

Université Libre de Bruxelles

Faculté des Sciences

La cécidomyie orange du blé, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) : appréhension des risques et gestion intégrée

par

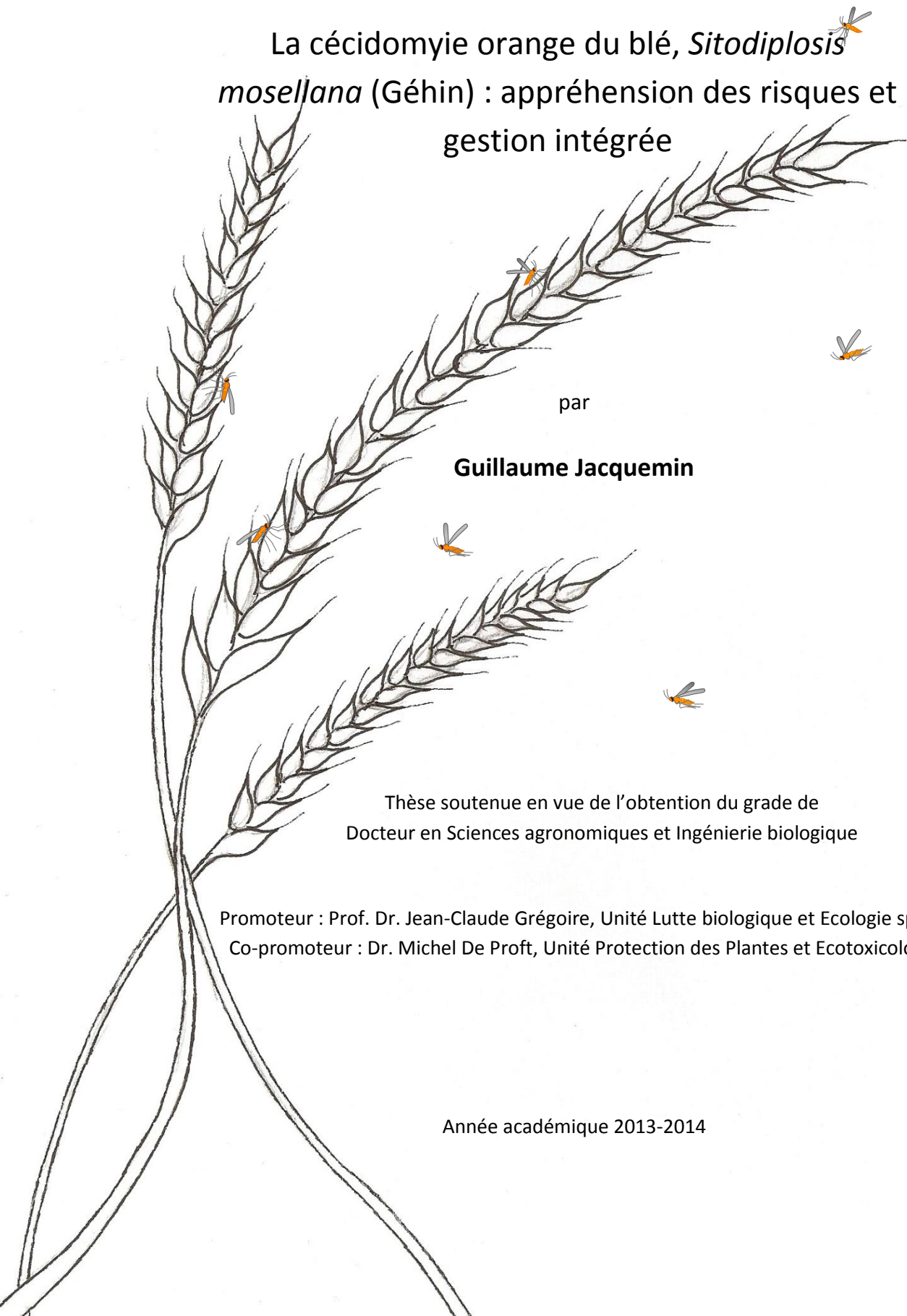
Guillaume Jacquemin

Thèse soutenue en vue de l'obtention du grade de
Docteur en Sciences agronomiques et Ingénierie biologique

Promoteur : Prof. Dr. Jean-Claude Grégoire, Unité Lutte biologique et Ecologie spatiale, ULB

Co-promoteur : Dr. Michel De Proft, Unité Protection des Plantes et Ecotoxicologie, CRA-W

Année académique 2013-2014



Résumé-Abstract

La cécidomyie orange du blé, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin), est un ravageur commun du froment. Présente sur les trois continents de l'hémisphère Nord, cette espèce est connue depuis deux siècles mais son contrôle reste difficile tant par sa présence discrète que par ses effectifs hautement variables. En Wallonie, les niveaux d'infestations sont globalement faibles mais atteignent localement des seuils inquiétants.

Au début des années 2000, la phéromone sexuelle de *S. mosellana* a été identifiée au Canada. Cette découverte a permis la fabrication de pièges qui ont considérablement amélioré la détection et la mesure des vols de cet insecte minuscule. De 2007 à 2010, les captures de *S. mosellana* ont été mesurées quotidiennement dans plusieurs dizaines de champs de Wallonie, aux historiques et aux couverts variés.

Les volumes de captures au piège à phéromone sexuelle ont été très importants. Il a fallu en étudier la signification, notamment en termes de mesure du risque. En effet, si les mâles sont efficacement capturés, seules les femelles constituent un risque de dégâts. L'interprétation correcte des captures à l'aide de ce type de piège, a été rendue possible par l'observation de différences fondamentales concernant la mobilité et la distribution spatiale des mâles et des femelles de *S. mosellana*. Même s'ils ne mesurent pas directement l'émergence proprement dite, les pièges à phéromone ont permis, grâce à leur très grande sensibilité, de préciser les connaissances sur l'émergence des adultes et de révéler que plusieurs vagues d'émergence pouvaient se succéder au cours d'une même année.

La prévision des émergences de la cécidomyie orange du blé, constitue la clé de voûte de la lutte contre ce ravageur dont un contrôle efficace par des insecticides ne se justifie éventuellement que lorsque la courte saison des pontes coïncide avec l'épiaison des froments. Les patrons d'émergence obtenus par les pièges ont été confrontés aux prévisions de différents modèles conçus en Europe ou en Amérique du Nord, et appliqués aux conditions météorologiques observées de 2007 à 2010. Aucun de ces modèles n'a prévu correctement les émergences sur l'ensemble des quatre années.

Les données d'émergence obtenues à l'aide des pièges à phéromone (effectifs élevés et relevés quotidiens) ont fait apparaître une relation de cause à effet entre, d'une part les vagues d'émergences et, d'autre part les épisodes pluvieux observés trois à six semaines plus tôt. L'écart entre une "pluie inductrice" et la vague d'émergence induite correspondante s'est avéré constant en termes d'accumulation de température : il équivaut à 160 degrés-jours en base 7°C. Partant de ce constat et des acquis des modèles antérieurs, un modèle prévisionnel original des émergences a été développé et validé sur le terrain. Allié à une meilleure connaissance de la biologie du ravageur, il constitue un outil majeur de la lutte intégrée.

Par ailleurs, les travaux menés ont également révélé l'existence d'un biais fréquent dans les essais d'évaluation des variétés, entraîné par la concentration des pontes de cécidomyie orange sur les premières parcelles atteignant le stade épiaison. Dans le système d'évaluation en vigueur, notamment pour l'inscription dans les catalogues nationaux, ce biais conduit à une sous-estimation du potentiel de rendement des variétés de blé les plus précoces.

Enfin, la découverte du rôle inducteur des pluies sur l'émergence des adultes a été exploitée en conditions contrôlées pour planifier des émergences échelonnées, et pour disposer, pendant une longue période, de jeunes adultes prêts à pondre. Cette application permet dès à présent de mesurer en serre le niveau de résistance des variétés exposées de façon homogène à l'insecte, quel que soit leur degré de précocité.

De diverses façons, cette étude contribue à une meilleure connaissance de la cécidomyie orange du blé et offre de nouveaux outils pour la lutte intégrée contre ce ravageur.

Orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin): risk evaluation and pest management

The orange wheat blossom midge, Sitodiplosis mosellana (Géhin), a common pest of wheat throughout the northern hemisphere, is known for two centuries but remains difficult to control due to its discrete behavior and its highly variable population level.

In general, the infestation levels in Wallonia (Belgium) are low, although levels could locally exceed worrying thresholds.

In the early 2000s, the sexual pheromone of S. mosellana has been identified in Canada. This discovery has led to the manufacturing of traps which have greatly improved the detection of this tiny insect. From 2007 to 2010 in Wallonia, S. mosellana captures have been daily registered in about 20 fields with different cropping histories and grown with different crops.

Insect captures by pheromone traps were numerous. Relation between amount of captures and risk measurement has been studied. As expected, only the males are attracted by the pheromone and the risk of ears infestation is mainly related to the presence of females. The correct interpretation of captures in pheromone traps has been established by the observation of fundamental differences between males and females concerning their mobility and their spatial distribution.

Despite the fact that pheromone traps are not real emergence traps, they have led to new information on adult emergence indicating that several emergence waves can be consecutive during the same year.

Forecasting the emergence of the adult orange wheat blossom midge is a key element on pest management. Insecticides treatments are sometimes justified when the egg laying period of the insect coincides with ear emergence of wheat. Emergence patterns established from captures of pheromone traps have been compared with the forecast of several models built in Europe or North America. These forecasting models were used with the meteorological data observed from 2007 until 2010. None of the six tested models provided a reliable forecast across the four years of our study.

Emergence data from catches in pheromone traps were very accurate because the number of catches were high and were taken each day. This emergence data showed a relation between emergence waves and rainfalls occurring during the preceding 3 to 6 weeks. The lag between inductive rain and emergence wave is constant in terms of temperature accumulation: it is equivalent

to 160 degree–days above 7°C. This discovery, combined with experience from previous models, was incorporated into a new forecasting model.

In addition, the present work has also revealed the existence of a common bias in variety evaluation trials leading sometime to the concentration of the eggs in the earliest earing variety. In the current evaluation system, this bias leads to a sub-evaluation of the yield for the most precocious varieties.

Finally, the discovery of the inductive rain for adult emergence has been used in the screening for resistant varieties to *S. mosellana* by providing adults during the complete duration of the test. This application of the model allows to measure, under controlled conditions, the level of resistance of all varieties (early and late heading varieties) which are exposed homogeneously to the insect.

In total, this study has contributed to a better understanding of the orange wheat blossom midge and provides some new tools in the management of this pest.

Remerciements

Une thèse, lit-on souvent, est le fruit de réflexions et d'investigations personnelles. Pourtant, elle tire sa richesse des multiples contacts et collaborations dont le doctorant peut bénéficier au cours de ses années de recherche. De ce travail collectif extrêmement enrichissant, je tiens à assumer, seul, les maladresses ou imperfections. Et dans le même temps, je veux exprimer ma profonde reconnaissance à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Il y a, bien sûr, les institutions, sans lesquelles, rien n'aurait été possible. D'abord, la Région wallonne qui a soutenu et financé ce projet. Le CRA-W, ensuite, qui m'a assuré un cadre de travail agréable et L'ULB, enfin, qui en m'accordant le soutien du monde académique, a permis la parution de cette thèse. Avec ces 3 institutions, je souhaite remercier, à titre personnel, Madame Pourtois, qui a suivi et soutenu le projet cécidomyie pour la Région Wallonne, Monsieur Destain pour le CRA-W, et Monsieur le Professeur Grégoire, mon promoteur de thèse à l'ULB.

Je souhaite également exprimer à Michel De Proft, toute ma gratitude. En effet, il est à l'origine du projet. En 2007, il n'a pas craint d'engager un « caractère vif », prompt à ruer dans les brancards et étranger au monde agricole. Bref un profil peu conventionnel pour le CRA-W. Cette thèse doit beaucoup à la liberté qu'il m'a accordée tout au long de ces années. Par ailleurs, Michel m'a encouragé à sortir des voies toutes tracées et à tenter des expérimentations farfelues qui auraient fait souvent sourire des chercheurs traditionnels. Par ses nombreuses relectures et remarques, il a su garantir à cette thèse un « côté » littéraire que nous affectionnons tous deux.

Sur la page de couverture, ne figure que mon seul nom. Pourtant, je n'étais presque jamais seul au champ ou au labo. Alain et moi, avons formé une équipe improbable mais finalement efficace. Alain, c'est 700 kilos de terre tamisée, 7.000 relevés de pièges et 300.000 cécidomyies dénombrées. Alain, c'est la générosité et la persévérance. Il a supporté, sans broncher, des exigences et un rythme de travail, que beaucoup de collaborateurs auraient refusés. Merci à lui.

Au CRA-W, j'ai pu également bénéficier, ponctuellement, de l'aide et de l'expérience de l'équipe des « mouches » : Agnès, Michel, Noël, Hervé et Daniel. Ils m'ont transmis leur approche du terrain et je leur dois une part importante de ce « bon sens agronomique » qui m'est si cher aujourd'hui.

Chaque année en juillet, une dizaine d'étudiants venaient nous prêter main-forte pour le dénombrement des larves. Ce travail, peu gratifiant au premier abord, se transformait souvent en compétition animée grâce à leur bonne humeur et à quelques notes de musique. Merci à eux et en particulier à ceux qui ayant acquis de l'expérience, ont formé les néophytes. Merci donc à Florence, à Romain, à Sylvain, à Louis, à Arthur, à Corentin et à Mona.

Plusieurs fois, cette thèse a failli glisser dans les tiroirs de l'abandon et de l'oubli. Elle n'aurait certainement pas vu le jour si Sandrine ne s'était pas investie dans la recherche consacrée à la « cécidomyie » et ne m'avait incité à coucher, sur papier, données et résultats amassés. Ce sont sa rigueur et sa motivation qui ont permis la parution de notre article. A l'heure où la recherche agronomique wallonne connaît des jours sombres et que les contrats de recherche sont de plus en plus précaires, je lui souhaite de pouvoir poursuivre dans ce domaine où elle pourra donner la pleine mesure de ses compétences et de sa passion.

Au CRA-W toujours, d'autres collègues ont également apporté leur contribution à ce travail : Bernard par sa passion de la photographie, Gilles et Viviane par leurs connaissances en statistique et beaucoup d'autres - ne serait-ce que par leur présence agréable.

Durant les périodes de captures, Alain et moi, ne possédant pas le don d'ubiquité, avons abandonné les relevés de pièges en dehors de la zone de Gembloux, à des amis et à des membres de ma famille. Une part importante du travail repose sur ces bénévoles que je remercie énormément. Merci à Geneviève, à Christian, à Thierry et à Charly.

Si ce travail a adopté un style résolument agronomique, c'est qu'il a été réalisé chez et grâce à des agriculteurs curieux et progressistes. Ces derniers nous ont permis de disposer de leurs champs et des informations nécessaires aux interprétations des mesures. Merci tout particulièrement à Philippe, à André, à Geert, à Pierre, à Olivier et à François.

L'évaluation des variétés de céréales et la recherche sur les résistances des plantes, ne sont devenues possibles que grâce à la collaboration des sélectionneurs et des expérimentateurs. Ils m'ont ouvert leurs champs d'essai et m'ont permis de découvrir un monde qui est mon quotidien aujourd'hui. Merci d'abord à Bernard, à Françoise et à Benoit pour les essais de la FUSAGx, merci à Emmanuelle, à Luc et à Jean-Luc pour les essais CRA-W. Un merci tout particulier aux sélectionneurs, Marie et Jozef, pour m'avoir transmis leur passion des céréales.

Ce travail aurait dû paraître début 2011 à la fin des expérimentations... Sa gestation a pris trois années de plus. Trois hivers de rédaction durant lesquels Jean-Pierre Goffart m'a permis de mettre de côté, une part de mes responsabilités quotidiennes. Cet aménagement du temps de travail, n'aurait pas été possible sans le soutien et sans l'autonomie de mon équipe. Merci donc à Laeti, à Greg, à Pascalou, à Omer, à Vincent et à Pascal.

L'écriture de ce document fut tantôt un plaisir, tantôt une tâche pénible. Sans le concours de mes relecteurs, la thèse eût certainement été moins compréhensible. Merci donc à Christian, à Jean-Claude, à Monsieur Moens, à Sandrine, à Marie et surtout à Michel qui a consacré de très nombreuses soirées, à déchiffrer mes tâtonnements scripturaux.

J'ai la chance d'avoir pour voisin, Monsieur Moens, cet agronome retraité, qui a consacré sa vie à l'étude des insectes et des mollusques. Doté d'une profonde gentillesse, Monsieur Moens m'a traduit des textes allemands dont l'importance s'est révélée capitale dans la compréhension des mécanismes menant à l'émergence des adultes de cécidomyie orange. C'est également sur ses conseils que le deuxième chapitre a pris forme. Par ailleurs, les notions de pédologie développées dans ce chapitre ainsi que les cartes qui y sont présentées sont, elles, le résultat de discussions avec Xavier Legrain, un autre passionné, qui manie les logiciels de cartographie et les concepts pédologiques avec une facilité déconcertante. Merci beaucoup à eux deux.

Bien que certains gènes m'unissent à une famille d'artistes, mes compétences en dessin sont plutôt décevantes. Mais mon « petit frère » Thomas a, lui, hérité de ce don familial. Quand je lui ai demandé d'illustrer la thèse, il a, de suite, accepté et le résultat dépasse de loin mes espérances, merci Tom.

Bien d'autres personnes méritent ma reconnaissance car elles ont contribué à faire de ces années de recherche, de très belles années. Si leur nom ne figure pas dans la liste qui précède, qu'elles sachent que je pense à elles avec beaucoup de plaisir et de gratitude.

Enfin, l'achèvement de cette thèse a pour moi, une saveur toute particulière : en effet, tout au long de sa conception, nos enfants m'ont aidé à en mesurer le prix. Moues de déception sur les petits visages, cris de représailles, culpabilité de ne pouvoir leur accorder plus de temps, matins blêmes d'insomnie... Beaucoup d'enfantements sont douloureux mais le moment de la naissance reste toujours aussi merveilleux.

Marie et moi avons souvent dit que nous aurions quatre enfants. Augustin, Adeline, Félix étaient déjà là... Le dernier est dans vos mains.

Bonne lecture.

Sommaire

RÉSUMÉ-ABSTRACT	I
REMERCIEMENTS	IV
SOMMAIRE	VII
CONTEXTE ET OBJECTIFS GÉNÉRAUX	1
PRÉSENTATION DU RAVAGEUR ET DE SON ENVIRONNEMENT	4
CHAPITRE 1 : LA CÉCIDOMYIE ORANGE DU BLÉ : PRÉSENTATION... ..	4
1.1. LES CÉCIDOMYIES DANS LE MONDE.....	5
1.1.1. <i>Diversité de formes et de comportements</i>	5
1.1.2. <i>Les cécidomyies du froment</i>	6
1.2. DESCRIPTION DE <i>SITODIPLOSI MOSCELLANA</i> (GÉHIN, 1857).....	8
1.2.1. <i>Adultes</i>	8
1.2.2. <i>Œufs</i>	9
1.2.3. <i>Larves</i>	9
1.2.4. <i>Pupes</i>	10
1.3. BIOLOGIE DE <i>S. MOSCELLANA</i>	10
1.3.1. <i>Cycle biologique</i>	10
1.3.2. <i>Sex-ratio</i>	13
1.3.3. <i>Protandrie</i>	13
1.3.4. <i>Longévité des adultes</i>	14
1.3.5. <i>Activité et vols</i>	14
1.3.6. <i>Déplacements</i>	15
1.4. PLANTES HÔTES ET STADE VULNÉRABLE.....	15
1.5. PRÉDATEURS, PARASITOÏDES ET PATHOGÈNES	17
CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DE LA CULTURE DES CÉRÉALES EN WALLONIE	20
2.1. FACTEURS CLIMATIQUES ET PÉDOLOGIQUES EN WALLONIE	21
2.1.1. <i>Climatologie de la région wallonne</i>	21
2.1.2. <i>Diversité des sols en région wallonne</i>	24
2.1.3. <i>Diversité des paysages et des cultures</i>	25
2.2. CULTURE DU FROMENT EN WALLONIE	26
2.2.1. <i>Répartition de la culture de froment</i>	26
2.2.2. <i>Place de la culture de froment dans les exploitations wallonnes</i>	26
2.2.3. <i>Suivi de la culture du semis à la récolte</i>	27
2.3. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET PHYTOTECHNIQUES DES ESSAIS.....	29
2.3.1. <i>Evolution des cultures de froment et conditions météorologiques</i>	29
2.3.2. <i>Localisation des essais</i>	31
EXPÉRIMENTATIONS ET DISCUSSIONS.....	35
CHAPITRE 3 : MESURE DES POPULATIONS DE <i>S. MOSCELLANA</i> EN WALLONIE	35
3.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	36
3.2. MESURE DES POPULATIONS DANS LES CHAMPS DE LA RÉGION DE GEMBLOUX.....	37
3.2.1. <i>Mesure des populations par analyse de sols</i>	37
3.2.2. <i>Mesure des populations par dénombrement des larves dans les épis</i>	39
3.3. DISTRIBUTION SPATIALE DE <i>S. MOSCELLANA</i> DANS LES CHAMPS	41
3.4. CONCLUSION	43

CHAPITRE 4 : CAPTURES AU PIÈGE À PHÉROMONE : POSSIBILITÉS, LIMITES ET INTERPRÉTATION	44
4.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	45
4.2. DESCRIPTION DU PIÈGE À PHÉROMONE ET DU RÉSEAU DE PIÉGEAGE	46
4.3. FIABILITÉ DU PIÈGE À PHÉROMONE EN TANT QU'OUTIL DE PRÉVISION DU RISQUE	47
4.4. LE PIÈGE À PHÉROMONE EN TANT QU'OUTIL DE MESURE DES POPULATIONS	49
4.5. DISTRIBUTION SPATIALE DES CAPTURES.....	51
4.5.1. <i>Distribution entre champs voisins et au sein de ces champs</i>	51
4.5.2. <i>Distribution à l'échelle de la Wallonie</i>	52
4.6. PIÈGE À PHÉROMONE : OUTIL DE DÉTERMINATION DES CONDITIONS DE VOL	54
4.7. MESURE DES DÉPLACEMENTS DE <i>S. MOSELLANA</i>	58
4.7.1. <i>Mobilité des mâles de S. mosellana</i>	58
4.7.2. <i>Mobilité des femelles de S. mosellana</i>	62
4.8. CONCLUSION	64
CHAPITRE 5 : ETUDE DES ÉMERGENCES DE <i>S. MOSELLANA</i>.....	65
5.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	66
5.2. PATTERN DE VOLS	67
5.2.1. <i>Pattern de vols en fonction des cultures</i>	67
5.2.2. <i>Epoque des vols en fonction des années</i>	71
5.3. PATTERN D'ÉMERGENCES	73
5.4. ÉMERGENCES ET RÉGIONS PÉDOCLIMATIQUES	75
5.5. CONCLUSION	77
CHAPITRE 6 : EVALUATION DES MODÈLES PRÉVISIONNELS DE L'ÉMERGENCE	78
6.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	79
6.2. DESCRIPTION DES MODÈLES EXISTANTS	79
6.2.1. <i>Modèles à une période de capitalisation de température</i>	79
6.2.2. <i>Modèle à deux périodes de capitalisation de température</i>	80
6.2.3. <i>Modèle à seuils de température</i>	81
6.3. EVALUATION DES MODÈLES EXISTANTS.....	82
6.4. EVALUATION DE MODÈLES AJUSTÉS	84
6.5. CONCLUSION	87
CHAPITRE 7 : DÉFINITION D'UN NOUVEAU MODÈLE PRÉVISIONNEL DES ÉMERGENCES	88
7.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	89
7.2. EVALUATION DES COMPOSANTES DES MODÈLES EXISTANTS	89
7.2.1. <i>Accumulation de températures requises par les larves pour sortir de leur cocon</i>	89
7.2.2. <i>Humidité nécessaire à la sortie de cocons</i>	93
7.2.3. <i>Seuil de température et pupaison</i>	94
7.3. RELATION ENTRE PLUIES ET ÉMERGENCES	95
7.4. DÉFINITION DE LA PLUIE INDUCTRICE	99
7.4.1. <i>Pluie nécessitant le dépassement préalable d'un seuil de température</i>	99
7.4.2. <i>Pluie intervenant après la capitalisation des températures nécessaires</i>	99
7.4.3. <i>La quantité d'eau</i>	100
7.5. PROPOSITION DU NOUVEAU MODÈLE	101
7.6. AMÉLIORATIONS POSSIBLES DE LA PRÉCISION DU MODÈLE.....	102
7.6.1. <i>Température de l'air et température du sol</i>	102
7.6.2. <i>Optimisation du calcul des sommes de température</i>	104
7.7. COUPLAGE DE LA PRÉVISION DES ÉMERGENCES À LA PRÉVISION DES ÉPIAISONS	106
7.8. EXTENSION DE L'UTILISATION DU MODÈLE PRÉVISIONNEL DES ÉMERGENCES	108
7.8.1. <i>Extension à d'autres populations de S. mosellana</i>	108
7.8.2. <i>Extension à d'autres espèces de cécidomyies</i>	108

7.9. CONCLUSION	110
CHAPITRE 8 : DÉGÂTS DE CÉCIDOMYIE ORANGE DU BLÉ : FRÉQUENCE ET AMPLEUR	112
8.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	113
8.2. FRÉQUENCE DES COÏNCIDENCES.....	116
8.3. NIVEAUX D'INFESTATION DES ÉPIS EN SITUATION DE COÏNCIDENCE	119
8.3.1. <i>Effet des conditions météorologiques sur les pontes</i>	119
8.3.2. <i>Concentration ou dilution des pontes</i>	120
8.4. QUANTIFICATION DES DÉGÂTS	120
8.5. CONCLUSION	123
CHAPITRE 9 : CÉCIDOMYIE ORANGE ET ÉVALUATION DES VARIÉTÉS DE FROMENT	124
9.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	125
9.2. IMPACT DE <i>S. MOSELLANA</i> DANS L'ÉVALUATION DU POTENTIEL DE RENDEMENT DES VARIÉTÉS.....	126
9.2.1. <i>Effet de la coïncidence sur l'évaluation des variétés</i>	127
9.2.2. <i>Concentration des attaques sur les parcelles les plus précoces</i>	129
9.2.3. <i>Biais expérimental induit par la cécidomyie orange</i>	130
9.3. IDENTIFICATION DE VARIÉTÉS RÉSISTANTES À <i>S. MOSELLANA</i>	133
9.3.1. <i>Méthodes d'exposition des variétés à S. mosellana</i>	133
9.3.2. <i>Evaluation de la résistance variétale à S. mosellana</i>	137
9.4. CONCLUSION	141
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	142
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DÉFINITIONS DES SIGLES	148
TABLES DES ILLUSTRATIONS	149
RÉFÉRENCES	152

Contexte et objectifs généraux

Extrêmement discrète par sa taille et ses mœurs, la cécidomyie orange du blé, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin), échappe aux observations classiques des céréaliers et des agronomes. Beaucoup considèrent cet insecte comme un ravageur d'importance secondaire, voire négligeable. A moins d'être très importantes, les pertes de rendement et de qualité occasionnées par *S. mosellana* sont généralement mal identifiées.

Le niveau des populations est très variable à la fois selon les régions et selon les années. Certains agro-entomologistes définissent la cécidomyie orange comme un "ravageur direct de type temporaire, à fluctuations rythmiques basées sur un cycle de 5 ans souvent masquées par des conditions climatiques défavorables" (Barnes 1956; Dajoz 1974; Skuhrava et al. 1984; Affolter 1990).

Les grandes infestations généralisées sont occasionnelles. En Belgique, l'année 1999 fut la dernière durant laquelle des pertes de rendement conséquentes ont affecté les récoltes (De Proft et Latteur 2000). En Angleterre, c'est en 1993 et 2003 que les infestations ont connu leur dernier pic (Oakley 1994; Oakley et al. 2005). En France, plus récemment, la Champagne a été confrontée à des vols très importants aux printemps 2008 et 2009 (Flodrops et Taupin 2010). Les pertes occasionnées sont difficiles à évaluer mais en se basant sur la proportion de grains attaqués, lors de telles pullulations, les champs atteints peuvent perdre de l'ordre de 5 à 10 % de rendement (Skuhrava et al. 1984; Nijveldt et Bokhorst 1973).

L'Europe, n'est pas le seul continent affecté par la cécidomyie orange. L'espèce est présente dans l'ensemble de l'hémisphère Nord. Sa présence en Amérique du Nord serait due à une importation par les colons au début du 19^{ème} siècle (Felt 1912; Sanderson 1915). Depuis, certaines provinces du Canada sont régulièrement victimes de pullulations importantes. Toujours dans l'hémisphère Nord mais en Chine et au Japon, les publications concernant *S. mosellana* sont légions (Katayama et al. 1987; Ni et Ding 1994 ; Wu et al. 2009, Duan et al. 2013). En 2013, la dernière forte infestation a concerné plus de 2.400.000 hectares dans les provinces de Henan et Hebei (Y.-Q. Wu, communication personnelle).

En dehors des pertes directes dues aux larves, il semble bien que la cécidomyie orange du blé participe à la dissémination de plusieurs maladies des épis telles que les fusarioses (*Fusarium* spp. et *Michrodochium nivale*) (Couture et al. 1995; Mongrain et al. 1997) ou la septoriose des épis (*Septoria nodorum*) (Wellso et Freed 1982). Outre les pertes de rendement, directement préjudiciables aux agriculteurs, les fortes infestations ont également des répercussions sur l'ensemble de la filière "céréales" : les grains endommagés sont plus enclins à la germination sur pied les rendant ainsi inutilisables pour la production de semences (Fritzsche et Wolfgang 1959). Par ailleurs, le grain est également déprécié dans ses qualités technologiques, notamment dans son aptitude à la panification (Miller et Halton 1960).

Pour protéger le blé de la cécidomyie orange, des millions d'hectares sont traités chaque année à l'insecticide. En 2004, au Royaume-Uni, 500.000 hectares ont été traités contre ce ravageur (Ellis et al. 2009; Bruce et Smart 2008). Par manque d'informations fiables, de nombreux agriculteurs réalisent chaque année, un traitement systématique sur chacun de leurs champs de blé. Vu l'étroitesse de la fenêtre d'application de l'insecticide et l'aspect sporadique des infestations, une

part très importante de ces traitements ne sont ni efficaces, ni justifiés. Les insecticides existant contre la cécidomyie n'étant pas sélectifs, c'est l'ensemble de l'entomofaune qui subit ces traitements.

Dans nos régions, la présence de la cécidomyie orange est attestée depuis longtemps (Marchal 1897). Quelquefois, des dégâts sensibles ont été soupçonnés par les agronomes et les chercheurs, mais aucune étude n'a mesuré de niveaux de populations, ni donné de renseignement sur la distribution de l'insecte selon les régions. En revanche, depuis les années 60, les pucerons des céréales, principalement *Sitobion avenae* et *Metopolophium dirhodum*, ont fait l'objet de travaux importants (Latteur et Nicolas 1987; Latteur et Oger 1987) qui ont abouti à un modèle prévisionnel des pullulations dès 1990 (Latteur et Oger 1990).

La protection contre les pucerons s'est améliorée, notamment par la mise en place d'un service d'aide à la décision émettant chaque semaine des avis pendant les périodes pertinentes (CADCO : Centre Agricole pour le Développement des Céréales et des Oléoprotéagineux). En revanche, faute de connaissance, la cécidomyie orange n'était pas prise en compte dans ces avis.

La présente thèse s'inscrit dans ce contexte où le manque de connaissance et de suivi de la cécidomyie orange empêchait le développement de la lutte intégrée contre l'ensemble des ravageurs du froment, de la montaison jusqu'au remplissage du grain.

Le premier objectif de la thèse était d'évaluer les niveaux de populations de cécidomyie orange en Wallonie par analyses de sols ou d'épis : cet objectif est développé au chapitre 3.

En tant qu'alternative à ces méthodes, efficaces mais fastidieuses, les pièges à phéromone ont été testés. Les relevés quotidiens d'une cinquantaine de ces pièges pendant 4 ans ont permis de caractériser leur potentiel comme outil de mesure des populations. Les captures au piège à phéromone n'ont pas la même signification que celles enregistrées à l'aide de pièges passifs, principalement en raison des différences de comportement et de déplacement entre mâles et femelles. Le deuxième objectif de la thèse, développé dans le chapitre 4, était d'identifier les éléments du comportement de l'insecte susceptibles d'affecter les captures aux pièges à phéromone.

En Belgique comme ailleurs, la cécidomyie orange a fréquemment donné lieu à des traitements insecticides aux alentours de l'épiaison du froment, particulièrement dans les années qui suivirent les infestations de 1999 et de 2003. Paradoxalement, il y avait peu d'études concernant l'efficacité et la pertinence de tels traitements. Dans le cas de la cécidomyie orange, juger de la pertinence d'un traitement, c'est avant tout déterminer le niveau de coïncidence entre l'émergence des adultes et la phase vulnérable du froment. Sans coïncidence entre ces événements, le risque de dégât est nul et tout traitement est superflu. Le troisième objectif de la thèse était, précisément, de mesurer les risques de dégâts de cécidomyie orange. Cet objectif est développé dans les chapitres 5, 6 et 7. Rapidement, il est apparu que les pièges à phéromone permettaient de déterminer avec précision, les périodes d'émergence apportant un nouvel éclairage sur les mécanismes impliqués. De ces informations, un modèle prévisionnel de l'émergence des adultes a été établi prenant en compte les conditions météorologiques prévalant durant la fin du développement larvaire de l'insecte.

Le quatrième objectif, développé au chapitre 8, était de mesurer la fréquence et l'ampleur des dégâts occasionnés par la cécidomyie orange. La coïncidence est une condition *sine qua non* de l'infestation des épis, cependant d'autres facteurs peuvent également déterminer les dégâts

occasionnés par le ravageur. Parmi ces facteurs, les conditions météorologiques, la localisation et la taille des champs ont été étudiés.

Le dernier chapitre est consacré à l'interaction entre la plante-hôte et le ravageur. Des recherches récentes au Canada et au Royaume-Uni ont mis en évidence des mécanismes de résistance de certaines variétés de froment (Ding et al. 2000) face à *S. mosellana*. Le cinquième et dernier objectif était la caractérisation des variétés cultivées en Belgique quant à leurs éventuelles aptitudes à résister à la cécidomyie orange. Le chapitre 9 y est consacré.

Chapitre 1 :

La cécidomyie orange du blé : présentation



Le premier chapitre est consacré à la présentation de la cécidomyie orange du blé. Il contient les éléments bibliographiques qui permettront de comprendre les travaux présentés par la suite.

1.1. Les cécidomyies dans le monde

1.1.1. Diversité de formes et de comportements

Les Cecidomyiidae sont l'une des plus vastes familles de l'ordre des Diptères. Près de 5700 espèces sont décrites et bien d'autres restent à étudier (Skuhrava 2006). Toutes ont l'aspect de petits moustiques de 0,5 à 3 mm, rarement plus longs que 8 mm, avec de longues antennes, spécialement les mâles. Les nervures alaires sont réduites : on compte généralement trois ou quatre nervures longitudinales. On différencie les Cecidomyiidae des autres Nématocères par l'absence d'éperons au niveau des tibias.

Le terme "cécidomyie" est emprunté au grec ancien et signifie "mouche à galle". Certaines espèces de cette famille sont en effet capables d'induire la formation de galles plus ou moins volumineuses et élaborées par leurs plantes hôtes.

Sur base de fossiles, la famille des Cecidomyiidae serait vieille d'au moins 150 millions d'années (Dorchin 2008). L'apparition des Angiospermes aurait permis une grande diversification des espèces au Crétacé.

Les Cecidomyiidae sont divisées en quatre sous-familles (Figure 1) (Dorchin 2008). La première, les Catotrichinae, ne compte que sept espèces considérées comme ancestrales. Les Porricondyliinae et les Lestrimiinae sont composées exclusivement d'espèces mycétophages. La dernière, les Cecidomyiinae, comprend des espèces mycétophages mais également des zoophages. Parmi celles-ci, certaines sont prédatrices de pucerons ou même d'autres cécidomyies (Imms 1957). Cependant, ces comportements alimentaires sont minoritaires, la grande majorité des Cecidomyiinae étant phytophages. Bon nombre d'entre elles sont inféodées à des plantes cultivées dont elles constituent quelquefois des ravageurs importants.

Chez les cécidomyies, le stade adulte est très bref : quelques jours, voire quelques semaines. A ce stade, des pièces buccales réduites ne permettent que l'absorption de liquide. Chez la plupart des espèces, les adultes ne s'alimentent pas (Dorchin 2008). Pour les espèces considérées comme "ravageurs", c'est durant le stade larvaire que les dégâts sont occasionnés. La durée de la phase larvaire est très variable. Elle va de quelques semaines à plusieurs années.

Les cécidomyies sont présentes dans l'ensemble des régions du monde (Figure 2) (Skuhrava 2006). La majorité des espèces décrites sont localisées dans l'hémisphère Nord, mais ceci est probablement lié à la distribution des entomologistes. De nombreuses espèces sont encore à décrire notamment dans des zones moins connues comme les forêts tropicales humides (Maia 2001). La majorité des espèces présentent une répartition limitée à une région zoogéographique (Skuhrava 2006). La plupart des exceptions à cette règle sont des ravageurs de grandes cultures qui ont profité des déplacements de l'homme et du transport de denrées pour franchir les océans et les chaînes de montagnes. La mouche de Hesse, *Mayetiola destructor* (Say), est ainsi devenue un des ravageurs des céréales les plus importants au monde (Botha et al. 2005).

En France, 662 espèces de cécidomyies sont référencées, dont 42 sont considérées comme d'importance agricole ou forestière (Pierre 2013). Parmi les ravageurs les plus notables de nos régions, citons notamment la cécidomyie des poirettes, *Contarinia pyrivora* (Riley), la cécidomyie des

siliques de crucifères, *Dasineura brassicae* (Winnertz), la cécidomyie du chou-fleur, *Contarinia nasturtii* (Kieffer) et plusieurs cécidomyies inféodées aux céréales.

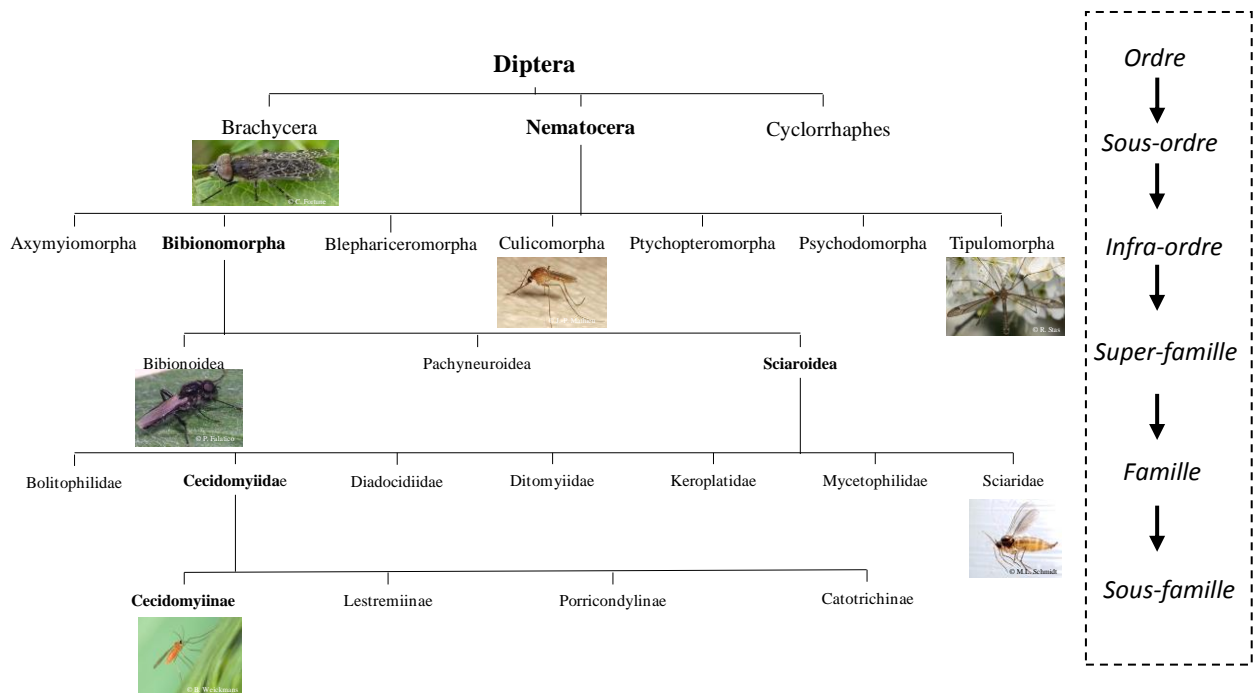


Figure 1 : arbre taxonomique des Cecidomyiinae

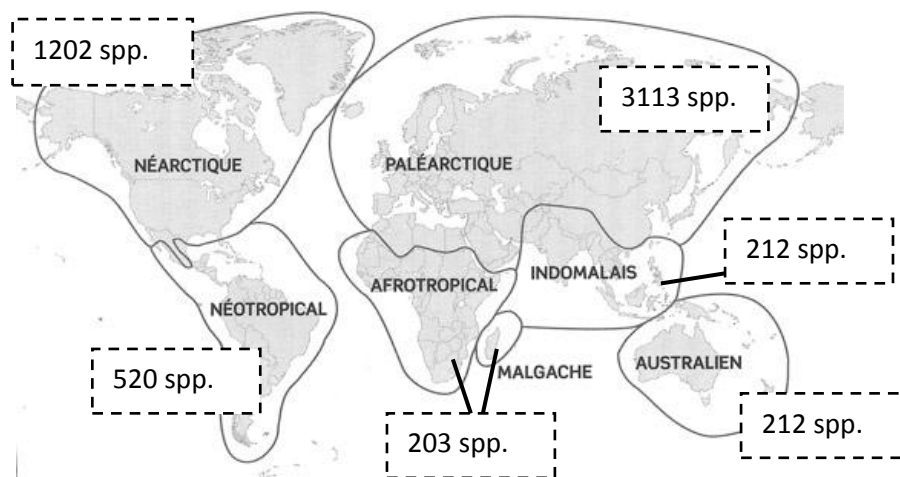


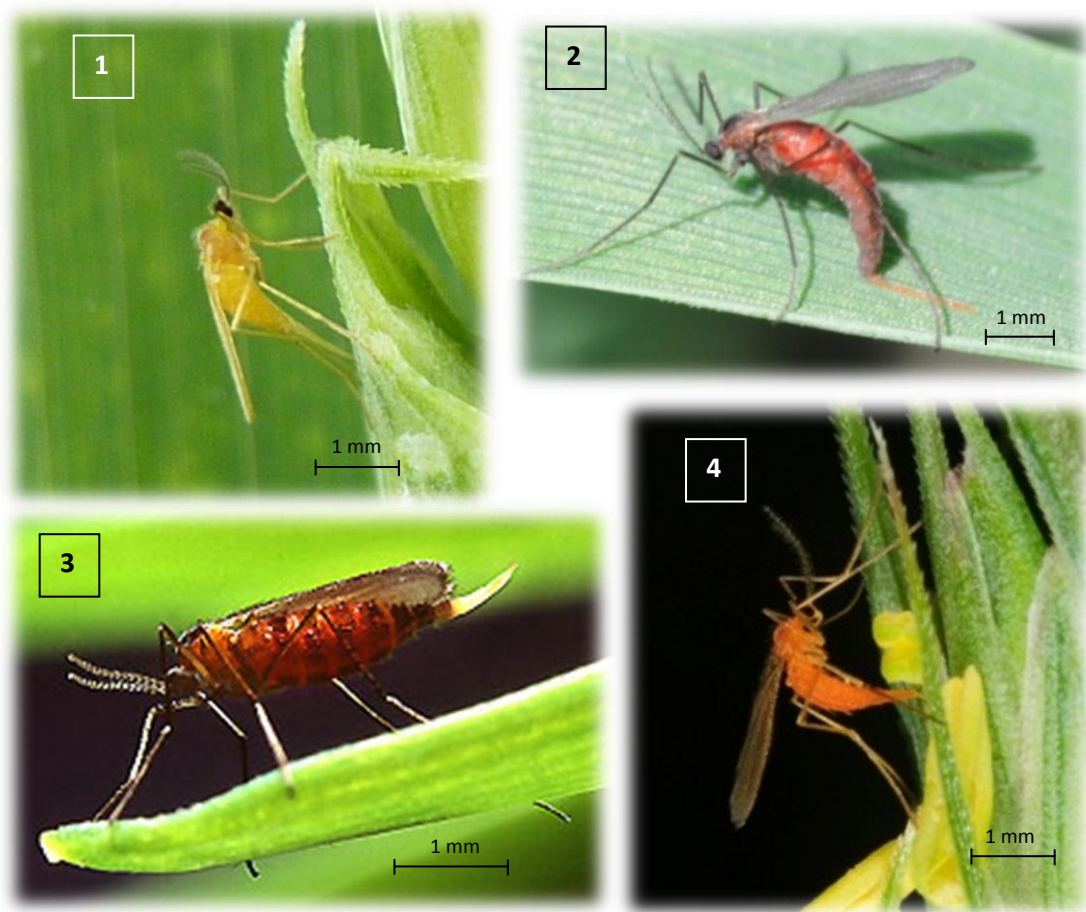
Figure 2 : nombres d'espèces de cécidomyies décrites par zone zoogéographique (Skuhrava 2006)

1.1.2. Les cécidomyies du froment

Parmi les ravageurs du froment, on compte quatre espèces importantes de cécidomyies : la cécidomyie équestre (*Haplodiplosis marginata* (von Roser)), la mouche de Hesse (*Mayetiola destructor* (Say)), la cécidomyie jaune du blé (*Contarinia tritici* (Kirby)) et la cécidomyie orange du blé (*Sitodiplosis mosellana* (Géhin)).

Les larves des deux premières s'attaquent aux tiges des céréales, celles de la cécidomyie jaune, aux organes floraux et aux grains en tout début de formation. Les larves de la cécidomyie orange, elles, se nourrissent aux dépens de grains en formation.

Jusque dans les années cinquante, la cécidomyie jaune était prédominante en Europe. Depuis l'avènement des moissonneuses-batteuses et donc du battage au champ, les larves de cécidomyie orange, plus tardives à se laisser tomber des épis, ne sont plus exportées vers les zones de battage. Elles peuvent désormais boucler leur cycle de développement dans des conditions favorables. Depuis, les populations de cécidomyie orange ont surpassé celles de cécidomyie jaune (Skuhrava et al. 1984).



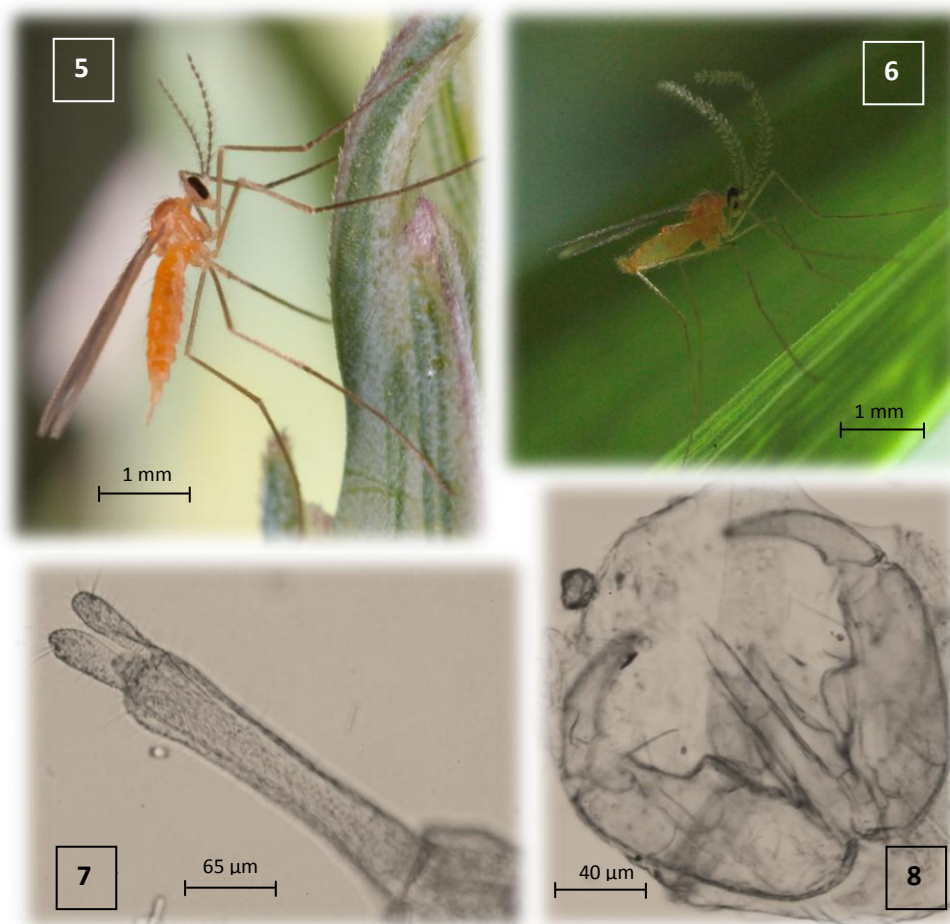
Photos

- 1 : cécidomyie jaune du blé (auteur: M. Killmayer)
- 2 : cécidomyie équestre (auteur : F. Censier)
- 3 : mouche de Hesse (auteur : S. Bauer)
- 4 : cécidomyie orange du blé (auteur: O. Charlier)

1.2. Description de Sitodiplosis mosellana (Géhin, 1857)

1.2.1. Adultes

La cécidomyie orange du blé adulte mesure 1,5 à 3 mm de long et est de couleur rouge-orangé. Ses longues pattes fines et son aspect frêle lui donnent l'apparence d'un petit moustique (Photos 5 et 6). Les appendices génitaux sont des caractères spécifiques (Harris 1966). Les genitalia mâles se composent d'une large pince génitale et d'un gonocoxa qui semble écorné (Photo 8). Chez les femelles, l'ovipositeur est constitué d'une tarière rétractile munie de deux lobes elliptiques (Photo 7). Les mâles se distinguent également des femelles par leur taille plus petite (1,5 à 2,5 mm / 2 à 3 mm) ainsi que par la forme et la longueur de leurs antennes (Barnes 1928). Les antennes des mâles sont plumeuses et les 12 articles présentent un double étranglement allongé qui les divise en 24 nodules. Chez les femelles, le simple étranglement des 12 articles représente un tiers de leur longueur (Affolter 1990).



Photos

5 : femelle de *S. mosellana* (auteur : O. Charlier)

6 : mâle de *S. mosellana* (auteur : O. Charlier)

7 : ovipositeur de *S. mosellana* (auteur : G. Jacquemin)

8 : appendices génitaux mâles de *S. mosellana* (auteur : G. Jacquemin)

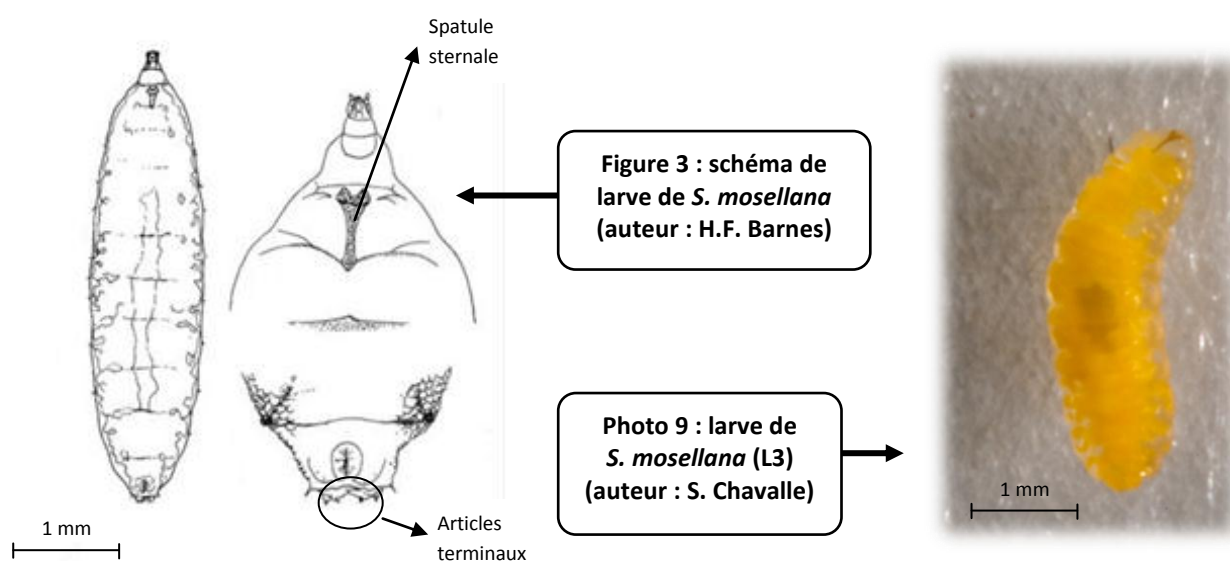
1.2.2. Œufs

Les œufs de *S. mosellana* sont bacilliformes, lisses, brillants, d'abord translucides puis rougeâtres. Ils sont longs de 0,35 mm et d'un diamètre de 0,09 mm (Affolter 1990; Speyer et Waede 1956). Ils sont très sensibles à la sécheresse mais ils en sont généralement préservés puisqu'ils sont déposés entre les glumes et les glumelles. Contrairement aux œufs de la cécidomyie jaune, les œufs de la cécidomyie orange sont rarement plus de deux par grain (Smith et Lamb 2004). En outre, une même femelle de *S. mosellana* ne dépose généralement pas plus de trois œufs sur un même épi (Smith et Lamb 2001).

1.2.3. Larves

Au cours de leur développement, les larves de *S. mosellana* passent par trois âges larvaires successifs (L1, L2, L3), les deux premiers se terminant par une mue. En L1, les larves sont blanchâtres et mesurent 0,45 à 1,05 mm. Ce stade est bref, la première mue a lieu après 2-3 jours (Gagné et Doane 1999). En L2, selon la disponibilité en éléments nutritifs (Smith et Lamb 2004) la croissance est plus ou moins rapide, la larve atteint 1,05 à 3,3 mm et prend une couleur orange. Lors de la deuxième mue, l'ecdysie de la L2 est conservée et sert d'enveloppe temporaire à la L3 (Gagné et Doane 1999). En L3, la larve se nourrit peu ou pas ; elle mesure alors 2,8 à 3,2 mm. Les femelles sont jusqu'à 80 % plus lourdes que les mâles (Smith et Lamb 2004).

Malgré la morphologie élémentaire des larves, de nombreuses espèces de cécidomyies sont aisément identifiables à ce stade. Deux caractères sont particulièrement utiles pour les taxonomistes : la spatule sternale et les "articles terminaux" (Skuhrava 1997). En anglais, la spatule sternale, typique des Cecidomyiidae, est également appelée "anchor" par référence à sa forme qui rappelle celle d'une ancre de bateau (Figure 3). Cet organe n'est présent qu'au dernier stade larvaire (L3). Il s'agit d'une structure sclérifiée située dans la partie ventrale du prothorax. Elle permet à la larve de se frayer un chemin dans le sol. Les articles terminaux sont, quant à eux, les ébauches des organes reproducteurs (Figure 3). Le nombre et la forme de ces protubérances sont des caractères spécifiques. Chez *S. mosellana*, elles sont au nombre de quatre, dont les deux extérieures sont légèrement plus longues que les deux intérieures.



1.2.4. Pupes

Au stade pupe, les cécidomyies ne sont pas distinguables avec certitude. Les pupes de *S. mosellana* sont orange et mesurent environ 2 mm. L'évolution est présentée en photo.



Photos 10 et 11 : pupes de *S. mosellana* (auteurs : S. Chavalle et G. Jacquemin)

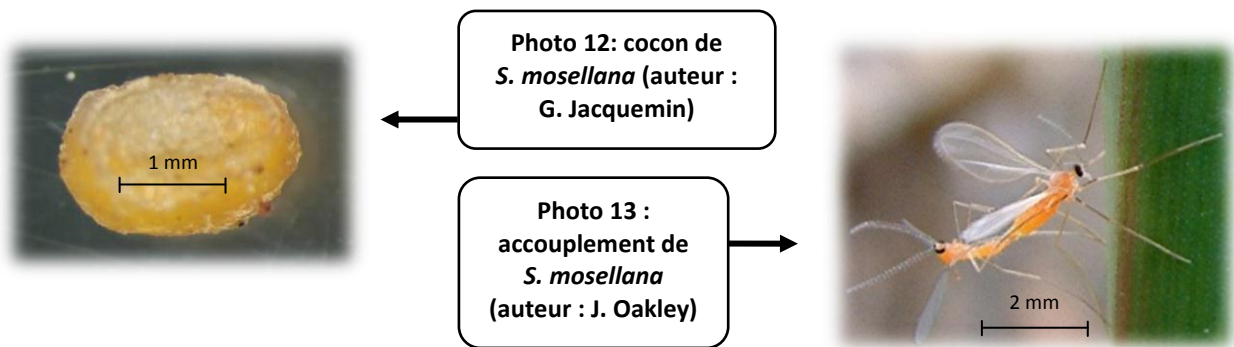
Des descriptions détaillées du stade pupe ont été réalisées par plusieurs auteurs (Kieffer 1900; Barnes 1928; Basedow 1971; Borkent 1989; Affolter 1990).

1.3. Biologie de *S. mosellana*

1.3.1. Cycle biologique

La cécidomyie orange du blé ne compte qu'une génération par an. C'est la nécessité d'une période de froid au cours du développement larvaire qui fixe le caractère univoltin de l'espèce.

Les larves passent l'hiver dans le sol, protégées dans un cocon qu'elles ont tissé avant d'entrer en diapause (Figure 4). Avec des variantes d'ordre quantitatif selon les sources, il est globalement admis que la levée de diapause est conditionnée par l'enchaînement de deux périodes. Au cours de la première, la larve doit être exposée à des températures inférieures à 10°C pendant au moins 70 jours (Oakley 1994). La seconde période est une capitalisation de degrés-jours c'est-à-dire une accumulation de chaleur. Dans la nature, la première condition empêche la sortie de diapause et l'émergence de l'adulte avant l'hiver. La seconde, quant à elle, évite la sortie prématurée de diapause au printemps. Le début de cette seconde période est généralement fixé au 1^{er} janvier. Cette date précise ne correspond à aucun élément objectif, mais elle se situe dans la période où la première condition (besoin de froid) est remplie, et où la seconde (capitalisation de degrés-jours) est encore nulle ou insignifiante : c'est le cœur de l'hiver.

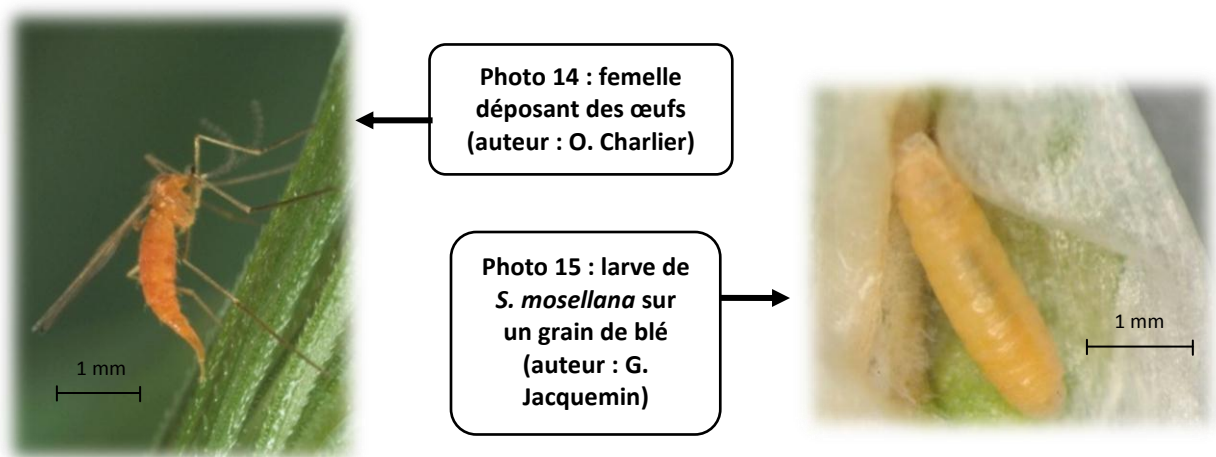


Une fois la diapause levée, pendant cinq semaines environ (Basedow 1977a), les larves seront capables de répondre à un stimulus les poussant à quitter leur cocon, à gagner la couche supérieure du sol (à 1 cm de la surface) et à se transformer en pupes (Oakley 1994; Basedow 1977a).

La proportion d'insectes émergents est très variable selon les régions et les années. Selon des études allemandes, cette proportion varie entre 10 et 94 % (Basedow et Schütte 1982). Au Canada, des niveaux d'émergence de 95 % sont généralement observés (Wise et Lamb 2004). La cécidomyie orange conserve la capacité d'émerger même après plus de 10 ans passés en cocon (Barnes 1952a).

La durée du stade pupa serait comprise entre 8 et 21 jours (Golightly 1952). Les vols ont généralement lieu vers le début juin. Ils sont le plus souvent crépusculaires et peuvent durer quelques semaines dans une même parcelle, et cela même si la durée de vie d'un adulte, considéré individuellement, ne dépasse pas quelques jours.

Dès l'émergence, les femelles émettent une phéromone sexuelle qui attire les mâles (Pivnick et Labbé 1992; Pivnick 1993; Gries et al. 2000). Il s'agit du (2S,7S)-2,7-nonanediyl dibutyrate. L'accouplement a lieu sur le site d'émergence. Fécondée, la femelle vole face au vent guidée par des stimuli olfactifs (Oakley 1994; Ganeshiarachchi et Harris 2009).



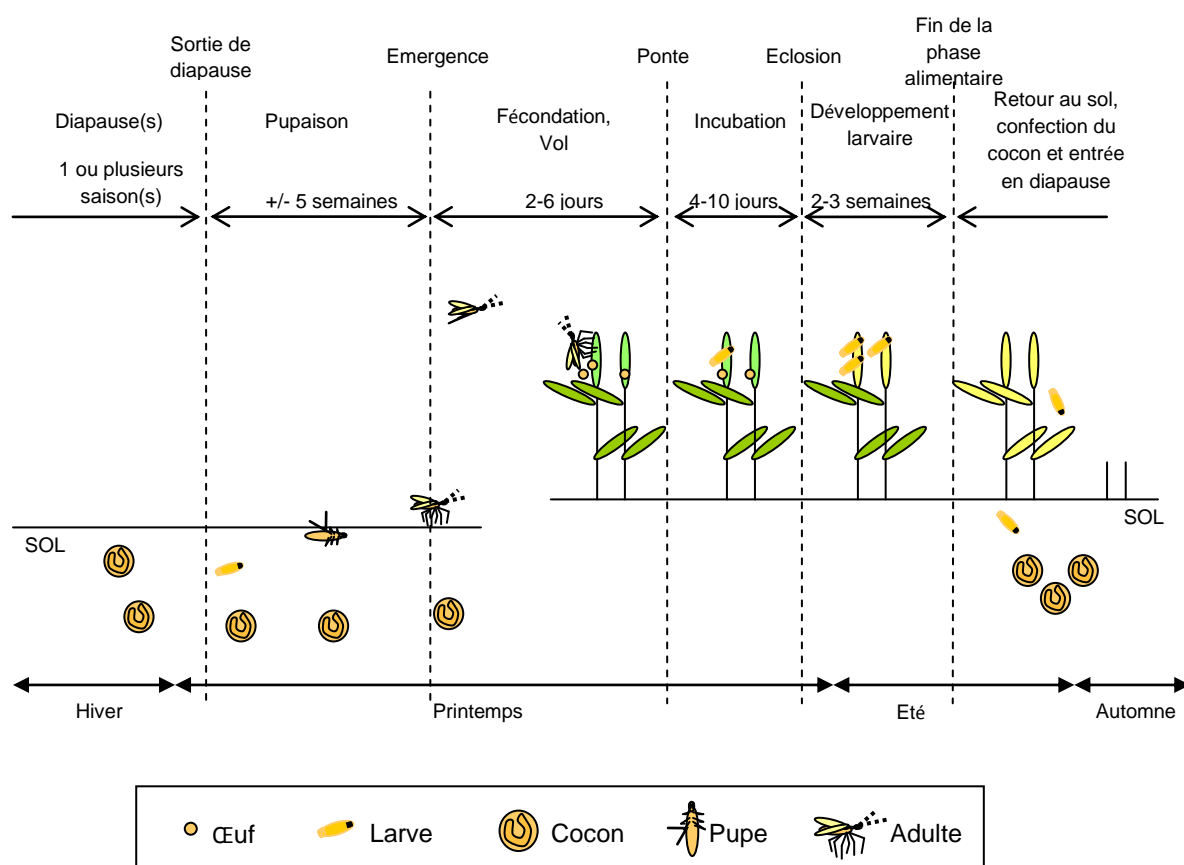


Figure 4 : cycle biologique de *Sitodiplosis mosellana*

Parmi les nombreuses variétés de froment, certaines sont nettement plus attractives que d'autres vis-à-vis des femelles de *S. mosellana* en quête de site de ponte (Wise et al. 2001; Oakley et al. 2005) mais le principal facteur d'attractivité semble être le stade de développement atteint par la plante au moment des vols (Barnes 1956). Des substances volatiles émises par l'épi entre les stades de développement BBCH¹ 53 à 58, c'est-à-dire durant l'épiaison, sont particulièrement attractives (Ding et Lamb 1999; Smith et Lamb 2001). Il faut noter qu'autant la nature des molécules émises que, le bouquet qu'elles constituent sont déterminants dans l'attractivité de ces signaux (Birkett et al. 2004).

