



BIO-STUDIES

ETUDES POUR LA PROTECTION
BIOLOGIQUE DES VEGETAUX

Etude des facteurs déterminant l'installation et le développement des insectes ravageurs en cultures légumières de plein champ pour le référencement de moyens agronomiques de lutte

Nathalie Bernard-Griffiths

01/10/2012



EcoPhytoSys-Légumes



Préambule

Cette étude a été réalisée par Nathalie Bernard-Griffiths (société Bio-Studies). Elle a été menée pour l'UMR IGEPP de l'INRA de Rennes sous la responsabilité scientifique de Pierre Glérant (INRA). Elle a été suivie au sein d'un comité associant Vincent Faloya (INRA), Anne-Marie-Cortesero (Université de Rennes 1) et Anne Le Ralec (Agrocampus Ouest). Cette étude s'inscrit au sein d'un programme de recherche-développement conduit par l'INRA pour des productions légumières durables et moins dépendantes des phytosanitaires.

EcoPhytoSys légumes est un programme de recherche-développement du GIS PIC leg associant l'INRA et la filière légumière de Basse-Normandie. Il repose sur une démarche collaborative entre scientifiques, techniciens, expérimentateurs régionaux et producteurs. Il a pour objectif l'évaluation en situation de production (12 parcelles réparties dans 9 exploitations de la Manche) de systèmes de cultures innovants, mobilisant des outils agronomiques pour que le producteur maintienne son revenu, en utilisant moins de phytosanitaires. Une première étape a consisté à réaliser un inventaire des outils agronomiques disponibles et des connaissances sur les phases de vie des bio-agresseurs. Il s'agissait d'optimiser les effets régulateurs des actions culturales et des moyens de lutte contre les bio-agresseurs, en les utilisant aux étapes du développement des bio-agresseurs, au cours desquelles ils sont les plus vulnérables. Un recueil bibliographique des connaissances scientifiques et techniques a été réalisé en ce sens sur 22 pathogènes et 8 insectes ravageurs principaux des cultures légumières dominantes de Basse-Normandie : poireau, carotte, salade et choux (recueil constitué en 2011 avec le soutien financier de France AgriMer). Ce travail sur les insectes ravageurs a été réalisé par Nathalie Bernard-Griffiths (société Bio-Studies) en 2011 et sert de base à cette étude des facteurs déterminant l'installation et le développement des insectes ravageurs en cultures légumières, pour le référencement de moyens agronomiques de lutte.

Sommaire

| | |
|---|------------|
| INTRODUCTION GENERALE..... | 4 |
| Contexte et enjeux | 4 |
| Les objectifs de l'étude | 4 |
| I- METHODES D'ETUDE..... | 6 |
| II- ETUDE GENERALE BASEE SUR LES CONNAISSANCES BIBLIOGRAPHIQUES ACTUELLES...9 | |
| 1- Influence du paysage sur les dynamiques de populations : des théories..... | 9 |
| a) Le paysage agricole, zone hétérogène et fragmentée | 9 |
| b) Les processus affectant les dynamiques des populations | 10 |
| c) L'échelle spatiale fonctionnelle d'une espèce | 12 |
| d) Rôle des habitats semi-naturels | 12 |
| 2- Influence des pratiques agricoles sur les dynamiques de populations | 14 |
| 3- La protection intégrée des cultures : importance de l'échelle espace-temps | 15 |
| 4- Rappels sur les cycles de développement des insectes : généralités | 18 |
| 5- Etat des connaissances sur le thrips du poireau <i>Thrips tabaci</i> (Lindeman)..... | 22 |
| a- Culture de poireaux | 22 |
| b- Traits de vie du thrips du poireau | 23 |
| c- Ennemis naturels connus du thrips du poireau | 27 |
| d- Facteurs de l'environnement et modes de gestion, favorables ou défavorables au développement du thrips du poireau et de ses ennemis naturels | 30 |
| 6- Etat des connaissances sur la mouche du chou <i>Delia radicum</i> (Linné)..... | 42 |
| a- Culture de choux | 42 |
| b- Traits de vie de la mouche du chou | 42 |
| c- Ennemis naturels connus de la mouche du chou | 52 |
| d- Facteurs de l'environnement et modes de gestion, favorables ou défavorables au développement de de la mouche du chou et de ses ennemis naturels | 55 |
| 7- Etat des connaissances sur la mouche de la carotte <i>Psila rosae</i> (F.) | 76 |
| a- Culture de carottes | 76 |
| b- Traits de vie de la mouche de la carotte | 76 |
| c- Ennemis naturels connus de la mouche de la carotte | 82 |
| d- Facteurs de l'environnement et modes de gestion, favorables ou défavorables au développement de la mouche de la carotte et de ses ennemis naturels | 84 |
| III- ETUDE DE TERRAIN..... | 96 |
| 1- Matériel et méthodes..... | 96 |
| 2- Résultats et discussion | 97 |
| 3- Conclusion | 97 |
| IV- DISCUSSION – CONCLUSION | 100 |
| V- ANNEXES | 108 |

Contexte et enjeux

La production de légumes frais en Normandie représente 8 460 ha, soit 4 % de la surface légumière française (hors pommes de terre). 82 % de cette surface est localisé en Basse-Normandie. La Manche constitue le 1^{er} département légumier normand et se situe au 10^{ème} rang des départements français pour sa surface légumière (chiffres de 2010, source <http://www.cra-normandie.fr/agricopie-legumes.asp> consulté en août 2012). Les cultures sont concentrées essentiellement sur 3 zones sur le littoral de la Manche (Val de Saire, région de Créances/côte Ouest Cotentin, Baie du Mont-Saint-Michel). Les légumes cultivés sont essentiellement les carottes, poireaux, choux, navets et salades.

Dans ces zones, les bio-agresseurs (pathogènes tels que champignons, bactéries et nématodes, insectes, adventices) sont nombreux et peuvent poser de sérieux problèmes de rendement et de qualité des légumes. Les **insectes** font partie des bio-agresseurs les plus gênants et ils sont responsables de dégâts rendant les légumes impropres à la vente. La production de légumes uniformes et « sans défaut » est une contrainte cruciale pour les producteurs et le recours aux produits phytosanitaires en particulier, pour lutter contre ces insectes est largement employé.

Cependant, l'utilisation de produits phytosanitaires a montré ses limites. En effet, les produits couramment utilisés en agriculture constituent d'abord un problème pour la santé des agriculteurs, premiers exposés à ces produits. De plus, ils peuvent générer des problèmes environnementaux (pollution des sols et de l'eau [nappes souterraines, rivières, étangs, ...])(Schwarzenbach, Egli et al. 2010). Par ailleurs, certains auteurs mentionnent l'inefficacité de certains insecticides vis-à-vis de certains insectes ravageurs de légumes, tels que la mouche de la carotte (Villeneuve, Maignien et al. 2010) ou certaines populations du thrips du poireau (Martin, Workman et al. 2003; Foster, Gorman et al. 2010). Enfin, le plan Ecophyto2018 préconise une diminution de 50% de l'utilisation des produits phytosanitaires d'ici 2018. Ainsi, de nombreuses substances actives sont supprimées. Il apparaît donc nécessaire d'identifier des méthodes de lutte, où la place des insecticides est la plus limitée possible.

Depuis les années 80, la protection intégrée recherche des solutions alternatives aux pesticides. Actuellement, les recherches se poursuivent dans cette voie dans différentes cultures (cultures de céréales, vergers, viticulture surtout) et elles tendent à prendre en compte, non plus seulement la parcelle cultivée mais le paysage environnant (autres zones cultivées et zones semi-naturelles) dans un système de cultures pluri-annuel. Dans ce contexte, le projet EcoPhytoSys-Légumes a pour ambition de proposer des systèmes de cultures légumiers économes en intrants et efficaces pour limiter les bio-agresseurs, en Basse-Normandie.

Les objectifs de l'étude

Dans le cadre du projet EcoPhytoSys-Légumes, notre étude a pour objectif d'analyser comment les insectes ravageurs arrivent et s'installent dans les parcelles cultivées, comment ils s'y développent et quels sont les facteurs impliqués dans ces phénomènes. Ainsi, elle devra **faire la liste des facteurs déterminant l'installation et le développement de chaque insecte ravageur** ; puis elle devra préciser (autant que possible) les déterminants principaux pour chaque ravageur, selon des critères qui seront explicités. En particulier, l'étude devra mettre en évidence (si c'est possible) les effets des pratiques culturales ou des états du milieu sur les différents ravageurs en fonction de leurs stades de développement et de la période considérée (étude qualitative).

Ce travail se limitera aux insectes ravageurs les plus problématiques en Basse-Normandie c'est-à-dire le thrips du poireau *Thrips tabaci*, la mouche du chou *Delia radicum* et la mouche de la carotte *Psila rosae*. L'étude ne traitera pas des pucerons des salades, en raison des perspectives données à ce projet, à savoir le programme « Dephy Expé » qui a été validé en 2012 et qui porte principalement sur les cultures de carottes,

poireaux et choux. Après une étude approfondie des connaissances bibliographiques sur ces insectes, une étude de terrain devra se prononcer sur les risques liés aux insectes dans 12 parcelles de producteurs dans la Manche.

L'originalité du travail est de prendre en considération non seulement la parcelle cultivée mais aussi le système de culture au sens large, avec ses successions culturales et l'environnement proche des parcelles. Alors que la littérature scientifique fait état de plusieurs études systémiques sur les insectes dans les agrosystèmes en arboriculture et en grandes cultures (céréales), peu d'études se sont intéressées aux insectes dans les systèmes de cultures légumiers. Le projet est donc intéressant de ce point de vue. Cependant, le défi à relever est important compte tenu de la complexité des systèmes légumiers.

A terme, cette étude devra permettre de mettre en évidence les leviers mobilisables dans la co-construction de prototypes de systèmes de cultures économes en intrants et capables de limiter la pression des insectes ravageurs.

Références bibliographiques

- Bianchi, F. J. J. A., C. J. H. Booij, et al. (2006). "Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control." Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences **273**(1595): 1715-1727.
- Foster, S. P., K. Gorman, et al. (2010). "English field samples of Thrips tabaci show strong and ubiquitous resistance to deltamethrin." Pest Management Science **66**(8): 861-864.
- Martin, N. A., P. J. Workman, et al. (2003). "Insecticide resistance in onion thrips (Thrips tabaci) (Thysanoptera : Thripidae)." New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science **31**(2): 99-106.
- Schwarzenbach, R. P., T. Egli, et al. (2010). "Global Water Pollution and Human Health." Annual Review of Environment and Resources **35**(1): 109-136.
- Villeneuve, F., G. Maignien, et al. (2010). "Ravageur Mouche de la carotte : Une année 2010 sous tension." Culture légumière **119**: 22-24.

Analyser comment les insectes ravageurs arrivent et s'installent dans les parcelles cultivées, comment ils s'y développent et quels sont les facteurs impliqués dans ces phénomènes nécessite de répondre à deux principales questions :

- Quelles sont les connaissances actuelles sur les insectes ravageurs de cultures et sur leur régulation naturelle ?
- Quelles sont les effets connus des pratiques culturales, des caractéristiques des parcelles et de leur environnement, sur les attaques de ravageurs et sur leurs ennemis naturels ?

Pour répondre à ces 2 questions, nous aurons tout d'abord une **approche théorique**.

Nous nous d'abord appuierons sur les concepts théoriques actuels expliquant comment le paysage influence les dynamiques de populations d'insectes dans les écosystèmes agricoles. De plus, nous exposerons l'influence des pratiques culturales sur les insectes ravageurs et les auxiliaires en général.

Puis pour chaque ravageur étudié (le thrips du poireau *Thrips tabaci*, la mouche du chou *Delia radicum* et la mouche de la carotte *Psila rosae*), nous rassemblerons diverses informations :

➤ **Culture**

Nous nous appuierons sur le calendrier des cultures en Basse-Normandie et sur les risques liés aux insectes, établis par le SILEBAN. S'il est disponible, nous exposerons un exemple d'itinéraire technique de la culture.

➤ **Traits de vie de l'insecte ravageur**

Nous indiquerons ici les stades de développement de l'insecte ravageur, leur périodes de présence et leur localisation, en lien avec les conditions climatiques rencontrées au cours de l'année. Nous préciserons les étapes clés du cycle de vie telle que l'hivernation, les sources d'insectes au printemps, la dispersion des adultes, et les habitats (cultivés et/ou non cultivés) nécessaires à la réalisation du cycle de vie (zones de reproduction, zone d'alimentation des adultes, plantes-hôtes alternatives connues). Nous indiquerons également la façon dont les insectes repèrent la culture plante-hôte et les dégâts qu'ils occasionnent.

➤ **Ennemis naturels connus de l'insecte ravageur**

Nous mentionnerons les ennemis naturels connus tels que les microorganismes entomopathogènes (bactéries, champignons, virus...), nématodes, insectes parasitoïdes et insectes prédateurs.

➤ **Facteurs de l'environnement et modes de gestion, favorables ou défavorables au développement de l'insecte ravageur et de ses ennemis naturels**

Nous préciserons ici l'effet des conditions extérieures (facteurs abiotiques) sur la présence et l'activité de l'insecte : facteurs climatiques favorables ou non (températures, précipitations, vent...), autres facteurs favorables ou non (photopériode, moment de la journée...).

Puis nous exposerons les effets possibles des pratiques culturales (ou modes de gestion) réalisées par le producteur, des caractéristiques pédo-climatiques des parcelles et de leur environnement proche, sur les attaques de l'insecte ravageur et ses ennemis naturels. Ces effets seront résumés sous forme d'un tableau selon une trame présentée dans le tableau I-1. Si possible, nous mettrons ces effets en lien avec le cycle de vie du ravageur, en particulier des stades de l'insecte.

Pour cette partie, nous nous appuierons sur les connaissances bibliographiques acquises au cours de l'étude « Inventaire des traits biologiques et écologiques des principaux insectes ravageurs des cultures légumières » (menée par la Société Bio-Studies du 27/10/10 au 18/04/11). Ces connaissances seront actualisées grâce à la documentation accessible à l'INRA Le Rheu, en ligne ou directement auprès des auteurs.

Tableau I-1 : Trame de tableau utilisé pour étudier les modes de gestion et les facteurs de l'environnement, favorables ou défavorables au développement de chaque insecte ravageur et de ses ennemis naturels

| Pratique culturale / mode de gestion | | Modalité | |
|---|---|---|--|
| Précédent | Rotation | Durée et position par rapport au cycle de développement de l'insecte | |
| | Sol nu, jachère | | |
| | Interculture ou engrais verts | | |
| Choix de la parcelle | Taille de la parcelle | | |
| | Espacement de la parcelle par rapport à des parcelles proches de même culture | | |
| | Environnement de la parcelle | Haies, bordures, bandes enherbées, zones boisées, rivière... (refuges ?) Pas de bordures, haies... | |
| Sol | Type de sol | | |
| | Texture du sol | | |
| | Travail du sol | Pas de labour | |
| | | Labour peu profond par rapport au cycle de développement de l'insecte - Binage buttage ... | |
| Labour profond par rapport au cycle de développement de l'insecte | | | |
| Culture | Variétés résistantes | | |
| | Date de semis/plantation | | |
| | Densité de plantation | | |
| | Largeur entre les rangs | | |
| | Stade sensible de la culture | Stade phénologique | |
| | | Taille des plantes | |
| | Date de récolte | | |
| Cultures pièges | | | |
| Apports : fertilisation, amendements | Apports | Fumier, matières organiques | |
| | | Soufre | |
| | | Autres : cendres, sable... | |
| Irrigation | faible | | |
| | importante | | |
| Cultures intercalaires (plantes compagnes) | | | |
| Couverts : paillages, mulchs | | | |
| Prévision des vols | Modèles de prévision | | |
| | Surveillance des vols et/ou des pontes (piégeage) | | |
| Traitements insecticides | Traitement des parties aériennes | | |
| | Traitement du sol | | |
| | Traitement des semences | | |
| | Modalités d'application (par bande, en granulés, moment...) | | |
| | Intervalles entre les applications | | |
| | Substances répulsives, réduisant la ponte ou le développement | | |
| Barrières physiques | Filets anti-insectes | Filets couvrants, bâches | |
| | | Filets verticaux | |
| Auxilliaires ou ennemis naturels | Champignons entomopathogènes | | |
| | Bactéries entomopathogènes | | |
| | Nématodes entomopathogènes | | |
| | Prédateurs | Favorisation des prédateurs naturels | |
| | | Lâchers inondatifs | |
| | Parasitoïdes | Favorisation des parasitoïdes naturels | |
| Conduite en cas d'attaques importantes | Arrachage de la culture | | |
| | Enfouissement | | |
| | Labour | | |

Une **approche de terrain** tentera de faire le lien entre les caractéristiques du paysage dans les zones agricoles de la Manche et les risques liés aux insectes ravageurs.

Les données nécessaires pour l'approche de terrain concernent 12 parcelles du réseau EcophytoSysLég (parmi les 57 existantes).

Dans un premier temps, pour chaque parcelle étudiée (« parcelle cible »), nous aurons besoin de différentes informations :

- **informations sur la parcelle** (coordonnées géographiques du centre de la parcelle, numéro de la parcelle du réseau EcophytoSys, zone (VDS Val de Saire, CO Côte Ouest, MSM Mont St Michel), nom de la parcelle, numéro de l'îlot, lieu-dit, canton)
- **cartographie de l'assolement** (dans un rayon de 500 m autour de la parcelle). La cartographie a déjà été réalisée à partir des photographies satellites de 2007, et comporte une carte avec les cultures présentes, les prairies permanentes, les zones humides, les zones naturelles (dunes, bois...) et les zones urbaines.
- **cartographie du réseau bocager**. La cartographie autour de la parcelle cible a déjà été décrite précisément, celle du paysage environnant a été décrite de façon simple (« haie » ou « talus ») (M. Renault, 2010).
- **historique des assolements**. Il est en général connu pour les parcelles du réseau EcophytoSysLég de 2008 à 2010.

Les données existantes sont renseignées dans un Système d'Information Géographique créé à l'aide du logiciel Quantum GIS 1.5 Tethys, par Mathilde Renault en 2010 ; elles devront être complétées ou mises à jour pour 2011 et 2012.

Dans un 2^{ème} temps, si c'est utile, nous tenterons de relier les caractéristiques des parcelles et de leur environnement avec l'impact des ravageurs. Ainsi, d'autres informations seront indispensables. D'une part, il s'agira de relever le maximum d'informations sur la parcelle cible auprès du SILEBAN, de coopératives (Agrial, GPLM) et/ou de producteurs :

- **caractéristiques de la parcelle cible** : type de sol, itinéraire technique, rotation, opérations menées, outils et produits utilisés (en particulier les pesticides), choix et contraintes du producteur, problèmes rencontrés (maladies, ravageurs...)...
- **caractéristiques des parcelles environnantes** : localisation des parcelles de la même culture l'année précédente (Brassicacae, Apiacées, Astéracées), problèmes rencontrés (maladies, ravageurs...), travail du sol post-récolte, utilisation d'insecticides...
- **caractéristiques précises des bordures des parcelles** : bandes enherbées, haies, talus, forêts, prairies, (hauteur, longueur, espèces botaniques les plus fréquentes...).

D'autre part, différentes mesures seront nécessaires :

- **suivis des plantes cultivées** : stades phénologiques, % de plantes attaquées par les insectes, rendements,...
- **suivis entomologiques des insectes ravageurs** (suivis des vols et des pontes, par le réseau de surveillance mis en place par le SILEBAN ?)
 - relevés du nombre de ravageurs adultes piégés (suivis des vols grâce aux pièges jaunes pour la mouche de la carotte, pièges bleus pour les thrips du poireau, coupelles jaunes pour la mouche du chou...)
 - et/ou comptage des insectes présents sur les plantes (pucerons sur les salades, ... ?)
 - relevés des différents stades présents : nombre d'œufs pondus (piège à feutrine pour la mouche du chou), nombre de larves présentes et/ou de nymphes/ pupes (mouches)
- **suivis entomologiques des ennemis naturels des ravageurs (auxiliaires)** :
 - estimation des taux de parasitisme (pupes de mouches parasitées, momies de pucerons (pucerons parasités))
- **estimation des prédateurs présents** (grâce à des pièges Barber)
- **relevés météorologiques** (températures, précipitations, vents...) de stations météorologiques proches.

1- Influence du paysage sur les dynamiques de populations : des théories

a) Le paysage agricole, un paysage hétérogène et fragmenté

Le paysage peut se définir comme : « le niveau d’organisation des systèmes écologiques, supérieur à l’écosystème ; il se caractérise essentiellement par son hétérogénéité et par sa dynamique gouvernée pour partie par les activités humaines » (Burel and Baudry 1999).

L’écologie du paysage a pour but de comprendre les relations entre les fonctionnements des systèmes écologiques et la structure des paysages, liée en particulier à la modification des paysages par l’Homme au cours du temps (pour l’agriculture, la sylviculture, l’urbanisation, les transports etc.) (Burel 2006). Le paysage apparaît donc morcelé, on parle de *mosaïque paysagère*. Celle-ci prend en compte différents éléments du paysage : zones cultivées diverses, boisements, haies, bâtis, routes, etc.

Le plus souvent dans nos régions, le paysage englobe de nombreux éléments différents : on dit que l’*hétérogénéité* des paysages est forte. De plus, ces éléments, au lieu d’occuper de vastes zones, peuvent être découpés en petites zones : on dit que la *fragmentation* est importante.

Ainsi, les écosystèmes agricoles (ou agroécosystèmes) constituent des paysages hétérogènes, dans lesquels les habitats des espèces animales sont fragmentés (figure II-1-1).

