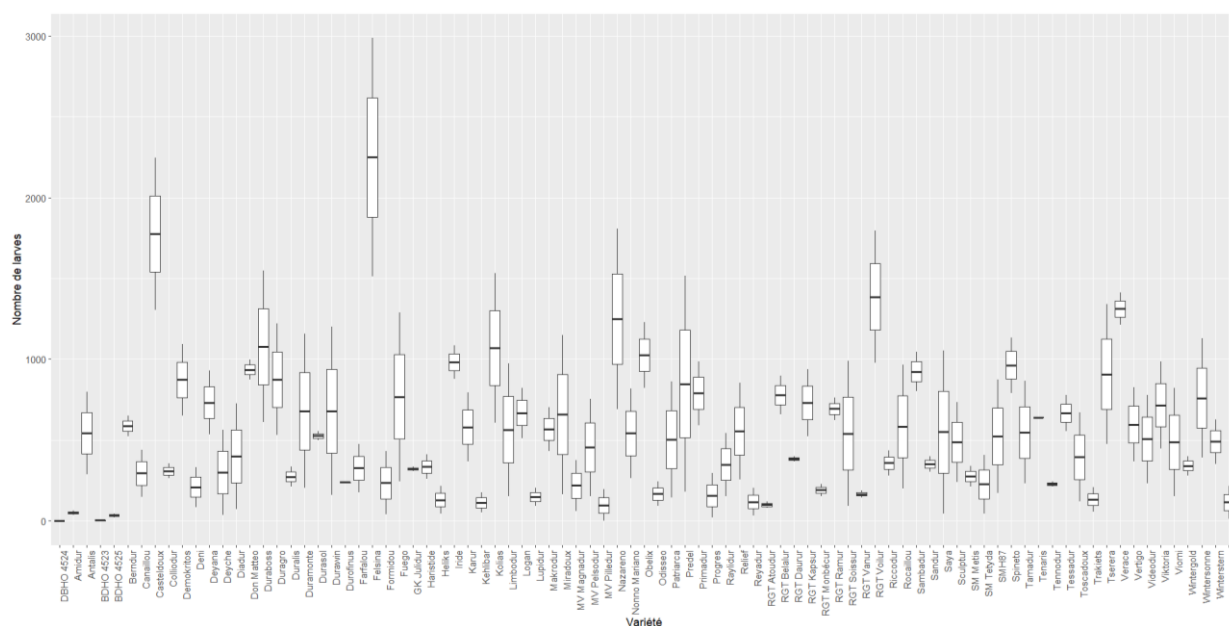
Un constat a été établi concernant le temps écoulé entre l'arrosage et l'émérgence des adultes, pour les terrines ayant subi les mêmes conditions mais ayant été arrosées tardivement. Comme illustré dans le **Tableau 10**, la deuxième accumulation de 160 DJ en base 7 n'est pas achevée alors que les émergences sont déjà observées. Une ébauche d'explication serait que les transformations physiologiques subies par la larve et initiant la pupaison débuteraient avant la pluie inductrice, ce qui raccourcirait donc la période entre la pluie et les émergences.

Tableau 10 : Intervalle de temps entre l'arrosage et les émergences prévues et observées.

	Date de l'arrosage	Fin de l'accumulation des 160 DJ en base 7	Date d'émergence observée	Intervalle entre l'arrosage et les émergences	Écart des prévisions et des observations
<b>E</b>	25 avril	17 mai	14 mai	19 jours	3 jours
<b>F</b>	29 avril	20 mai	16 mai	17 jours	4 jours
<b>G</b>	02 mai	23 mai	17 mai	15 jours	6 jours

### 5.2.3 Sensibilité variétale

La sensibilité d'une variété se marque par la présence plus ou moins abondante de larves sur les épis. Des différences très hautement significatives (\*\*\*) et p-valeur < 0,001) entre les variétés ont été observées, comme le montre la **Figure 66**. Certaines variétés se distinguent déjà : Felsina a comptabilisé pas moins de 100 larves par épis, mais encore RGT Atoudur sur laquelle un nombre réduit de larves a été observé. Les lignées BDHO, supposées résistantes, semblent être confirmées. Les variétés BDHO 4524 et BDHO 4523 ne présentent pas de différence significative entre elles et une variabilité entre les serres a également été détectée par le modèle.

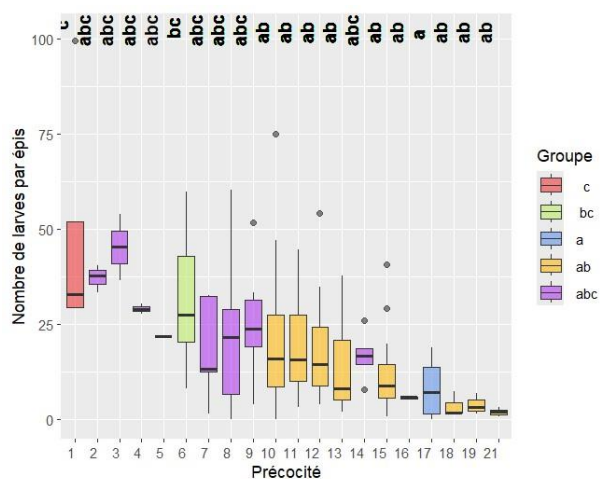


**Figure 66 :** Boxplot du nombre de larves observées par variété.

**Légende :** Une version agrandie se trouve en Annexe 13.

### 5.2.4 Précocité

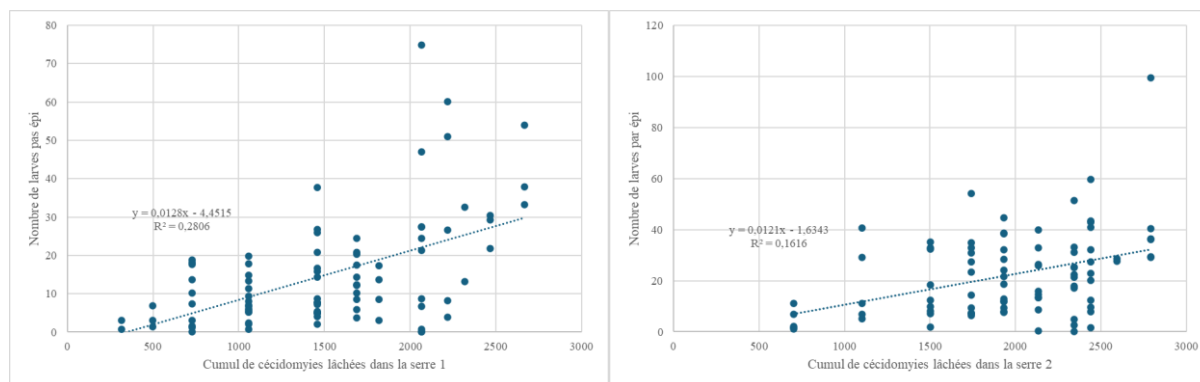
En remplaçant le facteur variété par la précocité dans le modèle d'analyse, l'impact de la date d'épiaison a été constatée. La différence du nombre de larves observées par niveau de précocité est très hautement significative (p-valeur =  $9,282.10^{-8}$ ). Un plus grand effectif de larves a été remarqué chez les variétés précoces, certainement expliqué par une exposition plus longue aux cécidomyies.



**Figure 67 :** Boxplot du nombre de larves observées par épi en fonction de la précocité.

### 5.2.5 Cumul des lâchers

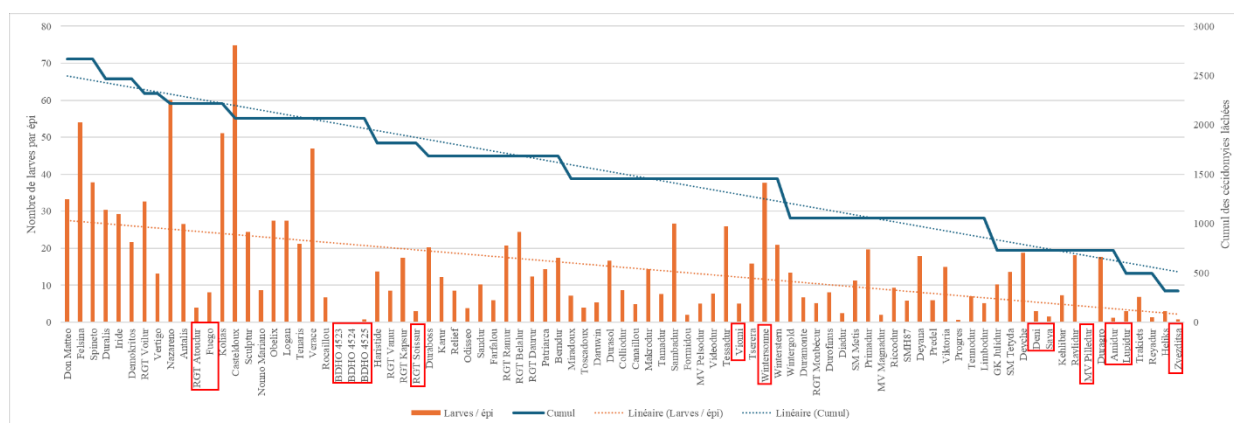
Le cumul des lâchers a un effet très hautement significatif sur la quantité de larves obtenue. Comme illustré sur la **Figure 68**, le nombre de larves par épi et le cumul ont une relation positive. Ce qui signifie qu'une variété avec un grand cumul de cécidomyies, et donc précoce, sera potentiellement plus infestée de larves. Par conséquent, cette analyse du cumul, comme une covariable de la variété, reflète à la fois le caractère sensible de la variété et son caractère précoce.



**Figure 68 :** Relation entre le nombre de larves par épi et le cumul des lâchers dans les serres 1 et 2.

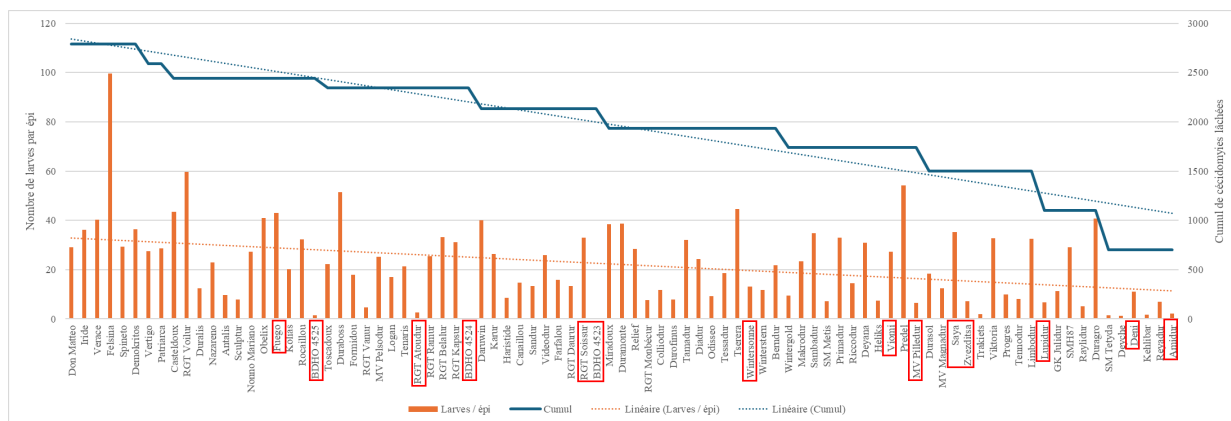
**Légende :** Une version agrandie se trouve en Annexe 14.

Pour chaque serre, les variétés ont été classées par ordre d'épiaison (**Figure 69** et **Figure 70**). Les variétés BDHO 4523, 4524, 4525 et RGT Atoudur se distinguent de nouveau dans les deux serres, malgré la précocité de leur épiaison. D'autres variétés paraissent intéressantes dans une serre mais pas dans l'autre. Parmi celles-ci, Viomi, RGT Soissur, Fuego, Saya, Wintersonne, entre autres, montrent de degrés différents de sensibilité d'une serre à l'autre. Pour ces variétés, il est impossible de tirer des conclusions. De plus, les variétés plus tardives affichent une quantité plus réduite de larves. C'est notamment le cas d'Amidur, Zvezditsa, MV Pilledur, Lupidur, Deni pour qui aucune conclusion ne peut également être établie. Étant plus tardive à l'épiaison, ces variétés n'ont pas été suffisamment exposées aux cécidomyies.



**Figure 69 :** Classement des variétés de la serre 1 en fonction de leur précocité, du cumul des lâchers et du nombre de larves observées.

**Légende :** Une version agrandie se trouve en Annexe 15



**Figure 70 :** Classement des variétés de la serre 2 en fonction de leur précocité, du cumul des lâchers et du nombre de larves observées.

**Légende :** Une version agrandie se trouve en Annexe 16.

### 5.2.6 Cotation de la résistance variétale

Les résultats obtenus précédemment vont être comparés à ceux obtenus par le modèle de Monsieur Jacquemin. L'ensemble des résultats se trouve en **Annexe 17**.

Le modèle a été construit selon les principes ci-dessous.

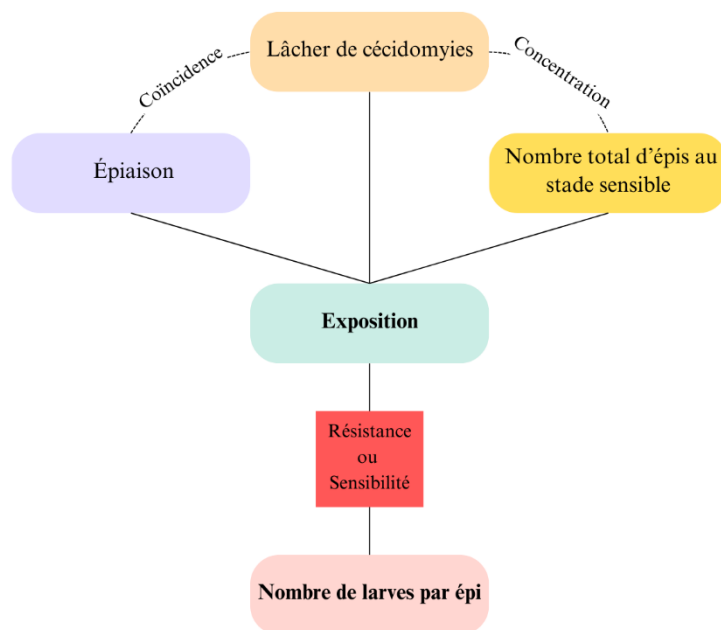
Le nombre de larves présentes par épi est l'indicateur utilisé pour évaluer le degré de tolérance des variétés de blé dur à la cécidomyie orange. Cet indicateur est influencé par trois facteurs qui doivent être pris en considération, à savoir l'épiaison, les lâchers de cécidomyies et le nombre total d'épis au stade sensible dans la serre. Ces trois facteurs sont les paramètres mesurables qui permettent de chiffrer l'exposition des variétés à la cécidomyie. Ainsi, l'exposition correspond au nombre d'œufs qui devraient théoriquement être pondus par épi sur une variété sensible. La coïncidence de rencontre entre les deux espèces et la concentration de cécidomyies sont déterminantes dans le calcul du taux d'exposition. La coïncidence entre le stade sensible du blé et la présence de femelle, est mesurée par la précocité des variétés et les lâchers. La concentration, quant à elle, est le nombre de femelles lâchées prêtes à pondre pour un nombre d'épis disponibles au stade sensible.