Si les conditions sont favorables (température minimale de 15°C, vent < 10 km/h), les femelles pondent la majorité de leurs œufs le 3^{ème} jour de leur vie (Pivnick et Labbé 1993). Pendant la journée, les femelles se tiennent très bas dans le couvert, généralement posées sur la base des tiges de céréales.

La période d'activité s'étend en moyenne de 75 minutes avant le coucher du soleil à 30 minutes après (Pivnick et Labbé 1993). La femelle vole et dépose ses œufs isolément ou bien par petits groupes de trois ou quatre sur les épis (Smith et Lamb 2004). Les œufs sont déposés sur toute la partie émergée de l'épi, apparemment sans préférence quant à la position sur l'épi (Smith et Lamb 2001). Les œufs sont généralement déposés dans les épillets entre les glumes et les lemmes, ce qui

¹ BBCH cette échelle des stades de développement des céréales est équivalente à celle de Zadoks utilisés dans certains articles. L'échelle est détaillée au chapitre 2, Section 2.2.3.

permet aux larves d'atteindre rapidement le jeune grain (Mukerji et al. 1988). Cependant, pour certaines variétés de froment de printemps, les œufs sont déposés sur le rachis, vraisemblablement en réponse à des facteurs inhibant l'oviposition sur les épillets (Lamb et al. 2003). Le taux de survie de ces œufs est bien inférieur à celui des œufs pondus dans les épillets, notamment en raison de la sensibilité des œufs à la dessiccation. Dans de bonnes conditions, une femelle dépose en moyenne 80 œufs (Pivnick et Labbé 1993). La ponte peut se poursuivre jusqu'à ce que les températures descendent sous 11°C. Après la ponte, la femelle peut rester posée sur un épi jusqu'au matin puis, lorsque les températures redeviennent supérieures à 15°C, descendre en profondeur dans le couvert. Les femelles adultes vivent, en moyenne, une semaine (Pivnick et Labbé 1993).

L'œuf éclôt après quelques jours (4 jours à 20°C, 10 jours à 15°C (Oakley 1994)). La larve rampe vers le jeune grain contre lequel elle reste jusqu'à la fin de sa phase d'alimentation. Plusieurs larves peuvent se développer sur un même grain (Lamb et al. 2000b). La phase d'alimentation dure une dizaine de jours, après quoi la larve entre en quiescence jusqu'à l'occurrence d'une forte pluie, à la faveur de laquelle elle se laisse tomber de l'épi et pénètre dans le sol ameubli. Lorsque l'été est sec, les larves demeurent dans les épis jusqu'à la moisson (Wise et Lamb 2004; Elliott et al. 2011a). Lors du battage, les larves sont séparées des grains et tombent sur le sol avec les sons et la paille (Skuhrava et al. 1984). Si la sécheresse persiste, les larves sont incapables de pénétrer dans le sol et sont alors des proies faciles pour les carabes, staphylins et autres prédateurs généralistes (Holland et Thomas 2000).

1.3.2. Sex-ratio

Le sex-ratio de *S. mosellana* évolue au fil des stades successifs de développement (Smith et al. 2004b). Avant qu'elles ne tissent leur cocon, les larves femelles seraient légèrement plus nombreuses que celles de mâles (54-57 % de femelles). Selon Smith et al. (2004b), cet écart augmenterait durant la diapause grâce à un taux de survie supérieur des femelles. Au stade adulte, la proportion de femelles passerait à 60-65 %². Toutes les études s'accordent sur cette prédominance des femelles à l'émergence (Barnes 1931; Basedow et Gillich 1982).

1.3.3. Protandrie

Les mâles de *S. mosellana* seraient plus précoces à l'émergence que les femelles (Pivnick et Labbé 1992). Cette protandrie est commune chez les espèces d'insectes dont les femelles ne s'accouplent qu'une seule fois, juste après l'émergence³ (Thornhill et Alcock 1983). Cette protandrie se produirait à deux niveaux : d'une part l'heure d'émergence, d'autre part le jour de l'émergence. En effet, les mâles émergeraient en moyenne deux heures avant les femelles. Dans l'expérience réalisée au champ de Pivnick et Labbé (1992), la majorité des mâles ont émergé l'après-midi entre 14 et 16h tandis que l'émergence des femelles a eu lieu en début de soirée entre 16 et 20h. Au cours de la saison, et selon la même étude, les mâles peuvent émerger de 0 à 3 jours plus tôt que les femelles.

² Une analyse du sex-ratio réalisée dans notre laboratoire en 2009, confirme une proportion de femelles de 62 % à partir d'une population de 481 adultes obtenus en élevage.

³ Contrairement aux femelles, les mâles sont capables de s'accoupler de nombreuses fois et restent sensibles à la phéromone tout au long de leur vie. Cette constatation a été faite en conditions contrôlées dans nos terrariums sur des adultes issus d'élevage.

Cette protandrie, qualifiée "d'inconstante", a été confirmée dans d'autres essais mais ne dépasse pas 3 jours (Elliott et al. 2009).

1.3.4. Longévité des adultes

La vie de la cécidomyie orange est principalement larvaire, le stade adulte est bref. La longévité des adultes est généralement estimée entre 2 et 7 jours en conditions contrôlées (Basedow 1977a; Pivnick et Labbé 1993). Les mâles vivraient de 2 à 4 jours et les femelles de 3 à 7 jours. Seules deux études ont été réalisées au champ sur le sujet (Reeher 1945; Pivnick et Labbé 1992). Au cours de ces dernières, les entomologistes ont régulièrement observé des individus de *S. mosellana* âgés de plus de 10 jours⁴. Selon l'étude de Pivnick et Labbé (1992) 30 % des femelles ($n_{\text{tot}}=30$) subsistaient après 11 jours et 20 % étaient encore en vie après 16 jours.

Il existe une controverse sur la capacité des adultes de *S. mosellana* à se nourrir. La majorité des chercheurs déclarent que les adultes ne se nourrissent pas (Basedow 1973; Gagné et Doane 1999; Affolter 1990; Smith et Lamb 2004). Pourtant, Pivnick (1993) relate l'observation de mâles buvant dans des gouttes de rosée sur la surface des feuilles, et de femelles buvant de l'eau et ingérant des nutriments tels que du pollen⁵ ou du miellat (Pivnick et Labbé 1993). Pour d'autres espèces de cécidomyies utilisées en lutte biologique, telles *Aphidoletes* sp., il est connu qu'il convient de mettre à la disposition des adultes du miel dilué dans de l'eau (Krieg et Franz 1989). La capacité à se nourrir permet une longévité accrue qui pourrait expliquer les différences entre les résultats des études de laboratoire et celles de terrain.



Photo 16 : femelle de *S. mosellana* (auteur : G. Jacquemin)

1.3.5. Activité et vols

La cécidomyie orange est active surtout au crépuscule, par temps humide et chaud (Barnes 1932). En conditions contrôlées, les vols ne répondent plus à ce rythme nycthéral, et sont

⁴ Dans notre laboratoire, une femelle ayant accès à de l'eau sucrée (10 % saccharose), a atteint l'âge de 24 jours.

⁵ Nos observations au champ semblent donner raison à Pivnick car comme illustré par la photo 16, des femelles ont été observées s'abreuvant sur des étamines de froment.

entièrement régis par les facteurs environnementaux : luminosité, vent, température et humidité (Ellis, 2009). Dans un tunnel de vol, il a été démontré que le vent inhibe les vols lorsque sa vitesse dépasse 2,78 m/s (10 km/h). Concernant la température, des seuils ont été déterminés en conditions contrôlées pour différentes activités : les vols requièrent au moins 15°C, les accouplements 17°C, et les pontes 11°C (Pivnick et Labbé 1993). En conditions humides (HR > 75 %), l'activité semble augmenter avec la température jusqu'à 25°C (Ellis et al. 2009). En conditions plus sèches, Pivnick et Labbé (1993) ont observé qu'il y avait encore des vols à 64 % d'humidité. Ellis et al. (2009) rapportent que, même à des valeurs de 35 % d'humidité, des vols ont encore lieu, mais leur fréquence est réduite de moitié par rapport à celle observée à 70 %. La diminution de la luminosité est souvent décrite comme un stimulateur d'activité (Pivnick et Labbé 1993; Reeher 1945). Cependant, en conditions contrôlées lorsque la température est de 25°C et l'humidité relative de 70 %, des insectes peuvent voler à des luminosités élevées de 800 Lux (Ellis et al. 2009). Les conditions les plus favorables aux vols de *S. mosellana* sont celles des soirées chaudes, humides et à vent très faible ou nul.

1.3.6. Déplacements

Les mâles sont décrits comme très peu mobiles (Reeher 1945). L'accouplement a lieu sur le site d'émergence puis les mâles se cantonnent dans les strates inférieures de la végétation (Pivnick et Labbé 1992). Les femelles sont plus mobiles. Une fois fécondées, elles se mettent en quête d'un champ de froment, dont le stade de développement est favorable à la ponte. A ce stade, certaines kairomones semblent particulièrement attractives pour les femelles de *S. mosellana* (Birkett et al. 2004). Les femelles se déplacent contre le vent, en zig-zag entre les épis. Ce type de vol a été qualifié de "upwind appetitive flight" (Basedow 1977b). Il existe également des vols sur de longues distances prouvés notamment par la capture de femelles à 75m de haut (Miao et al., 2013), par l'observation d'une migration d'un bord à l'autre de la mer Baltique (Svårdson 1940), ou encore par la rapide extension (> 10km par an) des populations sur le continent nord-américain (Borkent 1989; Olfert et al. 2009).

1.4. Plantes hôtes et stade vulnérable

Le froment est de loin la plante-hôte la plus attractive pour la cécidomyie orange. Ce n'est cependant pas la seule espèce à permettre à la cécidomyie orange de boucler son cycle biologique. Quelques autres céréales ainsi que des graminées adventices sont également des hôtes potentiels de *S. mosellana* (Tableau 1). Le seigle est décrit comme un hôte très favorable par Basedow (1972) qui releva des niveaux d'infestation très élevés dans la région de Weser-Ems dans le nord de l'Allemagne. Kurppa (1989) fait la même observation pour l'orge dans la région de Koria (Finlande). Dans ces régions où le froment est peu cultivé, ces deux céréales semblent être devenues les principaux hôtes de la cécidomyie orange du blé. Ailleurs, là où le blé est cultivé, ces espèces sont considérées comme des hôtes accessoires⁶ au même titre que l'avoine et quelques graminées sauvages. Le cas du triticale et de l'épeautre reste à éclaircir : les rares études qui s'y sont intéressées n'ont pas pu conclure à la sensibilité de ces espèces au vu du faible nombre de variétés testées. Il

⁶ Au cours de nos observations et malgré des conditions très favorables à l'infestation en 2007, le nombre de larves dans les épis d'orge est resté très faible (< 3 larves/100 épis).

semblerait cependant que les espèces de *Triticum* à grains vêtus comme l'épeautre soient plus résistantes que les espèces à grains nus (Wise et al. 2001).

Tableau 1 : plantes-hôtes connues de *S. mosellana*

Plantes-hôtes		Références
Froment	<i>Triticum aestivum</i> L.	Géhin 1857; Wagner 1866; Barnes 1956; Basedow 1977a; Wise et al. 2001
Orge	<i>Hordeum vulgare</i> L.	Tedin 1917; Reeher 1945; Basedow 1977a; Kurppa 1989; Wise et al. 2002
Triticale	× <i>Triticosecale</i> Wittm. ex A. Camus	Wright et Doane 1987
Avoine	<i>Avena sativa</i> L.	Basedow 1977a
Epeautre	<i>Triticum spelta</i> L.	Basedow 1977a; Affolter 1990; Wise et al. 2001
Seigle	<i>Secale cereale</i> L.	Basedow 1972; Wright et Doane 1987
Vulpin des champs	<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.	Wagner 1866; Barnes 1930
Chiendent	<i>Agropyron repens</i> (L.) Beauv.	Basedow 1972; Affolter 1990; Doeksen 1938

On ne peut donc pas considérer la cécidomyie orange du blé comme un ravageur spécifique du froment. Cependant, dans nos régions, seule l'infestation du froment est susceptible d'entraîner des dégâts conséquents.

Les dégâts ne sont observés que lorsque les pontes coïncident avec le stade épiaison des céréales soit, selon l'échelle BBCH (Tottman et Broad 1987)⁷, du stade 51 au stade 59 (Figure 5). Les œufs déposés en tout début de floraison (stades 61-63) peuvent également produire quelques larves viables mais la proportion de ces larves décroît rapidement une fois les anthères sorties (Elliott et Mann 1996).



Figure 5 : période de sensibilité du froment face aux pontes de *S. mosellana*

Les stades font référence aux stades de développement de la céréale selon l'échelle BBCH.

La sensibilité d'une variété à la cécidomyie orange est une combinaison de deux caractères : d'une part l'attractivité des épis pour les femelles prêtes à pondre, d'autre part l'incapacité de la plante à faire obstacle au développement des larves. La première se mesure par le nombre d'œufs pondus et la seconde par le pourcentage de larves qui parviennent à réaliser leur développement

⁷ Voir l'échelle BBCH présentée au chapitre 2, Section 2.2.3.

complet. La vulnérabilité d'un stade est, dans ce cas, un terme assez mal choisi car ce n'est pas à l'épiaison que les dégâts sont occasionnés. Les grains sont attaqués durant la phase de remplissage quelques jours plus tard. Cependant, pour réussir cette infestation, les œufs doivent avoir impérativement été pondus à l'épiaison. C'est pourquoi, on désigne l'épiaison comme le "stade vulnérable".

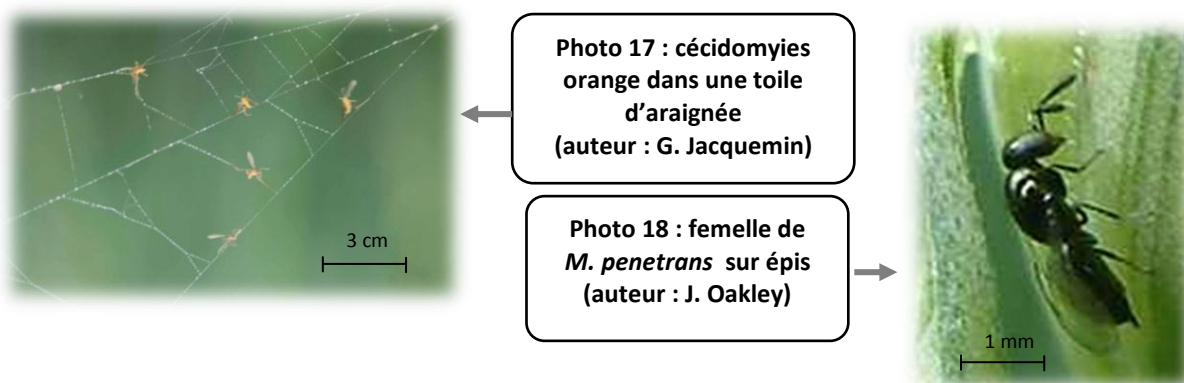
L'attractivité des épis est manifeste lors de l'observation du comportement de l'insecte et du vol face au vent des femelles. Birkett et al. (2004) ont isolé et analysé les composés volatils libérés par les épis au stade épiaison. Six molécules ont été identifiées par chromatographie en phase gazeuse. Ils ont ensuite démontré par olfactométrie que les femelles de *S. mosellana* sont attirées par un mélange composé de trois de ces molécules⁸. Aucune de ces molécules n'est attractive seule. Elles ne sont pas spécifiques du blé, et sont par exemple, émises également par les fleurs de pommier (Buckbauer et al. 1993) et de colza (Blight et al. 1997). Selon Birkett et al. (2004), ce serait le rapport entre ces trois molécules qui conférerait la spécificité du bouquet attractif. D'un point de vue comportemental, il a été démontré que, lorsque les femelles ont le choix entre de jeunes épis ou des épis en floraison, elles se posent indifféremment sur les deux types d'épis mais pondent trois fois plus d'œufs sur les jeunes épis que sur les épis en floraison (Ganehiarachchi et Harris 2009).

Concernant les œufs pondus après la période vulnérable, il semblerait que les larves qui en sont issues, ne soient pas capables de se nourrir aux dépens de grains en formation. Elles sont retrouvées mortes à proximité immédiate des grains (Ding et Lamb 1999). L'hypothèse la plus communément admise est que les niveaux d'acides phénoliques produits dans le grain sont alors trop élevés et intoxiquent les larves (Arnason et al. 1992). Ce phénomène est avancé comme mécanisme de résistance de certaines variétés (McKenzie et al. 2002). De manière générale, l'antibiose est la voie privilégiée par l'amélioration variétale pour lutter contre *S. mosellana* (Ellis et al. 2009).

1.5. Prédateurs, parasitoïdes et pathogènes

Petit moucheron fragile se déplaçant avec maladresse, la cécidomyie orange est la proie de nombreux prédateurs. C'est sur le nombre que repose la stratégie de l'espèce. Outre la localisation des larves dans le sol ou les grains, les cécidomyies ne semblent pas disposer de moyen de défense efficace.

⁸ Le mélange expérimental comprenait 1,3 ng/μl d'acétophénone ; 3,4 ng/μl de (Z)-3-hexényl acétate et 7,4 ng/μl de 3-carène.



Les prédateurs généralistes se nourrissent de cécidomyies au cours des périodes où elles sont le plus exposées. Les carabes et staphylins consomment les pupes de même que les larves L3 tombées au sol (Basedow et Schütte 1982; Floate et al. 1990). Les araignées et certains diptères Empidides sont les principaux prédateurs des adultes (Stark et Wetzel 1987). Des thrips et des acariens se nourrissent des œufs (Reeher 1945). Les larves sont également la proie d'oiseaux, de coccinelles, de larves de syrphes ou même de larves de cécidomyies zoophages (Barnes 1956; Speyer et Waede 1956; Carl et Affolter 1984).

Outre ces prédateurs, la cécidomyie orange est aussi victime de champignons pathogènes tels qu'*Entomophthora brevinucleata* sp. (Keller et Wilding 1985), et de nématodes Mermithides (Faber 1970). Néanmoins, malgré la grande diversité des prédateurs et des pathogènes, leur impact ne semble pas prépondérant sur le niveau des populations de *S. mosellana* (Barnes 1956).

Dès les premières études sur les cécidomyies des céréales (fin 18^{ème} s.), les entomologistes observent et rapportent l'existence de nombreux parasitoïdes de la cécidomyie orange (Kirby 1798). Il s'agit plus précisément d'hyménoptères endoparasitoïdes ovo-larvaires solitaires. Affolter dresse dans sa thèse une liste non exhaustive des travaux concernés : Borodin 1915; Leonardi 1927; Klee 1936; Johansson 1936; Doeksen 1938; Barnes 1956; Speyer et Waede 1956; Prasad 1969; Herting et Simmonds 1978; Lübke 1982; Basedow et Schütte 1982. La complexité de cette matière a conduit à de nombreuses confusions.



Photos 19 et 20 : larves de cécidomyies orange parasitées par des Platygastriidae (auteur : G. Jacquemin)

Plusieurs micro-hyménoptères appartenant aux familles des Pteromalidae et des Platygastriidae ont été identifiés comme des parasitoïdes spécifiques de *Sitodiplosis mosellana* (Barnes 1956; Basedow et Schütte 1982; Affolter 1990). Le plus connu d'entre eux est *Macroglenes penetrans* (Kirby) (Photo 18). Les femelles pondent leurs œufs à l'intérieur de ceux de *S. mosellana*. La larve du

parasitoïde ne débute son développement que lorsque la larve de cécidomyie sort de diapause. A partir de ce moment, la larve de *M. penetrans* se développe rapidement au détriment de son hôte, le parasitoïde termine seul son développement pour finalement émerger 3 à 9 jours après les cécidomyies non parasitées (Affolter 1990; Olfert et al. 2003; Elliott et al. 2011b). Si la phénologie de cet insecte est assez bien documentée, il y a peu d'informations sur son comportement, ses déplacements et ses préférences alimentaires. Ces notions sont pourtant importantes si l'on souhaite favoriser ou simplement éviter de nuire au développement de cet auxiliaire précieux, par des pratiques culturales inappropriées. Les effectifs de ces parasitoïdes sont peu connus. La dernière étude date de 25 ans et a été effectuée en Suisse par Affolter (1990). Selon ce dernier, les taux de parasitisme fluctuaient entre 24 et 54 %. Des données antérieures, signalaient des taux de parasitisme pouvant atteindre plus de 90 % (Tableau 2)(Barnes 1932). Le parasitisme de *S. mosellana* a, à plusieurs reprises, été décrit comme le deuxième facteur le plus influent sur les populations après celui de la coïncidence entre les pontes et le stade vulnérable des cultures (Basedow et Schütte 1982; Affolter 1990).

Les méthodes culturales évoluant, une actualisation de ces mesures serait nécessaire. Au Canada, des données récentes estiment le taux de parasitisme entre 14 et 48 %, mais ne concerne que *M. penetrans*⁹ (Smith et al. 2004a). En Europe, la contribution des Platygastriidae n'est pas négligeable. Ils pondent notamment en moyenne 600 œufs par femelle contre 200 œufs chez *M. penetrans* (Affolter 1990). La thématique du parasitisme n'est pas abordée dans ce travail bien que l'abondance de *Macroglenes penetrans* et de Platygastriidae ait été confirmée au cours de nos observations.

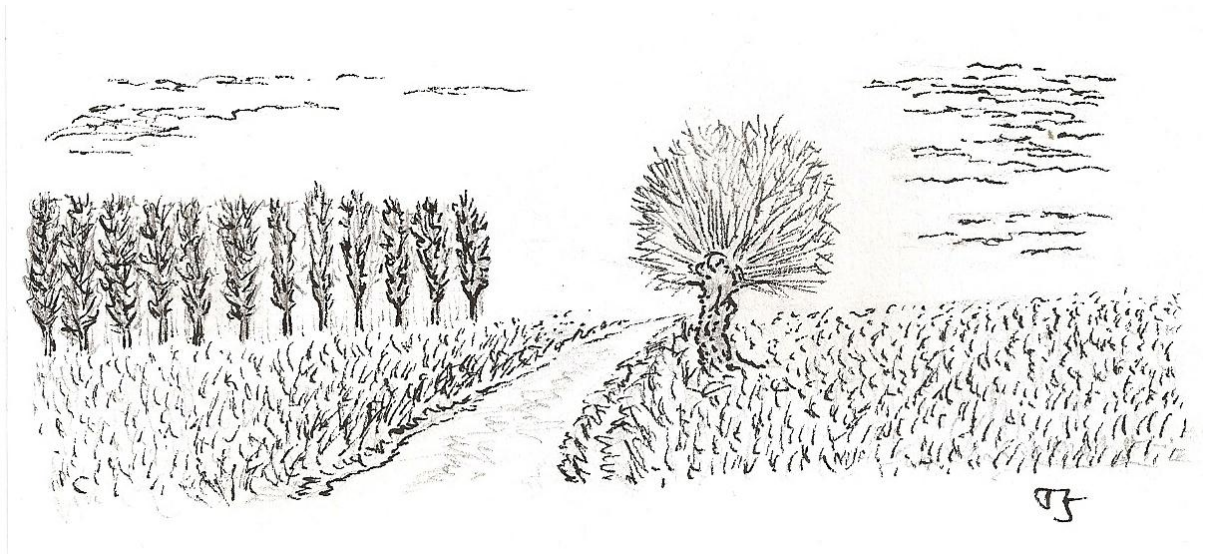
Tableau 2 : taux de parasitisme (tous parasitoïdes confondus) observés chez *S. mosellana*

Pays	Période d'observation	Taux de parasitisme	Sources
Allemagne	1970-1979	9-74 %	Basedow et Schütte 1982
Allemagne	1956	22-93 %	Speyer et Waede 1956
Canada	2000-2002	15-48 %	Smith et al. 2004a
Canada	1995-1998	22-40 %	Wise et Lamb 2004
Canada	1991-2000	20-45 %	Olfert et al. 2009
Canada	1984-1985	2-53 %	Doane et Olfert 2008
Royaume-Uni	1927-1956	4-99 %	Barnes 1956
Royaume-Uni	1929-1931	43-85 %	Barnes 1932
Suisse	1985-1989	24-54 %	Affolter 1990

⁹ Au Canada, en vue de renforcer la lutte contre *S. mosellana*, le parasitoïde *Platygaster tuberosula* Kieffer a été introduit en provenance de la Suisse (Olfert et al 2003). Sa présence reste pour l'instant anecdotique au niveau du continent nord-américain.

Chapitre 2 :

Présentation de la culture des céréales en Wallonie



Ce deuxième chapitre est consacré à l'environnement dans lequel évolue la cécidomyie orange. Il présente successivement les aspects climatologiques, pédologiques et culturels de la Wallonie.

2.1. Facteurs climatiques et pédologiques en Wallonie

2.1.1. Climatologie de la région wallonne

La Wallonie couvre 16.844 km² soit 55,2 % du territoire belge. La plupart des expérimentations présentées dans ce travail ont été mises en place à proximité de Gembloux où est implanté le Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) (Figure 6). Gembloux est situé au centre d'une région fortement tournée vers l'agriculture et majoritairement vers les cultures céréalières et industrielles.



N° station	Localité	Coordonnées géographiques (Lambert 1972)		Altitude
		x	y	
★	Gembloux	172.692	141.317	158 m
1	Esplechin	72.842	142.266	53 m
2	Casteau	127.300	136.359	95 m
3	Couthuin	205.536	135.003	170 m
4	Haut-le-Wastia	183.916	109.720	204 m
5	Seny	222.965	128.073	277 m
6	Jemelle	212.428	95.307	224 m
7	Libramont	221.230	68.813	476 m
8	Michamps	253.122	81.689	498 m
9	Shockville	250.488	50.811	348 m

Figure 6 : localisation des stations météorologiques utilisées
(auteurs : X. Legrain et G. Jacquemin)

La proximité de la Mer du Nord place le pays dans un climat océanique tempéré (Figure 7). Gembloux est situé à 126 km de la mer. Il y tombe 800 mm de pluie par an. Les hivers sont relativement froids (température moyenne de 2-3°C). On dénombre en moyenne 72 jours de gel et 22 jours de neige par an (MeteoBelgique 2013). Les printemps sont longs et légèrement plus secs que les autres saisons. Les étés sont doux (17-18°C) et humides. Les précipitations ont alors un caractère plus intense et les orages sont assez fréquents. Sur ces 20 dernières années, ce fut particulièrement le cas au mois d'août. En automne, les températures diminuent assez rapidement, et les jours de brouillard sont relativement fréquents, principalement en novembre.

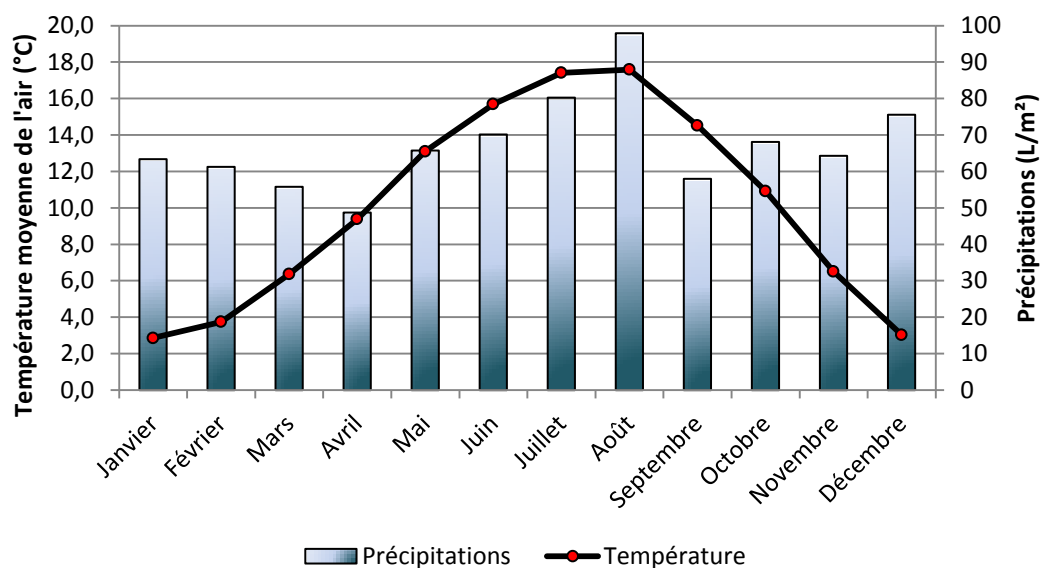


Figure 7 : diagramme ombrothermique pour la station de Gembloux
Données compilées de 1995-2012

Bien que de taille modeste, la région wallonne montre de fortes disparités des conditions climatiques. Les différences se marquent principalement selon un axe Nord-Ouest / Sud-Est, soit à mesure que l'on s'éloigne de la côte : on passe progressivement du climat océanique à un climat plus continental. Les deux stations météorologiques situées aux extrêmes de cet axe illustrent bien cette réalité (Figure 6). A Esplechin et à Casteau (Tournai), les hivers sont plus doux qu'à Gembloux, tandis qu'à Schockville (Arlon), ils sont plus froids et plus humides (Tableau 3). Globalement, les zones les plus froides et les plus humides de Wallonie sont logiquement celles situées en altitude (Haute Ardenne et Ardenne centrale), la zone la plus sèche est dénommée la Hesbaye sèche : c'est la partie orientale de la Hesbaye. Sur une année, il y pleut deux fois moins qu'à la station de Libramont située en Ardenne, 85 km plus au sud (Tableau 4).

Au niveau de la météo quotidienne, le sillon Sambre-et-Meuse marque très souvent la limite entre deux météos différentes au nord et au sud de ce dernier. Les stations de Couthuin (177 m) et de Seny (277 m) situées à 21 km l'une de l'autre, illustrent ces différences.

Tableau 3 : températures mensuelles moyennes exprimées en °C d'écart par rapport à Gembloux

Le gradient de couleur va du rouge pour les situations plus chaudes que Gembloux au mauve pour les plus froides (données CRA-W et réseau PAMESEB ; années 1995 à 2012).

°C	Gembloux	Esplechin	Casteau	Couthuin	Haut-le-Wastia	Seny	Jemelle	Libramont	Michamps	Shockville
Janvier	2,9	+0,5	+0,6	+0,1	-0,4	-0,5	-0,5	-2,0	-2,2	-1,5
Février	3,8	+0,4	+0,6	+0,2	-0,5	-0,6	-0,6	-2,1	-2,2	-1,3
Mars	6,4	0,0	+0,5	+0,3	-0,3	-0,5	-0,4	-1,7	-2,0	-0,9
Avril	9,4	-0,1	+0,5	+0,3	-0,2	-0,1	-0,2	-1,4	-1,6	-0,4
Mai	13,1	-0,1	+0,5	+0,6	+0,1	-0,1	+0,1	-1,0	-1,3	0,0
Juin	15,7	+0,0	+0,5	+0,6	+0,2	0,0	+0,2	-0,9	-1,1	+0,2
Juillet	17,4	0,0	+0,5	+0,5	+0,1	-0,1	+0,1	-1,1	-1,3	0,0
Août	17,6	0,0	+0,4	+0,8	0,0	-0,1	-0,1	-1,2	-1,5	-0,4
Septembre	14,5	-0,1	+0,3	+0,2	-0,5	-0,4	-0,6	-1,6	-2,0	-1,0
Octobre	10,9	-0,1	+0,3	+0,1	-0,5	-0,5	-0,4	-1,7	-2,0	-1,2
Novembre	6,5	+0,1	+0,3	+0,4	-0,4	-0,6	-0,4	-1,9	-2,2	-1,2
Décembre	3,0	+0,4	+0,5	+0,3	-0,1	-0,5	-0,2	-1,7	-1,9	-1,1
Ecart moyen annuel	0	+0,1	+0,5	+0,4	-0,2	-0,3	-0,3	-1,5	-1,8	-0,7
Température moyenne observée	10,1	10,2	10,6	10,5	9,9	9,8	9,8	8,6	8,3	9,3

Tableau 4 : précipitations mensuelles moyennes exprimées en mm d'écart par rapport à Gembloux

Le gradient de couleur va du rouge pour les situations plus sèches que Gembloux au bleu pour les plus humides (données CRA-W et réseau PAMESEB ; années 1995 à 2012.)

mm	Gembloux	Esplechin	Casteau	Couthuin	Haut-le-Wastia	Seny	Jemelle	Libramont	Michamps	Shockville
Janvier	63	+4	+14	-10	+18	+9	+10	+70	+34	+52
Février	61	-7	+6	-10	+16	+10	+12	+50	+20	+41
Mars	56	+7	+10	-6	+20	+9	+11	+52	+27	+32
Avril	49	-2	0	-5	+2	+10	+13	+35	+21	+17
Mai	66	-5	-4	-16	-3	-8	+4	+17	+12	+6
Juin	70	-7	-12	-13	-9	-2	-1	+19	+2	+4
Juillet	80	0	+2	-14	+3	+12	-1	+20	+7	+3
Août	98	-15	-14	-29	-11	-4	-5	+12	0	-20
Septembre	58	-3	+2	-6	+4	+2	+1	+17	+12	+8
Octobre	68	-1	+6	-9	+5	-1	-2	+31	+11	+19
Novembre	64	+10	+12	-7	+7	+6	+4	+47	+18	+25
Décembre	76	+2	+9	-13	+16	+3	+4	+62	+19	+54
Ecart moyen annuel	0	-17	+31	-135	+68	+46	+49	+432	+183	+240
Pluviométrie annuelle observée	809	792	840	674	877	855	858	1241	992	1049

2.1.2. Diversité des sols en région wallonne

Les localités wallonnes sont à l'origine de très nombreuses dénominations d'unités chronostratigraphiques (Tournaisien, Dinantien, Frasnien, ...). Ceci résulte en partie de la très grande diversité des formations géologiques de la région. Par dégradation de la roche-mère, cette diversité se retrouve dans la composition des sols. La carte des textures de surface des sols est présentée à la figure 8. Comme pour les données météorologiques, on retrouve la limite du sillon Sambre-et-Meuse qui délimite au nord une couverture limoneuse continue et au sud, des sols très variés dont la charge caillouteuse reflète le substrat sous-jacent. On retrouve également des sols sableux dans le bassin de la Haine et la plaine de l'Escaut ainsi qu'en Lorraine belge. L'ensemble des sols wallons comporte une composante argileuse mais les vrais sols argileux (> 18 % d'argile) se rencontrent principalement dans le bassin de la Haine, en Fagne-Famenne ainsi qu'en Lorraine. Le Condroz est complexe, cette région est formée globalement d'une alternance de bombements psammitiques¹⁰ et de dépressions calcaires. Les sols développés à partir de ces substrats diffèrent par leur profondeur, la nature, l'abondance et la taille de la charge caillouteuse (terres à clavier¹¹). Ils sont généralement de texture plus lourde dans les dépressions, si on excepte les nombreux placages limoneux. Dans ces paysages contrastés, les meilleures terres de culture côtoient donc les plus mauvaises.

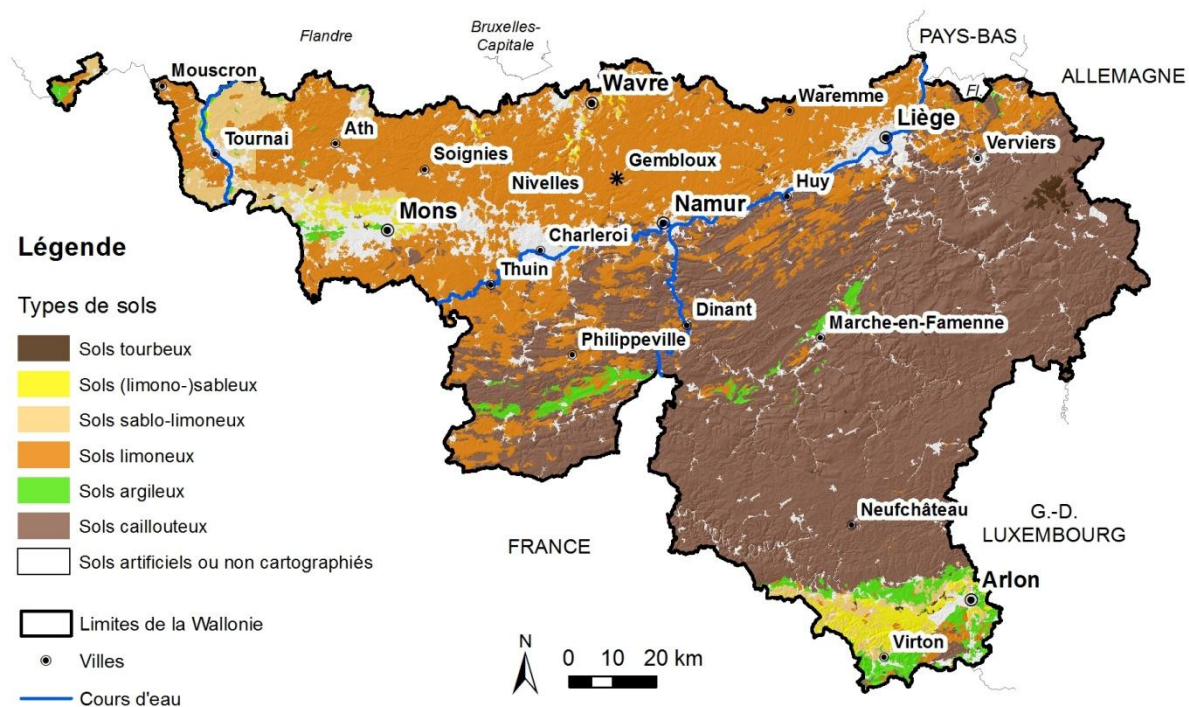


Figure 8 : carte des textures de surface des sols

(auteurs : X. Legrain et G. Jacquemin sur base des données de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (Bock et al. 2008))

¹⁰ Terme utilisé uniquement en Belgique pour désigner des grès micacés.

¹¹ Terme wallon qui désigne des cailloux de nature quartzreuse, abondants et généralement de petites tailles.

La figure 9 présente l'état du drainage naturel des sols. Le drainage du plateau hennuyer est modéré à imparfait, car sous une couche peu épaisse de limon, se trouve un substrat formé d'argiles du Tertiaire peu perméables. Les sols de cette région restent donc assez longtemps gorgés d'eau à la sortie de l'hiver. Sur le plateau limoneux brabançon, par contre, le limon repose sur les sables du Bruxellien, ce qui confère aux sols un meilleur drainage. D'autres sols comportent un drainage pauvre à très pauvre : c'est le cas de certains sols argileux, mais également des sols tourbeux comme ceux des Hautes-Fagnes (Sud-est de Verviers). Dans ces régions, la forêt prédomine et les cultures sont rares.

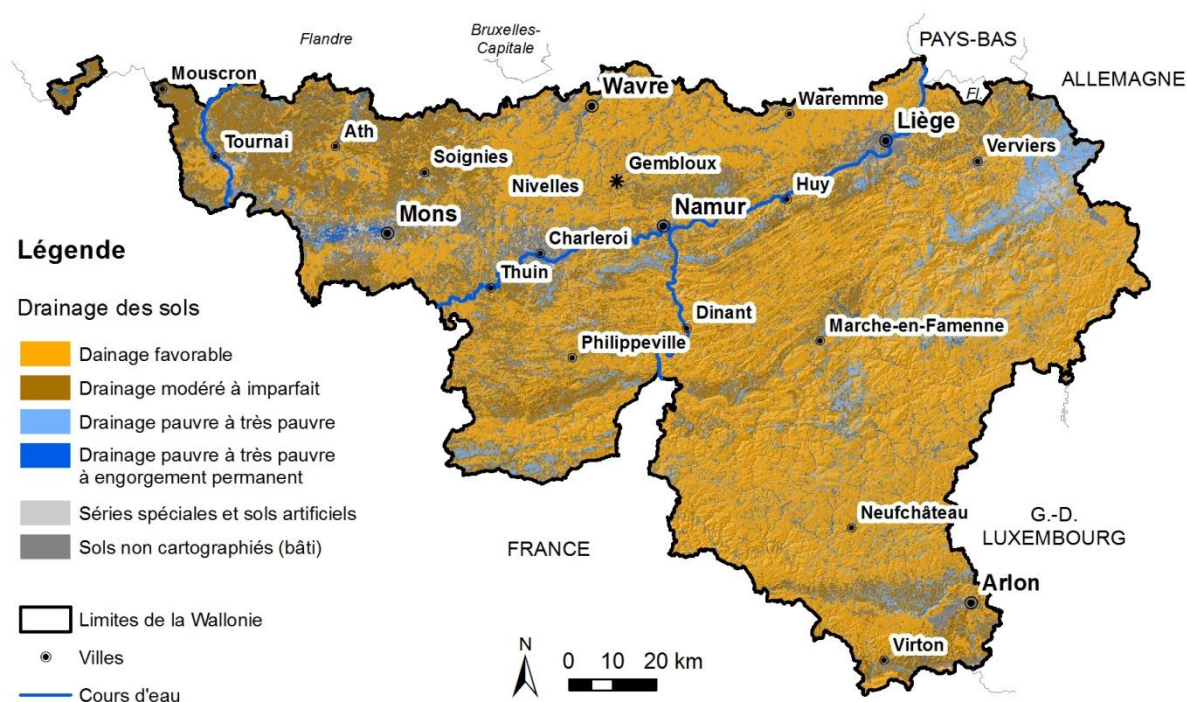


Figure 9 : carte illustrant le niveau d'hydromorphie des sols en Wallonie
(auteurs : X. Legrain et G. Jacquemin sur base des données de la Carte Numérique des Sols de Wallonie)

2.1.3. Diversité des paysages et des cultures

La variabilité des sols et des conditions climatiques a engendré une grande diversité de paysages, des plaines de l'Escaut aux forêts ardennaises. Les forêts sont majoritaires en Ardenne et Haute Ardenne (Figure 6). Elles constituent également une des principales composantes du paysage en Famenne et en Condroz, où elles alternent avec les pâturages et des cultures fourragères. Les prairies délimitées par des haies caractérisent le pays de Herve, où se concentre une bonne partie de la production laitière. Dans les régions limoneuses de Tournai à Liège, la culture prédomine. Le paysage est ouvert, les haies sont rares, et seuls quelques bosquets d'arbres délimitent les plaines.

2.2. Culture du froment en Wallonie

2.2.1. Répartition de la culture de froment

Le blé tendre, appelé "froment" en Belgique, est la culture prédominante en Wallonie. En 2012, 132.206 hectares¹² y étaient affectés sur une surface totale de terre arable de 377.302 ha, soit plus de 35 % de la sole. La culture du froment est pratiquée principalement au nord du sillon Sambre-et-Meuse, dans les sols limoneux. La Hesbaye est la région agricole présentant la plus forte concentration de froment : plus d'un tiers de la surface arable. La culture de froment est également présente dans le Condroz. Dans l'est du pays, les escarpements, les sols peu profonds et les rigueurs de l'hiver limitent considérablement la culture du blé.

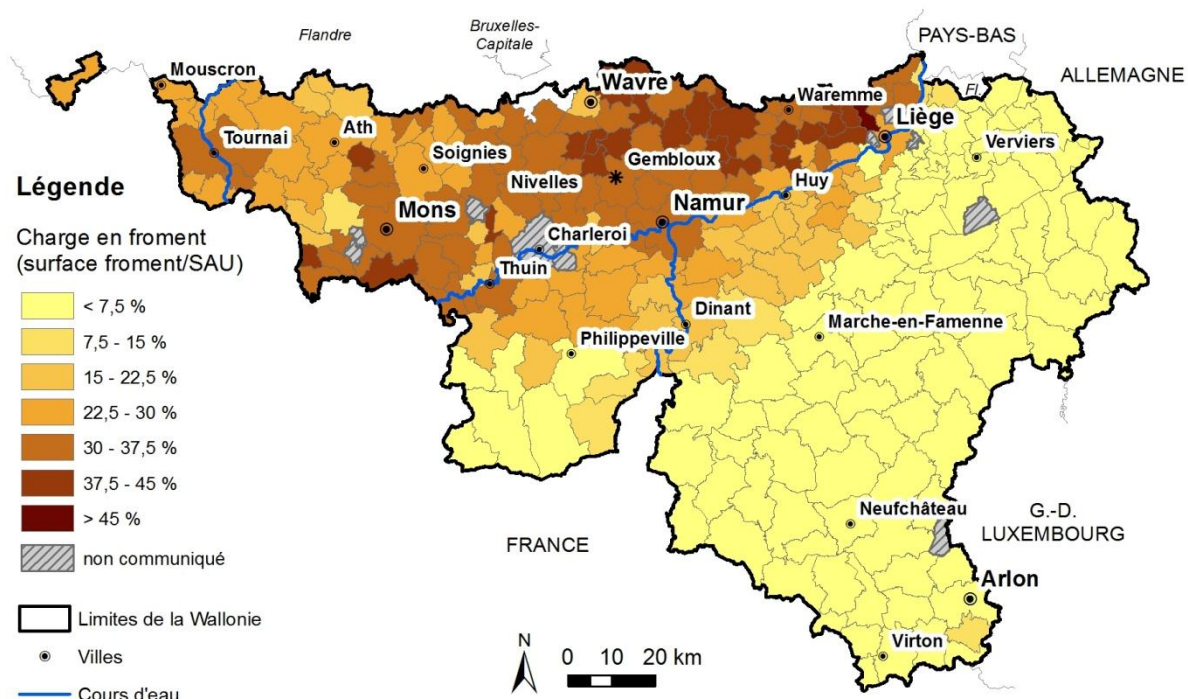


Figure 10 : répartition de la culture de froment en Wallonie
(auteurs : X. Legrain et G. Jacquemin sur base des données de l'INS¹²)

2.2.2. Place de la culture de froment dans les exploitations wallonnes

Deux types de rotation impliquant le froment prédominant en Wallonie. La première voit revenir le froment une année sur trois. Dans ce cas, il est précédé d'une tête de rotation (betterave, lin, maïs, colza ou pomme de terre) et suivi en deuxième paille d'escourgeon ou d'épeautre. Un deuxième type de rotation très pratiqué comprend un froment tous les deux ans en alternance avec des cultures racines surtout pomme de terre ou betterave, et de plus en plus fréquemment par des légumes de plein champ : carottes, épinard, oignons, etc.

¹² Données provenant de l'Institut National de Statistique belge (INS)

La succession froment sur froment n'est pratiquée qu'assez rarement. Dans ce cas, le froment prend la place de l'orge dans les rotations triennales.

La composition des rotations varie selon les régions agricoles. Les pommes de terre, les légumes et le lin ne se retrouvent que dans les sols limoneux au nord du sillon Sambre-et-Meuse. Dans le Condroz, la culture du colza est commune, tandis qu'en Famenne et en Ardenne, le triticale et l'épeautre sont fréquemment cultivés pour nourrir le bétail.

Les céréales de printemps, et notamment le froment de printemps, sont devenues des cultures anecdotiques (880 ha soit 0,2 % des terres arables en 2012). Ce sont des cultures auxquelles les agriculteurs ont recours les années où les conditions automnales ne permettent pas d'implanter les céréales d'hiver, ou lorsque ces dernières ont été détruites par le froid.

2.2.3. Suivi de la culture du semis à la récolte

Traditionnellement en Wallonie, le froment est semé à partir du 10-15 octobre. Selon les variétés, la période de semis peut s'étendre jusqu'au début février. Le choix de la variété est guidé notamment par la date de semis, ceci afin d'éviter que les stades les plus sensibles au froid¹³ ne soit atteint durant la période la plus froide de l'année. La densité des semis dépend à la fois des dates et des régions : de 250 grains par m² en octobre dans des sols limoneux, à 400 grains par m² en décembre dans les régions froides à sols plus lourds. Les engrais azotés sont apportés en deux ou trois fractions aux stades clefs du développement printanier. Selon les restitutions de matières organiques, et selon les reliquats azotés mesurés dans les sols, la fumure minérale apportée est généralement de 140 à 220 unités d'azote par hectare. Les fractions sont appliquées au tallage, au redressement et peu avant l'épiaison. Afin d'éviter la verse, les céréales sont raccourcies au début de la montaison avec des régulateurs de croissance.

Le désherbage se fait le plus souvent à la sortie de l'hiver. Les graminées adventices les plus fréquentes du froment en Wallonie sont le vulpin des champs *Aloperucus myosuroides* Huds., le jouet du vent *Apera spica-ventis* (L.) P. Beauvois, et la folle avoine *Avena fatua* L. Les dicotylées les plus fréquentes sont la matricaire camomille *Matricaria chamomilla* L., le gaillet gratteron *Galium aparine* L., la pensée sauvage *Viola tricolor* L., la véronique à feuille de lierre *Veronica hederifolia* L., le lamier pourpre *Lamium purpureum* L., le mouron des oiseaux *Stellaria media* (L.) Villars, et le coquelicot *Papaver rhoeas* L. Dans la plupart des cas, un seul passage en sortie d'hiver avec un herbicide adapté à la flore adventice présente, suffit.

Les maladies cryptogamiques les plus importantes sont la septoriose et la rouille brune. L'oïdium est moins dommageable, à condition que la fumure azotée ne soit pas excessive. Certaines années, la rouille jaune, ou la fusariose des épis nécessitent des interventions spécifiques.

Pour prévenir les infections cryptogamiques, divers itinéraires techniques sont possibles. Le plus fréquemment emprunté consiste en une double application de fongicides : la première au stade 2^e nœud, et la seconde au stade dernière feuille étalée ou épiaison (Tableau 5). Les agriculteurs sont informés chaque semaine sur l'évolution de la pression de maladies par les systèmes d'avertissement

¹³ Le tallage est le stade végétatif le plus résistant au froid. Il est précédé de la levée et suivi de l'élongation de la tige qui sont toutes deux des phases sensibles au froid.







(CADCO). Ils peuvent ainsi reporter le premier traitement le plus tard possible, jusqu'à le supprimer les années à faible pression.

Plusieurs ravageurs peuvent contrarier la bonne implantation du froment. Outre les oiseaux et les limaces, les plus fréquents en Wallonie sont la mouche grise des céréales *Delia coarctata* (Fallen), la mouche des semis *Delia platura* (Meigen) et, dans une moindre mesure, plusieurs espèces de taupins *Agriotes spp.* En fin de développement de la céréale, les principaux ravageurs sont, outre les cécidomyies, les criocères *Oulema melanopa* (L.) et *Oulema lichenis* Voet, les thrips *Limothrips denticornis* (Haliday) et les pucerons *Sitobion avenae* (F.) et *Metopolophium dirhodum* (Walker). En automne, ces deux derniers pucerons, mais surtout un troisième, *Rhopalosiphum padi* (L.), sont vecteurs du virus de la jaunisse nanisante de l'orge. Cette virose, touchant fréquemment l'orge d'hiver, est rare en froment d'hiver, du fait des dates de semis plus tardives qui ne permettent que rarement les infections pré-hivernales.

La lutte contre les ravageurs de début de culture consiste principalement à mesurer les risques en fonction de la situation de chaque parcelle (précédents culturaux, date de semis, gestion de l'interculture) et de la pression globale de chaque ravageur mesurée par les services spécialisés. En fonction des risques déterminés, les précautions nécessaires sont recommandées, parmi lesquelles, d'éventuels traitements de semences.

En Wallonie, les ravageurs d'été ne font pas l'objet de pulvérisations systématiques. Comme pour les maladies, des avertissements spécifiques informent les agriculteurs semaine après semaine de l'évolution des infestations dans les champs, et recommandent le cas échéant, les interventions utiles.

Tableau 5 : stades de développement du froment (Tottman et Broad 1987) et travaux associés

Stades	Echelle BBCH	Travaux agricoles	Périodes probables en région wallonne
 Germination -levée	00-09	Travail du sol + Semis	Mi-octobre à mi-novembre
Développement des feuilles basales	10-19		
 Tallage	20-29	Fumure : 1 ^{ère} fraction Désherbage	Décembre à février
 Montaison	30-39		Mars à avril
Stade 1 nœud	31	Régulateur de croissance	
Stade 2 nœuds	32	Fumure : 2 ^{ème} fraction (Fongicide : 1 ^{er} traitement)	
Dernière feuille pointante	37		
Dernière feuille étalée	39	Fumure : 3 ^{ème} fraction	
Gonflement	40-49	Fongicide : 2 ^{ème} traitement	Début mai
 Épiaison	50-59	(Insecticide)	Mi-mai à début juin
Début épiaison (10% de l'épi au dessus de la ligule de la dernière feuille)	51		
Mi-épiaison (50% de l'épi au dessus de la ligule de la dernière feuille)	55		
Fin épiaison (col de l'épi visible)	59		
 Floraison	60-69		Début juin
Développement des grains	70-79		Juin à mi-juillet
 Maturation des grains	80-89	Récolte	Fin-juillet à mi-août

2.3. Conditions météorologiques et phytotechniques des essais

L'étude a débuté en 2007 et s'est poursuivie jusqu'en 2010. La majorité des observations ont été réalisées dans des champs situés à proximité de Gembloux (Section 2.3.2). D'un point de vue météorologique, les quatre années ont été contrastées et chacune a permis de nouvelles avancées dans l'étude du comportement de la cécidomyie orange. Parallèlement au développement de l'insecte, les cultures ont aussi évolué différemment au cours de ces quatre années. Les différentes situations sont discutées à la section 2.3.1.

2.3.1. Evolution des cultures de froment et conditions météorologiques

Les deux premiers hivers (2007 et 2008) furent particulièrement doux avec une température moyenne pour les mois d'hiver¹⁴ (décembre, janvier et février) de respectivement 5,9°C et 4,8°C. Les deux hivers suivants, 2009 et 2010 furent nettement plus froids avec des moyennes de 1,5°C et 0,8°C et des minima de -22°C et -15°C.

Les périodes d'épiaison sont principalement déterminées par les températures observées durant la fin de l'hiver et au cours du printemps (mars, avril, mai) (Figure 11). Le printemps 2007 fut chaud (10,9°C) et la période d'épiaison¹⁵ débuta exceptionnellement tôt (13 mai), soit l'épiaison la plus précoce observée en Belgique depuis au moins 25 ans (données du Catalogue National des variétés). Le printemps 2008 fut assez conforme aux normales saisonnières. Suite à l'hiver doux, l'épiaison fut relativement précoce et débuta le 24 mai dans la région de Gembloux. En 2009, le printemps fut plus chaud que la normale et permit aux cultures de rattraper leur retard (Figure 11). L'épiaison a d'ailleurs débuté à la même date, à un jour près, que celle de 2008. En 2010, la période froide s'est prolongée jusqu'au mois de juin, ce qui conduisit à des épiaisons plus tardives d'une semaine par rapport à 2008 et 2009.

Les hivers et printemps furent globalement relativement secs en 2007 (367 mm) et 2010 (313 mm) et particulièrement humides en 2009 (529 mm). Cependant, plus encore que pour les températures, les précipitations globales masquent des phénomènes ponctuels particulièrement importants pour le développement de la cécidomyie orange. Il s'agit des périodes de sécheresse printanière de 2007 et, dans une moindre mesure, de 2010. La première dura 40 jours (du 21 mars au 7 mai 2007) et la seconde, 25 jours (du 8 avril au 3 mai 2010). Ces deux périodes n'ont guère eu d'impact sur l'évolution des stades de développement des céréales qui, à cette période, étaient suffisamment développées pour puiser l'eau en profondeur. En revanche, le développement de la cécidomyie orange fut, comme nous le verrons dans cette étude, très dépendant des précipitations.

¹⁴ Hiver et printemps sont ici considérés en termes agronomiques, l'hiver débute le 1^{er} décembre et le printemps le 1^{er} mars.

¹⁵ Les périodes d'épiaison présentées proviennent des essais variétaux officiels (Catalogue national des variétés) semés en octobre sur la région de Gembloux.

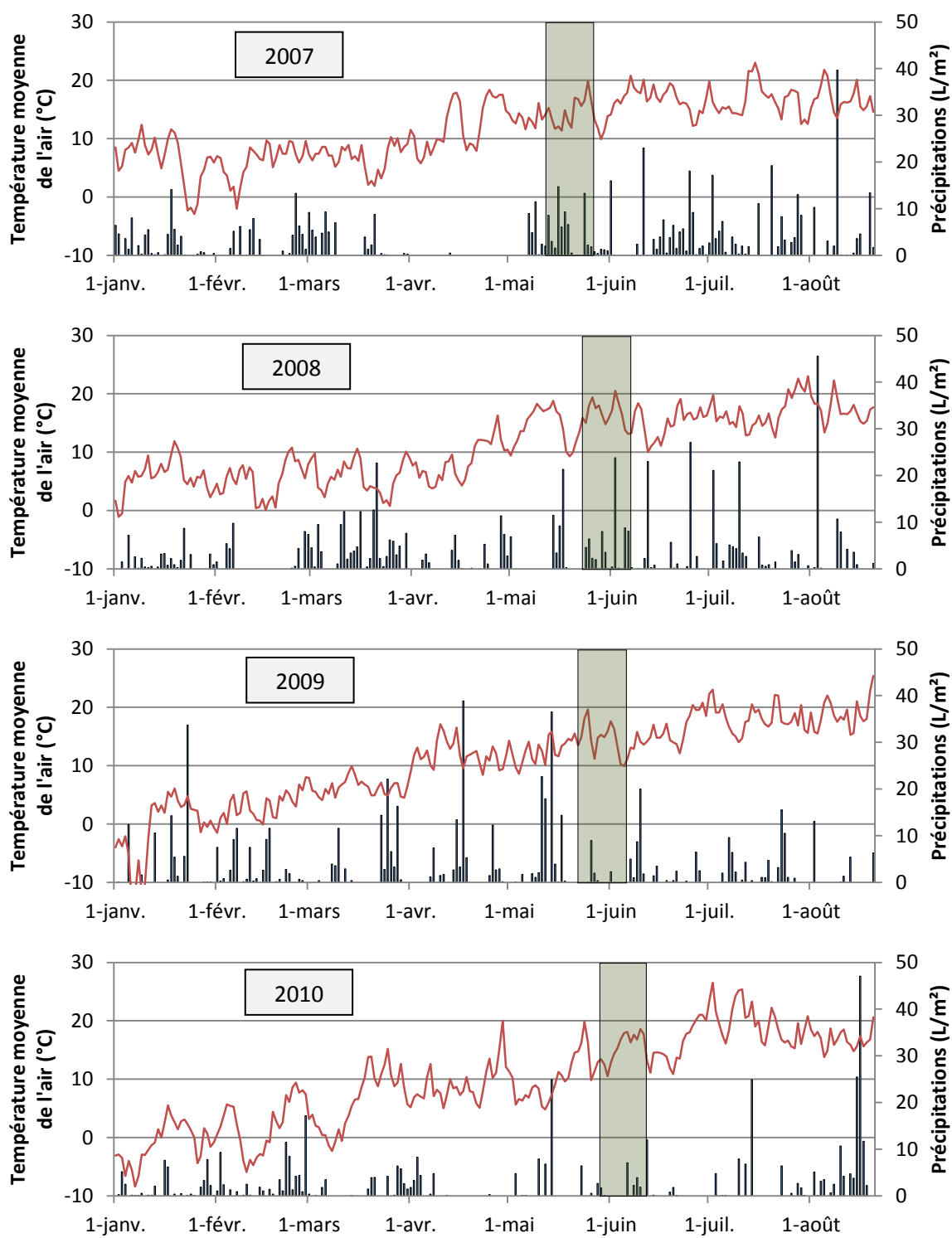
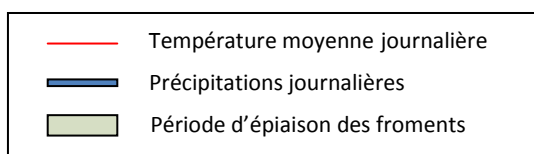
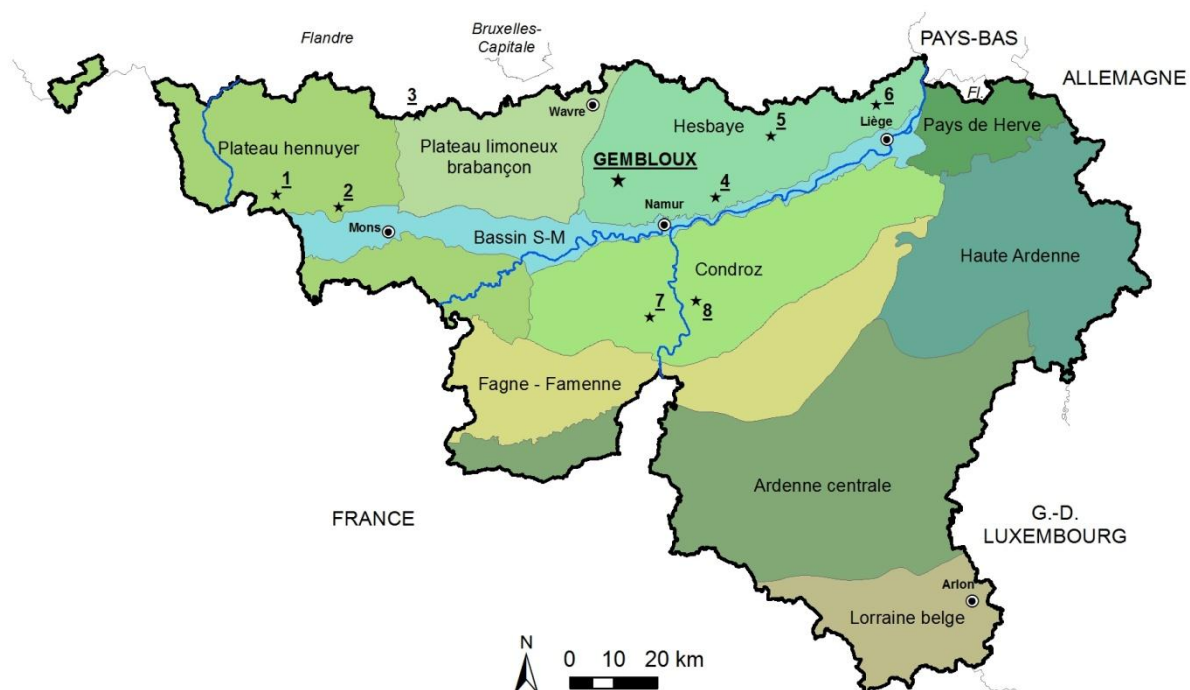


Figure 11 : suivi des conditions météorologiques et des périodes d'épiaison de 2007 à 2010



2.3.2. Localisation des essais

Les expérimentations consacrées à cette étude ont été réalisées en grande majorité dans la région de Gembloux. Afin de juger de la pertinence de ces résultats, d'autres sites répartis dans la zone de production de froment en Wallonie ont également été exploités (Figure 12).



N°	Localités	Commune	Année d'expérimentation
1	Roucourt	Péruwelz	2009
2	Sirault	Saint-Ghislain	2009
3	Petit-Enghien	Enghien	2008, 2009
4	Hingeon	Fernelmont	2008
5	Omal	Geer	2009
6	Wihogne	Juprelle	2008
7	Falaën	Onhaye	2008
8	Purnode	Yvoir	2009

Figure 12 : localisation des sites expérimentaux
(auteurs : X. Legrain et G. Jacquemin)

Pour la zone de Gembloux, dès la première année du projet (2007), des observations ont été réalisées dans un espace d'environ 200 ha, comprenant une cinquantaine de champs répartis sur les entités de Bossière, Corroy-le-Château et Lonzée (Figures 13 et 14). Pour chacune des parcelles suivies, les agriculteurs concernés avaient transmis tous les paramètres culturels utiles (successions des cultures, variétés, travail du sol, etc.). Cet espace comportait des surfaces non cultivées (boisées ou construites), isolant les uns des autres plusieurs groupes de parcelles. Cette structure par îlots était particulièrement intéressante pour l'étude d'un insecte réputé peu mobile. De ce point de vue, chaque îlot pouvait être considéré comme un système fonctionnant de façon plus ou moins fermée : les insectes émergeant des champs d'un îlot, ne se déplacent pas à grande distance, mais s'installent

pour se multiplier dans les froments les plus proches, appartenant au même "système". En identifiant les "champs-sources" et les "champs-cibles" de chaque îlot, et en y effectuant des mesures, on pouvait espérer obtenir une meilleure compréhension de l'évolution des populations que dans des systèmes plus ouverts.

D'un point de vue pédologique, la zone d'étude est située à la limite méridionale de la Hesbaye gembloutoise, avec une couverture limoneuse encore bien présente et continue, mais néanmoins moins épaisse que quelques kilomètres plus au nord, et avec une influence plus marquée du substrat sous-jacent. A la faveur des incisions de l'Orneau et de ses affluents, les roches sous-jacentes se retrouvent très près de la surface ou peuvent même affleurer. Elles ont une incidence sur la charge caillouteuse du sol, son comportement hydrique et sa composition chimique.