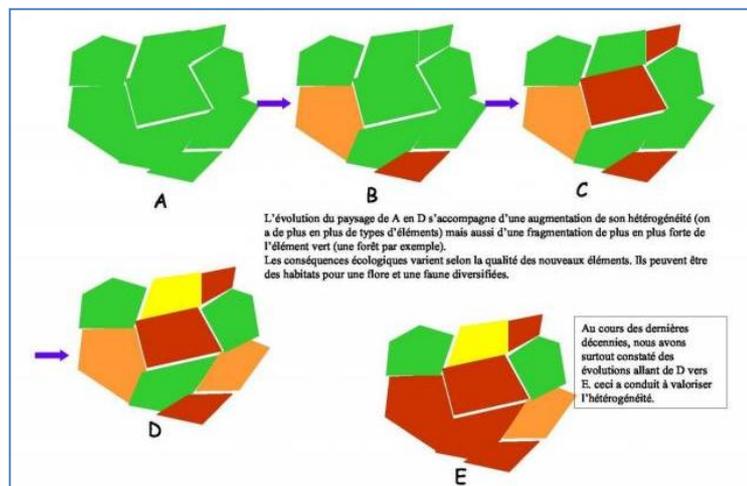


Figure II-1-1 : Hétérogénéité et fragmentation (Burel, 2006)

Sensu stricto, le terme « *habitat* » pour une espèce correspond à l’ensemble des conditions physiques et des ressources nécessaires à la réalisation du cycle de développement de cette espèce (Dennis, Shreeve et al. 2003).

On considère généralement que le *site d’habitat* ou « *tache d’habitat* » ou « *patch* » désigne plus précisément un emplacement géographique délimité, homogène pour certaines caractéristiques et utilisé par l’espèce. Ainsi, comme le montre la figure II-1-2, un paysage fragmenté comprend des taches d’habitat utilisées par les populations et des *éléments linéaires* reliant ces taches d’habitat (certains éléments linéaires peuvent jouer le rôle de corridors [cf. § II- 1) b]). Le reste du paysage non utilisé par l’espèce constitue la *matrice paysagère*.

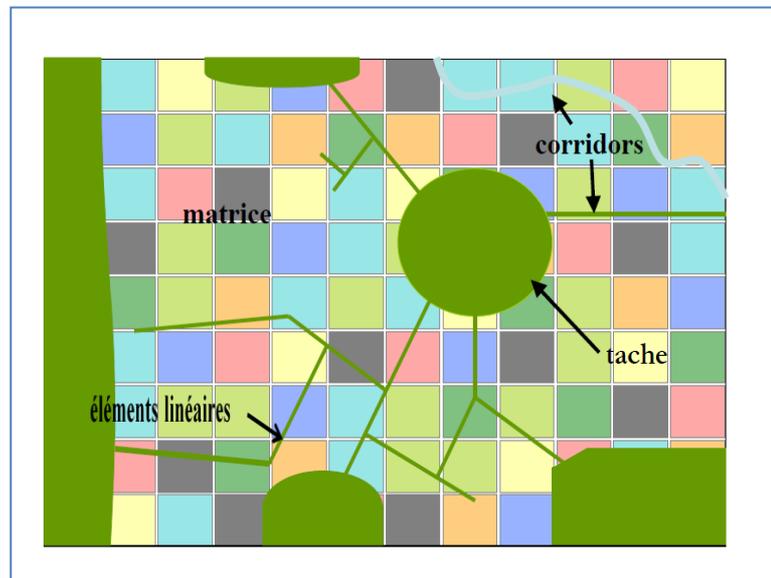


Figure II-1-2 : Le paysage, un ensemble de "taches d'habitat" utilisées par l'espèce, au sein d'une matrice.
 (d'après un diaporama de Thierry Taton, consultable sur le site :
http://www.paca.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/1_ecologie_paysage_tatoni_IMEP_cle76786e.pdf)

(Fahrig 2003) distingue nettement la fragmentation de la diminution de la quantité d'habitat. Selon cet auteur, la fragmentation doit être considérée par l'association simultanée de quatre phénomènes 1) une réduction de la quantité d'habitat, 2) une augmentation du nombre de sites 3) une diminution de la taille moyenne des sites 4) une augmentation de l'isolement des sites (distance au plus proche voisin).

b) Les processus impliqués dans les dynamiques des populations

Il existe plusieurs processus affectant la dynamique de population d'une espèce (Dunning, Danielson et al. 1992; Burel 2006) :

- Certaines espèces animales doivent utiliser plusieurs éléments du paysage au cours de leur cycle de vie. S'il s'agit d'éléments de même nature, on parle de **supplémentation**. Par exemple, si une ressource devient insuffisante dans une zone donnée, les individus se déplacent vers d'autres milieux de même nature.

- S'il s'agit d'éléments de natures différentes, on parle de **complémentation**. Par exemple, certaines espèces doivent avoir accès à plusieurs types de ressources (pour l'alimentation, le refuge (abri), l'hivernation, la reproduction...) dans différents milieux accessibles, pour accomplir leur cycle de vie dans leur totalité.

- Si on se place à une échelle de temps plus longue et que l'on considère les populations, les habitats fragmentés génèrent des **populations fragmentées ou métapopulations**. Une métapopulation est donc un ensemble de populations locales occupant un réseau de taches d'habitat (ou patches) situés dans une matrice d'habitats non exploitables par l'espèce considérée (Levins 1969).

Si les taches d'habitat favorable sont petites, les populations peuvent être soumises à des extinctions locales sous l'effet de facteurs environnementaux. Les taches d'habitat laissées vacantes sont alors recolonisées ce qui permet la survie de l'espèce au niveau du paysage ou de la région. Une métapopulation est considérée comme un ensemble de populations locales reliées entre elles par cette **dynamique d'extinctions et de recolonisations**.

La dynamique des populations au sein du paysage dépend des caractéristiques locales des taches d'habitat : c'est le concept de **dynamique source – puits** (Pulliam 1988; Dunning, Danielson et al. 1992) (figure II-1-3). Les taches où le taux de reproduction de la population est supérieur au taux de mortalité seront des taches sources d'individus et les taches où le taux de reproduction est inférieur au taux de mortalité seront des taches puits. La persistance des populations dans les taches puits dépendra donc des déplacements (immigration) d'individus depuis les taches sources.

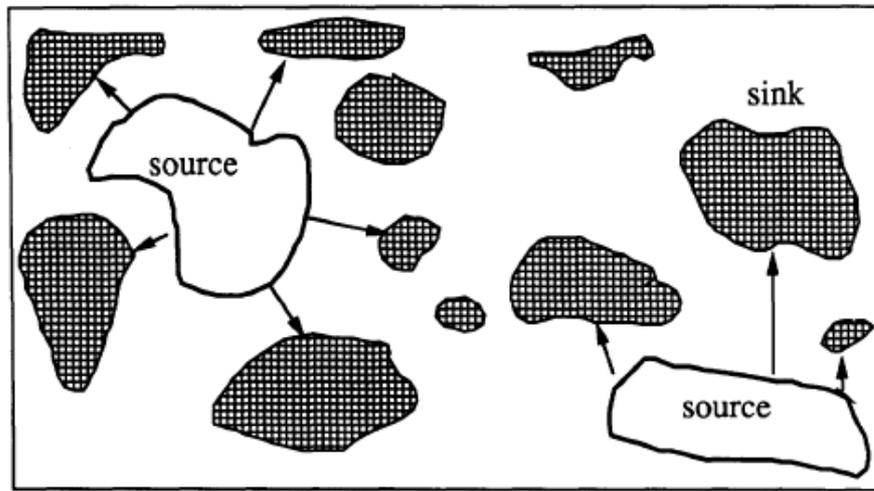


Figure II-1-3 : Sources et puits (Dunning, Danielson et al. 1992). Une espèce occupe deux types de taches : des taches riches (sources) (en blanc) capables de produire des individus en excès et des taches pauvres (puits) (en gris) qui ne produisent pas assez d'individus pour maintenir la population locale. La population des puits dépend de la dispersion d'individus provenant de sources proches.

Enfin, les *relations de voisinage* impliquent que l'abondance d'une espèce d'une tache d'habitat donnée est plus affectée par les caractéristiques de taches adjacentes que par celles des taches plus éloignées.

Ces 4 processus ont été démontrés pour plusieurs espèces et expliquent les dynamiques de leurs populations au sein de paysages hétérogènes (Dunning, Danielson et al. 1992).

Pour bien comprendre le rôle du paysage sur les dynamiques de population, il est nécessaire d'identifier les éléments du paysage et les ressources utilisées par l'espèce au cours de son cycle de développement.

Comme le résume (Rusch 2010), plusieurs facteurs peuvent influencer la dynamique des populations à l'échelle du paysage. Il a été démontré que la diminution de la surface d'habitat favorable diminue la diversité spécifique et l'abondance des individus (Fahrig 2003). L'isolement d'une tache d'habitat (par rapport à des taches d'habitat de même nature) peut avoir plusieurs effets : il peut augmenter, diminuer ou ne pas modifier l'abondance des individus dans une tache donnée (cf. réf. in (Rusch 2010) [p.9]). La variation inter-annuelle de la quantité totale d'habitats favorables disponible dans un paysage considéré peut également influencer la répartition spatiale d'une population (Thies, Steffan-Dewenter et al. 2008). Enfin, la qualité de l'habitat peut affecter les taux de mortalité de l'espèce et les probabilités de colonisation des taches voisines (Pulliam 1988; Moilanen and Hanski 1998; Thomas, Bourn et al. 2001).

Les espèces doivent effectuer des *mouvements entre les taches d'habitat* pour survivre à l'échelle de la région. Ces mouvements dépendent de la connectivité du paysage pour l'espèce (connectivité fonctionnelle) c'est-à-dire la capacité de cette espèce à utiliser les différents éléments du paysage pour se déplacer (Burel 2006).

Il est bien évident que la *connectivité du paysage pour une espèce* dépend de plusieurs paramètres (Burel and Baudry 1999; Burel 2006):

- de la configuration spatiale et de l'abondance des habitats favorables dans le paysage
- du (des) mode(s) de déplacement de l'espèce et de sa capacité à se disperser, y compris dans les zones non utilisées par l'espèce (matrice paysagère)
- des exigences écologiques de l'espèce (certains éléments du paysage peuvent favoriser les déplacements d'une espèce mais peuvent constituer des barrières pour d'autres)
- du temps (saisons, perturbations naturelles) qui modifie en particulier les couverts végétaux
- des actions de l'Homme (modifications agricoles...) au cours d'une année, ou de plusieurs années
- de l'impact des ennemis naturels (parasites, prédateurs...)

Les *éléments linéaires* dans le paysage (exemple : une haie) peuvent servir d'habitat, de refuge, de conduit, de filtre ou de barrière pour les espèces (figure II-1-4). On parle de *corridors biologiques* quand les éléments linéaires permettent les déplacements des individus dans une « matrice hostile » (rôle de conduit). L'efficacité d'un corridor biologique pour une espèce peut dépendre de ses caractéristiques propres (nature, orientation, ressources nutritives...) mais aussi des éléments adjacents. Par exemple, dans les paysages agricoles, la nature des cultures et les modalités de conduite de la culture (travail du sol, utilisation de pesticides) peuvent favoriser ou au contraire diminuer la fonction « corridor » des haies. De plus, les corridors ne sont pas toujours continus, ils peuvent être composés de milieux associés à petite échelle ; on parle alors de « mosaïque corridor » (Burel 2006).

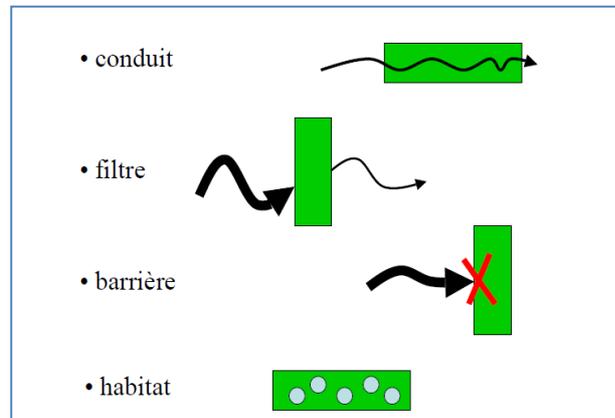


Figure II-1-4 : Rôles possibles des éléments linéaires du paysage, pour une espèce. (d'après un diaporama de Thierry Tatoni, consultable sur le site : http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/1_ecologie_paysage_tatoni_IMEP_cle76786e.pdf)

c) L'échelle spatiale fonctionnelle d'une espèce

Afin de comprendre les dynamiques de population d'une espèce dans un paysage, il est nécessaire de déterminer l'échelle spatiale fonctionnelle de l'espèce (ce qui semble correspondre à l'étendue minimale du paysage que l'espèce utilise pour survivre). Cette échelle varie selon le paramètre du paysage modélisé.

Pour déterminer l'échelle spatiale fonctionnelle de l'espèce, on utilise l'approche développée sur les oiseaux par (Pearson 1993). Cette approche consiste à faire varier la surface de la zone d'étude dans *différents cercles concentriques* (ou « *buffers* ») autour d'un point d'échantillonnage donné. Cette approche a été largement utilisée dans d'autres études (Östman, Ekblom et al. 2001; Tschardtke, Klein et al. 2005; Thies, Steffan-Dewenter et al. 2008) (in (Rusch 2010)).

L'échelle spatiale fonctionnelle d'une espèce dépend des traits de vie de l'espèce et en particulier de son niveau trophique, de la taille du corps, du degré de spécialisation vis-à-vis de l'habitat et de ses capacités de dispersion (Tschardtke, Klein et al. 2005).

d) Rôle des habitats semi-naturels

Les *habitats semi-naturels* tels que les bois, les haies, les bordures de parcelles, les jachères et les prairies sont considérés comme des habitats plus stables et moins perturbés que les zones cultivées (Bianchi, Booij et al. 2006). Ils hébergeraient plus d'espèces auxiliaires que d'espèces de ravageurs (Denys and Tschardtke 2002).

A travers de nombreux exemples, (Landis, Wratten et al. 2000; Norris and Kogan 2005; Bianchi, Booij et al. 2006) montrent que les habitats semi-naturels possèdent de nombreux effets pour les populations d'ennemis naturels, mais aussi sur les ravageurs.

Il a été démontré qu'ils fournissent *des hôtes alternatifs ou des proies alternatives pour les ennemis naturels des ravageurs (parasitoïdes ou prédateurs)*. Ces hôtes ou proies alternatifs permettent ainsi de maintenir les populations d'ennemis naturels. Cependant, les mauvaises herbes dans les cultures ou les bordures par exemple, peuvent aussi servir de plantes-hôtes aux ravageurs.

Ils peuvent être sources de miellat (par exemple, le miellat des pucerons du pois consommé par les parasitoïdes du charançon de la luzerne augmente la fécondité et la durée de vie de ces parasitoïdes (les pucerons du pois étant présents dans des habitats semi-naturels proches).

Ils peuvent être *sources de pollen et de nectar floral*, qui semblent être profitables aux prédateurs et parasitoïdes.

Ils offrent des zones d'*abris et des sites d'hivernation /d'estivation* aux ennemis naturels. 9 espèces auxiliaires sur 10 utiliseraient les zones non cultivées à un moment de leur cycle de développement (contre 1 espèce ravageurs sur 2) [d'après Keller et Häni, 2000 (article en allemand cité dans (Rusch 2010)]. Par exemple, les habitats semi-naturels peuvent offrir un microclimat favorable à leur développement, une zone refuge en cas de pulvérisations d'insecticides ou une zone convenable pour l'hivernation. Cependant, il ne faut pas négliger le fait que certains ravageurs utilisent les zones non cultivées comme zones d'hivernation. C'est le cas par exemple de certaines espèces d'altises et de méligèthes qui hivernent dans les haies, les forêts ou les bordures (Pywell, James et al. 2005; Rusch 2010; Rusch, Valantin-Morison et al. 2012).

L'effet de la *complexité du paysage* (forte proportion de zones non cultivées) sur les populations de ravageurs et de leurs ennemis naturels est variable. Une étude récente a recensé les études (la majorité datant des années 2000) ayant un effet positif, négatif ou neutre de la complexité du paysage sur les populations de ravageurs (10 études) et les populations d'ennemis naturels (24 études) (Bianchi, Booij et al. 2006) (tableau II-1-1) . Un paysage « complexe » est ici considéré comme un paysage comportant une forte proportion de zones non cultivées, un paysage « simple » ayant une faible proportion de zones non cultivées. Cette étude montre que sur les 10 études ayant pris en compte les populations de ravageurs, 45 % ont montré une diminution des populations dans des paysage plus complexes, 40 % n'ont trouvé aucun effet de la complexité du paysage sur la pression exercée par les ravageurs et 15 % ont montré un effet positif de la complexité du paysage sur les populations de ravageurs. Sur les 24 études ayant pris en compte les populations d'ennemis naturels, 74 % ont montré une augmentation de la régulation naturelle ou des populations d'ennemis naturels avec la complexité du paysage, 20.8 % n'ont trouvé aucun effet de la complexité du paysage, et 5.1 % ont montré un effet négatif de la complexité du paysage sur ces populations. D'autres études ultérieures ont confirmé cette tendance. **En résumé, les études montrent l'impact généralement positif de la complexité des paysages sur les ennemis naturels mais pas sur les ravageurs.** L'impact mesuré sur les ravageurs est variable et peut dépendre de très nombreux facteurs (méthodologie employée, position géographique des parcelles, effet des pratiques culturales); d'autres études doivent être menées pour apporter les connaissances manquantes à la compréhension de la dynamique des populations de ravageurs.

Tableau II-1-1 : Pourcentage d'études ayant montré des effets positifs, neutres ou négatifs de la complexité du paysage sur les populations d'ennemis naturels et de ravageurs (D'après une étude de (Bianchi, Booij et al. 2006) cité dans Rusch (2010).

| Niveaux trophiques | Effets de la complexité du paysage | | |
|--------------------|------------------------------------|-------|------|
| | + | = | - |
| Ennemis naturels | 74% | 20.8% | 5.1% |
| Insectes ravageurs | 15% | 40% | 45% |

Les études en écologie du paysage doivent prendre en considération non seulement la composition du paysage (proportion de chaque type d'éléments du paysage) mais aussi *l'arrangement spatial des éléments du paysage* c'est-à-dire la connectivité fonctionnelle du paysage pour une espèce donnée (Perovic, Gurr et al. 2010).

(Letourneau, Jedlicka et al. 2009) ont travaillé sur 226 études liées à l'impact de la biodiversité des ennemis naturels sur la mortalité des ravageurs : 70% d'entre elles ont montré que la lutte contre les ravageurs était plus efficace si la richesse spécifique en ennemis naturels était importante.

Conclusion :

A travers la discipline récente qu'est l'écologie du paysage, on peut chercher à comprendre l'influence du paysage sur les dynamiques de populations d'un insecte ravageur de cultures.

Le paysage agricole moderne peut être considéré comme un espace hétérogène et fragmenté, composé de *sites d'habitat* utiles à l'insecte considéré (ex : parcelles cultivées avec les plantes-hôtes de l'insecte), d'*éléments linéaires* reliant ces sites (ex : bordures, haies...) et d'une *matrice paysagère* non utilisée par l'insecte. On considère également que les populations de ces insectes sont fragmentées et forment des métapopulations (ensembles de populations locales occupant différents sites d'habitats).

Les sites d'habitat sont utilisés par les individus au cours de leur cycle de développement, pour y trouver abris, nourriture ou zone d'hivernation... Les populations d'insectes effectuent des *mouvements* entre ces sites d'habitats, ce qui permet la survie de l'espèce au sein du paysage et au fil des années. Ces mouvements sont liés à de nombreux facteurs, en particulier à la répartition des habitats favorables, au mode de déplacement et à la capacité de dispersion de l'espèce, aux saisons et aux couverts végétaux, aux pratiques agricoles, et aux ennemis naturels. La littérature fait état de nombreuses études montrant l'importance des *habitats semi-naturels* (bois, haies, bordures des parcelles, jachères, prairies) pour le maintien des ennemis naturels des ravageurs.

2- Influence des pratiques agricoles sur les dynamiques de populations

Cette partie s'appuie sur les informations tirées d'une synthèse réalisée par (Rusch 2010) [chapitre 1].

La *diversité végétale à l'intérieur de la parcelle* influence l'abondance des populations de ravageurs. Andow 1991 a rassemblé 209 études portant sur la diversité végétale intra-parcelle et les espèces de ravageurs. 52 % des études montrent que les espèces de ravageurs sont moins abondantes dans les écosystèmes agricoles diversifiés que dans les monocultures, 15% des études montrent que les ravageurs sont plus abondants dans les écosystèmes diversifiés. Beaucoup d'études montrent que les cultures intercalaires (« intercropping »), les engrais verts (« cover cropping ») et même les mauvaises herbes diminuent les dégâts liés aux ravageurs. Une étude récente a montré que dans la plupart des cas (sur 45 études récentes, de moins de 10 ans), la réduction des ravageurs, l'augmentation des ennemis naturels et la diminution des dégâts étaient plus importants dans les cultures diversifiées que dans les monocultures (Letourneau, Armbrrecht et al. 2010). Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer ce phénomène : l'hypothèse liée à l'ennemi (« enemy hypothesis » (augmentation des ennemis naturels) (Root 1973), l'hypothèse de la concentration en ressources (« Resource Concentration Hypothesis ») (diminution de la probabilité du ravageur de trouver sa plante-hôte du fait de la « dilution » de cette plante-hôte parmi les autres plantes) (Root 1973), l'hypothèse de la culture piège (« trap crop hypothesis ») (qui attirerait davantage les ravageurs) (Vandermeer 1989).