Le premier facteur à prendre en compte est donc le nombre total d'épis au stade sensible présents dans la serre. En effet, le nombre d'épis à disposition de la cécidomyie impactera la quantité d'œufs pondus par épis.

Le deuxième facteur est l'épiaison des variétés. Le stade sensible des variétés est fixé entre l'éclatement de la gaine et la floraison, et dure en moyenne une semaine (Ding et Lamb, 1999).

Le troisième et dernier facteur est le nombre total de cécidomyies lâchées dans chaque serre. Dans ces lâchers, l'estimation du sex-ratios est de 50% de femelles et 50% de mâles. Les femelles sont également caractérisées par un taux de survie et une dynamique de ponte. Le taux de survie a été fixé à quatre jours et la dynamique de ponte s'inspire de ceux observés par Pivnick et Labbé (1993).





La différence fondamentale entre les analyses précédentes et le modèle de Monsieur Jacquemin réside dans les notions de cumul des lâchers et de l'exposition. Le cumul considère la phase sensible des blés jusqu'aux derniers lâchers, soit une durée de 21 jours. En réalité, l'épiaison d'une variété n'a pas duré plus de 15 ou 16 jours, si tous les épis sont pris en considération. La notion d'exposition est donc plus précise que celle du cumul en intégrant plus de paramètres.

L'incertitude est également calculée dans le modèle et permet de prendre du recul face aux cotes de résistances. Cette incertitude est fonction de l'exposition des variétés aux cécidomyies. En effet, au plus l'exposition est importante, au mieux sera représenté le caractère résistant ou sensible d'une variété et au plus l'incertitude sera faible.

### 5.2.7 Caractérisation variétale

Afin de statuer sur la tolérance de chaque variété, plusieurs critères ont été définis :

- La cote de résistance prend des valeurs comprises entre 1 et 9 (1 étant la plus forte sensibilité et 9 la résistance).
- L'incertitude varie entre 10 et 53.
- L'exposition est comprise entre 3 et 100. Une exposition de 10 œufs théoriquement pondus par épi est la valeur jugée minimum pour obtenir un degré d'incertitude raisonnable.

Les variétés ont ensuite été caractérisées de différentes manières :

- Résistante : quand la cote est supérieure à 8, l'incertitude et l'exposition jugées suffisantes.
- (Très) Intéressant : quand la cote est comprise entre 6 et 8, avec une bonne exposition et un bon degré d'incertitude.
- Incertain : pour les cotes comprises entre 6 et 8 mais dont l'incertitude est trop grande.
- Sensible : pour les variétés ayant une cote inférieure à 6.

Les lignées BDHO 23, 24 et 25 sont considérées comme résistantes. Ce résultat était attendu puisque ces lignées proviennent de croisement entre un blé tendre résistant et du blé dur. Elles possèdent donc le gène Sm1.

La variété qui se distingue de toute est RGT Atoudur. En effet, sa cote de résistance est de 7 dans les deux serres, l'exposition est supérieure à 10 et le degré d'incertitude est faible. Initialement, toutes les variétés de blé dur sont considérées sensibles à la cécidomyie et ne possèdent pas le gène de résistance Sm1. RGT Atoudur mériterait donc des recherches plus approfondies sur sa tolérance à la cécidomyie.

Le caractère tolérant des variétés Zvezditsa et Reyadur est incertain. La cote de résistance est assez bonne dans les deux serres (entre 6 et 8), seulement l'exposition de la serre 1 n'a pas été suffisante ce qui entraîne une incertitude importante. Dans ce cas, des répétitions expérimentales supplémentaires auraient été nécessaires.

Des différences importantes de cotation entre la serre 1 et 2 sont parfois observées. C'est notamment le cas des variétés Saya, Limbodur, Durawin, Predel. La cote de résistance est nettement meilleure pour la première serre. Ces différences s'expliquent de nouveau par l'exposition. En effet, l'exposition de la serre 1 est insuffisante (inférieure à 10), ce qui provoque une incertitude par rapport à la cotation. Pour pallier cela, les lâchers de cécidomyies auraient dû durer plus longtemps durant la phase d'épiaison. Cependant, les contraintes d'émergences en milieu contrôlé ne l'ont pas permis.

À l'inverse, la variété Fuego observe des bons taux d'exposition et d'incertitude, mais elle constate une différence importante entre les deux serres. Aucune explication ne peut être donnée, si ce n'est que les conditions de ponte ont peut-être été différentes d'une serre à l'autre. Plus de répétitions auraient également été un avantage de ce cas-ci.

La variété Don Matteo obtient une cote de résistance moyenne malgré son exposition très importante dans la première serre. Felsina et Casteldoux sont les variétés les plus sensibles.

Les variétés intermédiaires sont considérées comme sensibles, même dans le cas d'exposition moindre dans l'une ou l'autre serre.

Un autre constat a pu être posé concernant l'exposition relative à chaque serre. La serre 1 observe les taux d'exposition les plus faibles alors que ceux de la serre 2 sont toujours supérieurs à 10 et donc suffisants. Les résultats obtenus pour la deuxième serre sont plus fiables que ceux de la première.

**Tableau 11:** Caractérisation variétale, cote de résistance et résultats d'analyses.

N°	Origine	Variétés	Cote de résistance			Exposition		Degré d'incertitude		Analyses Rstudio		Caractère
			Serre 1	Serre 2	Combiné	Serre 1	Serre 2	Serre 1	Serre 2	Larves	Cumul	
90	DE	BDHO 4524	9	9	9,0	25,9	22,9	19,6	20,9	a	a	Résistant
89	DE	BDHO 4523	9	8	8,5	25,9	20,3	19,6	22,2	a	a	Résistant
91	DE	BDHO 4525	8	8	8,0	25,9	24,1	19,6	20,4	ab	a	Résistant
66	FR	RGT Atoudur	7	7	7,0	29,6	22,9	18,4	20,9	bcdef	a	Très intéressant
58	BG	Zvezditsa	8	6	6,8	3,7	16,8	52,2	24,4	bcde	abc	Incertain
64	BG	Reyadur	8	6	6,9	6,1	12,4	40,4	28,4	bcdef	abc	Incertain
39	IT	Odisseo	7	6	6,5	19,1	19,0	22,9	22,9	bcdefghij	ab	Intéressant
54	BG	Saya	8	4	5,8	7,4	16,8	36,7	24,4	cdefghijkl	abc	Sensible
87	AT	Limbodur	7	4	5,4	9,9	16,8	31,7	24,4	cdefghijkl	abc	Sensible
7	DE	Durawin	7	3	5,0	16,1	20,3	24,9	22,2	defghijkl	abc	Sensible
70	IT	Fuego	6	3	4,5	33,8	25,7	17,2	19,7	defghijkl	abc	Sensible
61	BG	Predel	7	1	3,8	9,9	18,0	31,7	23,6	efghijkl	abc	Sensible
18	IT	Don Matteo	5	5	5,0	99,7	49,8	10,0	14,2	fghijkl	abc	Sensible
73	IT	Felsina	4	1	2,5	83,7	49,8	10,9	14,2	l	c	Sensible
2	FR	Casteldoux	1	3	2,0	25,9	25,7	19,6	19,7	kl	bc	Sensible

De plus, des similitudes sont remarquées en comparant les cotes de résistance et les résultats des analyses statistiques sur RStudio. En effet, les groupes obtenus sur RStudio suivent la tendance du modèle. Les lignées BDHO et la variétés RGT Atoudur sont classées dans le même groupe pour les analyses de cumul. Les variétés Felsina et Casteldoux se sont aussi distinguées des autres par leur sensibilité.

Les autres pistes à explorer pour expliquer la tolérance de certaines variétés sont la morphologie des épis. En effet, les caractéristiques morphologiques des variétés peuvent être des facteurs explicatifs de la présence plus ou moins abondante de larves par épi. Par exemple, la pilosité pourrait restreindre la ponte en rendant l'accès aux glumes plus difficile. Cette réduction d'accessibilité aux glumes force les femelles à pondre sur le dos de l'épillet, ce qui rend les œufs plus vulnérables, en les exposant davantage à la pluie et aux prédateurs. L'expérimentation se déroulant en serre, et donc en milieu semi-contrôlé, a certainement été une forme de protection. Ce caractère pubescent est notamment présent chez les variétés Reyadur et Raylidur. Cependant, Lamb et al (2001) ont déjà étudié différents traits morphologiques de l'épi et sont arrivés à la conclusion qu'aucun trait ne justifiait la réduction de ponte.

## 6 Contribution personnelle

---

Tout a démarré lors de visite de champs d'essai au CRA-W en 2018. Je me souviens avoir particulièrement apprécié l'intervention de Michel De Proft qui nous présentait la cécidomyie orange et nous expliquait le modèle prévisionnel des émergences.

Des années plus tard, c'est en rencontrant Guillaume Jacquemin que j'ai eu l'opportunité de réaliser mon travail de fin d'études sur la cécidomyie orange, au CRA-W.

Ce travail m'a apporté énormément, d'un point de vue intellectuel mais aussi relationnel.

Tout d'abord, pouvoir réaliser mon TFE en entreprise a été une occasion pour moi d'intégrer le milieu professionnel. J'ai notamment pu participer aux activités des équipes, rencontrer de nouvelles personnes, apprendre ce qui n'est pas enseigné sur les bancs des auditoires, faire face à la réalité du terrain...

J'ai également eu l'occasion d'assister à une journée de conférence sur le blé dur à Orléans.

Lors de la visite des parcelles d'essai, il m'a été permis de présenter mon travail et mes recherches à des agriculteurs.

Pour les analyses de données, j'ai dû apprendre à coder sur RStudio ainsi qu'à utiliser le logiciel de tableur Excel.

## 7 Conclusion et perspectives

---

Ce travail visait deux objectifs. Le premier consistait à observer l'évolution des différents stades de développement de la cécidomyie orange dans le sol. Le deuxième était la caractérisation du comportement résistant ou sensible à la cécidomyie orange de plusieurs variétés de blé dur.

Les comptages hebdomadaires des échantillons de sol des terrines ont permis de tirer certains constats. Tout d'abord, la sortie des larves de leur cocon hivernal s'est avérée assez longue. Les larves sont restées longtemps sensibles aux pluies froides qui sont le moteur de cette sortie. Ensuite, l'observation de cocons allongés est une donnée originale et peu documentée qui a pu être décrite. Les conditions humides de ce printemps 2024 ont certainement poussé les larves à se fabriquer un second cocon. La pupaison a également été décrite. Enfin, les techniques d'extraction ont pu être améliorées.

L'essai variétale du blé dur sur la résistance à la cécidomyie a permis de caractériser les variétés selon leur degré de sensibilité. Les lignées BDHO45 23, 24 et 25 et la variété RGT Atoudur se sont particulièrement distinguées. De plus, un modèle de cotation a été créé dans le cadre de ce travail afin d'évaluer le taux d'exposition à la cécidomyie de chaque variété. Aucune conclusion n'a pu être tirée pour les variétés tardives ni pour les variétés dont l'exposition n'a pas été suffisant. Un nombre plus important de répétitions aurait été nécessaire.

Quelques recommandations peuvent être suggérer de futures recherches :

- Étudier plus en détails la pupaison afin de pouvoir prévoir les émergences tardives.
- Étudier le stade cocon allongé dans le but d'identifier les conditions qui poussent les larves à se fabriquer un second cocon.
- Tester plusieurs répétitions de variétés jugées intéressantes mais également les variétés incertaines afin d'obtenir des résultats plus fiables et pourvoir tirer des conclusions.