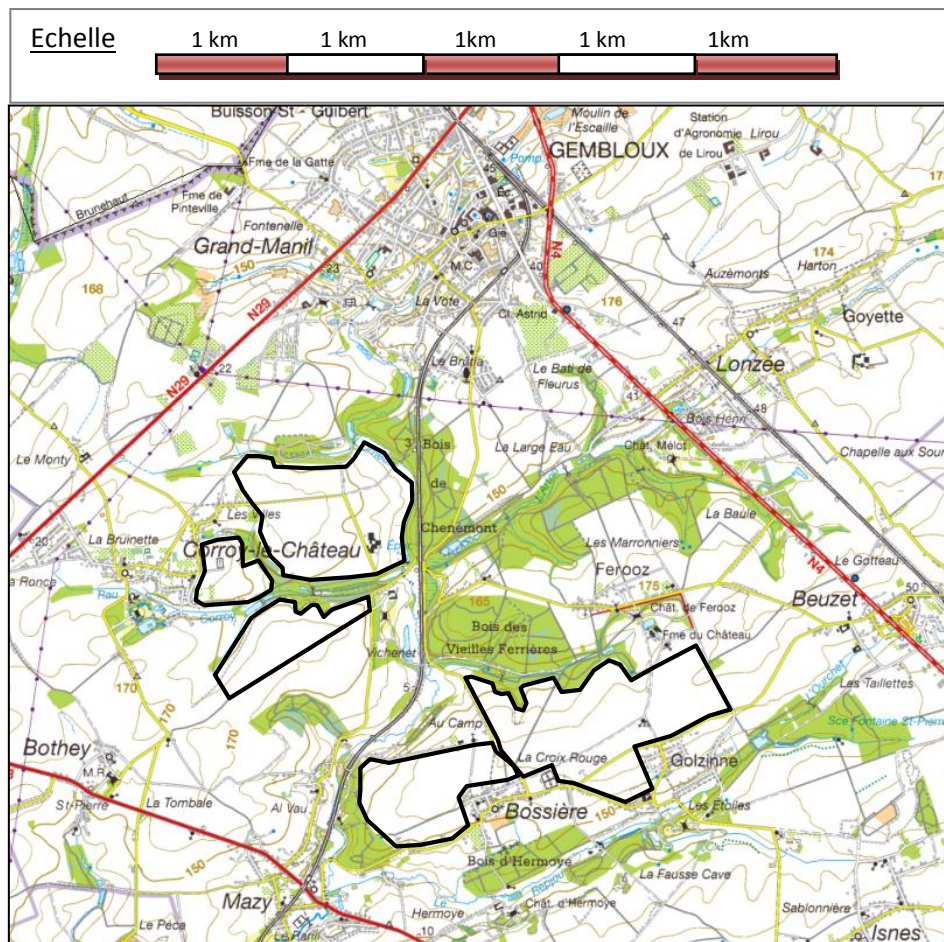


Figure 13 : carte IGN (Institut Géographique National) de la région de Gembloux et des zones d'expérimentation (entourées de noir sur la carte)

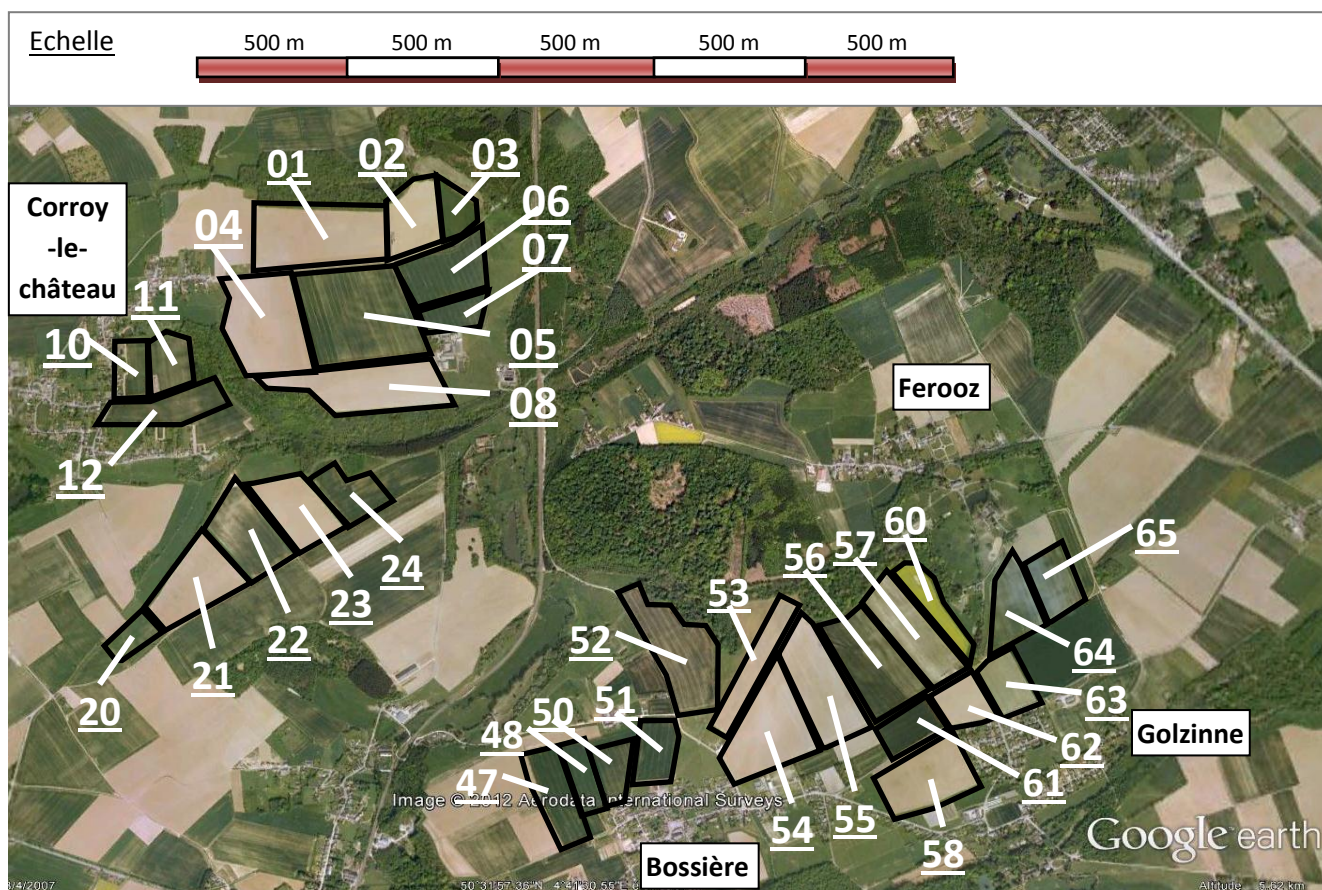


Figure 14 : carte des parcelles choisies pour les observations, et des alentours

Dans l'ensemble, les parcelles choisies étaient assez homogènes d'un point de vue pédologique. Les champs suivis faisaient partie de six exploitations. Ils ont été désignés par un nombre à deux chiffres, dont le premier identifie l'exploitation. Cette information est utile, chaque exploitant ayant sa façon de pratiquer le travail du sol (Tableau 6).

Tableau 6 : exploitations agricoles et gestion du travail du sol

Exploitation	Champs	Travail du sol
Ferme Pilet	01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08	Labour systématique sauf après P. de T.
Ferme Van Eick	10, 11, 12	Labour systématique
Ferme Golar	20, 21, 22, 23, 24	Principalement labour
Ferme Delplace	47, 48	Principalement labour
Ferme Denolf	50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58	Non labour systématique
Ferme Debilde	60, 61, 62, 63, 64, 65	Labour sauf après P. de T. et chicorée

Les rotations choisies par ces agriculteurs sont classiques pour la région. Elles sont principalement constituées de froment, d'escourgeon, de betterave, et de pomme de terre. Les agriculteurs Golar et Denolf ajoutent le lin à leur rotation, et Geert Denolf cultive également du lupin. Les rotations complètes des terres étudiées peuvent être consultées au tableau 7.

Tableau 7 : rotation pratiquée pour les champs dont les populations de *S. mosellana* ont été suivies

N° champ	2006	2007	2008	2009	2010
01	Escourgeon	Betterave	Froment	P.de T.	
02	Escourgeon	Betterave	Froment*	Escourgeon	
03	Ray-grass	Ray-grass	Froment*	Escourgeon	
04	Froment	P. de T.	Froment	Betterave	
05	Betterave	Froment	Escourgeon	Betterave	
06	Froment	Escourgeon	Betterave	Froment	
07	Froment	Escourgeon	Maïs	Froment	
08	Froment*	Betterave	Froment	Lin	
10	Betterave	Froment	Froment	Colza	Froment
11	Betterave	Froment	Froment	Colza	Froment
12	Froment	Froment	Escourgeon	Betterave	
13	Betterave	Froment	Escourgeon	Betterave	
20	Froment	Escourgeon	Betterave	Froment	
21	Froment	P. de T.	Froment	Lin	
22	P. de T.	Froment	Escourgeon	Betterave	
23	Lin	Betterave	Froment	Escourgeon	
24	Froment	Escourgeon	Maïs	Froment	
47	Froment	Escourgeon	Betterave/Froment	Froment	Betterave
48	Froment	Escourgeon	Betterave	Froment	
50	Maïs	Froment	Betterave	Froment	
51	Maïs	Froment*	Betterave	Froment	
52	Betterave	Froment*	Lupin	Froment	Betterave
53	Froment	Lin	Maïs	Luzerne	
54	Froment	Betterave/Lupin	Froment	Lin/Maïs/Betterave	
55	Froment	Lupin	Escourgeon	Betterave/P. de T.	
56	Lin/Chicorée	Froment	Betterave/ P. de T.	Froment	
57	Chicorée	Froment	Lin	Froment	
58	Froment	P. de T.	Froment	Escourgeon	
60	Jachère	Colza	Froment	Froment*	
61	P. de T.	Froment	Escourgeon	Betterave	
62	Froment	Betterave	Froment*	P. de T.	
63	Froment	Froment	Betterave	Froment	

*variété de froment résistante à la cécidomyie orange

Dans la partie expérimentale de cette thèse, les champs dans lesquels les différents essais et observations ont eu lieu seront identifiés selon la numérotation du tableau 7 et de la figure 14. Le lecteur pourra donc s'y référer pour y retrouver la localisation exacte et l'historique.

Chapitre 3 :

*Mesure des populations de *S. mosellana* en Wallonie*



Le troisième chapitre est consacré à l'estimation des populations de cécidomyie orange en Wallonie. Les mesures ont été réalisées selon deux méthodes classiques : le dénombrement des larves, d'une part dans le sol et, d'autre part dans les épis.

3.1. Contexte et objectifs

Appréhender les risques agronomiques liés à la cécidomyie orange du blé en Wallonie impliquait de connaître les niveaux de population auxquels la région pouvait être confrontée. Or, à notre connaissance, seuls quelques signalements de "pullulations" ayant "vraisemblablement entraîné des dégâts" avaient été faits, mais sans aucune mesure objective, ni des niveaux de population en présence, ni de l'ampleur des dégâts (De Proft et Latteur 2000). La première partie de l'étude a donc consisté en mesures des niveaux de population selon les méthodes classiques : dénombrement de larves extraites d'échantillons de sol ou d'épis (Doane et al. 1987; Aitkenhead et al. 1955; Barnes 1952b) (Section 3.2). La démarche visait à obtenir un jeu de données pouvant être rapprochées de mesures faites ailleurs, dans des situations où la relation entre les niveaux de populations mesurés et l'importance des dégâts observés avait pu être établie.

En Europe, c'est surtout au Royaume-Uni, à la suite de la forte pullulation de 1993 que *S. mosellana* a été étudiée (Oakley 1994). Au cours des années suivantes, les populations mesurées par des analyses de sol se sont révélées très élevées. Les nombres moyens de cocons par m² étaient voisins de 4.000¹⁶ en 1994 et de 2.500¹⁷ en 1995 (Oakley et al. 1998). Plus récemment, la moyenne basée sur les prélèvements effectués dans huit Comtés¹⁸ est passée de 1.500 cocons par m² en 2002, à 5.000 en 2003, avant de retomber à 1.500 en 2004 (J. Oakley, communication personnelle). L'année 2003 était celle de la dernière infestation majeure observée au Royaume-Uni (Oakley et al. 2005).

Au Canada, dans la province du Saskatchewan, les niveaux les plus hauts jamais mesurés ont été atteints suite aux attaques de 1983. Dans cinq sites, connus pour avoir subi de lourdes pertes de rendement, des mesures d'infestation opérées après les récoltes ont révélé des niveaux d'infestation de 5.256, 8.916, 25.320, 29.219 et 43.798 larves par m² (Doane et Olfert, 2008).

Le tableau 8 donne quelques exemples de niveaux de population mesurés lors de différentes pullulations observées en Amérique et en Europe.

Tableau 8 : niveaux d'infestation élevés mesurés dans le sol

Année	Pays	Population maximale de <i>S. mosellana</i> observée (cocons/m²)	Sources
2011	Etat-Unis, Dakota du Nord	3.750	Knodel 2012
1995	Canada, Manitoba	7.920	Lamb et al. 1999
1995	Royaume-Uni	4.690	Oakley et al. 1998
1994	Royaume-Uni	7.200	Oakley et al. 1998
1984	Canada, Saskatchewan	43.798	Doane et Olfert 2008
1969	Allemagne	11.200	Basedow et Schütte 1982
1947	Royaume-Uni	16.098	Golightly 1952

Outre les niveaux de population absolus, les vastes campagnes de prélèvements de sol réalisées au Canada ont montré que la distribution de la cécidomyie orange était variable selon les régions et

¹⁶ min = 910, max = 7.200, n = 5 champs

¹⁷ min = 652, max = 4.690, n = 5 champs

¹⁸ n = 19 champs

que les niveaux d'infestation les plus élevés se rencontraient dans les régions les plus productrices de céréales (Doane et al. 2000; Doane et Olfert 2008; Olfert et al. 2009; Lamb et al. 1999).

Les mesures effectuées en Wallonie au cours de notre étude ont comparé les niveaux de populations de *S. mosellana* dans les principales régions céréalières de Wallonie. Les populations de cécidomyie orange ont ensuite été mesurées au niveau de terroirs, puis au niveau de parcelles. Ces mesures visaient, elles aussi, à mieux mesurer le risque constitué par la cécidomyie orange et ce, jusqu'à l'échelon le plus utile à l'agronome : le champ. La section 3.3 portant sur la distribution de l'insecte à l'échelle la plus petite visait aussi à éclaircir des points sur lesquels la littérature comportait des contradictions : effet de bordure, phénomènes agrégatifs, comportement de ponte, déplacements, etc. (Basedow 1973; Kurppa 1989; Pivnick et Labbé 1993 Lamb et al. 1999 ; Doane et al. 2000 ; Liu et al. 2002).

3.2. Mesure des populations dans les champs de la région de Gembloux

3.2.1. Mesure des populations par analyse de sols

a) Matériel et Méthodes

Coordonnées des champs contrôlés pour les prélèvements

De 2007 à 2009, de nombreux champs de la zone définie pour l'étude (Section 2.3.2) ont été échantillonnés afin d'estimer la population de *S. mosellana* dans les sols (Tableau 9). Les prélèvements ont été effectués indépendamment des cultures en place. Ils ont été réalisés une première fois en mars, puis répétés aux mêmes endroits en juin ou juillet puis en septembre. Les prélèvements de mars visaient à mesurer la population de larves avant les émergences printanières, ceux de juin-juillet, la population restant en réserve dans le sol après ces émergences, et enfin ceux de septembre, la population enrichie des larves de la nouvelle génération. Dans cette première étude, seules les analyses des prélèvements de septembre sont considérées.

Tableau 9 : coordonnées des champs dont sont issus les prélèvements de terre

Périodes de prélèvement	N° des champs ¹⁹	Nombre de champs échantillonnés
Septembre 2007	01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 10, 11, 12, 48, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 63	20
Septembre 2008	01, 02, 03, 04, 05, 06, 08, 10, 11, 12, 21, 22, 23, 24, 47, 48, 52, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 63, 64, 65	27
Septembre 2009	01, 02, 03, 04, 05, 06, 08, 10, 11, 12, 21, 22, 23, 24, 47, 48, 52, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 63, 64, 65	27

¹⁹ La localisation et l'historique récent de ces champs sont présentés à la figure 14 et au tableau 7, page 33 et 34.

Echantillonnage de sol

En 2007, les prélèvements ont été réalisés en 40 prises par champ, distantes d'au moins 10 m entre elles, à l'aide d'une sonde de 2,5 cm de diamètre, et sur une profondeur de 20 cm (par champ : surface prélevée = 196 cm², volume prélevé = 3.925 cm³). Ce procédé de sous-échantillonnage en 40 prises visait à donner à l'échantillon soumis à l'analyse une bonne représentativité du champ correspondant. Chaque carotte prélevée a été coupée en deux parties représentant, l'une les 10 cm les plus superficiels, l'autre les 10 cm suivants.



Photo 21 : sonde utilisée pour les prélèvements

En 2008 et 2009, le diamètre de la sonde utilisée était de 4,2 cm au lieu de 2,5 cm, et un échantillon était constitué de 30 prises (volume = 8.320 cm³) au lieu de 40. La surface totale analysée par champ était donc de 416 cm² par champ. A titre de comparaison, les surfaces prélevées pour le suivi des populations au Canada étaient de 50,6 cm² par champ (Olfert et al. 2009) tandis que pour les études allemandes, les prélèvements d'un champ allaient de 200 à 400 cm² (Basedow 1977a).

Extraction des cocons

L'extraction des cocons est basée sur la méthode décrite par Doane et al. (1987) lui-même s'inspirant de Golightly (1952) et de Basedow et Schütte (1971). Elle débute par la dispersion de l'échantillon de terre dans un seau de 10 litres rempli d'eau. Après agitation, on laisse sédimenter la terre pendant 10 secondes. Puis l'eau contenant les particules les moins denses en suspension est versée sur deux tamis superposés, le premier de 3 mm de maille et le second de 300 µm. Le premier tamis retient les débris les plus grossiers, mais laisse passer les cocons de *S. mosellana*; le second retient les cocons et laisse passer les particules fines. Ensuite le seau est à nouveau rempli, le contenu agité, et l'eau à nouveau versée au-dessus des tamis. Cette opération est répétée 10 fois, après quoi le contenu du tamis de 300 µm est versé dans un vase de Berlin en rinçant le tamis à l'aide d'une pissette remplie d'une solution aqueuse de MgSO₄ de densité égale à 1,21. La solution est mise sous agitation magnétique pendant 10 minutes afin de bien séparer les cocons des particules les plus lourdes. Les cocons flottent dans cette solution. Le surnageant est passé sur un tamis de 200 µm dont le résidu est ensuite récupéré dans une cellule de comptage pour examen et comptage sous loupe binoculaire. Comme l'avaient déjà constaté Doane et al. (1987), plus de 95 % des larves peuvent être extraites par cette méthode. Les cocons sont triés selon leur forme et leur couleur sous loupe binoculaire, avant d'être dénombrés.

b) Résultats et discussion

Au cours des trois années d'étude (2007-2009), le nombre de cocons de cécidomyie orange présents dans le sol est resté relativement faible (Figure 15).

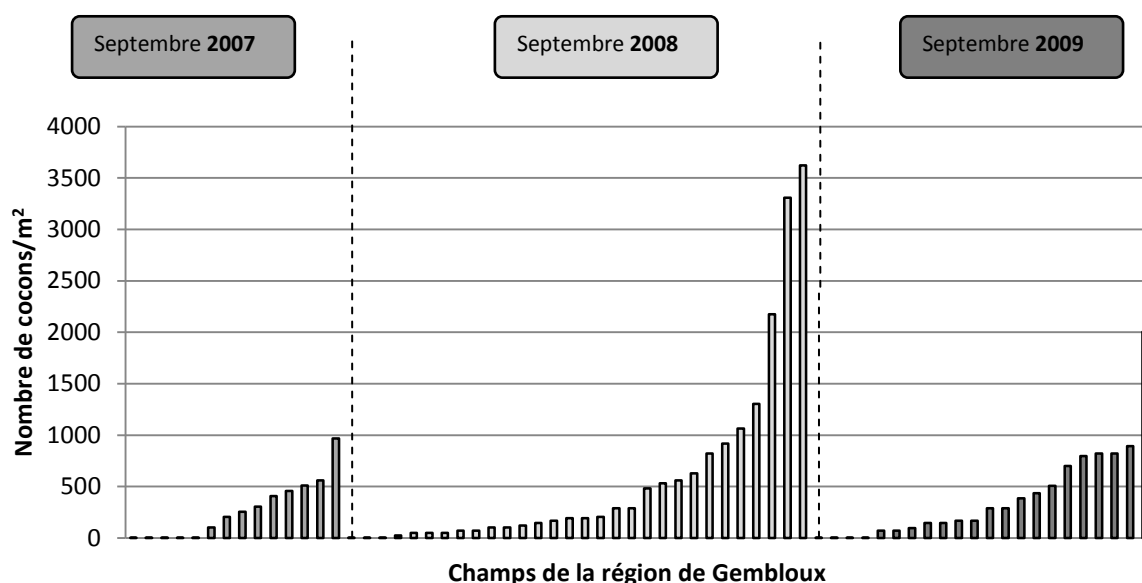


Figure 15 : distribution des populations dans le sol au cours des années 2007 à 2009
(champs de la région de Gembloux)

En moyenne, on comptait respectivement 263, 574 et 401 larves par m^2 en septembre 2007, 2008 et 2009. La quantité de larves dénombrées par champ est très variable. La majorité des champs ne contenaient que de faibles effectifs. Cependant, quelques champs affichaient des niveaux de population supérieurs à 1.000 larves par m^2 , particulièrement au terme de la saison 2008.

On notera aussi que l'on n'a pas retrouvé de cocons de cécidomyie orange dans 5, 3 et 4 champs respectivement en 2007, 2008 et 2009.

Au Canada, un seuil de risque acceptable a été fixé à 600 larves par m^2 (Elliott et al. 2011a). A ce niveau, les dégâts potentiels ne sont plus jugés négligeables et au-delà de 1.200 larves par m^2 , le risque est considéré comme tellement élevé qu'il est déconseillé à l'agriculteur d'implanter des cultures sensibles (Doane et al. 2002).

Les résultats de ces mesures indiquent qu'à la fin des années 2008 et 2009, certains champs de la région de Gembloux étaient infestés à des niveaux largement suffisants pour constituer un risque de perte de rendement important.

3.2.2. Mesure des populations par dénombrement des larves dans les épis

a) Matériel et méthode

Durant la période 2007-2009, un minimum de 150 épis a été collecté dans chacun des champs de froment suivi. Suivant les années, les prélèvements d'épis ont eu lieu respectivement le 29, 24 et le 25 juin. Les épis sont collectés au champ à l'aide d'une paire de ciseaux et placés dans un sac plastique référencé. Dans l'heure qui suit, les sacs sont placés dans un congélateur à $-18^{\circ}C$ en attendant l'extraction des larves. Pour effectuer cette extraction, les épillets sont détachés des rachis des épis après avoir au préalable coupé les barbes lorsque cela est nécessaire (variétés barbuées). Les épillets sont immergés dans un litre d'eau maintenue sous agitation pendant 20 minutes via un agitateur à barrette magnétique. La solution est ensuite versée sur trois tamis superposés. Le tamis

supérieur possède des mailles de 2,8 mm, le moyen de 1 mm et le dernier de 0,3 mm. Les deux premiers tamis retiennent les débris végétaux les plus grossiers mais laissent passer les larves de *S. mosellana* qui sont ensuite retenues par le dernier tamis. Les épillets disposés sur le tamis sont mélangés à la main, sous un jet d'eau continu pendant 5 minutes. Ensuite les larves retenues sur le tamis de 0,3 mm de maille sont recueillies dans un pot transparent, puis disposées dans une coupelle et dénombrées sous loupe binoculaire.

b) Résultats et discussion

Les trois années étudiées furent très contrastées en ce qui concerne la production de larves de nouvelle génération. En 2007, cette production fut quasiment nulle. 2008 fut très favorable aux cécidomyies tandis qu'en 2009, le taux de multiplication de la cécidomyie orange demeura assez faible (Figure 16).

L'année 2007, vit les cécidomyies émerger deux semaines après la fin de la période vulnérable du blé. L'attaque n'eut dès lors pas lieu pour les champs semés classiquement à l'automne. Le champ 63, semé en février, fut le seul à permettre la coïncidence entre l'épiaison et les pontes de cécidomyie.

En 2008, les nombres de larves produites ont atteint des niveaux relativement élevés. Cependant, on remarque une grande variabilité selon les champs. Un niveau de 7 larves/épi constitue le record observé durant la période 2007-2010 sur la région de Gembloux. Deux champs, ont présenté ce niveau élevé en 2008 : le champ 47 et le champ 01. Le premier est un cas très particulier puisqu'il s'agit d'un champ qui en jouxtait un autre ayant porté du froment quatre années consécutives entre 2003 et 2006 (Figure 14). Le second était divisé en bandes longues et étroites (48 m) de variétés différentes. La première bande bordant la grande plaine de culture portait une variété dont la période vulnérable a coïncidé avec la majorité des vols. Cette bande du champ 01 a vraisemblablement concentré des pontes de femelles issues de l'ensemble de la plaine.

En 2009, les champs les plus atteints ne présentaient que 2 larves/épi. Cette année-là, ce sont les conditions défavorables de vols qui n'ont pas permis à la cécidomyie orange de se multiplier. Ce cas sera discuté à la section 8.3.1.

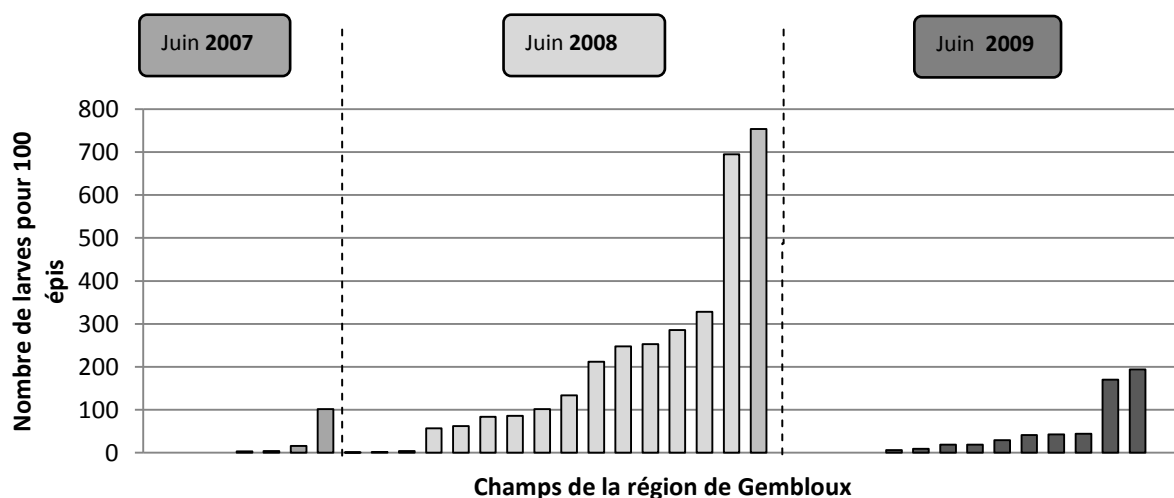


Figure 16 : niveaux d'infestation observés sur la région de Gembloux en 2008 et 2009

Les réserves de populations étant faibles dans les sols à l'entame de la saison 2008, la part de la population des sols en septembre 2008 était majoritairement constituée des nouvelles larves. Dans ces conditions, le dénombrement des larves dans les épis s'est avéré une méthode fiable de mesure des populations.

En effet, il existe une bonne corrélation entre les résultats obtenus par dénombrement des larves dans les épis et l'augmentation de la population larvaire du sol. L'apport au sol est déterminé par la différence entre les effectifs mesurés lors des prélèvements de sol effectués en juin (après les vols) et ceux mesurés lors des prélèvements du mois de septembre suivant (après la chute des larves au sol) (Figure 17). Cette constatation permet de valider les deux méthodes de dénombrement des larves.

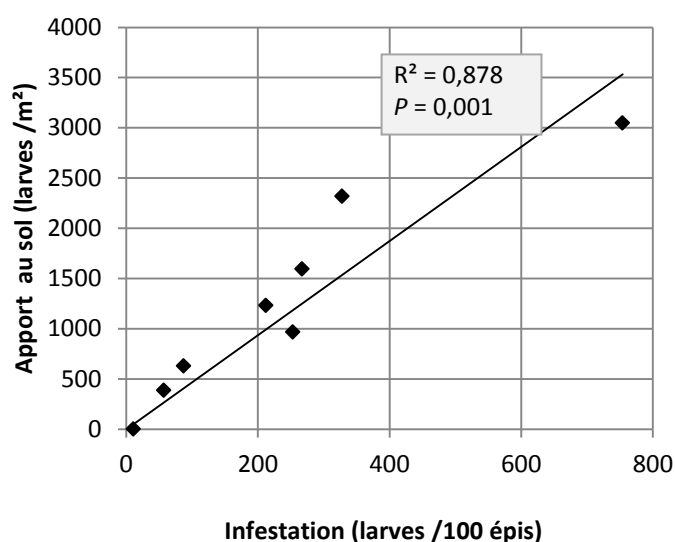


Figure 17 : relation entre l'infestation des épis et l'infestation du sol après saison en 2008

3.3. Distribution spatiale de *S. mosellana* dans les champs

L'étude de la distribution de l'infestation au sein d'un champ a été entamée dans le prolongement des études précédentes visant à déterminer la distribution à une échelle supérieure. L'objectif était de savoir si la distribution au sein d'une même parcelle justifiait ou non une gestion différenciée des bordures et du reste du champ.

a) Matériel et méthode

En 2010, des épis provenant de quatre champs de froment différents ont été collectés. Les champs ont été quadrillés en fonction des distances séparant les traces de pulvérisation. Les quatre champs étaient de tailles similaires (environ 100 x 150 m). L'un était situé à Juprelle près de Liège (champ A : 6 larves/épi), un deuxième à Corroy-le-Château à l'ouest de Gembloux (champ B : 0,25 larve/épi). Les deux derniers étaient contigus et se trouvaient à Sauvenière au nord-est de Gembloux (champs C : 1,75 larves/épi et D : 0,2 larve/épi). Pour ces quatre champs, les prélèvements d'épis ont été effectués la dernière semaine de juin, sur une zone d'un m² aux intersections d'un maillage de 21 m, à raison de 50 épis par prélèvement (A, B) ou de 30 m, à raison de 40 épis par prélèvement (C, D). L'extraction des larves et leur dénombrement ont été réalisés comme décrit Section 3.2.2.

b) Résultats

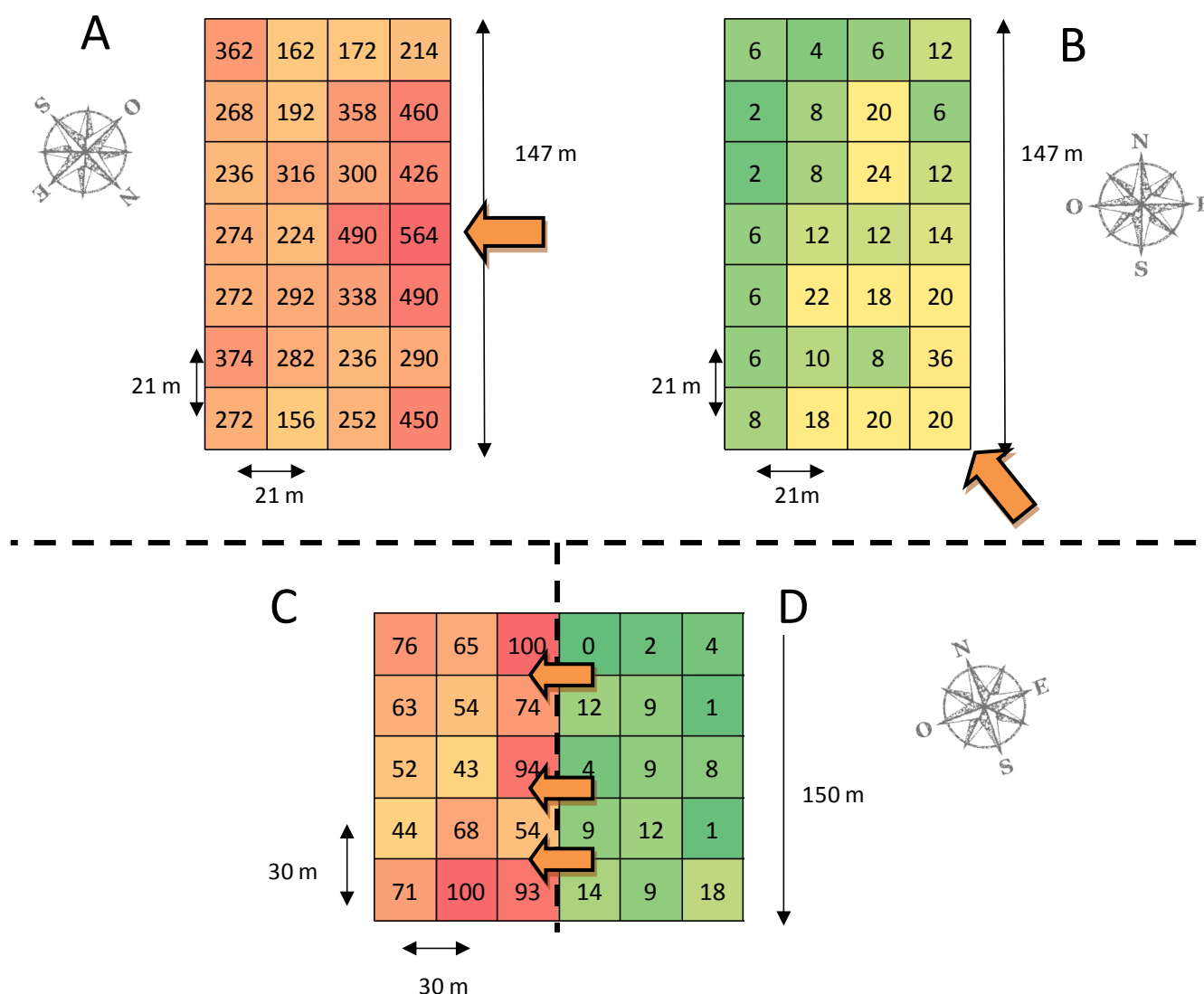


Figure 18 : répartition spatiale de l'infestation dans quatre champs

Les valeurs indiquent le nombre de larves par prélèvement. Les couleurs : du vert au rouge en passant par le jaune, sont à mettre en relation avec les effectifs croissants de larves dénombrées. Les flèches orange indiquent le sens présumé de la colonisation des champs, en fonction de la présence de voisins. Pour la colonisation du champ C, les cécidomyies provenaient du champ D qui était un "champ-source".

L'examen des niveaux d'infestation mesurés dans les quatre champs indiquent que toutes les mesures effectuées dans un même champ sont du même ordre de grandeur (Figure 18). Ces observations confirment l'hypothèse de Kurppa qui soutient la thèse d'un mécanisme de dispersion des pontes (Kurppa 1989).

Toutefois, au travers des légers gradients d'infestation observés au sein de chaque champ, on pourrait penser qu'il subsiste des traces du sens dans lequel chacun a été colonisé. Ces mouvements supposés sont représentés par des flèches orange dans la figure 18. Ils n'ont fait l'objet d'aucune mesure. Toutefois, ils se présentent comme une vraisemblance et pourraient bien correspondre aux "effets de bordure" évoqués par Basedow (1973).

Par ailleurs, même si deux champs de froment sont contigus (situation des champs C et D), les niveaux mesurés entre les champs peuvent différer fortement. Ceci est, une fois de plus, à mettre sur le compte de la coïncidence qui, en fonction de la précocité des variétés, a été plus favorable pour le champ C que pour le champ D.

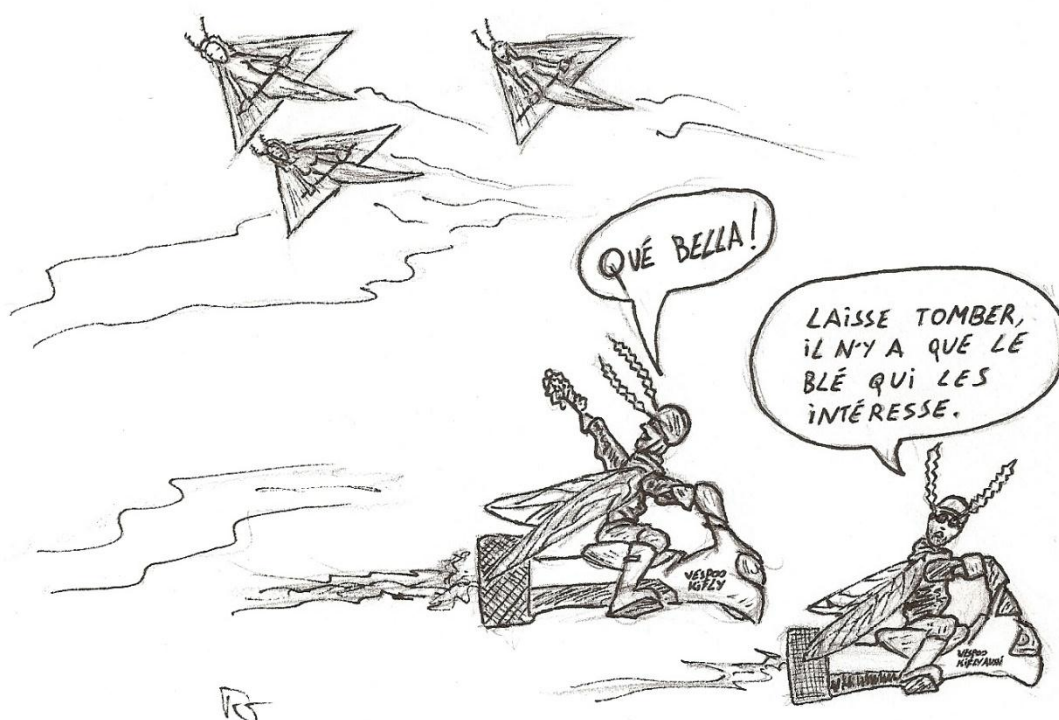
3.4. Conclusion

Les mesures de populations effectuées dans la région de Gembloux par extraction des larves, soit du sol, soit des épis, ont montré des niveaux variés en fonction de divers facteurs tels que la charge de la rotation en froment, ou l'occurrence d'une bonne coïncidence entre les pontes et la phase vulnérable du blé. Par comparaison avec des références établies à l'étranger, il est apparu que certains champs présentaient des niveaux suffisamment élevés pour constituer un risque de dégât. La Wallonie doit donc compter avec la cécidomyie orange, et mettre en œuvre une gestion de la protection du froment, qui intègre ce ravageur.

L'homogénéité de la distribution de *S. mosellana* au sein d'un même champ a été démontrée. Elle contraste avec l'hétérogénéité marquée entre champs, même adjacents. Elle est notamment révélatrice d'une dynamique de population de l'insecte intimement liée à la parcelle, mais aussi du comportement de ponte des femelles, qui répartissent leurs œufs sur l'ensemble du champ. Cette information permet d'estimer le niveau d'infestation d'un champ à partir de quelques mesures seulement.

Chapitre 4 :

Captures au piège à phéromone : possibilités, limites et interprétation



Le piège à phéromone est facile à mettre en œuvre et permet des effectifs de capture très élevés. Toutefois, il ne capture que les mâles, particularité qui impose une interprétation prudente des données, tenant compte des différences de comportement des deux sexes. Le chapitre 4 est consacré à l'étude de cet outil peu -et quelquefois mal- utilisé jusqu'ici.

4.1. Contexte et objectifs

En développant le piège à phéromone sexuelle, des chercheurs du Rothamsted Research (Royaume-Uni) pensaient mettre au point un outil de mesure du risque d'infestation des épis dans les champs de froment : à un volume de captures élevé devait, pensaient-ils, correspondre un risque élevé, donnant à l'agriculteur le signal qu'un traitement insecticide était nécessaire (Bruce et al. 2007). De 2005 à 2008, ils exploitèrent un réseau de pièges à phéromone (Ellis et al. 2009). Celui-ci couvrait chaque année une quinzaine de champs, dont une bonne dizaine de champs de froment et quelques terres en jachère, où les pièges étaient relevés deux à trois fois par semaine. Cette étude a révélé une mauvaise corrélation entre les volumes de captures et l'infestation des épis. Cette même conclusion avait déjà été tirée d'une étude menée au Canada, où le suivi des captures n'avait pas permis de mesurer le risque d'infestation des épis de manière fiable (Mircioiu 2004). Dans ces deux pays très concernés par le ravageur, ces résultats ont pratiquement conduit à l'abandon de l'utilisation des pièges à phéromone au profit des classiques pièges collants, ou pièges à noyade dont les effectifs de captures sont pourtant jusqu'à 100 fois moindres (Ellis et al. 2009).

Dans ce chapitre, nous avons voulu répéter, dans le contexte de la culture de froment telle qu'elle est conduite en Wallonie, l'expérimentation visant à faire le lien entre, d'une part les volumes de captures au piège à phéromone et, d'autre part les niveaux d'infestation des épis (Section 4.3).

Nous avons également étudié ce piège en tant qu'outil de mesure des niveaux de population dans les "champs-sources", et nous avons comparé les effectifs d'insectes capturés de la sorte à ceux obtenus par l'analyse de sol classique (Section 4.4). Le relevé des pièges étant rapide et aisé, de grands nombres de pièges ont pu être déployés, et la distribution des captures a pu être étudiée à trois niveaux d'échelle : au sein d'un même champ, au sein de champs proches les uns des autres dont certains constituaient des groupes de champs adjacents, et enfin au niveau de quatre régions céréalières de Wallonie (Section 4.5).

Un piège à phéromone relevé quotidiennement donne aussi une idée de l'activité de la cécidomyie, et des conditions météorologiques qui y sont favorables. Les volumes de captures quotidiennes ont été mis en relation avec les conditions météorologiques enregistrées, de même qu'avec l'observation directe de l'activité de l'insecte au champ (Section 4.6).

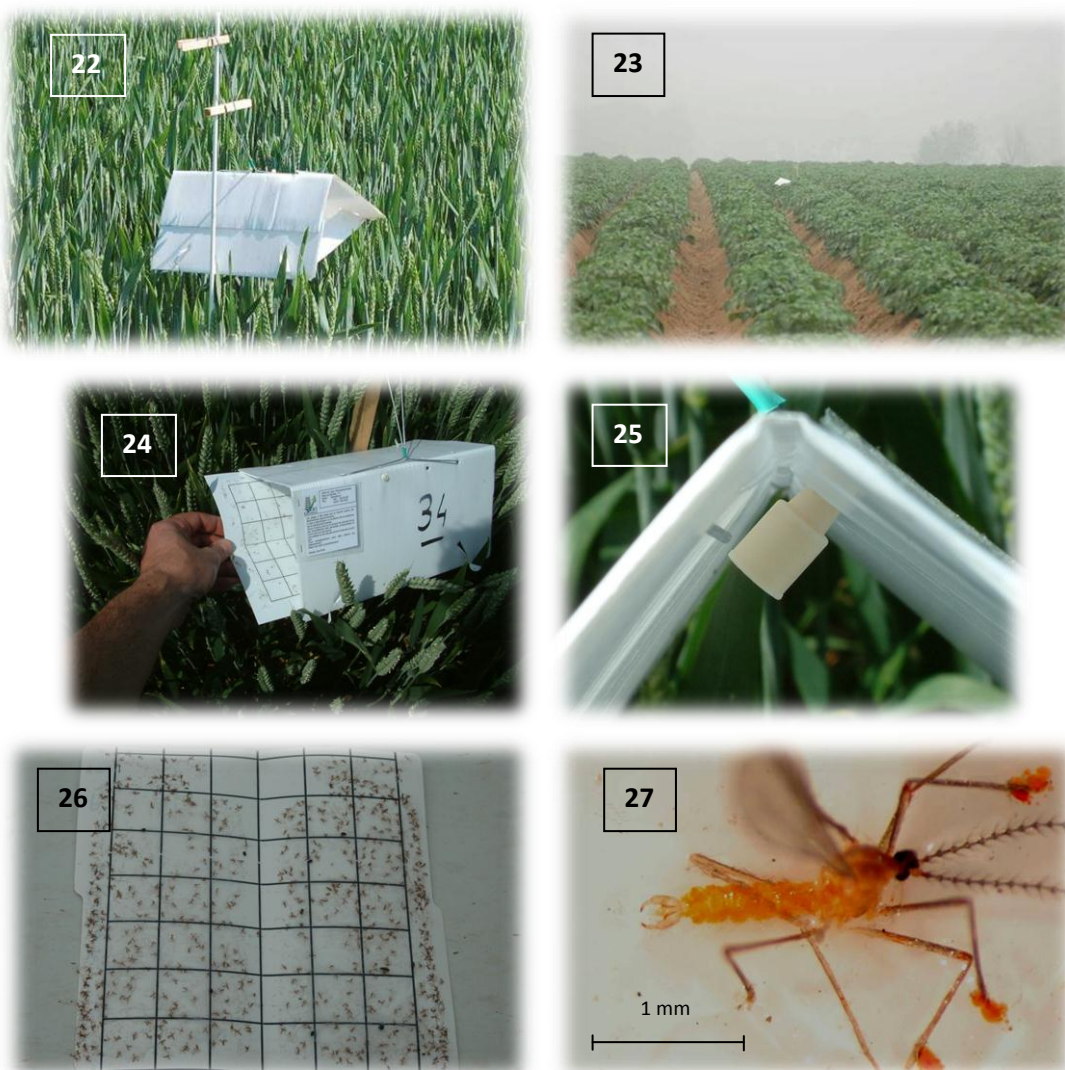
Enfin, l'évolution sur quelques jours consécutifs de la distribution des captures dans un ensemble de champs très proches a permis de recueillir des informations sur le déplacement de l'insecte (Section 4.7).

Tous les essais relatés au chapitre 4 utilisent les mêmes pièges, déployés de manière similaire dans tous les champs. Ces éléments techniques sont décrits à la section 4.2.

4.2. Description du piège à phéromone et du réseau de piégeage

De 2007 à 2010, un réseau de pièges à phéromone a été déployé à proximité de Gembloux dans la zone qui avait également fait l'objet des prélèvements de sol présentés à la section 3.2.

Dans chacun des champs suivis (Tableau 10) durant la période des vols, au moins deux pièges à phéromone avaient été disposés. Ces pièges étaient composés de quatre éléments : un diffuseur de phéromone constitué d'une capsule en caoutchouc permettant une émission progressive de la phéromone (Photo 25), un piège delta (Photo 22) dont le plancher amovible était constitué d'une plaque engluée (Photos 24 et 26), et un jalon en fibre de verre de 1,30 m auquel le piège était suspendu (Photo 22). Les diffuseurs et les pièges delta étaient commercialisés par la société Agrisense® (Pontypridd, Mid Glamorgan, UK).



Photos : (auteur : G. Jacquemin)

22 et 23 : pièges delta dans champs de froment et de pomme de terre

24 : relevé de la plaque engluée

25 : diffuseur de phéromone

26 : plaque engluée après captures

27 : mâle englué

Les pièges étaient placés à 40 cm de haut et remontés progressivement pour se trouver à hauteur du sommet de la végétation. Le plancher englué amovible a été remplacé quotidiennement²⁰ entre 9h et 12h.

Tableau 10 : coordonnées des champs suivis par pièges à phéromone

Années	N° des champs	Nombre de champs suivis
2007	10, 11, 12, 21, 22, 23, 24, 48, 50, 53, 54, 55, 56, 57	14
2008	01, 03, 05, 06, 10, 11, 12, 22, 23, 24, 47, 48, 52, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 63, 64, 65	22
2009	01, 02, 04, 05, 06, 08, 11, 12, 21, 22, 47, 52, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 63	20
2010	01, 06, 11, 47, 52, 57, 63	7

La durée d'utilisation préconisée des capsules est de six semaines. En 2007 et 2008, les capsules ont été remplacées après ce délai. Cependant, lors de la deuxième année d'essai, celles qui avaient été utilisées lors de la première campagne étaient toujours aussi attractives que des nouvelles²¹. Dès lors, à partir de 2009, les capsules n'ont plus été renouvelées en cours de saison. Les pièges étaient toujours placés à au moins 25 m des bords des champs et à 50 m les uns des autres pour éviter les éventuels effets de bordure et les interactions entre pièges. Les insectes capturés étaient identifiés et dénombrés sous loupe binoculaire.

4.3. Fiabilité du piège à phéromone en tant qu'outil de prévision du risque

Malgré les mauvais résultats des études canadiennes (Mircioiu 2004) et britanniques (Ellis et al. 2009) menées sur ce thème, l'évaluation du piège à phéromone en tant qu'outil de mesure du risque a été répétée, avec pour objectif de tenter de comprendre les raisons des résultats observés, et d'identifier si possible les conditions d'application dans lesquelles le piège à phéromone pourrait tout de même donner une mesure du risque. A cette fin, un suivi quotidien des captures a été assuré dans une série de champs dont l'historique était connu. L'étude a testé la corrélation entre les captures et l'infestation des épis en considérant, d'abord le total des captures de la saison et, ensuite les captures faites seulement pendant la période vulnérable du champ de froment correspondant.

a) Matériel et méthodes

Les sept champs de froment suivis en 2008 étaient tous situés à proximité de Gembloux. Les précédents culturaux et les variétés sont repris au tableau 11. Le niveau d'infestation des sols avait été mesuré en avril, par extraction et dénombrement des larves selon la méthode présentée à la section 3.2.1. Les stades de développement de la culture ont été évalués quotidiennement. La

²⁰ En 2009, le nombre de pièges à relever étant très important (70), à partir du 7 juin, les pièges des champs 21, 22, 52, 56, 57 et 62 n'ont plus été relevés durant les week-ends.

²¹ En 2008, l'attractivité de 12 capsules issues de la campagne 2007 et replacées au frigo de juillet 2007 à mai 2008 a été comparée à celle de 12 autres achetées en 2008, sans révéler de différence.

période au cours de laquelle le froment a été considéré comme vulnérable à la cécidomyie orange s'étendait du stade 51 au stade 59 marquant respectivement le début et la fin de l'épiaison (Tableau 5). Deux pièges à phéromone étaient disposés dans chaque champ à au moins 25 m des bordures et au moins 50 m l'un de l'autre. Les pièges ont été relevés quotidiennement. La somme des captures de chaque piège a été confrontée au nombre de larves présentes dans les épis. Les prélèvements de 200 épis par champ ont été réalisés le long de la trace de pulvérisation qui reliait les deux pièges à phéromone à une distance supérieure à 10 m de chacun des pièges soit sur les 30 m restants. L'extraction et le dénombrement des larves ont été réalisés comme décrit à la section 3.2.2.

b) Résultats et discussion

D'un champ à l'autre, les volumes de captures se sont révélés très différents : de 835 à 3.386 sur l'ensemble des vols ou de 261 à 1.832 pendant l'épiaison (Tableau 11). Les niveaux d'infestation des épis, quant à eux, étaient encore plus disparates : de 11 à 754 larves par 100 épis.

Tableau 11 : captures aux pièges et infestation des épis en 2008

N° champ	Variété de froment en place	Nombre de captures/ piège sur l'ensemble de la saison	Période vulnérable	Nombre de captures/ piège pdt la période vulnérable	Nombre de larves/ 100 épis
01	Mulan	3.113	29 mai - 4 juin	1.832	695
10	Tuareg	2.230	27 mai - 3 juin	699	253
11	Tuareg	1.839	27 mai - 3 juin	530	328
21	Centenaire	3.386	31 mai - 6 juin	1.019	57
23	Kodex	2.395	31 mai - 6 juin	899	11
47	Smuggler	1.154	27 mai - 2 juin	261	754
60	Lion	835	25 mai - 3 juin	409	212

Que la période de captures considérée soit la saison complète des vols ou seulement la période vulnérable du froment, aucune relation entre les captures de mâles au piège et le nombre de larves présentes dans les épis n'a pu être mise en évidence (Figure 19).

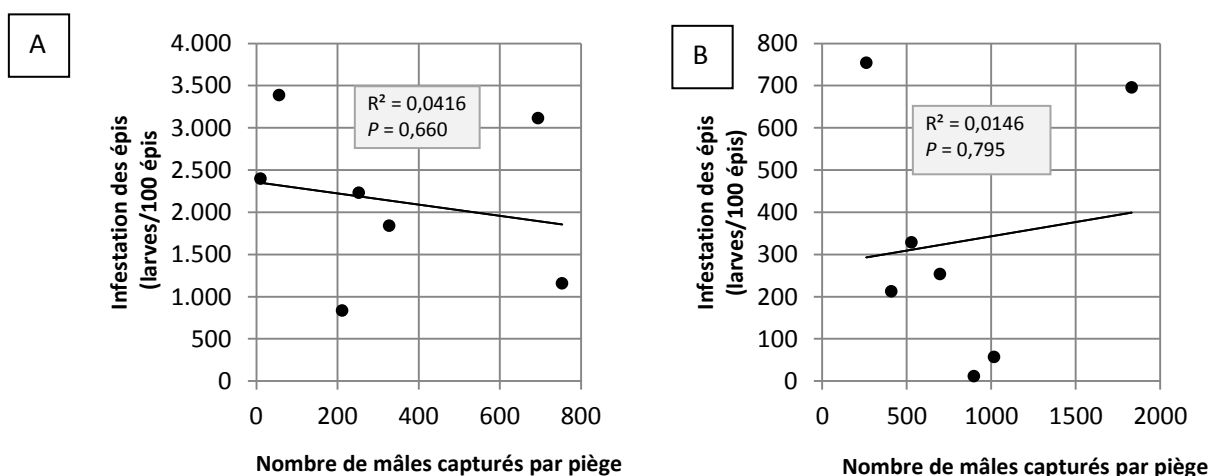


Figure 19 : relation entre l'infestation des épis et les captures au piège à phéromone durant l'ensemble de la période de vol (A) ou durant la phase épiaison (B) pour sept champs suivis en 2008

Ainsi, on observe des captures abondantes dans le champ 21 (1.019 pendant la période de vulnérabilité), sans relation avec le faible nombre de larves dans les épis (57 larves/100 épis). À l'inverse, dans le champ 47, l'infestation des épis est élevée (754 larves/100 épis), alors que les captures au piège étaient faibles (261 pendant la période vulnérable).

Que ce soit dans un sens ou dans l'autre, ces observations confirment que le piège à phéromone disposé dans un champ de froment n'est pas un bon indicateur du risque d'attaque de ce champ par la cécidomyie orange. Cette conclusion confirme les résultats des études canadiennes et britanniques (Mircioiu 2004 ; Ellis et al 2009). Ces résultats signifient que la population de mâles à un endroit donné n'a pas de rapport constant avec la population de femelles prêtes à pondre, et suggère que l'un et l'autre sexe se déplacent de façon différente.

4.4. Le piège à phéromone en tant qu'outil de mesure des populations

Le piège à phéromone mesure l'abondance des mâles de *S. mosellana* qui, à la différence des femelles, sont réputés très peu mobiles, voire sédentaires (Reeher et al. 1945). Se fondant sur cette idée simple, l'hypothèse émise est que le piège à phéromone, alors qu'il ne peut pas déterminer le risque d'attaque dans les "champs-cibles", pourrait donner une idée du volume des populations dans les "champs-sources".

Afin de tester cette hypothèse, l'expérimentation réalisée a consisté à mesurer les volumes de captures dans un vaste réseau de piégeage et de les confronter aux niveaux de populations de larves mesurés dans le sol avant l'émergence.

a) Matériel et méthode

En 2008 et 2009, deux pièges ont été installés dans chacun des champs étudiés, de la manière décrite à la section 4.2. Les nombres de captures présentés dans cette section correspondent à la moyenne de ces deux pièges. Des résultats d'analyses de sol sont également présentés dans cette section. Les prélèvements de sols ont été réalisés avant la période de vol, soit durant les mois de mars 2008 et 2009 et selon la méthodologie détaillée à la section 3.2.1.

Quatorze champs étudiés étaient cultivés en froment, et dix autres en betterave (Tableau 12).

b) Résultats et discussion

Entre les niveaux d'infestation du sol et les effectifs de captures, il n'y a pas de proportionnalité lorsque les pièges sont installés en froment. Dans cette culture, les captures au piège ne reflètent pas le niveau des sources ($r^2 = 0,119$; $p = 0,227$) (Figure 20A) ; en revanche, les captures des pièges installés en betterave en donnent une assez bonne idée ($r^2 = 0,5464$; $p = 0,015$) (Figure 20B). Cette différence provient du comportement des mâles, très différent en fonction de la présence ou non d'un couvert (Section 4.7.1).

Tableau 12 : captures au piège et infestation des sols pour 14 champs de froment et 10 champs de betterave au cours des saisons 2008 et en 2009

N° champ	Culture	Année	Nombre de larves/m ² avant les vols	Nombre de captures/piège sur l'ensemble de la saison
01	Froment	2008	314	3.113
10	Froment	2008	193	2.230
11	Froment	2008	266	1.839
21	Froment	2008	797	3.386
23	Froment	2008	97	2.395
47A	Froment	2008	604	1.154
60	Froment	2008	0	835
06	Froment	2009	290	3124
47	Froment	2009	1449	1660
52	Froment	2009	24	707
56	Froment	2009	0	1233
57	Froment	2009	0	834
60	Froment	2009	918	4022
63	Froment	2009	169	3444
06	Betterave	2008	748	1.829
24	Betterave	2008	435	1.073
47B	Betterave	2008	870	1.748
48	Betterave	2008	676	1.495
56	Betterave	2008	0	752
63	Betterave	2008	628	3.530
05	Betterave	2009	193	2.020
22	Betterave	2009	48	420
54	Betterave	2009	1.063	3.613
61	Betterave	2009	72	237

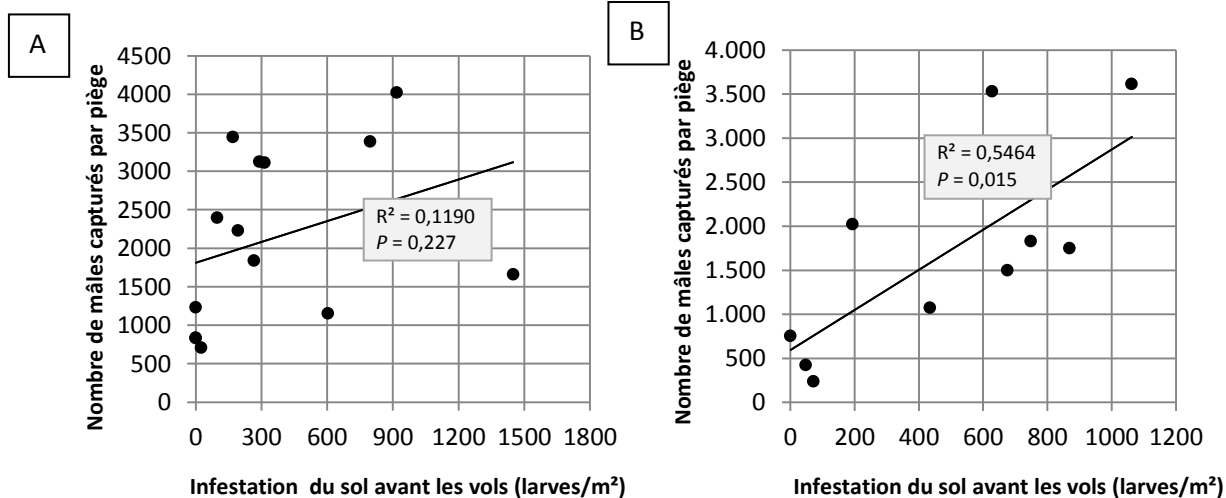


Figure 20 : relation entre l'infestation du sol avant les vols et les captures au piège à phéromone durant l'ensemble de la période de vol (A) pour des champs de froment (B) pour des champs de betterave

Les données de base des figures 20 A et 20 B concernent les années 2008 et 2009, et ont été considérées ensemble dans l'analyse parce qu'elles ont connu des scénarios d'émergences et de vols de cécidomyie orange fort similaires²². Ceci n'aurait pas été possible pour deux années aux conditions d'émergence contrastées. Les effectifs de captures au piège à phéromone ne sont que des mesures indirectes des niveaux de population des sources. Leur dépendance aux conditions de l'année ne permet pas de les considérer comme des mesures absolues. Toutefois, cet outil très simple à mettre en œuvre, permet des comparaisons au cours d'une même saison.

4.5. Distribution spatiale des captures

L'utilisation du piège en tant qu'indicateur des sources, a permis d'évaluer la distribution des cécidomyies mâles à trois échelles : celle d'un champ, celle d'un ensemble de champs proches, et celle d'une vingtaine de champs répartis dans quatre régions pédoclimatiques distinctes de Wallonie.

4.5.1. Distribution entre champs voisins et au sein de ces champs

Un des objectifs de la mise en place d'un réseau de pièges à phéromone, était de comparer des volumes de captures entre champs proches et au sein de ces champs, et de tester le niveau d'indépendance d'un champ à l'autre du point de vue des effectifs capturés. L'hypothèse était que les mâles émergeant des "champs-sources" se déplaceraient peu, conduisant à des effectifs homogènes au sein de chaque champ, mais disparates entre champs même contigus.

a) Matériel et méthodes

En 2009, les captures de 42 pièges répartis dans 21 champs (+/-150 ha) de la zone d'essais de Gembloux (Figure 14) ont été comparées. Dans chaque champ, deux pièges ont été installés et relevés comme décrit à la section 4.2.

b) Résultats et discussion

Les résultats de la campagne de captures 2009 sont présentés à la figure 21: chaque bâtonnet de l'histogramme illustre les captures d'un piège sur l'ensemble de la saison. Comme pour les analyses de sol et d'épis, les différences de niveau de captures se sont révélées importantes entre les champs même contigus, et faibles au sein d'un même champ. Une analyse statistique (ANOVA à un facteur = champ) suivi d'une décomposition de la variabilité (Dagnelie 1998) indique que le facteur champ peut expliquer 95 % de la variabilité laissant 5 % de variance résiduelle qui reflète, elle, la variabilité entre pièges d'un même champ.

²² 2008 et 2009 étaient fort similaires par les dates d'émergence des insectes, par les dates d'épiaison des froments (voir section 8.2) ainsi que par le nombre moyen de captures par piège (1.852 et 1.830 *S. mosellana* capturées en moyenne par piège respectivement pour les saisons 2008 et 2009).

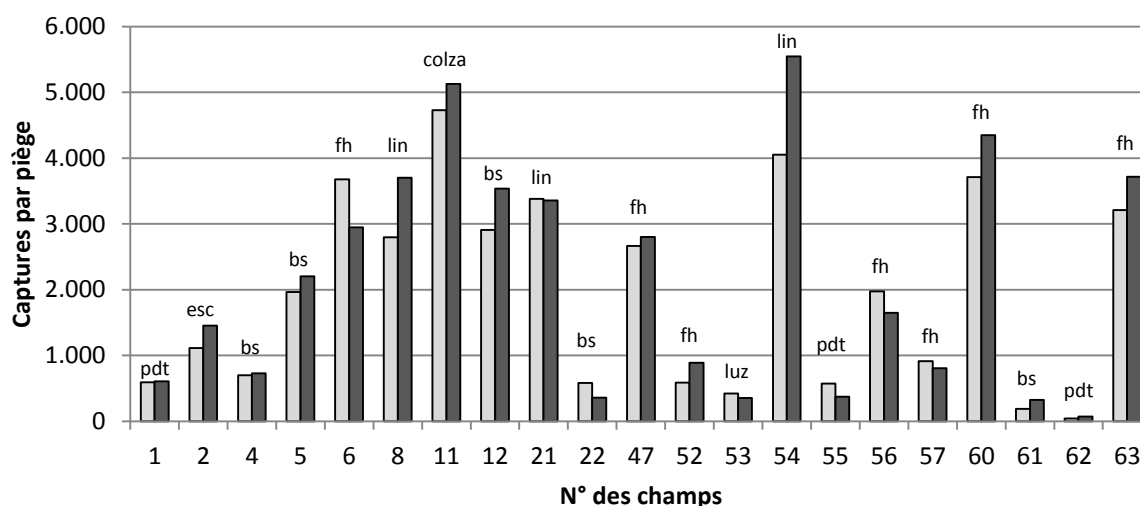


Figure 21 : répartition des captures aux pièges à phéromone en 2009.

Chaque champ comprend deux pièges. Les cultures sont représentées par les sigles suivant : pdt : pomme de terre, esc : escourgeon, bs : betterave sucrière, fh : froment d'hiver, luz : luzerne.

La portée de la phéromone n'est pas connue mais, qu'elle soit longue ou courte, on peut déduire des effectifs capturés que les mâles sont répartis de façon assez homogène dans un champ. Cette observation est la conséquence logique des observations relatives à la distribution des larves dans les épis (Section 3.3). En effet, une distribution homogène des pontes, et donc des larves se développant dans les épis, conduit à une distribution homogène des larves dans le sol, puis à des captures homogènes des adultes mâles émergeant au printemps suivant.

Cette homogénéité des captures à l'intérieur d'un champ trahit également une faible mobilité des mâles. Cet aspect sera développé à la section 4.7.1.