La *résistance des variétés végétales* vis-à-vis des ravageurs est une méthode importante pour limiter l'impact des ravageurs, par des mécanismes d'antixénose (non-préférence) ou d'antibiose (effet de substances toxiques, gênant le développement). Mais il est vrai la sélection génétique des plantes résistantes aux insectes est longue et coûteuse.

Il semble qu'une *forte fertilisation en azote* favorise, dans la plupart des cas, l'attaque des ravageurs mais certaines études montrent que des apports normaux d'azote diminuent les dégâts. (Scriber 1984; Waring and Cobb 1992). Des études récentes se sont intéressées à l'impact de la fertilisation en azote sur les parasitoïdes. Une étude montre qu'un parasitoïde de la teigne des crucifères est affecté par les taux de fertilisation du sol (Sarfrac, Dossdall et al. 2009).

L'effet du *labour* sur les ravageurs est variable selon les études et les espèces. Un labour réduit semble favoriser l'abondance et la diversité de la faune du sol mais l'ensemble des études montre que l'effet du labour dépend non seulement du type de labour, mais aussi des caractéristiques écologiques des espèces (telles que la taille du corps, le cycle de vie, le régime alimentaire, les capacités de dispersion et la taille de la population) (Baguette and Hance 1997). Néanmoins certains stades (pupes, larves non mobiles, adultes hivernants ou estivants) seraient sensibles au labour (Kendall 2003). Les résidus de cultures laissés sur le sol et associés à un labour réduit, pourraient gêner la localisation des plantes-hôtes par les ravageurs, et augmenter la matière organique disponible ce qui favoriserait la diversité et l'activité des prédateurs (Kladivko 2001). Les labours importants peuvent diminuer l'abondance des ravageurs mais aussi celle des parasitoïdes ou des prédateurs, par des phénomènes de mortalité ou de déplacements des populations.

Il est également admis que la *date du semis*, la *densité de plantes* et la *date de récolte* influencent les dégâts liés aux insectes ravageurs et la capacité des plantes à compenser ces dégâts. Par exemple, les dégâts infligés au colza par des altises (*Phyllotreta cruciferae*) sont plus importants sur des cultures semées au printemps que sur celles semées en automne (Doddall and Stevenson 2005), les plantes étant plus vigoureuses et donc résistantes aux attaques des altises. D'autres études montrent que la date de semis a une influence variable selon les ravageurs, pour une même culture. Semer tôt le colza d'hiver réduit les attaques d'altises (*Phyllotreta chrysocephala*) mais augmente celle de la mouche du chou (*Delia radicum*). Souvent, il a été prédit que la densité de ravageurs par plante augmentait avec la densité de plantes (selon l'hypothèse de la concentration en ressources (Root 1973) mais de nombreuses publications montrent le contraire [cf réf. in (Yamamura 1999)] ce qui appuie plutôt l'hypothèse de la dilution des ressources. Par exemple, les dégâts liés à la mouche du chou, au charançon des tiges et au meligèthe diminuent avec la densité de colza oléagineux (Valantin-Morison, Meynard et al. 2007). La récolte en perturbant les milieux et en particulier le microclimat, peut modifier les populations d'ennemis naturels. Cet effet varie selon la date de récolte.

La *rotation des cultures* permet d'interrompre le cycle de vie des ravageurs et elle influence également les populations d'ennemis naturels. Une étude montre que des rotations sur 4 années, alliées à une diminution de pesticides, favorisent l'activité de certains prédateurs par rapport à une rotation conventionnelle sur 2 ans (O'Rourke, Liebman et al. 2008).

Enfin, l'effet négatif de l'*utilisation des pesticides* sur les ennemis naturels est bien documenté.

Conclusion :

De nombreuses études ont montré l'impact des pratiques culturales sur les ravageurs de cultures et leurs ennemis naturels. Les résultats sont très variables selon les pratiques et les ravageurs considérés. Néanmoins quelques tendances intéressantes peuvent être dégagées. Il semble que la diversité végétale a tendance à réduire les dégâts liés aux insectes. La résistance variétale des plantes est un facteur à ne pas négliger. Une forte fertilisation azotée peut accentuer les problèmes liés aux ravageurs mais ce n'est pas toujours le cas. L'effet du labour sur les ravageurs et leurs ennemis naturels est également variable selon les types de labour, les plantes et les ravageurs. La date du semis, la densité de plantes et la date de récolte peuvent également influencer les dégâts aux cultures. La rotation sur plusieurs années semble constituer une piste intéressante pour limiter les ravageurs. Enfin, l'usage des pesticides a un effet néfaste sur les ennemis naturels des ravageurs et est donc à limiter.

3- La protection intégrée des cultures : importance de l'échelle espace-temps

La production biologique intégrée (ou PBI) définie par l'O.I.L.B/S.R.O.P en 1980 vise à limiter l'emploi de produits phytosanitaires en privilégiant « des méthodes alternatives devant satisfaire des exigences à la fois économiques, écologiques, et toxicologiques, en vue d'obtenir une récolte qualitativement optimale ».

La protection intégrée contre les ravageurs de culture s'appuie sur la combinaison de différentes méthodes de lutte. Ces méthodes sont les suivantes : la *lutte génétique* (utilise des variétés résistantes), la *lutte biotechnique* (consiste à utiliser des produits d'origine biologique, mais qui ne sont pas des organismes vivants, par exemple l'introduction de gène de résistance d'origine bactérienne dans les plantes), la *lutte culturale* (consiste à modifier les successions culturales, utiliser des couverts végétaux, modifier des dates de semis...), la *lutte physique* (consiste à utiliser des moyens thermiques ou mécaniques), la *lutte biologique* (consiste à utiliser des organismes vivants (insectes, bactéries, champignons, nématodes...)) et en dernier recours la *lutte chimique* (utilise des pesticides).

Le plus souvent, la protection intégrée a été mise en œuvre autour de méthodes curatives ponctuelles, ayant pour objectif de surveiller les populations de ravageurs au sein des parcelles et d'appliquer des traitements en fonction des seuils de nuisibilité. Mais cette approche a montré ses limites et n'a pas résolu les problèmes.

Ainsi, depuis quelques années, **la protection intégrée tend à mettre en place des stratégies de gestion de populations de ravageurs à long terme, préventives et qui prennent en considération non plus seulement les parcelles cultivées, mais également le paysage environnant.** Cette stratégie recouvre la lutte biologique par conservation.

L'objectif est de **favoriser les régulations naturelles de ravageurs et les capacités de résilience des plantes**, afin de réduire au minimum les populations de ravageurs. La littérature fait état de deux modes de régulation intéressants (Figure II-3-1):

- une **régulation ascendante ou « bottom-up »** qui s'appuie sur la capacité des plantes-hôtes à stimuler leurs défenses ou compenser les agressions, pour limiter le développement des ravageurs et leurs dégâts (variétés résistantes, nutrition azotée).

- une **régulation descendante ou « top-down »** qui favorise l'action des ennemis naturels (Gurr, Wratten et al. 2003) via les pratiques agricoles et la gestion des aménagements du paysage alentour.

Ces régulations d'insectes ravageurs ne peuvent donc se concevoir qu'à une échelle spatiale adaptée, à savoir **l'échelle du paysage des systèmes agricoles** et à sur une **échelle de temps longue** (pluri-annuelle). Ceci d'autant que les insectes utilisent différents éléments du paysage pour accomplir leur cycle de vie (sites d'hivernation, de reproduction, d'alimentation, etc.) ou pour des espèces ayant une grande capacité de dispersion.

Conclusion :

Agir pour limiter l'impact des populations d'insectes ravageurs dans les cultures, tout en réduisant les intrants, nécessite de **favoriser l'action des ennemis naturels des ravageurs et favoriser la capacité des plantes à se défendre contre ces ravageurs**, à travers l'aménagement du paysage et la conduite de pratiques agricoles appropriées.

Cela implique de prendre en considération l'échelle spatiale du paysage agricole et une échelle temporelle pluri-annuelle.

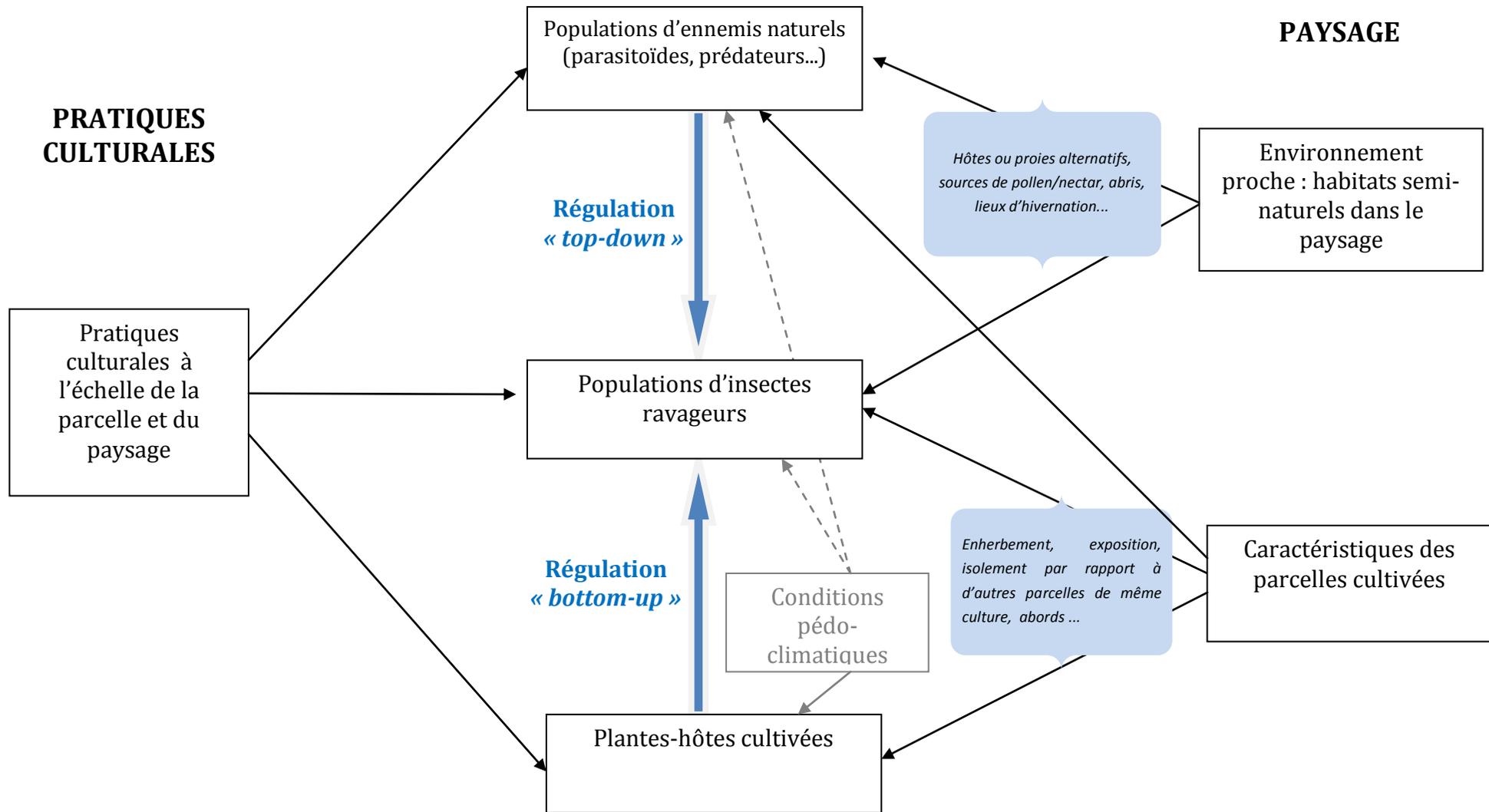


Figure II-3-1 : Représentation schématique des effets potentiels des pratiques agricoles et du contexte paysager (et des conditions pédo-climatiques) sur les populations d'insectes ravageurs, leurs plantes-hôtes cultivées et leurs ennemis naturels (adapté de Rusch, 2010)

4- Rappels sur les cycles de développement des insectes : généralités

D'une façon générale, les insectes passent successivement par plusieurs stades de développement (figure II-4-1) : - **le stade « œuf »**.

- **le stade « larve »**. Ce stade est appelé chenille chez les papillons, asticot chez les mouches. Il existe toujours plusieurs stades larvaires, leur nombre varie selon les espèces. Les larves sont généralement capables de se déplacer sur de petites distances.

- **le stade « nymphe »**. Il peut être parfois protégé dans un cocon, qui correspond au stade chrysalide chez les papillons, pupa chez les mouches. C'est un stade immobile.

- **le stade « adulte »**. Le plus souvent, mâles et femelles s'accouplent et permettent la ponte des œufs par les femelles. Mais il existe d'autres modes de reproduction ne nécessitant pas d'accouplement (cas des pucerons, des thrips).

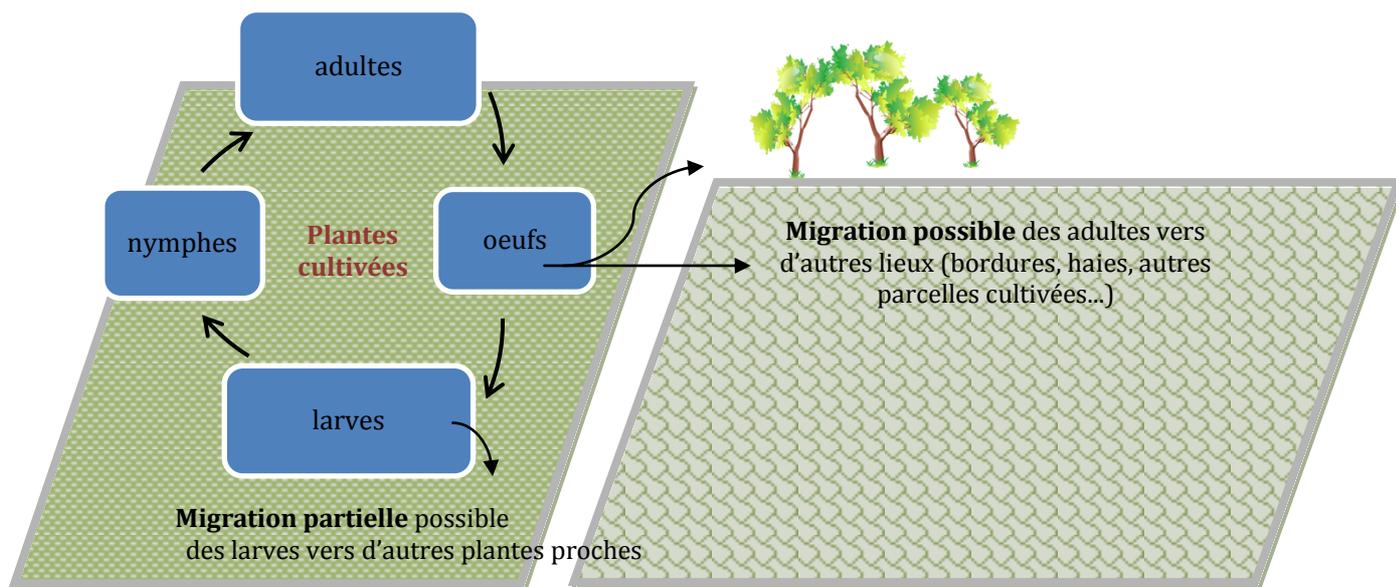


Figure II-4-1 : Cycle de vie d'un insecte ravageur de culture - cas général simplifié

On considère qu'une **génération** est effectuée au cours d'une période allant de l'œuf à l'œuf (l'œuf pondu se transforme en adulte capable de pondre à son tour).

Les insectes passent l'hiver sous la forme de **stades résistant aux conditions hivernales**. Ces stades diffèrent selon les espèces (œufs chez les pucerons ; larves ou pupes chez les mouches ; larves, nymphes ou adultes chez les thrips).

Au printemps, le développement des insectes reprend et l'activité des adultes qui ont émergé, est détectée par le piégeage au champ ; on parle ainsi de « vols » d'adultes. Ces adultes capables de voler se déplacent au sein du paysage pour s'accoupler, se nourrir, trouver un site de ponte etc.

En effet, chez la plupart des insectes, quelques jours après leur émergence, les adultes mâles et femelles se rencontrent et s'accouplent. Les accouplements sont généralement nécessaires à la ponte des **œufs** par les femelles ; cette ponte est également conditionnée par une alimentation riche en glucides (sucres) et/ou en protides (pollen), apportée par les fleurs environnantes.

Les femelles partent à la **recherche de plantes-hôtes** plus ou moins spécifiques, capables de subvenir aux besoins de leur progéniture (larves). Elles détectent et choisissent leurs plantes hôtes en utilisant différents signaux : signaux visuels (couleurs, forme du feuillage...), signaux olfactifs (odeurs « vertes » ou odeurs spécifiques de leurs plantes-hôtes), signaux chimiques de contact (substances présentes à la surface des feuilles...), présences de micro-organismes etc.

Si le site leur convient, elles pondent alors leurs œufs sur les plantes-hôtes ou à proximité. Lors d'un « vol », une même femelle peut présenter plusieurs périodes de ponte, échelonnées au cours du temps.

Si les conditions extérieures le permettent (notamment, températures et humidité adéquates), les œufs éclosent et donnent naissance à de jeunes **larves** qui vont se nourrir de différentes parties de la plante (racine, feuilles, sève). Les larves se développent en se nourrissant de la plante et sont parfois capables de se déplacer d'une plante à une autre. Elles passent par plusieurs stades larvaires séparés par des mues. A la fin du développement larvaire, les larves âgées se métamorphosent en stades immobiles qui ne s'alimentent plus (**nymphes**). Les nouveaux **adultes** qui émergent des nymphes pourront à leur tour s'accoupler et chercher des plantes-hôtes favorables au développement de leur progéniture.

Au cours de leur cycle de vie, les insectes peuvent subir des ralentissements de développement de 2 types. Ils peuvent subir une **diapause**. Le stade diapausant diffère selon l'espèce (œuf, larve, nymphe mais aussi adulte). Le plus souvent, la diapause est déclenchée par le raccourcissement de la durée du jour (photopériode) au cours du développement larvaire. La diapause peut être génétiquement déterminée. Les insectes peuvent aussi se trouver dans un état de vie ralentie appelé **quiescence** lorsque les conditions du milieu sont défavorables (fortes températures, sécheresse, absence de plante-hôte); les insectes se réfugient par exemple en profondeur dans le sol ou les débris de végétaux. Leur activité reprend lorsque les conditions redeviennent favorables.

Conclusion :

Pour se développer, un insecte passe par plusieurs étapes (œuf, larves, nymphe, adulte) qui utilisent différents éléments du paysage dans la culture (s'il s'agit d'un ravageur de cultures) mais aussi dans le paysage environnant, au cours du temps.

Par conséquent, pour limiter l'impact d'un ravageur de cultures, il est nécessaire de bien connaître son cycle de développement et de savoir quels éléments du paysage il utilise.

Dans les parties suivantes, nous allons exposer l'état des connaissances sur les différentes espèces de ravageurs de cultures qui nous intéressent (thrips du poireau *Thrips tabaci*, mouche de la carotte *Psila rosae* et mouche du chou *Delia radicum*) ainsi que les effets connus des différentes pratiques culturales sur ces ravageurs et leurs ennemis naturels.

Références bibliographiques

- Baguette, M. and T. Hance (1997). "Carabid beetles and agricultural practices: Influence of soil ploughing." Biological Agriculture & Horticulture **15**(1-4): 185-190.
- Bianchi, F. J. J. A., C. J. H. Booij, et al. (2006). "Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control." Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences **273**(1595): 1715-1727.
- Buckland, K. R. (2011). Evaluating Fertilizer Rate, Crop Rotation and Trap Crops for Effects on Onion Growth and Yield, Soil Health, Thrips Densities and Iris Yellow Spot Virus Incidence. Plants, Soils, and Climate, Utah State University: 132p.
- Burel, F. (2006). "Ecologie du paysage : échanges entre les éléments de la mosaïque paysagère." Retrieved Février, 2012, from <http://ct83.espaces-naturels.fr/ecologie-du-paysage>.
- Burel, F. and J. Baudry (1999). Ecologie du paysage: concepts, méthodes et applications, Tech.& Doc./Lavoisier.
- Dennis, R. L. H., T. G. Shreeve, et al. (2003). "Towards a functional resource-based concept for habitat: a butterfly biology viewpoint." Oikos **102**(2): 417-426.
- Denys, C. and T. Tscharrntke (2002). "Plant-insect communities and predator-prey ratios in field margin strips, adjacent crop fields, and fallows." Oecologia **130**(2): 315-324.
- Dosdall, L. M. and F. C. Stevenson (2005). "Managing Flea Beetles (spp.) (Coleoptera: Chrysomelidae) in Canola with Seeding Date, Plant Density, and Seed Treatment." Agron. J. **97**(6): 1570-1578.
- Dunning, J. B., B. J. Danielson, et al. (1992). "Ecological processes that affect populations in complex landscapes." Oikos **65**(1): 169-175.
- Fahrig, L. (2003). "Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity." Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics **34**: 487-515.
- Gurr, G. M., S. D. Wratten, et al. (2003). "Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits." Basic and Applied Ecology **4**(2): 107-116.
- Kendall, D. A. (2003). Soil tillage and epigeal predatory arthropods. Soil Tillage in Agroecosystems. A. E. Titi. New York CRC Press.
- Kladivko, E. J. (2001). "Tillage systems and soil ecology." Soil and Tillage Research **61**(1-2): 61-76.
- Landis, D. A., S. D. Wratten, et al. (2000). "Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture." Annual Review of Entomology **45**: 175-201.
- Letourneau, D. K., I. Armbrrecht, et al. (2010). "Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review." Ecological Applications **21**(1): 9-21.
- Letourneau, D. K., J. A. Jedlicka, et al. (2009). Effects of Natural Enemy Biodiversity on the Suppression of Arthropod Herbivores in Terrestrial Ecosystems. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics. **40**: 573-592.
- Levins, R. (1969). "Some Demographic and Genetic Consequences of Environmental Heterogeneity for Biological Control." Bulletin of the ESA **15**(3): 237-240.
- Moilanen, A. and I. Hanski (1998). "Metapopulation dynamics: Effects of habitat quality and landscape structure." Ecology **79**(7): 2503-2515.
- Norris, R. F. and M. Kogan (2005). "Ecology of interactions between weeds and arthropods." Annual Review of Entomology **50**: 479-503.
- O'Rourke, M. E., M. Liebman, et al. (2008). "Ground Beetle (Coleoptera: Carabidae) Assemblages in Conventional and Diversified Crop Rotation Systems." Environmental Entomology **37**(1): 121-130.
- Östman, Ö., B. Ekbom, et al. (2001). "Landscape heterogeneity and farming practice influence biological control." Basic and Applied Ecology **2**(4): 365-371.
- Pearson, S. M. (1993). "The spatial extent and relative influence of landscape-level factors on wintering bird populations." Landscape Ecology **8**(1): 3-18.
- Perovic, D. J., G. M. Gurr, et al. (2010). "Effect of landscape composition and arrangement on biological control agents in a simplified agricultural system: A cost-distance approach." Biological Control **52**(3): 263-270.
- Pulliam, H. R. (1988). "Sources, sinks and population regulation." American Naturalist **132**(5): 652-661.