## 8 Bibliographie

- Affolter, F. 1990. Structure and dynamics of the parasitoid complex of the wheat midges *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) and *Contarinia tritici* (Kirby) (Diptera: Cecidomyiidae), Université de Neuchâtel.
- Agreste, 2023. Synthèses conjoncturelles. Grandes cultures. Novembre 2023, N°415. Consulté le 10 août 2024. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/SynGcu23415/consyn415202311-GdesCultures.pdf>.
- ARVALIS, 2022. La résistance au froid des céréales à paille : un processus d'acclimatation progressif. Arvalis, Institut du végétal, Paris. Consulté le 10 août 2024. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/la-resistance-au-froid-des-cereales-paille-un-processus-dacclimatation-progressif>.
- ARVALIS, 2017. Blé dur : Guide de culture, Arvalis, Institut du végétal, Paris.
- Barnes, H. F. 1928. Wheat blossom midges (Cecidomyiidae, Diptera). Differences between *Contarinia tritici* (Kirby) and *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). Bulletin of Entomological Research 18 (3) : 285-288.
- Barnes, H. F. 1952a. Studies of fluctuations in insect populations XII. Further evidence of prolonged larval life in the wheat blossom midges. Annals of Applied Biology 39 (3) : 370-373.
- Barnes, H. F. 1956. Gall midges of cereal crops. Dans : Gall midges of economic importance, L. Crosby Lockwood & Sons. London, 29-82.
- Basedow, T. 1977a. Der einfluss von temperatur und niederschlägen auf diapause und phänologie des weizengallmücken *Contarinia tritici* (Kirby) und *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera : Cecidomyiidae). Zoologische Jahrbuecher Abteilung für Systematik Oekologie und Geographie der Tiere 104 : 302-326.
- Basedow, T. et Gillich, H. 1982. Untersuchungen zur prognose des auftretens der weizengallmücken *Contarinia tritici* (Kirby) und *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera, Cecidomyiidae). II. Faktoren, die ein schadauftreten der m cken verhindern k nnen. Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz und Umweltschutz 55 (6) : 84-89.
- Basedow, T. et Schütte, F. 1982. Die populationsdynamik de weizengallmücken *Contarinia tritici* (Kirby) und *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Dipt., Cecidomyiidae) in zwei norddeutschen weizenanbaubeiten von 1969 bis 1976. Zoologische Jahrbuecher Abteilung für Systematik Oekologie und Geographie der Tiere 109 : 33-82.
- Censier, F., Cavalle, S., Knor, S., De Proft, M., Bodson, B., Skuhrava, M., 2014. Unusual Occurrence of Cocoons in Population of *Haplodiplosis marginata* (Diptera: Cecidomyiidae) in Belgium. Journal of Insect Science. Oxford Academic. Consulté le 10 juillet 2024. <https://academic.oup.com/jinsectscience/article/14/1/239/2383581>.
- Cepicop – Centre Pilote Céréales et Oléo-Protéagineux. Avertissements 1107, 09/05/2023. Consulté le 24 avril 2024. <https://centrespilotes.be/publi/Avertissements/1107>.
- Cepicop – Centre Pilote Céréales et Oléo-Protéagineux. Avertissements 69, 24/05/2018. Consulté le 24 avril 2024. <https://centrespilotes.be/publi/Avertissements/69>.
- Cepicop – Centre Pilote Céréales et Oléo-Protéagineux. Avertissements 72, 29/05/2018. Consulté le 29 avril 2024. <https://centrespilotes.be/publi/Avertissements/69>.
- Chavalle, S., 2018. La cécidomyie orange du blé, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) : amélioration des stratégies de lutte et gestion intégrée. PhD Thesis, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique.
- Chavalle, S., De Proft, M., Jacquemin, G., Censier, F., Mahieu, A., Denayer, J., Berger, A., Berger, N., Gasia, D., Rousseau, H., Ruth, M., 2015. CRA-W. Centre wallon de Recherches agronomiques. « La cécidomyie orange du blé et autres cécidomyies des céréales ».

- Chavalle, S., Censier, F., San Martin y Gomez, G., De Proft, M., 2015. Protection of winter wheat against orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae): efficacy of insecticides and cultivar resistance. *Pest Manag. Sci.* 71, 783–790.
- Chavalle, C., Jacquemin, G., De Proft, M., 2015. Cécidomyie orange : repérer les blés qui lui résistent. *Phytoma* 687, 35-39.
- Chavalle, S., De Proft, M., Jacquemin, G., Censier, F., Mahieu, A., Denayer, J., Berger, A., Berger, N., Gasia, D., Rousseau, H., Ruth, M., 2016. La cécidomyie orange du blé et autres cécidomyies des céréales.
- Chavalle, S., Jacquemin, G., De Proft, M., 2014b. Evaluation en conditions contrôlées de la résistance variétale du blé tendre d'hiver à la cécidomyie orange du blé, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin), in : AFPP - 10ème Conférence Internationale sur les Ravageurs en Agriculture, Montpellier, France, 22-23 Octobre 2014. pp. 575-584.
- Chavalle, S., Jacquemin, G., De Proft, M., 2017a. Assessing cultivar resistance to *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) using a phenotyping method under semi-field conditions. *J. Appl. Entomol.* 141, 780–785.
- Climat.be, juin 2024. « Changement observés ». Consulté le 11 juin 2024. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/changements-observees>.
- Commission européenne, 2024. « Pesticides - Commission européenne ». Consulté le 18 juillet 2024. [https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/environmental-sustainability/low-input-farming/pesticides\\_fr](https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/environmental-sustainability/low-input-farming/pesticides_fr).
- Couture, L., Dubuc, J. P. et Comeau, A. 1995. Occurrence of contamination of wheat grain by the orange wheat blossom midge and seed microflora in Québec. *Canadian Plant Disease Survey* 75 (1) : 128-129.
- De Proft, M. et Latteur, G. 2000. Les "mouches" des céréales. Fumure et protection phytosanitaire des céréales. Gembloux : FUSAGx et CRA-W, 5 pages.
- Ding, H. et Lamb, R. J. 1999. Oviposition and larval establishment of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) on wheat (Gramineae) at different growth stages. *The Canadian Entomologist* 131 (4) : 475-481.
- Ding, H., Lamb, R. J. et Ames, N. 2000. Inducible Production of Phenolic Acids in Wheat and Antibiotic Resistance to *Sitodiplosis mosellana*. *Journal of Chemical Ecology* 26 (4) : 969-985.
- Doane, J. F. et Olfert, O.O. 2008. Seasonal development of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae), in Saskatchewan, Canada. *Crop Protection* 27 (6) : 951-958.
- Doane, J. F., Olfert, O. O. et Mukerji, M. K. 1987. Extraction precision of sieving and brine flotation for removal of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae), cocoons and larvae from soil. *Journal of Economic Entomology* 80 (1) : 268-271.
- Dorchin, N. 2008. Gall midges (Diptera: Cecidomyiidae). Dans : *Encyclopedia of Entomology*, édité par J. L. Capinera: Springer, 1576-1580.
- Drakulic, J., Bruce, T.J.A. et Ray, R.V. 2017. Direct and host-mediated interactions between *Fusarium* pathogens and herbivorous arthropods in cereals. *Plant Pathology* 66, 3-13.
- Duan, Y., Wu, Y.-Q., Luo, L.-Z., Miao, J., Gong, Z.-J., Jiang, Y.-L. et Li, T. 2013. Genetic Diversity and Population Structure of *Sitodiplosis mosellana* in Northern China. *PLoS ONE* 8 (11):e78415.
- Échelle BBCH améliorée. « Stades.pdf » <https://www.gembloux.ulg.ac.be/phytotechnie-temperec/pic/Stades.pdf>
- Elliott, R. H., et Mann, L. W. 1996. Susceptibility of red spring wheat, *Triticum aestivum* L. cv. Katepwa, during heading and anthesis to damage by wheat midge, *Sitodiplosis*

- mosellana (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae). The Canadian Entomologist 128 (3) : 367-375.
- Ellis, S. A., Bruce, T. J., Smart, L. E., Martin, J. A., Snape, J. et Self, M. 2009. Integrated management strategies for varieties tolerant and susceptible to wheat blossom midge. HGCA Project Report N°451, 148 pages.
- Feillet, P., (2000). Le grain de blé. Paris : INRA
- FranceAgriMer, 2022. Les données. Marché du blé dur. Campagne 2021-2022. Consulté le 10 juillet 2024. [https://www.franceagrimer.fr/content/download/70027/document/20221209\\_BILAN\\_BLE\\_DUR\\_2021\\_22.pdf](https://www.franceagrimer.fr/content/download/70027/document/20221209_BILAN_BLE_DUR_2021_22.pdf).
- Gaafar, N., et Volkmar, C. 2010. Evaluation of wheat ear insects in large scale field in central Germany. Agricultural Sciences 1 (2) : 68-75.
- Gagné, R. J. et Doane, J. F. 1999. The larval instars of the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae). Proceedings of the Entomological Society of Washington 101 (1) : 53-63.
- Ganehlarachchi, G.A.S.M., Harris, M.O., 2007. Oviposition behaviour of orange wheat blossom midge on low-vs. High-ranked grass seed heads. Entomol. Exp. Appl. 123, 287-297.
- Ganehlarachchi, G. et Harris, M. O. 2009. Ovipositing females of a short-lived gall midge take time to assess suboptimal grass seed heads. Physiological Entomology 34 (2) : 119-128.
- Géhin, J.-B. 1857. Notes pour servir à l'histoire des insectes nuisibles à l'agriculture dans le département de la Moselle. II. Insectes qui attaquent les blés. Impr. F. Blanc. Metz, 38 pages.
- Gharalari, A. H., Smith, M. A. H., Fox, S. L. et Lamb, R. J. 2009. The relationship between morphological traits of the spring wheat spike and oviposition deterrence to orange wheat blossom midge. Entomologia Experimentalis et Applicata 132 (2) : 182-190.
- Golightly, W. H. 1952. Soil sampling for wheat blossom midges. Annals of Applied Biology 39 (3) : 379-384.
- Google Maps, 26 juin 2024. Google Maps : <https://www.google.be/maps/>.
- Gries, R., Gries, G., Khaskin, G., King, S., Olfert, O., Kaminski, L. A., Lamb, R. et Bennett, R. 2000. Sex pheromone of orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana*. Naturwissenschaften 87 (10) : 450-454.
- Harris, K. M. 1966. Gall midge genera of economic importance (Diptera: Cecidomyiidae). Part 1 : Introduction and subfamily Cecidomyiinae; supertribe Cecidomyiidi. Transactions of the Royal Entomological Society of London 118 (10) : 313-358.
- Inventaire national du patrimoine naturel, 2024. *Triticum turgidum* subsp. *durum* (Desf.) Husn., 1899 - Blé dur, Blé d'Afrique. Inventaire National du Patrimoine Naturel. Consulté le 9 juillet 2024. [https://inpn.mnhn.fr/espece/cd\\_nom/141978](https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/141978).
- IRIS phytoprotection. Consulté le 22 juillet 2024. <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/>.
- IRM, 2024. IRM – Bilans climatologiques de 2024. Consulté le 02 août 2024. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2024/juillet>.
- Jacquemin, G., 2014. La cécidomyie orange du blé, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) : appréhension des risques et gestion intégrée. PhD Thesis, Université libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium.
- Jacquemin, G., Chavalle, S., De Proft, M., 2014. Forecasting the emergence of the adult orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) in Belgium. Crop Prot. 58, 6-13.
- Knodel, J. et Ganehlarachchi, M. 2008. Integrated pest management of the wheat midge in North Dakota – E1130. NSDU Extension Service.



- Kurppa, S. 1989. Wheat blossom midges, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) and *Contarinia tritici* (Kirby) in Finland, during 1981-1987. *Annales Agriculturae Fenniae* 28 : 87-96.
- Lamb, R. J., McKenzie, R. I. H., Wise, I. L., Barker, P. S., Smith, M. A. H. et Olfert, O. O. 2000a. Resistance to *Sitodiplosis mosellana* (Diptera : Cecidomyiidae) in Spring wheat (Gramineae). *The Canadian Entomologist* 132 (5) : 591-605.
- Lamb, R. J., Smith, M. A. H., Wise, I. L. et Clarke, P. 2001. Oviposition deterrence to *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae): a source of resistance for durum wheat (Gramineae). *The Canadian Entomologist* 133 (4) : 579-591.
- Lamb, R.J., Smith, M.A.H., Wise, I.L., McKenzie, R.I.H., 2015. Resistance to wheat midge (Diptera: Cecidomyiidae) in winter wheat and the origins of resistance in spring wheat (Poaceae). *Can. Entomol.* 00, 1-10.
- Lamb, R. J., Sridhar, P., Smith, M. A. H. et Wise, I. L. 2003. Oviposition preference and offspring performance of a wheat midge *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) on defended and less defended wheat plants. *Environmental Entomology* 32 (2) : 414-420.
- Lamb, R. J., Tucker, J. R., Wise, I. L. et Smith, M. A. H. 2000b. Trophic interaction between *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) and spring wheat: implications for yield and seed quality. *The Canadian Entomologist* 132 (5) : 607-625.
- Lamb, R.J., Wise, I.L., Olfert, O.O., Gavloski, J., Barker, P.S., 1999. Distribution and seasonal abundance of *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae). *Can. Entomol.* 131, 387-397.
- Le Sillon Belge. « La culture de blé dur en Wallonie : les premiers enseignements de la vague de froid de février », 1 mars 2021. <https://www.sillonbelge.be/7172/article/2021-03-01/la-culture-de-ble-dur-en-wallonie-les-premiers-enseignements-de-la-vague-de>.
- Livre Blanc Céréales, Septembre 2018.
- McKenzie, R. I. H., Lamb, R. J., Aung, T., Wise, I. L., Barker, P. et Olfert, O. O. 2002. Inheritance of resistance to wheat midge, *Sitodiplosis mosellana*, in spring wheat. *Plant Breeding* 121 (5) : 383-388.
- Meza Morales, W. R., 2021. CRA-W. Centre wallon de Recherches agronomiques. « Le blé dur, une opportunité dans la diversification de nos grandes cultures ? ». Consulté le 10 juillet 2024. <https://www.cra.wallonie.be/fr/le-ble-dur-une-opportunite-dans-la-diversification-de-nos-grandes-cultures#>
- Minne, 2020. CRA-W. Centre wallon de Recherches agronomiques. « Effets du changement climatique et gestion des risques de production en Wallonie ». Consulté le 29/07/2024. <https://www.cra.wallonie.be/fr/effets-changement-climatique-gestion-risques-production-wallonie>.
- Moiroux J., G. Bourgeois, G. Boivin et J. Brodeur. 2014. Impact différentiel du réchauffement climatique sur les insectes ravageurs des cultures et leurs ennemis naturels : implications en agriculture. Feuille technique Ouranos Projet 550005-103, Québec, Canada. 12 p.
- Mongrain, D., Couture, L., Dubuc, J.-P. et Comeau, A. 1997. Occurrence of the orange wheat blossom midge (Diptera: Cecidomyiidae) in Quebec and its incidence on wheat grain microflora. *Phytoprotection* 78 (1) : 17-22.
- Mongrain, D., Couture, L. et Comeau, A. 2000. Natural occurrence of *Fusarium graminearum* on adult wheat midge and transmission to wheat spikes. *Cereal Research Communications* 28 (1) : 173-180.
- Oakley, J. N., Green, D. I., Jones, A. E., Kilpatrick, J. B. et Young, J. E. B. 1994. Forecasting the abundance of orange wheat blossom midge in wheat. Brighton Crop Protection Conference - pests and diseases.
- Oakley, J. N. 1995. Orange wheat blossom midge: survey of the 1993 outbreak. HGCA Research Review N°106, 14 pages.