4.5.2. Distribution à l'échelle de la Wallonie

Le piège à phéromone, permettant des effectifs de captures très élevés²³, a été utilisé afin de comparer le niveau des populations dans 20 champs d'historiques récents similaires, distribués dans plusieurs régions céréalières de Wallonie.

a) Matériel et méthodes

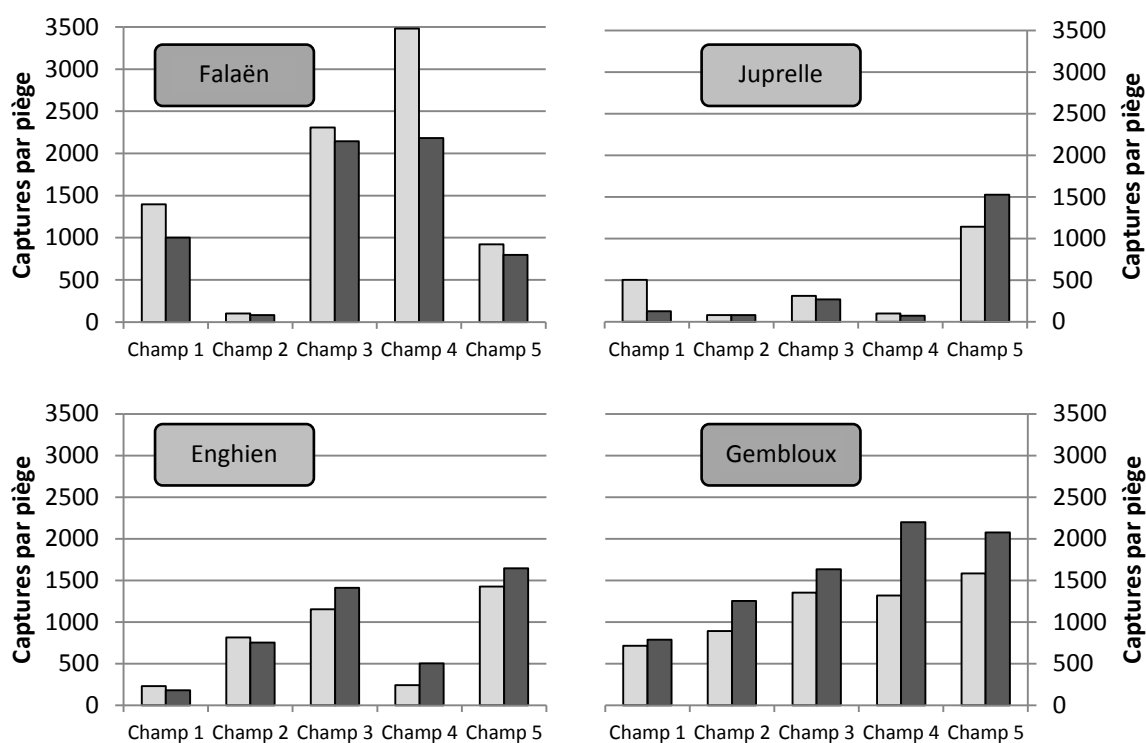
En 2008, quatre sites ont été choisis comprenant chacun cinq champs situés dans un rayon de 5 km, respectivement à Juprelle (Hesbaye liégeoise), à Enghien (région sablo-limoneuse), à Falaën (Condroz namurois) et à Gembloux (Hesbaye gembloutoise) (Figure 12). Les pièges ont tous été installés dans des champs de betterave (en 2008) ayant porté du froment en 2006, dernière année de multiplication importante de *S. mosellana* en Belgique. La culture de betterave a été choisie pour son homogénéité quant au couvert au moment des vols, au travail du sol subi et aux dates de semis. C'est également la culture implantée classiquement deux ans après un froment et après deux

²³ Sur les quatre années d'étude, près de 300.000 mâles de *S. mosellana* ont été capturés sur 174 pièges soit une moyenne de 1.724 captures par piège et par saison.

labours²⁴. Il s'agissait donc à chaque fois de champs potentiellement sources. Dans chacun de ces 20 champs, deux pièges à phéromone ont été relevés quotidiennement pendant toute la période des vols.

b) Résultats et discussion

La figure 22 montre des niveaux de captures variables selon les champs, mais atteste de la présence du ravageur dans chacune des quatre régions. La variabilité d'un champ à l'autre confirme les observations menées dans les environs de Gembloux (Section 4.5.1) : il existe une grande hétérogénéité d'infestation, même entre champs proches les uns des autres. Dans chacune des régions, les captures de certains champs ont atteint ou dépassé 1.000 individus par piège. La cécidomyie ne semble donc pas proliférer plus abondamment dans une région de Wallonie que dans une autre. Ses pullulations sont possibles partout, et répondent à des coïncidences favorables aboutissant à une distribution par "foyers".



**Figure 22 : nombre de captures par piège sur l'ensemble de la saison des vols 2008
(2 pièges par champ)**

²⁴ Le labour enfouit profondément les larves dans le sol. Nos observations ont révélé que leur capacité à émerger est alors moindre. Suite à un second labour, les larves sont ramenées dans la couche du sol proche de la surface et nombre d'entre elles émergent cette même année, soit 2 ans après l'infestation des épis.

4.6. Piège à phéromone : outil de détermination des conditions de vol

Les volumes de captures quotidiennes sont apparus liés aux conditions météorologiques. L'expérimentation rapportée ici, confronte les relevés quotidiens de captures au piège à phéromone aux données météorologiques correspondantes. Cette confrontation visait à préciser les conditions requises pour que les adultes volent.

a) Matériel et Méthodes

L'influence des conditions météorologiques sur l'activité des adultes de cécidomyie orange a été mesurée par deux méthodes.

La première a consisté à confronter les captures comptabilisées chaque matin aux conditions météorologiques de la soirée précédente (station météorologique de Gembloux). L'étude des conditions de vol a été menée à Bossière, notamment dans un champ de lin assez fortement infesté au printemps 2009 (champ 54). Cette culture n'étant pas hôte, les femelles de *S. mosellana* s'en écartent une fois fécondées. En revanche, les populations de mâles y demeurent stables et leur activité peut y être observée plus facilement que dans d'autres cultures. En effet, le couvert du lin, aéré, lumineux et régulier, permet de visualiser la présence et les mouvements des insectes jusqu'au sol.

La seconde a consisté en observations directes au champ. Tous les soirs de la période des vols soit du 13 mai au 22 juin 2009, quatre champs sources (champs 6, 11, 47 et 54 lin) ont été visités en vue de mesurer l'activité des adultes, mâles et femelles. Chaque observation consistait à parcourir aller-retour les 50 m qui séparaient les deux pièges à phéromone de chaque champ. Les plantes inspectées étaient situées dans les 30 cm bordant les traces de roues du pulvérisateur (côté extérieur). Au total, l'observation portait donc sur 30 m² et prenait environ 10 minutes par champ. Des observations et appréciations étaient consignées dans un carnet de champ. En outre, à chaque visite, les deux pièges à phéromone étaient inspectés ce qui permettait de juger de l'activité des mâles à ce stade de la soirée.

b) Résultats et discussion

La confrontation des conditions météorologiques et des captures du champ de lin 54 est présentée à la figure 23. Pour étudier les conditions favorables aux vols, deux périodes de 3 jours consécutifs ont été choisies : la première (21 au 23 mai) où 2 jours à fortes captures encadraient un jour à faibles captures, et la seconde (27 au 29 mai) où c'était l'inverse. Les soirées à fortes captures étaient caractérisées par des températures de 17 à 20°C, une humidité relative comprise entre 60 et 80 % et un vent faible (vitesse moyenne < 13-14 km/h) (Tableau 13). Les soirées à très faibles captures étaient caractérisées, soit par une humidité relative faible (< 50 %), soit par des températures froides (< 13°C) (Tableau 14).

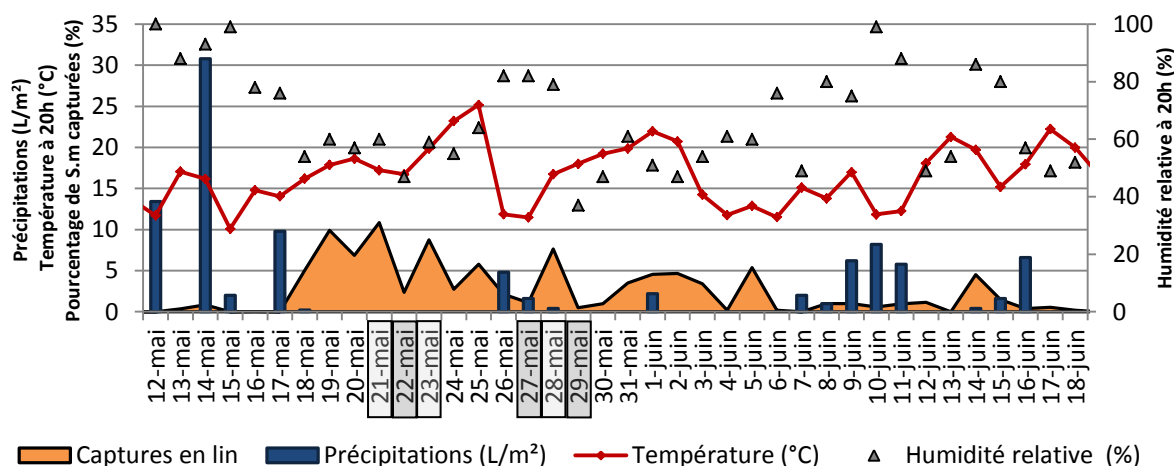


Figure 23 : relation entre les conditions de vol et les captures de mâles dans un champ de lin (champ 54) au cours de la saison 2009

Les conditions météo des dates encadrées et leur influence sur les captures sont détaillées aux tableaux 13 et 14.

Tableau 13 : soirées favorables aux vols

21-mai	P	T°	HR	Vm	VM
18:00	0	19	59	12	18
19:00	0	18	60	14	21
20:00	0	17	61	8	13
21:00	0	17	63	7	9
22:00	0	16	70	4	5
23:00	0	15	73	4	6
00:00	0	14	79	4	9
Nombre de captures ²⁵	519				

23-mai	P	T°	HR	Vm	VM
18:00	0	21	50	9	19
19:00	0	20	59	11	15
20:00	0	20	60	8	11
21:00	0	19	63	9	14
22:00	0	18	65	10	14
23:00	0	17	70	10	15
00:00	0	17	71	10	15
Nombre de captures	418				

28-mai	P	T°	HR	Vm	VM
18:00	0	17	76	12	18
19:00	0	17	77	12	18
20:00	0	17	79	13	21
21:00	0	16	81	12	20
22:00	0	15	80	9	15
23:00	0	15	85	5	9
00:00	0	14	86	6	8
Nombre de captures :	366				

Tableau 14 : soirées défavorables aux vols

22-mai	P	T°	HR	Vm	VM
18:00	0	17	45	14	23
19:00	0	17	46	9	19
20:00	0	17	48	10	21
21:00	0	16	50	8	13
22:00	0	15	55	5	11
23:00	0	14	61	4	6
00:00	0	13	67	4	7
Nombre de captures	113				

27-mai	P	T°	HR	Vm	VM
18:00	0,6	11	92	16	24
19:00	0	11	87	19	28
20:00	0	11	82	18	25
21:00	0	12	81	19	32
22:00	0,2	11	93	17	30
23:00	0,2	9.9	100	13	23
00:00	0	10	100	15	22
Nombre de captures	53				

29-mai	P	T°	HR	Vm	VM
18:00	0	19	32	19	24
19:00	0	18	33	19	26
20:00	0	18	38	19	31
21:00	0	17	42	15	22
22:00	0	16	47	10	13
23:00	0	14	54	9	12
00:00	0	14	60	10	14
Nombre de captures	24				

Légende :

P = Précipitations (L/m²)

T° = Température de l'air (°C)

HR = Humidité relative (%)

Vm = Vitesse moyenne du vent (km/h) au cours de l'heure écoulée

VM = Vitesse maximale du vent (km/h) au cours de l'heure écoulée

Les données obtenues par piégeage des mâles ont été complétées par les observations directes sur l'activité des femelles dans les champs de froment. Durant la période de vol, l'activité des mâles et celle des femelles ont montré les mêmes fluctuations face aux conditions météorologiques : les pics de captures de mâles (Figure 23) correspondent aux périodes d'activité intense des femelles (Figure 24).

Au champ, on peut observer des situations différentes à 20 et 22h, alors que le relevé des pièges ne fournit qu'une seule information : la quantité de captures sur 24h. Ainsi à plusieurs reprises, les conditions étaient favorables durant une partie de la soirée mais pas sur l'ensemble. Ce fut le cas les 22, 23 et 31 mai ainsi que le 1^{er} et le 6 juin. Dans la majorité de ces cas, l'humidité n'était pas suffisante en début de soirée. Elle l'est devenue par la suite avec la diminution des températures.

Ces observations ont permis de confirmer le seuil de vol communément admis de 15°C, tout en lui conférant une précision supplémentaire : les vols sont possibles à des températures plus froides pour peu que l'humidité soit suffisamment importante. Ainsi, les 6 et 11 juin, une humidité relative très élevée (> 90 %) a permis des vols malgré des températures basses proches de 12 °C. Par ailleurs, il semblerait que les températures supérieures à 20°C soient défavorables à l'activité de vol lorsque les humidités relatives sont moyennes (50 à 75 %). En effet, dans de telles circonstances, à six reprises sur sept, les insectes sont restés dans la végétation (Figure 24). En 2009, nous n'avons pas connu de soirée chaude (> 25°C) et humide (> 80°C) mais, en conditions contrôlées, les insectes volent sous ces conditions (Ellis et al. 2009; Hao et al. 2013). La fenêtre optimale pour les vols serait donc comprise entre 15 et 20°C pour des humidités relatives moyennes, et s'élargirait avec l'augmentation de l'humidité.

Comme dans les expériences de Ellis et al. (2009), l'activité est proportionnellement corrélée à l'humidité mais, même à seulement 38 % d'humidité, des vols sont toujours possibles. L'humidité reste néanmoins un facteur important car lorsqu'elle est élevée, l'insecte est moins tributaire des températures. Au travers des résultats obtenus, une fenêtre de conditions favorables aux vols a été déterminée (Figure 24).

Tableau 15 : données météorologiques des soirées de la période des vols 2009

Date	Heure	HR (%)	T (°C)
18-mai	20h	55	16,2
19-mai	20h	60	17,9
20-mai	20h	58	18,6
21-mai	20h	61	17,2
22-mai	20h	48	16,7
22-mai	23h	61	13,9
23-mai	19h	50	21,0
23-mai	22h	65	18,0
24-mai	20h	56	23,0
25-mai	20h	66	25,0
25-mai	22h	74	22,5
26-mai	20h	82	11,8
7-mai	20h	82	11,5
28-mai	20h	79	16,7
29-mai	20h	38	18,0
30-mai	20h	48	19,2
31-mai	20h	61	19,9
31-mai	23h	66	18,0
1-juin	20h	52	22,0
1-juin	21h	79	17,5
2-juin	21h	51	19,3
3-juin	21h	61	13,0
4-juin	20h	61	12,0
5-juin	21h	61	13,0
6-juin	21h	77	11,5
6-juin	23h	93	10,0
7-juin	18h	48	16,0
8-juin	20h	81	14,0
10-juin	20h	75	11,9
11-juin	21h	96	12,3
12-juin	20h	88	18,0
13-juin	21h	64	20,0
15-juin	21h30	83	15,1
16-juin	21h30	65	17,0

Légende :

Rouge : pas d'insectes visibles dans le haut de la végétation, pas de vols.

Jaune : insectes facilement visibles dans le haut de la végétation, quelques vols, quelques pontes.

Vert : forte présence d'insectes dans le haut de la végétation, vol et pontes fréquents.

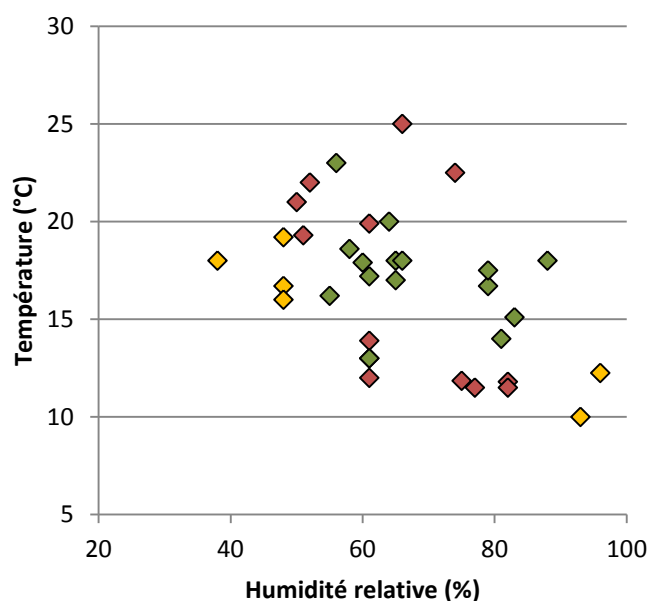


Figure 24 : observation des vols de femelles en fonction de l'humidité relative et de la température

La luminosité influence également l'activité des adultes. Nous n'avons jamais observé de cécidomyie active en pleine lumière. En pleine journée par contre, si le ciel se couvre et devient sombre, les adultes se déplacent. Ceci fut observé notamment le 25 mai 2009 à 14h et le 7 juin 2009 dans l'après-midi. Par contre, l'obscurité même totale n'empêche pas les vols. En effet, il a été observé le 25 mai 2009, qu'après une soirée défavorable aux vols n'ayant permis aucune capture jusqu'à 22h30, le lendemain matin, plus de 100 captures par piège ont été relevées, indiquant que des vols avaient eu lieu en pleine nuit, à un moment où des conditions favorables avaient enfin été rencontrées, vraisemblablement après l'orage qui a eu lieu vers 3h du matin. Ces observations confirment donc l'influence de la luminosité en tant qu'inhibiteur des activités des cécidomyies.

4.7. Mesure des déplacements de *S. mosellana*

4.7.1. Mobilité des mâles de *S. mosellana*

Les études portant sur les déplacements de *S. mosellana* n'ont quasi jamais considéré que les femelles (Miao et al 2013). Le piège à phéromone pouvait constituer un outil adéquat pour localiser les individus mâles et peut-être même révéler certains déplacements.

a) Matériel et méthodes

En 2009, à Bossière (Gembloux), 26 pièges à phéromone ont été disposés le long de deux transects parallèles (13 pièges par transect) distants entre eux de 50 m, et traversant un ensemble de huit champs sur une distance approximative de 1.000 m (Figure 25).

Les champs situés aux deux extrémités du dispositif (champs 54 et 60) constituaient des sources importantes de cécidomyie orange du blé, comme l'attestent les résultats des analyses de sol réalisées en septembre 2008 (Tableau 16). Tous les autres champs du dispositif (champs 55, 56 et 57), de même que ceux situés à proximité immédiate (champs 52, 53, 61, 62 et 63) étaient faiblement, voire très faiblement infestés. Dans les champs de froment 56 et 57, la disposition était telle que chacun des deux pièges (un le long de chaque transect) situés dans une zone (A, B, C ou D) se trouvaient à égale distance par rapport aux "champs-sources" (champs 54 et 60). Dans le champ 56, deux pièges (pièges de la zone A) se situaient à un mètre de la limite avec le champ 55, permettant ainsi de mesurer d'éventuelles concentrations à cet endroit particulier. Deux autres pièges se trouvaient à 51 m (pièges de la zone B) de cette même limite. Les autres (pièges des zones C et D) se trouvaient dans le cœur du champ 56, à respectivement 101 m et 151 m de la limite avec le champ 55.

Tableau 16 : niveau d'infestation des champs du dispositif et des champs voisins

Nombre de pièges	N° champs	Culture	Infestation du sol
	52	Froment d'hiver	< 30 larves/m ²
	53	Luzerne/Ray-Grass	< 30 larves/m ²
2	54	Lin textile	1.063 larves/m ²
2	54	Maïs ensilage	1.063 larves/m ²
2	54	Betterave sucrière	1.063 larves/m ²
2	55	Betterave sucrière	< 30 larves/m ²
2	55	Pomme de terre	< 30 larves/m ²
8	56	Froment d'hiver	< 30 larves/m ²
6	57	Froment d'hiver	< 30 larves/m ²
2	60	Froment d'hiver	918 larves/m ²
	61	Betterave sucrière	72 larves/m ²
	62	Pomme de terre	193 larves/m ²
	63	Froment d'hiver	169 larves/m ²

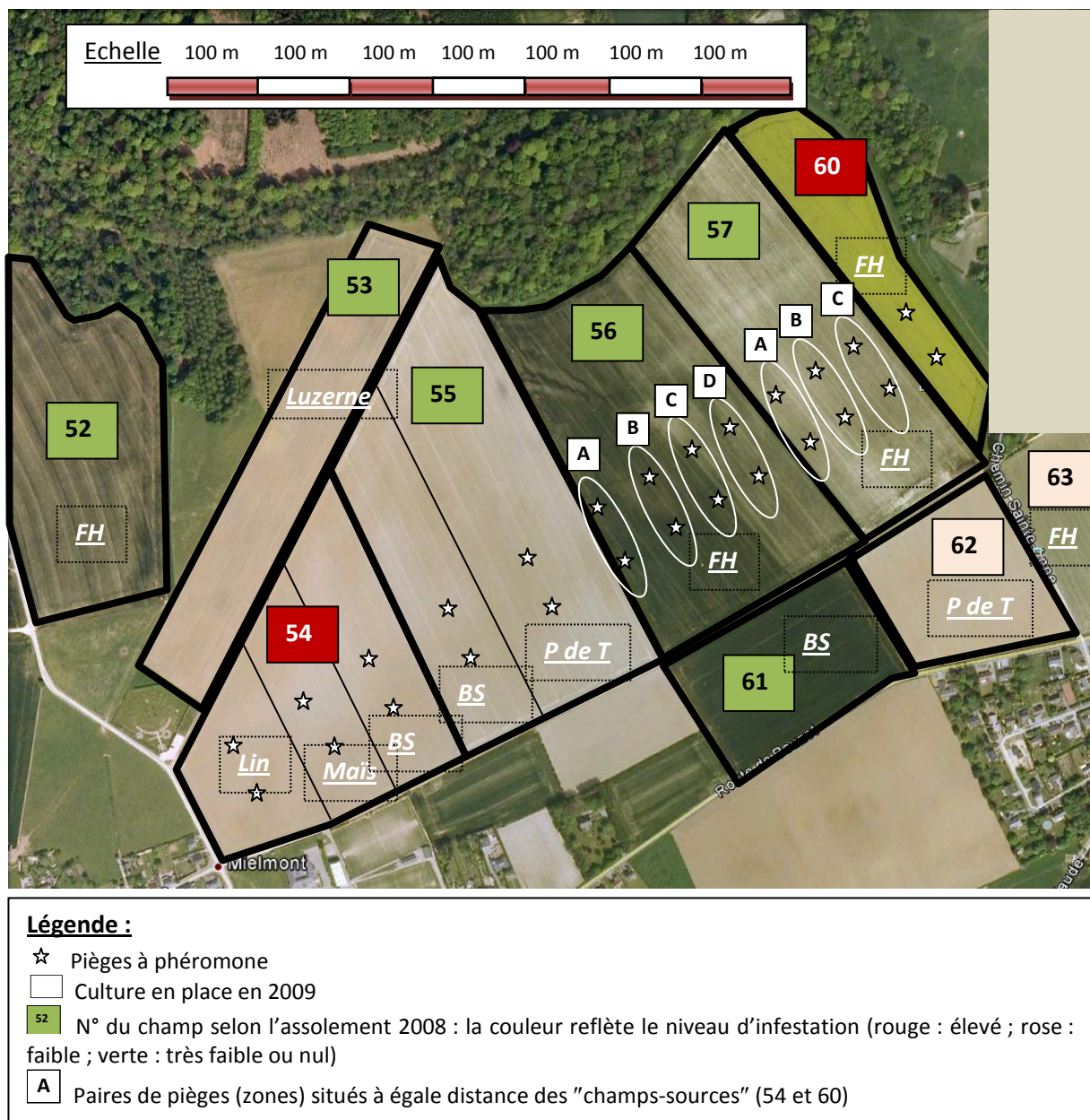


Figure 24 : dispositif de l'essai "déplacement des cécidomyies"

Les pièges ont été relevés quotidiennement. Puis, les données de captures ont été ramenées en quatre phases en considérant la moyenne des captures de 4 jours (Figure 26).

b) Résultats et discussion

L'étude de la mobilité des mâles s'appuie principalement sur l'évolution des captures par les pièges à phéromone (Figure 26), l'interprétation des résultats est présentée au tableau 17.

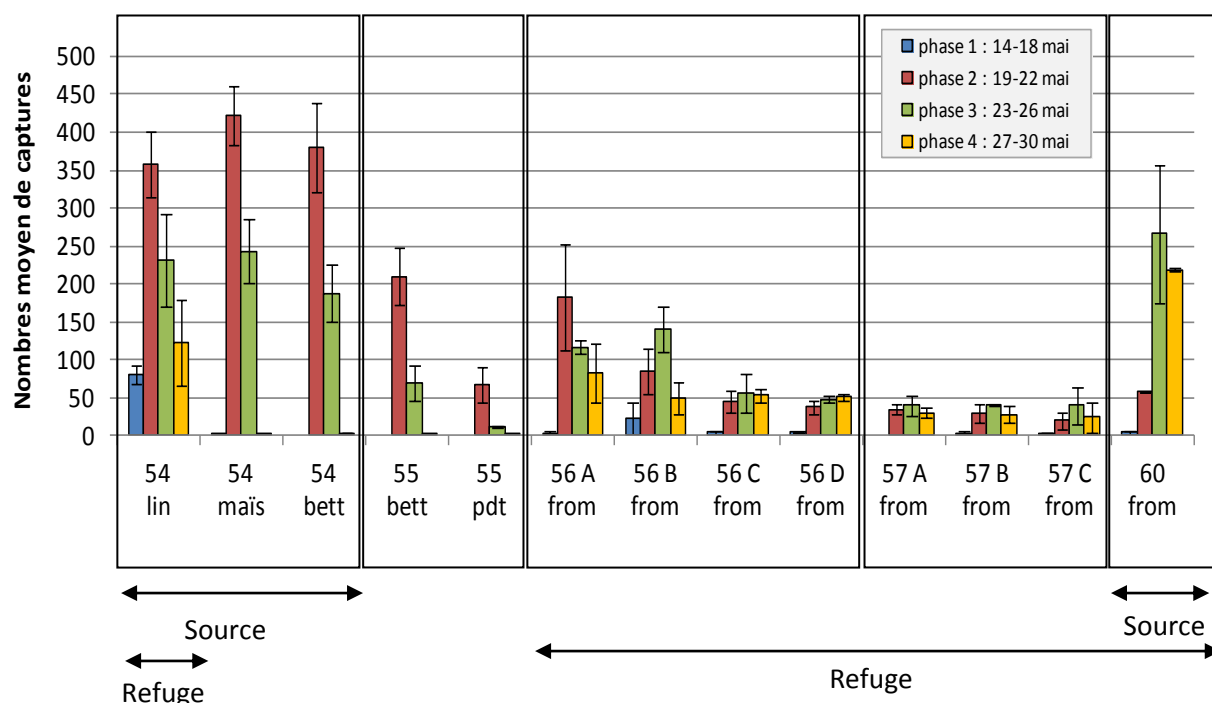


Figure 25 : évolution des captures de mâles en fonction du temps et des pièges.

Tableau 17 : déroulement de la saison des vols

Dates	Observations
15-18 mai	Premières captures en lin (champ 54), correspondant vraisemblablement aux émergences dans ce champ.
19-22 mai	<p>Les captures sont abondantes dans toutes les cultures de printemps, et correspondent de façon évidente au pic d'émergence dans ces cultures. Il y a peu de captures dans les champs de froment 56 et 57 (sources faibles), sauf dans les pièges 56 A, proches de la limite avec le champ de pommes de terre 55 ; cette concentration en bordure du froment suggère que les insectes émergeant du champ 55, dépourvu de couvert, se sont réfugiés dans le froment le plus proche.</p> <p>Les captures dans la partie du champ 55 cultivé en betterave sont assez élevées en regard du niveau d'infestation de ce champ (source faible). Ce niveau de captures pourrait correspondre à l'interception d'insectes émergeant du champ 54 voisin (source importante) et se déplaçant à la recherche d'un couvert.</p> <p>Cette période marque le début de l'émergence dans le froment du champ 60.</p>

Dates	Observations (suite)
23-26 mai	<p>Les captures diminuent dans les cultures de printemps. Elles se maintiennent à niveau bas dans les champs de froment 56 et 57 (sources faibles), sauf dans les pièges proches de la limite du champ 55 (pièges 56 A et 56B) où elles restent élevées. Les faibles captures observées dans le champ 55, et les fortes captures observées dans les pièges installés en bordure de froment (pièges 56 A et 56 B), suggèrent que les mâles émergeant du champ de pomme de terre dépourvu de couvert se sont déplacés vers le froment²⁶.</p> <p>Il y a de nombreuses captures dans le champ 60 (source importante), correspondant au pic principal d'émergences, un peu plus tardif que dans les cultures de printemps</p>
27-30 mai	<p>Plus aucune capture dans les cultures de printemps, à l'exception du lin. Cette observation suggère que les émergences ont pris fin dans les cultures de printemps, et que les mâles ont complètement déserté les champs à faibles couverts.</p> <p>Les effectifs de captures dans les pièges de bordure 56 A se sont alignés sur ceux des autres pièges du champ 56, à un niveau bas, correspondant vraisemblablement aux émergences propres dans ce champ, plus tardives qu'en culture de printemps. Cet alignement des pièges de bordure sur ceux du cœur du champ appuie l'hypothèse de la fin des émergences dans les cultures de printemps, et donc la fin des arrivées d'insectes quittant les champs dépourvus de couvert et leur concentration dans la bordure contiguë du champ de froment.</p> <p>Il y a encore beaucoup de captures dans le petit champ 60 (source importante), vraisemblablement parce que les émergences n'y sont pas encore terminées et que les mâles restent sur place grâce à la présence d'un couvert suffisant.</p>

La mobilité des mâles est très faible pour peu que ces derniers soient abrités par un couvert. C'est le cas dans les situations où l'émergence avait lieu dans un champ de céréales ou de toute autre culture formant un couvert dense sur le champ (lin, par exemple). Par contre, les adultes émergeant de champs de maïs, de betterave, de pomme de terre ou d'autres cultures ne fournissant pas de couvert suffisant à cette période de l'année (mai-juin), quittent ces champs dès le jour de l'émergence. Ils se réfugient dans des champs voisins dont la végétation est plus à même de les protéger du vent et de la pluie.

²⁶ Une analyse statistique a été réalisée pour tester la répartition des captures dans les champs de froment 56 et 57 selon les sept zones définies (56 A, 56 B, 56 C, 56 D, 57 A, 57 B, 57 C). Il s'agit d'une ANOVA à deux facteurs (Zone, Date). Les résultats indiquent qu'il existe au moins une zone différente des autres du point de vue du nombre de captures ($F_{6,168}=31,96$ $p=0,000$). Un test de Dunet a été réalisé pour comparer les moyennes deux à deux avec comme témoin la zone 57 C. Les résultats montrent que les captures observées dans les zones 57 B, 57 A, 56 D et 56 C ne sont pas différentes de celles de la zone 57C (respectivement $p=0,99$; $0,99$; $0,92$; $0,82$). En revanche les captures opérées dans les deux zones bordant le champ 55 (56 B et 56 A) sont significativement différentes ($0,00$ et $0,00$) de la zone témoin.

4.7.2. Mobilité des femelles de *S. mosellana*

a) Matériel et méthodes

La mobilité des femelles a pu être observée concomitamment à celle des mâles dans l'essai de Bossière (Section 4.7.1). Les captures ont, dans ce cas, été réalisées au moyen d'un Vortis. Il s'agit d'un aspirateur à insectes commercialisé par la société anglaise Burkard. L'aspiration se faisait sur des transects de 20 m le long des traces de pulvérisateur, à une distance minimum des pièges à phéromone de 15 m. Les insectes étaient aspirés à environ 30-40 cm du sol dans le courant de l'après-midi. Six répétitions étaient réalisées par champ.



Les captures au Vortis ont eu lieu le 30 mai 2009, à un moment où la majorité des vols avaient déjà eu lieu, ce qui avait permis aux insectes de se déplacer.

Le sex-ratio a été mesuré dans trois champs : un "champ-source", un "champ-cible" et un champ à la fois source et cible. Le champ 54 emblavé en lin constituait le "champ-source" et n'était pas cible (plante non hôte) ; le champ 57, très faiblement infesté en début de saison ("champ-non-source") était emblavé en froment et constituait dès lors un "champ-cible" ; enfin, le champ 60 était à la fois source et cible car cultivé en froment et fortement infesté en début de saison par la cécidomyie orange (Tableau 16).

b) Résultats et discussion

Dans le lin ("champ-source"), les captures ont été abondantes. Les captures de mâles ont été plus nombreuses que les captures de femelles (245 ♂ / 61 ♀)²⁷ dont la majorité avaient déjà quitté le champ lors des captures (Figure 27).

²⁷ ANOVA à 1 facteur = Sexe ($n_{\text{mâles}}=1430$; $n_{\text{femelles}}=369$; $F=106$; $p=0,000$)

Dans le champ de "froment-cible-non-source" (champ 57), les captures sont nettement moins nombreuses ("champ-non-source") et le sex-ratio est très nettement en faveur des femelles ($3 \sigma / 63 \varphi$)²⁸. Les quelques rares captures de mâles y correspondraient aux émergences à peine perceptibles du champ, mais les femelles viennent vraisemblablement de "champs-sources" voisins.

Dans le troisième champ (60), à la fois source et cible, mâles et femelles sont présents en proportions plus équilibrées que dans le champ 57, mais les femelles sont néanmoins majoritaires ($44 \sigma / 101 \varphi$)²⁹. Même si le sex-ratio à l'émergence est à peu près en équilibre, il n'est pas surprenant de voir celui-ci en faveur des femelles au bout de quelques jours de vols ayant permis à des femelles issues de champs sources à proximité de renforcer l'effectif du champ et de faire évoluer le sex-ratio en faveur des femelles.

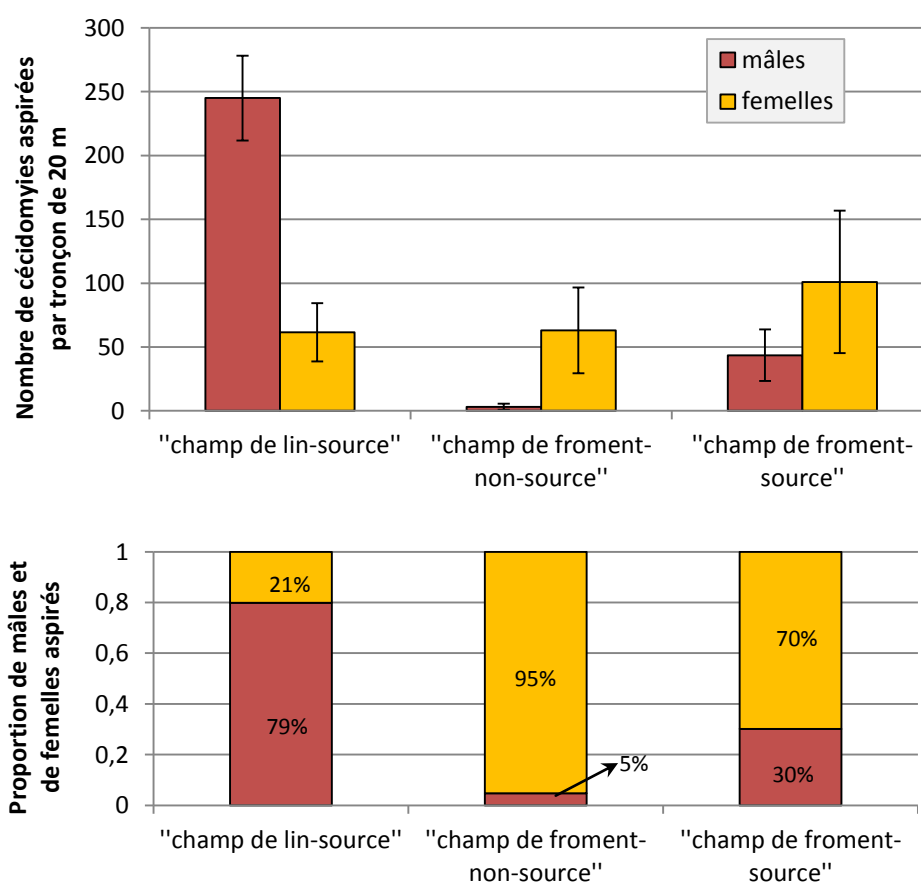


Figure 26 : sex-ratio des insectes capturés au Vortis au 30 mai 2009 dans les trois champs étudiés

"champ de lin-source" = champ 54, "champ de froment-non-source" = champ 57, "champ de froment-source" = champ 60

Les résultats confirment les observations précédentes : les mâles ne sont présents que dans les "champs-sources" et les femelles quittent très vite ces lieux d'émergence pour atteindre les "champs-cibles" dans lesquels elles pourront déposer leurs œufs (Figure 27). Cette répartition différentielle selon le sexe³⁰ explique l'absence de corrélation constatée entre les effectifs de

²⁸ ANOVA à 1 facteur = Sexe ($n_{\text{mâles}}=19$; $n_{\text{femelles}}=378$; $F=41$; $p=0,000$)

²⁹ ANOVA à 1 facteur = Sexe ($n_{\text{mâles}}=261$; $n_{\text{femelles}}=606$; $F=7,11$; $p=0,024$)

³⁰ Pour l'ANOVA à 2 facteurs (Champ, Sexe), l'interaction Champ x Sexe est très hautement significative ($F=53,33$; $p=0,000$), les facteurs Champ et Sexe valant respectivement $F=48,37$ et $F=0,99$.

captures au piège à phéromone et l'infestation des épis, les captures concernant les mâles et l'infestation des épis, les femelles.

Les observations directes réalisées en soirée dans les champs de céréales confirment que les femelles ont des vols en zigzag de type "upwind appetitive flight", tels que ceux décrits par Basedow (1977b). Un autre type de vol a été observé au cours de soirées calmes et chaudes, par vent faible et quasi laminaire. Comme répondant à un signal, et pendant quelques minutes seulement, des milliers de femelles s'élèvent à la verticale, de plusieurs mètres au-dessus de la céréale, et se laissent emporter par le vent. Ce type de vol, décrit pour la cécidomyie jaune du blé et qualifié de "downwind transit flight" (Basedow 1977b), n'avait apparemment jamais été observé pour la cécidomyie orange. Nous l'avons observé notamment à Bossière (Gembloux) au cours de la soirée du 24 mai 2009, dans un champ de lin que quittaient les femelles de cécidomyie orange du blé (champ 54). Les envols ont été observés à trois reprises au cours de cette soirée, à chaque fois sur des périodes de quelques minutes seulement. 118 captures ont pu être opérées sur ces insectes quittant le lin, à l'aide de petits panneaux englués : toutes correspondaient à des femelles de cécidomyie orange. Ce type de vol est vraisemblablement responsable de déplacements à longue distance.

4.8. Conclusion

Dans un premier temps, les pièges à phéromone ont permis de confirmer que les adultes mâles, comme les larves étudiées dans le chapitre précédent, se répartissaient de manière homogène au sein d'un même champ. Toujours en accord avec la répartition des larves, les effectifs de mâles capturés montrent une grande hétérogénéité entre champs, même voisins. La grande facilité d'utilisation des pièges à émergence a également permis d'investiguer la présence du ravageur dans les différentes régions productrices de froment en Wallonie, et de confirmer sa présence à des niveaux nuisibles dans chacune des zones étudiées.

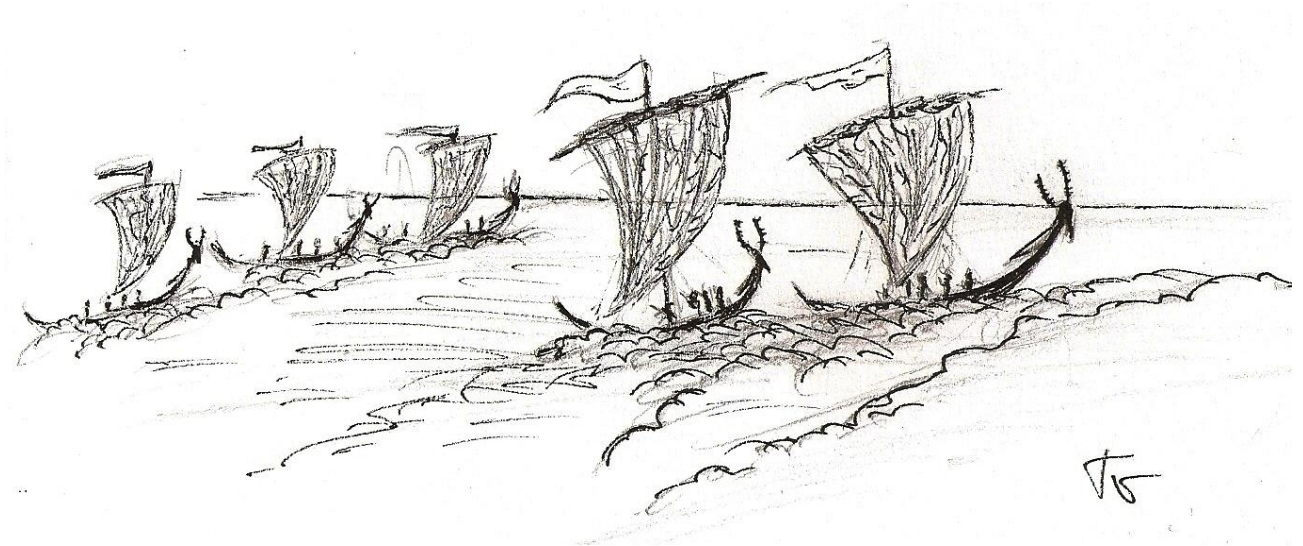
L'utilisation du piège comme avertisseur direct du risque d'infestation pour un champ a été testée mais, comme le rapportait la littérature, l'outil n'est pas efficace. Les suivis et observations des conditions requises pour les vols de *S. mosellana* ainsi que la mobilité différente des mâles et des femelles, expliquent l'inadéquation du piège pour prévoir les infestations au niveau d'un champ.

En outre, si le déplacement actif des femelles était connu, leur déplacement passif, sous l'effet du vent, n'avait jamais été observé. Ce type de déplacement peut rendre plus complexe l'estimation des risques encourus par un champ.

Les déplacements des mâles n'avaient fait l'objet d'aucune étude spécifique, vraisemblablement parce qu'ils ne présentent aucun risque pour les cultures. Contrairement aux théories admises, les mâles se déplacent. Ce n'est pas le cas si le couvert du "champ-source" est suffisant pour les abriter mais dans le cas contraire, soit pour la majorité des cultures de printemps, les mâles quittent leur site d'émergence pour des couverts plus hospitaliers. Cette observation est capitale pour une interprétation correcte des captures obtenues aux pièges à phéromone.

Chapitre 5 :

Etude des émergences de *S. mosellana*



Le chapitre qui suit est de type descriptif ; il présente différentes observations sur les périodes d'émergence qui permettront, par la suite, de mieux cerner les mécanismes déterminant cette phase cruciale du développement afin d'en permettre la prévision.

5.1. Contexte et objectifs

Au niveau des populations de *S. mosellana*, la réussite où l'échec d'une année dépend essentiellement de la synchronisation entre l'émergence des adultes et la présence de jeunes épis. En intégrant certaines caractéristiques importantes du comportement de *S. mosellana*, une utilisation originale des pièges à phéromone a été développée et a abouti à de nouvelles précisions concernant les émergences des adultes.

Les études portant sur l'émergence au sens strict sont assez rares. La raison en est sans doute que ce type d'étude impliquait, jusqu'à présent, l'utilisation de pièges à émergence classiques. Or ces pièges présentent au moins deux types d'inconvénients³¹.

Le premier est de ne capturer que de faibles effectifs. Au Canada par exemple, en 1996 et 1997, 384 pièges à émergence, disposés dans 64 champs, n'ont permis de capturer que 1.920 adultes de *S. mosellana*, soit en moyenne 5 adultes par piège sur l'ensemble de la saison (Lamb et al. 1999). Le maximum obtenu pour un piège sur une saison était de 30 individus, ce qui est bien trop faible pour permettre une bonne mesure des émergences. Cette situation s'est reproduite dans d'autres essais avec ce type de piège (L. Smart, communication personnelle).

Un second inconvénient des pièges à émergence, est de créer un microclimat au niveau du piège (température, humidité, ensoleillement...) (Southwood et Siddorn 1965). La température et l'humidité perçues par les insectes sous les pièges, sont différentes de celles auxquelles les autres insectes du champ sont soumis et les dates d'émergences des insectes capturés aux pièges ne sont donc pas représentatives.

Dans la littérature, la période des émergences est souvent assimilée à la période des captures. Etant donné la faible longévité estimée de l'insecte en comparaison avec la durée de la période de vol, il est admis que des émergences ont lieu durant toute la période des vols. Au Canada, les vols sont principalement contrôlés par captures au piège jaune collant (Lamb et al. 2002). La période de vol y a lieu en juillet et août. Cette période semble assez constante d'une année à l'autre (Lamb et al. 1999) au point que des chercheurs canadiens proposent un système d'avertissement calendaire (Elliott et al. 2009). Au Royaume-Uni, le démarrage des vols a généralement lieu au début du mois de juin (Oakley et al. 1998; Ellis et al. 2009).

Dans ce cinquième chapitre, le réseau de pièges à phéromone a été mis à profit pour analyser les différents profils de captures obtenus selon les champs. Dans un premier temps, ces profils ont été comparés entre champs et entre cultures (Section 5.2.1). Ensuite, ces observations ont été reproduites tous les ans jusqu'en 2012 permettant ainsi de juger de la variabilité des périodes de captures (Section 5.2.2).

Comme pour les estimations de population, les champs de betterave et de maïs se sont révélés être des situations particulières dans lesquels les captures sont le reflet des émergences (Section 5.3). Les patterns de captures obtenus dans ces champs ont fourni des informations originales sur les caractères synchrones et multiples de ces émergences.

³¹ Nous avons également testé différents pièges de ce type : pièges en forme de cage, seaux percés, pièges pyramidaux... Ces pièges d'émergence, se sont révélés d'assez piètres indicateurs du démarrage des vols.

Dans le but de mieux cerner les mécanismes responsables de l'émergence, des captures ont également été réalisées dans des champs de quatre régions de Wallonie aux conditions météorologiques distinctes et les patterns d'émergences y ont été comparés (Section 5.4).

5.2. Pattern de vols

L'objectif de cette section est de comparer les profils de captures obtenus selon les cultures et selon les années afin de déterminer d'éventuelles influences de chacun de ces deux paramètres, à la fois sur le pattern des vols mais également sur l'époque à laquelle ces vols ont débuté.

5.2.1. Pattern de vols en fonction des cultures

Au chapitre précédent, les captures de pièges à phéromone d'un même champ, se sont révélées homogènes dans le temps. Il est dès lors possible de définir un pattern de vols pour chaque champ. L'expérimentation présentée dans cette section 5.2.1 compare les profils de captures de 19 champs quant à leur distribution dans le temps ainsi qu'en relation avec les cultures portées. Par la suite, et profitant de la possibilité d'établir des patterns de vols selon les cultures, les patterns de six cultures sont confrontés afin de juger de l'influence de ces cultures sur la précocité des vols.

a) Matériel et méthodes

Les captures comparées sont issues des relevés de 2008. Cette expérience concerne 22 champs identifiés au tableau 18. Ces champs contenant chacun deux pièges, ont été suivis quotidiennement selon la procédure décrite à la section 4.2.

Tableau 18 : champs suivis pour comparer les vols en fonction des cultures

Culture	N° du champ	Nombre de champs
Lupin	52	1
Lin	57	1
Betterave	06, 24, 47A, 48, 56, 63	6
Colza	64	1
Froment	01, 03, 10, 11, 23, 47B, 60, 62	8
Escourgeon	05, 12, 22, 55, 61	5

Les données de captures des pièges disposés dans un même champ sont compilées pour obtenir les captures moyennes par jour et par champ. Dans un second temps, les valeurs quotidiennes sont remplacées par des pourcentages de captures ($100 \times \text{captures du jour} / \text{captures sur l'ensemble de la saison}$). L'ensemble de ces valeurs constitue le pattern de vol d'un champ. Lorsque plusieurs champs d'une même culture étaient concernés, la moyenne des patterns de vols de ces champs constituait le pattern de vol de la culture pour l'année concernée.

Afin de visualiser la précocité des émergences de chaque culture, la date à laquelle 10 % de l'ensemble des effectifs capturés sur la saison ont été atteints, a été positionnée à la figure 29.

b) Résultats et discussion

Les profils de captures des 19 champs suivis sont présentés en trois graphiques dont chacun réunit les patterns de vols des champs d'une même culture. Ces champs partagent un même profil de captures. Les champs de betterave se caractérisent par des pics de captures isolés les uns des autres dont le premier a lieu le 15 mai. En culture de froment, le profil de captures quotidiennes est plus constant. Les premiers vols ont également lieu vers le 15 mai, mais la majorité des captures ne surviennent que plus tard et particulièrement entre le 2 et le 5 juin. Le pic de captures du 23 mai, observable en champ de betterave, n'est pas visible en froment. Quant aux escourgeons comme pour les deux autres cultures, de nombreuses cécidomyies ont été capturées durant la période de captures du 2 au 5 juin. Cependant, le principal pic de captures est plus tardif et a eu lieu les 14 et 15 juin.

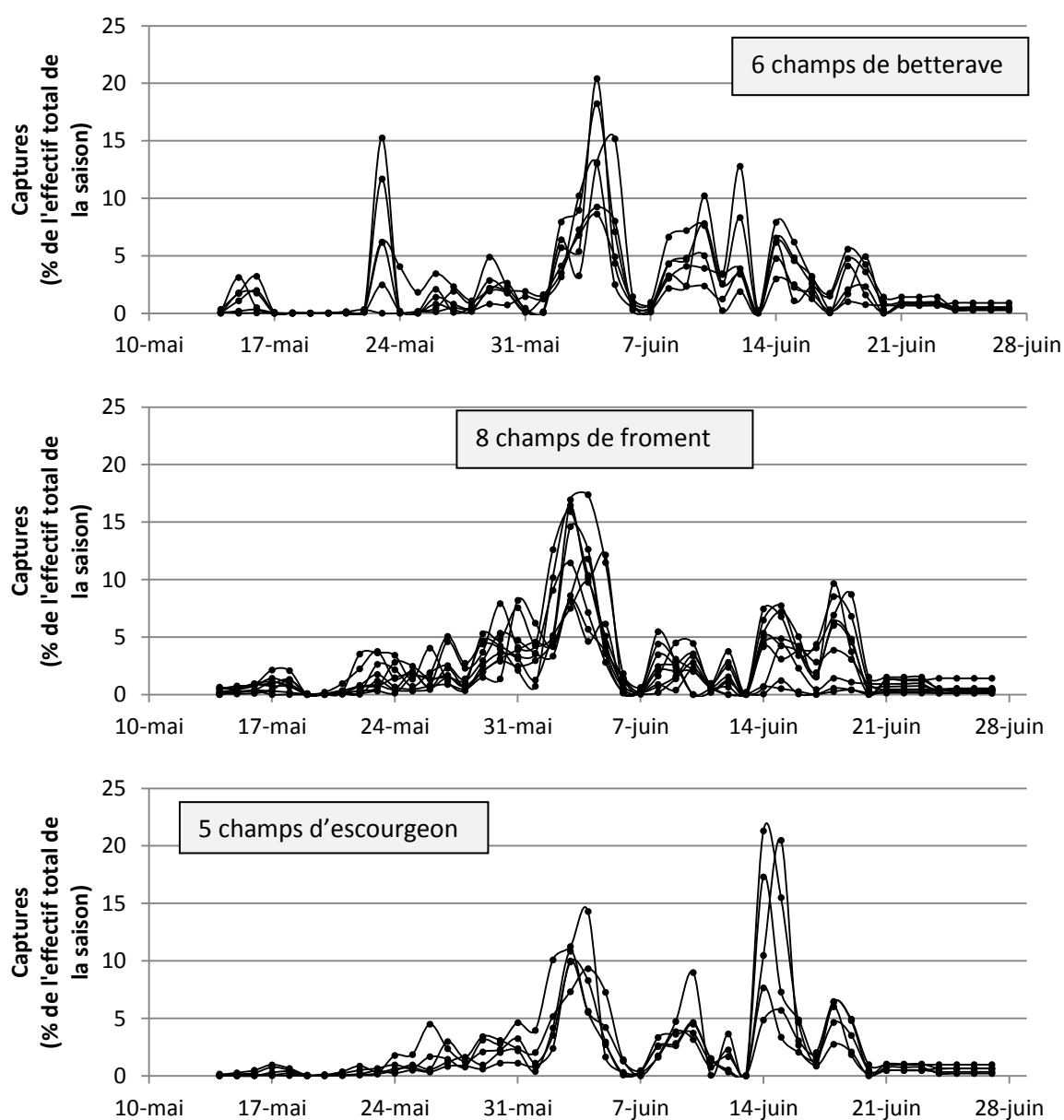


Figure 27 : comparaison des profils de captures entre champs différents en 2008.

Les données concernant les champs sont reprises au tableau 18.

L'information à retenir de ces patterns de vols est double : dans une même région, les champs portant les mêmes cultures conduisent à des profils de captures similaires et les champs portant des cultures différentes présentent des profils différents pour lesquels les vols n'ont pas lieu exactement aux mêmes dates et peuvent connaître des intensités différentes.

En 2008 comme en 2007 (31 mai) et 2009 (18 mai), les premières captures de l'année ont débuté dans un champ de lupin (Figure 29). Quelques jours plus tard, les cultures de printemps telles que le lin, les betteraves et le maïs, ont également donné lieu à des émergences précoces. A l'autre extrême dans le froment et surtout l'orge d'hiver les émergences de *S. mosellana* ont été tardives. En 2007 et 2009, les champs suivis, ont présenté la même chronologie dans l'ordre des émergences. En outre, au début des années septante, les suivis au champ, réalisés en Allemagne par Basedow, avaient montré que les cécidomyies provenant des champs d'avoine de printemps et de betterave émergeaient plus tôt que celles provenant des champs de céréales d'hiver (Basedow 1977a). Ces résultats sont en accord avec les observations que nous avons pu réaliser.

Au Royaume-Uni, Toby Bruce et Lesley Smart (Communication personnelle) rapportent que le pois protéagineux, culture semée très tôt au printemps, constitue une culture très favorable à l'émergence précoce des cécidomyies orange. Dans la zone étudiée de Gembloux, il n'y avait pas de culture de pois, mais la culture de lupin doux en est très proche du point de vue de la gestion culturale. Cette culture est la première semée au printemps (fin février). Pour les cultures de printemps, le début des vols suit la chronologie des implantations des cultures (lupin, lin, betterave, maïs, pomme de terre). Pour les cultures d'hiver (colza, froment, escourgeon), la logique semble dictée par un autre facteur. En colza et en escourgeon, le début des vols est plus tardif que pour les cultures de printemps tandis qu'en froment, les premières captures ont lieu concomitamment avec celles observées en cultures de printemps, mais avec de faibles effectifs. Une caractéristique des champs de colza et d'escourgeon au moment du début des vols, est de présenter une végétation bien plus haute et plus dense que toutes les cultures précitées. L'influence de ce couvert sur les paramètres environnementaux n'est pas négligeable. Parmi ceux-ci, l'humidité du sol et les températures sont deux facteurs influençant le développement des cécidomyies. Ces deux paramètres sont également fortement influencés par les travaux d'implantation des cultures de printemps.

L'humidité du sol n'a pas été spécifiquement contrôlée dans les champs suivis mais il est vraisemblable que les sols des champs portant des cultures d'hiver sont plus secs que ceux laissés à nus avant les semis de printemps (Basedow 1977b). Les températures du sol ont fait l'objet de différentes mesures dont les résultats sont discutés au chapitre 7.

En résumé, les captures au piège à phéromone observées dans des cultures variées, ont permis de mettre en évidence une influence de la culture sur la précocité des vols et donc vraisemblablement sur les émergences. L'humidité et la température semblent logiquement influencer sur la précocité des émergences de *S. mosellana*.

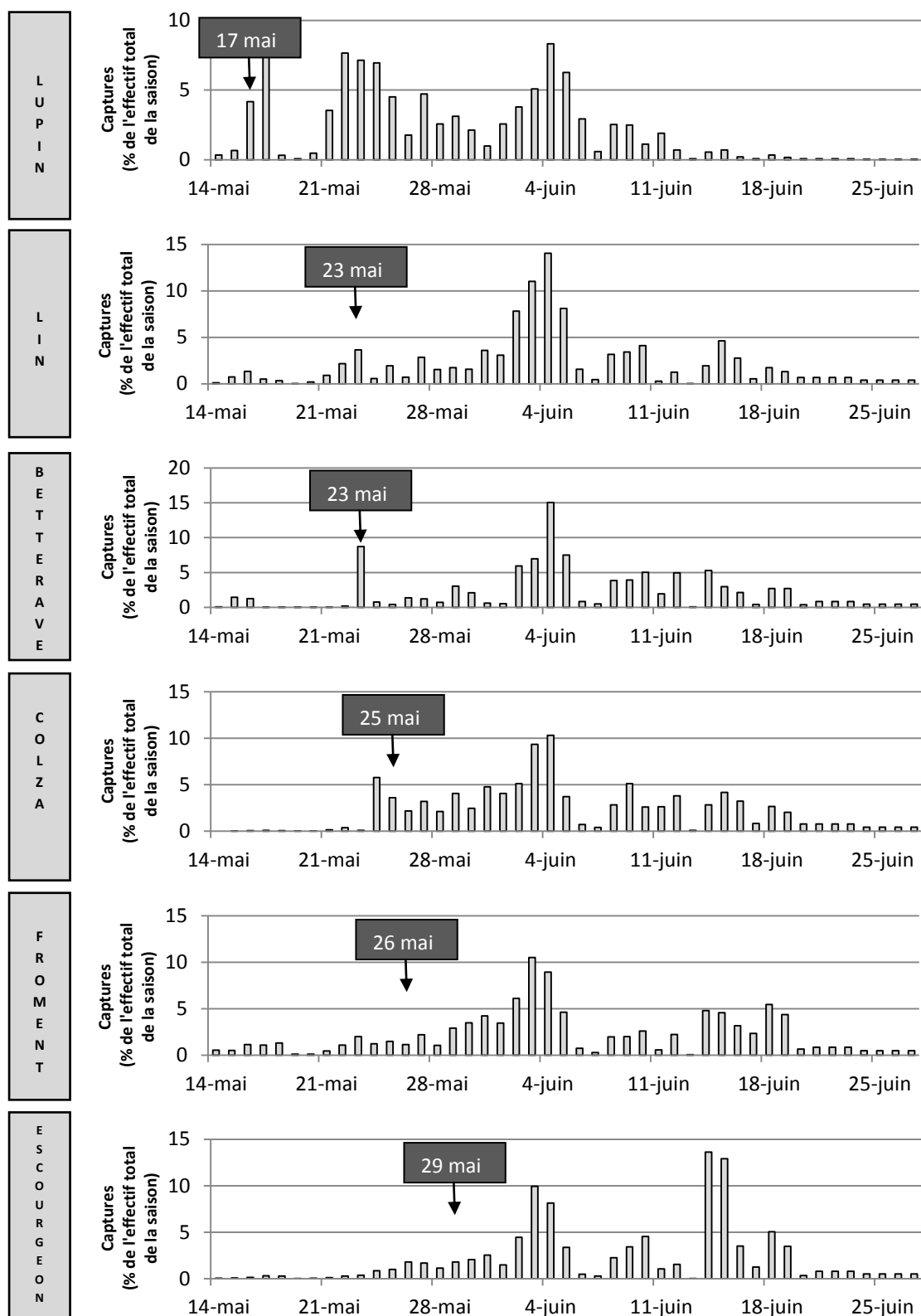


Figure 28 : relation entre le début des captures de *S. mosellana* et les cultures en 2008

La flèche indique la date à laquelle 10 % des captures de la saison ont été atteints. Les données relatives aux champs suivis sont présentées au tableau 18.

5.2.2. Epoque des vols en fonction des années

Durant les quatre années d'observation, les époques auxquelles ont débuté les vols ont pu être comparées. Les études sur la cécidomyie orange ayant été poursuivies en 2011 et 2012 par l'équipe de Michel De Proft et de Sandrine Chavalle, ces deux années ont été ajoutées aux quatre précédentes car elles complètent ces observations et fournissent une information supplémentaire sur la variabilité des périodes d'émergence.

a) Matériel et méthodes

Le suivi des vols a été contrôlé par piège à phéromone comme détaillé Section 4.2. Les champs retenus pour illustrer les patterns d'émergence sont repris au tableau 19. Le champ 101 n'est pas présenté au chapitre 2, il est situé à Sauvenière dans la commune de Gembloux (coordonnées géographiques : 50°34'29.72"N ; 4°44'28.45"E). En 2010, ce champ était emblavé en froment semé tardivement, ce qui en faisait une source potentielle de cécidomyies orange pour les années 2011 et 2012.

Tableau 19 : coordonnées des champs suivis pour la comparaison des périodes de vols de 2007 à 2012

Année	Champs contrôlés		Nombre de champs
	N°	Culture ³²	
2007	23, 54, 21	BS, BS, P. de T.	3
2008	06, 24, 47, 48, 56, 63	BS, BS, BS, BS, BS, BS,	6
2009	54,12, 54	BS, BS, Maïs	3
2010	47, 52	BS, BS	2
2011	101	FH	1
2012	101	Chicon	1

Les données de captures des pièges disposés dans un même champ sont, dans un premier temps, regroupées pour obtenir les captures moyennes par jour et par champ. Dans un deuxième temps, les valeurs quotidiennes sont remplacées par des pourcentages de captures (100 x captures du jour/captures sur l'ensemble de la saison). On obtient ainsi des patterns de vol par champ. Et finalement lorsque c'est nécessaire, les patterns de vols des différents champs sont regroupés par année en en faisant la moyenne, afin d'obtenir le pattern de vols de l'année.

b) Résultats et discussion

En 2007 et 2010, les premiers adultes ont été observés au 1^{er} juin. En revanche, en 2011, les émergences ont débuté le 22 avril, ce qui porte à plus de cinq semaines l'écart possible entre les débuts d'émergence de deux années distinctes (Figure 30).

Cet écart est très important et contraste avec la relative stabilité décrite par les chercheurs canadiens (Elliott et al. 2009). Cette variabilité de la période de démarrage des vols trahit une forte dépendance aux conditions environnementales.

³² BS : betterave sucrière, P. de T. : pomme de terre, FH : froment d'hiver

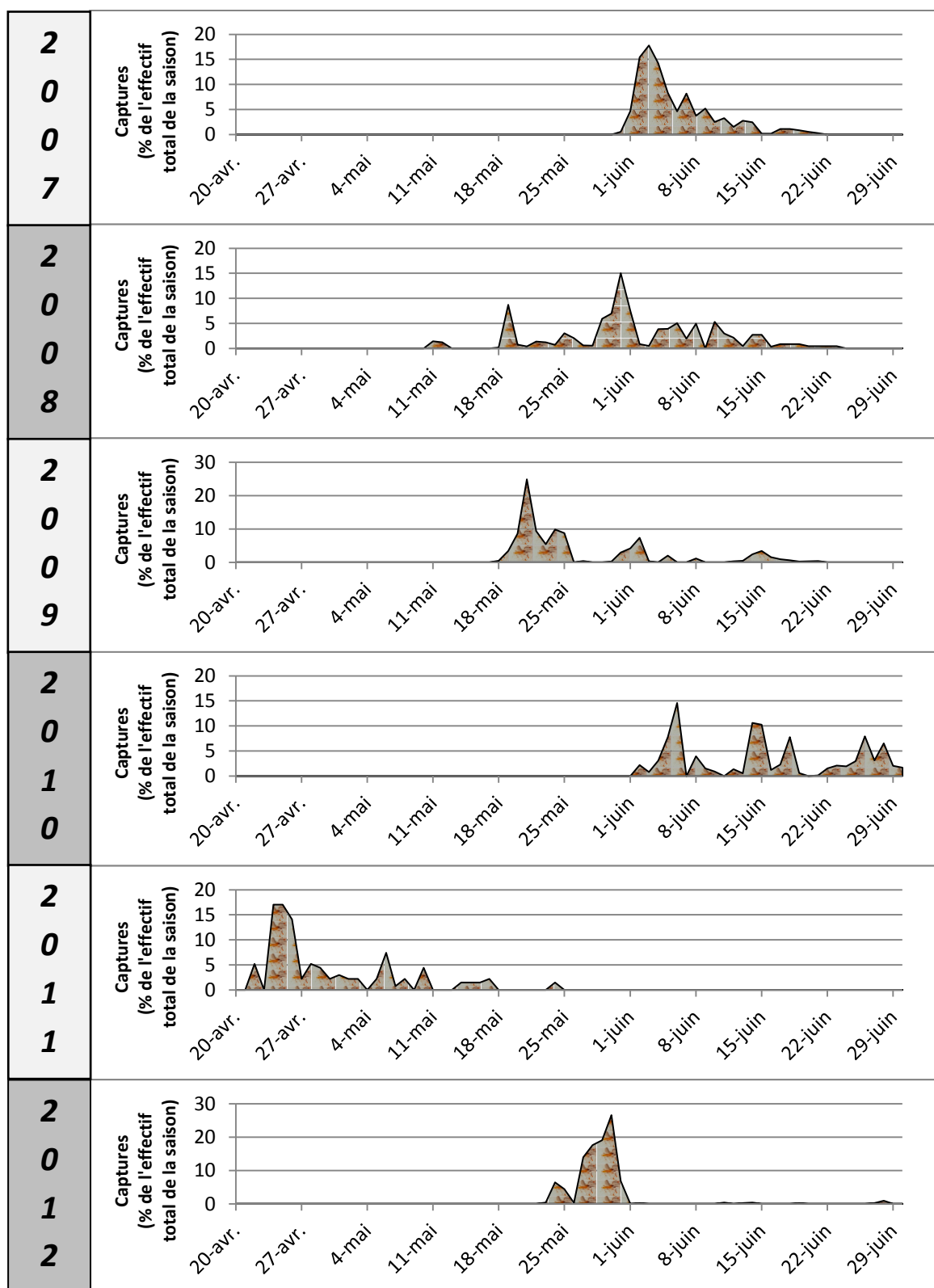


Figure 29 : périodes de vol de 2007 à 2012

Pour chaque jour, le nombre moyen de captures est présenté en pourcentage de l'ensemble des captures moyennes sur la saison des vols. Les champs d'où proviennent les données de captures, sont détaillés au tableau 19.

5.3. Pattern d'émergences

Concernant la détermination des dates d'émergence au sens strict, les captures aux pièges à émergence n'ont pas permis d'obtenir de résultats fiables (résultats non présentés). La recherche d'alternatives à ces pièges a conduit à reconsidérer l'intérêt porté aux pièges à phéromone et, moyennant quelques précautions, à étudier leur potentiel pour mettre en évidence l'émergence des adultes. Pour cela les patterns de captures sont analysés en fonction des couverts végétaux.

a) Matériel et méthodes

La gestion des pièges à phéromone utilisés pour les mesures d'émergence a été définie Section 4.2. Les champs dont les résultats sont présentés à cette section sont repris Tableau 20.