- Pywell, R. F., K. L. James, et al. (2005). "Determinants of overwintering habitat quality for beetles and spiders on arable farmland." Biological Conservation **123**(1): 79-90.
- Root, R. B. (1973). "Organization of a Plant-Arthropod Association in Simple and Diverse Habitats: The Fauna of Collards (Brassica Oleracea)." Ecological Monographs **43**(1): 95-124.
- Rusch, A. (2010). Analyse des déterminants des attaques de *Meligethes aeneus* (Coleoptera, Nitidulidae) et de sa régulation biologique à l'échelle d'un paysage agricole : Contribution à l'amélioration de la protection intégrée du colza. Thiverval-Grignon, AgroParisTech: 187p.
- Rusch, A., M. Valantin-Morison, et al. (2012). "Local and landscape determinants of pollen beetle abundance in overwintering habitats." Agricultural and Forest Entomology **14**(1): 37-47.
- Sarfraz, M., L. M. Dossall, et al. (2009). "Host plant nutritional quality affects the performance of the parasitoid *Diadegma insulare*." Biological Control **51**(1): 34-41.
- Scriber, J. M. (1984). "Nitrogen nutrition of plants and insect invasion." American Society of Agronomy.
- Thies, C., I. Steffan-Dewenter, et al. (2008). "Interannual landscape changes influence plant-herbivore-parasitoid interactions." Agriculture, Ecosystems & Environment **125**(1-4): 266-268.
- Thomas, J. A., N. A. D. Bourn, et al. (2001). "The quality and isolation of habitat patches both determine where butterflies persist in fragmented landscapes." Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences **268**(1478): 1791-1796.
- Tscharntke, T., A. M. Klein, et al. (2005). "Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - ecosystem service management." Ecology Letters **8**(8): 857-874.
- Valantin-Morison, M., J. M. Meynard, et al. (2007). "Effects of crop management and surrounding field environment on insect incidence in organic winter oilseed rape (Brassica napus L.)." Crop Protection **26**(8): 1108-1120.
- Vandermeer, J., Ed. (1989). The Ecology of Intercropping. Cambridge UK, Cambridge University Press.
- Villeneuve, F., J. P. Bosc, et al. (1997). "Thrips tabaci on leeks and directed control." Infos-CTIFL (Paris)(128): 39-43.
- Waring, G. L. and N. S. Cobb (1992). The impact of plant stress on herbivore population dynamics. Plant-insect interactions. E. A. E. Bernays, CRC, Boca Raton, Fla. **4**: 167-226.
- Yamamura, K. (1999). "Relation between plant density and arthropod density in cabbage fields." Researches on Population Ecology **41**(2): 177-182.

5- Etat des connaissances sur le thrips du poireau *Thrips tabaci* Lindeman

a- Culture de poireau

Les semis sont réalisés généralement en pépinières de mars à avril et se développent en pépinière jusqu'à la plantation.

La plantation au champ (Figure II-5-1) s'effectue en majorité :

- de la fin avril à la mi-juillet dans la zone du Mont St Michel,
- de la mi-juin à la fin juillet, dans le Val de Saire et sur Créances.

La culture s'effectue en général avec une rotation tous les trois ans sur une même parcelle pour la côte ouest. Une rotation tous les 4 ou 5 pour le Val de Saire. Dans le Val de Saire, le précédent majoritaire est le chou ou une céréale (d'après le rapport « Analyse des systèmes de culture légumiers de plein champ » Hascoet J. 2008)

La récolte se déroule de septembre à fin avril. On note donc que les poireaux sont présents dans la zone de production tout au long de l'année.

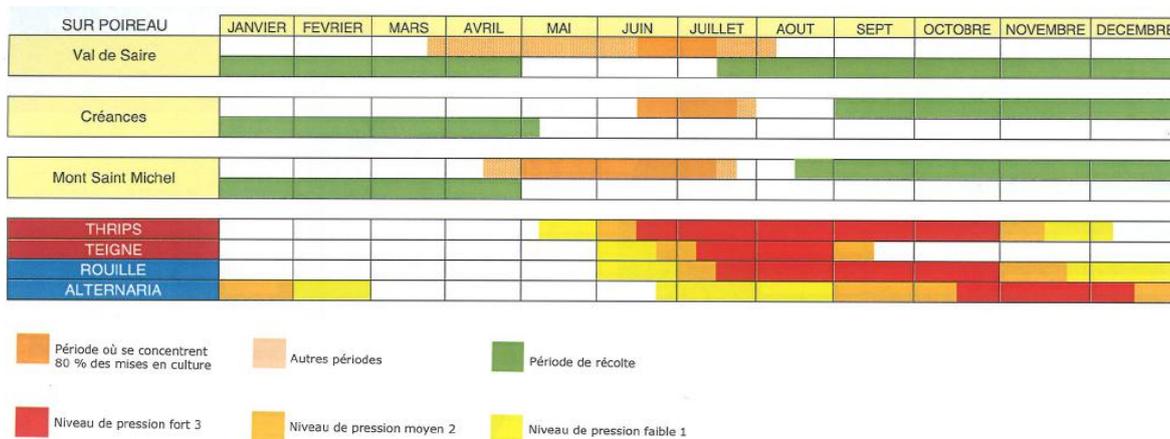
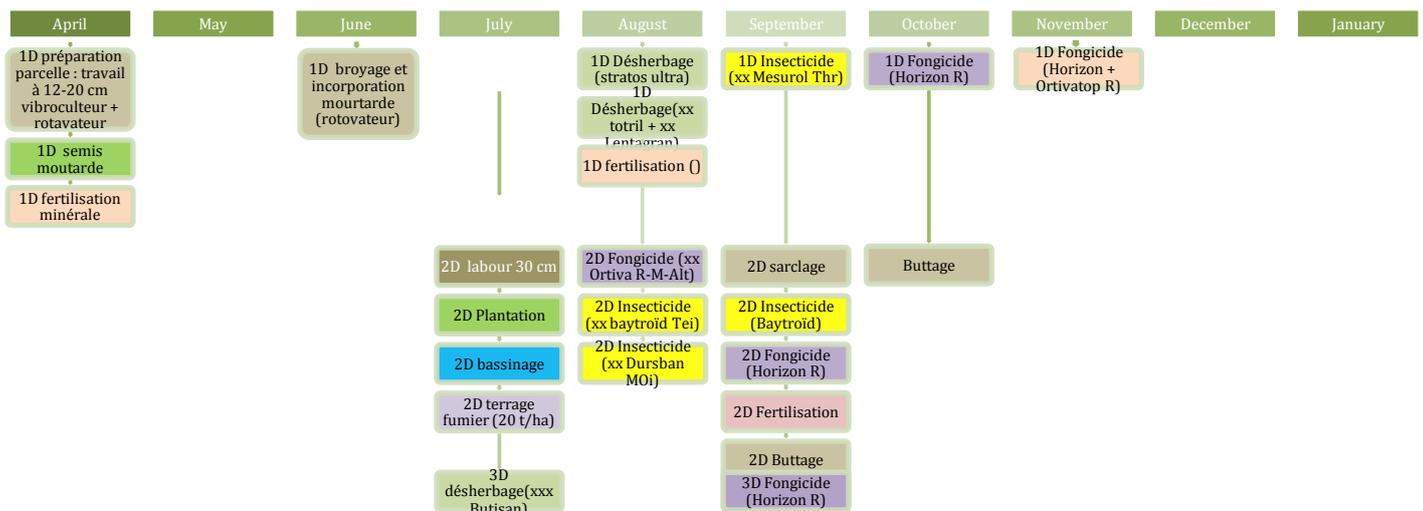


Figure II-5-1 : Phases de culture de poireau et risques phytosanitaire en Basse Normandie (rapport SILEBAN- CDAM : Réduire l'usage des pesticides dans les exploitations légumières, 2012)

En général, plusieurs traitements phytosanitaires sont effectués au cours de la culture.

Exemple de pratique culturale sur une parcelle de poireau :



b- Traits de vie du thrips du poireau

Le thrips du poireau *Thrips tabaci* Lindeman est un insecte Thysanoptère de la famille des Thripidae, il est aussi appelé thrips de l'oignon ou thrips du tabac (voir cycle de vie simplifié Figure II-5-2).

Parmi les thrips présents sur poireau, il s'agit de l'espèce majoritaire. En effet, aux Pays-Bas, en France, en Espagne, en Italie, 92 à 99% des thrips présents sur poireaux font partie de l'espèce *T. tabaci* (Haage, Bastiaans et al. 2001). Cependant, il existerait plusieurs écotypes de *T. tabaci* ayant évolué dans différentes régions (Bournier 1983).

C'est un ravageur important des cultures de poireau en Europe. **En s'alimentant, le thrips provoque des tâches décolorées/argentées sur les feuilles de poireau.** Les dégâts peuvent affecter le poids des plantes mais surtout, ils diminuent la qualité esthétique des poireaux pour la vente (Hommes, Hurni et al. 1994; Koschier, Sedy et al. 2002). En Suisse lorsque l'offre en poireaux est abondante sur le marché, des poireaux avec plus de 10% de surface foliaire attaquée, peuvent être déclassés ou refusés (Aviron, Krauss et al. 2009).

Certaines populations de *T. tabaci* sont **vecteurs des virus du genre *Tospovirus***, en particulier le virus des tâches bronzées de la tomate « Tomato spotted wilt virus » (TSWV) [(Linford 1932) in (Ullman, Sherwood et al. 1997) ; (Whitfield, Ullman et al. 2005)] et le virus des taches jaunes de l'iris « Iris yellow spot virus » (IYSV) (Bosco and Tavella 2010).

T. tabaci est une espèce **polyphage** (Bournier 1983; Murai 2000) qui peut se développer sur plus de 150 - 300 espèces végétales : tabac, Liliacées (oignons, poireaux...), chou, pois, haricot, melon, laitue, œillet, pomme de terre, tomate, concombre etc.(Bournier 1983). *T. tabaci* est un ravageur important du colza *Brassica napus* signalé en Iran (Fathi, Gholami et al. 2011). *T. tabaci* est également très préjudiciable aux cultures d'oignons en particulier en Amérique du Nord (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011). En Turquie, une étude a montré la présence de *T. tabaci* sur différentes mauvaises herbes Apiacées sauvages telles que la carotte sauvage *Daucus carota*, en particulier entre avril et mai (Atakan and Uygur 2005). Une étude récente dans l'état de New York montre la présence de larves de *T. tabaci* sur 25 espèces de mauvaises herbes (annuelles, bisannuelles et vivaces) de 14 familles différentes, en particulier des Brassicées (moutarde des champs, barbarée commune...) et des Astéracées (pissenlit, petite bardane) (Smith, Ditommaso et al. 2011). *T. tabaci* est présent l'hiver sur l'amarante hybride et le chénopode blanc (Larentzaki, Shelton et al. 2007).

Certains auteurs citent des **vols de dispersion** de *T. tabaci* vers des cultures d'oignons (aux Etats-Unis) depuis des culture de luzerne [Horsefall, 1921 in (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011), de choux ou de cultures fourragères [(North and Shelton 1986a) in (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011)]. *T. tabaci* peut aussi provenir d'anciennes cultures d'oignons, de la végétation environnante, des mauvaises herbes (Larentzaki, Shelton et al. 2007). Mais d'autres auteurs pensent que les dégâts observés dans une parcelle sont surtout liés à des mouvements et à la reproduction au sein de la culture plutôt qu'à des migrations [(Harding 1961) in (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011)]. Pourtant *T. tabaci* est considéré comme une espèce qui possède de **fortes capacités de dispersion** (Lewis 1997), les adultes se dispersant plutôt en début d'après-midi (Sites, Chambers et al. 1992; Burnstone and Collier 2009). En effet, certains auteurs (Sites, Chambers et al. 1992) ont montré que les adultes ont tendance à se regrouper dans la partie haute du feuillage des oignons en début d'après midi en été, quand les températures sont les plus élevées. En laboratoire, les vols prennent une large part dans les comportements des thrips quand la température atteint 25°C (Burnstone 2009). En Belgique, le début des vols d'immigration dans les cultures de poireaux semble avoir lieu quand la température moyenne de la journée atteint 19-20°C pendant 2-3 jours (Steene and Tirry 2007).

C'est une espèce qui présente **environ 2 à 5 générations** par an en France. On signale **un vol important en été** dans l'ouest de la France (Villeneuve, Bosc et al. 1997).

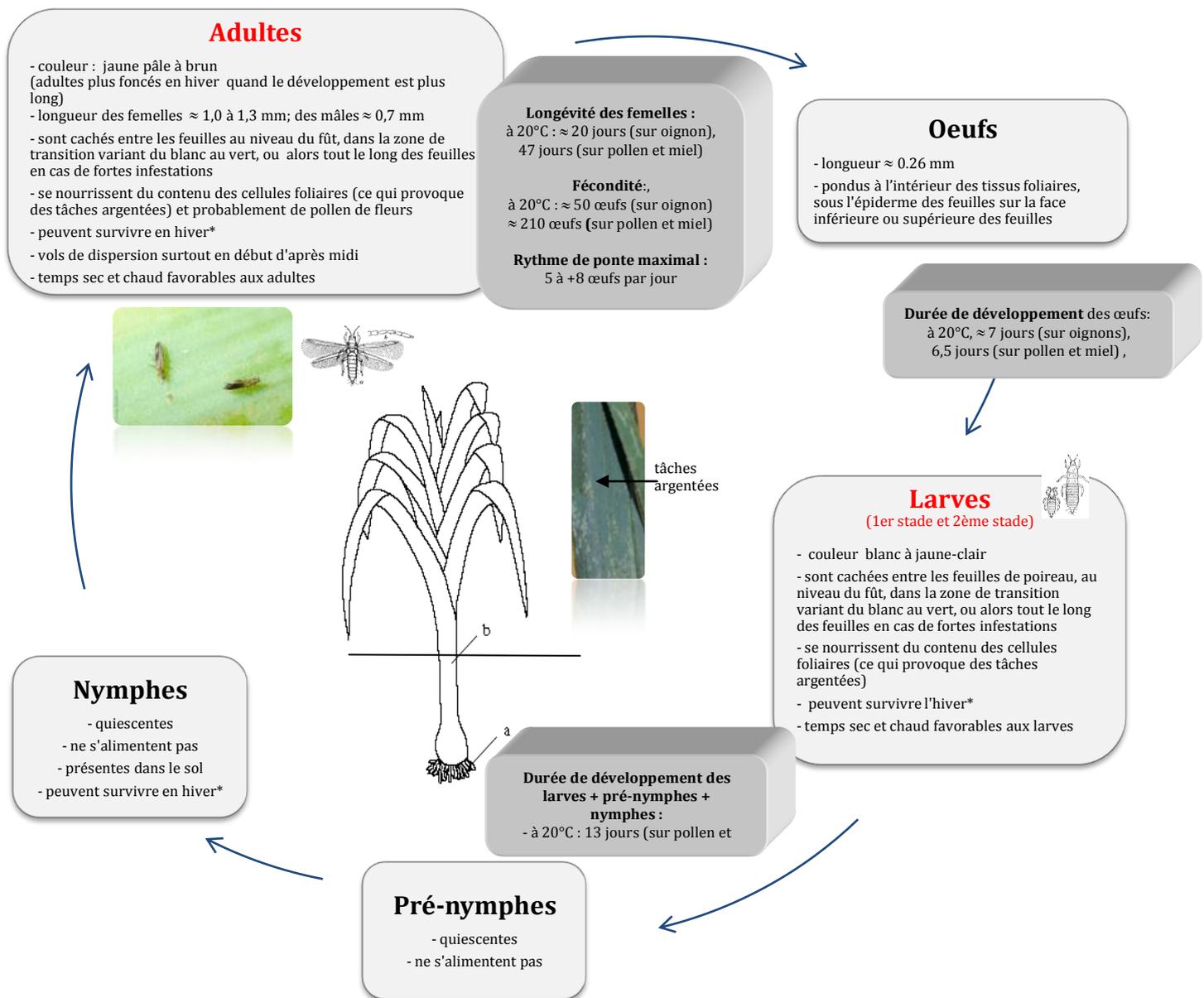


Figure II-5-2 Cycle de développement de *Thrips tabaci* sur culture de poireau

[Schéma réalisé d'après les articles de (Bournier 1978; Theunissen and Legutowska 1991b; Mortiz 1997; Kirk 1997a; Kirk 1997b; Murai 2000; Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011) ; dessin du poireau de Minost C. a: racine; b: feuilles engainantes, formant à la base un fût cylindrique blanchâtre et à limbe vert foncé, d'après le site <http://www.inra.fr/hyppz/CULTURES/3c---001.htm> ; dessins des thrips provenant du Department of Agriculture Yearbook of the United States Department of Agriculture 1898 (Washington: Government Printing Office, 1899) 143 d'après le site http://etc.usf.edu/clipart/46300/46335/46335_thrips.htm]

Capacité à passer l'hiver * Selon plusieurs auteurs, les adultes et les larves passent l'hiver dans le sol, le blé, la luzerne, les mauvaises herbes ou dans des fissures profondes, dans le sol des champs d'oignons, des bordures, des anciennes cultures d'oignons et dans les mauvaises herbes (North and Shelton 1986b; Larentzaki, Shelton et al. 2007). En Belgique (Flandre, culture de poireaux), seuls les adultes et les nymphes sont observés en hiver (pas les larves) (Steene and Tirry 2007). En Angleterre, ce sont des adultes qui passent l'hiver ; ils sont inactifs et le plus souvent groupés entre les 6^{ème} et 7^{ème} feuilles de poireau (en partant de l'extérieur) (Burnstone 2009).

Les thrips d'une façon générale semblent **localiser les plantes-hôtes** par leur couleur et grâce au contraste entre la plante et l'environnement (Terry 1997). *T. tabaci* est capable de pondre (et de se nourrir) sur des surfaces artificielles (membranes de parafilm), ce qui suggère qu'il n'existe pas de stimulants de contact pour la ponte (Terry 1997).

Les **durées de développement des différents stades varient selon la température**, les plantes-hôtes sur lesquelles les thrips sont élevés et selon l'origine géographique (Stacey and Fellowes 2002). Les durées de développement diminuent quand la température augmente (Figures II-5-3 et 4).