- Oakley J. N., Cumbleton, P. C., Corbett, S. J., Saunders, P., Green, D. I., Young, J. E. B. et Rodgers, R. 1998. Prediction of orange wheat blossom midge activity and risk of damage. *Crop Protection* 17 (2) : 145-149.
- Oakley J. N., Talbot G., Dyer C., Self M. M., Freer, J. B. S., Angus, W. J., Barrett, J. M., Feuerhelm, G., Snape, J., Sayers, L., Bruce, T. J. A., Smart, L. E. et Wadhams, L. J. 2005. Integrated control of wheat blossom midge: variety choice, use of pheromone traps and treatment thresholds. HGCA Project Report N°363, 65 pages.
- Olfert, O.O., Mukerji, M.K., Doane, J.F., 1985. Relationship between infestation levels and yield loss caused by wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae), in spring wheat in Saskatchewan. *Can. Entomol.* 117, 593–598.
- Perspectives Agricoles. 2024. « Rester attentif à la cécidomyie ». Consulté le 24 avril 2024. <https://www.perspectives-agricoles.com/conduite-de-cultures/cecidomyie-du-ble>.
- Pivnick, K. A. 1993. Response of males to female sex pheromone in the orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae). *Journal of Chemical Ecology* 19 (8) : 1677-1689.
- Pivnick, K. A., et Labbé, E. 1992. Emergence and calling rhythms, and mating behaviour of the orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae). *The Canadian Entomologist* 124 (3) : 501-507.
- Pivnick, K. A., et Labbé, E. 1993. Daily patterns of activity of females of the orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera : Cecidomyiidae). *The Canadian Entomologist* 125 (4) : 725-736.
- Readshaw, J.L., 1966. « The Ecology of the Swede Midge, *Contarinia Nasturtii* (Kieff.) (Diptera Cecidomyiidae). I.-Life-History and Influence of Temperature and Moisture on Development ». *Bulletin of Entomological Research* 56, n°4 (août 1966) : 685-700. <https://doi.org/10.1017/S0007485300056686>
- Rabier, F., 2023. CRA-W. Centre wallon de Recherches agronomiques. « Le blé dur ». Consulté le 10 juillet 2024. <https://www.cra.wallonie.be/fr/ble-dur>.
- Rosillon D., Huart J.P., Planchon V., De Proft M. et Dumont B. Livre Blanc Céréales, Février 2020. « Le Point Agrométéorologique - Situation Climatique - 2 Nouveaux OAD Céréales ».
- Rouillon, C., Doucet, R. et Taupin, P. 2006. Ravageurs de printemps. Cécidomyies. L'efficacité de la lutte passe par une bonne observation. *Perspectives Agricoles* 322 : 58-61.
- Skuhrava, M. 1997. Family Cecidomyiidae. *Manual of Palaearctic Diptera*. Papp L. & Darvas B. Budapest, 71-204.
- Skuhrava, M. 2006. Species richness of gall midges (Diptera: Cecidomyiidae) in the main biogeographical regions of the world. *Acta Societatis Zoologicae Bohemicae* 69: 327-372.
- Skuhrava, M., V. Skuhavy, et J. W. Brewer. 1984. The distribution and long-term changes in population dynamics of gall midges on cereals in Europe. (Cecidomyiidae, Diptera). *Cecidologia Internationale* 5 (1-2) : 1-7.
- Smith, M. A. H. et Lamb, R. J. 2001. Factors influencing oviposition by *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: cecidomyiidae) on wheat spikes (Gramineae). *The Canadian Entomologist* 133 (4) : 533-548.
- Smith, M. A. H. et Lamb, R. J. 2004. Causes of variation in body size and consequences for the life history of *Sitodiplosis mosellana*. *The Canadian Entomologist* 136 (6) : 839-850.
- Speyer, W., 1957. Die Eiablage der Weizengallmücken *Contarinia tritici* Kirby und *Sitodiplosis mosellana* Géhin. *Z. Für Pflanzenkrankh. Pflanzenpathol. Pflanzenschutz* 64, 534–540.
- SPW. 2023. « Utilisation de produits phytopharmaceutiques - État de l'environnement wallon ». Consulté le 18 juillet 2024.

[http://etat.environnement.wallonie.be/cms/render/live/fr\\_BE/sites/ceew/contents/indicat  
orsheets/AGRI%206.html](http://etat.environnement.wallonie.be/cms/render/live/fr_BE/sites/ceew/contents/indicat<br/>orsheets/AGRI%206.html).

- Statista Research Department, 2023. Céréales : volume de production par type dans le monde 2022/2023. Consulté le 10 août 2024. <https://fr.statista.com/statistiques/565119/production-totale-de-cereales-par-type-dans-le-monde/>.
- Thomas, J., Fineberg, N., Penner, G., McCartney, C., Aung, T., Wise, I. L. et McCallum, B. 2005. Chromosome location and markers of Sm1: a gene of wheat that conditions antibiotic resistance to orange wheat blossom midge. *Molecular Breeding* 15 (2) : 183-192.
- Vera, C.L., Fox, S.L., DePauw, R.M., Smith, M.A.H., Wise, I.L., Clarke, F.R., Procunier, J.D., Lukow, O.M., 2013. Relative performance of resistant wheat varietal blends and susceptible wheat cultivars exposed to wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). *Can. J. Plant Sci.* 93, 59–66.
- WalOnMap, 2024. SPW. « WalOnMap ». Consulté le 26 juin 2024. <http://geoportail.wallonie.be/walonmap>.
- Wang, Y., Li, D., Liu, Y., Li, X.-J., Cheng, W.-N., Zhu-Salzman, K., 2016. Morphology, ultrastructure and possible functions of antennal sensilla of *Sitodiplosis mosellana* Géhin (Diptera: Cecidomyiidae). *J. Insect Sci.* 16.
- Wellso, S. G. et Freed, R. D. 1982. Positive association of the wheat midge (Diptera: Cecidomyiidae) with glume blotch. *Journal of Economic Entomology*. 75 (5) : 885-887.
- Wise, I.L., Lamb, R.J., 2004. Diapause and émergence of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) and its parasitoid *Macroglènes penetrans* (Hymenoptera Pteromalidae). *The Canadian Entomologist* 136, 77–90.
- Wright, A. T. et Doane, J. 1987. Wheat midges infestation of spring cereals in northeastern Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science* 67 (1) : 117-120.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14, 415–421.

## 9 Annexe

### Annexe 1 : Liste des variétés

N°	Nom	Année d'inscription ou de collecte	Pays d'inscription	Obtenteur ou Collecteur	Pays d'obtention
1	Wintergold	2011	DE, RO, AT	Südwestdeutsche Saatzucht GmbH & Co. KG	Allemagne
2	Casteldoux	2012	FR, CL	Florimond Desprez Veuve et Fils	France
3	Miradoux	2007	FR, AR	Florimond Desprez Veuve et Fils	France
4	Toscadoux	2016	FR	Florimond Desprez Veuve et Fils	France
5	Fulgur SZS	2017	DE	Universitaet Hohenheim Landessaatzuchtanstalt Herrn Dr. Friedrich Longin	Allemagne
6	Duraboss			Dr. Berthold Alter	Allemagne
7	Durawin			Dr. Berthold Alter	Allemagne
8	Durasol	2008	DE	Dr. Berthold Alter	Allemagne
10	RGT Voilur	2016	FR	RAGT 2n	France
11	Karur	2002	FR, BG	RAGT 2n	France
12	Duralis	2018	DE	Südwestdeutsche Saatzucht GmbH & Co. KG	Allemagne
13	Duramonte	2011	ES, CL	Südwestdeutsche Saatzucht GmbH & Co. KG	Allemagne
14	Relief	2013	FR, CL	Syngenta Seeds SAS	France
15	Haristide	2015	FR	Caussade Semences SA	France
16	Maesta	2015	IT	Regal Sementi SRL	Italie
17	Nazareno	2016	IT	CGS Sementi	Italie
18	Farah	2016	IT	Regal Sementi SRL	Italie
19	Don Matteo	2016	IT	Regal Sementi SRL	Italie
20	Antalis	2013	IT	Limagrain Europe SAS	Italie
21	Turanico 38				Italie
22	RGT Monbécur	2018	FR	RAGT 2n	France
23	Colliodur	2018	AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
24	Durofinus	2016	AT,FR, UA, IT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
25	Canailou	2020	FR	Florimond Desprez Veuve et Fils	France
26	Makrodur	2019	DE	Südwestdeutsche Saatzucht GmbH & Co. KG	Allemagne
27	Sculptur	2007	FR, IT, ES	RAGT 2n	France

28	Tamadur	2014	AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
29	Sambadur	2016	AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
30	Diadur	2017	AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
31	Formidou	2020	FR	Florimond Desprez Veuve et Fils	France
32	RGT Vanur	2019	FR	RAGT 2n	France
33	Nonno Mariano	2016	IT	Regal Sementi SRL	Italie
34	Lupidur	2009	AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
35	Obelix	2017	AR	Syngenta Participation AG.	Italie
36	Mv Pelsodur	2017	HU	MTA Agrártudományi Kutatóközpont MGI, Martonvásár, Hungary	Hongrie
38	SM Metis	2019	PL	HR Smolice, Poland	Pologne
39	Primadur	2009	HR	Bc Institut d.d. Zagreb	Croatie
41	Iride	2017	IT	Societa' Produttori Sementi S.P.A. (IT)	Italie
42	Odisseo	2011	IT, AR	Societa' Produttori Sementi S.P.A. (IT)	Italie
43	GK Julidur	2015	HU	Gabona Kutato, Hungary	Hongrie
45	MV Magnadur	2020	HU	MTA Agrártudományi Kutatóközpont MGI, Martonvásár, Hungary	Hongrie
46	Sandur	2019	HR	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
47	Riccodur	2019	AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
48	Videodur	2020	AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
49	Tessadur	2016	AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
51	SM Tetyda	2020	PL	HR Smolice, Poland	Pologne
52	SMH87			HR Smolice, Poland	Pologne
53	Logan			Societa' Produttori Sementi S.P.A. (IT)	Italie
54	Tenaris			Societa' Produttori Sementi S.P.A. (IT)	Italie
55	Farfalou	2021	FR	Florimond Desprez Veuve et Fils	France
56	Deyche	2021	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
57	Deyana	2007	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
58	Deni	2008	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
59	Saya	2016	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie

60	Heliks	2018	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
61	Kehlibar	2015	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
62	Viomi	2020	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
63	Zvezditsa	2007	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
64	Trakiets	2015	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
65	Raylidur	2016	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
66	Predel	2008	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
67	Tserera	2017	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
68	Viktoria		BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
69	Reyadur	2016	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
70	Progres	1998	BG	Institute of Agricultural Crops -Chirpan (BG)	Bulgarie
71	RGT Atoudur	2010	FR	RAGT 2n	France
72	RGT Ramur	2021	FR	RAGT 2n	France
73	Wintersonne	2022	DE, HR	Südwestdeutsche Saatzucht GmbH & Co. KG	Allemagne
74	Winterstern	2022	DE	Südwestdeutsche Saatzucht GmbH & Co. KG	Allemagne
75	Fuego	2020		Societa' Produttori Sementi S.P.A. (Andrea Massi)	Italie
76	Verace	2020		Societa' Produttori Sementi S.P.A.	Italie
77	Kolias	2021	IT	Syngenta Crop production AG	
78	Felsina	2021			Italie
79	MV Pilledur	2022	HU	MTA Agrártudományi Kutatóközpont MGI, Martonvásár, Hungary	Hongrie
80	RGT Belalur	2020	FR	RAGT 2n	France
81	RGT Daurur	2013	IT	RAGT 2n	France
82	RGT Kapsur	2020	FR	RAGT 2n	France
83	Vertigo	2021		Florimond Desprez Veuve et Fils	France
84	Patriarca	2020		CGS Sementi S.P.A.	Italie
85	Spineto	2020		CGS Sementi S.P.A.	Italie
86	Rocaillou	2023	FR	Florimond Desprez Veuve et Fils	France
87	Berndur		DE		
88	RGT Soissur	2020	FR	RAGT 2n	France

89	Duragro		DE	Südwestdeutsche Saatzucht GmbH & Co. KG	Allemagne
90	Amidur		AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
91	Tennodur		AT	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
92	Limbodur		AT, HU	Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG	Autriche
93	Demokritos	2016	GR, FR		Grèce
94	BDHO 4523			Universitaet Hohenheim Landessaatzuchtanstalt Herrn Dr. Longin	Allemagne
95	BDHO 4524			Universitaet Hohenheim Landessaatzuchtanstalt Herrn Dr. Longin	Allemagne
96	BDHO 4525			Universitaet Hohenheim Landessaatzuchtanstalt Herrn Dr. Longin	Allemagne

## Annexe 2 : Echelle BBCH améliorée

### PRINCIPAUX STADES REPERES DE LA VEGETATION EN CEREALES

#### Echelle BBCH améliorée, les échelles individuelles

Céréales Witzemberger et al., 1989; Lancashire et al., 1991

#### Echelle BBCH des stades phénologiques des céréales

(froment, blé = *Triticum* sp. L., orge = *Hordeum vulgare* L., avoine = *Avena sativa* L., seigle = *Secale cereale* L.)