Tableau 20 : n° des champs retenus pour comparer captures et émergences en 2009

Culture	N° du champ	Nombre de champs
Betterave	12, 54B, 55, 61	4
Lin	08, 21, 54A	3
Froment	06, 47A, 47B, 52, 56, 57, 60, 63	8

b) Résultats et discussion

La figure 31 présente les patterns de captures observés en 2009, d'une part dans les champs de betterave et d'autre part, dans les champs à couvert plus dense comme les champs de lin ou de céréales.

On remarque des niveaux de captures plus variables en betterave, où les jours sans capture sont fréquents : 14 jours entre le 19 mai et le 18 juin. Pour le lin et les céréales, les niveaux de captures sont plus constants avec seulement respectivement 1 et 2 jours sans capture. Les mâles émergeant dans ces couverts, y demeurent (Section 4.7.1). Les captures aux pièges à phéromone n'y sont pas le reflet des émergences du jour, mais bien de l'ensemble de la population séjournant dans ce couvert, éventuellement depuis plusieurs jours. Tout au contraire, les insectes émergeant de champs nus ou à très faible couvert (pomme de terre, betterave, maïs...) ne sont pris aux pièges à phéromone que le jour même de leur émergence puisqu'ils quittent rapidement ces sites d'émergence inhospitaliers pour gagner des couverts plus protecteurs.

Dans les champs à couvert dense, abritant pour plusieurs jours une population de *S. mosellana*, le niveau des captures d'un jour est fonction à la fois du volume de la population en place, et de son activité. Cette dernière est directement conditionnée par les paramètres météorologiques. Les soirées des 27, 28 et 29 mai sont très illustratives à ce sujet³³. Alors que les conditions de vols sont très favorables le 28 (mais défavorables le 27 et le 29), le nombre de captures en champ de betterave est anecdotique, contrairement à ceux observés en lin et en céréale (voir les flèches à la figure 31). L'absence de capture en champ de betterave malgré de bonnes conditions de vols, trahit une absence d'émergence aux alentours du 28 mai. Dès lors, les captures observées en lin et céréales sont vraisemblablement des captures de mâles âgés de plus d'un jour.

³³ Voir chapitre 4 traitant des conditions de vols, Section 4.7.

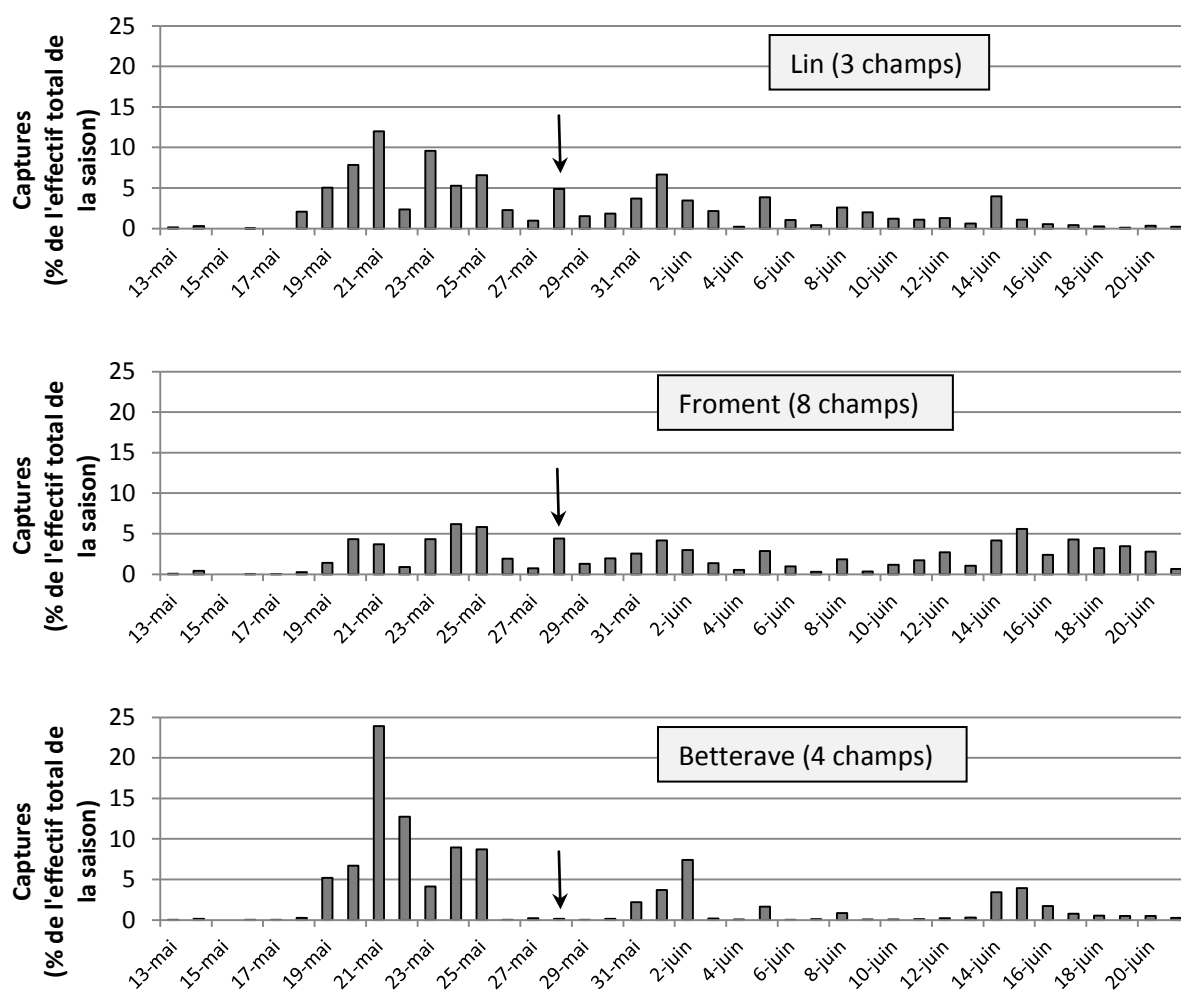


Figure 30 : patterns de captures 2009 établis au piège à phéromone selon les cultures en place
La flèche indique les captures du 28 mai (jour très favorable aux vols). Les données relatives aux champs suivis sont présentées au tableau 20.

Le rayon d'action des pièges à phéromone n'est pas clairement défini et peut être variable en fonction des conditions d'utilisation. Ce type de piège utilisant le comportement de l'insecte est soumis à tout ce qui peut l'influencer. Néanmoins, à condition d'être disposé dans des "champs-sources" sans couvert ou à couvert très réduit durant la période pertinente, le piège à phéromone s'est avéré très efficace pour détecter et mesurer les émergences. Les patterns de capture observés dans les champs de betterave peuvent donc être considérés comme des patterns d'émergence³⁴. Les effectifs de captures, très élevés (Figure 21), sont un grand avantage comparativement aux pièges d'émergence classiques.

Dès lors qu'il est acquis que les captures des pièges à phéromone installés dans les "champs-sources" nus, ou à faible couvert, mesurent les émergences du jour, une remarque importante s'impose : les pics de captures présentés Section 5.2.1 pour les champs de betterave ne reflètent pas

³⁴ Lors de certaines années à émergences très tardives, certaines cultures de betterave pourraient être suffisamment développées pour constituer un couvert protecteur. Les profils de captures n'y seraient plus représentatifs des émergences.

l'activité plus ou moins intense des cécidomyies, mais correspondent précisément à des vagues d'émergence, dont le nombre varie selon les années.

Au sein de ces vagues, les cécidomyies semblent parfaitement synchronisées (Figures 28 et 31). En supposant que les femelles émergent peu après les mâles (Section 1.3.2), ceci constitue un avantage pour la survie des populations du ravageur car la recherche de partenaires sexuels est ainsi simplifiée. Une implication de ce niveau de coordination entre les individus est qu'il existe un facteur de synchronisation des émergences intervenant peu de temps avant ces dernières.

5.4. Emergences et régions pédoclimatiques

La comparaison des patterns d'émergence entre régions présente au moins deux intérêts. D'un point de vue scientifique, elle apporte une information complémentaire sur les facteurs régulant les émergences. Par ailleurs, dans l'optique d'avertissements aux agriculteurs, il semblait utile de vérifier que les émergences observées à Gembloux soient le reflet de celles de l'ensemble de la Wallonie.

a) Matériel et méthodes

Le suivi des captures aux pièges à phéromone a été reproduit dans quatre zones pédoclimatiques de Wallonie (Section 2.1.2), et ce durant les saisons 2008 et 2010. La gestion des pièges s'est opérée selon les mêmes modalités que celles décrites Section 4.2. Cependant en 2010, les captures n'ont été relevées que jusqu'au 6 juin pour le champ situé à Omal et jusqu'au 10 juin pour les autres situations. Tous les champs suivis pour cette expérimentation, étaient emblavés en betterave et avaient porté du froment d'hiver deux saisons plus tôt. La distribution des champs est présentée au tableau 21 et leur localisation à la figure 12.

Tableau 21 : répartition des champs suivis

2008	2010
4 champs à Bossière (Hesbaye gembloutoise)	2 champs à Bossière (Hesbaye gembloutoise)
2 champs à Corroy-le-château (Hesbaye gembloutoise)	1 champ à Purnode (Condroz)
5 champs à Juprelle (Hesbaye liégeoise)	1 champ à Omal (Hesbaye liégeoise)
5 champs à Falaën (Condroz)	1 champ à Roucourt (Hainaut)
5 champs à Petit-Engnien (Hainaut)	1 champ à Sirault (Hainaut)

b) Résultats et discussion

Au cours du suivi de 2008, l'évolution moyenne des captures fut similaire dans toutes les zones étudiées (Figure 32). Les captures ont débuté au 14 mai pour trois régions et au 15 mai pour la région de Juprelle. Au 23 mai, après plusieurs jours sans capture, un deuxième pic est observé dans toutes les régions. Le troisième et principal pic d'émergence survient entre le 2 et le 5 juin comme discuté précédemment pour la région de Gembloux. Les nombres maximaux de captures surviennent le 3 juin pour le Hainaut et la Hesbaye liégeoise et le 4 juin à Gembloux et dans le Condroz.

En 2010, le début des vols a également été suivi dans les quatre mêmes zones pédoclimatiques. Comme en 2008, les vols ont globalement débuté en même temps dans les différentes régions. Les vols ont débuté le 4 juin dans le Hainaut occidental, le 5 dans la région liégeoise et le 6 à Gembloux

et dans le Condroz. Cet étalement, semblable à celui du pic principal de 2008, reflète les différences de températures moyennes enregistrées au mois de mai dans ces régions³⁵. Les régions les plus chaudes (Hainaut et Hesbaye liégeoise) ont connu une émergence plus précoce que les zones plus froides (Gembloux, Condroz).

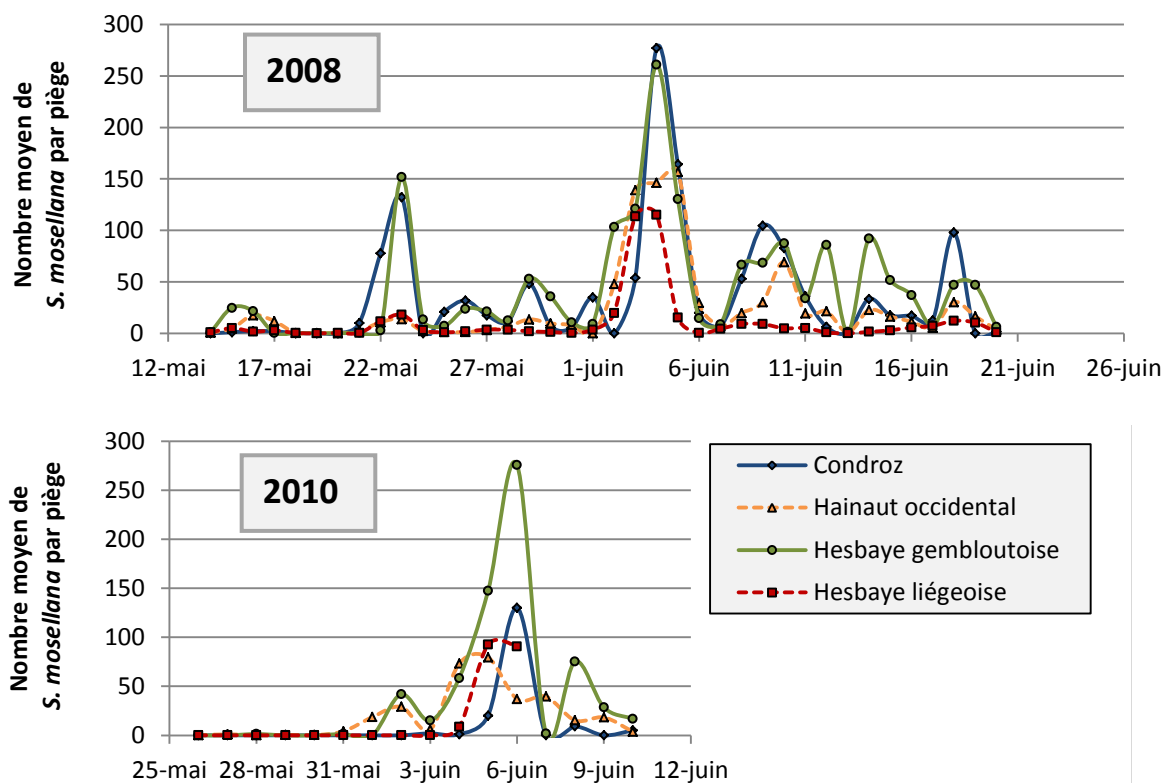


Figure 31 : patterns d'émergences observés en 2008 et 2010 pour quatre régions pédoclimatiques distinctes

Les données relatives aux champs suivis sont présentées au tableau 21.

La synchronisation des émergences sur l'ensemble de la région wallonne réfute un déterminisme de l'émergence basé uniquement sur des conditions climatiques accumulées sur le long terme³⁶. Si c'était le cas, l'écart entre les régions serait plus important car les conditions hivernales sont bien distinctes par exemple entre le Hainaut et le Condroz (Section 2.1.1). Cependant, le léger décalage des courbes d'émergence selon les régions, tend à impliquer la température accumulée comme étant néanmoins un facteur régulateur du développement. Vu les faibles écarts, l'impact de ce facteur serait limité ou ne porterait que sur une courte période du développement de l'insecte.

³⁵ En 2008, les températures moyennes du mois de mai étaient pour les différentes stations météorologiques proches des essais : Casteau (Hainaut occidental)= 15,80°C ; Bierset (Hesbaye liégeoise)= 15,95°C ; Gembloux = 15,08°C et Havelange (Condroz) = 14,77°C (Sources IRM).

En 2010, les températures moyennes du mois de mai étaient pour les différentes stations météorologiques proches des essais : Lesdain (Hainaut occidental)=10,97°C ; Voroux (Hesbaye liégeoise)=10,68°C ; Gembloux = 10,30°C et Cerfontaine (Condroz) =10,30°C (Sources IRM et météoBelgique).

³⁶ Cette théorie est communément admise comme le montre le nombre de modèles prévisionnels des émergences basés sur une somme unique de température débutant en hiver (Section 6.2.1).

5.5. Conclusion

L'utilisation du piège à phéromone pour mesurer les émergences, a été rendue possible par sa "délocalisation" des champs de froment dans lesquels il était généralement utilisé, vers les "champs-sources" dépourvus de couvert ou à couvert peu dense. Dans ces champs, la fuite des mâles vers des couverts plus protecteurs permet aux pièges à phéromone de ne capturer que les mâles nouvellement émergés.

Ces pièges, d'une très grande efficacité, ont permis de mettre en évidence la synchronisation des émergences au sein de "vagues". Ces observations laissent transparaître l'implication d'un facteur régulateur qui peut être multiple certaines années et dont l'influence se marque peu de temps avant l'émergence.

La différence entre les dates d'émergence des champs de cultures différentes ainsi que les écarts entre années semblent incriminer des facteurs environnementaux à deux échelles : les différences entre cultures en place seraient liées à des différences de "microclimat" au niveau des sols, tandis que les écarts, beaucoup plus importants, entre les années trouveraient leur origine dans les conditions touchant des régions entières telles que les conditions météorologiques sur des périodes de plusieurs mois.

Par ailleurs, la relative synchronisation des époques d'émergences entre régions pédoclimatiques suggère que ces conditions météorologiques subies sur le long terme ne déterminent pas, seules, les époques d'émergence mais que d'autres facteurs interviennent également.

Toutes ces informations permettent d'envisager l'utilisation ou la création d'un modèle prévisionnel de l'émergence. Il en existe plusieurs dont les descriptions et les évaluations font l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 6 :

Evaluation des modèles prévisionnels de l'émergence



Le chapitre 6 est consacré à la présentation et à l'évaluation des modèles prévisionnels de l'émergence. Ces modèles, d'origines diverses, ont été testés en leur appliquant les conditions météorologiques rencontrées en Wallonie au cours des quatre années d'étude.

6.1. Contexte et objectifs

Plusieurs études ont tenté d'élaborer des modèles en vue de prévoir les émergences des adultes de *S. mosellana*. Dans ce chapitre, les principales théories sont décrites (Section 6.2).

Chacun de ces modèles a ensuite été testé avec les données météorologiques et biologiques recueillies durant les quatre années d'observations (Section 6.3). Leur pertinence a ainsi pu être évaluée quant à leur application dans nos conditions de cultures.

Enfin, trois modèles représentatifs des différentes théories ont été ajustés aux conditions rencontrées en modifiant les paramètres quantitatifs mais en conservant la structure générale. Ces modèles "adaptés" ont également été évalués (Section 6.4).

6.2. Description des modèles existants

On peut regrouper les différentes théories existantes en trois grands types de modèles : les modèles reposant sur la détermination d'une seule période d'accumulation de température, les modèles basés sur une double période d'accumulation de température, et les modèles établis sur des seuils de température.

6.2.1. Modèles à une période de capitalisation de température

Modèle finlandais

Le modèle proposé par Kurppa est assez simple (Husberg et Kurppa 1988; Kurppa 1989). Il appartient à la catégorie des modèles mettant en jeu une somme de température (SDT)³⁷. Suite aux mesures réalisées durant les années 1986 et 1987, ces chercheurs ont constaté que 400 degrés-jours (DJ) en base 5°C, comptabilisés à partir du 1^{er} janvier, étaient suffisants pour atteindre l'émergence de 10 % des adultes de *S. mosellana*. L'hiver finlandais étant rigoureux, les besoins en froid sont toujours satisfaits. Dans ce modèle, les SDT nécessaires au développement sont faibles. Ceci reflète vraisemblablement une adaptation des populations scandinaves de cécidomyies à des conditions froides.

Modèles nord-américains

Au Canada et dans le nord des Etats-Unis, les modèles développés sont semblables au modèle de Kurppa (Doane et Olfert 2008). Tout comme ce dernier, ce sont des modèles à une SDT. Cependant, pour les modèles nord-américains, la comptabilisation des degrés-jours débute au 1^{er} mars et non au 1^{er} janvier.

Deux modèles canadiens coexistent. Le premier a été développé sur base d'une étude de la diapause en laboratoire (Wise et Lamb 2004) : après 9 mois à 2,5°C, il a fallu 306 DJ en base 9°C pour

³⁷ Les sommes de températures discutées dans le chapitre 6 sont toutes calculées selon la formule classique : Somme des T° en base X°C = $\sum \left(\frac{T^{\circ} \text{max journalière} + T^{\circ} \text{min journalière}}{2} \right) - X$

Valable si $(T^{\circ} \text{max} + T^{\circ} \text{min})/2 > X$, sinon on considère 0 pour le jour concerné

que 50 % des adultes émergent. Le second modèle canadien a été défini par Elliott et al. (2009) pour la province du Saskatchewan. De 1991 à 2000, ils ont observé que la période des émergences était assez constante d'une année à l'autre. Ils ont, dès lors, proposé un modèle de type calendaire, c'est-à-dire un modèle qui prévoit l'émergence de 10 % des adultes pour une date définie qui reste la même chaque année. En l'occurrence il s'agissait du 11 juillet \pm 5,9 jours. Cette date correspondait à une SDT calculée a posteriori de 693 DJ en base 5°C.

Aux Etats-Unis, dans le Dakota du Nord, un modèle similaire est utilisé par le Service de Vulgarisation de l'Université d'Etat du Dakota du Nord (NSDU Extension Service) pour avertir les agriculteurs. La base des SDT est de 40 degrés Fahrenheit. Ceci correspond à une base 4,44 en degrés Celsius et la SDT est estimée à 704°C (Knodel et Ganehiarachchi 2008).

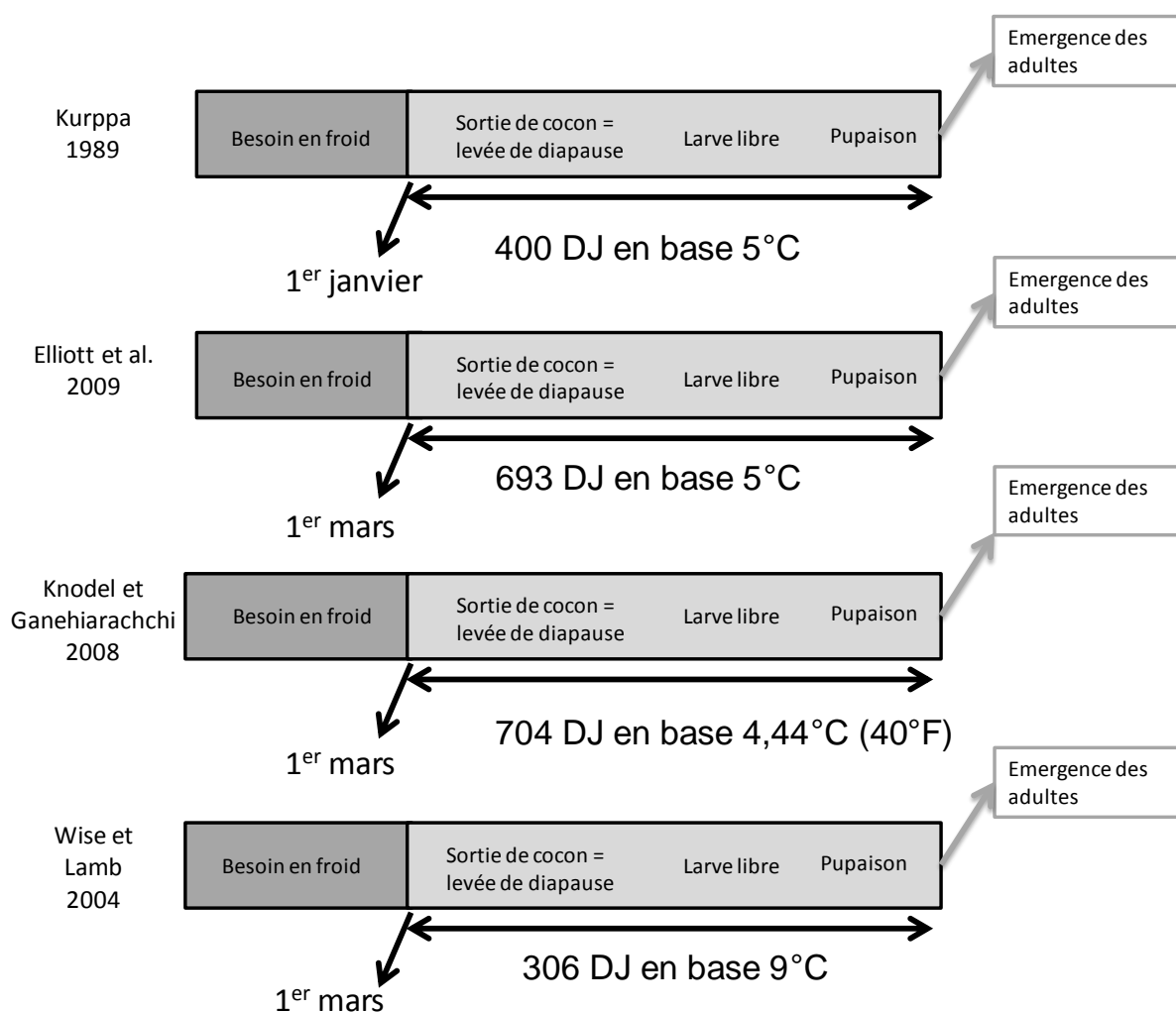


Figure 32 : schémas des modèles à une période de capitalisation de température (Finlande, Canada et Etats-Unis)

6.2.2. Modèle à deux périodes de capitalisation de température

Le modèle à deux périodes de capitalisation de température a été proposé par Thies Basedow à la fin des années septante (Basedow et Gillich 1982; Basedow 1977a). Ce modèle a été établi en

Allemagne sur base d'observations en laboratoire. Initialement mis au point pour la cécidomyie jaune du blé, *Contarinia tritici*, le principe de ce modèle est applicable à *Sitodiplosis mosellana*.

Pour *C. tritici*, il met en évidence qu'après une période de froid de 2-3 mois, 220 DJ en base 3°C sont nécessaires pour lever la diapause. Selon ce modèle, la diapause ne prend réellement fin que lorsqu'une chute de pluie permet aux larves de sortir de leur cocon. Les termes "sortie de cocon" et "levée de diapause" sont utilisés comme synonymes. Cette théorie est toujours la plus communément admise. Une fois les larves sorties du cocon, Basedow estime à 450 DJ en base 6°C, la SDT nécessaire pour la phase de "post-diapause" : migration des larves vers la surface, pupaison et émergence de 10 % des adultes. Ce modèle a été testé au champ par la même équipe de chercheurs mais les résultats ne furent pas très concluants (Basedow 1977a). Pour la cécidomyie orange, le nombre de larves disponibles n'était pas suffisant pour évaluer les SDT. Par contre, il est apparu que comme *C. tritici*, *S. mosellana* nécessite une phase de réchauffement pour terminer sa diapause. De même, la phase de sortie de cocon et la "post-diapause" requièrent une humidité minimale (humidité supérieure à 50 % de la capacité au champ). Cette période humide ne doit pas nécessairement être constante : des humidités transitoires succédant à des averses sont suffisantes (Basedow 1977a).

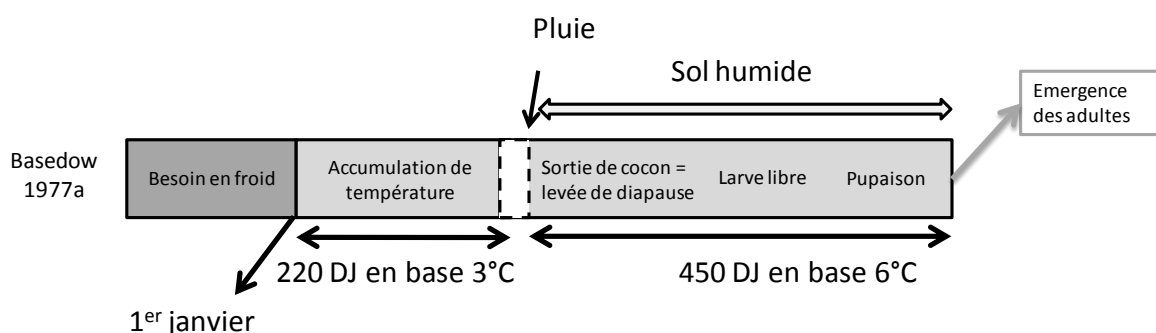


Figure 33 : schéma du modèle à deux périodes de capitalisation de température (Allemagne)

6.2.3. Modèle à seuils de température

Au Royaume-Uni, les années nonante ont été des années à forte pression de cécidomyies orange ce qui a permis à Jonatan Oakley de tester le modèle de Basedow sur le terrain (Oakley 1994; Oakley et al. 1998). Très vite, il lui semble que les SDT ne sont pas applicables aux conditions britanniques. Il va même jusqu'à douter de leur utilité en ce qui concerne le développement de l'insecte (communication personnelle). Selon le modèle d'Oakley (1998), des seuils de températures sont nécessaires à la "réactivation" des larves et à l'émergence des adultes. Ces seuils sont respectivement de 13°C et de 15°C. A partir du moment où les premiers centimètres du sol atteignent 13°C, Oakley compte trois semaines avant l'émergence probable des adultes. L'émergence a lieu après une pluie. Pour lui, comme pour Basedow, le développement des insectes nécessite une période humide (Oakley 1994).

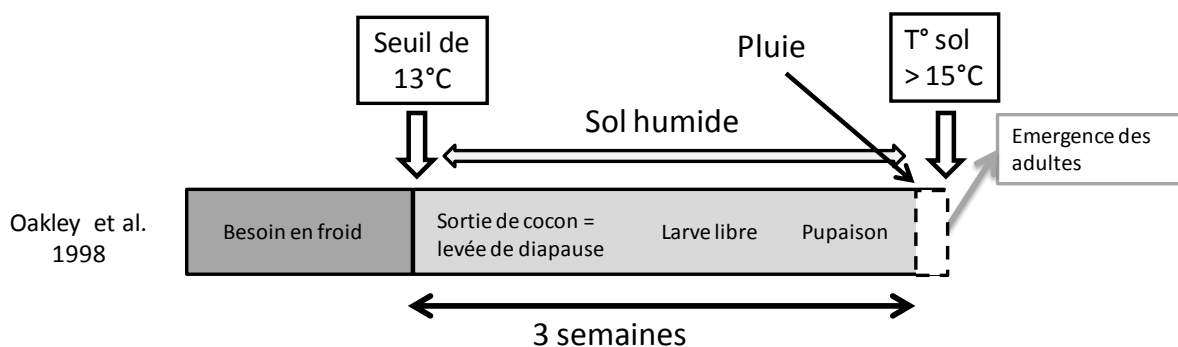


Figure 34 : schéma du modèle à seuil de température (Royaume-Uni)

6.3. Evaluation des modèles existants

Les différents types de modèles ont été testés en les appliquant aux données météorologiques observées à Gembloux au cours des années 2007 à 2010 et en confrontant leurs prévisions aux émergences effectivement observées.

a) Matériel et méthodes

Comme démontré précédemment, les données d'émergence les plus précises proviennent des captures des pièges à phéromones disposés dans des champs de betterave ou de maïs (Tableau 22). C'est donc à partir de ce type de patterns de captures que les dates représentatives du début des émergences ont été définies.

Tableau 22 : champs pris en compte pour le calcul des dates représentatives de l'émergence

Année	N° champ	Culture
2007	23	Betterave
	54	Betterave
2008	47	Betterave
	63	Betterave
2009	54	Maïs
	54	Betterave
2010	47	Betterave
	52	Betterave

Les données de captures des pièges disposés dans un même champ sont, dans un premier temps, regroupées pour obtenir les captures moyennes par jour et par champ. Dans un deuxième temps, les valeurs quotidiennes sont remplacées par des pourcentages de captures (100 X captures du jour /captures sur l'ensemble de la saison). Finalement, la moyenne des patterns d'émergence des différents champs est calculée afin d'obtenir le pattern d'émergence de l'année. Ces patterns sont ensuite transformés en valeurs cumulées et les dates correspondant aux pourcentages d'émergence définis par les modèles respectifs sont définies.

D'une manière générale, la date fixée doit éviter de tenir compte des quelques premières captures sporadiques. Pour cela on peut comparer l'évolution des pourcentages cumulés de captures au fil de la saison (Tableau 23). Au cours des quatre années, lorsque le seuil de 5 % des captures de l'année est dépassé, le nombre de captures augmente très rapidement et dépasse même les 10 %

cumulés dans la même journée. Pour la suite de l'étude, on peut donc fixer la date d'émergence par une double condition : que les captures cumulées aient dépassé 5 % des captures de la saison, et que les captures du jour soient supérieures à 5 % sur cette seule journée. Pour le modèle de Wise et Lamb (2004) qui, seul, se réfère à la date à laquelle 50 % des émergences ont été atteintes, la date représentant l'émergence est donc différente de celle utilisée pour les autres modèles (Tableau 23).

Tableau 23 : définition des dates représentant l'émergence

Captures cumulées	2007	2008	2009	2010
1 %	31-mai	14-mai	19-mai	2-juin
3 %	31-mai	15-mai	19-mai	4-juin
5 %	1-juin	22-mai	20-mai	5-juin
10 %	1-juin	22-mai	20-mai	5-juin
50 %	4-juin	3-juin	23-mai	16-juin

Les données météorologiques utilisées proviennent de la station d'Ernage (Gembloux) gérée par le CRA-W et dont les données sont validées par l'Institut Royal Météorologique (IRM) de Belgique.

b) Résultats et discussion

Les six modèles ont été appliqués aux données météorologiques de 2007 à 2010. Les dates prévues pour les émergences sont reprises (Tableau 24). Pour les modèles allemand et britannique, le développement prévu a été fractionné en trois étapes. Dans le modèle allemand, la première date marque la fin de la 1^{ère} SDT, la deuxième représente la pluie qui provoque la sortie des cocons, et la dernière est l'émergence des adultes. Pour le modèle anglais, la première date représente le dépassement du 1^{er} seuil de température (13°C), la deuxième indique le terme des trois semaines de pupaison et la troisième date marque la combinaison d'une pluie avec des températures d'au moins 15°C, qui provoquerait l'émergence des adultes.

Tableau 24 : application des modèles prévisionnels existants

Modèles		Date d'émergence prévue			
Origine	Description	2007	2008	2009	2010
Finlande	400 DJ en base 5°C	29-avr	15-mai	22-mai	31-mai
Canada (Saskatchewan)	693 DJ en base 5°C	11-juin	23-juin	23-juin	29-juin
Etats-Unis (Dakota Nord)	704 DJ en base 4,44°C	8-juin	19-juin	18-juin	26-juin
Canada (Manitoba)	306 DJ en base 9°C	7-juin	11-juin	19-juin	27-juin
Allemagne	220 DJ en base 3°C	28-févr	14-mars	11-avr	10-avr
	+ pluie > 5 L	1-mars	16-mars	17-avr	2-mai
	+ 450 DJ en base 6°C	27-mai	7-juin	20-juin	1-juil
Royaume-Uni	13°C	12-avr	26-avr	3-avr	19-mars
	+ 3 semaines	3-mai	17-mai	18-avr	9-avr
	+ (Pluie + 15°C)	9-mai	24-mai	14-mai	26-mai

Les dates prévues ont ensuite été comparées aux dates d'émergence observées. Les écarts figurent Tableau 25. Les deux modèles dont l'écart moyen par rapport à la date d'émergence observée sont les plus faibles, sont les modèles finlandais et anglais. Cependant la pertinence de ces deux modèles varie fortement en fonction des années : l'écart entre les prévisions pour l'année 2007 et l'émergence réellement observée est respectivement de 33 et de 23 jours. On remarque également que ces deux modèles sont généralement en avance sur les émergences observées tandis que les quatre autres modèles prévoient des émergences plus tardives que les émergences observées. L'élaboration de chaque modèle est liée à une région et il n'est pas étonnant que les paramètres des modèles diffèrent selon leur région de conception.

Tableau 25 : évaluation de la pertinence des modèles existants

	Ecart en nombre de jours entre la date d'émergence prévue par les modèles et la date observée				
Modèles	2007	2008	2009	2010	Moyenne ³⁸ (jour)
Finlande	(-) 33	(-) 7	(+) 2	(-) 5	11,8
Canada (Saskatchewan)	(+) 10	(+) 32	(+) 34	(+) 24	25,0
Etats-Unis (Dakota Nord)	(+) 7	(+) 28	(+) 29	(+) 21	21,3
Canada (Manitoba)	(+) 3	(+) 8	(+) 27	(+) 11	12,3
Allemagne	(-) 5	(+) 16	(+) 31	(+) 26	19,5
Royaume-Uni	(-) 23	(+) 2	(-) 6	(-) 10	10,3

6.4. Evaluation de modèles ajustés

Trois modèles ont été définis en respectant les principes des modèles existants mais en y optimisant les valeurs pour correspondre au mieux aux données recueillies à Gembloux. Cette manipulation avait pour objectif de tester les concepts de ces modèles une fois que les écarts n'étaient plus imputables aux différences entre les données météorologiques belges et celles des régions d'origine des modèles.

³⁸ La moyenne a été calculée à partir des valeurs absolues des écarts présentés dans le tableau 25.

a) Matériel et méthodes

Les trois types de modèles dérivés se définissent comme suit :

Type 1 = Modèle à une période d'accumulation de température :

- Début : 1^{er} janvier
- Fin : émergence de 10 % des imagos
- Contrainte : 1 SDT unique
- Variables et leurs limites :
 - Base des DJ (comprise entre 0 et 10°C)
 - Valeur de la SDT (> 0)

Type 2 = Modèle à deux périodes d'accumulation de température :

- Début de la 1^{ère} SDT : 1^{er} janvier
- Fin de la 1^{ère} SDT après 250 DJ en base 3°C
- Début de la 2^{ème} SDT : après la pluie qui suit la fin de la 1^{ère} SDT.
- Fin de la 2^{ème} SDT : émergence de 10 % des imagos
- Contraintes :
 - 2 SDT successives
 - 5 semaines maximum peuvent séparer la fin de la 1^{ère} SDT et la pluie qui déclenche la 2^{ème} SDT
- Variables et leurs limites :
 - Base des DJ de la 2^{ème} SDT (comprise entre 5 et 10°C)
 - Valeur de la 2^{ème} SDT (> 0)

Type 3 = Modèle basé sur une "température-seuil" :

- Début : lorsque la température moyenne atteint le seuil de température
- Fin : émergence de 10 % des imagos
- Variable et leurs limites :
 - "Température-seuil" (comprise entre 10 et 20°C)
 - Durée séparant le dépassement du seuil de température de l'émergence (comprise entre 0 jour et 3 mois)

Le modèle de type 3 s'est un peu éloigné du modèle d'Oakley et al. (1998) car la double condition comprenant une pluie et 15°C pour l'émergence n'a pas été retenue. En effet en 2008, 2009 et 2010, les émergences n'ont pas été immédiatement précédées par des pluies. Cette contrainte a donc été écartée.

b) Résultats et discussion

Les trois modèles qui satisfont le mieux aux conditions de l'expérimentation sont :

- Modèle 1 : 165 DJ en base 9°C
- Modèle 2 : 250 DJ en base 3°C, pluie, 275 DJ base 6°C
- Modèle 3 : seuil $T^{\circ}\text{moy} = 16^{\circ}\text{C} + 37$ jours

Tableau 26 : évaluation de la pertinence des modèles ajustés

	Ecart en nombre de jours entre la date d'émergence prévue par les modèles et la date observée				
Modèles	2007	2008	2009	2010	Moyenne (jours)
Modèle 1	(-) 22	0	(+) 4	0	6,50
Modèle 2	(-) 24	0	(+) 8	(+) 2	8,50
Modèle 3	(-) 12	(+) 12	(-) 3	0	6,75

En adaptant les types de modèle aux conditions observées, on parvient à réduire l'écart entre les dates prévues et les dates réellement observées. Le modèle le plus pertinent prévoit l'émergence avec une erreur moyenne de 6,5 jours (Tableau 26). Aucun des trois types de modèle ne s'est révélé pleinement efficace sur l'ensemble des quatre années. Les raisons varient selon le type de modèle.

Le modèle de type 1, comme tous les modèles à une SDT, ne tient pas compte des besoins en eau de l'insecte. En 2007, les émergences ont eu lieu tard (1^{er} juin) car il n'y a pas eu de pluie entre le 21 mars et le 7 mai. Hormis l'année 2007, les trois autres années répondent assez bien au modèle adapté de 165 DJ en base 9°C. Cette somme est comptabilisée, comme dans le modèle finlandais, à partir du 1^{er} janvier, mais vu la base utilisée, les journées qui participent concrètement à cette accumulation de température n'interviennent pas avant la fin avril. En année sèche, les prévisions de ce type de modèle ne seront pas pertinentes.

Le modèle de type 2 n'a pas non plus été validé. Le modèle original de Basedow avait été particulièrement inefficace en 2009, 2010 et 2011. Ces trois années se différencient des deux premières par des hivers plus froids et plus longs. Les 220 DJ en base 3°C avaient donc été acquis tard dans la saison et les 450 DJ en base 6°C renvoyaient à une date d'émergence très tardive. Cette seconde phase semblait inadaptée à nos conditions. Dans le modèle adapté, qui minimise l'écart moyen, l'accumulation des degrés-jours est réduite à 275 DJ en base 6°C. Cependant en diminuant les écarts des années 2008, 2009 et 2010, on augmente celui de l'année 2007. Ceci démontre que la période séparant la sortie des cocons de l'émergence des adultes n'est pas définie par une simple relation de SDT. L'intérêt principal de ce modèle est d'avoir mis en lumière l'existence de deux phases de développement différentes (fin de diapause et post-diapause) ainsi que d'avoir mis en évidence le rôle indispensable joué par l'eau pour la sortie des cocons.

Le modèle de type 3, dérivé du modèle anglais, est basé sur des seuils de température. Oakley et al. (1998) ne contestent pas que l'humidité est favorable au développement de l'insecte mais, contrairement à Basedow, ils ne signalent pas la nécessité d'une pluie à un moment précis du développement, si ce n'est lors de l'émergence des adultes. C'est la première cause de non-validité

de ce modèle. La seconde est la suppression de la phase d'accumulation de température post-hivernale. Il remplace les 220 DJ en base 3°C de Basedow par un seuil de 13°C. Généralement, ce modèle répond assez bien aux situations observées, mais lors d'une année très précoce, comme 2010, durant laquelle du 20 au 29 mars, les températures moyennes ont dépassé 13°C, le modèle ne fonctionne plus. Quant à la nécessité d'une pluie et d'un sol à plus de 15°C pour l'émergence des adultes, nos observations ont infirmé cette hypothèse. Dans le modèle adapté, cette dernière condition n'a pas été prise en compte. Le seuil exprimant la meilleure relation avec la situation observée fut un seuil de 16°C suivi d'une période de 37 jours.

6.5. Conclusion

Aucun des modèles existants n'est parvenu à expliquer les émergences observées au cours des quatre années. Les écarts entre les dates prédites et les dates d'émergences observées, sont trop importants pour permettre l'utilisation de ces modèles à des fins de lutte intégrée.

Les modèles "adaptés" minimisent ces écarts mais ne sont, toutefois, pas non plus assez précis pour être utilisés dans nos régions. L'impossibilité d'ajuster les modèles en modifiant les paramètres quantitatifs remet en question les fondements mêmes de ces modèles.

Les bases sur lesquelles repose chacun de ces modèles, méritent d'être analysées et testées séparément afin de pouvoir proposer un nouveau modèle adapté à nos conditions.

Chapitre 7 :

Définition d'un nouveau modèle prévisionnel des émergences



Un nouveau modèle prévisionnel des émergences des adultes de *S. mosellana* est présenté dans ce chapitre. Il se base en partie sur des concepts développés par les modèles existant ainsi que sur de nouveaux principes mis en évidence par l'analyse des patterns d'émergence présentés au cinquième chapitre.

7.1. Contexte et objectifs

Suite au manque de fiabilité des modèles existants (Chapitre 6) et aux informations originales recueillies via le réseau de captures (Chapitre 5), le développement d'un nouveau modèle prévisionnel des émergences d'adulte de *S. mosellana* a été entrepris.

Trois composantes des modèles existants sont apparues pertinentes : la première concerne la nécessité pour les larves d'accumuler une somme de température après la période de froid (Section 7.2.1), la deuxième a trait au rôle de l'humidité lors de la sortie des larves de leur cocon (Section 7.2.2) et la dernière traite de l'existence d'un seuil de température pour enclencher le stade puppe (Section 7.2.3). Toutes trois ont été confirmées au cours des observations.

L'analyse des paramètres météorologiques susceptibles de déterminer les dates d'émergences a conduit à identifier le rôle de certaines pluies en tant qu'inductrices des vagues d'émergences (Section 7.3). Ces pluies répondent à des critères précis en étroite relation avec les composantes sélectionnées des modèles antérieurs (Section 7.4). Rassemblant toutes ces conditions et la notion de "pluie inductrice", un nouveau modèle prévisionnel a été proposé (Section 7.5).

Ce modèle est basé sur des mesures de températures moyennes de l'air dont les données sont aisément disponibles pour l'ensemble du territoire concerné. Cependant des mesures de température de sol à des fréquences plus régulières permettraient une plus grande précision du modèle (Section 7.6).

Afin de prévoir le risque de coïncidence entre les émergences et l'épiaison, il est également nécessaire de prévoir le stade de développement que la culture aura atteint au moment de l'émergence. Ceci est possible sur base des connaissances physiologiques actuelles du froment. La section 7.7 traite de ce couplage des deux modèles prévisionnels.

La dernière section (7.8) traite de l'extension du modèle à d'autres régions du monde pour la cécidomyie orange ainsi qu'à d'autres espèces de cécidomyies aux caractéristiques biologiques comparables.

7.2. Evaluation des composantes des modèles existants

7.2.1. Accumulation de températures requises par les larves pour sortir de leur cocon

Selon Basedow (1977), une condition essentielle pour s'extraire de leur cocon est que les larves des cécidomyies du blé (*Sitodiplosis mosellana* et *Contarinia tritici*) aient acquis une SDT suffisante après la période de froid. Pour la cécidomyie jaune du blé, Basedow estimait cette somme à 220 DJ en base 3°C. Afin de mesurer cette accumulation de température pour la cécidomyie orange du blé, une expérience comparant l'effet de six régimes de température a été réalisée.

a) Matériel et méthodes

Le développement de *S. mosellana* a été suivi en conditions contrôlées et des sondes de températures ont été disposées dans les champs pour comparer les conditions d'élevage à celles de terrain.

Etude du développement de *S. mosellana* selon différents régimes de température

Cinquante kilos de terre ont été prélevés en septembre 2008 dans un champ d'essai situé à Beuzet et géré par la Faculté universitaires des Sciences agronomiques de Gembloux. La terre de la parcelle était très fortement infestée : le froment récolté avait contenu plus de 15 larves de *S. mosellana* par épi, qui étaient descendues au sol à la faveur des pluies de juillet. La terre des cinq premiers centimètres de sol a été prélevée, ramenée au CRA-W et stockée à l'extérieur sur une bâche. Cette collecte de terre en septembre a permis d'éviter que les larves ne soient diluées par le labour. A la fin novembre, la terre a été placée en chambre froide maintenue à 3-4°C, jusqu'aux extractions des cocons. Les cocons avaient alors déjà subi le froid nécessaire³⁹ à la sortie de diapause.

Deux extractions successives ont eu lieu selon le processus habituel (Section 3.2.1) : la série A, le 13 janvier 2009 suivie 15 jours plus tard (28 janvier) par la série B. Lors de chacune de ces opérations, 600 cocons ont été extraits. Les cocons ont ensuite été disposés dans des boîtes en plastique (12 cm X 20 cm X 4 cm) dont le fond était couvert d'un papier absorbant humidifié. 100 cocons ont été répartis par boîte, et les boîtes disposées dans des chambres conditionnées.

Six régimes de température ont été testés (Tableau 27). Trois régimes étaient constitués de températures fixes (15°C, 20°C et 25°C) et trois autres, d'alternances journalières de température de 7°C pendant 16h et de respectivement 15°C, 20°C et 25°C pendant 8h. Les boîtes soumises à l'alternance de température étaient changées de chambre conditionnée, tous les matins à 8h ainsi qu'en fin d'après-midi à 16h. 200 cocons ont ainsi été soumis à chaque traitement. Quotidiennement, les boîtes étaient examinées et le nombre de larves sorties des cocons, était enregistré.

Tableau 27 : conditions de l'expérience "somme de température"

Régimes de T°	T° équivalente	Gain journalier Base 3°C	Nombre de larves "sorties"	
			Série A	Série B
15°C	15°C	12°C	46	41
20°C	20°C	17°C	52	34
25°C	25°C	22°C	17	6
7/15°C (16h/8h)	9,6°C	6,7°C	81	74
7/20°C (16h/8h)	11,3°C	8,3°C	75	89
7/25°C (16h/8h)	13°C	10°C	75	62

³⁹ La notion de "froid nécessaire" est une notion floue, chaque auteur propose un nombre de jours et une intensité de froid différents. Cependant, ils s'accordent pour dire que 2-3 mois à une température moyenne de moins de 10°C est suffisant (Basedow 1977a, Oakley et al. 1998, Wise et Lamb 2004).

Mesure des températures du sol à différentes profondeurs

Durant le printemps 2009, six enregistreurs de température (ThermoPuce®, Waranet Solution SAS, France) ont été disposés à différentes profondeurs du sol (-5cm, -10 cm, -15 cm) en deux points du champ 60 emblavé en froment d'hiver. Les enregistreurs sont constitués d'un capteur métallique qui fait également office de carte de stockage de l'information et d'un support plastique (Photo 29). La ThermoPuce® a la taille et la forme d'une pile de montre (diamètre 1,2 cm). Afin d'éviter le contact avec l'eau, les puces étaient protégées par un sachet en plastique scellé de 70 µm d'épaisseur dans lequel un sachet de sulfate de magnésium maintenait une humidité faible. Les enregistreurs étaient disposés à la profondeur souhaitée, capteur vers le haut. Afin de ne pas perturber le sol situé au-dessus du capteur, la ThermoPuce® était insérée horizontalement après avoir creusé un trou de profondeur suffisante à côté de l'endroit choisi. Le trou une fois rebouché, un piquet en fibre de verre était planté. Un fil à ligaturer reliait les enregistreurs à ces piquets afin de les localiser. La programmation des puces imposait une mesure toutes les 40 minutes.



Photo 29 : enregistreur de température (ThermoPuce®)

Les mesures ont été enregistrées entre le 13 mars, date de leur mise en place et le 17 avril, date présumée du début de la pupaison (Section 7.3). Deux puces étaient disposées à chaque profondeur et 36 mesures ont été enregistrées par jour. Le calcul de la SDT diffère de celui généralement utilisé dans la littérature et est détaillé ci-dessous⁴⁰:

$$SDT \text{ en base } 3^{\circ}\text{C} = \sum_{n=13 \text{ mars}}^{17 \text{ avril}} \sum_{i=1}^{36 \text{ mesures}} \frac{(T^{\circ} \text{ mesurée} - 3)}{36}$$

Valable si ($T^{\circ} \text{ mesurée} > 3^{\circ}\text{C}$), sinon on considère 0 pour la mesure concernée

b) Résultats et discussion

Conformément à l'hypothèse de Basedow, il est apparu que le délai, entre la fin du stockage en chambre froide et la sortie des larves de leur cocon, dépendait des températures perçues par les larves. Plus la température était élevée, plus la sortie était rapide.

Comme pour *C. tritici* (Basedow 1977a), les SDT ont été calculées en base 3°C. Quel que soit le régime supporté par les larves, toutes ont nécessité une période d'accumulation de température

⁴⁰ Les raisons de ce changement de formule sont présentées à la section 7.6.2

(Figure 36). La valeur moyenne observée fut de 320 DJ en base 3°C. Cette valeur est plus élevée que celle proposée par Basedow (220 DJ). Cependant, on note que, plus les régimes sont constitués de températures élevées, plus les SDT nécessaires à la sortie de cocon sont élevées. Les températures supérieures à 20°C semblent moins efficaces et ne profitent pas autant au développement de l'insecte que les régimes de 15°C et de 7°C/15°C. C'est particulièrement le cas pour les régimes 25°C et 7°C/25°C pour lesquels les larves nécessitent 400 DJ avant de pouvoir quitter leur cocon⁴¹. A la température constante de 25°C, seules quelques larves (17 et 6) ont pu sortir de leur cocon (Tableau 27).

Globalement, les effectifs sortis de cocons sont nettement plus faibles à température constante (< 50 %) que pour les régimes de températures alternées⁴² (± 80 %). La grande majorité des études antérieures se sont déroulées à des températures constantes et les taux de sortie de cocons se sont toujours révélés faibles (Basedow 1977a; Hinks et Doane 1988; Wise et Lamb 2004). Il faut noter que ces régimes de températures fixes ne s'observent pas sur le terrain et que des températures supérieures à 15°C sont exceptionnelles au mois de mars. Les résultats obtenus sous ces régimes sont donc à prendre avec précaution.

Pour le régime le plus en phase avec la réalité (7°C/15°C), les valeurs sont comprises entre 230 et 270 DJ. La valeur obtenue est donc proche des 220 DJ en base 3°C déterminée par Basedow.

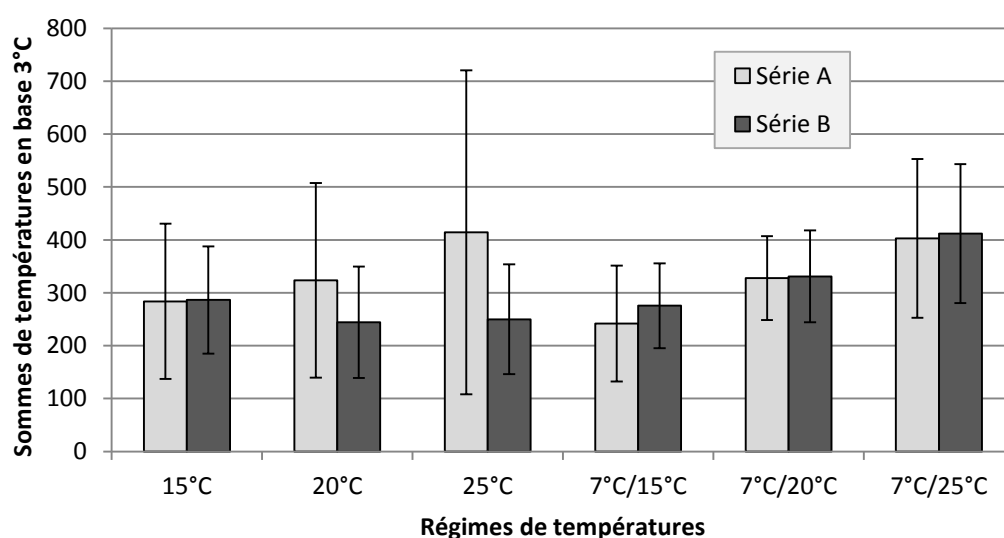


Figure 35 : moyennes et écarts-types des SDT nécessaires à la sortie des cocons selon le régime de température subi

⁴¹ Les 6 régimes réunis obtiennent une SDT en base 3°C statistiquement différente (ANOVA à un facteur ; $F_{5,646}=11,36$; $p=0,000$). Cependant lorsque l'on ne tient pas compte des régimes 25°C et 7°C/25°C, les 4 régimes restants présentent une SDT qui n'est plus différente (ANOVA à un facteur ; $F_{3,379}=1,37$; $p=0,253$).

⁴² Ces taux de sorties de cocon jamais atteints en conditions contrôlées pourraient expliquer pourquoi les larves situées à faible profondeur dans le sol sont plus enclines à émerger que celles enfouies à des profondeurs où l'amplitude journalière des températures est plus faible (résultats non présentés). Le rythme nyctéméral de température pourrait être perçu par l'insecte comme un stimulus d'éclosion. Cette hypothèse n'a pas été testée dans le cadre de cette étude.

On notera que pour un même régime de température, la sortie des cocons est très étalée dans le temps. C'est pourquoi, les écarts-types sont importants. Ceci confirme les observations de terrain pour lesquelles l'apparition des larves "libres" se produit sur plusieurs semaines (observations non présentées) pour autant que l'humidité soit suffisante. Cet étalement des sorties de cocon est d'autant plus marqué au champ que les cocons sont répartis à différentes profondeurs du sol. Les températures accumulées par les larves sont variables comme le montrent les mesures obtenues à différentes profondeurs dans un champ de froment d'hiver (Figure 37). En effet, des écarts supérieurs à 20 DJ en base 3°C peuvent être observés entre la quasi-surface du sol (-1 cm) et la profondeur de -15 cm. En début de printemps, cet écart peut conduire à un retard de sortie de cocon de près d'une semaine.

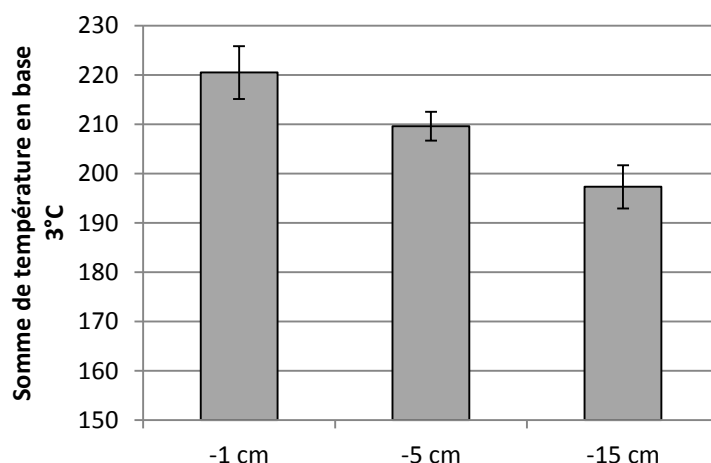


Figure 36 : cumul de température à différentes profondeurs de sol dans un champ de froment entre le 13 mars et le 17 avril 2009

En conclusion, l'expérimentation réalisée confirme l'hypothèse de Basedow quant à la nécessité d'une accumulation de température pour permettre aux larves de sortir de leur cocon. La plupart des larves ont besoin de 250 DJ en base 3°C. Cependant, les premières sorties de cocons s'observent dès 150 DJ en base 3°C. A cette grande amplitude de besoin de température accumulée s'ajoute une assez grande amplitude de température subie par les larves en fonction de leur profondeur d'enfouissement dans le sol. Ces deux composantes conduisent à un étalement important de la sortie des cocons, nécessitant en aval un mécanisme régulateur pour aboutir en définitive à des émergences d'adultes synchronisées.

7.2.2. Humidité nécessaire à la sortie de cocons

Au cours de l'expérience présentée à la section précédente, ainsi que pour toutes les manipulations opérées sur les cocons, la satisfaction du besoin en eau des larves pour sortir des cocons est apparue comme une condition indispensable. Au champ, comme en labo, aucune larve ne sort de son cocon si elle n'est pas soumise à une forte humidité. Ceci confirme les observations de Basedow (1977).

La sortie des cocons peut survenir à des températures assez basses. Soumises à des températures constantes de 7, 10 ou 15°C, le pourcentage de larves quittant leur cocon ne varie pas (expérience non présentée). Le facteur température intervient donc sous forme de capitalisation mais pas sous forme de seuil.

Lors de l'étude de 1977, Basedow remarque que les larves ayant acquis l'accumulation de température requise ne peuvent quitter leur cocon que pendant une période de 4-5 semaines. Une fois ce délai passé, elles entament une nouvelle diapause jusqu'au printemps suivant⁴³. Oakley (1998) estime également la durée de cette période à cinq semaines. Toutefois, en considérant les résultats de l'expérimentation présentée à la section 7.2.1, il semble que la longueur de la période au cours de laquelle la larve est capable de sortir de son cocon corresponde à une capitalisation de température plutôt qu'à une durée. La valeur moyenne entre les premières larves sorties et les dernières fut de 400 DJ en base 3°C ce qui correspond généralement à 7-8 semaines pour la période mars-avril. Le succès reproductif des cécidomyies orange est très aléatoire et lors d'années sans coïncidence, l'espèce ne doit sa survie qu'à l'aptitude de ses larves à demeurer plusieurs années dans le sol. En supposant que les facteurs déclenchant la sortie des larves soient liés aux températures et/ou à l'humidité, ces conditions finiraient chaque année par être rencontrées au cours de la bonne saison et les insectes quitteraient donc le sol en été ou en automne. Ce mécanisme de sauvegarde apparaît, dès lors, comme essentiel à la survie de l'espèce.

7.2.3. Seuil de température et pupaison

Selon Oakley et al. (1998), la pupaison ne peut débuter qu'une fois que la température du sol est supérieure à 13°C. Au cours des nombreux prélèvements de sol réalisés aux printemps 2007 à 2009, alors que le sol était toujours plus froid que 13°C, aucune pupe n'a été extraite. En laboratoire également, à 10°C (contrairement à 15°C), aucune pupe n'a été observée. La température-seuil n'a pu être définie de manière plus précise dans le cadre de ce travail. Cependant, ce facteur déclencheur de la pupaison précédé par des sorties de cocons très échelonnées permet de penser à une phase "larves libres" de durée variable. Durant cette phase, les larves sorties de leur cocon à différentes profondeurs dans le sol pourraient progressivement se regrouper dans la couche supérieure du sol (à moins d'1 cm de la surface), où se déroule la pupaison. Etrangement, cette période, indépendante du temps et des besoins en température cumulée, n'a jamais été considérée dans les modèles prévisionnels. Pourtant, la présence de "larves libres" plusieurs mois avant l'émergence des adultes, est attestée dans de nombreuses études de terrain (Golightly 1952; Doane et Olfert 2008). Au Canada par exemple, durant les printemps 1984 et 1985, des "larves libres" avaient été observées respectivement à partir du 14 mai et du 9 mai : les premières pupes avaient, elles, été extraites du sol respectivement le 15 juin et le 10 juin (Doane et Olfert 2008).

Au cours de nos observations également, la durée de la phase "larve libre" s'est avérée très variable. Contrairement à 2007, en 2009, cette période a été très courte car l'acquisition des degrés-jours a été directement accompagnée par un réchauffement du sol au-delà de 13°C. La phase libre peut donc être très brève. C'est vraisemblablement pour cela que les expériences de Basedow, principalement réalisées en laboratoire, n'ont pas identifié le seuil de température comme facteur indispensable. En laboratoire, les températures utilisées étaient toujours supérieures à 13°C et la sortie de cocon était donc directement suivie par le déclenchement de la pupaison.

⁴³ Dans le texte original de Basedow (1977a), il n'est pas question de "nouvelle" diapause, mais de prolongation de l'ancienne. Suite aux récentes découvertes de Li et al. 2006 qui démontrent une reprise des activités métaboliques des larves dans leur cocon durant chaque hiver, l'idée de Basedow a été rectifiée.

7.3. Relation entre pluies et émergences

Les patterns d'émergence sont désormais déterminés de façon précise et robuste grâce aux relevés quotidiens de pièges à phéromone disposés dans des "champs-sources" à couvert réduit, choisis de manière à ne capturer que les insectes émergents du jour. Ces patterns ont montré des allures très différentes d'une année à l'autre : pour trois de ces années, des vagues d'émergences distinctes ont été observées. De plus, la forte coordination des émergences comparée à l'étalement de la sortie des larves de leur cocon laissait entrevoir l'influence d'un facteur de synchronisation. C'est afin de déterminer ce qui pourrait expliquer cette synchronisation que les profils d'émergence ont été confrontés aux données météorologiques correspondantes et en particulier aux précipitations.

a) Matériel et méthodes

Au cours de chacune des quatre années d'étude (2007-2010), des pièges à phéromone ont été disposés dans les champs suivis de la région de Gembloux. Les pièges et la gestion des relevés ont été détaillés Section 4.2. Chaque année, les pièges de deux champs infestés de cécidomyie orange, cultivés soit en betterave, soit en maïs (Tableau 28), ont servi à établir les patterns d'émergence annuels de la cécidomyie orange, comme présenté Section 5.2.3.

Les données météorologiques utilisées étaient celles de la station météorologique d'Ernage, située à environ 6 km des champs observés et qui effectue une mesure toutes les 10 minutes.

b) Résultats et discussion

L'analyse des conditions météorologiques, qui ont prévalu durant les périodes précédant les émergences, révèle la vraisemblance d'une relation entre certaines pluies et les vagues d'émergences. Ainsi en 2007, malgré des températures favorables, les émergences des cécidomyies orange n'ont pas eu lieu avant le 1^{er} juin. Ces émergences tardives ont logiquement fait penser que le manque d'eau en était responsable. En effet, il n'avait pas plu du 21 mars au 7 mai, soit pendant plus de 40 jours (Section 2.3.1). La pluie du 7 mai a été suivie par des émergences⁴⁴ le 1^{er} juin, soit 25 jours, plus tard (Figure 38). En 2008, puis en 2009, trois pluies ont été suivies à distance par trois vagues d'émergence. En 2010, sept vagues d'émergences ont été observées, chacune pouvant avoir été provoquée par une pluie antérieure. Le lien entre pluie inductrice supposée et vague d'émergence induite a été recherché pour les quatre années d'observation. Pour ce faire, à chaque vague d'émergence, la pluie inductrice la plus vraisemblable (voir Section 7.4) a été associée et ainsi, 14 couples "pluie inductrice-vague d'émergence" ont été formés (Tableau 29).

Se fondant sur l'idée qu'une constante en degrés-jour liait vraisemblablement la cause et l'effet, les températures de base de 0 à 10°C par pas de 1°C ont été testées afin de déterminer la SDT la plus constante aux 14 relations "pluie inductrice-vague d'émergence". La température de base de 7°C s'est le mieux ajustée à ces 14 séries de température. En moyenne, l'écart entre la pluie inductrice et l'émergence est de 160 ± 8 DJ en base 7°C, les extrêmes se situant respectivement à 174 et 144 DJ en base 7°C. Physiologiquement, cette période pourrait correspondre à la durée de la

⁴⁴ Dès 23h50, le soir même, une étrange cécidomyie de 3 kg 500 a vu le jour : bienvenue Augustin ;-)

pupaison, phase de développement qui n'avait jamais été considérée distinctement dans les modèles antérieurs. Les phases du développement précédant la pupaison, c'est-à-dire la sortie de diapause, la sortie du cocon et le déplacement des larves vers la surface du sol, sont moins exigeantes en température. De ce fait, les températures de base utilisées dans les modèles antérieurs étaient pour la plupart inférieures à 7°C.