Sur oignon, la durée totale du développement de l'œuf à l'adulte est de 21 jours à 15,8°C, 19,6 jours à 18°C, 16 jours à 23,4°C [(Lall and Singh 1968) in (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011)] (Figure II-5-3).

| Temp (°C) | Egg | L1 | L2 | Prepupa | Pupa | Total (d from egg to adult) | Preoviposition | Oviposition | Eggs/female | Adult longevity | Reference |
|-----------|------|------|------|---------|------|-----------------------------|----------------|-------------|-------------|-----------------------------|-----------|
| | 3.6 | 6.4 | 1.2 | 3.2 | 14.4 | 2.8 | 49.6 | 80.1 | 38.2 | Salimara (1937) | |
| | 5.6 | 8.0 | 2.0 | 4.2 | 20.4 | 3.9 | 44.2 | 53.9 | 51.7 | | |
| 15.8 | 8.5 | 6.5 | 2.0 | 4.0 | 21.0 | | | 49.8 | 18.8 | Lall and Singh (1968) | |
| 18.0 | 7.9 | 6.2 | 2.0 | 3.5 | 19.6 | | | 51.7 | 19.6 | | |
| 23.4 | 6.0 | 3.5 | 1.7 | 2.8 | 16.0 | | | 50.0 | 20.1 | | |
| 30.8 | 4.8 | 3.3 | 1.4 | 2.4 | 13.9 | | | 28.2 | 20.2 | | |
| 25.0 | 3.4 | 2.4 | 2.8 | 2.2 | 3.1 | 1.4 | 15.6 | 23.6 | 17.8 | Gawaad and El-Shazli (1971) | |
| 17.5 | 15.1 | | | 15.3 | | 30.4 | 3.7 | | | Edelson and Magaro (1988) | |
| 27.5 | 4.3 | | | 6.8 | | 11.1 | 1.0 | | | | |
| 32.0 | 4.33 | 2.09 | 2.04 | 1.17 | 2.4 | 12.0 | 2.7 | 19.5 | 21.5 | Salas et al. (1993) | |
| 23.4 | 4.6 | 2.06 | 4.03 | 1.2 | 2.3 | 14.2 | 4.6 | 15.2 | 40.65 | Guzman et al. (1996) | |
| 23.4 | 3.2 | 2.7 | 2.9 | 1.9 | 3.5 | 14.2 | 2.0 | 8.0 | 39.0 | Arribeche et al. (2006) | |

Figure II-5-3 : Durée de développement des différents stades de *T. tabaci* sur oignon (d'après (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011))

En laboratoire, dans un milieu contenant miel et pollen, elle est d'environ 39 jours à 15°C, alors qu'elle est de 20 jours à 20 °C, 14 jours à 25°C (Murai 2000) (Figure II-4-4).

| Temp. (°C) | Hatchability (%) | Developmental duration in days ^a | | | | | | Survival rate from hatch to adult (%) |
|------------|------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| | | Egg | 1st larva | 2nd larva | Prepupa | Pupa | Preoviposition period | |
| 15 | 94.4 | 11.41±0.91 (213) | 7.15±1.46 (40) | 9.56±1.89 (39) | 3.53±0.69 (38) | 7.89±0.56 (38) | 8.64±0.56 (38) | 95.0 |
| 20 | 83.6 | 6.53±0.59 (225) | 3.26±0.55 (39) | 3.92±0.54 (38) | 1.89±0.39 (38) | 3.95±0.27 (38) | 4.37±0.56 (38) | 95.0 |
| 23 | 83.5 | 5.03±0.51 (224) | 2.80±0.41 (20) | 3.26±0.45 (19) | 1.17±0.37 (18) | 3.22±0.55 (18) | 3.41±0.71 (18) | 90.0 |
| 25 | 82.4 | 4.99±0.41 (210) | 2.38±0.54 (40) | 2.87±0.57 (37) | 1.11±0.31 (28) | 2.63±0.56 (27) | 2.35±0.56 (27) | 67.5 |
| 30 | 10.5 | 3.76±0.44 (200) | 1.85±0.17 (39) | 1.89±0.46 (31) | 0.80±0.25 (27) | 2.33±0.48 (27) | 1.96±0.64 (27) | 67.5 |

^a Means±SD. Numbers in parenthesis indicate sample size.

Figure II-5-4 : Durée de développement des différents stades, taux d'éclosion et taux de survie de l'éclosion à l'adulte chez *T. tabaci* (d'après (Murai 2000))

Le délai avant la ponte des femelles élevées dans un milieu contenant miel et pollen au laboratoire, est de 9 jours à 15°C, 4 jours à 20°C, 2 jours à 25°C (Murai 2000) (figure II-5-4).

Le développement de *T. tabaci* est optimal à des températures de 20 à 25°C (Murai 2000) (figure II-5-5).

| Temp. (°C) | Mean generation time (<i>T</i>) (day) | Net reproductive rate (<i>R</i> ₀) | Intrinsic rate of natural increase/day (<i>r</i> _m) (/day) |
|------------|---|---|---|
| 15 | 85.6 | 164.7 | 0.0596 |
| 20 | 48.1 | 195.6 | 0.1097 |
| 23 | 37.3 | 270.4 | 0.1500 |
| 25 | 29.9 | 164.7 | 0.1709 |
| 30 | 16.9 | 62.7 | 0.0246 |

Figure II-5-5: Paramètres de la croissance de population de *T. tabaci* au laboratoire, à différentes températures (d'après (Murai 2000))

La température minimale estimée permettant le développement de l'œuf à l'adulte varie de 4,2°C à 11,5°C selon les zones géographiques et les plantes-hôtes (Stacey and Fellowes 2002).

En laboratoire, des femelles placées à une température de 10°C en contact avec des feuilles de poireau, survivent mais sont inactives ; elles ne donnent pas de larves, ce qui suppose que la ponte est inhibée à 10°C (Burnstone 2009), ce qui fait penser à une quiescence induite par la baisse des températures.

D'après un article récent (Murai 2000), on ne sait pas s'il existe des phénomènes de diapause chez *T. tabaci*. Une étude (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011) indique que certains auteurs (Sites and Chambers 1990) pensent que la température induit une diapause chez *T. tabaci* et que les œufs sont pondus dès que la température augmente au printemps.

Une étude en Pologne a montré que l'émergence des thrips avait lieu lorsque les poireaux ont 2 à 4 feuilles et que les thrips sont plus abondants lorsque les poireaux ont 5 à 7 feuilles (Duchovskiene 2006). Mais cette étude ne montre pas si cet effet est lié à la température, ou au stade phénologique de la plante ; elle ne montre pas non plus l'effet de la variété de poireau sur l'abondance des thrips.

| Temp. (°C) | <i>n</i> | Longevity ^a (days) | Fecundity ^{a,b} (total egg no./female) |
|------------|----------|-------------------------------|---|
| 15 | 34 | 86.6±36.6 c | 169.6±94.2 (349) b |
| 20 | 38 | 46.8±21.4 b | 210.0±148.9 (548) bc |
| 23 | 17 | 41.7±14.5 b | 270.4±111.6 (433) c |
| 25 | 26 | 25.0±10.2 ab | 165.0±84.8 (293) b |
| 30 | 23 | 12.8±4.6 a | 62.6±35.9 (124) a |

^a Means±SD. Means followed by the same letter in the same column were not significantly different at *p*=0.05 (Scheffé's multiple comparison test).

^b Maximum fecundity indicated in parenthesis.

Figure II-5-6 : Fécondité et longévité des femelles *T. tabaci* élevées sur miel et pollen à différentes températures (d'après (Murai 2000))

oignon est de 39 à 55 œufs de 18°C à 23,4°C [(Lall and Singh 1968) in (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011)] (Figure II-5-6).

La **longévité** des adultes diminue avec les températures et varient selon la plante-hôte ; elle est de 87 jours à 15°C, 47 jours à 20°C, et 25 jours à 25°C pour des femelles élevées en laboratoire dans un milieu contenant miel et pollen (Murai 2000) (figure II-4-6). La longévité est d'environ 20 jours sur oignon [(Lall and Singh 1968) in (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011)] (Figure II-5-6).

La **fécondité** des femelles (nombre d'œufs pondus au cours de la vie) varie selon la température, la plante et l'alimentation des femelles (Murai 2000). La fécondité est optimale à 23°C (270 œufs) dans un milieu contenant miel et pollen, en laboratoire (Murai 2000). Dans cette étude, une alimentation en miel n'est pas suffisante pour permettre la ponte, l'apport supplémentaire de pollen est nécessaire (Murai 2000) (figure II-4-6). La fécondité des femelles élevées sur

La **reproduction du thrips** prend plusieurs formes. Le plus souvent, les œufs non fécondés donnent des femelles (parthénogenèse thélytoque) (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011). Mais certains articles rapportent que les œufs non fécondés peuvent donner des mâles, et les œufs fécondés, des femelles ou que des œufs non fécondés donnent des mâles ou des femelles [voir réf. in (Nault, Shelton et al. 2006; Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011)].

Conclusion :

Thrips tabaci est un petit insecte responsable de dégâts importants en culture de poireau (tâches argentées sur les feuilles de poireau, liées à l'alimentation des larves et adultes). On le rencontre sur les poireaux et les oignons mais aussi sur de très nombreuses plantes cultivées (choux, colza, laitues, luzerne, blé, concombre...) et sur des mauvaises herbes de nombreuses familles (moutarde des champs, pissenlits...). Il localise les plantes par leur couleur. Il est considéré comme ayant de fortes capacités de dispersion, en particulier l'été par temps chaud.

Les adultes et les larves vivent entre les feuilles de poireaux et se nourrissent du contenu des cellules de feuilles. La reproduction ne nécessite pas la recherche de partenaires sexuels, les femelles pondent des œufs qui donneront des larves puis des nymphes qui deviendront des femelles. Il semble qu'une alimentation glucidique et protidique soit indispensable pour la ponte. Les protéines pourraient provenir du pollen des fleurs.

Dans nos régions, ce sont probablement les adultes et les larves qui passent l'hiver dans les poireaux, le blé, la luzerne, les mauvaises herbes mais aussi dans le sol des champs ou des bordures. On ne sait pas si cette espèce subit une diapause en hiver ou une quiescence. Il a été démontré que les adultes peuvent survivre à 10°C mais sont inactifs et ne se reproduisent pas. La longévité des femelles augmente quand les températures diminuent ; ainsi, on signale que les femelles peuvent vivre environ 87 jours à 15°C. Le développement des différents stades est ralenti lorsque les températures diminuent.

Les températures relativement élevées (20-25°C) constituent des conditions favorables au développement des différents stades et à la reproduction. En effet, la durée de développement de l'œuf à l'adulte est plus courte lorsque les températures sont plus élevées. La fécondité des femelles est plus importante aux alentours de 20-23°C.

Les traits de vie mentionnés ci-dessus peuvent ainsi expliquer en partie le nombre important de générations par an (5 à 6 générations dans l'ouest de la France) et l'explosion des populations de thrips en été.

c- Ennemis naturels connus du thrips du poireau

Diverses espèces de champignons entomopathogènes, nématodes, prédateurs et parasitoïdes sont connues et identifiées ; certaines ont été utilisées comme agents de lutte biologique.

Il existe un grand nombre de **prédateurs** de *T. tabaci* : chrysopes, syrphes, hyménoptère Sphecidae (mineuses), coccinelles, coléoptères Malachidae et Staphylinidae, carabes *Dromius*, orthoptères Grillidae, punaises, thrips prédateurs *Aeolothrips*, acariens, araignées [cf. in (Thicoipe 1990; Sabelis and Van Rijn 1997; Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011)]. Les punaises Hétéroptères Anthocoridae du genre *Orius* (Thicoipe 1990), appartiennent majoritairement à l'espèce *Orius majusculus* mais sa présence est variable selon les années, en culture d'*Allium* (Bosco and Tavella 2010) . *Orius sp* peut être efficace en cultures de poireaux, in vitro en conditions de laboratoire (Rat-Morris 1999). L'insecte Névroptère *Chrysoperla lucanisa* (chrysope) serait le prédateur le plus intéressant au champ (essai de lâcher de prédateurs dans culture de poireaux porte-graines, sous bâche plastique, en France) (Rat-Morris 1999).

Il existe des Hyménoptères, Eulophidae, en particulier *Ceranisus menes* , **parasitoïdes** de thrips. Les femelles pondent un œuf à l'intérieur des larves de thrips (Murai and Loomans 2001). C'est une espèce

cosmopolite (présente dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées) (Loomans, Murai et al. 1997). Au Japon, cette espèce parasite environ 34% de *T. tabaci* dans des parcelles d'oignons. Le parasitisme augmente au cours du temps et augmente quand la densité d'hôtes augmente [(Sakimura 1937) in (Loomans, Murai et al. 1997; Kirk 1997b)].

Différents **champignons entomopathogènes** sont connus [cf. in (Butt and Brownbridge 1997; Aviron, Krauss et al. 2009)] par exemple *Neozygites parvispora* [cité in (Trdan, Znidarcic et al. 2008), *Beauveria bassiana* et *Metarhizium anisopliae* efficaces (Maniania, Sithanatham et al. 2003; Thungrabeab, Blaeser et al. 2006)].

L'association de champignons pathogènes et de **nématodes** (*Paecilomyces fumosoroseus* + *Steinernema feltiae*) a réduit le nombre de thrips par plante et la fréquence d'infestation dans un essai sur oignon (Jung 2004). L'association champignons et de nématodes (*Lecanicillium muscarium* + *Steinernema feltiae*) a réduit le nombre de thrips par plante dans un essai sur poireau (Jung 2004).

Une autre étude a montré l'intérêt du nématode *Heterorhabditis indicus* contre *T. tabaci*. Des applications à 1.5 millions de nématodes par m² ont provoqué une mortalité des thrips de 70% par un traitement du sol, 55% par un traitement des feuilles [(Al-Siyabi, Kinawy et al. 2006) in (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011)]. Cependant les résultats méritent d'être confirmés (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011).

Certains auteurs (Parrella and Lewis 1997) considèrent que le contrôle des populations de *T. tabaci* par les ennemis naturels ne joue un rôle important au champ.

Conclusion :

Thrips tabaci possède de nombreux ennemis naturels : prédateurs (ex : chrysopes, syrphes, coccinelles, thrips prédateurs etc.), parasitoïdes (petits Hyménoptères capables de pondre dans les larves de thrips), champignons et nématodes entomopathogènes. On ne connaît pas de bactéries capables de limiter les thrips.

Les ennemis naturels participent à diminuer les populations de thrips mais selon certains auteurs, leur influence est mineure. En réalité, il est difficile de connaître leur impact réel au champ.

La façon dont les thrips du poireau utilisent les éléments du paysage est résumé sur la figure II-5-3 ; cette figure rend compte des incertitudes (mentionnées par des points d'interrogation) concernant certains phénomènes.

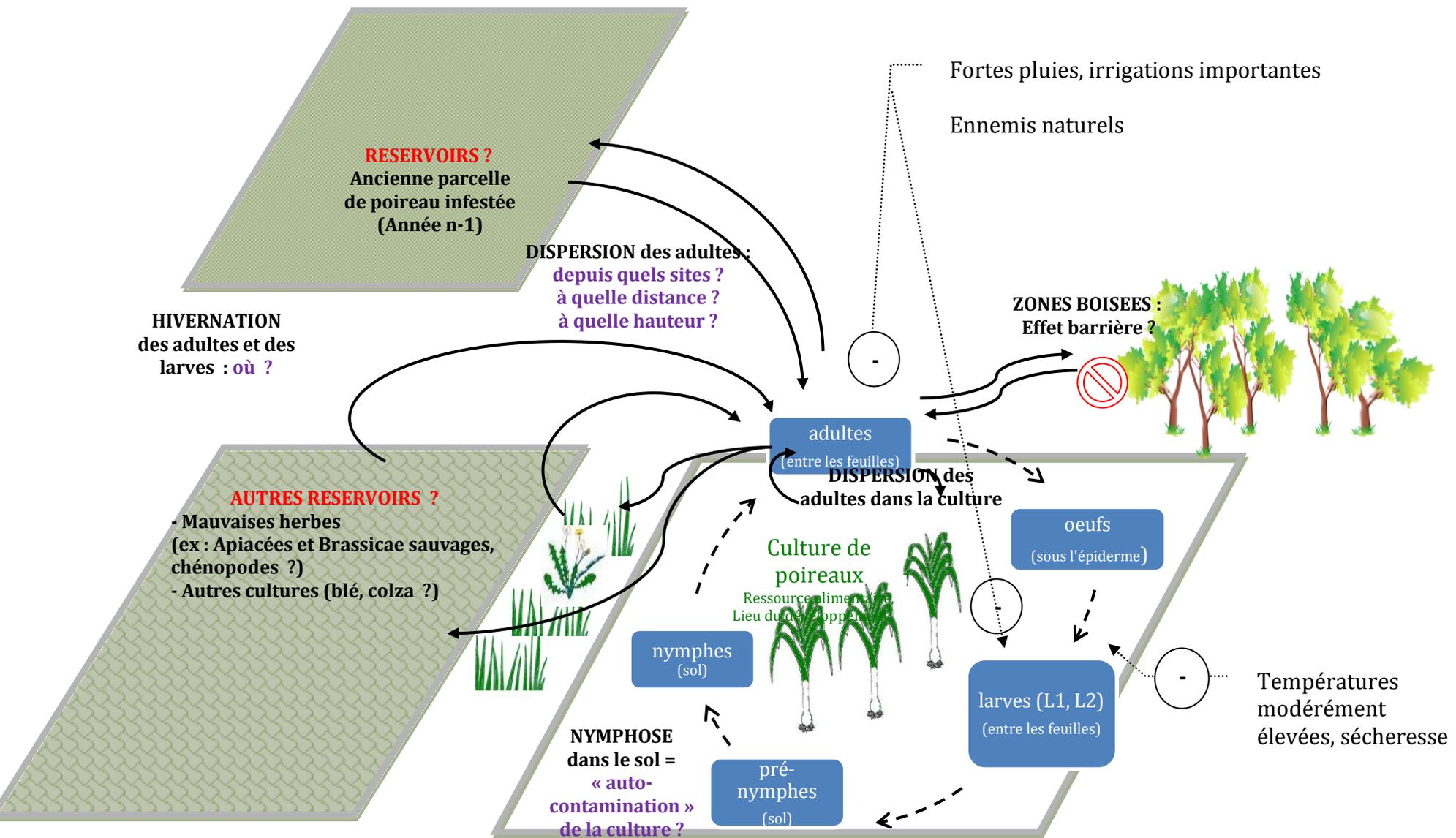


Figure II-5-3 : Déterminants des attaques de *Thrips tabaci* en culture de poireaux, au sein du paysage agricole

(+ effet positif, - effet négatif ; - - - > développement des stades de l'insecte ; → déplacement des individus adultes ; chaque point d'interrogation signifie l'incertitude de cette donnée).

De nombreux facteurs peuvent favoriser ou au contraire défavoriser le développement et la survie des thrips du poireau. Les principaux facteurs mentionnés dans la littérature sont exposés ci-dessous et les effets connus ou supposés des modes de gestion pratiqués sont résumés dans le tableau II-5-1.

Facteurs abiotiques naturels

Les **fortes pluies sont défavorables** car elles tuent les jeunes larves, diminuent la population de thrips (Kirk 1997b) et empêchent la dispersion des adultes (Morsello, Groves et al. 2008). Elles entraîneraient également le développement de champignons entomopathogènes sur les pré-nymphes et nymphes du sol (Aviron, Krauss et al. 2009). Cependant, aucune étude ne l'a montré (Burnstone 2009).

Des **températures relativement élevées et une sécheresse modérée** sont plutôt favorables aux thrips (Hommes, Hurni et al. 1994). Une étude au Kenya a montré que le nombre maximal de thrips observés sur des oignons était atteint lorsque les températures allaient de 18 à 21°C et quand la pluie était faible (114-144 mm/mois) (Waiganjo, Gitonga et al. 2008). Une autre étude en Egypte a montré que les femelles pondent davantage et vivent plus longtemps à des températures allant de 21.1°C à 23.6°C et à une humidité relative de 52% [(Hamdy and Salem 1994) in (Waiganjo, Gitonga et al. 2008)].

Le développement optimal des thrips semble se situer à une température de 25°C ; le taux d'éclosion des œufs devient faible à des températures de 30°C (par rapport à des températures entre 15 et 25°C) (Murai 2000).

Précédent cultural

Une étude aux Etats-Unis montre qu'avec un précédent « blé », le nombre de thrips adultes est à certaines dates, significativement plus important qu'avec un précédent « maïs » mais les résultats ne sont pas nets sur les 2 années d'étude (Buckland 2011).

En culture de poireaux, il est préférable de choisir des parcelles n'ayant pas eu de liliacées (poireaux, oignons...) l'année précédente (Thicoipe 1990).

Choix de la parcelle (environnement) : l'importance des bordures et des parcelles environnantes

Du fait de la capacité de migration des thrips, il semble très important de **limiter les sources possibles de thrips** autour des cultures. En culture d'oignons, il est recommandé d'éliminer les rejets d'oignons en surplus issus d'anciennes cultures, et d'éliminer les mauvaises herbes (Mo, Stevens et al. 2009). En culture de poireaux, il est préférable de choisir des parcelles isolées de cultures de liliacées hivernées (poireaux) (Thicoipe 1990).

L'entretien des cultures et des bordures semblent avoir de l'importance. En effet, les rejets d'oignons en surplus issus d'anciennes cultures et les mauvaises herbes sont des lieux d'hivernation pour les thrips adultes (Larentzaki, Shelton et al. 2007; Mo, Stevens et al. 2009).

Les cultures de poireaux près de zones boisées (arbres ou arbustes de plus de 2 mètres de haut et de 25 mètres de large) sont moins attaquées que les cultures en zones ouvertes (Belder, Elderson et al. 2002). D'après les auteurs, cela pourrait s'expliquer soit par l'effet barrière de ces zones (qui limiterait la migration des thrips), soit par la présence plus importante d'ennemis naturels.

Certains auteurs semblent remarquer que les infestations de thrips apparaissent plus tôt et sont plus fortes quand les mauvaises herbes proches sont éliminées par des paillis répétés ou par l'utilisation d'herbicides (Atakan and Uygur 2005).

Sol (type, texture, travail du sol)

L'aération du sol et l'apport de calcaire peuvent atténuer les dégâts (Thicoipe 1990).

Les labours seraient défavorables aux thrips qui font une partie de leur cycle dans le sol (à l'automne, dessiccation des larves mises à jour, ou en hiver, attaques par entomophtorales du sol) (Bournier 1983) mais aucune étude n'a prouvé cet effet.

Culture de poireau (variétés, semis/plantation, récolte, cultures pièges...)

Des essais pour trouver des **variétés de poireaux résistants à *T. tabaci*** ont été menés. Les variétés de poireaux d'automne moins attaquées sont les variétés « Sehlton F1 », « Upton », « Carlton », « Parton », « Roxton », « ZEFA plus », « Zeus F1 », « Alcazar » (en Suisse) [(Theiler, Buser et al. 2002) in (Aviron, Krauss et al. 2009)]. La variété de poireau *Allium ampeloprasum kurrat* serait résistante (Perus, Couloumies et al. 2010) ainsi que d'autres variétés « Jumper » et « Stricker » (poireaux d'été), « Delmas » et « Poulton » (poireaux d'automne) (Perus, Couloumies et al. 2010) mais les auteurs ne précisent pas la méthode d'étude. Selon certains auteurs, la recherche de variétés résistantes aux thrips est une piste à développer (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011).