#### Stade principal 0: germination, levée

**00** semence sèche (caryopse sec)

**01** début de l'imbibition de la graine

**03** imbibition complète

**05** la radicule sort de la graine

**06** élancement de la radicule, apparition de poils absorbants et développement des racines secondaires

**07** le coléoptile sort de la graine

**09** levée: le coléoptile perce la surface du sol

#### Stade principal 1: développement des feuilles 1, 2

**10** la première feuille sort du coléoptile

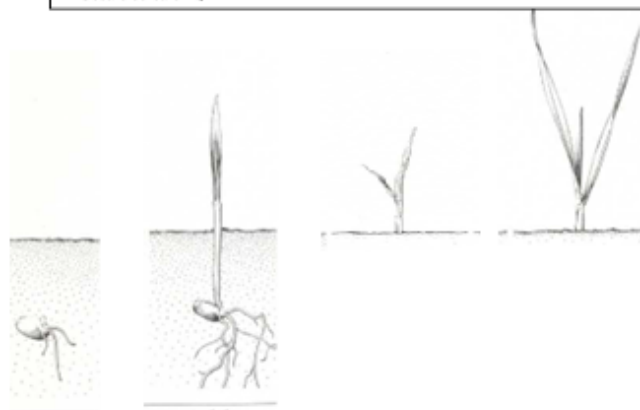
**11** première feuille étalée

**12** 2 feuilles étalées

**13** 3 feuilles étalées

**1** . et ainsi de suite ...

**19** 9 ou davantage de feuilles étalées



	Levée <sup>3</sup>	Une feuille	Deux feuilles	Trois feuilles
<b>Zadoks</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
Keller et Baggioloni	A	B	C	D
Feekes et Large	1	1	1	1

#### Stade principal 2: le tallage<sup>3</sup>

**20** aucune talle visible

**21** début tallage: la première talle est visible

**22** 2 talles visibles

**23** 3 talles visibles

**2** . et ainsi de suite ...

**29** fin tallage

**1** Une feuille est étalée si sa ligule est visible ou si l'extrémité de la prochaine feuille est visible

**2** Le tallage ou l'élancement de la tige principale peut intervenir avant le stade 13, dans ce cas continuez avec le stade 21

**3** Si l'élancement de la tige principale commence avant la fin du tallage alors continuez au stade 30.



	Début tallage	Plein tallage	Fin tallage
<b>Zadoks</b>	<b>21</b>	<b>26</b>	<b>30</b>
Keller et Baggioloni	E	F	H
Feekes et Large	2	3	4

2008





	Redressement	Premier nœud
<b>Zadoks</b>	<b>30</b>	<b>31</b>
Keller et Baggioloni	H	I
Feekes et Large	5	6

### Stade principal 3: élongation de la tige principale

**30** début montaison: pseudo-tiges et talles dressées, début d'élongation du premier entre-nœud, inflorescence au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage.

**31** le premier nœud est au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage

**32** le deuxième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du premier nœud

**33** le troisième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du deuxième nœud

**3 . et ainsi de suite ...**

**37** la dernière feuille est juste visible, elle est encore enroulée sur elle-même

**39** le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible



	Deuxième noeud	Apparition de la dernière feuille
<b>Zadoks</b>	<b>32</b>	<b>37</b>
Keller et Baggioloni	J	K
Feekes et Large	7	8

**Stade principal 4: gonflement de l'épi ou de la panicule, montaison**

**41** début gonflement: élongation de la gaine foliaire de la dernière feuille

**43** la gaine foliaire de la dernière feuille est visiblement gonflée

**45** gonflement maximal de la gaine foliaire de la dernière feuille

**47** la gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre

**49** les premières arêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)



	Ligule visible	Gaine éclatée	Emergence de l'épi
<b>Zadoks</b>	<b>39</b>	<b>45</b>	<b>50</b>
Keller et Baggioloni	L	M	N
Feekes et Large	9	10	10.1

**Stade principal 5: sortie de l'inflorescence ou épisaison**

**51** début de l'épisaison: l'extrémité de l'inflorescence est sortie de la gaine, l'épillet supérieur est visible

**52** 20% de l'inflorescence est sortie

**53** 30% de l'inflorescence est sortie

**54** 40% de l'inflorescence est sortie

**55** mi-épisaison: 50% de l'inflorescence est sortie

**56** 60% de l'inflorescence est sortie

**57** 70% de l'inflorescence est sortie

**58** 80% de l'inflorescence est sortie

**59** fin de l'épisaison: l'inflorescence est complètement sortie de la gaine



	Epi dégagé	Début floraison
<b>Zadoks</b>	<b>58</b>	<b>60</b>
Keller et Baggioloni	O	P
Feekes et Large	10.5	10.5.1

**Stade principal 6: floraison, anthèse**

**61** début floraison, les premières anthères sont visibles

**65** pleine floraison, 50% des anthères sont sorties

**69** fin floraison, tous les épillets ont fleuri, quelques anthères desséchées peuvent subsister

**Stade principal 7: développement des graines**

**71** stade aqueux: les premières graines ont atteint la moitié de leur taille finale

**73** début du stade laiteux

**75** stade milaiteux: contenu de la graine laiteux, les graines ont atteint leur taille finale mais sont toujours vertes

**77** fin du stade laiteux

**Stade principal 8: maturation des graines**

**83** début du stade pâteux

**85** stade pâteux mou: contenu de la graine tendre mais sec, une empreinte faite avec l'ongle est réversible

**87** stade pâteux dur: contenu de la graine dur, une empreinte faite avec l'ongle est irréversible

**89** maturation complète: le caryopse est dur et difficile à couper en deux avec l'ongle

**Stade principal 9: sénescence**

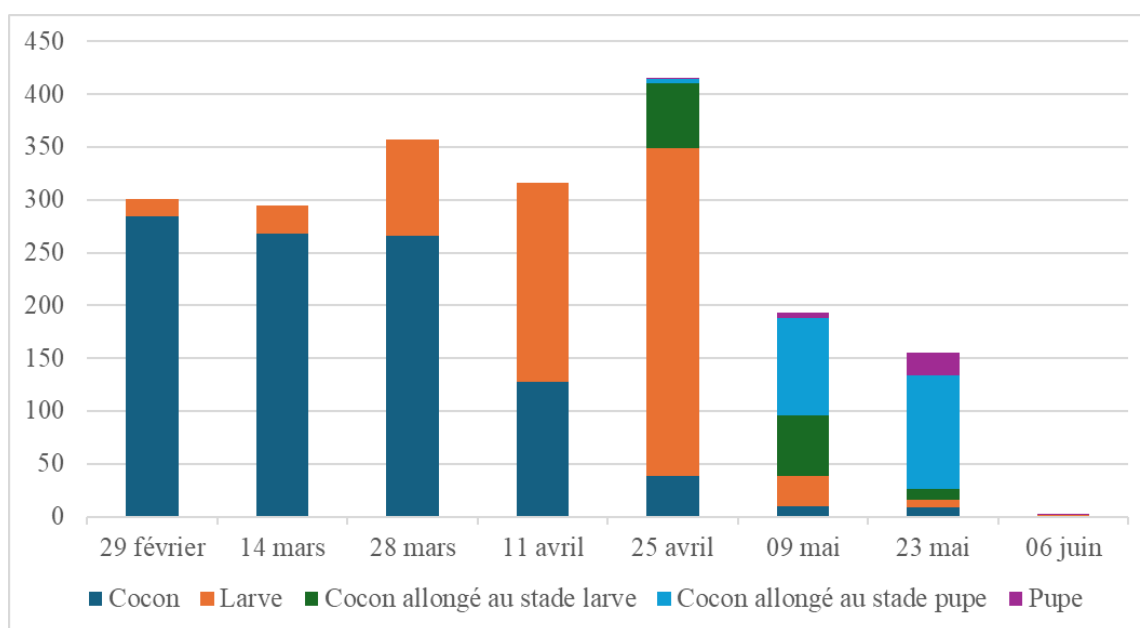
**92** sur-maturité: le caryopse est très dur, ne peut pas être marqué à l'ongle

**93** des graines se détachent

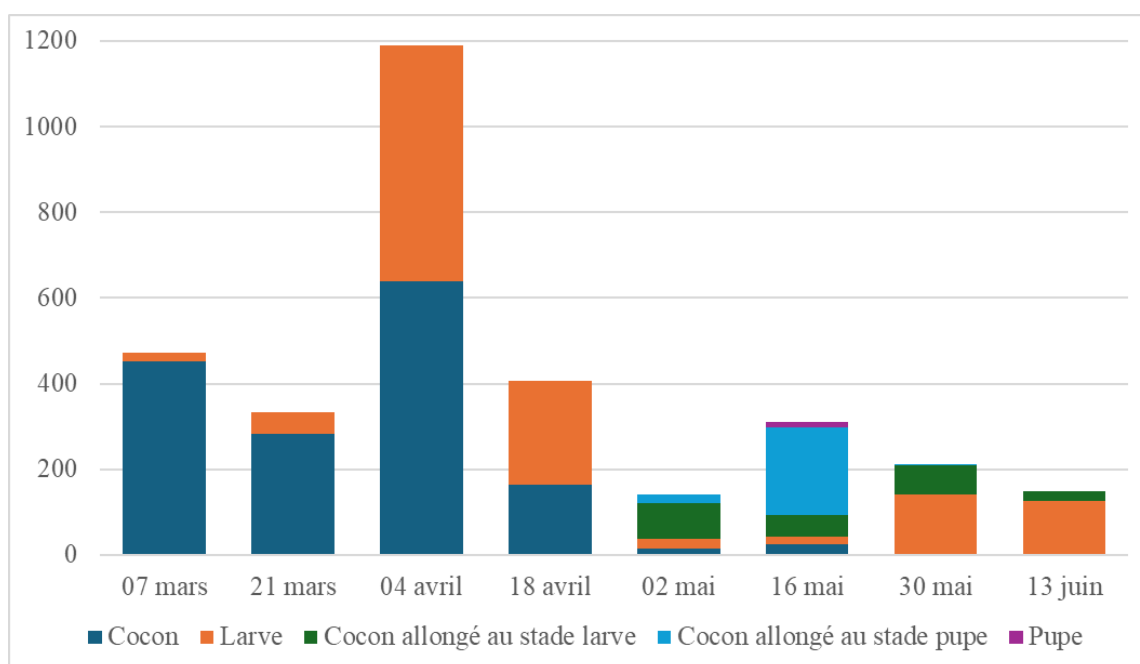
**97** la plante meurt et s'affaisse

**99** produit après récolte

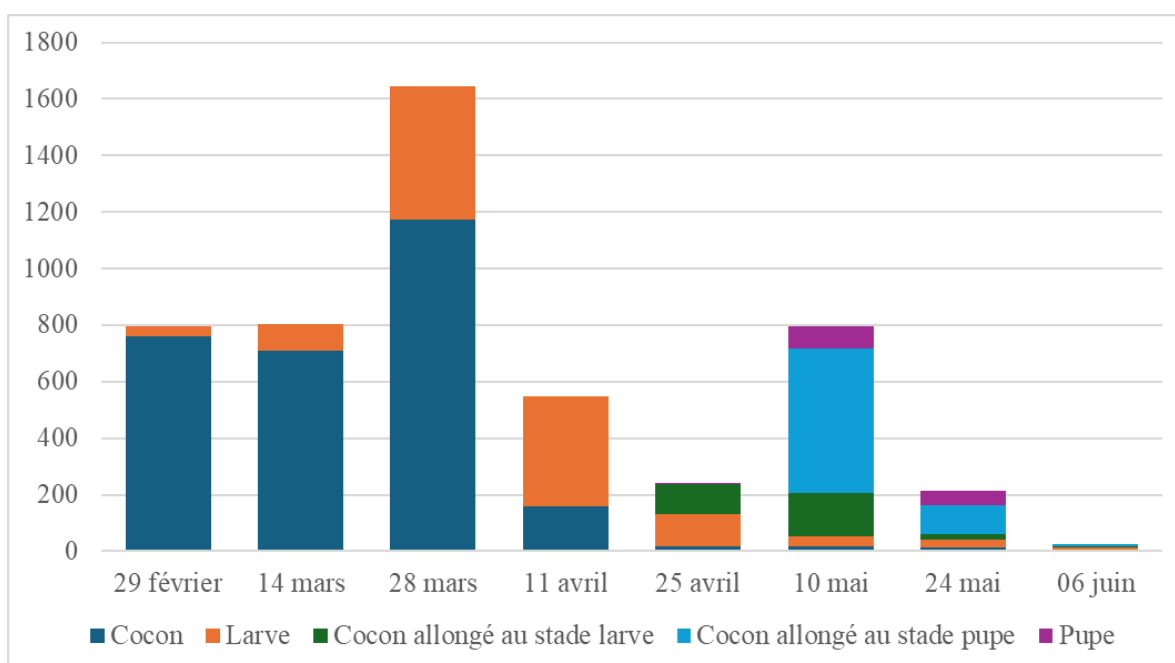
### **Annexe 3 : Suivi de la population de la terrine A**



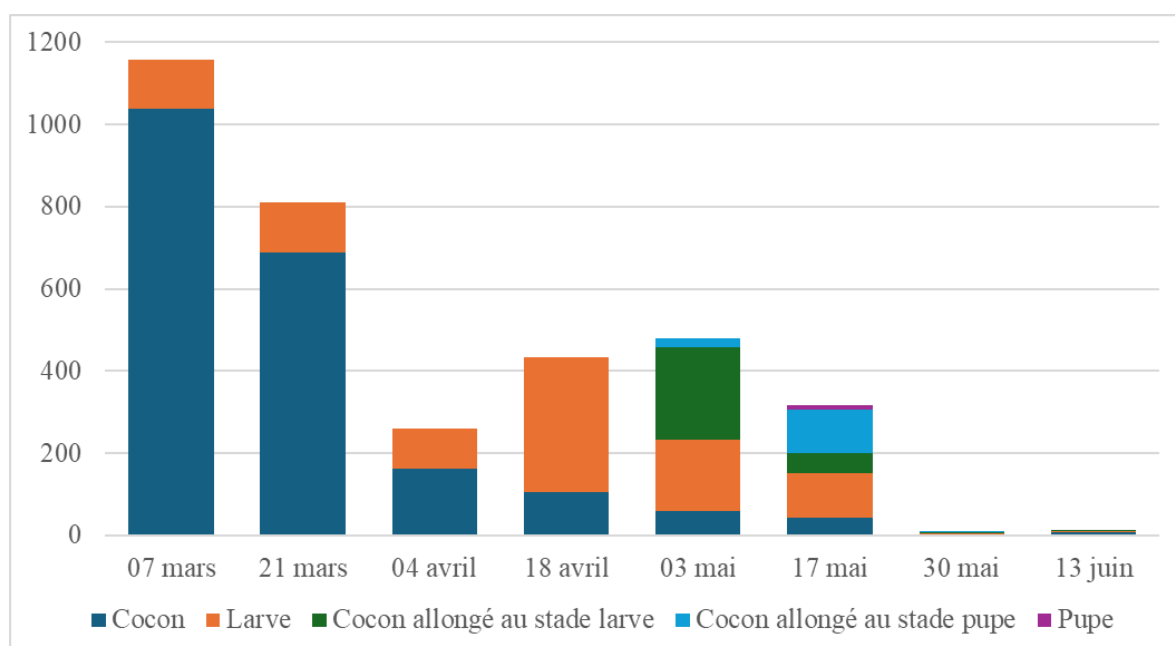
### **Annexe 4 : Suivi de la population de la terrine B**