Tableau 28 : champs suivis et effectifs des captures prises en compte pour illustrer la relation "pluie inductrice-vague d'émergence"

Année	N° Champ	Culture	N° Piège	Effectifs capturés
2007	23	Betterave	1	3.114
			2	2.335
	54	Betterave	1	541
			2	960
2008	47	Betterave	1	1.245
			2	2.079
	63	Betterave	1	2.921
			2	3.878
2009	54	Maïs	1	3.287
			2	2.895
	54	Betterave	1	3.835
			2	3.390
2010	47	Betterave	1	1.052
			2	893
	52	Betterave	1	2.588
			2	3.020

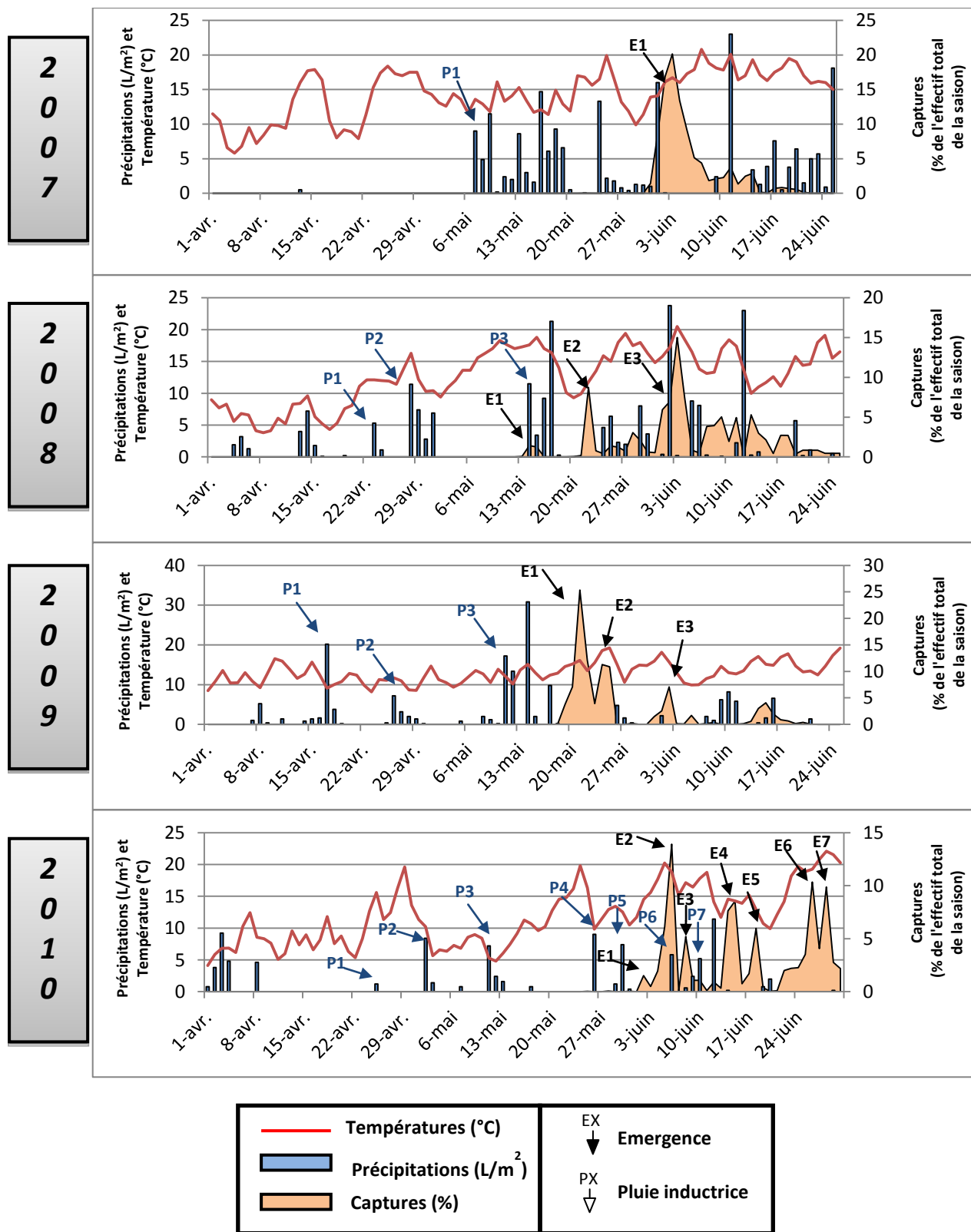


Figure 37 : relation entre les pluies et les émergences d'adultes de 2007 à 2010
 Les données relatives aux champs suivis sont présentées au tableau 28.

Tableau 29 : comparaison des délais et des SDT entre pluie inductrice et vague d'émergence induite

Coordonnées des flèches			Date de la pluie		Quantité d'eau (L/m ²)	Date de l'émergence	Durée en jours séparant la pluie de l'émergence	SDT en base 7°C entre la pluie et l'émergence
2007	P1	E1	7/05	Soir	9,0	1/06	25	173,6
2008	P1	E1	23/04	Soir	5,3	14/05	21	154,4
	P2	E2	29/04	Nuit du 28/29	18,8	22/05	23	169,7
	P3	E3	15/05	Matin	14,9	1/06	17	143,9
2009	P1	E1	17/04	Nuit du 16/17	21,8	20/05	33	157,9
	P2	E2	26/04	Nuit du 25/26	7,6	24/05	28	161,2
	P3	E3	11/05	Nuit du 10/11	17,4	01/06	21	162,4
2010	P1	E1	25/04	Nuit du 25/26	1,2	2/06	38	161,5
	P2	E2	2/05	Matin	18,8	5/06	34	151,6
	P3	E3	11/05	Soir	10,0	8/06	28	171,3
	P4	E4	26/05	Matin	22,2	14/06	19	156,2
	P5	E5	30/05	Nuit du 29/30	10,0	17/06	18	154,9
	P6	E6	6/06	Midi	7,1	25/06	19	163,6
	P7	E7	10/06	Nuit du 9/10	5,8	28/06	18	162,2
						Moyenne	24,4	160,3
						Ecart-type	6,8	8,0
						Coefficient de variation	27,8 %	5,0 %

Afin de valider cette découverte, des essais spécifiques ont été réalisés en conditions contrôlées où des émergences ont pu être provoquées par des arrosages appliqués à dates échelonnées. Les essais de validation ont été conduits par Sandrine Chavalle et l'ensemble de l'équipe de Michel De Proft. Ces expériences associées aux données de terrain font l'objet d'une publication et ne seront pas détaillées dans ce travail (Jacquemin et al. 2014).

7.4. Définition de la pluie inductrice

L'identification d'une pluie inductrice peut s'avérer simple comme ce fut le cas le 7 mai 2007 où une pluie succéda à 40 jours de sécheresse. Ce n'est pas toujours le cas : les années suivantes, la multiplicité des périodes pluvieuses au cours du printemps ne permettait pas de déterminer d'emblée que telle pluie était inductrice et telle autre pas. Les conditions permettant à une pluie d'induire des émergences sont analysées ci-après.

7.4.1. Pluie nécessitant le dépassement préalable d'un seuil de température

Un premier paramètre déterminant les pluies inductrices est relatif au seuil de température. Comme décrit au paragraphe 7.2.3, le seuil de 13°C proposé par Oakley semble confirmé par nos observations directes aux champs.

La mise en évidence de la pluie inductrice permet, par analyse rétroactive, une nouvelle confirmation de ce seuil. Ainsi, lors de l'année 2008, le premier des trois pics d'émergence ne concerne qu'une faible proportion de cécidomyies. La pluie correspondante (P1) était d'intensité suffisante mais la température du sol n'avait pas encore atteint 13°C. Lors des deux pluies suivantes (P2 et P3), les températures étaient bien supérieures à 13°C et les émergences ont été abondantes. Le printemps 2009 fut globalement une saison assez froide. Cependant du 10 au 15 avril, les températures moyennes furent supérieures à 13°C. Les trois périodes de pluie qui se sont alors succédées ont, chacune, donné lieu à une vague d'émergence bien distincte. En 2010, la première pluie inductrice a eu lieu le premier jour où les températures moyennes de l'air ont dépassé 13°C.

Au laboratoire, il a été maintes fois confirmé que le développement des adultes n'est pas possible à 10°C mais se déroule sans problème à 15°C⁴⁵ (expériences non présentées). C'est également le cas dans les expériences de Wise et Lamb (2004).

7.4.2. Pluie intervenant après la capitalisation des températures nécessaires

Comme signalé par Basedow (1977a) et confirmé par l'expérimentation en conditions contrôlées présentée Section 7.2.1, la sortie des cocons implique d'abord une période de froid suffisante, puis une capitalisation d'environ 250 DJ en base 3°C. Aucune pluie survenant avant l'acquisition de ce capital ne peut induire d'émergence.

L'analyse rétroactive des émergences et du caractère inductif des différentes pluies va également dans ce sens. En effet, si la pluie inductrice peut être identifiée comme la première pluie qui suit l'acquisition d'une SDT suffisante, il est alors possible de mesurer la SDT acquise aux moments de ces pluies. L'analyse des pluies qui n'ont pas permis l'émergence est quant à elle

⁴⁵ Des expériences ont été entreprises pour tenter d'affiner la mesure du seuil de température nécessaire au passage du stade larve libre à celui de pupa. Ces expériences n'ont pas abouti à des résultats probants. La raison provient de la difficulté de contrôler à la fois l'humidité du sol et des températures basses pour de grands volumes de terre. Nous ne disposions pas de l'équipement et des installations nécessaires.

révélatrice de SDT insuffisantes. Plusieurs cas de figure se sont présentés sur les quatre années étudiées permettant progressivement de resserrer la fourchette des estimations :

- En 2007, la pluie inductrice a été la première pluie de la saison et l'on ne peut dès lors rien dire du seuil inférieur de la période de sensibilité. La pluie inductrice est survenue après 696 DJ en base 3°C cumulés à partir du 1^{er} janvier.
- En 2008, la première pluie inductrice a eu lieu après 367 DJ en base 3°C. Comme en 2007, ce fut la première pluie après que le seuil de 13°C ait été dépassé. Cette année ne fournit pas d'information sur la quantité minimale de température à accumuler.
- L'année 2009 fut la plus intéressante sur ce point. La première pluie inductrice eut lieu le 17 avril après 281 DJ en base 3°C. Cependant, la première quinzaine du mois d'avril avait été relativement chaude ($T^{\circ} \text{ moy} > 13^{\circ}\text{C}$) et trois pluies étaient tombées les 6, 10 et 11 avril alors que 173, 211 et 224 DJ en base 3°C avaient respectivement pu être capitalisés par les larves. Ceci nous permet de situer les besoins en température entre 224 et 281 DJ en base 3°C.
- En 2010, on retrouve le même schéma qu'en 2009 où une pluie chaude le 8 avril (212 DJ en base 3°C) avait précédé la pluie inductrice du 25 avril (301 DJ en base 3°C) mais sans provoquer d'éclosion. L'année 2010 confirme la précédente sans améliorer la précision de la somme nécessaire des températures à acquérir pour pouvoir répondre à la pluie inductrice.

Comme en conditions contrôlées, les observations de terrain et particulièrement l'année 2009 confirment la nécessité d'une période d'accumulation de température après les froids hivernaux et situent ces besoins entre 224⁴⁶ DJ et 281 DJ en base 3°C.

7.4.3. La quantité d'eau

Identifier une pluie inductrice, c'est aussi déterminer à partir de quelle quantité, des précipitations peuvent être actives. L'année 2010 fut la plus instructive à cet égard, car jusqu'alors seules des pluies de quantité importante avaient pu être identifiées comme "inductrices". La quantité tombée lors de la pluie P1 en 2010 fut de 1,2 L/m². Cette faible quantité d'eau a permis à un petit nombre de larves d'éclore (E1). Sans doute, s'agissait-il des larves situées le plus en surface du sol ou dans quelques anfractuosités qui auraient permis un temps de contact suffisant entre l'eau et la larve. En règle générale, on remarque que la proportion d'imagos émergés lors d'une vague d'éclosion est corrélée à la quantité d'eau de la pluie correspondante. Les trois pluies inductrices de l'année 2008 illustrent cette notion (Figure 38). La pluie n'a d'effet que sur les larves exposées directement à l'eau. L'efficacité de la pluie en termes quantitatifs est donc directement dépendante de la quantité d'eau tombée. Une faible pluie n'humidifiera que les premiers millimètres du sol et n'aura qu'un impact très limité sur l'ensemble de la population de larves réparties dans le sol.

Cependant, on aurait tort de se concentrer uniquement sur la quantité d'eau tombée le jour de la pluie présumée inductrice. Les quantités d'eau tombées dans les jours qui précèdent et qui

⁴⁶ La poursuite des travaux par l'équipe de S. Chavalle a permis en fonction des émergences de 2013 de resserrer encore la fenêtre de températures nécessaires entre 250 DJ et 281 DJ en base 3°C.

suivent, ainsi que le type de sol influencent également l'état de saturation en eau du sol et donc directement la probabilité que les larves se retrouvent en contact avec l'eau. Au niveau des sols, les terres sablonneuses vont, par exemple, requérir des quantités d'eau importantes pour activer les larves alors qu'une faible pluie pourrait suffire sur un sol argileux.

7.5. Proposition du nouveau modèle

Partant de l'apport de Basedow sur les conditions de développement de *C. tritici* et tenant compte des observations enregistrées tant au champ qu'en conditions contrôlées au cours de notre étude, un nouveau modèle prévisionnel de l'émergence de la cécidomyie orange du blé peut être proposé.

En Europe du Nord, les besoins en froid sont toujours satisfaits (Oakley et al. 1998). Ils ne sont donc pas pris en considération dans la construction du modèle. Le point de départ de ce dernier est fixé au 1^{er} janvier. Cette date ne représente aucune réalité biologique, sinon qu'elle se situe au cœur de l'hiver. A partir de cette époque, une capitalisation de 250 à 281 DJ en base 3°C (Sections 7.2.1 et 7.4.2), suivie d'une période humide (Section 7.2.2), serait nécessaire pour permettre aux larves de quitter leur cocon. Le déplacement des larves vers la surface du sol et la période d'attente de la pluie inductrice de la nymphose, constitueraient une phase de durée variable. Cette phase prendrait fin lorsque la température du sol atteindrait 13°C (Sections 7.2.3 et 7.4.1). A partir de ce moment, la première pluie survenant, ou "pluie inductrice", enclencherait la seconde phase température-dépendante qui amènerait les insectes au stade adulte en 160 DJ en base 7°C (Section 7.3). Le modèle proposé est schématisé à la figure 39.

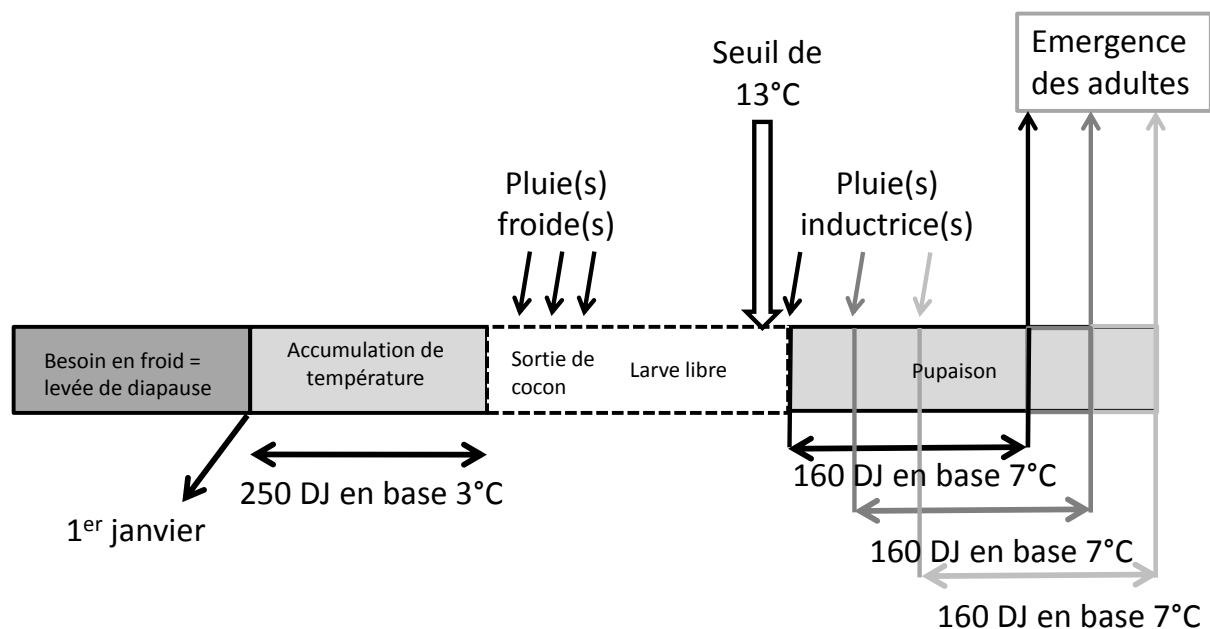


Figure 38 : schéma du modèle proposé

L'application de ce modèle aux conditions météorologiques enregistrées de 2007 à 2010 à Gembloux montre une précision de la prévision de l'ordre d'1 à 2 jours (Tableau 30). Le modèle pourrait être affiné par de nouvelles données, permettant de le valider pleinement pour nos régions,

mais aussi d'en connaître l'applicabilité dans des contextes climatiques différents. La relation pluie inductrice-émergence, quant à elle, est clairement établie.

Tableau 30 : pertinence du modèle proposé

Année	1 ^{er} janvier + 250 DJ en base 3°C	13°C	Pluie inductrice	160 DJ en base 7°C (émergence calculée)	Emergence observée	Ecart entre prévision et émergence observée (jour)
2007	6 mars	12 avril	7 mai	30 mai	1 juin	(-)2
2008	29 mars	26 avril	23 avril	15 mai	14 mai	1
	29 mars	26 avril	29 avril	21 mai	22 mai	(-)1
	29 mars	26 avril	15 mai	3 juin	1 juin	2
2009	14 avril	15 avril	17 avril	21 mai	20 mai	1
	14 avril	15 avril	26 avril	24 mai	24 mai	0
	14 avril	15 avril	11 mai	1 juin	1 juin	0
2010	16 avril	25 avril	25 avril	2 juin	2 juin	0
	16 avril	25 avril	2 mai	6 juin	5 juin	1
	16 avril	25 avril	11 mai	7 juin	8-juin	(-)1
	16 avril	25 avril	26 mai	15 juin	14 juin	1
	16 avril	25 avril	30 mai	18 juin	17 juin	1
	16 avril	25 avril	6 juin	25 juin	25 juin	0
	16 avril	25 avril	10 juin	28 juin	28 juin	0
				Moyenne (jours)		0,8

7.6. Améliorations possibles de la précision du modèle

Dans l'optique d'une utilisation agronomique du modèle prévisionnel, il faut rester attentif à l'imprécision induite par l'utilisation des températures moyennes de l'air comme valeurs approchées des températures perçues par l'insecte dans le sol. La précision est affectée à la fois par l'écart entre les températures de l'air et du sol (McMaster et Wilhelm 1998) ainsi que par l'approximation de la moyenne introduite dans le calcul des sommes de températures (Herms 2004).

7.6.1. Température de l'air et température du sol

Le but de cette expérimentation était de comparer les SDT mesurées, d'une part dans l'air à 1,5 m sous abris et, d'autre part dans le sol, à 1 cm de profondeur, au cours d'une période séparant pluie inductrice et émergence induite.

a) Matériel et méthode

L'utilisation des ThermoPuce® a déjà été détaillée Section 7.2.1. Pour cette discussion, ce sont les mesures obtenues en 2009 dans les champs 60 et 54 emblavés respectivement en froment et en betterave qui ont été utilisées. Les mesures de température de l'air sous abri proviennent de la station IRM d'Ernage.

Les mesures de température moyenne de l'air ont été comparées à celles recueillies dans le sol à 1 cm de profondeur. Les mesures concernées couvraient la période du 17 avril au 21 mai 2009 séparant la première pluie inductrice et la vague d'émergence associée.

Les calculs des SDT ont été réalisés selon la formule classique :

$$SDT \text{ en base } 7^{\circ}\text{C} = \sum_{n=17 \text{ avril}}^{20 \text{ mai}} \left(\frac{T^{\circ}\text{max journalière} + T^{\circ}\text{min journalière}}{2} \right) - 7$$

Valable si $((T^{\circ}\text{max} + T^{\circ}\text{min})/2) > 7$, sinon on considère 0 pour le jour concerné

b) Résultats et discussion

Tous les calculs présentés précédemment, étaient basés sur des températures de l'air alors que la température réellement ressentie par les larves est la température du sol. Les températures de l'air ont été préférées à celles du sol car, dans la pratique, ce sont les seules disponibles pour la majorité des stations. Cependant à l'avenir, si les bases d'information sur les températures du sol se généralisaient, le modèle gagnerait en précision en utilisant ces données.

Au cours de la saison 2009, sur la période qui fut nécessaire à la pupaison, c'est-à-dire du 17 avril au 21 mai (non compris), la SDT en base 7°C calculée sur base des températures moyennes de l'air, a été de 167 DJ. Au niveau du sol, à 1 cm de profondeur et pour la même période, cette somme a été de 227 DJ pour les champs de betterave et maïs soit 60 DJ en base 7°C supplémentaires, ce qui équivaut à un écart de 27 %.

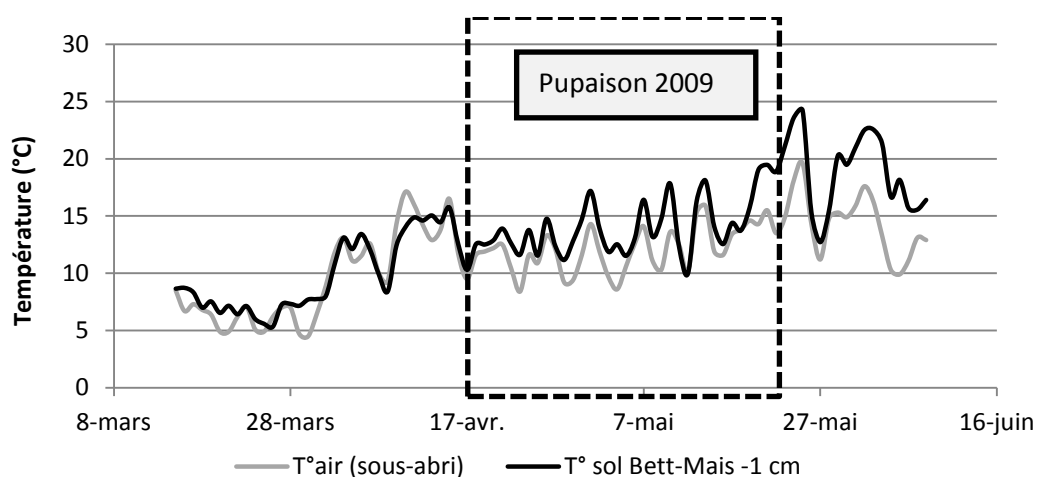


Figure 39 : T° moy de l'air et T° moy du sol

Cet écart entre la T°air et la T°sol est important. Sa valeur oscille également en fonction des cultures en place et des couverts. Figure 41, on peut constater que pour la saison concernée, les champs sans ou à très faible couvert (betterave) se réchauffent davantage que ceux portant des céréales⁴⁷.

⁴⁷ Cette constatation est vraisemblablement une des raisons -sinon la principale- du décalage observé entre le début des émergences pour les différentes cultures présentées Section 5.2.1.

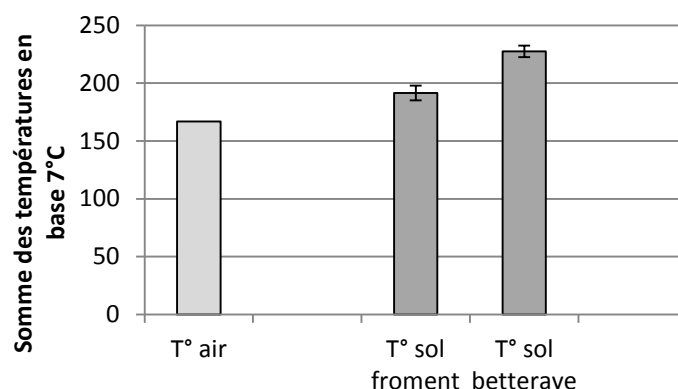


Figure 40 : écart entre la SDT comptabilisée durant la pupaison selon les températures de l'air ou du sol
 La SDT a été calculée entre le 17 avril et le 20 mai 2009 inclus. Les mesures du sol ont été effectuées à 1 cm de profondeur par deux ThermoPuces® par champ (les barres d'erreur indiquent les valeurs maximales et minimales).

Un modèle basé sur les températures du sol aurait l'avantage de prévoir les émergences à partir des différentes cultures et non plus seulement les premières émergences provenant des champs les plus chauds, en l'occurrence, les champs de maïs et de betterave.

7.6.2. Optimisation du calcul des sommes de température

Une autre source possible d'imprécision du modèle, est que les températures moyennes journalières sont obtenues par le calcul de la moyenne entre la température maximale et la température minimale. Cette méthode courante est un raccourci que nous avons dû emprunter afin de pouvoir utiliser des données météorologiques de différentes stations et de plusieurs années. Le fait de disposer d'enregistreurs de température pouvant prendre de nombreuses mesures par jour, permettait d'affiner les SDT nécessaires.

a) Matériel et méthode

Cette expérimentation se base sur le même jeu de données que celui présenté à la section 7.6.1. Deux ThermoPuces® placées dans le champ de betterave 54, ont été paramétrées de manière à enregistrer la température 36 fois par jour, soit une mesure toutes les 40 minutes. Les températures maximum et minimum utilisées par la méthode classique de calcul des SDT provenaient également de ce jeu de données. Pour les calculs, les données retenues concernaient la période du 17 avril au 20 mai 2009, soit la durée vraisemblable de la pupaison. Celle-ci se déroulant à proximité directe de la surface du sol, les enregistreurs de température étaient placés à 1 cm de profondeur.

Les SDT calculées selon l'une et l'autre méthode correspondaient aux formules suivantes :

$$SDT \text{ en base } 7^{\circ}C = \sum_{n=17 \text{ avril}}^{20 \text{ mai}} \left(\frac{T^{\circ}max \text{ journalière} + T^{\circ}min \text{ journalière}}{2} \right) - 7$$

Valable si $((T^{\circ}max + T^{\circ}min)/2) > 7$, sinon on considère 0 pour le jour concerné

$$SDT \text{ en base } 7^{\circ}\text{C} = \sum_{n=17 \text{ avril}}^{20 \text{ mai}} \sum_{i=1}^{36 \text{ mesures}} \frac{(T^{\circ} \text{ mesurée} - 7)}{36}$$

Valable si ($T^{\circ} \text{ mesurée} > 7$), sinon on considère 0 pour la mesure concernée

b) Résultats et discussion

La comparaison des deux méthodes montre des SDT très différentes (Figure 42). Au niveau de l'écart quotidien, la valeur est généralement faible. Cependant comme le calcul des SDT implique un cumul de ces écarts, l'écart total peut être conséquent.

En réalité, trois améliorations se combinent dans la nouvelle approche proposée. La première est une meilleure précision de la valeur moyenne de température grâce au calcul basé sur 36 mesures plutôt que sur 2 mesures. La seconde est le rejet possible des valeurs inférieures à la température de base, pour chacune des mesures recueillies. Et la troisième est la valorisation des températures supérieures à 7°C les jours où la température moyenne est inférieure à cette base. Au cours de la période concernée en 2009, seule la première amélioration a influencé significativement les SDT calculées, les mesures de températures inférieures à 7°C ayant été très peu fréquentes. Les SDT obtenues, d'une part par la méthode classique $((T^{\circ}\text{max}+T^{\circ}\text{min})/2)$ et, d'autre part par la méthode améliorée (36 mesures/jour) furent respectivement de 230 et 207 DJ en base 7°C. Les composantes journalières du calcul de la SDT améliorée se sont avérées inférieures à celles obtenues par l'approche classique pour 27 jours sur 34 (Figure 42).

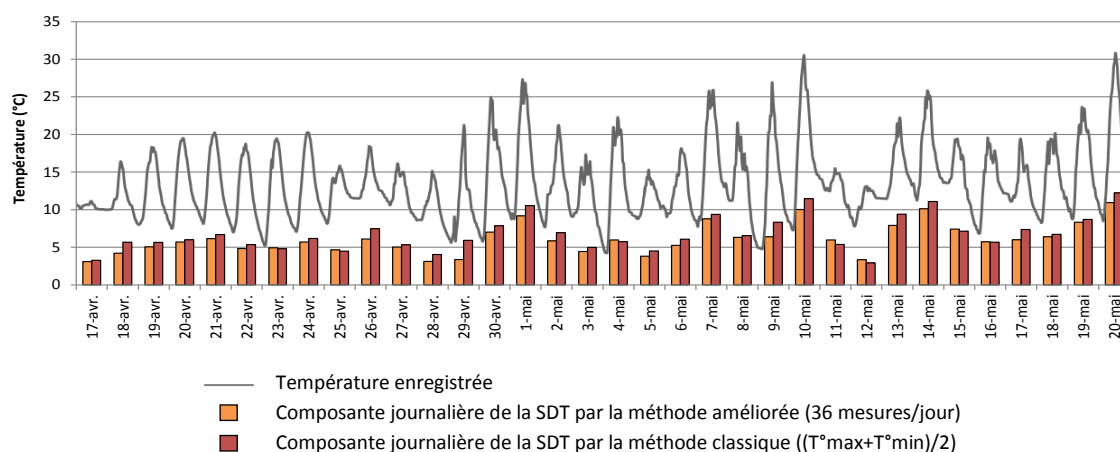


Figure 41 : écart entre les composantes des SDT obtenues par deux méthodes de calcul.

Les valeurs prises en compte ont été relevées entre le 17 avril et le 20 mai 2009 inclus. Deux ThermoPuces® par champ ont été utilisées.

La méthode améliorée est plus proche de la réalité car elle ne tient pas compte de ces heures passées sous les 7°C, et se révèle moins sensible aux pics de température qui surviennent de façon brève lors des journées ensoleillées. C'est vraisemblablement ce dernier élément qui explique que l'écart moyen entre les 2 approches est de 10 % supérieur pour la méthode classique. En 2009, la SDT calculée classiquement est donc une surestimation de la SDT réellement subie par l'insecte. Pour les

7 jours où les valeurs obtenues par la méthode classique ont été inférieures à celles obtenues par la méthode à 36 mesures, la sous-estimation peut s'expliquer par la prise en compte des valeurs inférieures à la température de base dans le calcul de la moyenne journalière (3 avril et 4 mai) ainsi que par une forte nébulosité (11, 12 et 15 mai), vraisemblablement responsable des faibles valeurs maximum enregistrées. Même si la surestimation de 10 % n'est prouvée que pour l'année 2009, cette valeur est vraisemblablement assez fréquente lors des périodes de pupaison (avril-mai-juin) durant lesquelles les températures inférieures à 7°C ne sont pas les plus courantes.

Dans cet exemple, la SDT en base 7°C réellement subie par les pupes est surestimée par la méthode classique (+10 %). Ceci contrebalance légèrement la différence inverse présentée à la section précédente (différence température air/sol). En additionnant les erreurs induites par la mesure des SDT en base 7°C de l'air (-27 %) calculée selon la méthode classique, on obtient dès lors, une erreur globale de "-17 %". La SDT estimée de 160 DJ en base 7°C nécessaire à la pupaison est donc inférieure de 17% à ce que les pupes subissent réellement dans les premiers centimètres d'un champ de betterave.

Cette différence explique vraisemblablement pourquoi, en conditions contrôlées à température constante ($(T^{\circ}\text{max}+T^{\circ}\text{min})/2 = T^{\circ}(36 \text{ mesures})$ et $T^{\circ}\text{sol} = T^{\circ}\text{air}$), la SDT en base 7°C s'est révélée plus élevée que celle estimée au champ par la méthode classique. En moyenne, au laboratoire, les adultes émergent 190 DJ après l'arrosage (Jacquemin et al. 2014) soit une SDT en base 7°C supérieure de 18,75 % aux 160 DJ observés classiquement au champ.

7.7. Couplage de la prévision des émergences à la prévision des épiaisons

La modélisation du développement du froment a fait l'objet de nombreuses études (Weir et al. 1984; Kirby et al. 1985; Gate 1995). Différents types de modèles existent qui permettent de prévoir la date d'épiaison avec plus ou moins de précision. En partant du semis, ces modèles ne sont pas très pertinents car ils sont dépendants de nombreux facteurs difficilement prévisibles ou mesurables. La durée de vernalisation est notamment fonction des variétés, de la période de semis, de la photopériode et des températures. Cependant, à partir du stade "redressement" (stade 31, Tableau 5), le développement de la céréale devient directement fonction des températures (Gate 1995). Tout comme pour la cécidomyie orange, la durée de développement se résume alors à une période d'accumulation de température. Pour les froments, la température minimale de développement n'est pas 7°C mais 0°C ; le froment parvenant à se développer tant que les températures sont positives.

Lorsque survient la pluie inductrice, le nombre de degrés-jours restant avant l'émergence de *S. mosellana*, est de 160 DJ en base 7°C. Il est possible à ce moment, de déterminer le stade de développement précis de la culture et d'en estimer la date d'épiaison. En pratique, il s'agit de faire une coupe longitudinale de la tige et d'en dégager les feuilles non encore dégainées, afin de les compter. Une notation décimale est possible pour la feuille en cours d'apparition (0,1 pour le sommet du limbe pointant, 1 pour la ligule visible). Le nombre de feuilles restant à sortir est multiplié par le phyllotherme, c'est-à-dire la durée thermique (SDT généralement en base 0°C) séparant l'apparition de deux feuilles successives. Ce phyllotherme varie légèrement avec les variétés mais est généralement équivalent à 100 DJ en base 0°C pour le froment (Figure 43). Pour obtenir la date

d'épiaison, il faut encore ajouter l'équivalent d'un phyllotherme pour tenir compte de l'écart entre l'apparition de la ligule de la dernière feuille et la sortie de l'épi.

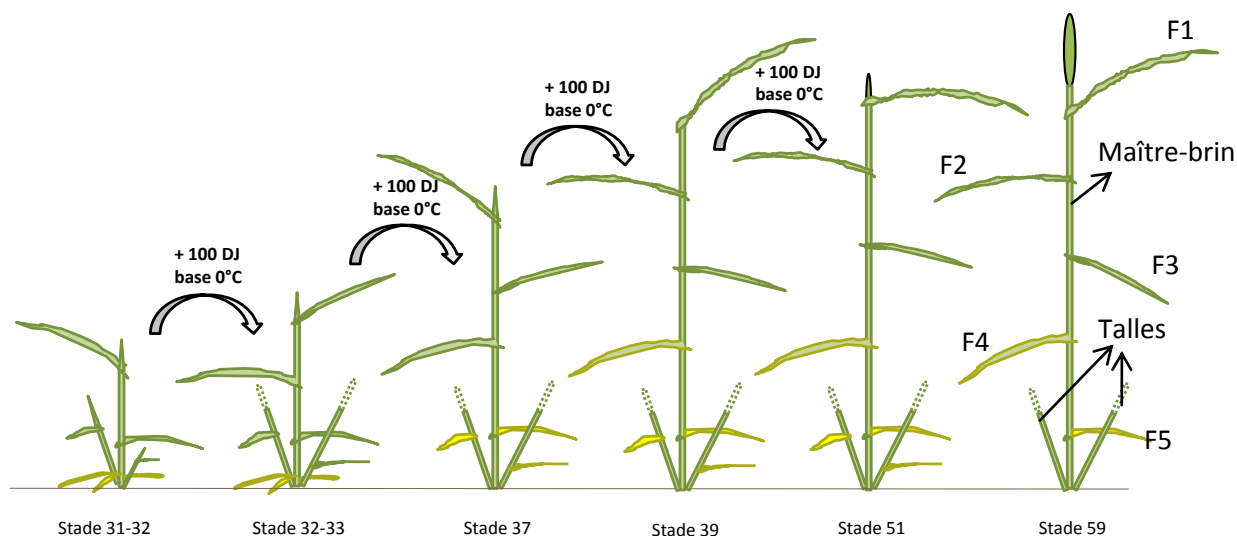


Figure 42 : évolution des stades de développement du froment en fonction des SDT

Deux exemples illustrent cette méthode :

Exemple 1 : en 2011, la pluie inductrice est tombée le 30 mars. A cette date, la majorité des froments étaient au stade 29-31⁴⁸, c'est à dire fin tallage-début redressement. Il restait encore 4-5 feuilles à sortir sans compter l'épi :

soit $(4,5 \times 100 \text{ DJ}) + 100 \text{ DJ} = 550 \text{ DJ}$ en base 0°C.

Cette année-là, l'épiaison a débuté le 12 mai, soit 20 jours après les premières émergences des cécidomyies. Comme prévu, il n'y a eu pas de coïncidence et les infestations des épis furent anecdotiques.

Exemple 2 : en 2012, la pluie inductrice est survenue le 28 avril, les froments étaient en plein redressement (stade 32-33), et en moyenne la F3⁴⁹ était aux deux tiers sortie. Il restait donc 2,3 feuilles à sortir ainsi que l'épi :

Soit $(2,3 \times 100 \text{ DJ}) + 100 \text{ DJ} = 330 \text{ DJ}$ en base 0°C.

Cette année-là, l'épiaison a débuté le 23 mai (320 DJ en base 0°C) soit un jour avant le début des émergences de la cécidomyie orange, offrant une excellente coïncidence favorable à la multiplication de l'insecte.

Rétrospectivement, si on compare les SDT obtenues en base 0°C sur les périodes séparant la première pluie inductrice de la première vague d'émergence de 2007 à 2012, on obtient des valeurs comprises entre 300 et 400 DJ en base 0°C (Tableau 31). Pour l'année 2010, la valeur est supérieure aux autres années car la période concernée a été très froide et dans ces conditions, la vitesse de

⁴⁸ Un récapitulatif du développement du froment et de l'échelle BBCH est présenté Tableau 5 (Chapitre 2).

⁴⁹ F3 = la 3^{ème} feuille en partant du haut de la plante lorsque toutes les feuilles sont visibles.

développement des céréales est proportionnellement plus rapide que celle des *S. mosellana* (cf. les bases de développement).

Tableau 31 : SDT séparant la première période pluie inductrice de la première vague d'émergence

Année	Somme de température	
	DJ en base 7°C	DJ en base 0°C
2007	174	362
2008	154	307
2009	158	396
2010	162	420
2011	163	345
2012	153	341

En anticipant 300-400 DJ en base 0°C sur l'épiaison, on peut donc dire que si la pluie inductrice survient lorsque la F3 est en train de sortir de la gaine (stade 31-33), le risque de coïncidence est élevé. Si, par contre, au moment de la pluie, les céréales n'ont pas atteint le stade 31 (1^{er} nœud), ou au contraire ont dépassé le stade 37 (dernière feuille pointante) le risque de coïncidence est très faible. La prévision, d'abord incertaine, se précise au fil des jours avec le remplacement progressif des températures estimées par les températures observées.

7.8. Extension de l'utilisation du modèle prévisionnel des émergences

7.8.1. Extension à d'autres populations de *S. mosellana*

Des capacités d'adaptation de *S. mosellana* ont déjà été mises en évidence au sein de populations du nord de l'Allemagne, vivant dans des zones entièrement dévolues à la production de seigle. En effet, les populations de cette région se sont montrées nettement plus précoces que celles établies dans des zones où prédomine la culture du froment dont l'épiaison est plus tardive (Basedow 1972). En Finlande également, les populations les plus septentrionales se sont particulièrement bien adaptées au climat et à l'orge qui y est la culture dominante (Kurppa 1989). Un troisième indice de cette forte faculté d'adaptation est l'ubiquité de la cécidomyie orange, dans l'ensemble de l'hémisphère Nord. On la retrouve dans des environnements climatiques et agronomiques très variés, ce qui ne paraît pas possible sans plasticité phénologique.

Le modèle prévisionnel de l'émergence proposé dans ce chapitre, n'est peut-être pas applicable à toutes les conditions. Si les éléments-clefs du développement sont sans doute bien conservés au niveau de l'espèce, le paramétrage du modèle n'est peut-être valable que pour les conditions rencontrées en Belgique et dans les zones limitrophes. Les paramètres du développement qui seraient susceptibles d'adaptation ne sont pas connus. On peut toutefois supposer que les valeurs requises pour les besoins en froid, et les SDT ainsi que la température-seuil, soient ajustables. Des études plus approfondies seraient nécessaires pour estimer "l'élasticité" du modèle.

7.8.2. Extension à d'autres espèces de cécidomyies

Dès lors que le modèle proposé convient pour *S. mosellana*, on en vient à se demander dans quelle mesure, il ne pourrait pas s'appliquer à d'autres espèces de cécidomyies. Une réinterprétation des travaux de Basedow (1977a) nous permet de penser que l'émergence de la cécidomyie jaune du

blé, *Contarinia tritici* serait, elle aussi, induite par une pluie et que la période de pupaison correspondrait à une SDT constante.

L'objectif de l'expérience constituant le 5^{ème} chapitre de l'ouvrage de Basedow (1977a) était de montrer que le développement de *C. tritici* et de *S. mosellana* comprenait deux phases (dépendantes de la température) séparées entre elles par une période pour laquelle l'humidité était requise. Cette période est, selon lui, nécessaire pour permettre aux larves de quitter leur cocon.

Des cocons avaient été récoltés et extraits à l'automne 1972. Ils avaient ensuite été répartis en sept séries de 1.000 cocons dans des bacs en plastique remplis de terre agricole stérilisée et couverte d'une fine couche de sable pour éviter la formation d'une croûte de terre. Chacune des séries avait été conservée dans une serre non chauffée jusqu'au 14 février 1973. A partir de cette date, les séries ont été soumises à un régime quotidien de température de 25°C pendant 8h et de 15°C pendant 16h. En outre, les séries ont été successivement arrosées à raison d'une série par semaine, d'une quantité d'eau permettant d'atteindre 50 % de la capacité au champ. Durant toutes les semaines suivant l'arrosage initial, ce niveau fut maintenu par des arrosages d'entretien.

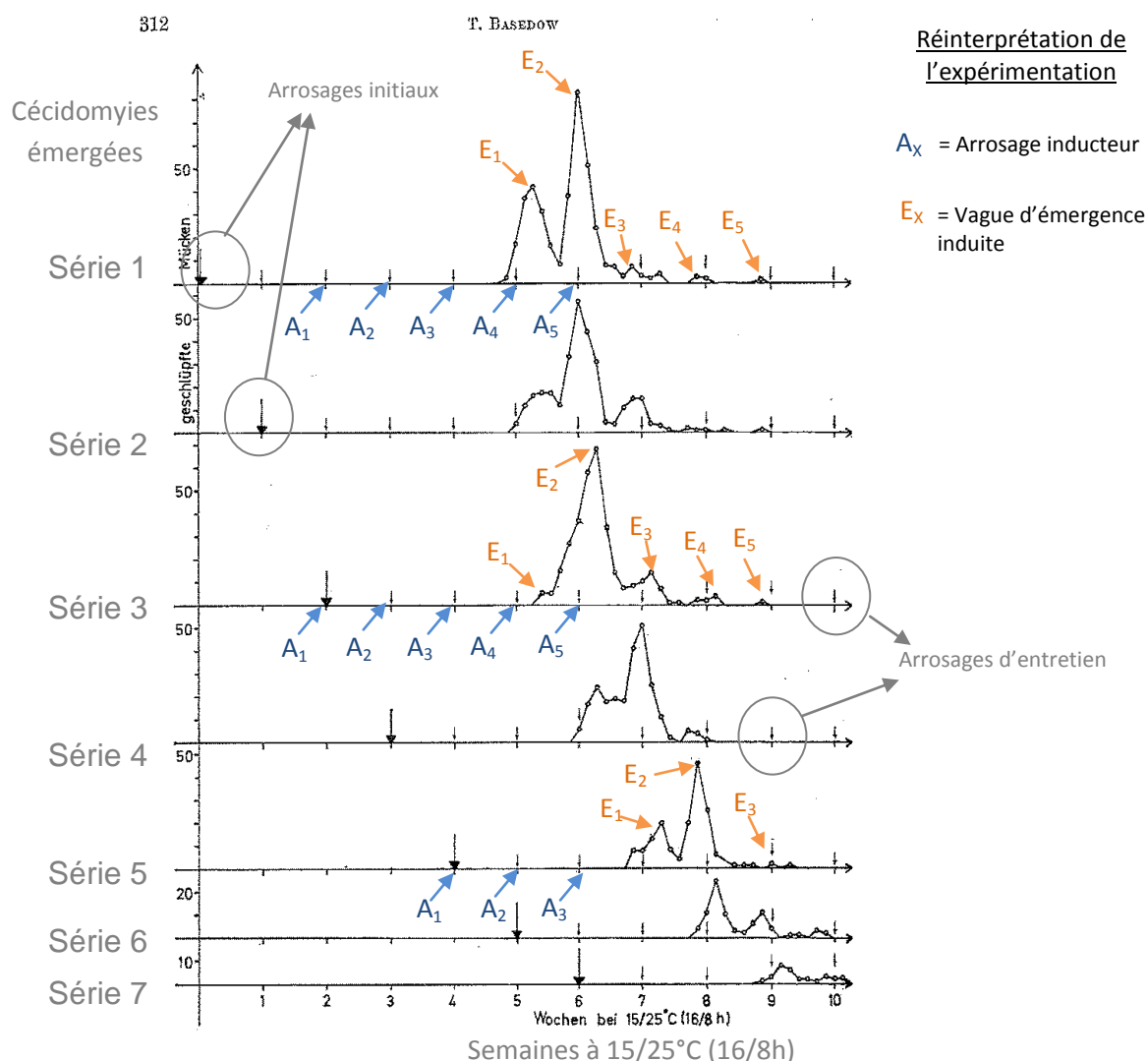


Figure 43 : relecture des résultats sur le déclenchement de l'émergence chez *C. tritici*

Le graphique initial de Basedow (1977a) est en noir, les traductions et descriptions du graphique en gris et, la réinterprétation en couleur.

Les graphiques présentés à la figure 44 montrent pour chaque série de *C. tritici*, l'évolution du nombre d'émergences sur 1.000 individus. Basedow note que "pour les trois premières séries, l'évolution est similaire et que le moment d'arrosage n'a pas d'effet sur la date de l'émergence". Il en conclut que "les deux premières séries n'ont pas émergé plus tôt parce qu'elles n'avaient pas capitalisé assez de chaleur pour sortir de leur cocon". Il note également que "pour les quatre autres séries, les courbes se sont déplacées chacune d'une semaine, suivant le moment d'humectation".

Sur les graphiques de Basedow, figurent les patterns d'émergences obtenus pour chaque série. Chacun de ces patterns comporte au minimum deux pics d'émergence. Ces deuxième et troisième pics ne sont vraisemblablement pas provoqués uniquement par l'arrosage initial comme le pensait Basedow mais pourraient plus vraisemblablement être la conséquence des appoints d'eau réalisés chaque semaine.

On remarque que la durée séparant l'arrosage du pic d'émergence est fixe⁵⁰ et comme la température moyenne l'est également, la SDT est une constante comme dans le modèle proposé pour *S. mosellana*. Dans l'exemple de Basedow, cette constante vaudrait 21 jours à 18°C de moyenne soit 231 DJ en base 7°C. Cette valeur est plus élevée que celle obtenue pour les cécidomyies orange (190 DJ en base 7°C). A la section 7.2.1, il a été démontré que les températures supérieures à 20°C n'étaient pas entièrement valorisées par *S. mosellana*. C'est peut être également le cas pour *C. tritici*. Ceci pourrait expliquer une partie de l'écart entre les deux constantes.

Une raison pour laquelle le modèle de Basedow diffère du nôtre, résulte de l'absence de considération d'une phase libre pour les larves. Cette lacune est explicable car dans les expériences en conditions contrôlées, les températures utilisées sont supérieures à 13°C. Dans ce cas, il n'y a pas de pluies "froides" et la pupaison s'enclenche dès la sortie du cocon.

Ces dernières années, les populations de cécidomyie jaune du blé sont trop faibles dans nos régions pour pouvoir être étudiées mais d'autres cécidomyies pourraient vraisemblablement, elles aussi, suivre un modèle similaire.

7.9. Conclusion

Des observations, mais aussi des essais spécifiques, ont permis de vérifier le bien-fondé de plusieurs composantes des modèles prévisionnels de Basedow et d'Oakley. Parmi ceux-ci, la SDT indispensable à la sortie de cocons et le seuil de 13°C nécessaire à l'enclenchement de la pupaison, se sont révélés deux éléments-clefs du développement de *S. mosellana*. La mise en évidence de la relation "pluie inductrice-émergence" constitue une 3^{ème} pièce du puzzle.

Le modèle a été élaboré en 2009 sur base de trois saisons d'observation. Sa pertinence s'est vue confirmée depuis, par quatre années supplémentaires (2010, 2011, 2012 et 2013) ainsi que par

⁵⁰ Le premier pic de chaque série est plus faible, plus tardif et moins net que le deuxième. Ceci s'explique par le fait que lors des premiers arrosages, au vu des conditions d'élevage, les larves étaient encore dans leur cocon et peut-être situées à des profondeurs variables. La durée nécessaire pour sortir du cocon pouvait donc varier. De plus, il est probable que pour la plupart des larves, le premier arrosage n'ait permis que de sortir du cocon, il a fallu attendre le deuxième arrosage pour enclencher la pupaison.

plusieurs essais en conditions contrôlées, au cours desquels les pluies simulées par des arrosages ont permis de provoquer et même de planifier des émergences (Jacquemin et al. 2014). Les prévisions issues du modèle sont d'ores et déjà utilisées en Wallonie par les systèmes d'avertissement à destination des agriculteurs (CADCO).

Les améliorations proposées concernant la prise en considération des températures du sol et d'une mesure plus précise des degrés-jours, devraient permettre d'accroître la précision du modèle particulièrement dans les régions de Belgique où la relation sol-température diffère de celle de Gembloux.

Le couplage du modèle prévisionnel des émergences avec celui de l'épiaison des froments devrait permettre d'anticiper les coïncidences dangereuses avec plusieurs semaines d'avance. Cette faculté permettra également d'ajuster les avertissements à la diversité des situations régionales et culturelles (dates de semis, variétés, etc.).

L'extension du modèle est envisageable à d'autres régions du monde moyennant un ajustement des paramètres quantitatifs. De même, les composantes du modèle, développées pour *S. mosellana*, sont vraisemblablement d'application pour d'autres espèces de cécidomyies, voire éventuellement pour certaines espèces appartenant à d'autres familles d'insectes.

Chapitre 8 :

Dégâts de cécidomyie orange du blé : fréquence et ampleur



Le chapitre 8 traite des éléments constitutifs du dégât. En utilisant les données de plusieurs années d'observation, il précise le portrait du ravageur en termes de fréquence et d'ampleur des dégâts en Wallonie.

8.1. Contexte et objectifs

Dans plusieurs pays d'Europe occidentale, la cécidomyie orange fait l'objet d'avertissements spécifiques à destination des céréaliers. Au Royaume-Uni, les dégâts ont été tels en 1993 et 2004 que la crainte de nouvelles attaques a entraîné, au cours des dernières années, l'application systématique d'insecticides sur des centaines de milliers d'hectares. Ce comportement irrationnel a été qualifié de "orange wheat blossom midge hysteria" par certains observateurs, ironisant à propos du battage médiatique qui, à ces occasions, accompagnait les recommandations de traitements insecticides au point d'instituer la "national chlorpyrifos⁵¹ week" (Abram 2008). En dehors de situations extrêmes où les pertes de rendement peuvent atteindre plusieurs dizaines de pourcents, les renseignements quant à la fréquence et à l'ampleur des dégâts dus à la cécidomyie orange, sont peu nombreux. Cette rareté trahit la difficulté de détecter les attaques de ce ravageur particulièrement discret et de quantifier les pertes de rendement qui lui sont attribuables.

A la section 8.2, les données de six années d'observation sont analysées afin de déterminer la fréquence des coïncidences des émergences de *S. mosellana* avec la phase vulnérable du développement des froments. Les résultats sont comparés à une autre étude de longue durée, menée en Allemagne au cours des années septante.

Les coïncidences concernent globalement une année sur deux. Cependant, les années dommageables pour les cultures sont moins fréquentes. La raison en est que la présence des femelles à l'épiaison, bien que nécessaire, n'est pas toujours suffisante pour conduire à l'infestation des épis. Cette distinction fait l'objet de la section 8.3.

L'impact de la cécidomyie orange sur le rendement est généralement estimé en mesurant la différence de rendement entre parcelles traitées ou non traitées à l'insecticide au tout début de la phase vulnérable. Parallèlement, le niveau d'attaque est mesuré par le nombre de larves formées dans les épis. En mettant ces deux données en relation, plusieurs auteurs ont déterminé des niveaux de perte de rendement, en kg/ha ou en pourcents, équivalents à une larve formée par épi. Une expérimentation de ce type conduite par Oakley et al. (1998) permet une estimation de dégâts de 68 kg/ha pour une infestation d'une larve/épi. Dans un essai mené en France, des niveaux d'attaque de 3 à 10 larves/épi, (Rouillon et al. 2006) correspondent à des pertes de rendement de respectivement 300 kg/ha et 800kg/ha, soit environ 100 kg de perte pour une larve/épi. Une dizaine d'autres essais ont été mis en place sans aboutir à des résultats probants : lorsque les niveaux d'infestation des épis étaient suffisants, la présence abondante de pucerons a rendu impossible toute mesure de la perte de rendement réellement imputable à *S. mosellana* (Oakley et al. 2005).

Dans le cadre de notre étude, plusieurs essais de ce type ont été mis en place et un d'entre eux a permis de se faire une idée plus précise de la nocivité de la cécidomyie orange (Section 8.4).

Deux études ont tenté d'estimer les pertes de rendement de manière plus théorique. Ces études ont été menées d'une part au Royaume-Uni par Barnes (1956) et plus récemment au Canada par Olfert et al. (1985). Ces études cherchaient à établir une relation entre le niveau d'infestation des épis et le pourcentage de grains endommagés. Les deux études ont été réalisées dans des conditions

⁵¹ Le chlorpyrifos-éthyl est la matière active de l'insecticide le plus utilisé contre la cécidomyie au Royaume-Uni, le Dursban®.

d'expérimentation très contrastées : la première a été réalisée sur un seul champ suivi durant une période de 27 ans avec des niveaux d'infestation moyens (moy = 4,6 larves/épi, max = 12,1 larves/épi), et la seconde sur une seule année mais avec 79 champs aux niveaux d'infestation nettement plus élevés (moy = 33 larves/épi, max = 134 larves/épi). L'étude britannique portait sur une monoculture perpétuelle de froment d'hiver et la canadienne sur du froment de printemps. Malgré ces différences, les résultats sont assez concordants, du moins pour les niveaux d'infestation inférieurs à 10 larves/épi (Figure 45). Une larve/épi semble correspondre à un peu moins de 2 % de grains endommagés. Les deux modèles divergent pour des niveaux élevés d'infestation, ce qui peut s'expliquer par le fait que l'étude de Barnes n'a jamais été confrontée à des infestations supérieures à 12 larves/épi.



Photo 30 : comparaison de grains sains et de grains endommagés par des larves de *S. mosellana* (auteur : Elliott et al. 2011)

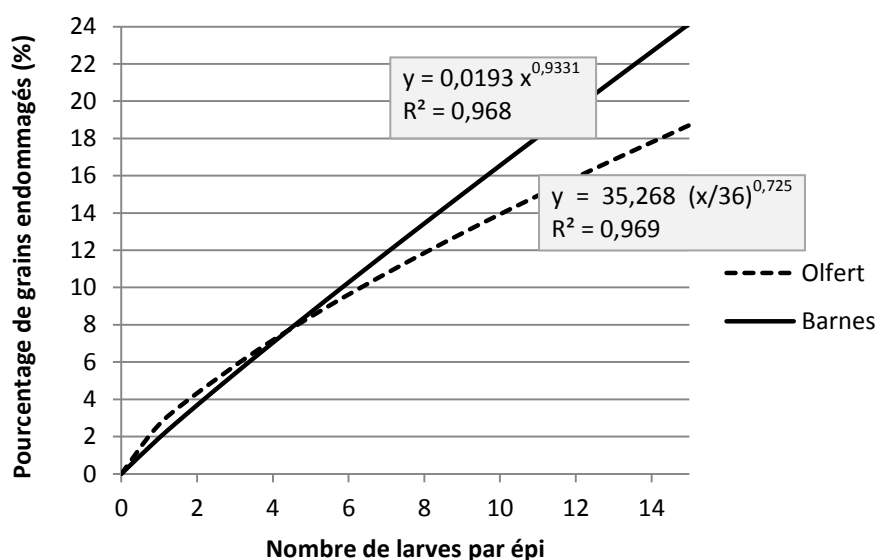


Figure 44 : relation entre niveau d'infestation des épis et dégâts en termes de proportion de grains attequés

Pour parvenir à estimer les pertes en rendement à partir du pourcentage de grains endommagés, il reste un facteur difficile à estimer qui prendrait en compte le nombre de grains par épi, ainsi que le poids résiduel des grains endommagés. Une étude de Lamb et al. (1999) montre que

le poids résiduel d'un grain attaqué dépend de manière logique du nombre de larves qui s'en sont nourris mais peut globalement être estimé à 38 % du grain intact. Cette valeur n'est pas directement transposable à nos variétés, ni à nos conditions de culture⁵². Cependant, Lamb et al. (1999) semblent également démontrer que l'infestation d'un grain n'a pas d'effet sur le développement des autres grains, ni de manière positive (compensation), ni de manière négative (action collatérale). La perte de rendement occasionnée ne peut donc être supérieure au pourcentage de grains attaqués. Sur la figure 45, la droite de Barnes représente donc également la perte de rendement maximum en fonction du nombre de larves/épi. Puisque le poids des grains endommagés n'est globalement pas négligeable, la valeur réelle de la perte est donc inférieure à cette fonction. Elle ne doit cependant pas en être trop éloignée, vu la petite taille généralement observée des grains obtenus⁵³ (Photo 30). De manière globale, on revient comme pour les essais au champ, à une perte de rendement d'environ 1 % pour 1 larve/épi.

A défaut d'études spécifiques sur les pertes de rendement, une revue de la littérature permet au moins de cerner les niveaux d'attaque observés de par le monde (Tableau 32). Ces derniers sont renseignés en nombre de larves/épi. En Europe, les maxima observés sont généralement inférieurs à 20 larves/épi⁵⁴ tandis qu'en Amérique du Nord et en Asie, ils sont généralement supérieurs à 30 larves/épi.

Tableau 32 : exemples de niveaux élevés d'infestation

Pays	Années suivies	Année record	Type de froment	Champs / parcelle	Nombre de <i>S.m</i> par épi	Sources
Chine (Henan)	2012	2012	Hiver	Parcelle	150	Y-Q Wu (com. personnelle)
France	2009	2009	Hiver	Parcelles	13	Flodrops et Taupin 2010
Royaume-Uni	2005-2008	2008	Hiver	Champs	11	Ellis et al. 2009
Royaume-Uni	2002-2004	2002	Hiver	Parcelles	53 ⁵⁵	Oakley et al 2005
Canada (Manitoba)	2000-2002	2001	Printemps	Parcelles	41	Smith et al. 2004a
Canada (Manitoba)	1993-1997	1996	Printemps	Champs	33	Lamb et al. 1999
Royaume-Uni	1994-1995	1995	Hiver	Champs	16,4	Oakley et al. 1998
Suisse	1985-1989				7,4	Affolter 1990
Finlande	1985-1987	1987	Printemps	Champs	41	Kurppa 1989
Japon	1983-1985	1983			48	Katayama et al. 1987
Canada (Saskatchewan)	1983	1983	Printemps	Champs	134	Olfert et al. 1985
Allemagne	1970-1975	1975	Hiver	Champs	27	Basedow et Schütte, 1982
Hollande	1973	1973	Hiver	Champs	26,8	Nijveldt et Bokhorst 1973
Royaume-Uni	1927-1955	1931	Hiver	Champs	12,1	Barnes 1956

⁵² Les études canadiennes traitent de froment de printemps présentant 35-40 grains par épi, et un potentiel de rendement de 3.000 kg/ha. En Belgique, le nombre de grains par épi est généralement supérieur à 60, et les rendements moyens des froments d'hiver sont de 9.000 kg/ha.

⁵³ Dans la pratique, les grains fortement endommagés, devenus très légers passent à travers les grilles de la moissonneuse et retombent au sol avec les sons et la paille.

⁵⁴ A l'exception des infestations observées dans des parcelles d'essai de quelques mètres carrés, lesquelles auraient concentré les attaques (voir Section 9.2.2).

⁵⁵ Dans le texte original, il s'agit de 106 larves par 100 grains sur des épis contenant en moyenne 50 grains.

Le niveau d'infestation aurait même atteint des valeurs supérieures à 100 larves⁵⁶ par épi au Canada en 1983. Nombre de ces maxima concernent des froments de printemps. Aucune étude ne suggère une plus forte vulnérabilité des céréales de printemps comparativement aux céréales d'hiver, mais les zones où l'on cultive à la fois des froments de printemps et des froments d'hiver, offrent deux fois plus de chances aux cécidomyies orange de bénéficier d'une coïncidence favorable. De plus, en Amérique du Nord où la cécidomyie a été importée il y a deux siècles (Felt 1912; Olfert et al. 2009), le complexe des parasitoïdes est moins développé qu'en Europe et se résume au seul *Macroglènes penetrans*. Ces deux paramètres contribuent aux niveaux d'infestation élevés, observés au Canada et aux États-Unis.

8.2. Fréquence des coïncidences

L'étude des facteurs déterminant l'émergence a permis de mieux comprendre les raisons des réussites et des échecs de coïncidence entre les périodes de vols et les périodes de vulnérabilité du froment. Si les températures sont à la fois prises en compte par les insectes et les plantes hôtes, ce n'est pas le cas des pluies dont l'absence n'a généralement d'effet que sur l'insecte. En situation sèche, les racines des cultures permettent bien souvent d'aller chercher l'eau en profondeur. Les larves sont, elles, tributaires des pluies. Ce différentiel de besoins peut entraîner des décalages dans les développements respectifs du ravageur et de son hôte. Au cours des années 2007 à 2012, les émergences observées de *S. mosellana* ont été mises en relation avec le développement des cultures de froment et la fréquence des coïncidences a été comparée à celle rapportée par la littérature.

a) Matériel et méthodes

Le suivi des émergences de *S. mosellana* a été réalisé par capture aux pièges à phéromone comme détaillé Section 4.2. Les champs observés sont présentés au tableau 19.

L'évolution des stades de développement des froments a été contrôlée dans des essais officiels de l'OBEV⁵⁷ situés dans la région de Gembloux. Ces essais ont, chaque année, été semés en octobre et contiennent toujours des variétés dont la gamme de précocité est équivalente à celle des variétés cultivées en Belgique.

b) Résultats et discussion

Au cours des six années, tous les cas de figure se sont présentés : les cécidomyies sont arrivées trop tôt en 2011 pour qu'il y ait coïncidence, au moment opportun en 2008, 2009 et 2012, légèrement trop tard en 2010, et largement trop tard en 2007 (Figure 46).

⁵⁶ La valeur de 134 larves par épi est à prendre avec précautions car le nombre d'épis prélevés par champ dans cette étude était de 10. Cependant, le niveau d'infestation devait réellement être colossal cette année-là, car 6 des 79 champs échantillonnés présentaient plus de 100 larves/épi.

⁵⁷ L'OBEV est l'Office Belge d'Évaluation des Variétés. L'objectif de ces essais officiels est d'évaluer les aptitudes des éventuelles nouvelles variétés, en vue de se prononcer sur leur acceptation sur la liste nationale et donc sur l'octroi du droit à la commercialisation de ces variétés.

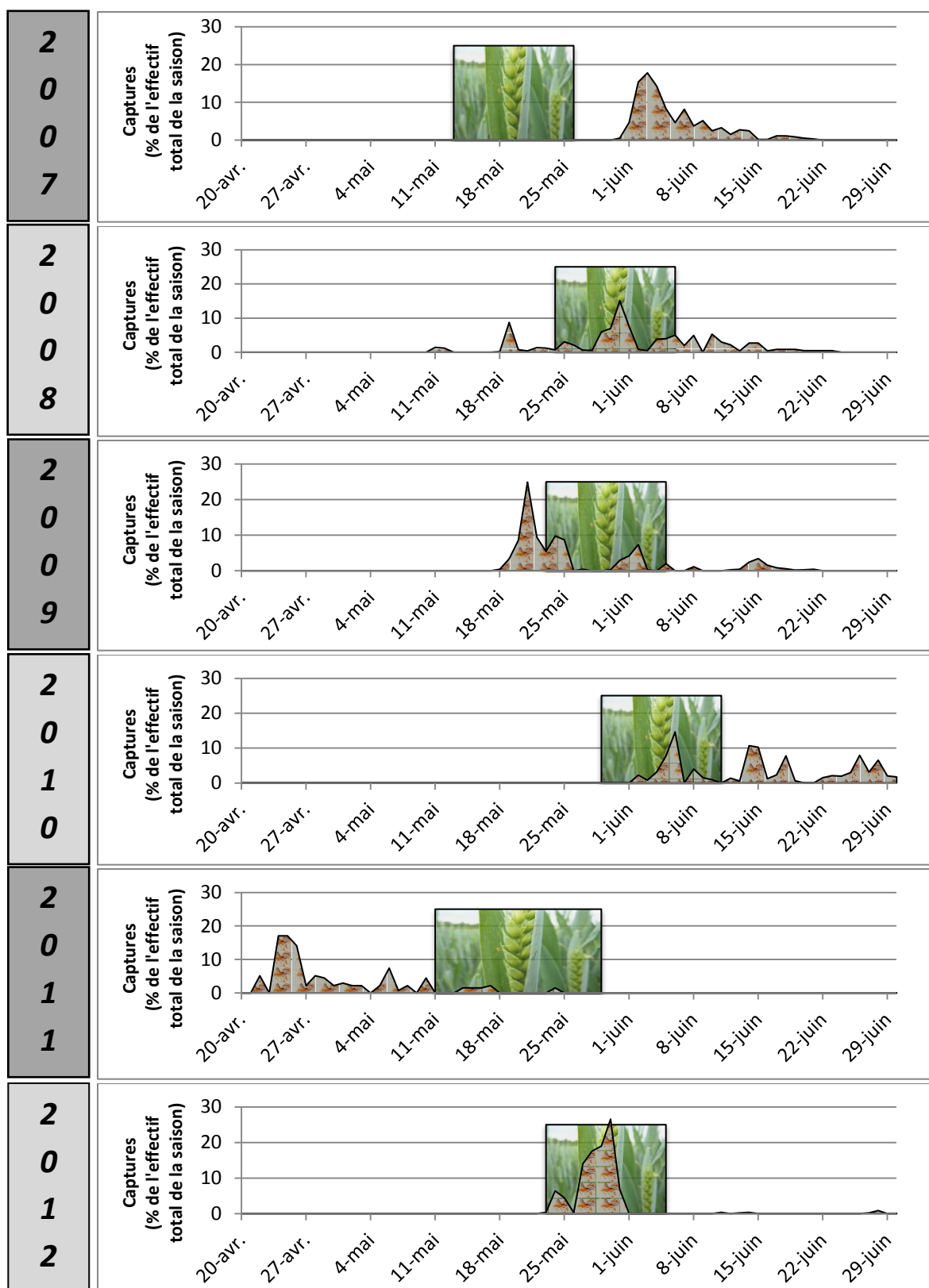


Figure 45 : comparaison des périodes de vol et des épiaisons des froments de 2007 à 2012
 Les courbes représentent les émergences révélées par les pièges à phéromone installés dans des "champs-sources" dépourvus de couvert. Les rectangles définissent la période allant du début de l'épiaison des variétés les plus précoces, à la fin de celle des plus tardives de l'essai variétal de Gembloux.