Avancer la date de transplantation semble aussi être une piste intéressante puisque des oignons transplantés très tôt échappent davantage aux dégâts [(Kisha 1977) in (Bournier 1983)].

Récemment, des essais avec du sarrasin ou de la phacélie (comme **cultures pièges**) ont montré un nombre plus important d'adultes et de larves lorsque ces cultures sont bien développées (quand les plants d'oignon sont petits) (Buckland 2011). Les plants de carotte n'ont pas attiré les thrips. Les auteurs suggèrent ainsi l'intérêt d'utiliser ces plantes comme cultures pièges.

Apports (fertilisation azotée)

Une étude au Pakistan a montré qu'un apport très important d'azote (200 ou 250 Kg ha⁻¹) (au-dessus de l'apport optimal de 150 kg ha⁻¹) augmente le nombre de thrips par rapport à un apport modéré ou faible d'azote (0, 50, 100 ou 150 kg ha⁻¹) [(Malik, Nawaz et al. 2009) in (Buckland 2011)]. Une étude récente aux Etats-Unis a montré qu'à certaines périodes, des oignons soumis à des taux des apports standards en azote (401,8 Kg N ha⁻¹) ont des nombres plus importants d'adultes et de larves de thrips que des oignons soumis à des taux des apports plus faibles en azote (133,8 Kg N ha⁻¹), pour un rendement comparable (Buckland 2011).

Irrigation

Une **irrigation importante** par temps chaud et sec diminue la survie des nymphes dans le sol, à cause des champignons entomopathogènes [Dololyi 1996 in (Aviron, Krauss et al. 2009)]. L'irrigation permettrait la formation d'une croûte de sol, qui tuerait les thrips ; il semble intéressant de préférer des intervalles courts entre les arrosages et d'éviter les irrigations en sillon (le haut des buttes n'étant pas arrosé). L'idée est d'éviter les sols friables pour augmenter la mortalité des thrips (Kirk 1997b). Ainsi, cette pratique peut diminuer les dégâts (Bournier 1983; Thicoipe 1990) mais elle peut donner des résultats variables (Diaz-Montano, Fuchs et al. 2011).

Cultures intercalaires

Différents essais ont testé l'efficacité des cultures intercalaires de poireaux avec d'autres cultures.

Il semble que des **cultures intercalaires trèfle/ poireaux** soient intéressantes. En Hollande, une culture de poireaux intercalée avec du trèfle a révélé beaucoup moins de larves qu'en monocultures de poireaux

(Theunissen and Schelling 1999) et a été moins touchée par les dégâts (Theunissen and Schelling 1997). Des cultures de poireaux dont les lignes sont intercalées avec du trèfle, contiennent moins de thrips adultes que des monocultures de poireaux (cet effet semble persister quand on élimine le trèfle) (Belder, Elderson et al. 2000). Cependant, la mise en œuvre de cette culture intercalaire trèfle/poireau est difficile à mettre en œuvre [(cf. in (Aviron, Krauss et al. 2009)].

Des **cultures intercalaires poireaux/céleri** ne semblent pas intéressantes. Le nombre de *T. tabaci* (larves et adultes) ne diminue pas en culture de poireaux (d'été ou d'automne), contrairement à des travaux précédents. Par contre, les dégâts par les thrips sur les poireaux de récolte d'été diminuent (pas sur récolte d'automne (sans altérer la qualité des poireaux produits (taille, diamètre et couleur de fûts) et les rendements) (Haage, Bastiaans et al. 2001).

Des cultures intercalaires **oignons/carottes** diminuent l'infestation par les thrips par rapport à des monocultures d'oignons (en particulier s'il existe une alternance 1 rang de carottes/ 1 rang d'oignons et si le feuillage de carottes masque celui des oignons) (Uvah and Coaker 1984)

Une étude a comparé la **phacélie à feuille de tanaïsie** (*Phacelia tanacetifolia*) et le **sarrasin** au trèfle comme culture intercalaire avec l'oignon. La phacélie à feuilles de tanaïsie et sarrasin semblent donner moins de dégâts sur oignons que dans une culture intercalaire oignons/trèfles, mais la phacélie et sarrasin ont une croissance trop rapide qui entraîne une compétition importante avec les oignons cultivés et une faible récolte d'oignons ; les auteurs suggèrent de les planter à une moindre densité ou d'avoir des cultivars à croissance moins rapide ou de les mettre en culture « piège » aux bordures des parcelles d'oignons (Slovénie) (Trdan, Znidarcic et al. 2008).

Couverts : paillage, mulchs

Une étude a montré qu'un mulch **avec de la paille de blé** diminuait le nombre de larves par rapport à un sol nu (Larentzaki, Plate et al. 2008b) (mais il semble que c'est moins efficace lorsque les thrips sont en grand nombre).

L'effet d'un **couvert en plastique réfléchissant les UV** a également un rôle positif en début de saison quand les thrips ne sont pas trop abondants (Van Toor, Till et al. 2004).

Surveillance des populations, prévision des vols, seuil d'intervention

La surveillance régulière des populations d'adultes avec des pièges bleus englués (marque Rebell®) permet de détecter le début des infestations [cité dans plusieurs articles (Steene and Tirry 2007; Aviron, Krauss et al. 2009)]. L'intervention chimique en culture de poireau peut être envisagée si le seuil de tolérance de dix thrips par piège et par semaine est dépassé (Aviron, Krauss et al. 2009).

Les modèles de prévision des vols sont importants car ils permettent d'intervenir rapidement lors des vols prévus ; une fois les thrips installés, ils se déplaceraient peu et sont plus difficiles à atteindre (Perus, Couloumies et al. 2010).

Les modèles de prévision des vols, basés sur des cumuls de températures, en prenant en compte le taux de développement des différents stades conduisent à bonne corrélation avec les données de terrain (Mo, Stevens et al. 2009).

Il existe d'autres méthodes d'estimation des populations de thrips sur poireau. Pour estimer le nombre de larves et d'adultes sur les plantes, plusieurs techniques sont citées (Mautino, Bosco et al. 2012) : l'inspection visuelle des poireaux au champ ; le battage du poireau au dessus d'un plateau ; la collecte de poireau avec une pelle à main, dans un sac plastique, et dissection du poireau, feuille par feuille au laboratoire. L'inspection visuelle des plantes semble la méthode la plus fiable mais les autres méthodes donnent des résultats qui vont dans le même sens. Le battage donne un nombre plus faible de larves que l'inspection visuelle. Enfin, il est possible d'estimer le taux d'émergence des thrips du sol grâce à des pièges à émergence posés sur le sol (Larentzaki, Shelton et al. 2007).

Des travaux récents ont montré que des pièges blancs contenant des nicotinates permettait d'augmenter significativement le nombre de thrips piégés (Davidson, Butler et al. 2009; Wogin, Butler et al. 2010).

D'autres études récentes indiquent qu'il est intéressant d'évaluer également la quantité d'œufs présents à l'intérieur des tissus foliaires de l'oignon ; en effet, cette étude montre que les œufs constituent un réservoir très important de thrips, par rapport aux larves ou aux adultes (site à l'adresse <http://utahpests.usu.edu/ipm/files/uploads/PPTDocs/08sh-insects-onionthrips.pdf> consulté en septembre 2012). La méthode consiste à prélever la 3^{ème} feuille interne de l'oignon, de la laver (pour supprimer les autres stades) et de la placer avec du papier absorbant dans un sac plastique fermé à 25°C; 1 ou 2 semaines après, on lave de nouveau la feuille et l'intérieur du sac et on compte le nombre de thrips retrouvés dans 'eau de rinçage. L'étude indique 8 prélèvements par parcelle.

Insecticides

Ce sont surtout des insecticides foliaires et systémiques qui ont été utilisés. Les insecticides systémiques sont peu efficaces car les thrips se nourrissent du contenu des cellules des feuilles, pas des vaisseaux transporteurs de sève contenant ces insecticides. Les insecticides foliaires atteignent surtout les thrips situés dans les parties supérieures des poireaux, pas ceux abrités plus en profondeur au sein des gaines, ni les œufs situés sous l'épiderme (Aviron, Krauss et al. 2009).

De nombreux auteurs soulignent l'inefficacité de certains insecticides (Hommes, Hurni et al. 1994; MacIntyre Allen, Scott-Dupree et al. 2005; Shelton, Zhao et al. 2006; Foster, Gorman et al. 2010; Mautino, Bosco et al. 2012) ; pourtant ceux-ci sont largement utilisés pendant l'été en traitement de routine (Bosco and Tavella 2010) . Le nombre moyen de thrips par plante est assez variable, il peut être plus important dans les cultures traitées que dans les cultures biologiques (sans qu'il y ait de différence au niveau des dégâts entre les 2 cultures) (Bosco and Tavella 2010). Une autre étude récente montre que des cultures témoins d'oignons sans insecticide ne montrent pas d'infestations plus fortes que les cultures traitées avec différents insecticides (Mautino, Bosco et al. 2012). Récemment, une étude a identifié les 3 mutations responsables de la **résistance** de *T. tabaci* aux insecticides pyréthroïdes (Toda and Morishita 2009).

La littérature indique que des techniques d'application particulières peuvent améliorer l'action des insecticides :

- L'aspersion d'insecticides sous les feuilles (« droplets ») est plus efficace que les techniques d'aspersion conventionnelles en cultures de poireaux ou d'oignon (cité dans l'article (Aviron, Krauss et al. 2009)).
- L'utilisation d'agents mouillants et d'un volume de bouillie plus important que le dosage minimal est également plus efficace (Aviron, Krauss et al. 2009) ; un volume de 500 à 600 L/ha est préconisé (Leblanc 2010), voire de 1000 L/ha (Aviron, Krauss et al. 2009).
- Utiliser des jets balais plutôt que des jets coniques, avec un angle de buses de 22° vers l'avant, permet d'améliorer la pénétration des insecticides entre les feuilles (Leblanc 2010).
- L'utilisation de buses anti-dérives à 90% diminue le nombre de poireaux attaqués par rapport au témoin. Les buses anti-dérives donnent des gouttes plus grosses, qui coulent plus facilement dans la gaine du poireau et donc atteignent plus facilement les thrips cachés (Perus, Couloumies et al. 2010).
- Il est recommandé d'appliquer les traitements de préférence les jours chauds et en début d'après-midi (Burnstone and Collier 2009).

Substances répulsives, réduisant la ponte, l'alimentation ou le développement

Les odeurs d'**huiles essentielles** de Lamiacées pulvérisées sur des feuilles de poireaux, diminuent les dégâts dus à l'alimentation des thrips *T. tabaci* mais pas la survie des adultes (Koschier, Sedy et al. 2002):

Le linalool et l'eugenol sont des composés dont les odeurs sont répulsives pour les femelles. En effet, des expériences de laboratoire montrent que les femelles évitent ces odeurs, évitent les feuilles de poireaux traitées avec ces composés (à concentration de 1%), évitent de pondre sur des feuilles de poireaux traitées avec ces composés (à concentration de 1% et 0,1%)(Koschier, Riefler et al. 2007). L'eugenol (phenylpropanoïde) appliqué sur des feuilles de poireau ou de concombre à une concentration de 1% diminue le temps d'alimentation et le temps lié à la ponte de *T. tabaci* (mais il ne diminue pas le nombre d'œufs pondus) (Riefler and Koschier 2009). La pulvérisation de carvacrol (huile essentielle de thym...) à 1% et 0,1% dissuade la ponte de *T. tabaci* sur poireau (en laboratoire) (Sedy and Koschier 2003).

En laboratoire, l'application foliaire d'un **film de particules de kaolin** diminue la ponte, le taux d'éclosion des œufs, augmente le taux de développement des stades larvaires, réduit l'alimentation par rapport à des feuilles d'oignons traitées avec de l'eau ; au champ, elle diminue le nombre de thrips capturés par rapport à une parcelle témoin (Larentzaki, Shelton et al. 2008a).

En laboratoire, l'application foliaire de « **pyriproxyfen** » (analogue d'hormone juvénile) sur choux diminue la longévité, survie, fécondité des femelles s'étant alimentées sur des feuilles traitées (Liu 2003).

Barrières physiques

Des **filets couvrants** de type FILBIO réduisent la population de thrips de 75% au cours du 1er mois de culture de poireaux (Thicoipe 1990). Des filets de protection à maillage fin (0,2 à 0,8 mm) en début de saison retarde l'établissement des thrips [Dololyi 1996 in (Aviron, Krauss et al. 2009)] mais ils entraînent des problèmes de désherbage des jeunes plants. Un auteur signale l'importance de la qualité du plant de poireau produit en pépinière. Il relate que des filets de polyamide FILBIO ou P10 en pépinière (sur les arceaux) jusqu'à l'arrachage des plants pour la plantation permet de produire des plants de poireaux indemnes ou avec une très faible population de thrips (Thicoipe 1990).

Conclusion :

De nombreux facteurs influencent le développement des thrips au champ. Il est généralement admis que les fortes pluies ont un impact négatif sur les thrips (elles limitent les déplacements des adultes, elles induisent une mortalité importantes des jeunes larves et des nymphes dans le sol). Les faibles températures ralentissent le développement des thrips. Au contraire, des **températures assez élevées** (20-25°) et une **sécheresse modérée** (50% d'humidité) favorisent le développement.

De nombreuses pratiques culturales ont été employées pour lutter contre les thrips (Tableau II-5-1).

Une étude montre qu'un **précédent** « blé » peut favoriser les thrips (contrairement à un précédent « maïs ») mais cette étude n'est pas catégorique. Il est préférable d'éviter une culture de de Liliacées l'année précédente dans la même parcelle.

Les thrips étant polyphages et sans doute capables de migrer facilement, il semble donc très important de **limiter les sources possibles de thrips** autour des cultures (mauvaises herbes, anciennes cultures de poireaux d'hiver). Les poireaux près de zones boisées sont moins attaqués que les poireaux en zones ouvertes ; ce serait peut être dû à un effet barrière des arbres/arbustes ou aux ennemis naturels plus abondants.

Un sol aéré et les labours en automne et en hiver, semblent défavorables aux thrips. Favoriser des variétés de poireaux résistants aux thrips, avancer la date de transplantation ou utiliser des cultures pièges de sarrasin ou de phacélie sont des stratégies intéressantes pour limiter les dégâts. Réduire l'apport azoté est important.

L'apport de calcaire pourrait atténuer les dégâts. Une irrigation importante par temps chaud et sec diminue la survie des nymphes dans le sol, à cause des champignons entomopathogènes ou de la croûte de sol qui se forme en cas d'irrigation régulière. Utiliser des cultures intercalaires de trèfle ou de phacélie, sarrasin ou de carottes peut permettre de diminuer les infestations mais ces cultures posent des problèmes de compétition difficiles à maîtriser. Un mulch avec de la paille de blé ou un couvert en plastique réfléchissant les UV, diminue la présence des larves.

La **surveillance des populations** d'adultes est régulièrement effectuée avec des pièges bleus englués ou des pièges blancs contenant des nicotines. D'autres méthodes permettent d'estimer le nombre d'œufs, de larves et d'adultes sur les plantes, par inspection visuelle. On constate que le nombre moyen de thrips par plante est assez variable.

Les modèles de prévision des vols, basés sur des cumuls de températures, en prenant en compte le taux de développement des différents stades conduisent à bonne corrélation avec les données de terrain.

Certains **insecticides** sont reconnus comme inefficaces. La résistance de *T. tabaci* aux insecticides pyréthroïdes a été prouvée (des gènes de résistance ont été identifiés). Des cultures témoins sans insecticide ne montrent pas d'infestations plus fortes que les cultures traitées avec différents insecticides. Améliorer les techniques d'application des insecticides permet de mieux atteindre les adultes et les larves, qui vivent cachés dans la gaine du poireau entre les feuilles. De plus, il est préférable d'appliquer les traitements de préférence les jours chauds et en début d'après-midi.

Des odeurs d'**huiles essentielles** de différentes plantes (lavande, clou de girofle, thym...) ou le dépôt d'un film de particules de kaolin, pulvérisés sur des feuilles de poireaux peuvent diminuer la ponte ou les dégâts liés à l'alimentation.

Des **filets couvrants** de type FILBIO sont intéressants le 1er mois en début de culture ou en pépinière pour limiter le développement des populations (mais ils présentent des problèmes de désherbage).

L'efficacité de ces pratiques mais n'est pas toujours démontrée, néanmoins, nous pouvons tirer quelques **propositions** ; certaines d'entre elles méritent d'être vérifiées (elles ont donc été signalées par un point d'interrogation).

Précédent cultural :

Éviter le poireau Eviter le blé ?

Choix de la parcelle :

Choisir une parcelle proche de zone boisée

Éviter les mauvaises herbes (lieux d'hivernation des thrips) et autres plantes-hôtes possibles

Éviter la proximité de culture de poireau d'hiver

Sol : Favoriser les labours avant plantation ? (pour limiter la survie des nymphes ?)

Culture de poireau :

Utiliser des variétés résistantes

Avancer la date de plantation des poireaux

Utiliser des cultures pièges (telle que la phacélie, sarrasin) ?

Apports :

Limiter les apports azotés - Augmenter les apports calcaires ?

Irrigation :

Favoriser une bonne irrigation

Cultures intercalaires :

Favoriser les cultures intercalaires avec le trèfle, la phacélie, le sarrasin ?

Couverts :

Paillage de blé ? (l'efficacité semble limitée) - Couvert réfléchissant les UV ?

Surveillance et prévision des vols :

Utiliser les modèles de prévision - Surveiller les vols (pièges bleus) et la présence des thrips dans les plantes

Insecticides :

Traiter en début d'après-midi, par temps chaud - Améliorer les techniques d'application

Favoriser les insecticides sélectifs et réduire les applications (pour éviter les résistances)

Applications foliaires :

Utiliser des substances répulsives ou réduisant la ponte (huiles essentielles, kaolin, « pyriproxyfen ») ?

Barrières physiques

Favoriser les filets couvrants

Tableau II-5-1 : Modes de gestion et facteurs de l'environnement, favorables ou défavorables au développement de *Thrips tabaci* et de ses ennemis naturels, d'après la littérature et perspectives en Basse-Normandie

| Pratique culturale ou mode de gestion | | Modalité | Effet connu ou supposé | Modes de gestion envisageables en Basse-Normandie mais effet à vérifier | Perspectives : questions posées | |
|---------------------------------------|---|--|---|--|--|--|
| Précédent | Rotation | Durée et position par rapport au cycle de développement de l'insecte | peut-être qu'un précédent blé favoriserait les thrips | choisir des parcelles sans Alliées l'année précédente et sans blé ? | Quelle est l'influence d'un précédent de type « blé » ? | |
| | Sol nu, jachère | | non connu | | | |
| | Interculture ou engrais verts | | non connu | | | |
| Choix de la parcelle | Taille de la parcelle | | non connu | | Quelle est la distance de dispersion des adultes ? | |
| | Espacement de la parcelle par rapport à des parcelles proches de même culture | | non connu | choisir des parcelles éloignées des autres Alliées | | |
| | Environnement de la parcelle | Haies, bordures, bandes enherbées, zones boisées, rivière... (refuges ?) Pas de bordures, haies... | - proximité de zones boisées => moins d'attaques - mauvaises herbes, colza, choux, blé... plantes-hôtes possibles - lieux d'hivernation : sol des parcelles cultivées, autres plantes | choisir des parcelles proches de zones boisées éliminer les éventuelles plantes-hôtes choisir une parcelle éloignée d'autres plantes susceptibles de servir de refuge ou d'hivernation | Quelles sont les autres plantes réellement utilisées comme refuges ? ou sur lesquelles les thrips passent l'hiver ? peut-on concrètement envisager de les éliminer ? Quelles sont les sources de thrips au printemps ? (plantes, sol) | |
| Sol | Type de sol | | non connu | | | |
| | Texture du sol | | sol aéré, calcaire défavorable ? | | | |
| | Travail du sol | Pas de labour Labour peu profond par rapport au cycle de développement de l'insecte - Binage buttage ... Labour profond par rapport au cycle de développement de l'insecte | effet des labours non connu aération du sol pourrait atténuer les dégâts | favoriser les labours avant la plantation pourrait peut-être limiter la survie des nymphes dans le sol | Le labour est-il réellement défavorable à la survie des thrips ? quand ? quelle profondeur de labour ? | |
| Culture de poireau | Variétés résistantes | | - certaines variétés de poireau seraient plus ou moins résistantes (voir texte) | utiliser des variétés résistantes | Quel est le mécanisme de résistance des plantes aux thrips ? | |
| | Date de semis/plantation | | - la plantation tardive permettrait de limiter les dégâts des thrips sur oignon | avancer la date de plantation des poireaux | Quelles pratiques de plantation seraient défavorables aux thrips ? | |
| | Densité de plantation | | non connu | | | |
| | Largeur entre les rangs | | non connu | | | |
| | Stade sensible de la culture | Stade phénologique | | non connu | | |
| | | Taille des plantes | | non connu | | |
| | Date de récolte | | non connu | | | |
| Cultures pièges | | phacélie et sarrasin seraient des cultures pièges intéressantes | favoriser des cultures pièges dans les cultures | | | |
| Apports : fertilisation, amendements | Apports | Fumier, matières organiques | - apport trop important d'azote augmente le nombre de thrips - amendement calcaire pourrait atténuer les dégâts | limiter les apports azotés augmenter les apports calcaires | Quelle est la quantité minimale d'engrais azoté à apporter, de façon à avoir un bon rendement sans favoriser trop les thrips ? Est-ce qu'un amendement calcaire a un intérêt ? | |
| | | Soufre | | | | |
| | | Autres : cendres, sable, calcaire... | | | | |
| Irrigation | faible | | Un apport d'eau important est néfaste à la survie des thrips. | favoriser une bonne irrigation | | |
| | importante | | | | | |
| Cultures intercalaires (plantes) | | | intérêt des cultures intercalaires trèfle/poireaux, phacélie/oignons | favoriser les cultures intercalaires | | |

| | | | | | | |
|--|---|--------------------------------------|---|---|--|--|
| compagnes) | | | et sarrasin/oignons | | | |
| Couverts : paillages, mulchs | | | paillage de blé diminue le nombre de larves par rapport à un sol nu (sauf en cas de fortes infestations) couvert réfléchissant les UV | favoriser les couverts | | |
| Prévision des vols | Modèles de prévision Surveillance des vols et/ou des pontes (piégeage) | | efficacité des modèles de prévision des vols pour alerter du début des vols | continuer l'utilisation des modèles de prévision des vols | | |
| Traitements insecticides | Traitement des parties aériennes | | traitements foliaires apparition de résistances à certains insecticides | utiliser des insecticides sélectifs, réduire les doses et le nombre d'application pour éviter les résistances | | |
| | Traitement du sol | | non connu | | | |
| | Traitement des semences | | non connu | | | |
| | Modalités d'application (par bande, en granulés, moment...) | | - intérêt de faire des application sous les feuilles - utiliser d'agents mouillants et des volumes important de bouillie - utiliser des jets balais plutôt que côniques - utiliser des buses anti-dérives à 90% - traiter de préférence les jours chauds et en début d'après midi | améliorer les techniques d'application des insecticides traiter en début d'après midi, par temps chaud | | |
| | Intervalles entre les applications | | non connu | | | |
| | Substances répulsives, réduisant la ponte ou le développement | | - intérêt des huiles essentielles de Lamiacées, linalool, eugenol, carcavol - intérêt de l'application foliaire de kaolin - intérêt de l'application de pyriproxyfen | favoriser les applications de substances répulsives | | |
| Barrières physiques | Filets anti-insectes | Filets couvrants, bâches | intérêt des filets couvrants en pépinière et en début de saison pour retarder l'installation des thrips | favoriser les filets couvrants | | |
| | | Filets verticaux | non connu | | A quelle hauteur se déplacent les thrips ? | |
| Auxiliaires ou ennemis naturels | Champignons entomopathogènes | | plusieurs espèces connues | | Favoriser l'impact des ennemis naturels (lutte biologique par conservation) : comment ? (d'abord en limitant les insecticides ! ou en utilisant des insecticides sélectifs) | |
| | Bactéries entomopathogènes | | non connu | | | |
| | Nématodes entomopathogènes | | plusieurs espèces connues | | | |
| | Prédateurs | Favorisation des prédateurs naturels | - prédateurs connus : chrysopes, syrphes, coccinelles et autres coléoptères, punaises Orius, thrips prédateurs, acariens... | | | |
| | | Lâchers inondatifs | | | | |
| Parasitoïdes | Favorisation des parasitoïdes naturels | | | | | |
| Conduite en cas d'attaques importantes | Arrachage de la culture | non connu | | | Comprendre les conséquences d'un arrachage, de l'enfouissement, du labour, en cas de fortes infestation | |
| | Enfouissement | non connu | | | | |
| | Labour | non connu | | | | |