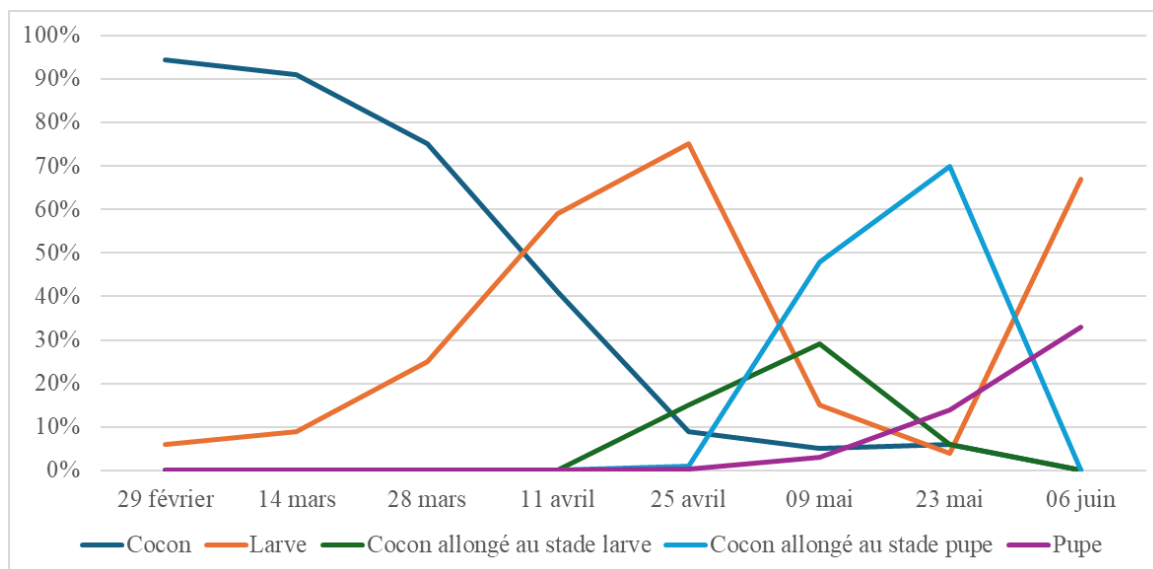
### **Annexe 5 : Suivi de la population de la terrine C**



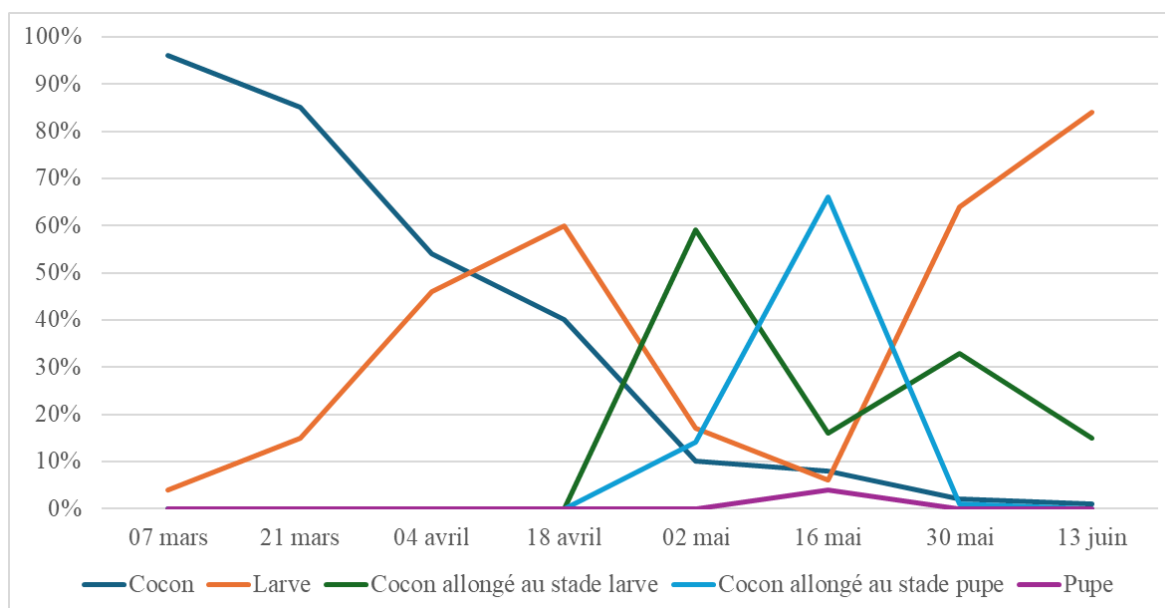
### **Annexe 6 : Suivi de la population de la terrine D**



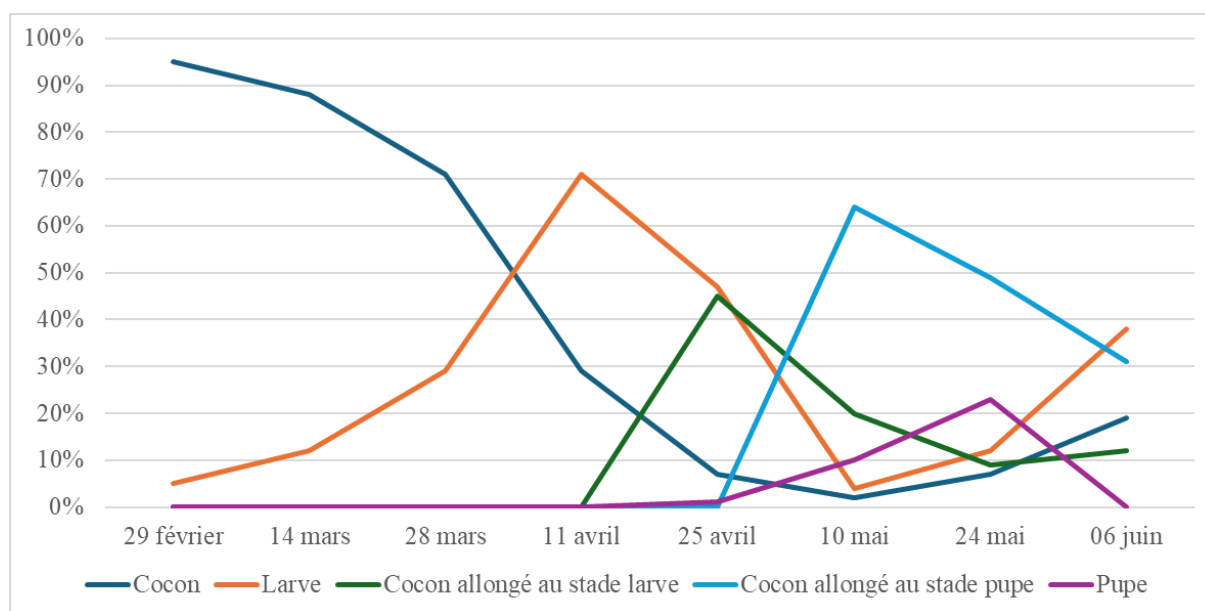
### **Annexe 7 : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine A**



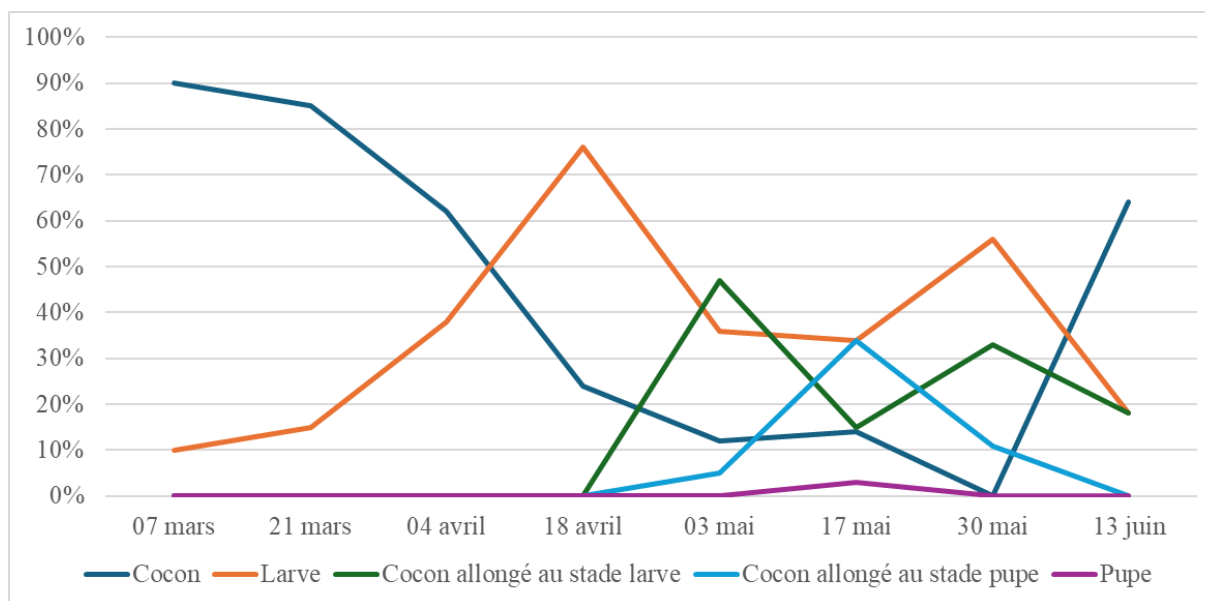
### **Annexe 8 : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine B**



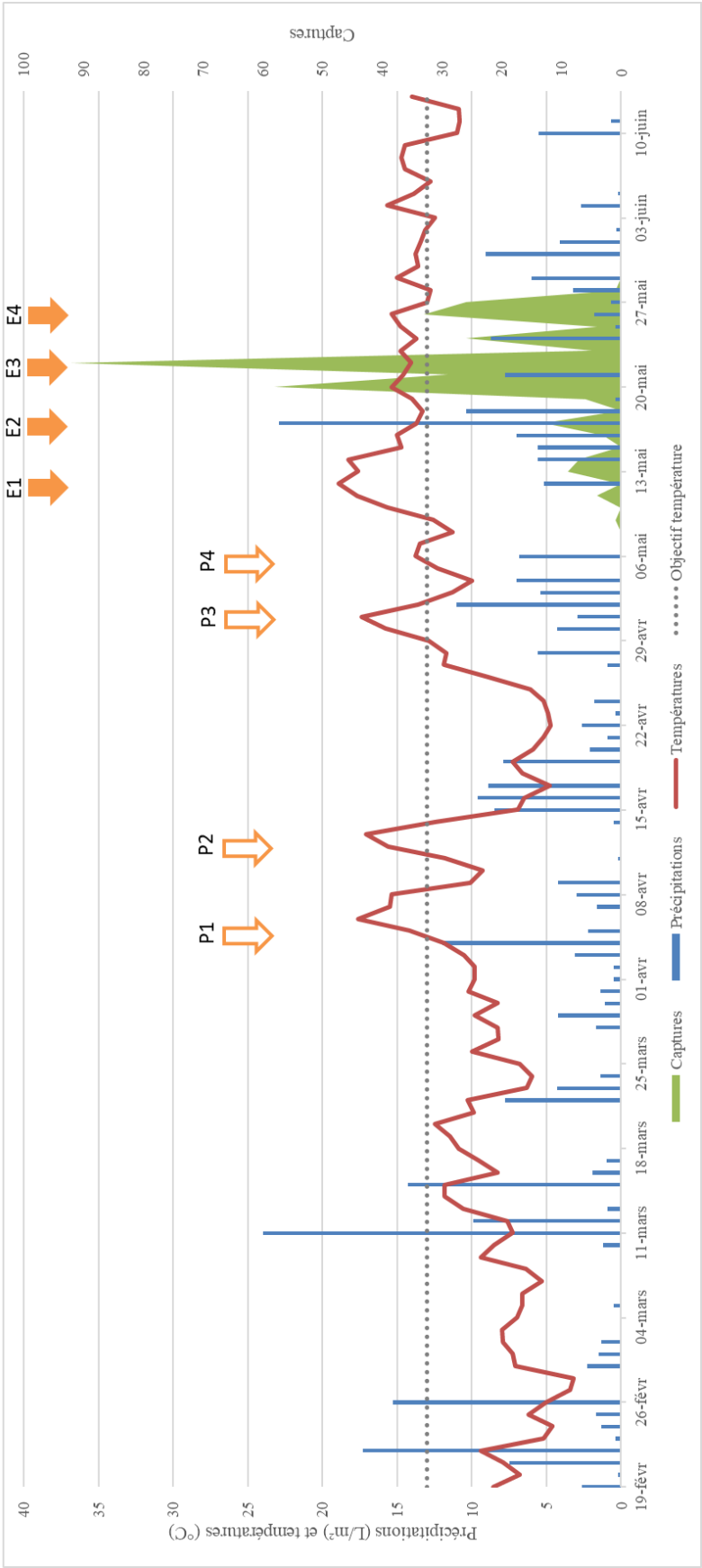
### **Annexe 9 : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine C**