Pour deux années sur six (2007 et 2011), l'absence de coïncidence ne permit pas à la cécidomyie orange de se reproduire⁵⁸. En 2010, seuls les champs semés tardivement ainsi que les variétés tardives, ont été infestés. L'année 2009 est particulière car, bien que la coïncidence fut favorable, les cécidomyies n'eurent pas l'occasion de se multiplier abondamment à cause des mauvaises conditions météorologiques qui ont prévalu lors des vols (voir Section 8.3.1). Un scénario identique s'est produit en 1994 au Royaume-Uni, l'année qui a suivi les très fortes infestations de 1993 (Lunn et al. 1995; Oakley et al. 1998). Enfin, les années 2008 et 2012 furent favorables aux cécidomyies mais les infestations n'occasionnèrent pas de dégâts importants vu les faibles réserves de larves présentes dans le sol en début de saison.

Sur les six années de l'étude, trois ont rempli les conditions d'une bonne coïncidence. Ces résultats sont comparables à ceux de Basedow portant sur la période de 1970 à 1975 (Tableau 33) (Basedow et Gillich 1982). Au cours des six années, la proportion d'émergences ayant lieu durant la phase vulnérable des froments, varie fortement selon les années, et se situe en moyenne autour de 40 % dans ces deux études d'assez longue durée.

Tableau 33 : proportion des émergences ayant eu lieu durant les épiaisons pour les études allemandes et belges

Proportion d'émergence ayant eu lieu durant les épiaisons (%)							
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Moyenne
Allemagne 1970-1975	49	15	10	17	45	94	38
Belgique 2007-2012	0	57	41	35	8	96	40

La coïncidence, condition nécessaire à l'infestation des épis, n'est pas suffisante pour entraîner des dégâts sensibles. Pour cela, il faut, en outre, un niveau de population élevé en début de saison. Ceci implique donc que pour occasionner des dégâts aux cultures, une succession de deux années d'infestation minimum est requise. Ce ne fut pas le cas au cours des six années étudiées.

Il est très peu question du froment de printemps dans ce travail car en 2012, cette culture ne représentait que quelques centaines d'hectares en Belgique. L'épiaison des froments de printemps survient en Belgique entre deux et trois semaines après celle des froments d'hiver. Si cette culture avait été plus répandue, les cécidomyies auraient donc bénéficié d'une période de coïncidence plus longue en 2007 et 2011, soit deux années où il n'y eut pas de coïncidence avec les froments d'hiver. On comprend dès lors pourquoi les infestations de cécidomyie orange sont plus fréquentes et plus fortes dans les régions où les deux cultures cohabitent, comme c'est le cas notamment dans certaines régions du Canada.

⁵⁸ Il est à noter que la non-coïncidence de 2007 s'est également produite jusque dans le centre de l'Allemagne où, là aussi, les insectes sont arrivés bien après l'épiaison (Gaafar et Volkmar 2010). Plus globalement, on remarque que si les pluies sont souvent des phénomènes locaux, les larges anticyclones se maintiennent sur de bien plus vastes zones. Il y a, dès lors, de fortes probabilités d'observer des situations similaires en Europe lors d'années comme 2007 où c'est la sécheresse qui a déterminé l'absence de coïncidence. Ce cas explique sans doute pourquoi Barnes pensait que la dynamique des populations de *S. mosellana* était régulée à l'échelle de tout un continent (Barnes 1956).

8.3. Niveaux d'infestation des épis en situation de coïncidence

Malgré une coïncidence favorable entre les périodes de vols et les périodes vulnérables des céréales, il arrive assez fréquemment que les niveaux d'infestation des épis restent faibles. Cela peut se produire à l'échelle d'une année comme ce fut le cas en 2009, ou à l'échelle de parcelles, comme observé chaque année. Différentes hypothèses sont présentées ci-après.

8.3.1. Effet des conditions météorologiques sur les pontes

Les saisons 2008 et 2009 sont comparables du point de vue de leur niveau de coïncidence (Section 8.2) ; cependant les niveaux d'infestation des épis furent très différents (Figure 16). Elevés en 2008, ces niveaux sont restés faibles en 2009. Cette constatation est doublement interpellante, car 2009 suit une année à forte multiplication de la population. On aurait logiquement pu s'attendre à des niveaux d'infestation des épis, plus élevés qu'en 2008. Ces deux années montrent que coïncidence et infestation des épis ne sont pas directement liées. Ce faible niveau d'infestation des épis en 2009 tient aux mauvaises conditions météorologiques qui ont prévalu durant l'épiaison (Tableau 15). L'influence de la température et de l'humidité sur les vols a fait l'objet de la section 4.6. L'influence de ces facteurs est vraisemblablement transposable aux pontes. Si durant l'épiaison de 2008, 11 jours ont été favorables aux pontes, seuls 3 jours en 2009 ont permis des pontes abondantes (Tableau 34).

Tableau 34 : température et humidité relative de l'air à 20h les soirs de ponte de 2008 et 2009

Les soirées défavorables aux vols apparaissent en gris foncé, les soirées partiellement défavorables en gris clair (voir section 4.6).

2008		Date de coïncidence	2009	
Humidité relative (%)	Température (°C)		Humidité relative (%)	Température (°C)
		23-mai	55	20,1
71	11,7	24-mai	56	23,0
92	14,1	25-mai	66	25,1
81	17,1	26-mai	82	11,8
85	18,5	27-mai	82	11,5
97	17,4	28-mai	79	16,7
87	12,0	29-mai	38	18,0
99	14,4	30-mai	48	19,2
97	14,8	31-mai	61	19,9
90	15,0	1-juin	52	22,0
96	15,5	2-juin	50	19,3
99	16,4	3-juin	58	14,0
91	15,3	4-juin	61	12,1
98	14,9	5-juin		

Outre le froid et le vent qui peuvent immobiliser les femelles pendant toute leur vie adulte, certaines pluies d'orage peuvent mettre fin anticipativement à la période des vols. Ce fut le cas des années 2007 et 2009, durant lesquelles des populations d'adultes ont brutalement été anéanties par des pluies violentes. Après de telles pluies, de grands nombres d'adultes morts ont pu être observés

sur les feuilles ou sur le sol (observations personnelles les 12/06/2007, 15/06/2007 et 8/06/2009). En 2009, cette pluie est survenue trop tardivement pour affecter les pontes.

Un dernier paramètre qui pourrait avoir influencé le niveau d'infestation en 2009 est la sécheresse de l'air (Tableau 34). Celle-ci n'a pas seulement d'influence sur l'abondance des pontes mais également sur la survie des œufs que l'on sait très sensibles à la dessiccation (Affolter 1990).

Les conditions météorologiques prévalant durant la période des vols, des pontes et du développement des œufs, ont donc un impact direct sur le niveau d'infestation des épis ainsi que sur la possibilité pour l'insecte de se multiplier.

8.3.2. Concentration ou dilution des pontes

Comme pour d'autres ravageurs hivernant dans les champs, la densité des attaques de cécidomyie orange est fonction du rapport de surface entre les "champs-sources" et les "champs-cibles". Lorsqu'au niveau de quelques dizaines ou centaines d'hectares, les sources occupent moins de surface que les cibles, les attaques se diluent. Dans le cas inverse, elles se concentrent. A l'extrême, un petit champ de froment situé à proximité de sources beaucoup plus étendues risque de subir une attaque grave même si le niveau global des populations est faible. Ce phénomène de concentration des attaques constitue un problème aigu dans les essais réalisés en petites parcelles (quelques m²) en vue d'évaluer les variétés (Section 9.2.2).

8.4. Quantification des dégâts

A partir des semis 2009, des essais spécifiques visant à mesurer les dégâts occasionnés par *S. mosellana*, ont été mis en place au Centre wallon de Recherches agronomiques. Cependant, durant les années qui ont suivi, les niveaux d'infestation des cultures sont restés trop faibles pour permettre de se prononcer sur la relation entre les niveaux d'infestation de larves dans les épis et les dégâts engendrés. Néanmoins, des informations ont pu être obtenues dans des essais comparant des variétés, dont certaines répétitions ont été protégées par traitement insecticide.

a) Matériel et méthodes

L'étude a tiré profit d'un essai variétal de post-inscription mis en place par la Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux en 2008. Cet essai visait à évaluer les caractères agronomiques d'une vingtaine de variétés, en vue de recommandations auprès des agriculteurs. L'essai était conduit en parcelles de 16 m², sans fongicides. L'essai comportait quatre répétitions dont deux ont été traitées à l'épiaison (2 juin) avec du Dursban 4® (insecticide à base de chlorpyrifos-éthyl, commercialisé sous forme de concentré émulsionnable (EC), 480 g/L) à la dose d'1 L/ha. Au 26 juin, 2 fois 50 épis de chaque parcelle non traitée, ont été collectés en vue de l'extraction et du comptage des larves conformément à la méthode présentée Section 3.2.2. Les rendements de chaque parcelle ont été mesurés à la récolte. La relation entre les niveaux d'infestation et les pertes de rendement (non traités - traités) donne un aperçu de la nocivité de la cécidomyie.

b) Résultats et discussion

Selon les variétés, le niveau d'infestation des parcelles variait de 0 à 15 larves/épi (Figure 47). Les émergences ayant débuté avant l'apparition des premiers épis, les variétés les plus précoces ont

été soumises à un nombre plus important de pontes. Le nombre de larves/épi a été, par conséquent, supérieur pour les variétés précoces que pour les tardives. Deux variétés ont fait exception : leurs épis ne contenaient pas de larves. Il s'agissait des variétés Koreli et Contender. Ces deux variétés se sont révélées résistantes à *S. mosellana*. Ce cas est discuté à la section 9.3.

Pour les variétés les plus précoces (Louisart, Toisonдор), des niveaux d'infestation supérieurs à 10 larves/épi ont été observés, alors que pour les plus tardives (Centenaire, Waldorf, Sahara), les niveaux étaient inférieurs à 5 larves/épi. Cette réalité apparaît clairement à la figure 47, où les variétés sont classées par ordre décroissant de précocité.

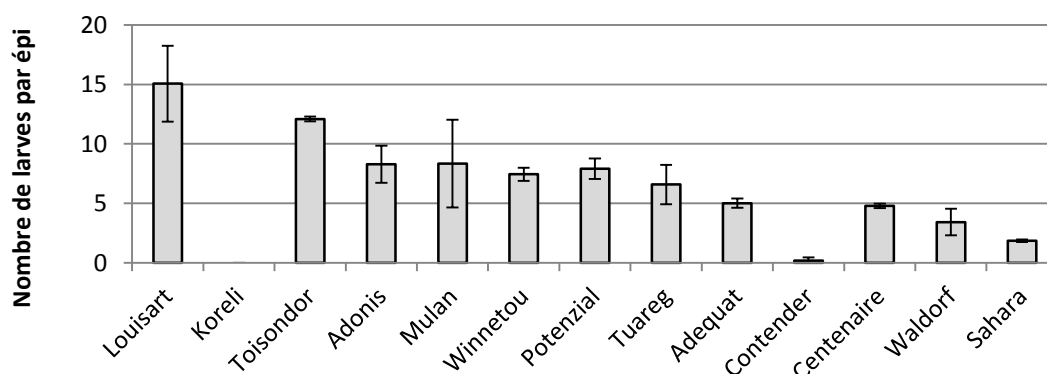


Figure 46 : niveau d'infestation des épis en fonction des variétés classées par ordre décroissant de précocité

Les niveaux de rendement obtenus par les différentes variétés ne présentent pas de lien simple avec leur précocité (Figure 48). Ils sont la résultante de l'ensemble des caractéristiques de chaque variété et de leurs interactions avec les conditions survenues au cours de la saison.

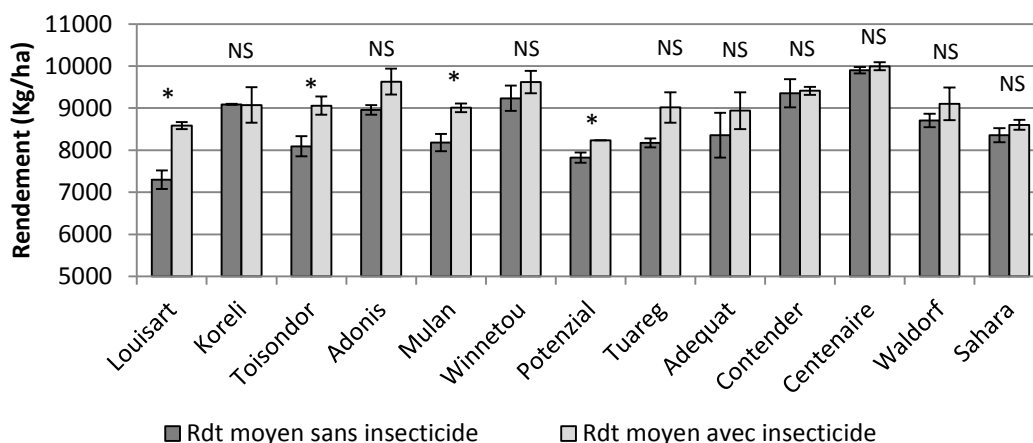


Figure 47 : rendement⁵⁹ moyen mesuré avec et sans insecticide
(effet du traitement sur la variété : * = significatif ($p \leq 0,05$), NS = non significatif)

⁵⁹ L'effet du traitement sur l'essai est attesté par une ANOVA à 2 facteurs (Traitement, Variété, Traitement x Variété) qui donne un effet très hautement significatif au facteur Traitement ($F = 55,47$; $p = 0,000$). Le facteur Variété et l'interaction Traitement X Variété obtiennent respectivement les valeurs suivantes : $F=20,87$; $p=0,000$ et $F=2,39$; $p=0,031$.

Les rendements en grain obtenus en l'absence de traitement étaient compris entre 7.300 kg/ha (Louisart) et 10.000 kg/ha (Centenaire). Le gain de rendement dû à l'insecticide, était le plus important pour la variété Louisart, avec 1.284 kg/ha supplémentaires. Par ailleurs, le traitement n'a eu aucun effet sur le rendement de la variété Koreli, exempte de larves ; cette observation confirme la quasi-absence d'autres ravageurs des épis qui auraient pu compromettre les résultats de l'essai.

Comme les niveaux d'infestation des épis, les gains de rendement obtenus grâce au traitement au chlorpyriphos-éthyl, sont d'autant plus importants que la variété est précoce.

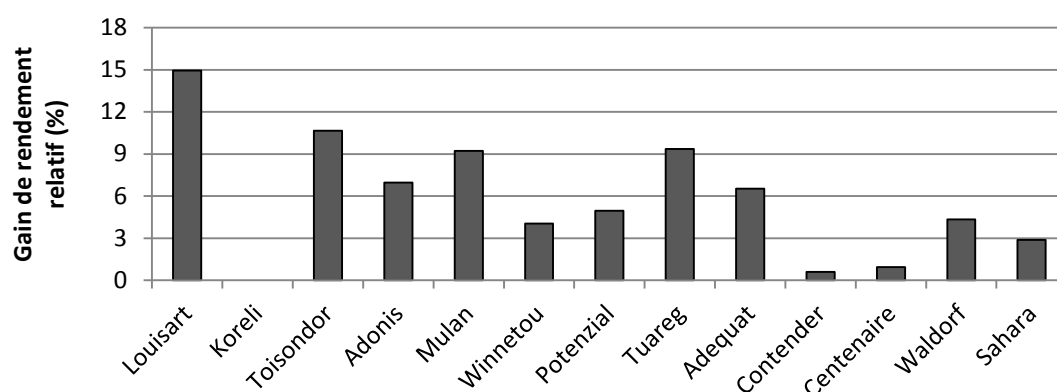


Figure 48 : gain de rendement relatif obtenu par le traitement insecticide

Il apparaît donc clairement que les gains de rendement étaient d'autant plus élevés que la pression exercée par la cécidomyie était forte. Cette relation est présentée à la figure 50. La droite de régression est caractérisée par un coefficient de détermination de 0,803. Le rapport (nombre de larves par épi /gain de rendement apporté par le traitement) indique qu'une larve/épi occasionne une perte de rendement de 1 %. Ceci concorde avec les estimations faites par Oakley et al. (1998).

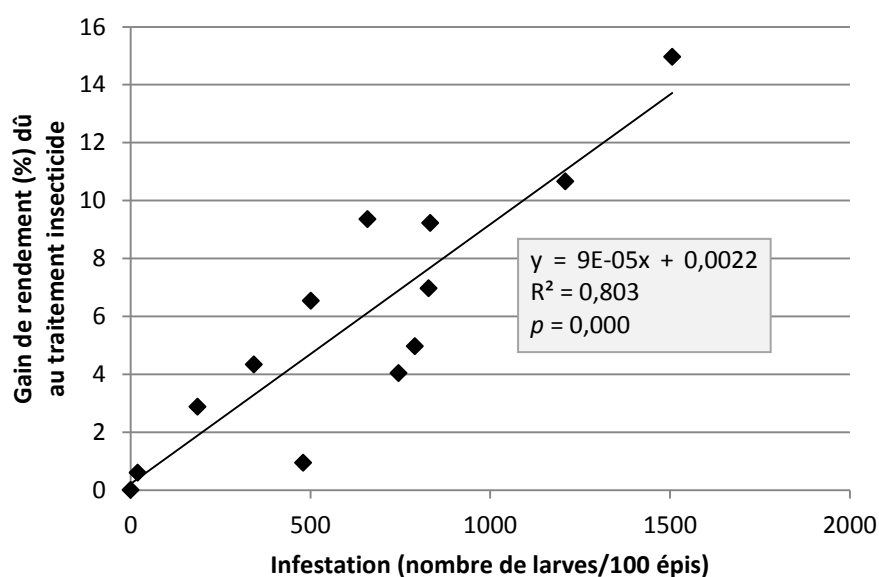


Figure 49 : impact de l'infestation sur le rendement

Si, dans l'expérimentation relatée, les résultats semblent cohérents, il reste néanmoins quelques imprécisions dans l'estimation du niveau de perte de rendement attribuable à la cécidomyie orange. En effet, cette estimation, pour être parfaitement correcte, impliquerait que le traitement insecticide ait totalement supprimé la pression exercée par la cécidomyie orange pour toutes les variétés étudiées, qu'il n'ait agi sur aucun autre ravageur, et qu'il n'ait eu aucun effet direct ou indirect sur la vigueur des plantes. Or, il est apparu que l'efficacité du traitement du 2 juin n'avait pas été complète, au moins pour la variété Premio, la plus précoce de l'essai ; certains œufs y avaient déjà éclos et les larves n'étaient plus accessibles au produit. Cette variété a été exclue de l'analyse pour cette raison. Il est possible que les résultats de la variété Louisart, un peu moins précoce que Premio, aient été affectés par le même phénomène, conduisant à une sous-estimation des dégâts de *S. mosellana*. Concernant la spécificité du traitement, il est évident que le chlorpyrifos-éthyl n'a pas agi sélectivement sur la cécidomyie orange, mais bien sur l'ensemble des ravageurs présents. Dans l'essai, une faible population de pucerons (*Sitobion avenae* et *Metopolophium dirhodum*) était présente et a pu conduire à une légère surestimation des dégâts de *S. mosellana*. Enfin, le produit appliqué, à base de chlorpyrifos-éthyl, s'est avéré phytotoxique envers quatre variétés : Manager, Lion, Haussman et Istabracq. Ces quatre variétés ont présenté des jaunissements suivis de nécrose sur les dernières feuilles, les autres variétés ne présentant aucun symptôme. Les quatre variétés citées ont également été exclues de l'analyse. Ce phénomène de phytotoxicité a pu affecter d'autres variétés sans qu'elles ne présentent de symptômes. Dans cette éventualité, l'impact sur le rendement de l'attaque de cécidomyie aurait été sous-estimé.

8.5. Conclusion

La coïncidence entre l'émergence des adultes et le stade vulnérable de la culture n'est pas directement synonyme de perte pour l'agriculteur. La coïncidence est une composante essentielle du risque mais les dégâts sont également fonction des conditions météorologiques après l'émergence.

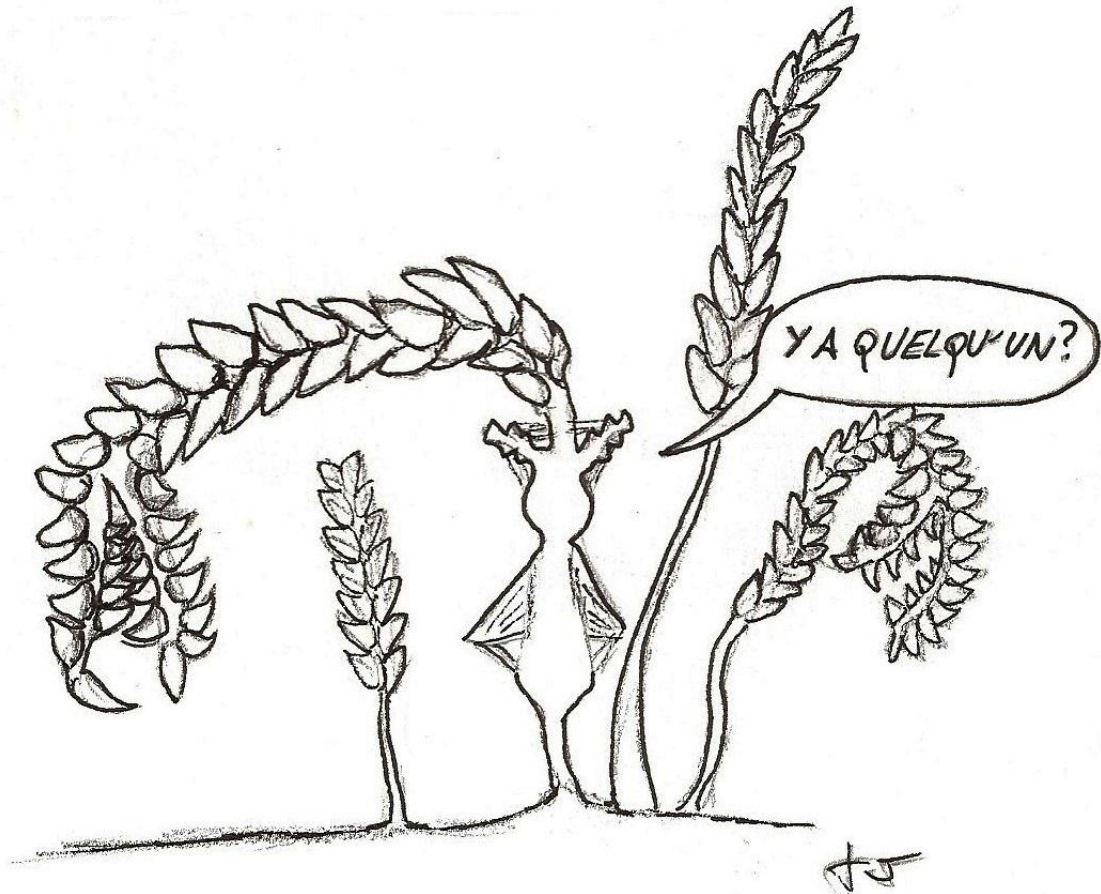
Sur base de six années d'observation, le pourcentage moyen de coïncidence s'est avéré similaire à celui observé par Basedow dans les années septante : 40 % des cécidomyies adultes ont été capturées durant la phase vulnérable du blé. Cette proportion ne préfigure en rien le nombre d'adultes qui vont émerger la saison suivante durant la période vulnérable des froments, mais sur le long terme, elle révèle un niveau satisfaisant de coordination entre un insecte qui ne vit que quelques jours et une fenêtre de vulnérabilité du froment qui ne dépasse pas 10 jours.

Outre la coïncidence et les conditions météorologiques subies par les femelles durant la période des vols, les niveaux d'infestation des cultures sont également dépendants des déplacements des femelles. Ceux-ci impliquent des phénomènes de concentration et de dilution en relation avec les surfaces des "champs-sources" et des "champs-cibles".

La relation entre niveaux d'infestation des épis et perte de rendement, a pu être mesurée en présence de volumes importants de cécidomyies et en quasi-absence d'autres ravageurs des épis. Cette situation, peu fréquente permet de confirmer le rapport d'une larve/épi engendrant une perte de rendement de 1 % pour les cultures de froment.

Chapitre 9 :

Cécidomyie orange et évaluation des variétés de froment



Le chapitre 9 est consacré à l'influence que la cécidomyie orange du blé peut avoir sur l'évaluation des variétés de froment, ainsi qu'à l'identification de variétés présentant des comportements intéressants face aux attaques.

9.1. Contexte et objectifs

Depuis près d'un demi-siècle, les agronomes du nord de la Chine sont confrontés à de graves infestations de cécidomyie orange du blé (Zheng, 1965). Très tôt, certaines variétés de froment d'hiver semblaient capables de se prémunir contre des attaques du ravageur (Berzonski 2003). Ce fut sans doute également le cas en Amérique du Nord et en Europe, où quelques variétés "résistantes" ont été répertoriées, sans cependant, donner lieu à des études spécifiques sur les mécanismes en jeu (Basedow et Schütte 1974 ; Barker et Mc Kenzie 1996 ; Berzonski 2003).

Dans les années 90, certaines variétés chinoises de blé d'hiver et des variétés canadiennes de blé de printemps présentaient des caractères de résistance particulièrement intéressants (Ding et Guo 1993; Barker et McKenzie 1996; Ding et al. 2000; Lamb et al. 2000a). Une réduction drastique de la survie des larves dans les épis, était observée pour ces variétés. Nonante-neuf pour cent des larves n'atteignaient pas le 2^{ème} âge larvaire (Sun et al. 1998; Ding et al. 2000). Cette résistance était associée à une teneur en acides phénoliques des grains, bien supérieure à celle observée chez les variétés sensibles. Pour toutes les variétés, les teneurs en acides phénoliques augmentent avec le développement des grains (McKeehen et al. 1999) expliquant vraisemblablement pourquoi seules les larves issues des œufs déposés avant la floraison se développent. Par ailleurs, ces teneurs étaient encore augmentées lorsque des larves étaient présentes dans les épis, trahissant un mécanisme inductif de la production d'acides phénoliques ou plus précisément d'un renforcement de celle-ci (Ding et al. 2000). Les deux principaux acides phénoliques produits dans les épis de blé sont l'acide férulique et l'acide p-coumarique. Présent dans toutes les graminées, l'acide férulique est principalement localisé dans les épis tandis que l'acide p-coumarique se retrouve préférentiellement au niveau des tiges (Faulds et Williamson 1999). Les acides phénoliques combinés à des polysaccharides contribuent à la structure des parois cellulaires et au processus de lignification (Ralph et al. 1997; Smith et Hartley 1983). Sous leur forme libre, ce sont des substances astringentes qui peuvent diminuer, voire inhiber la consommation des insectes phytophages (Arnason et al. 1992).

En 2002, le caractère résistant a pu être relié à un gène partiellement dominant appelé "Sm1" (McKenzie et al. 2002; Thomas et al. 2005). Depuis, de nombreux programmes de sélection ont incorporé le gène Sm1 pour la création de nouvelles variétés. Au Canada, les surfaces cultivées de froment résistant, sont en pleine expansion. Malgré des appels à protéger cette résistance verticale par l'intégration de bandes de variétés sensibles (Smith et al. 2004a), le contournement de la résistance reste une éventualité (Smith et al. 2007). C'est pourquoi les quatre variétés résistantes actuellement commercialisées au Canada, ne sont plus vendues qu'en mélange avec des variétés sensibles (Elliott et al. 2011a).

En Europe, une dizaine de variétés de froment d'hiver résistantes ont été identifiées par des chercheurs anglais (Oakley et al. 2005). Certaines d'entre elles présentent un taux d'acides phénoliques très élevé, mais ce caractère n'est pas corrélé à la seule présence du gène Sm1. Deux ou trois autres gènes seraient également responsables de l'antibiose (Oakley et al. 2005; Ellis et al. 2009). La résistance de ces froments d'hiver pourrait donc être de type multigénique, et, à ce titre, seraient plus robustes face à d'éventuels contournements de résistance que les variétés de froment de printemps canadiennes (Ellis et al. 2009). Cependant, pour accroître les teneurs en acides phénoliques de manière induite, une voie métabolique complète doit vraisemblablement être

mobilisée. Il n'est donc pas étonnant que plusieurs gènes soient impliqués dans la réponse aux attaques de cécidomyies. Si la résistance variétale ne concerne qu'un seul mode d'action, la stabilité de cette résistance ne dépend pas du nombre de gènes impliqués chez le blé, mais bien du nombre de gènes du ravageur qui devraient muter pour conférer à l'insecte, l'aptitude à contourner la résistance de la plante.

Si l'Europe et la Chine misent résolument sur l'antibiose, les chercheurs canadiens travaillent désormais davantage sur l'antixénose, et plus particulièrement sur les facteurs influençant l'oviposition (Lamb et al. 2000a; Wise et al. 2001; Smith et Lamb 2001). Selon leurs études, les deux mécanismes coexisteraient de façon indépendante. Par ailleurs, une autre étude indique que l'antixénose ne serait pas provoquée par des caractères morphologiques de l'épi (longueur, barbes, compacité), mais que la répulsion serait d'origine olfactive (Gharalari et al. 2009). Du point de vue du comportement de l'insecte, les femelles de *S. mosellana* se poseraient autant sur les variétés répulsives que sur les autres mais y déposeraient moins d'œufs (Ganehiarachchi et Harris 2009). Les plantes ayant atteint ou dépassé le stade floraison, provoquent les mêmes comportements chez les insectes que les plantes de variétés dites répulsives (Lamb et al. 2001; Lamb et al. 2003).

Dans plusieurs pays, la recherche de variétés résistantes de froment d'hiver est en pleine expansion. En Chine, au Royaume-Uni et au Canada, il existe des programmes de sélection spécifiques et de nombreuses variétés résistantes sont actuellement disponibles (Ding et Ni 1994; Li et al. 2004; Cheng et al. 2006; Qu et al. 2007; Ellis et al. 2009; Elliott et al. 2011a). En Europe centrale et de l'est, des screenings à grande échelle ont été entrepris pour identifier le comportement des variétés actuelles (Liatukas et al. 2009; Gaafar et al. 2011).

Au cours de notre étude, près de 400 variétés de froment ont été testées. Vingt-deux se sont révélées résistantes (Section 9.3). L'étude des variétés et particulièrement, l'utilisation d'essais variétaux en petites parcelles, a également mis en évidence l'influence que la cécidomyie orange du blé pouvait avoir sur ce type d'essai, très employé par l'ensemble de la filière céréalière (Section 9.2).

9.2. Impact de *S. mosellana* dans l'évaluation du potentiel de rendement des variétés

L'évaluation des variétés par les obtenteurs, par les services officiels chargés de leur inscription, ou par les chercheurs, consiste classiquement à les comparer pendant plusieurs années à des variétés témoins, dans un réseau d'essais en petites parcelles de 12 à 20 m². Ce protocole simple permet de classer les variétés selon différents critères tels que le potentiel de rendement, la résistance au froid ou à la verse, ou bien encore la résistance à divers pathogènes. Selon les conditions rencontrées au cours du processus d'évaluation, les résultats peuvent donc varier, et il est essentiel de bien situer les classements opérés dans le contexte des années d'essais concernées. Une faible résistance au froid, par exemple, peut très bien passer inaperçue si l'expérimentation se déroule au cours d'une période où les hivers sont doux. Dans les essais classiques d'évaluation des variétés, la cécidomyie orange n'est quasi jamais prise en compte, ni en tant que ravageur pouvant perturber les essais, ni en tant que critère intervenant dans l'évaluation des variétés.

9.2.1. Effet de la coïncidence sur l'évaluation des variétés

Dans les chapitres précédents, il a été montré que les dégâts de cécidomyie ne pouvaient survenir que si les émergences de l'insecte coïncidaient avec l'épiaison du froment. Or, dans les essais d'évaluation, les variétés ne traversent pas la phase vulnérable de leur développement au même moment. La cécidomyie orange ne touche donc pas toutes les variétés de façon uniforme. L'objectif de l'analyse qui suit est de mesurer l'impact de *S. mosellana* sur l'évaluation du potentiel de rendement à travers les observations effectuées en 2007 et 2008 dans des essais d'évaluation de variétés, installés à Gembloux.

a) Matériel et méthodes

Les deux essais variétaux présentés, ont été conduits par l'unité de Phytotechnie tempérée de la Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (FUSAGx). L'objectif premier de ces essais était d'évaluer les caractéristiques agronomiques (rendement, comportement face aux maladies, résistance à la verse,...) d'une vingtaine de variétés. Parmi celles-ci, sept variétés présentes dans les essais 2007 et 2008, ont été choisies pour leur gamme de précocité à l'épiaison. Deux des sept variétés, Robigus et Glasgow, étaient connues comme résistantes à la cécidomyie orange (J. Oakley, communication personnelle). L'essai 2007 a été semé en décembre et celui de 2008 en octobre. Chaque variété était présente quatre fois par essai dans des parcelles de 16 m² (2 m x 8 m). Les parcelles ayant fait l'objet de prélèvements, ont bénéficié d'une conduite classique (fumure, herbicides, régulateurs de croissance) sauf qu'elles n'étaient traitées ni avec des fongicides, ni avec des insecticides.

Le 4 juillet 2007 et le 26 juin 2008, 100 épis ont été prélevés par variété. Chaque prélèvement était constitué de deux lots de 50 épis provenant respectivement des répétitions 1 et 3. L'extraction des larves a été réalisée selon la procédure développée Section 3.2.2.



Photo 31 : essai d'évaluation variétale à Lonzée en 2008 (auteur : G. Jacquemin)

b) Résultats et discussion

Les niveaux d'infestation des épis sont apparus liés au degré de précocité des variétés, en relation avec les périodes de vols (Figure 51). En 2007, les vols ont eu lieu tardivement et seules les plus tardives des variétés de cet essai, semé en décembre, ont été exposées (Section 8.2). En 2008, le scénario a été tout différent, puisque les cécidomyies étaient présentes dès avant l'épiaison des variétés les plus précoces, ce qui explique que ces dernières aient été les plus affectées. Ces effets de la coïncidence peuvent masquer les résistances et les sensibilités : le scénario de l'année 2007 ne permet pas de distinguer le comportement de la variété Toison dor de celui de Glasgow. L'année 2008 clarifie la situation pour les variétés précoces mais est moins discriminante pour les plus tardives.

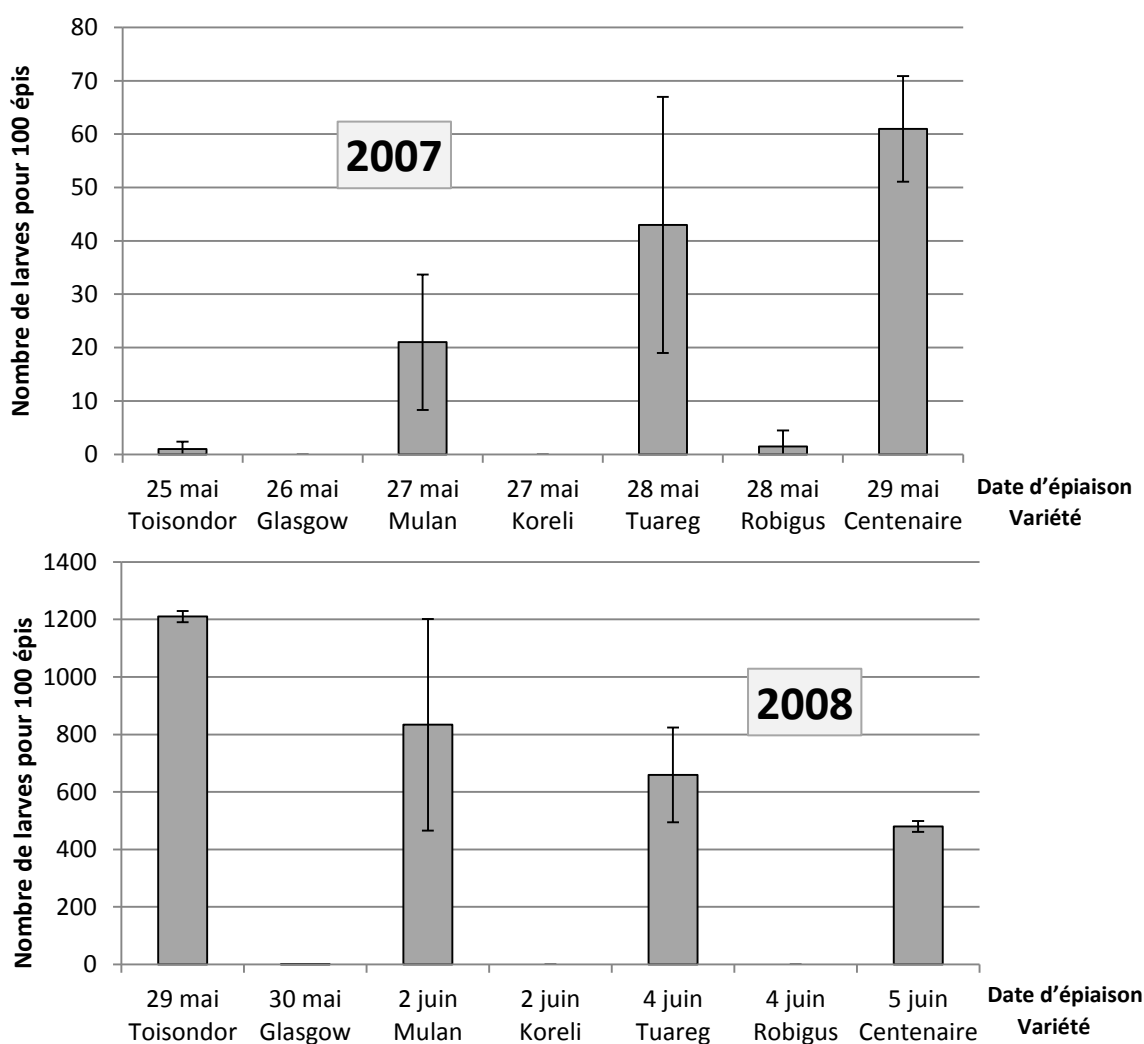


Figure 50 : effet de la coïncidence sur l'évaluation des variétés

L'infestation des épis est mise en relation avec les variétés et leur précocité (date d'épiaison = stade 51)

En 2007, les résultats de la variété Koreli donnaient à penser qu'elle pouvait être résistante à la cécidomyie orange. Toutefois, les effectifs étant faibles, ces résultats demandaient à être confirmés sous une pression plus forte de cécidomyie. Ce fut le cas en 2008 où les niveaux d'infestation des épis furent 20 fois plus élevés.

9.2.2. Concentration des attaques sur les parcelles les plus précoces

Les niveaux d'infestation des épis observés en 2008 et 2009 dans les essais variétaux suivis, ont dépassé les 10 larves/épi pour les variétés les plus précoces (Figures 51 et 53). Ce niveau d'infestation était bien supérieur à ce qui pouvait être observé aux mêmes moments dans les champs des agriculteurs (Figure 16). L'analyse qui suit tente d'en déterminer la cause et d'en mesurer les conséquences.

a) Matériel et méthodes

L'Unité Amélioration des espèces et Biodiversité du CRA-W dispose d'une grande collection variétale, utilisée notamment pour la création de nouvelles variétés. Chaque année, une partie de cette collection est semée pour les croisements, l'évaluation, ou la simple multiplication. En 2009, 295 variétés avaient été semées. Elles étaient disposées sur trois lignes de 1 m de long, distantes de 30 cm. Le nombre d'épis par m² y était donc faible (< 300). La collection est conduite comme un essai classique sans traitement fongicide ni insecticide mais avec régulateur de croissance et herbicides. Deux prélèvements de 25 épis chacun ont été réalisés le 24 juin et ont été analysés séparément. L'extraction des larves a été réalisée comme décrit Section 3.2.2.

b) Résultats et discussion

Dans la collection du CRA-W, en 2009, les variétés les plus attaquées présentaient plus de 15 larves en moyenne par épi. Le nombre maximum de larves était de plus de 20 en moyenne par épi (variété Sagitaire). Ces niveaux d'infestations étaient près de 10 fois supérieurs à ceux observés cette année-là, dans les champs des agriculteurs, où le niveau de 2 larves/épi de moyenne n'était jamais dépassé (Section 3.2.2). Comme en 2008, les émergences avaient commencé avant l'apparition des premiers épis et la coïncidence était très favorable aux pontes des cécidomyies sur les variétés les plus précoces. On observe dès lors, un net dégradé de l'infestation en fonction de la précocité (Figure 52).

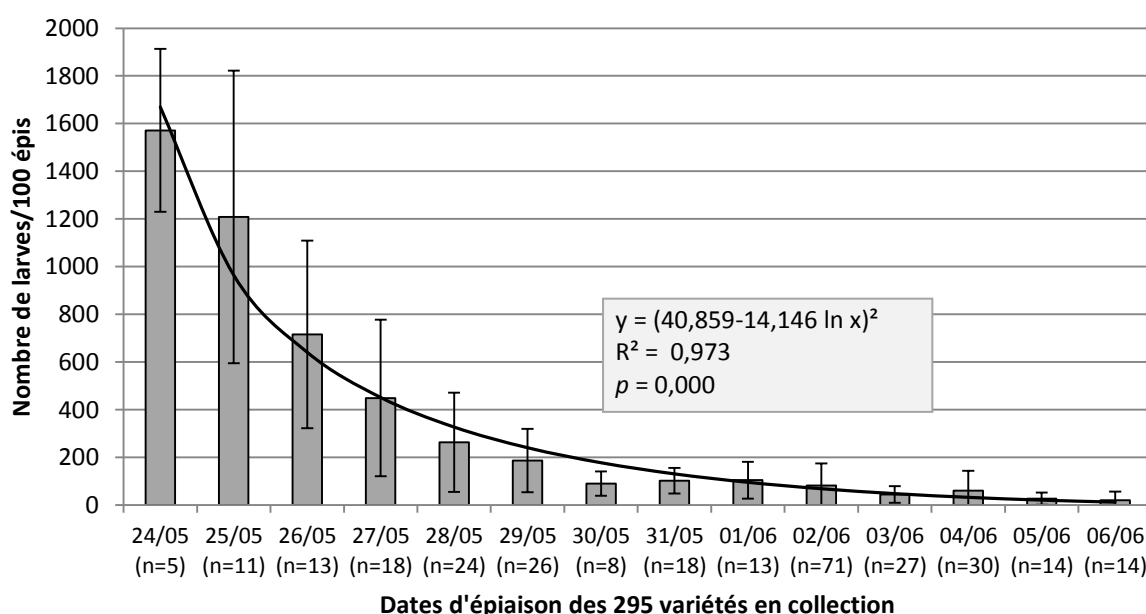


Figure 51 : infestation des parcelles de la collection variétale du CRA-W en 2009

Le niveau d'infestation des épis apparaît comme une fonction exponentielle décroissante de la précocité à l'épiaison : $y = 3181,1 x^{-1,691}$. L'allure de la courbe et son coefficient de détermination ($r^2 = 0,93$) indiquent un lien évident entre la précocité des variétés et le niveau d'infestation des épis : manifestement les variétés les plus précoces ont été plus exposées que les tardives aux pontes de cécidomyies. Ceci ne signifie pas nécessairement qu'il y avait plus d'insectes prêts à pondre lors de l'épiaison des variétés les plus précoces, mais plus vraisemblablement que les toutes premières parcelles en épis ont concentré les attaques de cécidomyies. La forme exponentielle de la fonction s'explique par le fait que, plus on avance dans la saison, plus le nombre de variétés ayant atteint l'épiaison est élevé. On assiste progressivement à une dilution spatiale des pontes qui se traduit sur le graphique par un niveau d'infestation des épis d'autant plus faible que les variétés épient tard. La courbure de la fonction est encore accentuée durant les six premiers jours par le fait que les variétés entrant en phase vulnérable étaient chaque jour plus nombreuses (5-11-13-18-24-26).

Au problème de coïncidence vient donc se superposer un effet de concentration lorsque le début de l'épiaison des variétés les plus précoces a lieu alors que les vols de cécidomyie orange ont déjà commencé. Ceci explique pourquoi, même lorsque les vols sont faibles et que les niveaux d'infestation des épis sont bas (2 larves/épi en 2009) dans les champs d'agriculteur, les variétés les plus précoces peuvent être fortement infestées (15 larves/épi en 2009) dans les parcelles d'essai⁶⁰.

9.2.3. Biais expérimental induit par la cécidomyie orange

Les paramètres d'un essai comparant des variétés (date de semis, densité de semis, régime de fumure,...) sont appliqués à l'essai dans son entièreté. Ces paramètres déterminés arbitrairement conviennent mieux à certaines variétés étudiées qu'à d'autres, et influencent le classement des variétés quant au potentiel de rendement. Cette constatation vaut tout autant pour les conditions pédoclimatiques dans lesquelles se déroule un essai que pour la pression des pathogènes et des ravageurs qu'il subit. C'est pourquoi, l'évaluation des variétés se fonde sur un ensemble d'essais répartis dans le temps et l'espace.

Que les résultats d'un essai ou même d'une année d'essais soient fortement marqués par un événement particulièrement intense (forte attaque de fusariose, dégâts de gel) ne constitue pas un biais d'expérimentation : ils touchent une variété de la même façon, qu'elle soit semée sur une petite parcelle de quelques mètres carrés incluse dans un essai, ou bien sur un champ de plusieurs hectares. En revanche, il y a biais expérimental lorsque les conditions particulières dues à l'essai (semis en parcelles, interactions entre parcelles, présence de sentiers...) conduisent à des résultats différents de ceux qui auraient été observés dans la pratique agricole.

La cécidomyie orange du blé constitue un biais fréquent et important au détriment des variétés les plus précoces. Entre 2007 et 2012, cette situation s'est présentée à deux reprises : en 2008 et 2009.

⁶⁰ Ce phénomène de concentration a été observé dans une dizaine d'essais variétaux de 2008 et 2009, et a vraisemblablement affecté tous les essais.

Dans certains cas, le biais a été accentué par des traitements insecticides appliqués alors que des pontes avaient déjà eu lieu dans les variétés les plus précoces. Il est également aggravé lorsque du mauvais temps est survenu après quelques jours de ponte. Ce dernier cas est illustré par l'essai de Loncée 2009 présenté ci-après.

a) Matériel et méthode

L'essai analysé en 2009 était conduit par l'unité de Phytotechnie tempérée (FUSAGx). Il présentait les mêmes caractéristiques que les deux essais présentés à la section 9.2.1 pour 2007 et 2008 à l'exception de deux traitements fongicides (Opus + Sportak au stade 2 noeuds et Fandango au stade début floraison). Le 26 juin 2009, 50 épis ont été prélevés respectivement dans les parcelles des répétitions 1 et 3. Les extractions de larves provenant des deux lots de 50 épis ont été réalisées séparément selon la procédure développée Section 3.2.2.

b) Résultats et discussion

En 2009, les conditions météorologiques ne furent pas favorables aux pontes après le 26 mai (Figure 53). Les trois variétés les plus précoces ont donc été doublement pénalisées. Premio, Goncourt et Mercato contenaient environ 10 larves/épi alors que les variétés à peine plus tardives, sauvées de la cécidomyie par le mauvais temps, n'en contenaient quasi pas. Comme l'année précédente, les niveaux d'infestations des épis en parcelles d'essai n'étaient pas représentatifs de ceux des champs d'agriculteurs dans lesquels l'infestation n'avait évidemment pas connu de concentration.

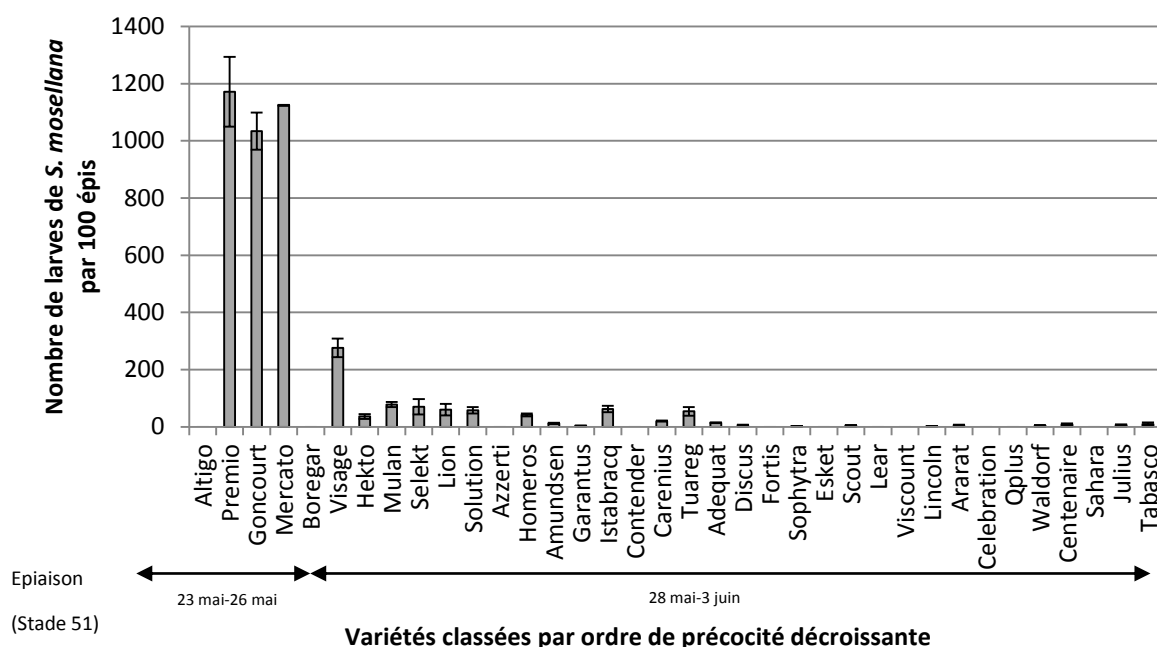


Figure 52 : infestation des parcelles d'essai en 2009 à Loncée

Dans cet essai, l'impact de la cécidomyie orange sur le rendement n'a pas été mesuré spécifiquement. Seuls les niveaux d'infestation dans les épis peuvent donner un renseignement

indirect. Toutefois, les rendements mesurés sont éloquentes : les rendements des sept variétés les plus précoces sont présentés à la figure 54 en comparaison avec les variétés témoins (Istabracq, Tuareg et Centenaire) qui déterminent le rendement de référence. Dans cet essai, un rendement relatif de 100 % équivaut à un rendement réel de 12.220 kg/ha, ce qui constitue un rendement très élevé.

Les rendements des quatre variétés dont les épis sont le plus infestés (Premio, Goncourt, Mercato et Visage) se situent entre 6 et 14 % sous la moyenne des témoins. Dans les essais d'évaluation des variétés, des résultats aussi faibles sont assez rares. Le cas échéant, ils résultent d'événements exceptionnels tels que les dégâts de gel ou les problèmes de fertilité d'épis. Dans l'essai de Lonzée, rien de tel ne s'est passé et seule la cécidomyie orange semble pouvoir expliquer les très mauvais rendements de ces quatre variétés.

La comparaison de ces quatre variétés sensibles à *S. mosellana* avec les variétés résistantes Altigo et Boregar laisse supposer une perte de rendement d'une dizaine de pourcents. Ce niveau de perte concorde avec les observations de la section 8.4 qui font coïncider la présence d'une larve/épi avec une perte de rendement de 1 %.

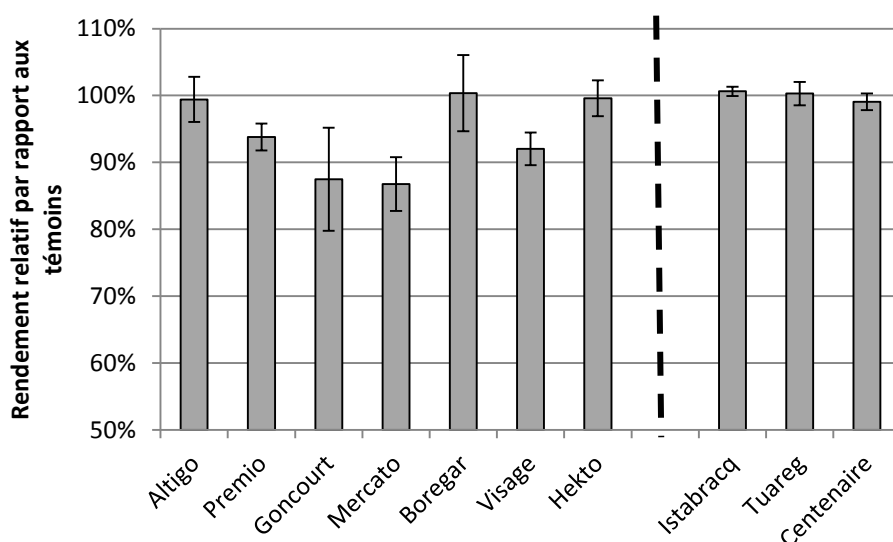


Figure 53: rendements de l'essai post-inscription de Lonzée en 2009
(100 % = 12.220 kg/ha)

Que ce soit au niveau d'essais de post-inscription, d'inscription aux différents catalogues nationaux, ou bien au niveau des pépinières de sélection, des variétés et des lignées de froments précoces ont été sous-classées par méconnaissance ou sous-estimation du problème de la cécidomyie orange⁶¹. La portée de cette constatation est très générale car l'évaluation des variétés en petites parcelles est pratiquée dans tous les pays producteurs de céréales.

⁶¹ Pour limiter cet effet de concentration, une précaution est désormais appliquée à certains essais variétaux et consiste à semer des parcelles de bordure avec une variété plus précoce que les variétés en essais. Cette variété attire à elle les cécidomyies éventuellement présentes avant que n'épient les variétés en essai, limitant ainsi le phénomène de concentration dans les parcelles d'essais.

9.3. Identification de variétés résistantes à *S. mosellana*

La recherche de variétés résistantes à la cécidomyie orange du blé est déjà ancienne (Berzonsky et al. 2003). Toutefois, en Europe, ce n'est que récemment que cette voie a été explorée, principalement au Royaume-Uni (Oakley et al. 2005). Au cours de notre étude, le comportement de près de 400 variétés a été testé selon diverses méthodes qui se sont progressivement affranchies des aléas des infestations naturelles.

9.3.1. Méthodes d'exposition des variétés à *S. mosellana*

Contrairement aux pathogènes responsables de maladies cryptogamiques, la cécidomyie orange ne figure pas parmi les critères de caractérisation des variétés, utilisés au cours du processus d'inscription. Cette lacune s'explique par la méconnaissance de cet insecte discret, mais aussi par la difficulté d'obtenir des résultats fiables dans des essais de plein champ, compte tenu des scénarii extrêmement variés qui peuvent se présenter. Cependant, certaines années, lorsque la période de pontes est longue et régulière, des résultats pertinents peuvent être obtenus par cette méthode. Ce fut le cas en 2008, où toutes les variétés ont été suffisamment exposées aux pontes pour déterminer leur comportement par rapport à l'insecte. Toutefois, de telles conditions sont assez rares sous le climat fréquemment perturbé de la Wallonie. D'autres techniques d'infestation ont donc été essayées, visant à assurer une exposition la plus homogène possible de toutes les plantes testées, à la cécidomyie orange. Les résultats enregistrés selon ces différentes approches ne sont pas complètement validés. Ils ont néanmoins déjà fait l'objet de communications vers les agriculteurs et surtout vers les sélectionneurs, très demandeurs d'informations, même partielles, susceptibles d'orienter leurs travaux vers l'obtention de variétés plus résistantes.

a) Matériel et méthodes

Trois types d'exposition à la cécidomyie orange ont été testés :

- naturelle
- par "transhumance"
- contrôlée en serre

Exposition naturelle

De 2007 à 2010, sept plates-formes d'essais variétaux d'inscription et de post-inscription ont été mises à profit pour réaliser des observations sur le comportement des variétés de froment d'hiver face à *S. mosellana* (Tableau 35). Durant l'épiaison, un relevé précis des stades de développement des plantes était effectué tous les deux jours. Entre 20 et 25 jours après la floraison, un minimum de 50 épis ont été prélevés pour chaque variété. Ces épis étaient mis en sachet à -18°C jusqu'au mois de juillet où les larves en étaient extraites et dénombrées (Section 3.2.2).

Exposition par déplacement des plantes (transhumance)

La deuxième méthode utilisée fut poétiquement baptisée "exposition par transhumance" car, comme pour les troupeaux d'ovins que l'on mène aux alpages, il s'agissait de déplacer les plantes vers les sources d'insectes afin de favoriser l'exposition des épis. Cette méthode ne fut employée

qu'une seule fois en 2009 (essai 2009-2). Peu avant l'épiaison, 10 plantes par variété ont été transplantées dans des seaux de 10 L. Ces seaux ont été déplacés dans le champ de lin 54 d'où de nombreuses cécidomyies avaient émergé. Du 20 au 27 mai, les pontes ont eu lieu, puis les seaux ont été déplacés vers le champ de froment 56 où les femelles étaient plus abondantes. Vingt jours après floraison, les larves de 20 épis par variété ont été extraites et dénombrées (Section 3.2.2).

Exposition contrôlée en serre

En 2009, 2010 et 2011, des infestations ont été réalisées en serre (essais 2009-1, 2010-1, 2011-1). Le but était de garantir un résultat qui, au champ, reste aléatoire et dépendant des conditions climatiques. A la sortie de l'hiver, 20 plantes par variété, étaient prélevées dans des champs d'essai du CRA-W. Ces plantes étaient repiquées sur deux lignes dans des bacs contenant 50 % de terreau et 50 % de terre de culture. L'arrosage, les engrais et la protection fongicide étaient apportés selon les besoins de la culture. A l'approche de l'épiaison, des captures de cécidomyies dans les champs les plus infestés étaient réalisées au moyen d'un Vortis (Section 4.7.2). Les insectes étaient ensuite relâchés sous un voile qui recouvrait les plantations et qui maintenait un niveau d'humidité élevé. Les captures se poursuivaient tous les deux jours durant toute la période d'épiaison. A chaque lâcher, le nombre d'insectes était estimé pour conserver une pression constante sur les variétés quelle que soit leur précocité. Entre 20 et 25 jours après la floraison, 20 épis étaient prélevés et les larves en étaient extraites et dénombrées (Section 3.2.2).



**Photo 32 : test de résistance des variétés de froment
(auteur : G. Jacquemin)**

Niveau d'exposition et stade de développement des céréales

L'exposition des essais peut être estimée par les niveaux maximaux d'infestation des épis observés par essai. Afin de tenir compte de l'ensemble de la gamme de précocité des variétés en essais, les variétés de chaque essai ont été regroupées selon leur classe de précocité (Tableau 36).

Cette dernière est un critère officiel de caractérisation des variétés⁶². Ces classes sont référencées de 1 à 9 selon un gradient de précocité décroissant. Les cotations de précocité ont été adaptées aux conditions belges par OBEV. Ce fut notamment le cas pour les variétés dont les descriptions n'étaient plus disponibles ainsi que pour celles initialement décrites dans un pays dont les conditions pédoclimatiques diffèrent des conditions belges. Le niveau d'infestation des épis de la variété la plus touchée de chaque gamme donne une mesure de l'exposition de chaque classe de précocité.

Tableau 35 : coordonnées et informations sur les différents essais

Année + N° d'essai	Type d'exposition	Lieux	Responsable d'essai	Nombre de variétés testées	Nombre d'épis étudiés par variétés	Niveau maximal d'infestation (larves/épi)
2007-1	Naturelle	Lonzée	FUSAGx	28	100	0,6
2008-1	Naturelle	Beuzet	FUSAGx	50	100	15,1
2009-1	En serre	Gembloux	CRA-W	65	20	10,4
2009-2	Transhumance	Bossière	CRA-W	65	20	33
2009-3	Naturelle	Ligney	CRA-W	20	50	5,5
2009-4	Naturelle	Enghien	CRA-W	25	50	3,3
2009-5	Naturelle	Lonzée	FUSAGx	36	50	11,7
2009-6	Naturelle	Gembloux	CRA-W	290	50	23,2
2010-1	En serre	Gembloux	CRA-W	92	20	16,1
2010-2	Naturelle	Gembloux	CRA-W	40	50	1,2
2011-1	En serre	Gembloux	CRA-W	39	20	33,3

b) Résultats et discussion

La méthode d'exposition naturelle a été employée à sept reprises au cours des quatre années (Tableau 36). L'essai 2008-1 fut le seul durant lequel la totalité des variétés ont pu être clairement caractérisées. Le principal inconvénient de cette méthode est que la période d'exposition des plantes aux pontes de cécidomyies est fonction de l'époque, de la durée et des conditions de pontes. Pour certains essais (2009-3, 2009-4, 2010-2), un second inconvénient de cette méthode est apparu. Il s'agit de la faiblesse des effectifs de cécidomyies présentes sur la plate-forme d'essai. Malgré ces inconvénients, cette méthode d'exposition reste intéressante parce que lorsque les conditions s'y prêtent, elle permet d'exploiter des implantations existantes.

Au cours de l'expérimentation de type "exposition par transhumance", les niveaux d'infestation des épis furent très importants (supérieurs à 30 larves/épi) démontrant, si besoin en est encore, toute l'importance du phénomène de concentration (Section 9.2.2), les seaux y tenant le rôle de "micro-parcelle". Ces niveaux élevés d'infestation des épis constituent un élément intéressant. Cependant, si en les déplaçant, on peut amener les plantes vers des champs où des insectes sont

⁶² La description de ce critère (CPVO n°4) est décrit dans le protocole technique en vigueur (TP 003/4Rev2) édité par l'office communautaire des variétés végétales (OCVV).

présents, on ne peut y forcer les pontes, les jours où les conditions météorologiques sont défavorables. Dans l'essai 2009-2, ceci explique le manque d'exposition des variétés de la classe de précocité 5 (180 larves/épi pour la variété la plus infestée)(Tableau 36). Les variétés de la classe 9 n'ont également été que faiblement exposées mais pour une tout autre raison : à l'époque de l'épiaison des variétés les plus tardives, les "champs-sources" s'étaient vidés des cécidomyies femelles qui s'étaient déplacées et réparties dans les "champs-cibles" entraînant leur dilution. Cette méthode est également assez fastidieuse, ce qui explique son abandon en 2010.

Tableau 36 : nombre de larves/100 épis de la variété les plus infestée de chaque classe de précocité

Les valeurs présentées en gras et surlignées en vert sont supérieures à 200 larves/100 épis. Les cases ombrées signifient que les essais ne comprenaient pas de variétés appartenant à ces classes de précocité

Essais	Type d'exposition	Classe de précocité décroissante								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2007 -1	Naturelle					49	34	58	34	61
2008-1	Naturelle			844	855	1507	834	829	590	480
2009-1	Serre			620	1000	180	1040	640	840	140
2009-2	Transhumance			320	940	180	3060	3300	600	160
2009-3	Naturelle					2	550	24	22	18
2009-4	Naturelle				246	12	332	96	38	20
2009-5	Naturelle			70	1034	1172	1124	60	6	10
2009-6	Naturelle			1758	2022	1390	955	498	452	144
2010-1	Serre				410	1610	1410	1115	1095	1120
2010-2	Naturelle				38	84	62	82	122	62
2011-1	Serre				700	1380	3330	2930	2800	360

En 2009, lors du premier essai d'exposition contrôlée en serre, les insectes ont été capturés dans les champs infestés et relâchés sous les voiles abritant les épis. En serre, les conditions de vol sont toujours favorables, ce qui constitue le principal avantage de cette méthode. Cependant, si l'approvisionnement en femelles prêtes à pondre se fait par capture aux champs, il reste dépendant des conditions météorologiques. C'est pourquoi en 2009, même en conditions contrôlées (essai 2009-1), les classes de précocité 5 et 9 de l'essai n'ont pas pu être caractérisées de façon certaine. En 2010, la période de vol a couvert l'ensemble des épiaisons en serre, et des résultats complets ont pu être obtenus contrairement à l'essai de plein champ. En 2011, le modèle prévisionnel annonçait une émergence très précoce des cécidomyies. La croissance des plantes cultivées en serre a dès lors été accélérée pour que l'épiaison des variétés coïncide avec les vols et les captures. La couverture des épiaisons a, de nouveau, été complète. Durant les années qui ont suivi (2012, 2013), une application concrète du modèle prévisionnel des émergences a consisté à provoquer des émergences échelonnées par des arrosages séquentiels de conteneurs remplis de terre infestée. Grâce à ce système, des insectes prêts à pondre ont pu être obtenus à volonté, et pendant toute la période nécessaire.