Compte tenu des effets plus ou moins démontrés des modes de gestion et surtout des traits de vie de l'espèce, de **nombreuses questions** peuvent être soulevées :

Quelle est l'influence d'un précédent (de type blé) sur *T. tabaci* ? (dans la mesure où le paysage est dominé par les poireaux sur pratiquement toute l'année et que les adultes sont capables de se disperser)

Quelle est la distance de dispersion des adultes *T. tabaci* ? (le but est de savoir à quelle distance il est préférable d'éloigner les cultures de poireau) Cette question est importante mais n'a pas de réponse évidente car il est très difficile d'appréhender les distances parcourues par les petits insectes.

A quelle hauteur se déplacent-ils ? (peut-on imaginer des filets verticaux pour limiter la migration des thrips vers les parcelles ?)

Quelles sont les plantes réellement utilisées comme refuges ou comme sites d'hivernation dans l'ouest de la France ? (mais si les mauvaises herbes servent de refuges, peut-on envisager de les éliminer avant l'installation des thrips?)

Quelles sont les sources de thrips au printemps ? (viennent-ils surtout des plantes environnantes ou du sol ?) Il semble que cette question n'a pas de réponse évidente.

Les parcelles entourées de zones boisées présentent-elles un avantage pour limiter les thrips ?

Le labour est-il vraiment défavorable aux thrips ? Quand faut-il le mettre en place ? Quelle profondeur de labour est à envisager ?

Est-ce qu'un apport de calcaire a un intérêt ?

Quelle quantité minimale d'engrais azoté doit-on apporter (pour avoir un rendement correct sans favoriser les thrips) ?

Peut-on imaginer mettre en place des cultures pièges pour les thrips (type phacélie ou sarrasin) ? ou des cultures intercalaires avec du trèfle, ou des carottes, ou de la phacélie, du sarrasin ?

Un mulch avec de la paille de blé présente-t-il un intérêt ?

Il semble nécessaire de continuer à rechercher des variétés résistantes.

Il semble également intéressant de tester l'influence de substances répulsives sur le feuillage pour limiter la ponte et l'alimentation des thrips : huiles essentielles, kaolin, pyriproxyfen par exemple.

Enfin, favoriser les régulations naturelles (lutte biologique par conservation) est une idée très intéressante mais elle se heurte à des difficultés importantes. En effet, on ne sait pas mesurer la régulation par les ennemis naturels (cela nécessite aussi des études de grande envergure, à une échelle spatiale importante). De plus, la littérature n'indique pas quelles stratégies on peut envisager pour favoriser ces régulations naturelles.

En conclusion, de très nombreux facteurs déterminent l'arrivée et le développement des populations de thrips en culture de poireaux. Ces facteurs sont variables, souvent imprévisibles et mal connus. Beaucoup de questions restent posées. En l'état actuel des connaissances, il n'est donc pas possible de déterminer les risques liés aux thrips pour une parcelle.

Références bibliographiques sur le thrips du poireau

Al-Siyabi, A. A., M. M. Kinawy, et al. (2006). "The susceptibility of onion thrips, *Thrips tabaci* to *Heterorhabditis indicus*." Commun Agric Appl Biol Sci. **71**(2 Pt A): 239-243.

Atakan, E. and S. Uygur (2005). "Winter and spring abundance of *Frankliniella* spp. and *Thrips tabaci* Lindeman (Thysan., Thripidae) on weed host plants in Turkey." Journal of Applied Entomology **129**(1): 17-26.

Aviron, S., J. Krauss, et al. (2009). "Lutte contre le thrips sur le poireau : les moyens chimiques suffisent-ils?" Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic. **41**(4): 231-238.

- Belder, E. d., J. Elderson, et al. (2002). "Effect of woodlots on thrips density in leek fields: a landscape analysis." Agriculture Ecosystems & Environment **91**(1-3): 139-145.
- Belder, E. d., J. Elderson, et al. (2000). "Effects of undersown clover on host-plant selection by Thrips tabaci adults in leek." Entomologia Experimentalis Et Applicata **94**(2): 173-182.
- Bosco, L. and L. Tavella (2010). "Population dynamics and integrated pest management of Thrips tabaci on leek under field conditions in northwest Italy." Entomologia Experimentalis Et Applicata **135**(3): 276-287.
- Bournier (1978). "Biologie d'un thrips prédateur *Aeolothrips intermedius* (Thys. : Aeolothripidae)." Entomophaga **23**(4): 403-410.
- Bournier, A. (1983). Les Thrips : biologie, importance agronomique. Paris, INRA.
- Buckland, K. R. (2011). Evaluating Fertilizer Rate, Crop Rotation and Trap Crops for Effects on Onion Growth and Yield, Soil Health, Thrips Densities and Iris Yellow Spot Virus Incidence. Plants, Soils, and Climate, Utah State University: 132p.
- Burnstone, J. and R. Collier (2009). "Improving the targeting of thrips control measures." IOBC/WPRS Bulletin **51**: 49-56.
- Burnstone, J. A. (2009). Investigations into the biology and behaviour of *Thrips tabaci* L. Philosophy in Plant and Environmental Sciences. Warwick HRI, University of Warwick: 1995.
- Butt, T. M. and M. Brownbridge (1997). "Fungal pathogens of thrips." Thrips as crop pests: 399-433.
- Davidson, M. M., R. C. Butler, et al. (2009). "Pyridine Compounds Increase Thrips (Thysanoptera: Thripidae) Trap Capture in an Onion Crop." Journal of Economic Entomology **102**(4): 1468-1471.
- Diaz-Montano, J., M. Fuchs, et al. (2011). "Onion Thrips (Thysanoptera: Thripidae): A Global Pest of Increasing Concern in Onion." Journal of Economic Entomology **104**(1): 1-13.
- Duchovskiene, L. (2006). "The abundance and population dynamics of onion thrips (*Thrips tabaci* Lind.) in leek under field conditions." Agronomy Research **4**(Sp. Iss. SI): 163-166.
- Fathi, S., F. Gholami, et al. (2011). "Life history parameters of Thrips tabaci (Thysanoptera:Thripidae) on six commercial cultivars of canola." Applied Entomology and Zoology **46**(4): 505-510.
- Foster, S. P., K. Gorman, et al. (2010). "English field samples of Thrips tabaci show strong and ubiquitous resistance to deltamethrin." Pest Management Science **66**(8): 861-864.
- Haage, I., L. Bastiaans, et al. (2001). "Using celery as second crop in leek: does it fight against weeds and thrips?" Phytoma(543): 49-51.
- Hamdy, M. K. and M. Salem (1994). "The effect of plantation dates of onion, temperature and relative humidity on the population density of the onion thrips, *Thrips tabaci* Lind. in Egypt." Annals of Agricultural Science, Ain-Shamd Univ. **39**(1): 417-424.
- Harding, J. A. (1961). "Effect of migration, temperature, and precipitation on thrips infestations in south Texas." Journal of Economic Entomology **54**(1): 77-&.
- Hommel, M., B. Hurni, et al. (1994). "Action thresholds for pests of leek - results from a co-operative experiment." IOBC/WPRS Bulletin **17**(8): 67-74.
- Jung, K. (2004). "Combined use of insect pathogenic fungi and nematodes against the onion thrips, *Thrips tabaci*, in the field." Bulletin OILB/SROP **27**(8): 141-143.
- Kirk, W. D. J. (1997a). Feeding. Thrips as crop pests: 119-174.
- Kirk, W. D. J. (1997b). Distribution, abundance and population dynamics. Thrips as crop pests: 217-257.
- Kisha, J. S. A. (1977). "Cultural and insecticidal control of thrips tabaci on onions in Sudan." Annals of Applied Biology **86**(2): 219-228.
- Koschier, E. H., J. Riefler, et al. (2007). "Bioactive plant compounds for control of *Thrips tabaci*." Bulletin OILB/SROP **30**(8): 1-8.
- Koschier, E. H., K. A. Sedy, et al. (2002). "Influence of plant volatiles on feeding damage caused by the onion thrips *Thrips tabaci*." Crop Protection **21**(5): 419-425.
- Lall, B. S. and L. M. Singh (1968). "Biology and control of the onion thrips in India." Journal of Economic Entomology **61**(3): 676-679.
- Larentzaki, E., J. Plate, et al. (2008b). "Impact of straw mulch on populations of onion thrips (Thysanoptera : Thripidae) in onion." Journal of Economic Entomology **101**(4): 1317-1324.

- Larentzaki, E., A. M. Shelton, et al. (2007). "Overwintering locations and hosts for onion thrips (Thysanoptera : Thripidae) in the onion cropping ecosystem in New York." Journal of Economic Entomology **100**(4): 1194-1200.
- Larentzaki, E., A. M. Shelton, et al. (2008a). "Effect of kaolin particle film on *Thrips tabaci* (Thysanoptera : Thripidae), oviposition, feeding and development on onions: A lab and field case study." Crop Protection **27**(3-5): 727-734.
- Leblanc, M. (2010). Thrips de l'oignon : quelques pistes pour accroître l'efficacité des traitements. Ste-Martine, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Lewis, T. (1997). Thrips as Crop Pests, CAB International.
- Linford, M. B. (1932). "Transmission of the pineapple yellow-spot virus by *Thrips tabaci*." Phytopathology **22**(4): 301-324.
- Liu, T. X. (2003). "Effects of a juvenile hormone analog, pyriproxyfen, on *Thrips tabaci* (Thysanoptera : Thripidae)." Pest Management Science **59**(8): 904-912.
- Loomans, A. J. M., T. Murai, et al. (1997). "Interactions with hymenopterous parasitoids and parasitic nematodes." Thrips as crop pests: 355-397.
- MacIntyre Allen, J. K., C. D. Scott-Dupree, et al. (2005). "Resistance of *Thrips tabaci* to pyrethroid and organophosphorus insecticides in Ontario, Canada." Pest Management Science **61**(8): 809-815.
- Malik, M. F., M. Nawaz, et al. (2009). "Effect of Different Nitrogen Regimes on Onion Thrips, *Thrips tabaci* Lindemann, on Onions, *Allium cepa* L." Southwestern Entomologist **34**(3): 219-225.
- Maniania, N. K., S. Sithanatham, et al. (2003). "A field trial of the entomogenous fungus *Metarhizium anisopliae* for control of onion thrips, *Thrips tabaci*." Crop Protection **22**(3): 553-559.
- Mautino, G. C., L. Bosco, et al. (2012). "Integrated management of *Thrips tabaci* (Thysanoptera: Thripidae) on onion in north-western Italy: basic approaches for supervised control." Pest Management Science **68**(2): 185-193.
- Mo, J., M. Stevens, et al. (2009). A temperature driven daily process model for onion thrips populations in onions. 18th World IMACS / MODSIM Congress. Cairns, Australia: 554-560.
- Morsello, S. C., R. L. Groves, et al. (2008). "Temperature and precipitation affect seasonal patterns of dispersing tobacco thrips, *Frankliniella fusca*, and onion thrips, *Thrips tabaci* (Thysanoptera : Thripidae) caught on sticky traps." Environmental Entomology **37**(1): 79-86.
- Mortiz, G. (1997). "Structure, growth and development." Thrips as crop pests.: 15-63.
- Murai, T. (2000). "Effect of temperature on development and reproduction of the onion thrips, *Thrips tabaci* Lindeman (Thysanoptera : Thripidae), on pollen and honey solution." Applied Entomology and Zoology **35**(4): 499-504.
- Murai, T. and A. J. M. Loomans (2001). "Evaluation of an improved method for mass-rearing of thrips and a thrips parasitoid." Entomologia Experimentalis et Applicata **101**(3): 281-289.
- Nault, B. A., A. M. Shelton, et al. (2006). "Reproductive modes in onion thrips (Thysanoptera : Thripidae) populations from New York onion fields." Environmental Entomology **35**(5): 1264-1271.
- North, R. C. and A. M. Shelton (1986a). "Ecology of Thysanoptera within Cabbage Fields." Environmental Entomology **15**(3): 520-526.
- North, R. C. and A. M. Shelton (1986b). "Overwintering of the Onion Thrips, *Thrips tabaci* (Thysanoptera: Thripidae), in New York." Environmental Entomology **15**(3): 695-699.
- Parrella, M. P. and T. Lewis (1997). "Integrated pest management (IPM) in field crops." Thrips as crop pests: 595-614.
- Perus, M., F. Couloumies, et al. (2010). "Optimiser la protection du poireau: où en est-on de part et d'autre de la frontière; quelles sont les perspectives d'évolution ?" Jade Info **6**: 1-8.
- Rat-Morris, E. (1999). "Biological control of *Thrips tabaci* on protected leek seed crops." Bulletin OILB/SROP **22**(1): 201-204.
- Riefler, J. and E. H. Koschier (2009). "Behaviour-modifying activity of eugenol on *Thrips tabaci* Lindeman." Journal of Pest Science **82**(2): 115-121.
- Sabelis, M. W. and P. C. J. Van Rijn (1997). "Predation by insects and mites." Thrips as crop pests: 259-354.
- Sakimura, K. (1937). "Introduction of *Thripoctenus brui* Vuillet, parasite of *Thrips tabaci* Lind., from Japan to Hawaii." Journal of Economic Entomology **30**: 799-802.

- Sedy, K. A. and E. H. Koschier (2003). "Bioactivity of carvacrol and thymol against *Frankliniella occidentalis* and *Thrips tabaci*." Journal of Applied Entomology **127**(6): 313-316.
- Shelton, A. M., J. Z. Zhao, et al. (2006). "Patterns of Insecticide Resistance in Onion Thrips (Thysanoptera: Thripidae) in Onion Fields in New York." Journal of Economic Entomology **99**(5): 1798-1804.
- Sites, R. W. and W. S. Chambers (1990). "Initiation of vernal activity of *Frankliniella occidentalis* and *Thrips tabaci* on the Texas south plains." Southwest. Entomol. **15**: 339-343.
- Sites, R. W., W. S. Chambers, et al. (1992). "Diel periodicity of thrips (Thysanoptera, Thripidae) dispersion and the occurrence of *Frankliniella-Williamsi* on onions." Journal of Economic Entomology **85**(1): 100-105.
- Smith, E. A., A. Ditommaso, et al. (2011). "Weed Hosts for Onion Thrips (Thysanoptera: Thripidae) and Their Potential Role in the Epidemiology of Iris Yellow Spot Virus in an Onion Ecosystem." Environmental Entomology **40**(2): 194-203.
- Stacey, D. A. and M. D. E. Fellowes (2002). "Temperature and the development rates of thrips: Evidence for a constraint on local adaptation?" European Journal of Entomology **99**(3): 399-404.
- Steene, F. v. d. and L. Tirry (2007). "Triptacon, a strategy for a supervised control of *Thrips tabaci* Lind in leek crops in Flanders (Belgium)." Bulletin OILB/SROP **30**(8): 91-100.
- Terry, L. I. (1997). "Host selection, communication and reproductive behaviour." Pest thrips in perspective: 65-118.
- Theiler, R., H. Buser, et al. (2002). "Variétés de poireau pour la culture d'automne." Der Gemüsebau/Le Maraîcher mars: 10-13.
- Theunissen, J. and H. Legutowska (1991b). "THRIPS-TABACI LINDEMAN (THYSANOPTERA, THIRIPIDAE) IN LEEK - WITHIN-PLANT DISTRIBUTION." Journal of Applied Entomology-Zeitschrift Fur Angewandte Entomologie **112**(3): 309-316.
- Theunissen, J. and G. Schelling (1997). "Damage threshold for *Thrips tabaci* (Thysanoptera: Thripidae) in monocropped and intercropped leek." European Journal of Entomology **94**(2): 253-261.
- Theunissen, J. and G. Schelling (1999). "Host-plant finding and colonization by *Thrips tabaci* in monocropped leeks and in leeks undersown with clover." Bulletin OILB/SROP **22**(5): 171-180.
- Thicoipe, J. P. (1990). "*Thrips tabaci* on leek. Towards a global strategy." Infos-CTIFL (Paris)(60): 15-20.
- Thungrabeab, M., P. Blaeser, et al. (2006). "Effect of temperature and host plant on the efficacy of different entomopathogenic fungi from Thailand against *Frankliniella occidentalis* (Pergande) and *Thrips tabaci* Lindeman (Thysanoptera : Thripidae) in the laboratory." Journal of Plant Diseases and Protection **113**(4): 181-187.
- Toda, S. and M. Morishita (2009). "Identification of Three Point Mutations on the Sodium Channel Gene in Pyrethroid-Resistant *Thrips tabaci* (Thysanoptera: Thripidae)." Journal of Economic Entomology **102**(6): 2296-2300.
- Trdan, S., D. Znidarcic, et al. (2008). "Yield of early white cabbage grown under mulch and non-mulch conditions with low populations of onion thrips (*Thrips tabaci* Lindeman)." International Journal of Pest Management **54**(4): 309-318.
- Ullman, D. E., J. L. Sherwood, et al. (1997). "Thrips as vectors of plant pathogens." Thrips as crop pests: 539-565.
- Uvah, III and T. H. Coaker (1984). "Effect of mixed cropping on some insect pests of carrots and onions." Entomologia Experimentalis Et Applicata **36**(2): 159-167.
- Van Toor, R. F., C. M. Till, et al. (2004). Evaluation of UV reflective mulches for protection against thrips (*Thrips tabaci*) in onion (*Allium cepa*) crops. New Zealand Plant Protection, Vol 57. S. M. Zydembos: 209-213.
- Villeneuve, F., J. P. Bosc, et al. (1997). "*Thrips tabaci* on leeks and directed control." Infos-CTIFL (Paris)(128): 39-43.
- Waganjo, M. M., L. M. Gitonga, et al. (2008). "Effects of weather on thrips population dynamics and its implications on the thrips pest management." African Journal of Horticultural Science **1**: 82-90.
- Whitfield, A. E., D. E. Ullman, et al. (2005). "Tospovirus-thrips interactions." Annual Review of Phytopathology **43**: 459-489.
- Wogin, M. J., R. C. Butler, et al. (2010). "Field response of onion thrips and New Zealand flower thrips to single and binary blends of thrips lures." Canadian Entomologist **142**(1): 75-79.

6- Etat des connaissances sur la mouche du chou *Delia radicum* L.

a- Culture de chou

La plantation des choux au champ en Basse-Normandie s'effectue généralement de juin à juillet mais peut débuter dès mars-avril pour les choux verts/rouges/blancs ou les brocolis (figure II-6-1).

Dans le Val de Saire, la culture s'effectue avec une rotation de 4 ans sur une même parcelle. Le précédent cultural le plus courant est une culture de céréales ou de pommes de terre primeurs.

La récolte se déroule de juin à fin mai de l'année suivante, toutes espèces confondues. On note donc que les choux sont présents dans la zone de production tout au long de l'année.