### **Annexe 10 : Évolution des proportions des différents stades de développement au cours du temps dans la terrine D**

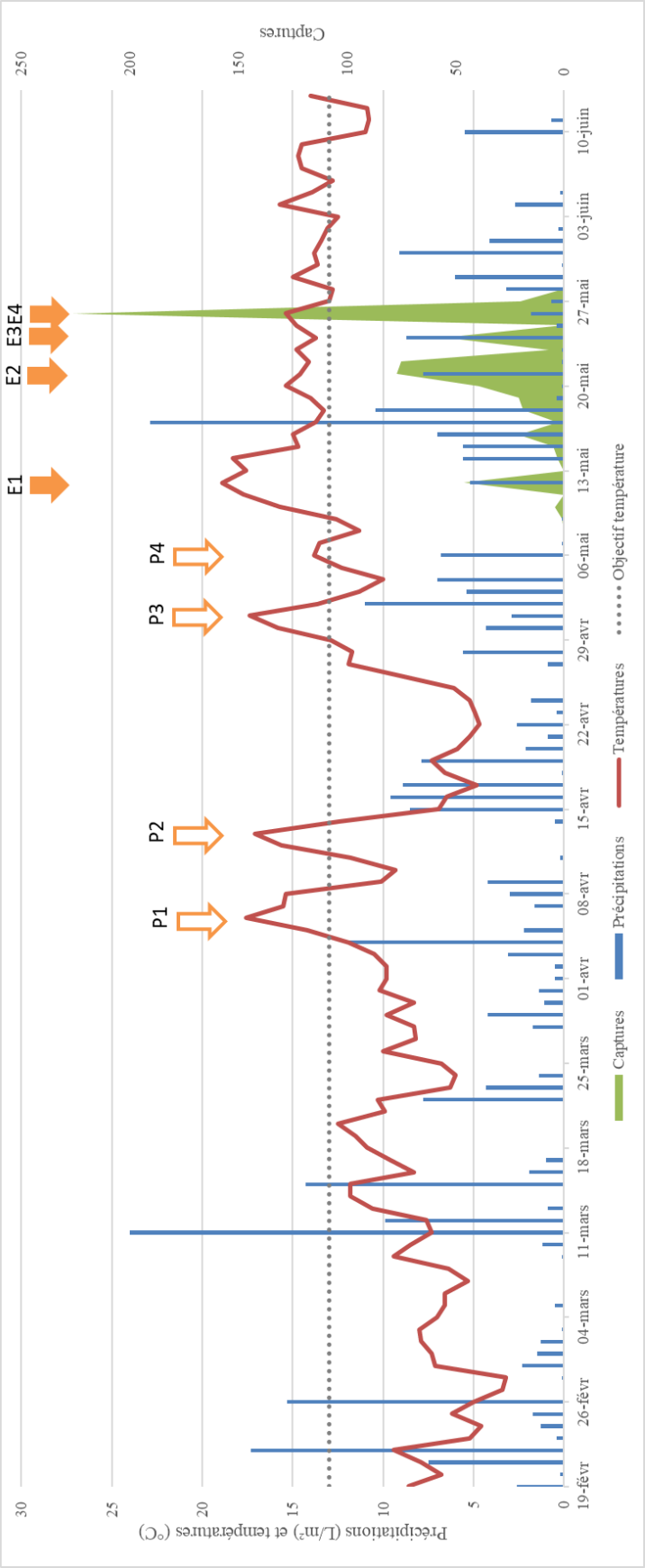


# **Annexe 11 : Schéma de l'activité des mâles en fonction des conditions climatiques**

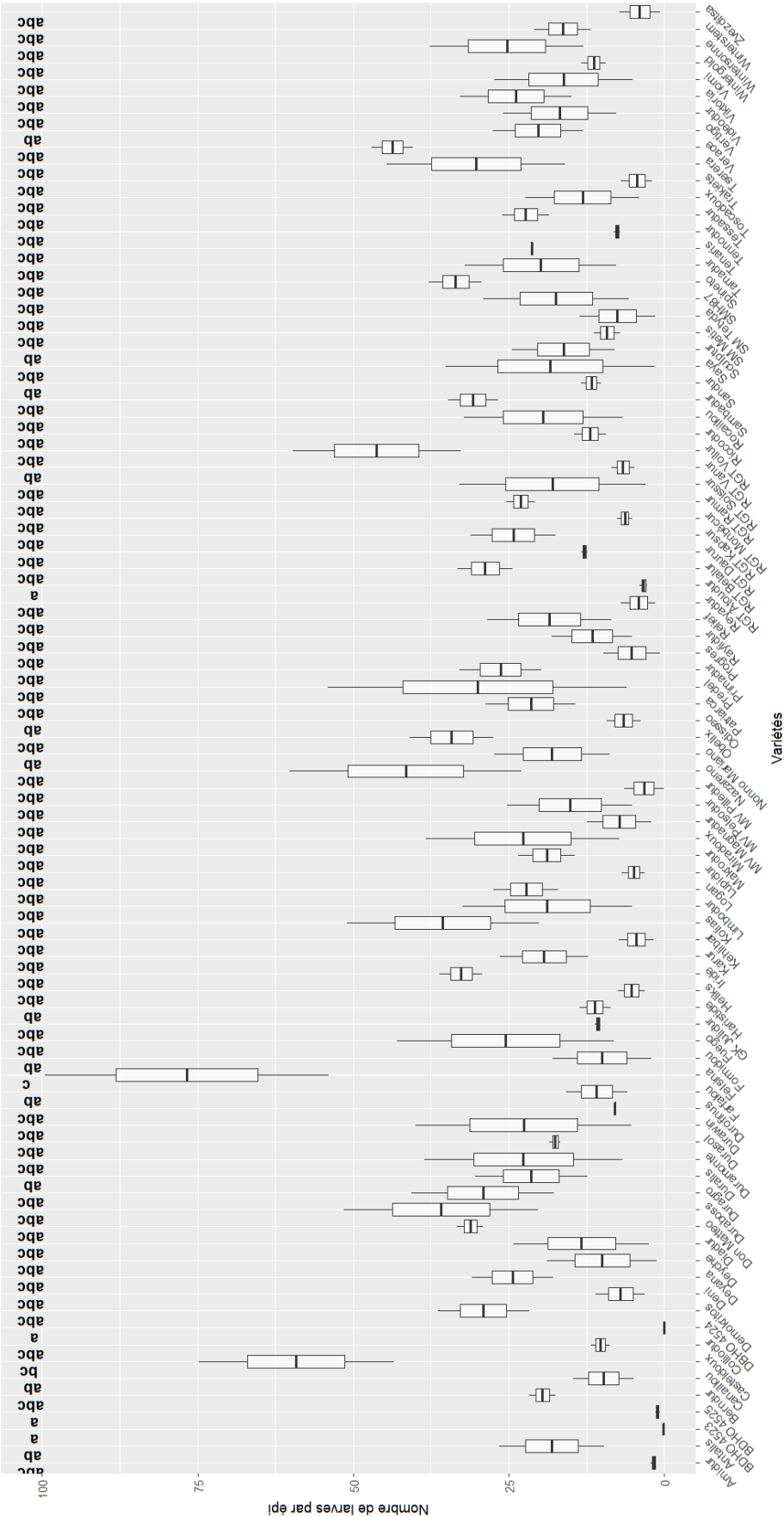




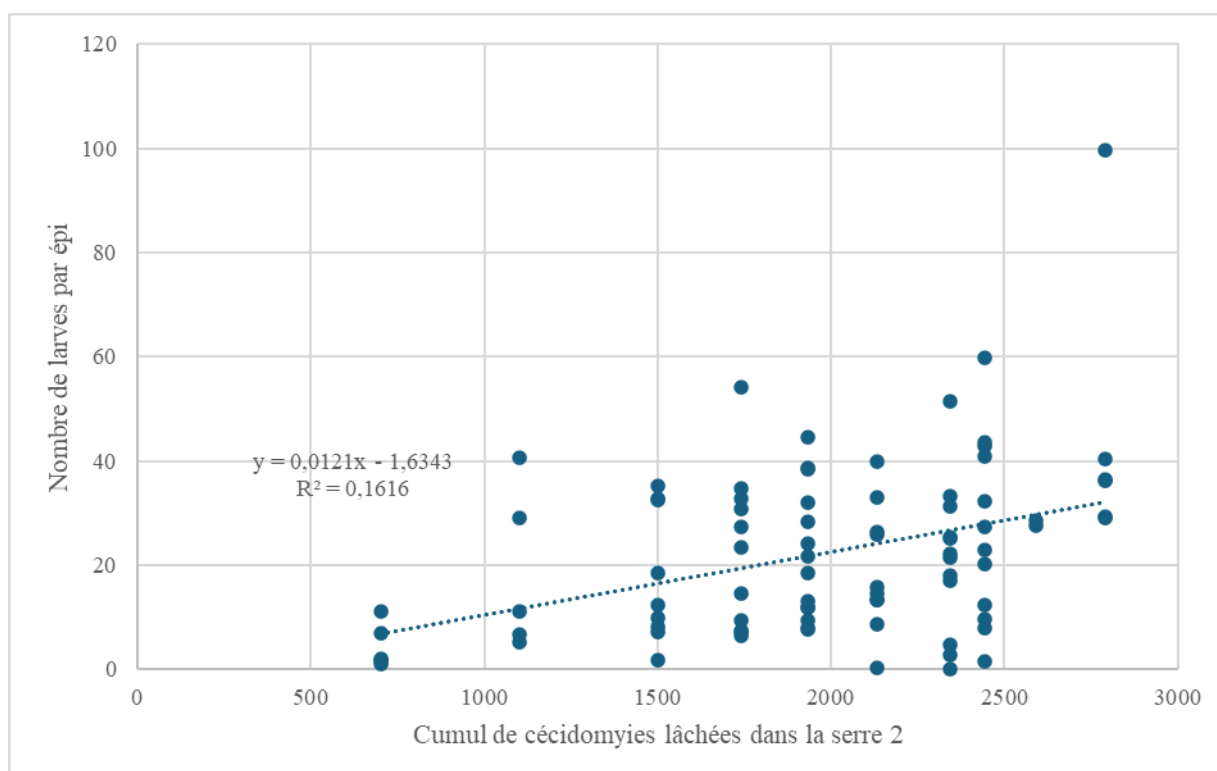
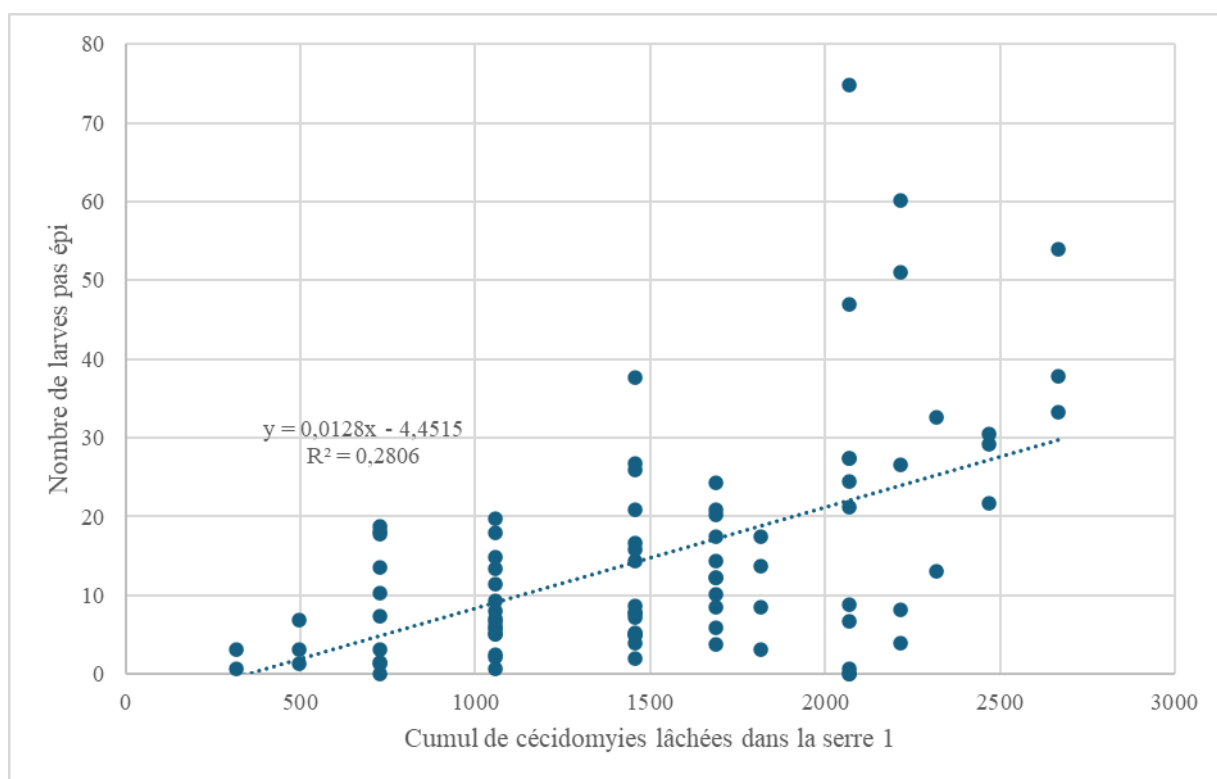
# **Annexe 12 : Schéma de l'activité des mâles en fonction des conditions climatiques dans la région de Gembloux**



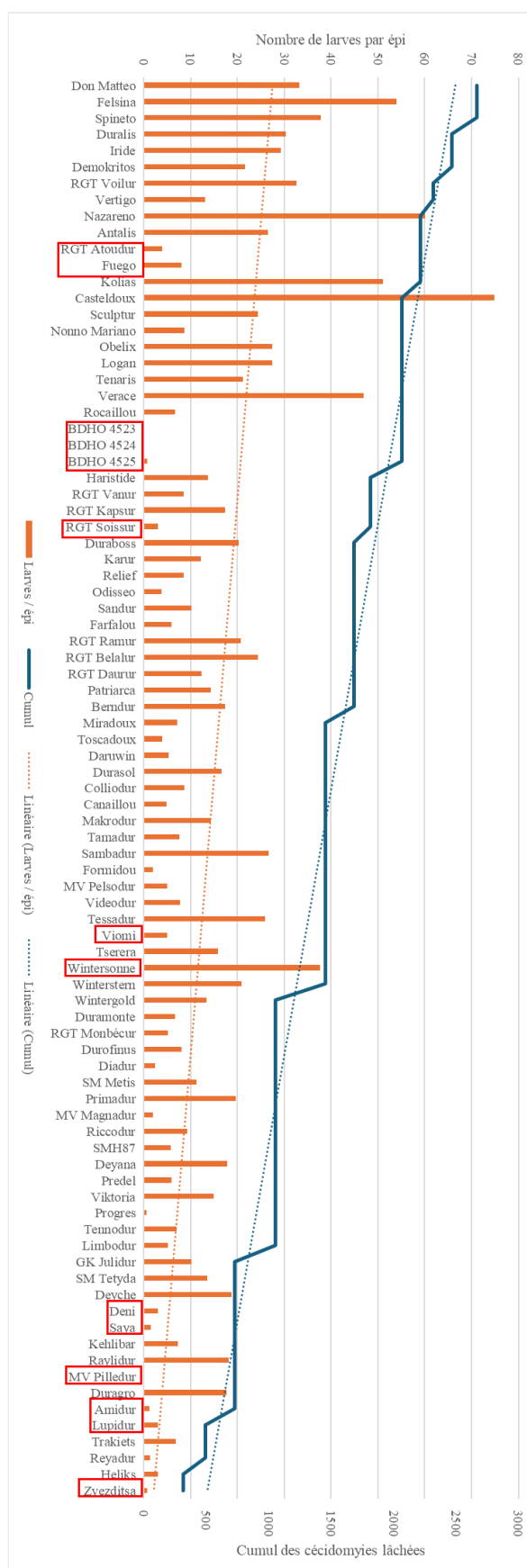
**Annexe 13: Boxplot du nombre de larves observées par variété.**