9.3.2. Evaluation de la résistance variétale à *S. mosellana*

Pour chaque variété testée, les résultats ont été considérés en relation avec leur classe de précocité. Les niveaux d'infestation obtenus par variété ont été validés sur base du niveau d'infestation le plus élevé obtenu pour la variété de même classe de précocité de l'essai considéré. La limite de validation d'une classe a été arbitrairement fixée à 200 larves/100 épis pour la variété la plus infestée de cette classe (Tableau 36).

Sur base des cotations validées, les variétés ont été réparties en trois classes de sensibilité : sensibles, peu sensibles et résistantes. Les variétés sensibles ont atteint au moins une fois la moitié du niveau d'infestation maximal obtenu par une variété appartenant à la même classe de précocité (Tableau 37). Les variétés résistantes ont, au moins à deux reprises, obtenu un niveau d'infestation inférieur à 5 % du niveau maximum de leur classe de précocité. Elles ne doivent également jamais avoir obtenu une cote supérieure à ces 5 %. Les variétés peu sensibles sont celles qui disposent d'au moins deux cotations validées mais qui n'entrent dans aucun des deux statuts précités. Les variétés pour lesquelles un seul essai a été réalisé sans démontrer la sensibilité de la variété, n'ont pas été classées.

Tableau 37 : identification et confirmation de variétés résistantes

	Niveau d'infestation par rapport au mode de la classe de précocité	Nombre de cotation validée
Variétés sensibles	Au moins 1 fois > 50 %	Minimum 1
Variétés peu sensibles	Toujours < 50 % mais > 5 % pour au moins une cotation	Minimum 2
Variétés résistantes	Toujours < 5 %	Minimum 2
Variétés partiellement caractérisées	< 50 %	Maximum 1

Sur les onze essais analysés, neuf ont permis de caractériser des variétés en ce qui concerne leur comportement face aux attaques de *S. mosellana*. Parmi ces neuf essais, tous ont été suffisamment infestés pour la classe de précocité moyenne mais les informations sont plus rares concernant les variétés tardives. Pour la dernière classe de précocité, seuls trois essais ont été suffisamment infestés à cette période. Deux de ces trois essais avaient été réalisés en conditions contrôlées via des lâchers réguliers de cécidomyies.

Sur l'ensemble des quatre années, 374 variétés ont été testées dont la plupart à plusieurs reprises ; 172 d'entre elles ont été clairement caractérisées tandis que le statut des 202 autres demeure incertain (Tableau 38). Pour ces dernières, les niveaux d'infestation des essais pour leurs classes de précocité respective, ne furent pas suffisants pour nous permettre d'être catégoriques. Parmi les 172 variétés caractérisées, 22 se sont révélées résistantes. Ces variétés ne présentaient qu'au maximum quelques larves/100 épis, ce qui semble indiquer une résistance de type antibiotique, telle que décrite par la littérature. Certaines d'entre elles, appartiennent à la lignée des variétés anglaises comprenant le gène Sm1. Un bilan, actualisé en 2013, des variétés résistantes à *S. mosellana*, a été établi en incorporant les observations des instituts de recherche français

(Flodrops 2010b, Soenen 2012, ARVALIS) et anglais (Oakley 2005, ADAS ; Leaman, NIAB communication personnelle) ainsi que certaines données provenant des obtenteurs, en attente de confirmation officielle (Tableau 39).

A côté des 104 variétés sensibles, 46 ont été déterminées peu sensibles. Cette classe est tout aussi utile que la liste des variétés résistantes car ces variétés présentent peut-être d'autres voies de résistance plus durable qu'une résistance basée sur un gène ou sur la production d'une simple molécule. Ces résistances partielles pourraient provenir, par exemple, d'une diminution de l'attractivité des épis, d'une accélération de la phase sensible rendant la variété moins exposée aux attaques, d'éléments morphologiques contrariant la mobilité des femelles ou des larves⁶³, ou de facteurs encore inconnus. Il n'a pas été possible, dans le cadre du présent travail, d'identifier les mécanismes responsables de ces résistances.

⁶³ Un de ces mécanismes a été identifié au cours de l'étude. La variété de froment "Lion" était très cultivée en Belgique durant les années 2007-2012. Elle était présente dans tous les essais d'évaluation au champ et a dès lors pu être testée à de nombreuses reprises (présence dans 7 essais). A chaque fois, le niveau d'infestation était 3 fois plus faible que celui des variétés ayant la même précocité et donc exposées de la même façon à *S. mosellana*. L'observation au binoculaire a permis de mettre en évidence la localisation anormale des œufs au dos de la glume, et non entre la glume et la glumelle comme c'est généralement le cas. La variété présente une caractéristique morphologique assez rare constituée d'une pubescence marquée des bords de glumes et de glumelles. Vraisemblablement, ces poils gênent l'oviposition sous la glume, les femelles pondant alors à l'extérieur, où les œufs sont nettement plus exposés aux pluies, aux prédateurs et à la dessiccation.

Tableau 38 : bilan de l'évaluation des comportements variétaux face à *S. mosellana*

Variétés sensibles		Variétés peu sensibles	Variétés résistantes	Variétés partiellement caractérisées			
Aconel	Madrigal	Actros	Allie	Achat	Charger	Jarbas	Profilus
Adequat	Maxwell	Akteur	Altigo	Akratos	Chatelet	Kadu	Punch
Adonis	Mercato	Alchemy	Altramont	Akzent	Claire	Kaltop	Qualibo
Albiano	Mulan	Alitis	Amaretto	Aligre	Colonia	Kelvin	Quattro
Aldric	Multi	Alves	Azzerti	Alixan	Compliment	Kerubino	Raspail
Apache	Nuage	Amply	Blasco	Ami	Constance	KWS Meilo	Razzano
Ararat	Olivart	Amundsen	Boregar	Andes	Corbeil	Lancelot	Reaper
Aztec	Ordeal	Anthem	Calisto	Antille	Cordiale	Landrel	Richepain
Blason	Orpheus	Anthus	Contender	Antonius	Creativ	Legat	Royssac
Brando	Paladain	Bermude	Ephoros	Arezzo	Cubus	Leiffer	Rytmic
Campari	Palladio	Buteo	Glasgow	Aristote	Deben	Lektri	Samurai
Campus	Paradis	Celebration	Koreli	Arminius	Dekan	Levis	Santana
Carenius	Pegassos	Corvus	KWS Madryn	Aron	Delmare	Lexus	Sequoia
Carisma	Pepidor	Cottage	Lear	Asketis	Dinosor	Liessart	Seyrac
Centenaire	Pericles	Discus	Oakley	Astuce	Domus	Lieven	Shamrock
Cezanne	Pernel	Enorm	Qplus	Atama	Dream	Limes	Sheldon
Champion	Petrus	Esket	Robigus	Atoll	Drifter	Ludwig	Skalmeje
Chevalier	Piastre	Farandole	Scout	Atomic	Duxford	Madrid	Skater
Dimension	Plectrum	Foxtrott	Viscount	Atrium	Edison	Maestro	Sobi
Dorian	Popstart	Franck	Warrior	Attlass	Einstein	Magister	Sokrates
Drees	Potenzial	Frodin	Xenos	Audace	Elegant	Magnus	Soleil
Edgar	Premio	Hardi	Zanatan	Aurele	Elephant	Malacca	Solstice
Espart	Promessa	Hausman		Avantage	Elvis	Manital	Sombrero
Euclide	Proxima	Henrik		Bagatelle	Emerald	Matrix	Sponsor
Expert	Rockystart	Incisif		Balance	Empire	Maxi	Stigg
Fioretto	Rollex	Inspiration		Balthazar	Epidoc	Melkior	Striker
Florett	Rustic	Kaspart		Baltimor	Equation	Melon	Subtil
Folio	Sahara	Kodex		Bantam	Equilibre	Mendel	Supral
Fortis	Salomo	KWS Horizon		Barbee	Equinox	Mermory	Symbio
Garantus	Sankara	KWS Ozon		Barok	Estivus	Messenger	Taft
Gaugain	Schamane	Lion		Bastide	Evasion	Meunier	Tapidor
Global	Scor	Manager		Battalion	Excellenz	Milvus	Tataros
Goncourt	Selekt	Ministre		Battant	Flair	Monty	Tilburi
Hekto	Soissons	Papageno		Biscay	Fourmi	Mozes	Toreador
Hermann	Solution	Patrel		Boncap	Fridolin	Nemocart	Tourmalin
Homeros	Sophytra	Phare		Boomer	Gaston	Nijinski	Transit
Impression	Spirit	Privileg		Boston	Gatsby	Nirvana	Triso
Intense	Tabasco	Quebon		Brillant	Gecko	Nucleo	Turkis
Intérêt	Taldor	Renan		Brompton	Genesis	Omart	Turpin
Invicta	Tarkus	Retro		Bussard	Globus	Opus	Tyvek
Iridium	Thesée	Rosario		Cactus	Gravitas	Orator	Virtuose
Istabraq	Toisondor	Smuggler		Cadenza	Gulliver	Ornicar	Vivant
Julius	Tremie	Sogood		Cama	Harald	Orvantis	Wasmo
Kalahari	Tuareg	Tommi		Caphorn	Hatrick	Ouragan	Welford
Katart	Tukan	Tulsa		Capnor	Hereford	Pactole	Zappa
Ketchum	Tybalt	Visage		Capo	Herzog	Pajero	Zebedee
Koch	Unicum			Capvern	Hobbit	Paledor	
KWS Pius	Urban			Caribou	Hybred	Panorama	
KWS Radius	Vasco			Cassius	Hymack	Parador	
Lincoln	Virilor			Certo	Hyperion	Paroli	
Locomo	Waldorf			Cetus	Igor	Perfactor	
Louisart	Winnetou			Chagall	Intact	Pirineo	

Tableau 39 : récapitulatif des variétés résistantes en Europe (sources présentées page 137)

Variétés	Années d'inscription	Sources officielles			Sources Obtenteurs
		Royaume-Uni	Belgique	France	
		NIAB	CRA-W	ARVALIS	
Allez-y	2010			X	
Altigo	2007		X	X	
Amaretto	2002		X		
As de coeur	2010				X
Avatar	2010				X
Azzerti	2009		X	X	
Barok	2009			X	
Blasco	2002		X		
Boregar	2008		X	X	
Brompton	2004	X	X		
Carlton	2001	X			
Conqueror	2007	X			
Contender	2006	X	X		
Cougar	2011	X			
Denman	2009	X			
Enorm	2002		X		
Ephoros	2004		X		
Farandole	1999		X		
Gatsby	2005	X	X		
Glasgow	2004	X	X	X	
Horatio	2011	X			
Kipling	2004	X			
Koch	2003		X		
Koreli	2006		X	X	
KWS Madryn	2011		X		
KWS Podium	2009			X	
KWS Santiago	2009	X			
KWS Target	2010	X			
Lear	2007		X	X	
Leeds	2011	X			
Magister	2005		X		
Monterey	2010	X			
Monty	2006		X		
Oakley	2006	X	X	X	
Oxebo	2010			X	
Qplus	2007	X	X		
Renan	1989			X	
Robigus	2002	X	X	X	
Rubisco	2011			X	
Scout	2007	X	X		
Skalmeje	2003		X		
Tobak	2011				X
Torch	2010	X			
Viscount	2007		X	X	
Warrior	2009		X	X	
Wasmo	2000		X		
Welford	2002	X			
Welland	2005	X			
Xenos	2002		X		
Zanatan	2006		X		

9.4. Conclusion

Comme le chapitre 8, le neuvième et dernier chapitre est consacré au froment et à ses interactions avec la cécidomyie orange. Deux problématiques y ont été successivement développées. La première concerne l'impact de la cécidomyie orange sur l'évaluation des variétés. La seconde, plus classique, présente les résultats de la recherche de variétés résistantes à la cécidomyie orange.

Avant de constituer un critère de sélection dans le cadre de l'amélioration variétale, la cécidomyie orange était déjà présente dans les essais variétaux, mais bien souvent, à l'insu des expérimentateurs. Dans les essais, le phénomène de coïncidence peut selon les années altérer les rendements des variétés précoces ou tardives. Par ailleurs, la cécidomyie orange peut également être responsable d'un biais bien plus important désigné, dans ce travail, sous le terme de "phénomène de concentration". Ce biais expérimental affecte les variétés les plus précoces des essais. Il se manifeste lorsque les insectes sont présents dans le champ d'essai, dès avant les premières épiaisons. Les premières pontes se concentrent alors sur les premiers épis visibles du champ d'essai entraînant pour ces variétés, des pertes de rendements sans commune mesure avec les pertes observées dans les champs cultivés par les agriculteurs.

En vue de détecter d'éventuelles variétés résistantes, trois méthodes d'exposition des froments à la cécidomyie orange ont été testées. Une seule d'entre elles a permis d'obtenir des résultats fiables à chaque utilisation : l'exposition des plantes en serre à des insectes issus d'élevages. Cette méthode permet de maîtriser les deux principaux problèmes rencontrés lors de ces évaluations : les conditions météorologiques nécessaires aux pontes et la présence de jeunes adultes en nombre suffisant.

Depuis 2009, plusieurs centaines de variétés et de lignées ont pu ainsi être caractérisées avec certitude et d'autres le seront vraisemblablement dans un avenir proche. Cette maîtrise des émergences obtenue grâce à l'identification des facteurs nécessaires au développement de l'insecte, devrait également favoriser les études portant sur la compréhension des mécanismes de résistance des plantes.

Conclusion générale et perspectives

A l'origine, ce projet s'était donné pour objectif d'appréhender les risques que la cécidomyie orange du blé présentait pour les cultures. Il s'agissait principalement de localiser les sources, d'en mesurer les niveaux de populations et d'établir les seuils à partir desquels les effectifs de cécidomyie orange pouvaient devenir dommageables pour les cultures de froment.

Les expérimentations et découvertes progressives sur les mécanismes de l'émergence ont singulièrement élargi les perspectives du projet initial : d'une notion de risque défini au moment des vols, nous sommes passés progressivement à une prévision de l'éventualité d'un risque plusieurs semaines avant les vols. Par ailleurs, le suivi des infestations de cécidomyie orange en parcelles expérimentales, nous a conduits à remettre en question le système d'évaluation du potentiel de rendement des variétés.

Nous résumons, ci-dessous, d'une part, les bénéfices agronomiques concrets nés de cette étude et, d'autre part, les perspectives de recherche qui en découlent.

- **Apports théoriques et pratiques de cette thèse**

- **Les mécanismes d'émergence et l'utilisation du piège à phéromone**

L'utilisation du piège à phéromone, délocalisé des "champs-cibles" vers les "champs-sources" dépourvus de couvert pouvant retenir les mâles, a permis d'obtenir de nombreux patterns d'émergences dans des situations diverses. L'examen de ces patterns a conduit aux notions de "synchronisation" et de "vague d'émergence". Ces notions ont, à leur tour, permis d'établir un lien direct entre les émergences et les pluies les précédant de 160 DJ mesurés en base 7°C. Ces pluies inductrices de la dernière phase du développement, vraisemblablement la nymphose, définies par l'acquisition préalable d'une somme de température et le dépassement d'une température-seuil, constituent une découverte originale de ce travail.

- **Un modèle prévisionnel fiable**

En Europe, les connaissances acquises sur la cécidomyie orange ont toujours été le fruit d'études à long terme reposant en grande partie sur des observations de terrain. Au début du 20^{ème} siècle, H.G. Barnes a consacré près de trente années de carrière à l'observation des cécidomyies, dont la cécidomyie orange ; ses travaux sont à la base des connaissances actuelles sur le comportement et la phénologie des cécidomyies. Dans les années septante, T. Basedow a allié les observations de terrain et les expérimentations en laboratoire ; il a mis en place le premier modèle prévisionnel des émergences des adultes comportant deux phases d'accumulation de températures. Plus récemment, dans les années nonante, J. Oakley a émis l'hypothèse d'une température-seuil nécessaire à la pupaison.

Notre étude s'inscrit dans la continuité de ces différents travaux. Ceux-ci ont largement inspiré le nouveau modèle prévisionnel qui tire sa particularité de la compréhension du rôle des pluies inductrices. Il constitue un nouvel outil pour la lutte intégrée. A ce jour, le modèle a prouvé son efficacité aussi bien durant les sept dernières saisons au champ que lors des trois années de validation en conditions contrôlées, où les émergences ont été induites par des arrosages (S. Chavalle, communication personnelle). Depuis 2011, les agriculteurs wallons sont informés de

l'imminence des émergences de *S. mosellana* par les avertissements du CADCO. Lorsque la coïncidence n'est pas rencontrée, les traitements sont évités. Lors des années à coïncidence favorable à l'insecte, il est conseillé aux agriculteurs de descendre dans leurs champs et d'évaluer la pression du ravageur.

- *Une évaluation plus objective des variétés de céréales*

Une autre avancée permise par ce travail, a été la mise en évidence de l'impact de la cécidomyie orange sur le système d'évaluation des variétés réalisées en petites parcelles. Partout où se pratique la création variétale, des variétés précoces ont été abandonnées en cours de sélection, refusées durant l'inscription, ou sous-estimées dans les essais de vulgarisation, sans relation avec leurs aptitudes agronomiques. La méconnaissance de la cécidomyie orange et du phénomène de concentration des pontes, est responsable de ce biais expérimental majeur. En Wallonie, le problème étant désormais connu, des avertissements sont envoyés aux responsables d'essais lorsque les émergences ont lieu juste avant les premières épiaisons, scénario dans lequel ce biais expérimental peut survenir.

- *Pistes de recherche et perspectives*

Au terme de cette étude, de nombreuses questions demeurent sans réponse. En voici résumées quelques-unes qui sont, tantôt des hypothèses nées de tendances observées, tantôt des perspectives de recherche plus concrètes mais qui demandent à être finalisées.

- *Notion de diapause et besoin en froid*

Dans l'élaboration du modèle prévisionnel, la question du besoin en froid n'a pas été étudiée. La cécidomyie orange du blé est une espèce univoltine : la seule période propice à la nutrition des larves se réduit au remplissage des grains de céréales c'est-à-dire maximum un mois par an. Pour cette raison, la larve, une fois au sol, entre en diapause. La notion de diapause est généralement définie comme un arrêt de développement ou un repos physiologique, programmé génétiquement avec l'objectif de résister à des facteurs défavorables. Dans le cas présent, ces facteurs ne seraient pas le froid mais au contraire, les conditions propices à l'émergence qui provoqueraient la sortie des insectes en fin d'été ou en automne, période où les chances de reproduction seraient vouées à l'échec vu l'absence d'hôte au stade requis. La période de froid ou d'absence de températures chaudes peut dès lors être vue comme une composante du réveil de diapause. La durée et l'intensité de cette période sont apparues très variables selon les études et ce fut également le cas dans nos expérimentations durant lesquelles nous avons obtenu des adultes à partir de larves n'ayant subi qu'une période de 23 jours à 7°C. Une hypothèse serait que cette période dépend des conditions de températures auxquelles les larves auraient été exposées durant l'été. Cela permettrait peut-être d'expliquer cette variabilité. En attendant plus de précision, le modèle débute arbitrairement au 1^{er} janvier et son fonctionnement donne satisfaction.

- *Taux d'émergence des adultes*

La proportion d'insectes émergeant du sol est globalement la même que celle des larves quittant leur cocon. Pratiquement, ces deux notions sont quasi équivalentes. Dans la thèse, les facteurs impliqués dans la détermination du taux d'émergence ne sont pas discutés car aucun n'a pu être supporté par des valeurs significatives. Cependant des tendances semblent se dessiner. La sortie

des larves de leur cocon est conditionnée par une période humide qui doit survenir dans les semaines qui suivent l'acquisition de la première somme de température. Il est donc logique que ce qui influence la quantité et la répartition de l'eau dans le sol puisse influencer le taux d'émergence. C'est vraisemblablement le cas des précipitations, de la texture du sol, du couvert en place et du type de travail du sol.

En dehors de leur influence sur la répartition de l'eau, certains de ces facteurs pourraient également avoir un rôle plus direct sur les larves. Pour le couvert et la culture, certaines relations plantes-insectes pourraient influencer le taux de sortie des larves. Le seul indice que nous ayons pu mettre en évidence et qui soutienne cette hypothèse est que, chaque année, les captures de cécidomyie orange sur champ de lupin étaient bien plus nombreuses que pour les autres cultures. C'est évidemment insuffisant et des études spécifiques seraient nécessaires pour vérifier cette hypothèse.

Un deuxième paramètre fortement influencé par la nature du sol, le couvert et le travail du sol, est la température. On connaît l'impact de ce facteur sur la vitesse de développement de l'insecte. Ce paramètre est donc grandement responsable des dates d'émergence mais n'influence globalement pas le taux d'émergence. Cependant, des essais en conditions contrôlées ainsi que l'observation de différences des taux d'émergences en fonction des profondeurs d'enfouissement des larves, suggèrent que l'amplitude de variation nycthémérale de température favoriserait la sortie des larves de leur cocon. Ce phénomène pourrait jouer pour les larves se trouvant à proximité de la surface du sol, un rôle de signal de la sortie de l'hiver.

Un dernier paramètre connu pour influencer le taux d'émergence est l'âge des larves (Affolter 1990). Nos observations semblent confirmer que les larves plus anciennes ont une tendance moindre à quitter leur cocon. Cette tendance renforcerait la persistance d'une réserve de larves dans le sol. Ceci présenterait au moins deux avantages : d'une part, une répartition des risques vis-à-vis de conditions climatiques défavorables et d'autre part, un renforcement du brassage génétique par l'accouplement d'individus de générations distinctes. Les mécanismes qui rendent les larves de moins en moins sensibles aux stimuli de sortie des cocons restent actuellement inconnus.

▪ Notions quantitatives du risque

Dans la thèse, les notions quantitatives ont été régulièrement évitées. Aucun seuil de tolérance n'est proposé : ni pour les populations du sol, ni pour le nombre d'adultes émergeant ou capturés, ni pour le nombre de femelles sur épi en période de ponte. La principale raison en est que ce travail nous a amené à relativiser ces notions de seuil. Le risque existe pratiquement toujours, un sol faiblement infesté peut provoquer des pertes bien plus importantes qu'un sol très infesté. Le taux d'émergence n'est rien sans une coïncidence favorable. Cette même coïncidence n'implique de dégâts que si les conditions de vols permettent les pontes. Le devenir des pontes dépend de la plante-hôte... De plus, la gestion du risque présenté par la cécidomyie, ne doit pas être dissociée de celle présentée pour les autres ravageurs des céréales tels que les pucerons et les criocères. La gestion intégrée prend ici tout son sens. La prévision d'une coïncidence doit être prise en compte dans la décision, et le positionnement d'éventuels traitements. En présence abondante de pucerons justifiant un traitement insecticide, celui-ci peut être positionné au début de l'épiaison afin de protéger également la culture, des cécidomyies. En l'absence de ravageurs autres que la cécidomyie, il sera nécessaire de définir un seuil de traitement. Au Royaume-Uni, le seuil préconisé est atteint

lorsqu'une femelle de cécidomyie peut être comptée tous les six épis (Bruce et Lesley 2008). Notre étude a montré que ce seuil doit être nuancé et évalué, suivant les conditions météorologiques prévues durant la période d'épiaison qui permettront ou non les pontes. Pour tous ces seuils, on ne peut se résoudre à ne considérer qu'un nombre d'insectes. Il faudrait peut-être définir des indicateurs composites qui associeraient ces effectifs avec des prévisions météorologiques, des notions de sensibilité des cultures avoisinantes... Les idées sont assez faciles à exposer, leur mise en œuvre s'avèrera sans doute plus laborieuse.

- *Influence du régime de travail du sol*

La cécidomyie orange passe la plus grande partie de son existence sous terre. Globalement, les effectifs ne semblent pas vulnérables durant cette phase. Pourtant, certains travaux du sol semblent pouvoir nuire à l'insecte. Si le labour ne fait que postposer les sorties de cocons d'une année à l'autre, un travail du sol réalisé durant la phase de pupaison, semble pouvoir détruire une très grande proportion des cécidomyies. Ce type d'intervention est envisageable au moment de l'implantation des cultures de maïs ou de pomme de terre. Ces destructions restent actuellement le résultat de coïncidences fortuites, les niveaux d'infestations actuels rencontrés dans nos régions ne justifiant pas de telles mesures.

- *Influence du parasitisme et de la prédation sur le niveau des populations*

La dynamique des populations de *S. mosellana* est fortement influencée par les interactions hôtes-parasites et dans une moindre mesure par les relations proies-prédateurs (Barnes 1956). Ces aspects n'ont pas reçu, dans cette étude, toute l'attention qu'ils méritent. Cependant certaines observations concernant l'abondance des parasitoïdes dans nos régions ont pu être réalisées. Ainsi en mai et juin 2007, sur l'ensemble d'une vingtaine de champ, plus de 30.000 *Macroglènes penetrans* ont été capturés au moyen de pièges passifs collants de couleur jaune. De même, l'analyse des larves de cécidomyies extraites d'un champ expérimental fortement infesté en 2008 a révélé un taux de parasitisme de 25 %. Tous les parasitoïdes n'étaient pas de l'espèce *M. penetrans*, un grand nombre d'entre eux appartenaient à une autre famille d'Hyménoptères, les Platygastriidae. Ce taux de parasitisme est conséquent mais peut sans doute être plus important certaines années et dans d'autres situations. Des études spécifiques permettraient sans doute d'estimer, de comprendre et de valoriser le potentiel que représentent les parasitoïdes dans la régulation des populations de *S. mosellana*.

- *Rôle de la cécidomyie orange dans la transmission des maladies d'épis*

Dans le milieu des années nonante, une forte corrélation entre les infestations de cécidomyies et la pression de fusariose a été rapportée à plusieurs reprises au Canada (Couture et al. 1995; Mongrain et al. 1997). L'hypothèse de l'implication des cécidomyies dans la dissémination de la maladie a été testée et semble se confirmer (Mongrain et al. 2000). En Belgique, deux formes de fusariose prédominent : *Fusarium graminearum* et *Microdochium nivale*. Aux périodes coïncidant avec la présence des cécidomyies (épiaison, floraison), la contamination naturelle des épis se fait par la pluie et le vent via la forme sexuée du champignon, les ascospores. Celles-ci sont portées par l'air et il est peu vraisemblable que les cécidomyies influencent leur dissémination sur les épis. L'expérience de Mongrain concernait la contamination par les formes asexuées de reproduction, les conidies, ainsi que par des fragments de mycélium. Les conidies n'apparaissent qu'en juillet sur les épis. Elles sont responsables des infections secondaires. Or à cette période, il n'y a généralement

plus de cécidomyie adulte. Pour cette raison, il est peu probable que la cécidomyie soit responsable de la dissémination de *F. graminearum*. Par contre, *M. nivale* se développe également sur feuille, dès avant l'épiaison. Cette espèce présente des conidies et du mycélium sur les feuilles pendant la phase épiaison et floraison. Il est, dès lors, possible que les infestations de cécidomyies favorisent la dissémination de *M. nivale*. Des expériences multi-disciplinaires seront nécessaires pour explorer cette question.

- Transposition du modèle à d'autres régions du monde ainsi qu'à d'autres cécidomyies

L'Europe n'est pas la seule région concernée par les dégâts de cécidomyie orange : les agriculteurs nord-américains et asiatiques y sont également confrontés, souvent d'ailleurs à des niveaux d'infestation bien supérieurs à ceux rencontrés sur notre continent. Les composantes du nouveau modèle prévisionnel, peuvent vraisemblablement être conservées pour les différentes populations de cécidomyie orange, quelle que soit leur localisation. Néanmoins, étant donné la capacité d'adaptation de l'espèce, des ajustements seront sans doute nécessaires pour les valeurs des différentes composantes du modèle : la valeur de la première de deux sommes de température et celle de la température-seuil, par exemple, pourraient être concernées par ces adaptations. Une mise en commun d'un protocole de comparaison de la phénologie des émergences entre les équipes de recherches européennes, asiatiques et américaines permettraient certainement de clarifier la situation et d'identifier les mécanismes d'adaptation de l'espèce.

Par ailleurs, la découverte de la relation pluie inductrice-émergence ouvre également une voie d'étude pour les insectes dont la survie dépend de la synchronisation entre l'émergence des adultes et le stade de développement des plantes-hôtes. Comme le montre la réinterprétation des travaux de Basedow, la cécidomyie jaune du blé (*Contarinia tritici*) fait vraisemblablement partie de ces espèces pour lesquelles des pluies constituent un signal de synchronisation. D'autres cécidomyies encore, présentent la même phénologie. La cécidomyie des poirettes, *Contarinia pyrivora*, par exemple, est également une espèce univoltine, hivernant dans le sol et dont les adultes doivent émerger et pondre avant la floraison des poiriers pour espérer réussir à se multiplier. Là, également, des études spécifiques seront nécessaires pour comparer la phénologie des différentes espèces.

- Caractérisation de variétés résistantes et mise en place d'une plate-forme d'évaluation de la résistance

Notre étude du comportement des variétés de froment a, certes, permis de proposer des alternatives intéressantes aux agriculteurs mais n'a pas amélioré la compréhension des mécanismes de résistance d'une manière générale. De plus, les connaissances acquises pour les variétés étudiées, risquent de disparaître avec les retraits progressifs de ces dernières.

Malgré cela, l'étude du comportement variétal des froments face à *S. mosellana*, peut désormais bénéficier d'un nouvel outil. En effet, la compréhension du mécanisme d'émergence a permis de mettre au point un système d'élevage de la cécidomyie orange, dans lequel les émergences d'adultes sont provoquées selon les besoins et notamment tout au long de la période durant laquelle les variétés de céréales doivent être exposées aux pontes. Ce système d'évaluation est utilisé en routine depuis 2 ans au CRA-W. Outre l'identification des variétés résistantes, cet élevage devrait également permettre d'améliorer nos connaissances quant aux mécanismes de résistance des variétés et des espèces céréalières.

Globalement, cette thèse a donc permis une meilleure compréhension de la phénologie de la cécidomyie orange, qui est, d'ores et déjà, exploitée dans la protection des cultures et dans la recherche de lignées résistantes, en Wallonie. Ce travail pourra, je l'espère, aider chercheurs et producteurs dans la compréhension et l'appréhension des risques liés aux cécidomyies, orange ou autres, dans les différentes régions du monde.

Liste des abréviations et définitions des sigles

ADAS : Agricultural Development Advisory Service

ARVALIS : Arvalis n'est pas un acronyme c'est la nouvelle dénomination de l'ITCF.

BS : betterave sucrière

BBCH : Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie

CADCO : Centre Agricole pour le Développement des cultures Céréalières et Oléo-protéagineuses.

CRA-W : Centre wallon de Recherches agronomiques

CV : coefficient de variation

DJ : degré-jour

E : date d'émergence

FH : froment d'hiver

FUSAGx : Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux

ha : hectare

HR : humidité relative

IGN : Institut Géographique National

IRM : Institut Royal Météorologique

ITCF : Institut technique des céréales et des fourrages

n : effectif

NIAB : National Institute of Agricultural Botany

OBEV : Office Belge d'Examen des Variétés

OCVV : Office Communautaire des Variétés Végétales

p : probabilité

P : précipitations en litre par m²

P. de T. : pomme de terre

r² : coefficient de corrélation

Rdt : rendement

SDT : somme de température

T° : température de l'air en °Celsius mesurée sous abri et à 1 m de hauteur

T°max : température maximum observée sur la journée

T°min : température minimum observée sur la journée

T°moy : température moyenne journalière de l'air calculée par (Tmax + Tmin)/2

T°moy₃₆ : température moyenne journalière de l'air calculée par (la somme de 36 mesures de T° effectuée sur la journée) /36

Tables des illustrations

Figures

Figure 1 : arbre taxonomique des Cecidomyiinae	6
Figure 2 : nombres d'espèces de cécidomyies décrites par zone zoogéographique	6
Figure 3 : schéma de larve de <i>S. mosellana</i>	9
Figure 4 : cycle biologique de <i>Sitodiplosis mosellana</i>	12
Figure 5 : période de sensibilité du froment face aux pontes de <i>S. mosellana</i>	16
Figure 6 : localisation des stations météorologiques utilisées.....	21
Figure 7 : diagramme ombrothermique pour la station de Gembloux.....	22
Figure 8 : carte des textures de surface des sols	24
Figure 9 : carte illustrant le niveau d'hydromorphie des sols en Wallonie.....	25
Figure 10 : répartition de la culture de froment en Wallonie.....	26
Figure 11 : suivi des conditions météorologiques et des périodes d'épiaison de 2007 à 2010.....	30
Figure 12 : localisation des sites expérimentaux	31
Figure 13 : carte IGN de la région de Gembloux et des zones d'expérimentation	32
Figure 14 : carte des parcelles choisies pour les observations, et des alentours	33
Figure 15 : distribution des populations dans le sol au cours des années 2007 à 2009	39
Figure 16 : niveaux d'infestation observés sur la région de Gembloux en 2008 et 2009	40
Figure 17 : relation entre l'infestation des épis et l'infestation du sol après saison en 2008.....	41
Figure 18 : répartition spatiale de l'infestation dans quatre champs.....	42
Figure 19 : relation entre l'infestation des épis et les captures au piège à phéromone	48
Figure 20 : relation entre l'infestation du sol avant les vols et les captures au piège à phéromone	50
Figure 21 : répartition des captures aux pièges à phéromone en 2009	52
Figure 22 : nombre de captures par piège sur l'ensemble de la saison des vols 2008.	53
Figure 23 : relation entre les conditions de vol et le nombre de captures de mâles dans un champ de lin	55
Figure 24 : observation des vols de femelles en fonction de l'humidité relative et de la température.	57
Figure 25 : dispositif de l'essai "déplacement des cécidomyies"	59
Figure 26 : évolution des captures de mâles en fonction du temps et des pièges.	60
Figure 27 : sex-ratio des insectes capturés au Vortis au 30 mai 2009 dans les trois champs étudiés	63
Figure 28 : comparaison des profils de captures entre champs différents en 2008.....	68
Figure 29 : relation entre le début des captures de <i>S. mosellana</i> et les cultures en 2008	70
Figure 30 : périodes de vol de 2007 à 2012	72
Figure 31 : patterns de captures 2009 établis au piège à phéromone selon les cultures en place	74
Figure 32 : patterns d'émergences observés en 2008 et 2010 pour quatre régions pédoclimatiques distinctes	76
Figure 33 : schéma des modèles à une période de capitalisation de température	80
Figure 34 : schéma du modèle à deux périodes de capitalisation de température.....	81
Figure 35 : schéma du modèle à seuil de température	82
Figure 36 : moyennes et écarts-types des SDT nécessaires à la sortie des cocons selon les températures	92
Figure 37 : cumul de température à différentes profondeurs de sol dans un champ de froment	93
Figure 38 : relation entre les pluies et les émergences d'adultes de 2007 à 2010	97
Figure 39 : schéma du modèle proposé.....	101
Figure 40 : T° moy de l'air et T° moy du sol	103
Figure 41 : écart entre la SDT comptabilisée durant la pupaison selon les températures de l'air ou du sol.....	104
Figure 42 : écart entre les composantes des SDT obtenues par deux méthodes de calcul.....	105
Figure 43 : évolution des stades de développement du froment en fonction des SDT.	107
Figure 44 : relecture des résultats sur le déclenchement de l'émergence chez <i>C. tritici</i>	109
Figure 45 : relation entre niveau d'infestation des épis et dégâts	114

Figure 46 : comparaison des périodes de vols et des épiaisons des froments de 2007 à 2012	117
Figure 47 : niveau d'infestation en fonction des variétés classées par ordre décroissant de précocité	121
Figure 48 : rendement moyen mesuré avec et sans insecticide	121
Figure 49 : gain de rendement relatif obtenu par le traitement insecticide	122
Figure 50 : impact de l'infestation sur le rendement	122
Figure 51 : effet de la coïncidence sur l'évaluation des variétés	128
Figure 52 : infestation des parcelles de la collection variétale du CRA-W en 2009	129
Figure 53 : infestation des parcelles d'essai en 2009 à Lonzée	131
Figure 54 : rendements de l'essai post-inscription de Lonzée en 2009	132

Photos

Photo 1 : cécidomyie jaune du blé	7
Photo 2 : cécidomyie équestre	7
Photo 3 : mouche de Hesse	7
Photo 4 : cécidomyie orange du blé	7
Photo 5 : femelle de <i>S. mosellana</i>	8
Photo 6 : mâle de <i>S. mosellana</i>	8
Photo 7 : ovipositeur de <i>S. mosellana</i>	8
Photo 8 : appendices génitaux mâles de <i>S. mosellana</i>	8
Photo 9 : larve de <i>S. mosellana</i> (L3)	9
Photos 10 et 11 : pupes de <i>S. mosellana</i>	10
Photo 12 : cocon de <i>S. mosellana</i>	11
Photo 13 : accouplement de <i>S. mosellana</i>	11
Photo 14 : femelle déposant des œufs	11
Photo 15 : larve de <i>S. mosellana</i> sur un grain de blé	11
Photo 16 : femelle de <i>S. mosellana</i>	14
Photo 17 : cécidomyies orange dans une toile d'araignée	18
Photo 18 : femelle de <i>M. penetrans</i> sur épis	18
Photos 19 et 20 : larves de cécidomyies orange parasitées par des Platygastriidae	18
Photo 21 : sonde utilisée pour les prélèvements.	38
Photos 22 et 23 : pièges delta dans champs de froment et de pomme de terre	46
Photo 24 : relevé de la plaque engluée	46
Photo 25 : diffuseur de phéromone	46
Photo 26 : plaque engluée après captures	46
Photo 27 : mâle englué	46
Photo 28 : vortis (aspirateur à insecte)	62
Photo 29 : enregistreur de température	91
Photo 30 : comparaison de grains sains et de grains endommagés par des larves de <i>S. mosellana</i>	114
Photo 31 : essai d'évaluation variétale à Lonzée en 2008	127
Photo 32 : test de résistance des variétés de froment	134

Tableaux

Tableau 1 : plantes-hôtes connues de <i>S. mosellana</i>	16
Tableau 2 : taux de parasitisme (tous parasitoïdes confondus) observés chez <i>S. mosellana</i>	19
Tableau 3 : moyennes mensuelles des températures exprimées en °C d'écart par rapport à Gembloux	23
Tableau 4 : précipitations mensuelles moyennes exprimées en mm d'écart par rapport à Gembloux	23
Tableau 5 : stades de développement du froment (Tottman et Broad 1987) et travaux associés	28
Tableau 6 : exploitations agricoles et gestion du travail du sol	33
Tableau 7 : rotation pratiquée pour les champs dont les populations de <i>S. mosellana</i> ont été suivies	34
Tableau 8 : niveaux d'infestation élevés mesurés dans le sol	36
Tableau 9 : coordonnées des champs dont sont issus les prélèvements de terre	37
Tableau 10 : coordonnées des champs suivis par pièges à phéromone	47
Tableau 11 : captures aux pièges et infestation des épis en 2008	48
Tableau 12 : captures au piège et infestation des sols pour au cours des saisons 2008 et en 2009	50
Tableau 13 : soirées favorables aux vols.....	55
Tableau 14 : soirées défavorables aux vols	55
Tableau 15 : données météorologiques des soirées de la période des vols 2009.....	57
Tableau 16 : niveau d'infestation des champs du dispositif et des champs voisins	58
Tableau 17 : déroulement de la saison des vols	60
Tableau 18 : champs suivis pour comparer les vols en fonction des cultures	67
Tableau 19 : coordonnées des champs suivis pour la comparaison des périodes de vols de 2007 à 2012.....	71
Tableau 20 : n° des champs retenus pour comparer captures et émergences en 2009	73
Tableau 21 : répartition des champs suivis.....	75
Tableau 22 : champs pris en compte pour le calcul des dates représentatives de l'émergence.....	82
Tableau 23 : définition des dates représentant l'émergence.....	83
Tableau 24 : application des modèles prévisionnels existants	83
Tableau 25 : évaluation de la pertinence des modèles existants	84
Tableau 26 : évaluation de la pertinence des modèles ajustés	86
Tableau 27 : conditions de l'expérience "somme de température".....	90
Tableau 28 : champs et captures illustrant la relation "pluie inductrice-vague d'émergence"	96
Tableau 29 : comparaison des délais et des SDT entre pluie inductrice et vague d'émergence induite.....	98
Tableau 30 : pertinence du modèle proposé.....	102
Tableau 31 : SDT séparant la première période pluie inductrice de la première vague d'émergence.....	108
Tableau 32 : exemples de niveaux élevés d'infestation	115
Tableau 33 : proportion des émergences ayant eu lieu durant les épiaisons	118
Tableau 34 : température et humidité relative de l'air à 20h les soirs de ponte de 2008 et 2009	119
Tableau 35 : coordonnées et informations sur les différents essais	135
Tableau 36 : nombre de larves/100 épis de la variété les plus infestée de chaque classe de précocité	136
Tableau 37 : identification et confirmation de variétés résistantes	137
Tableau 38 : bilan de l'évaluation des comportements variétaux face à <i>S. mosellana</i>	139
Tableau 39 : récapitulatif des variétés résistantes en Europe	140



- Abram, M. **2008**. Crop watch: Orange wheat blossom midge hysteria hits south and east. Farmers weekly, <http://www.fwi.co.uk/articles/02/06/2008/110680/crop-watch-orange-wheat-blossom-midge-hysteria-hits-south-and-east.htm> (consulté le 18.12.2013).
- 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.
- Aitkenhead, P., Barnes, H. F. et Heath, G. W. **1955**. Soil sampling for wheat blossom midges. *Plant Pathology* 4 (4) : 143-146.
- Arnason, J. T., Gale, J., Conilh de Beyssac, B., Sen, A., Miller, S. S., Philogene, B. J. R., Lambert, J. D. H., Fulcher, R. G., Serratos, A. et Mihm, J. **1992**. Role of phenolics in resistance of maize grain to stored grain to the stored grain insects, *Prostephanus truncatus* (Horn) and *Sitophilus zeamais* (Motsch.). *Journal of Stored Products Research* 28 (2) : 119-126.
- Barker, P. S. et McKenzie, R. I. H. **1996**. Possible sources of resistance to the wheat midge in wheat. *Canadian Journal of Plant Science* 76 (4) : 689-695.
- 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. **1930**. On the biology of the gall midges (Cecidomyiidae) attacking meadow foxtail-grass (*Alopecurus pratensis*), including the description of new species. *Annals of Applied Biology* 17 (2) : 339-366.
- Barnes, H. F. **1931**. The sex ratio at the time of emergence and the occurrence of unisexual families in the gall midges (Cecidomyiidae: Diptera). *Journal of Genetics* 24 (2) : 225-234.
- Barnes, H. F. **1932**. Studies of fluctuations in insect populations. *Journal of Animal Ecology* 1 (1) : 12-31.
- 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. **1952b**. Studies of fluctuations in insect populations XIII. An improved method of ascertaining the correct date to sample when assessing larval infestations of the wheat blossom midges. *Annals of Applied Biology* 39 (3) : 374-378.
- Barnes, H. F. **1956**. Gall midges of cereal crops. Dans : Gall midges of economic importance, L. Crosby Lockwood & Sons. London, 29-82.
- Basedow, T. **1971**. Zur morphologisches unterscheidung der beiden weizengallmückenarten *Contarinia tritici* (Kirby, 1798) und *Sitodiplosis mosellana* (Géhin, 1857) (Diptera: Cecidomyiidae). *Nachrichtenblatt der Deutschen Pflanzenschutzdienstes (Braunschweig)* 23 : 129-133.
- Basedow, T. **1972**. Relations between host plants and phenology of the gall midges *Contarinia tritici* (Kirby) and *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 71 (4) : 359-367.
- Basedow, T. **1973**. Neue Untersuchungen über eiablage, wirtschaftliche schadensschwelle und bekämpfung der weizengallmücken (Diptera: Cecidomyiidae). *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 73 (3) : 238-251.
- 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. **1977b**. Über den flug der weizengallmücken *Contarinia tritici* (Kirby) und *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Dipt., Cecidomyidae) in beziehung zur windrichtung und zu weizenfeldern. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 83 (1-4) : 173-183.
- Basedow, T. et Gillich, H. **1982**. Untersuchungen zur prognose des auftretens der weizengallmücken *Contarinia tritici* (Kirby) und *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera, Cecidomyidae). II. Faktoren, die ein schadauftreten der mücken verhindern können. *Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz und Umweltschutz* 55 (6) : 84-89.
- Basedow, T. et Schütte, F. **1971**. Untersuchungen zum überliegen der weizengallmücken *Contarinia tritici* (Kirby) und *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) in Norddeutschland im somer 1970. *Nachrichtenblatt der Deutschen Pflanzenschutzdienstes (Braunschweig)* 23 (1) : 4-8.
- Basedow, T. et Schütte, F. **1974**. Über die unterschiedliche anfälligkeit einiger winterweizensorten gegenüber den bieten weizengallmückenarten *Contarinia tritici* (Kirby) und *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Dipt.: Cecidomyidae). *Nachrichtenblatt der Deutschen Pflanzenschutzdienstes* 26 : 122-125.
- Basedow, T. et Schütte, F. **1982**. Die populationsdynamik de weizengallmücken *Contarinia tritici* (Kirby) und *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Dipt., Cecidomyidae) in zwei norddeutschen weizenanbaugebeiten von 1969 bis 1976. *Zoologische Jahrbuecher Abteilung für Systematik Oekologie und Geographie der Tiere* 109 : 33-82.
- Berzonsky, W. A., Ding, H., Haley, S. D., Harris, M. O., Lamb, R. J., McKenzie, R. I. H., Ohm, H. W., Patterson, F. L., Pearis, F. B., Porter, D. R., Ratcliffe, R. H. et Shanower, T. G. **2003**. Breeding wheat for resistance to insects. *Plant Breeding Reviews* 22 : 221-296.
- Birkett, M. A., Bruce, T. J., Martin, J. L., Smart, L. E., Oakley, J. et Wadhams, L. J. **2004**. Responses of female orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana*, to wheat panicle volatiles. *Journal of Chemical Ecology* 30 (7) : 1319-1328.
- Blight, M. M., Le Metayer, M., Pham Delegue M.-H., Pickett, J. A., Marion-Poll, F. et Wadhams, L. J. **1997**. Identification of floral volatiles involved in recognition of oilseed rape flowers, *Brassica napus* by honeybees, *Apis mellifera*. *Journal of Chemical Ecology* 23 (7) : 1715-1727.
- Bock, L., Legrain, X., Veron, P., Bracke, C. Bah, B. et Lejeune, P. **2008**. Carte Numérique des sols de Wallonie - version 1.2. Laboratoire de Géopédologie et Unité de gestion des ressources forestières et des milieux naturels. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Belgique.
- Borkent, A. **1989**. A review of the wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) in Canada. Technical Bulletin 1989-5E. Research Branch, Agriculture Canada. Ottawa, 24 pages.
- Borodin, D. N. **1915**. The first report on the work of the Entomological Bureau and a review of the pests of the Govt of Poltava in 1914. The Entomological Bureau of the govt. of the Zemstvo of Poltava. Poltava, 87 pages.
- Botha, J., Szito, A. et Hardie, D. **2005**. Industry biosecurity plan for the grains industry. Threat-specific contingency plan : Hessian fly. Plant Health Australia, 21 pages.
- Bruce, T. J. A. et Smart, L. E. **2008**. Orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana*, management. *Outlooks on Pest Management* 20 (2) : 89-92.
- Buckbauer, G., Jirovetz, L., Wasicky, M. et Nikiforov, A. **1993**. Headspace and essential oil analysis of apple flowers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 41 (1) : 116-118.
- Carl, K. et Affolter, F. **1984**. The natural enemies of the wheat blossom midges, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) and a proposal for its biological control in Canada. CIBC rapport non publié, 9 pages.
- Cheng, W.-N., Li, X.-L., Wu, J.-X. et Li, J.-J. **2006**. A method on resistance evaluation of wheat varieties to *Sitodiplosis mosellana*. *Agricultural Research in the Arid Areas* 24 (6) : 44-47.
- 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.
- Dajoz, R. **1974**. Dynamique des populations. Masson & Cie. Paris, 301 pages.

- Dagnelie, P. **1998**. Statistique théorique et appliquée. Tome 2 : Inférence statistique à une et à deux dimensions. De Boeck Université. Bruxelles, 659 pages.
- 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 Guo, Y. **1993**. Studies on the relationship between the components and the structure of wheat kernel and the resistance mechanism to wheat midge. *Scientia Agricultura Sinica* 26 (1) : 56-62.
- 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.
- Ding, H. et Ni, H. **1994**. Study on the technique for evaluation of resistance of wheat varieties to wheat midge. *J. Crop Genet. Res.* 4 (34-36).
- Doane, J. F., Braun, M. P., Olfert, O. O., Affolter, F. et Carl, K. **2002**. *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). Dans Biological Control Programmes in Canada 1981-2000, édité par P. G. Mason et J. T. Huber: CABI publishing, 246-249.
- Doane, J. F., Mukerji, M. K. et Olfert, O. O. **2000**. Sampling distribution and sequential sampling for subterranean stages of orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) in spring wheat. *Crop Protection* 19 (6) : 427-434.
- 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.
- Doeksen, J. **1938**. De tarwegalmuggen *Contarinia tritici* Kirby en *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera, Cecidomyiidae) in Nederland. Verslagen van de Technische tarwe commissie. Drukkerij gebroeders Hoitsema. Groningen, 296 pages.
- Dorchin, N. **2008**. Gall midges (Diptera: Cecidomyiidae). Dans : Encyclopedia of Entomology, édité par J. L. Capinera: Springer, 1576-1580.
- 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.
- Elliott, B., Olfert, O. O. et Hartley, S. **2011a**. Management practices for wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). *Prairie Soils & Crops Journal* 4 : 8-13.
- Elliott, R. H., L. Mann, et O. Olfert. **2009**. Calendar and degree-day requirements for emergence of adult wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) in Saskatchewan, Canada. *Crop Protection* 28 (7) : 588-594.
- Elliott, R. H., Mann, L. et Olfert, O. O. **2011b**. Calendar and degree-day requirements for emergence of adult *Macroglanes penetrans* (Kirby), an egg-larval parasitoid of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). *Crop Protection* 30 (4) : 405-411.
- 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.
- Faber, W. **1970**. Zur problematik der schadensprognose bei getreidegallmücken. *Pflanzenarzt* 23 (5) : 40-43.
- Faulds, C. B. et Williamson, G. **1999**. The role of hydroxycinnamates in the plant cell wall. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 79 (3) : 393-395.

- Felt, E. P. 1912. Observations on the identity of the wheat midge. *Journal of Economic Entomology* 5:286-289.
- Floate, K. D., Doane, J. F. et Gillott, C. **1990**. Carabid predators of the wheat midge (Diptera: Cecidomyiidae) in Saskatchewan. *Environmental Entomology* 19 : 1503-1511.
- Flodrops, Y., et Taupin, P. **2010**. Blé tendre. Lutter contre la cécidomyie orange. *Perspectives Agricoles* 365 : 46-50.
- Fritzsche, R. et Wolfgang, H. **1959**. Beeinflussung des saatgutwertes und der backqualität des weizens durch weizengallmückenbefall. *Zeitschrift fuer Pflanzenkrankheiten Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz* 66 : 645-653.
- Gaafar, N., El-Wakeil, N. et Volkmar, C. **2011**. Assessment of wheat ear insects in winter wheat varieties in central Germany. *Journal of Pest Science* 84 (1) : 49-59.
- 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.
- Ganehiarachchi, 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.
- Gate, P. **1995**. Ecophysiologie du blé. Technique & Documentation Lavoisier. Paris, 430 pages.
- 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.
- 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.
- Hao, Y.-N., Miao, J., Wu, Y.-Q., Gong, Z.-J., Jiang, Y.-L., Duan, Y., Li, T., Cheng, W.-N. et Cut, J.-X. **2013**. Flight Performance of the Orange Wheat Blossom Midge (Diptera: Cecidomyiidae). *Journal of Economic Entomology* 106 (5) : 2043-2047.
- 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.
- Herms, D. A. **2004**. Using degree-days and plant phenology to predict pest activity. *IPM (Integrated Pest Management) of Midwest Landscapes*: 49-59.
- Herting, B. et Simmonds, F. J. **1978**. A catalogue of parasites and predators of terrestrial arthropods. Section A Host or Prey/enemy. Volume V. Neuroptera, Diptera, Siphonaptera. CAB. London, 156 pages.
- Hinks, C. F. et Doane, J. F. **1988**. Observations on rearing and diapause termination of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) in the laboratory. *Journal of Economic Entomology* 81 (6) : 1816-1818.
- Holland, J. M. et Thomas, S. R. **2000**. Do polyphagous predators help control orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) in winter wheat? *Journal of Applied Entomology* 124 (7) : 325-330.
- Husberg, G. B. et Kurppa, S. **1988**. Occurrence and chemical control of wheat blossom midges, *Sitodiplosis mosellana* and *Contarinia tritici*, in Finland. *Växtskyddsnotiser* 52 (5): 117-123 .
- Imms, A. D. **1957**. A general textbook of entomology including the anatomy, physiology, development and classification of insects. Methuen & co. Ltd. London, 886 pages.
- Jacquemin, G., Chavalle, S. et De Proft, M. **2014**. Forecasting the emergence of the adult orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) in Belgium. *Crop Protection* 58 : 6-13.

- Johansson, E. **1936**. Studier och Forsok Rorande Vetemyggorna *Contarinia tritici* Kirby och *Clinodiplosis mosellana* Géhin. samt deras Bekampande. IV. Undersokning av vetemyggornas parasiter: 1. Svalof och Weibullsholm aren 1932-1935 antraffade arter. Medd. Vaxtskyddanst. Stockholm 15 : 1-19.
- Katayama, J., Fukui, M. et Sasaki, H. **1987**. Seasonal prevalence of adult occurrence and infestation of the wheat blossom midge. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology* 31(1) : 46-50.
- Keller, S. et Wilding, N. **1985**. Entomophthora brevinucleata SP. NOV. (Zygomycetes, Entomophthoraceae), a pathogen of gall midges (Diptera: Cecidomyiidae). *Entomophaga* 30 (1) : 55-63.
- Kirby, E. J. M., Appleyard, M. et Fellowes, G. **1985**. Effect of sowing date and variety on main shoot leaf emergence and number of leaves of barley and wheat. *Agronomie* 5 (2) : 117-126.
- Kirby, W. **1798**. XX. History of Tipula Tritici, and Ichneumon Tipulae, with some observations upon other Insects that attend the wheat, in a letter to Thomas Marsham. Esq. Sec. L. S. *Transactions of the Linnean Society of London* 4 (1) : 230-239.
- Klee, H. **1936**. Zur Kenntnis der Weizengallmücken *Contarinia tritici* Kirby und *Sitodiplosis mosellana* Géhin (aurantiaca Wagner). Inaugural Dissertation. Kiel, 102 pages.
- Knodel, J. **2012**. Wheat midge update. In Crop and pest report June 2012: North Dakota State University (NDSU), <http://www.ag.ndsu.edu/cpr/entomology/wheat-midge-update-6-28-12> (consulté le 12.12.2013).
- Knodel, J. et Ganahiarachchi, M. **2008**. Integrated pest management of the wheat midge in North Dakota – E1130. NSDU Extension Service 2008 (23/12/2013).
- Krieg, A. et Franz, J. M. **1989**. Lehrbuch der biologischen schädlingbekämpfung. Edité par P. Parey, Berlin, 302 pages.
- 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., 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., Gavloski, J. E., Kaminski, L. A. et Olfert, O. O. **2002**. Making control decisions for *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) in wheat (Gramineae) using sticky traps. *The Canadian Entomologist* 134 (6) : 851-854.
- Lamb, R. J., Wise, I. L., Olfert, O. O., Gavloski, J. et Barker, P. S. **1999**. Distribution and seasonal abundance of *Sitodiplosis mosellana*. (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae). *The Canadian Entomologist* 131 (3) : 387-397.
- Latteur, G. et Nicolas, J. **1987**. Piège à succion et prognose aphidienne en céréales. Aphid migration et forecasting "Euraphid" systems in European Community countries. Conférence
- Latteur, G. et Oger, R. **1987**. Principes de base du système d'avertissement relatif à la lutte contre les pucerons des froments d'hiver en Belgique. In Conférence internationale sur les ravageurs en agriculture, édité par ANPP. Paris, 129-136.
- Latteur, G. et Oger, R. **1990**. Winter wheat aphids in Belgium : prognosis and dynamics of their populations. Integrated control in cereal crops. Conférence de Göttingen.

- Leonardi, G. **1927**. Elenco delle specie di insecti dannosi e loro parassiti ricordati in Italia fino all'anno 1911, édité par F. Portici, 301 pages.
- Li, J.-J., Li, X.-L. et Cheng, W.-N. **2004**. Analysis and evaluation of resistance in wheat ideoplasm to wheat blossom midge (*Sitodiplosis mosellana*). *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* 32 (2) : 17-20.
- Li, Y.-M., Wu, J.-X., Cheng, W.-N. Li, Y.-P. et Hou, J. **2006**. Determination of juvenile hormone in wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). *Acta agriculturae Boreali-occidentalis Sinica* 15 (4):73-75.
- Liatukas, Z., Ruzgas, V., et Smatas, R. **2009**. *Sitodiplosis mosellana* - a new winter wheat pest in Lithuania. *Ekologiya* 55 (3-4) : 215-219.
- Liu, C.-Z., Zhou, S.-R., Wei, H.-X. et Lin, Y. **2002**. Studies on the spatial patterns of *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) and its applications. *Journal of Gansu Agricultural University* 6 (2) : 204-208.
- Lübke, M. **1982**. Untersuchungen zum Massenwechsel, zur Schädwirkung, überwachung und bekämpfung von weizengallmücken. Dissertation am Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg : 137 pages.
- Lunn, G. D., Scott, R. K., Kettlewell, P. S. et Major, B. J. **1995**. Effects of orange wheat blossom midge (*Sitodiplosis mosellana*) infection on pre-maturity sprouting and Hagberg falling number of wheat. *Aspects of Applied Biology* 42 : 355-358.
- Maia, V. C. **2001**. The gall midges (Diptera: Cecidomyiidae) from three restingas of Rio de Janeiro State, Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia* 18 (2) : 583-629.
- Marchal, P. **1897**. Les cécidomyies des céréales et leurs parasites. *Annales de la société entomologique de France* 66 : 1-105.
- McKeehen, J. D., Busch, R. H. et Fulcher, R. G. **1999**. Evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) phenolic acids during grain development and their contribution to Fusarium resistance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47 (4) : 1476-1482.
- 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.
- McMaster, G. S. et Wilhelm, W. W. **1998**. Is soil temperature better than air temperature for predicting winter wheat phenology? *Agronomy Journal* 90 : 602-607.
- MeteoBelgique. 2013. Cartes du climat de la Belgique. <http://www.meteobelgique.be/article/articles-et-dossiers/30/148-cartes-du-climat-de-la-belgique.html> (consulté le 10.01.2014).
- Miao, J., Wu, Y.-Q., Gong, Z.-J., He, Y.-Z., Duan, Y. et Jiang, Y.-L. **2013**. Long-distance wind-borne dispersal of *Sitodiplosis mosellana* Géhin (Diptera: Cecidomyiidae) in Northern China. *Journal of Insect Behavior* 26 (1) : 120-129.
- Miller, B. S. et Halton, P. **1960**. The damage to wheat kernels caused by the wheat blossom midge (*Sitodiplosis mosellana*). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 12 (5) : 391-398.
- 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.
- Mukerji, M. K., Olfert, O. O. et Doane, J. F. **1988**. Development of sampling designs for egg and larval populations of the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin)(Diptera: Cecidomyiidae), in wheat. *The Canadian Entomologist* 120 (6) : 497-505.
- Ni, H., et Ding, H. **1994**. Dynamics and integrated management strategy of wheat midge. *Chinese Agricultural Science Bulletin* 10 : 20-23.
- Nijveldt, W. et Bokhorst, H. J. **1973**. Over het optreden en de economische betekenis van de gele en de oranje tarwegalmug *Contarinia tritici* Kirby en *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) in Nederland. Instituut voor. Plantenziekten. Onderzoek Wageningen Mededeling 629 : 59-79.

- Oakley, J. N. **1994**. Orange wheat blossom midge: a literature review and survey of the 1993 outbreak. HGCA Research Review N°28, 51 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., 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., 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., Elliott, R. et Hartley, S. **2009**. Non-native insects in agriculture: strategies to manage the economic and environmental impact of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana*, in Saskatchewan. *Biological Invasions* 11 (1) : 127-133.
- Olfert, O. O., Doane, J. F. et Braun, M. P. **2003**. Establishment of *Platygaster tuberosula*, an introduced parasitoid of the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana*. *The Canadian Entomologist* 135 (2) : 303-308.
- Olfert, O. O., Mukerji, M. K. et 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. *The Canadian Entomologist* 117 (5) : 593-598.
- Pierre, E. **2013**. Ephytia : Hyperbase de données en Protection des plantes. Les ravageurs des cultures et leurs dégâts. INRA, <http://ephytia.inra.fr/fr/P/114/hypp> (consulté le 15. 01.2014).
- 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.
- Prasad, S. N. **1969**. Measures employed to control gall-midge infestation – 3. *Biological control. Cecidologia Indica* 4 (1) : 43-57.
- Qu, Z., Wen, S., Zhao, Y., Gao, S. et Wang, L. **2007**. Identification and utilization of wheat varieties resistant to *Sitodiplosis mosellana* *Plant Protection* 33 (4) : 33-35.
- Ralph, J., Hatfield, R. et Grabber, J. **1997**. Ferulates and diferulates as nucleation sites for lignification in grasses. *Polyphénols Actualités* 17 : 4-6.
- Reeher, M. M. **1945**. The wheat midge in the Pacific Northwest. U.S. Department of Agriculture Circular N° 732, 8 pages.
- 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.
- Sanderson, E. D. **1915**. Insect pests of farm, garden and orchard. John Wiley & sons. New-York, 684 pages.
- 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., Lamb, R. J., Wise, I. L. et Olfert, O. O. **2004a**. An interspersed refuge for *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) and a biocontrol agent *Macroglanes penetrans* (Hymenoptera: Pteromalidae) to manage crop resistance in wheat. *Bulletin of Entomological Research* 94 (2) : 179-188.
- Smith, M. A., Wise, I. L. et Lamb, R. J. **2004b**. Sex ratios of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae): implications for pest management in wheat (Poaceae). *Bulletin of Entomological Research* 94 (6) : 569-575.
- 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.
- Smith, M. A. H., Wise, I. L. et Lamb, R. J. **2007**. Survival of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) on wheat (Poaceae) with antibiosis resistance: implication for the evolution of virulence. *The Canadian Entomologist* 139 (1) : 133-140.
- Smith, M. M. et Hartley, R. D. 1983. Occurrence and nature of ferulic acid substitution of cell-wall polysaccharides in graminaceous plants. *Carbohydrate Research* 118 (1):65-80.
- Southwood, T. R. E., et Siddorn, J. W. **1965**. The temperature beneath insect emergence traps of various types. *Journal of Animal Ecology* 34 (3) : 581-585.
- Speyer, W., et Waede, M. **1956**. Feinde und parasiten der weizengallmücken (Beitrag zur Biologie und Bekämpfung von *Contarinia tritici* Kirby und *Sitodiplosis mosellana* Géhin. *Anzeiger für Schädlingkunde* 29 (12) : 185-191.
- Stark, A. et Wetzell, T. **1987**. Fliegen der gattung *Platypalpus* (Diptera, Empididae) bisher wenig beachtete Prädatoren im Getreidebestand. *Journal of Applied Entomology* 103 (1) : 1-14.
- Sun, S., Ni, H., Ding, H., Qu, Z. et Zhang, S. **1998**. Studies on the mechanism of biochemical resistance of wheat to wheat midge. *Scientia Agricultura Sinica* 31 : 24-29.
- Svärdson, G. **1940**. Studies and Experiments on the Wheat Gall-midges, *Contarinia tritici* and *Sitodiplosis mosellana*, and their-Control. VII. Dispersal of the Wheat Gall-midges by Wind. Meddelanden fran Statens Vaxtskyddsanstalt, 38 pages.
- Tedin, H. **1917**. Skada af hvetemygglarver pa tvaradskorn 1916. *Sveriges Utsadesforenings Tidskrift* 27 : 34-42.
- 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.
- Thornhill, R. et Alcock, J. **1983**. The evolution of insect mating systems. Harvard university Press. Cambridge, 547 pages.
- Tottman, D. R. et Broad, H. **1987**. Decimal code for the growth stages of cereals. *Annals of Applied Biology* 110 (2) : 683-687.
- Wagner, B. **1866**. *Diplosis tritici* Kirby ap. und *Dipl. aurantiaca* n. sp. *Stettiner Entomologische Zeitung*. 27 : 65-96 et 169-187.
- Weir, A. H., Bragg, P. L., Porter, J. R. et Rayner, J. J. **1984**. A winter crop simulation model without water on nutrients limitations. *Journal of Agricultural Science* 102 (2): 371-382.
- 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. et Lamb, R. J. **2004**. Diapause and emergence of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) and its parasitoid *Macroglanes penetrans* (Hymenoptera: Pteromalidae). *The Canadian Entomologist* 136 (1) : 77-90.
- Wise, I. L., Lamb, R. J. et Smith, M. A. H. **2001**. Domestication of wheats (Gramineae) and their susceptibility to herbivory by *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae). *The Canadian Entomologist* 133 (2) : 255-267.

- Wise, I. L. **2002**. Susceptibility of hulled and hulless barley (Gramineae) to *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae). *The Canadian Entomologist* 134 (2) : 193-203.
- Wright, A. T. et Doane, J. **1987**. Wheat midges infestation of spring cereals in northeastern Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science* 67 (1) : 113-120.
- Wu, Y. Q., Zhao, W. X. Jiang, Y. L. and Duan, Y. **2009**. Monitoring on adults of *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) with yellow sticky traps. *Acta Phytophyl Sinica* 36 (4) :381-382.
- Zheng, S. **1965**. Wheat midge. Agricultural Press. Beijing.