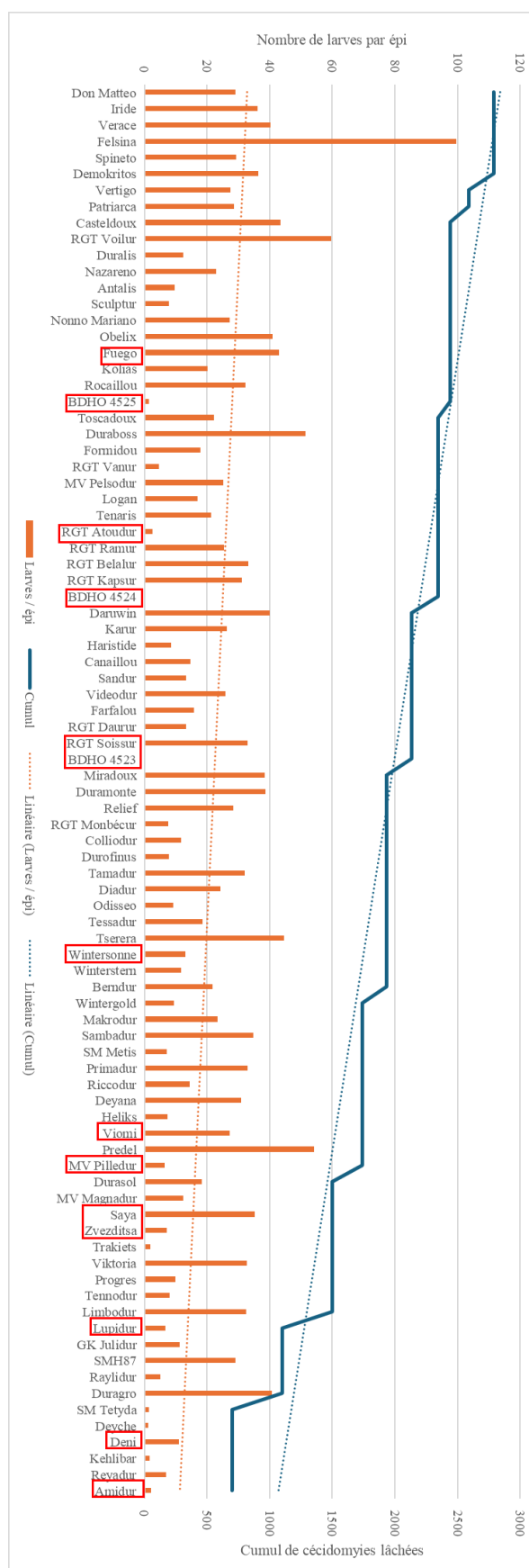
# **Annexe 14 : Relation entre le nombre de larves par épi et le cumul des lâchers dans les serres 1 et 2**



## Annexe 15 : Classement des variétés de la serre 1 en fonction de leur précocité, du cumul des lâchers et du nombre de larves observées.



## Annexe 16 : Classement des variétés de la serre 2 en fonction de leur précocité, du cumul des lâchers et du nombre de larves observées



## Annexe 17 : Résultats obtenus par le modèle de cotation

N°	Origine	Variétés	Cote de résistance			Exposition		Degré d'incertitude		Analyses Rstudio		Caractère
			Serre 1	Serre 2	Combiné	Serre 1	Serre 2	Serre 1	Serre 2	Larves	Cumul	
90	DE	BDHO 4524	9	9	9,0	25,9	22,9	19,6	20,9	a	a	Résistant
89	DE	BDHO 4523	9	8	8,5	25,9	20,3	19,6	22,2	a	a	Résistant
91	DE	BDHO 4525	8	8	8,0	25,9	24,1	19,6	20,4	ab	a	Résistant
74	HU	MV Pilledur	9	7	7,9	8,7	18,0	33,9	23,6	bcd	abc	Intéressant
85	AT	Amidur	8	7	7,5	8,7	12,4	33,9	28,4	abc	abc	Incertain
56	BG	Kehlibar	6	8	7,0	7,4	10,9	36,7	30,3	bcddefghij	abc	Incertain
66	FR	RGT Atoudur	7	7	7,0	29,6	22,9	18,4	20,9	bcd	a	Très intéressant
33	AT	Lupidur	7	7	7,0	6,1	14,5	40,4	26,3	bcd	abc	Incertain
65	BG	Progres	8	6	7,0	11,5	16,8	29,5	24,4	bcd	abc	Incertain
64	BG	Reyadur	8	6	6,9	6,1	12,4	40,4	28,4	bcd	abc	Incertain
58	BG	Zvezditsa	8	6	6,8	3,7	16,8	52,2	24,4	bcd	abc	Incertain
46	PL	SM Tetysda	5	8	6,6	8,7	12,4	33,9	28,4	bcd	abc	Incertain
51	BG	Deyche	5	8	6,6	8,7	12,4	33,9	28,4	cdefghijkl	abc	Incertain
59	BG	Trakiets	6	7	6,6	6,1	16,8	40,4	24,4	bcd	abc	Incertain
31	FR	RGT Vanur	6	7	6,5	22,3	22,9	21,2	20,9	bcd	ab	Intéressant
39	IT	Odisseo	7	6	6,5	19,1	19,0	22,9	22,9	bcd	ab	Intéressant
21	FR	RGT Monbécour	7	6	6,5	11,5	19,0	29,5	22,9	bcd	abc	Intéressant
55	BG	Heliks	7	6	6,4	3,7	18,0	52,2	23,6	bcd	abc	Incertain
60	BG	Raylidur	5	7	6,1	8,7	14,5	33,9	26,3	cdefghijkl	abc	Incertain
36	PL	SM Metis	5	7	6,0	11,5	18,0	29,5	23,6	bcd	abc	Incertain
22	AT	Colliodur	6	6	6,0	16,1	19,0	24,9	22,9	bcd	abc	Incertain
23	AT	Durofinus	6	6	6,0	11,5	19,0	29,5	22,9	bcd	abc	Incertain
86	AT	Tennodur	6	6	6,0	11,5	16,8	29,5	24,4	bcd	abc	Incertain
50	FR	Farfalou	7	5	6,0	19,1	20,3	22,9	22,2	bcd	ab	Intéressant
24	FR	Canailou	7	5	6,0	16,1	20,3	24,9	22,2	bcd	ab	Intéressant
4	FR	Toscadox	7	5	6,0	16,1	21,5	24,9	21,6	cdefghijkl	abc	Intéressant
30	FR	Formidur	7	5	6,0	16,1	21,5	24,9	21,6	bcd	ab	Intéressant
35	HU	MV Pelsodur	7	5	6,0	16,1	21,5	24,9	21,6	cdefghijkl	abc	Intéressant
41	HU	MV Magnadur	7	5	6,0	11,5	16,8	29,5	24,4	bcd	abc	Incertain
53	BG	Deni	7	5	6,0	8,7	12,4	33,9	28,4	bcd	abc	Incertain
29	AT	Diadur	7	5	6,0	11,5	19,0	29,5	22,9	cdefghijkl	abc	Incertain
54	BG	Saya	8	4	5,8	7,4	16,8	36,7	24,4	cdefghijkl	abc	Sensible
40	HU	GK Julidur	5	6	5,5	8,7	14,5	33,9	26,3	cdefghijkl	abc	Sensible
1	DE	Wintergold	5	6	5,5	11,5	18,0	29,5	23,6	cdefghijkl	abc	Sensible
83	FR	RGT Soissur	7	4	5,5	22,3	20,3	21,2	22,2	cdefghijkl	abc	Sensible
81	FR	Rocailou	7	4	5,5	25,9	24,1	19,6	20,4	defghijkl	abc	Sensible
69	DE	Winterstern	5	6	5,5	16,1	19,0	24,9	22,9	defghijkl	abc	Sensible
78	FR	Vertigo	6	5	5,5	38,1	33,4	16,2	17,3	defghijkl	ab	Sensible
32	IT	Nonno Mariano	6	5	5,5	25,9	25,7	19,6	19,7	defghijkl	ab	Sensible
26	FR	Sculptur	5	6	5,5	25,9	25,7	19,6	19,7	defghijkl	ab	Sensible
42	AT	Sandur	6	5	5,5	19,1	20,3	22,9	22,2	cdefghijkl	ab	Sensible
14	FR	Haristide	5	6	5,5	22,3	20,3	21,2	22,2	cdefghijkl	ab	Sensible
19	IT	Antalis	5	6	5,5	33,8	25,7	17,2	19,7	defghijkl	ab	Sensible
57	BG	Viomi	7	4	5,5	16,1	18,0	24,9	23,6	cdefghijkl	abc	Sensible
44	AT	Videodur	6	5	5,5	13,7	20,3	27,1	22,2	cdefghijkl	abc	Sensible
11	DE	Duralis	5	6	5,5	52,1	24,1	13,9	20,4	defghijkl	ab	Sensible
43	AT	Ricodur	6	5	5,5	11,5	18,0	29,5	23,6	cdefghijkl	abc	Sensible
47	PL	SMH87	7	4	5,4	9,9	14,5	31,7	26,3	cdefghijkl	abc	Sensible
87	AT	Limodur	7	4	5,4	9,9	16,8	31,7	24,4	cdefghijkl	abc	Sensible
13	FR	Relief	6	4	5,0	19,1	19,0	22,9	22,9	defghijkl	abc	Sensible
8	DE	Durasol	5	5	5,0	13,7	15,6	27,1	25,3	defghijkl	abc	Sensible
10	FR	Karur	5	5	5,0	19,1	20,3	22,9	22,2	defghijkl	abc	Sensible
18	IT	Don Matteo	5	5	5,0	99,7	49,8	10,0	14,2	ghijkl	abc	Sensible
25	DE	Makrodur	5	5	5,0	13,7	18,0	27,1	23,6	defghijkl	abc	Sensible
38	IT	Iride	5	5	5,0	66,3	49,8	12,3	14,2	ghijkl	abc	Sensible
48	IT	Logan	5	5	5,0	25,9	22,9	19,6	20,9	defghijkl	abc	Sensible
49	IT	Tenaris	5	5	5,0	25,9	22,9	19,6	20,9	defghijkl	abc	Sensible
67	FR	RGT Ramur	5	5	5,0	19,1	22,9	22,9	20,9	defghijkl	abc	Sensible
76	FR	RGT Daurur	5	5	5,0	19,1	20,3	22,9	22,2	cdefghijkl	abc	Sensible
79	IT	Patriarca	5	5	5,0	19,1	33,4	22,9	17,3	defghijkl	abc	Sensible
80	IT	Spineto	5	5	5,0	99,7	49,8	10,0	14,2	ghijkl	abc	Sensible
82	DE	Berndur	5	5	5,0	19,1	19,0	22,9	22,9	defghijkl	abc	Sensible
27	AT	Tamadur	6	4	5,0	16,1	19,0	24,9	22,9	defghijkl	abc	Sensible
7	DE	Durawin	7	3	5,0	16,1	20,3	24,9	22,2	defghijkl	abc	Sensible
70	IT	Fuego	6	3	4,5	33,8	25,7	17,2	19,7	defghijkl	abc	Sensible
45	AT	Tessadur	4	5	4,5	13,7	19,0	27,1	22,9	defghijkl	abc	Sensible
88	GR	Demokritos	5	4	4,5	52,1	39,5	13,9	15,9	efghijkl	abc	Sensible
34	IT	Obelix	5	4	4,5	25,9	25,7	19,6	19,7	ghijkl	abc	Sensible
77	FR	RGT Kapsur	5	4	4,5	22,3	22,9	21,2	20,9	defghijkl	abc	Sensible
75	FR	RGT Belalur	5	4	4,5	19,1	21,5	22,9	21,6	efghijkl	abc	Sensible
63	BG	Viktoria	5	4	4,5	11,5	16,8	29,5	24,4	defghijkl	abc	Sensible
3	FR	Miradoux	6	3	4,5	16,1	19,0	24,9	22,9	defghijkl	abc	Sensible
37	HR	Primadur	5	4	4,5	11,5	18,0	29,5	23,6	efghijkl	abc	Sensible
52	BG	Deyana	5	4	4,5	11,5	18,0	29,5	23,6	defghijkl	abc	Sensible
12	DE	Duramonte	6	3	4,4	11,5	19,0	29,5	22,9	defghijkl	abc	Sensible
68	DE	Wintersonne	3	5	4,0	16,1	19,0	24,9	22,9	efghijkl	abc	Sensible
28	AT	Sambadur	4	4	4,0	16,1	18,0	24,9	23,6	efghijkl	abc	Sensible
62	BG	Tserera	5	3	4,0	16,1	19,0	24,9	22,9	efghijkl	abc	Sensible
72	IT	Kolias	3	5	4,0	33,8	25,7	17,2	19,7	hijkl	abc	Sensible
84	DE	Duragro	5	3	3,9	8,7	14,5	33,9	26,3	efghijkl	abc	Sensible
61	BG	Predel	7	1	3,8	9,9	18,0	31,7	23,6	efghijkl	abc	Sensible
9	FR	RGT Voilur	5	2	3,5	38,1	25,7	16,2	19,7	ijkl	abc	Sensible
71	IT	Verace	3	4	3,5	25,9	44,7	19,6	14,9	ijkl	abc	Sensible
6	DE	Duraboss	5	2	3,5	19,1	21,5	22,9	21,6	ghijkl	abc	Sensible
16	IT	Nazareno	2	5	3,5	33,8	25,7	17,2	19,7	jkl	abc	Sensible
73	IT	Felsina	4	1	2,5	83,7	49,8	10,9	14,2	l	c	Sensible
2	FR	Casteldoux	1	3	2,0	25,9	25,7	19,6	19,7	kl	bc	Sensible