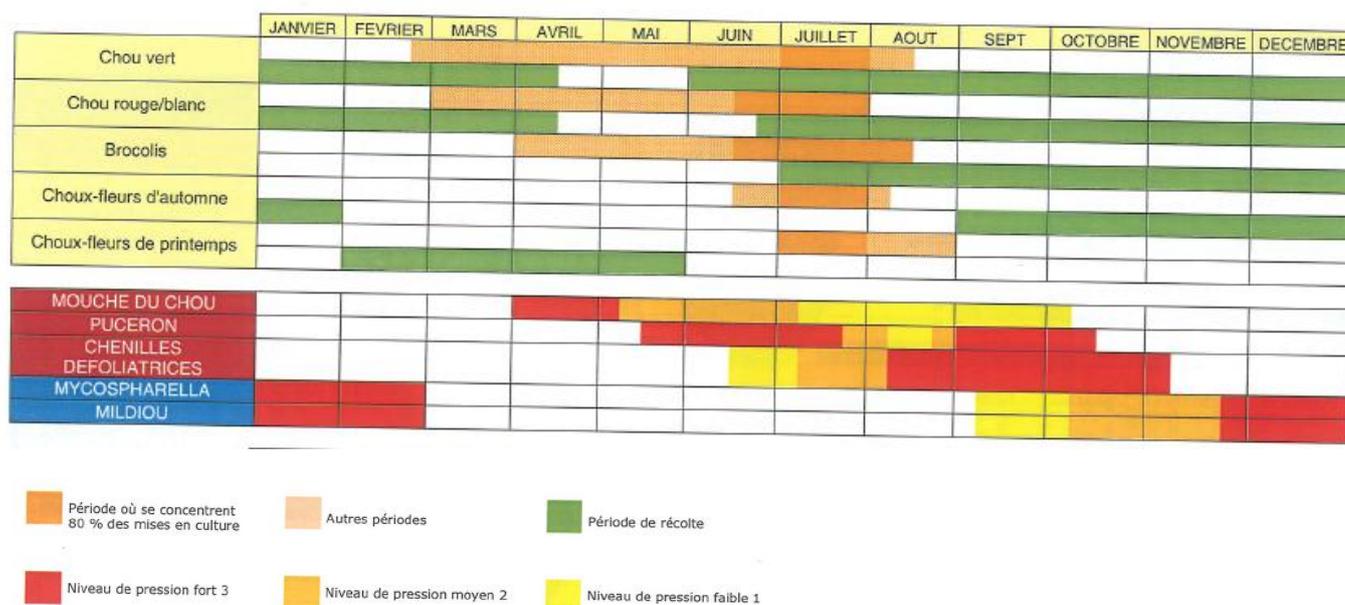


Figure II-6-1 : Phases de culture du chou et risques phytosanitaires en Basse Normandie (rapport SILEBAN- CDAM : Réduire l'usage des pesticides dans les exploitations légumières, 2012)

b- Traits de vie de la mouche du chou

La mouche du chou *Delia radicum* est un insecte Diptère, de la super-famille des Muscoidea et de la famille des Anthomyiidae.

C'est un ravageur important des **Brassicacées** (Crucifères) cultivées (chou, navet, radis, rutabaga, colza) et sauvages (giroflée, moutarde) (Nair and McEwen 1974; Finch and Ackley 1977). Ce sont les larves qui causent des dégâts lorsqu'elles s'alimentent des racines. Les dégâts sont particulièrement préjudiciables aux jeunes cultures de printemps et constitue une menace économique importante. La destruction des jeunes racines empêche l'approvisionnement en eau et provoque la mort des plantes. La présence de galeries dans les navets, rutabagas ou radis rend ces légumes impropres à la vente.

D'après (Lahmar 1982), la mouche du chou présente généralement **3 générations chevauchantes par an** dans l'ouest de la France (plus rarement 4 si les conditions automnales sont favorables). Les vols d'adultes, qui sont repérés grâce à des pièges jaunes, s'effectuent d'avril à septembre. Un 1er vol a lieu à partir d'avril-mai, un 2ème vol à partir de mi-juillet à fin août et un 3ème vol en septembre (Lahmar 1982). Il existe une grande variabilité des vols d'une année à l'autre, d'un lieu à un autre, que ce soit au niveau de la date des 1^{ères} captures (Brunel 1987) ou au niveau du nombre d'individus piégés (Abu Yaman 1960; Brunel 1987).

Chaque génération présente plusieurs stades de développement successifs : les femelles **adultes** accouplées pondent des **œufs**, donnant des **larves** (3 stades larvaires) puis des **pupes** d'où émergent les adultes de la génération suivant.

On constate souvent une baisse progressive du nombre d'adultes piégés de la 1^{ère} à la 3^{ème} génération (Lahmar 1982) mais ce n'est pas général (Brunel 1987). La cause de cette baisse a été attribuée aux ennemis naturels capables de réduire les populations (Lahmar 1982) mais aucune étude ne l'a démontré. Les femelles de la 1^{ère} génération sont plus grandes et déposent plus d'œufs que celles de la 2^{ème} génération (Angleterre) (Abu Yaman 1960), ce qui pourrait également expliquer la baisse du nombre d'individus piégés au cours de l'année.

Actuellement dans l'ouest de la France, le suivi des populations de mouche du chou s'effectue par comptage des œufs sur des feutrines positionnées au collet des plantes. La figure II-6-2 montre les résultats du nombre moyen d'œufs par piège dans le Finistère, dans les Côtes d'Armor et en Ile-et-Vilaine, en 2012 (courbes bleue et vertes) et en moyenne dans les 3 départements entre 2001-2011 (courbe rouge) [Bulletin de Santé du Végétal n°19 du 3/08/2012, à l'adresse http://draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV_No19_legumes_frais_03_aout_2012_cle061f78-1.pdf]

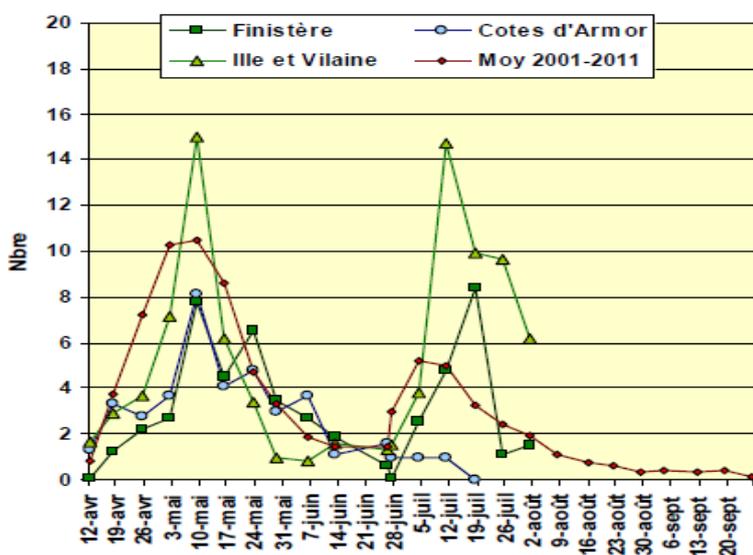


Figure II-6-2 : Evolution du nombre moyen d'œufs de mouche du chou par piège, en Bretagne au cours d'une année, en 2012 (dans chaque département : courbes vertes et bleue) et de 2001 à 2011 (courbe rouge).

Les mouches du chou peuvent subir une **estivation** sous forme de pupes. En effet, (Missonnier 1960; Nair and McEwen 1975) ont constaté que 25 à 75 % des pupes de 1^{ère} génération entrent en estivation. Le 3^{ème} vol est ainsi constitué d'adultes issus de la 2^{ème} génération et d'adultes issus des pupes qui ont estivé. L'estivation des pupes est une quiescence qui s'installe lorsque les températures deviennent supérieures à 21°C [cf. in (Coaker and Finch 1971)]. La mortalité des pupes est constatée à des températures au-delà de 33,5°C (Coaker and Finch 1971).

Les mouches du chou subissent une **diapause hivernale** sous forme de **pupes**, formées à partir du mois d'août (Missonnier 1960). L'entrée en diapause est déterminée par la température et la photopériode. Les pupes entrent en diapause si les larves de 3^{ème} stade de la 3^{ème} génération sont soumises à des température du sol inférieure à 15°C ou si photopériode est inférieure à 12h en automne [cf. in (Coaker and Finch 1971; Collier, Finch et al. 1989)].

Les pupes diapausantes présentent **deux phénotypes** principaux (Finch and Collier 1983; Walgenbach, Eckenrode et al. 1993; Biron, Langlet et al. 1998; Biron, Coderre et al. 2005) : un **phénotype hâtif** (l'émergence a lieu au bout de 20 jours maximum à 20°C) et un **phénotype tardif** (l'émergence a lieu au

moins après 30 jours à 20°C). Les mouches de phénotype hâtif sortent de la diapause après une période de 320 degrés-jours à des températures > 4,3°C et les mouches de phénotype tardif ont besoin d'une période de 320 degrés-jours au dessus de 4°C et de 280 degrés-jours au dessus de 7°C (Collier, Finch et al. 1989). Ces 2 phénotypes sont génétiquement contrôlés (Walgenbach, Eckenrode et al. 1993) et la diapause n'est pas nécessaire à l'expression des 2 phénotypes selon (Biron, Langlet et al. 1998).

La survie des pupes hivernantes n'est pas affectée par les faibles températures, du fait de la structure du puparium (Finch and Skinner 1980; Block, Turnock et al. 1987).

Les adultes émergent des pupes du sol. Peu d'adultes émergent si les pupes se trouvent à plus de 30 cm de profondeur [cf. in (Coaker and Finch 1971)].

Comportement des femelles en relation avec la recherche de la plante-hôte et la ponte

Seules les femelles accouplées et prêtes à pondre sont attirées par les odeurs de plantes (Hawkes, 1975 ; Hawkes & Coaker, 1979). Alors que les adultes s'alimentent essentiellement le matin dans les haies en bordures des cultures de Crucifères, la ponte a lieu surtout l'après-midi (Hawkes, 1972). Les stimuli impliqués dans l'attraction à distance et dans le déclenchement de la ponte ont été largement étudiés chez *D. radicum*.

Lorsque les femelles arrivent dans les 5 à 15 mètres des plantes-hôtes, elles perçoivent les **odeurs** qui les rendent plus actives (Traynier 1967a). Ces odeurs déclenchent également leur vol contre le vent (anémotaxie) vers les plantes-hôtes (Hawkes and Coaker 1976; Finch 1980). Les femelles effectuent alors des vols courts sur 50 à 150 cm avant de se poser, se réorienter et décoller de nouveau. Si l'odeur est perdue pendant le vol, elles retournent au sol jusqu'à ce qu'elles soient restimulées par l'odeur ou pour repartir dans une autre direction au hasard (Finch 1980). Le vol contre le vent est essentiellement stimulé par des isothiocyanates volatils (issus de la dégradation des glucosinolates) et en particulier par l'isothiocyanate d'allyle ((Hawkes and Coaker 1979; Wallbank and Wheatley 1979; Nottingham and Coaker 1985; Nottingham and Coaker 1987) et par l'acétate d'hexyle (Wallbank and Wheatley 1979).

Les femelles distinguent les plantes-hôtes des autres plantes, à environ 25 cm, en partie grâce à des signaux visuels tels que la couleur et la taille des feuilles (Prokopy, Collier et al. 1983). Les atterrissages sont plus fréquents sur des supports de couleur verte par rapport à des supports bruns (Kostal and Finch 1994).

En moyenne, une femelle effectue 4 vols en spirale et 2 sauts après l'atterrissage sur la plante-hôte ; les vols en spirale sont déterminants pour permettre la ponte (Kostal and Finch 1994). L'atterrissage sur 2 à 6 feuilles de plante-hôte suffit pour accepter la ponte sur la plante (Finch and Collier 2000b).

Les femelles acceptent une plante-hôte grâce aux odeurs et en même temps, grâce à des composés chimiques non volatils présents sur la surface des feuilles (kairomones de contact) (de Jong and Städler 1999).

Les femelles après avoir atterri sur leur plante-hôte se déplacent sur les feuilles et la tige. Des récepteurs chimiques situés sur les tarsi des femelles permettent de détecter ces composés chimiques et induire la descente vers le sol et la ponte (Finch and Collier 2000b). Une étude a montré que la ponte est enfin précédée par l'exploration du substrat autour de la plante ; cette exploration s'effectue grâce à la perception de substances chimiques volatiles ou de contact par les antennes ou les palpes labiaux (la tête de la femelle étant proche ou insérée dans le substrat) (Kostal, Baur et al. 2000).

Chez les plantes du genre Brassica, les stimuli induisant la ponte sont différents **glucosinolates** (Traynier 1967b; Nair and McEwen 1976a; Nair and McEwen 1976b; Roessingh, Städler et al. 1997) en particulier la **glucobrassicine** (Roessingh, Städler et al. 1992). Les glucosinolates sont perçus par les sensilles D sur les segments 3 et 4 des tarsi des femelles (Roessingh, Städler et al. 1992).

D'autres composés non volatils appelés **CIF « cabbage identification factor »** stimulent fortement la ponte ; celle-ci augmente quand la concentration en CIF augmente (Roessingh, Stadler et al. 1997). Ce composé a été identifié, il s'agit du Thia-triaza fluorenes spécifiques des Crucifères, extrait dans du méthanol (Hurter, Ramp et al. 1999; de Jong, Maher et al. 2000; Gouinguene, Poiger et al. 2006). En particulier, le 1,2-dihydro-3-thia-4,10,10b-triaza-cyclopenta [.a.]fluorine-1-carboxylic acid (**CIF-1**) stimule un neurone spécifique de la sensille C5 du tarse prothoracique (Roessingh, Stadler et al. 1997; Gouinguene and Stadler 2005; Gouinguene and Städler 2006). Les CIF-1 sont extraits des plantes mais aussi des œufs de *D. radicum* ; ces CIF pourraient avoir une origine femelle ou mâle lors de l'accouplement et avoir un rôle de phéromones de marquage (Gouinguene, Poiger et al. 2006).

Caractéristiques de la ponte

Quelques jours après émergence, et après l'accouplement généralement unique, chaque femelle commence à pondre (Swailles 1961). La ponte s'effectue seulement après accouplement (Missonnier and Stengel 1966) et à partir de 6-8 jours après l'émergence pendant 2 à 5 semaines (Coaker and Finch 1971).

Les œufs sont déposés dans les anfractuosités du sol et le plus souvent jusqu'à 5 cm du collet des plantes (Hughes and Salter 1959) mais aussi parfois sur les parties aériennes (Miles 1951). En conditions naturelles, la répartition des œufs autour des plantes est **agrégative** (Mukerji and Harcourt 1970). Certains auteurs ont en effet remarqué que le sable où des femelles *D. radicum* ont pondu, stimule la ponte d'autres femelles (de Jong and Städler 2001). Les œufs précédemment pondus stimulent la ponte d'autres femelles (Gouinguene, Poiger et al. 2006). Le phénomène de ponte agrégative éviterait ainsi le dessèchement des œufs, réduirait le parasitisme, la prédation et permettrait un bon développement des larves [cf. réf. in (Gouinguene, Poiger et al. 2006)].

Des expériences de choix en laboratoire montrent que les femelles préfèrent également pondre près des plantes déjà attaquées par des larves ; d'autres expériences montrent que les signaux qui permettent cette préférence, proviennent des racines endommagées, du sol et des micro-organismes associés (Baur, Kostal et al. 1996b). Les micro-organismes semblent avoir un rôle important pour la ponte des femelles : les pontes sont 3 à 4 fois plus importantes autour des plantes (radis) venant de graines non traitées par rapport à des plantes venant de graines portant peu ou pas de microorganismes (traitées avec NaOCl) (Ellis, Taylor et al. 1982).

Les femelles préfèrent pondre sur des plantes-hôtes de grande taille ou âgées, par rapport à des plantes plus jeunes (Abu Yaman 1960; Hardman and Ellis 1978; McDonald and Sears 1992; Kostal and Finch 1994; Dosedall, Herbut et al. 1996a).

La **fécondité (nombre d'œufs pondus au cours de la vie)** varie selon les conditions (température, femelles isolées ou en groupes, types de pupes d'où sont issus les adultes...) (Tableau II-6-1).

Tableau II-6-1 Fécondité de *D. radicum* en fonction des conditions du milieu, d'après la littérature.

| Fécondité | Température | Humidité | Femelles isolées / en groupe | Origine des adultes | Autres conditions | Références |
|-----------|-------------|----------|------------------------------|---|-------------------|-------------------------------|
| 80 œufs | 19-22°C | | | | | (Swailles 1961) |
| 130 œufs | 22±1°C | | | | | (Havukkala and Virtanen 1984) |
| 371 œufs | 19-22°C | 77±3% | femelles en groupes | | laboratoire | (Harris and Svec 1966) |
| 376 œufs | 15-21°C | 60% | femelles isolées | | laboratoire | (Finch and Coaker 1969a) |
| 220 œufs | 15-21°C | 60% | femelles en groupes | | | (Finch and Coaker 1969a) |
| 87 œufs | 19°C | | | pupes hivernantes | | (Abu Yaman 1960) |
| 42 œufs | 19°C | | | pupes de 2 ^{ème} et 3 ^{ème} générations | | (Abu Yaman 1960) |

Les femelles possèdent 2 ovaires constitués d'environ 30 ovarioles et produisent des œufs de façon cyclique (Missonnier and Stengel 1966).

Il existe plusieurs pics de ponte pour chaque femelle. Une étude au champ en Angleterre a montré que la ponte a lieu à partir du 6^{ème}-8^{ème} jour de vie pendant 2 à 5 semaines et qu'au cours du 1^{er} pic de ponte de la 1^{ère} génération, la ponte moyenne est de 63 œufs (étude au champ en Angleterre) (Coaker and Finch 1971). Au laboratoire à 20°C, le 1^{er} pic de ponte est obtenu du 4^{ème} au 6^{ème} jour après émergence, le 2^{ème} pic du 8^{ème} au 10^{ème} jour, le 3^{ème} pic du 12^{ème} au 14^{ème} jour (Neveu 1994). D'autres auteurs signalent un début de ponte à partir du 4^{ème} -5^{ème} jour au laboratoire à 23°C (Kostal, Baur et al. 2000).

La fécondité diminue avec la température ; la température favorable à la fécondité et à la ponte, en tenant compte de la mortalité des adultes, est de 15°C ; il n'y a pas de ponte en dessous de 10°C (Missonnier and Stengel 1966).

Alimentation des adultes

Les adultes se nourrissent de glucides et de protides (acides aminés). Dans les conditions naturelles, les glucides (fructose, glucose, maltose, sucrose, mélézitose, mannitol et sorbitol) sont apportés par le nectar et les exsudats de fleurs (en particulier de pissenlit, de trèfle et de merisier) (Miles 1951; Coaker and Finch 1971). Les sources alimentaires sont également constituées de pommes pourries, de sève d'arbres, de miellat de pucerons (Coaker and Finch 1971). Certains auteurs ont observé des adultes s'alimentant à la base des étamines en décomposition des graminées ou à la fin du printemps sur les fleurs de merisier et sur des Brassicées (Finch and Coaker 1969b).

L'alimentation en glucides des femelles est nécessaire à la maturation des 1^{ers} œufs et aux premières pontes alors qu'une alimentation en glucides et en acides aminés est nécessaire aux 2^{èmes} et 3^{èmes} pontes (Finch and Coaker 1969b; Coaker and Finch 1971; Kostal 1993).

La fécondité est liée à l'alimentation en glucides et en protides des femelles adultes (Missonnier and Stengel 1966; Kostal 1993) mais elle dépend également des réserves accumulées lors du développement larvaire (Missonnier and Stengel 1966). Elle varie selon les fleurs « butinées » : la fécondité est de 8 œufs si l'alimentation s'effectue sur des fleurs de trèfle (à cause de la difficulté d'atteindre le nectar), elle atteint 108 œufs sur fleurs de châtaigner ; la fécondité est faible sur les plantes-hôtes (Brassicacées), elle est élevée sur les Ombellifères et les Rosacées [cf. in (Finch and Coaker 1969b)]. Elle est plus élevée si l'alimentation s'effectue sur des fleurs de cerfeuil sauvage (début d'été) par rapport à une alimentation sur une solution de sucrose à 0.1 M ; elle est également plus élevée avec des fleurs de plantain lancéolé, de ronces, d'orties, de berce commune, d'aubépine, et d'herbes (houlque laineuse, fléole des prés, dactyle pelotonné, ray-grass) (Finch and Coaker 1969b). Ainsi, les bandes fleuries autour des parcelles cultivées (sources de nectar et de pollen) peuvent augmenter la reproduction donc les dégâts par la mouche du chou (Hawkes 1972a).

Longévité des adultes

La longévité (durée de vie) de *D. radicum* varie selon les conditions (température, humidité, femelles isolées ou en groupes, types de pupes d'où sont issus les adultes...) (tableau II-6-2).

La longévité est plus importante à 19°C qu'à 24°C pour les adultes de la 1^{ère} génération (Finch and Coaker 1969a).

Tableau II-6-2 Longévité de *D. radicum* en fonction des conditions du milieu, du sexe, de la présence de congénères, de l'origine des adultes d'après la littérature.

| Longévité | Température | Humidité | Adultes / femelles / mâles | Femelles isolées / en groupe | Origine des adultes | Autres conditions | Références |
|---------------|-------------|----------|----------------------------|------------------------------|---|-------------------|-------------------------|
| 22 jours | 19-22°C | | femelles | | | laboratoire | (Swales 1961) |
| 35 à 42 jours | 19-22°C | 77±3% | femelles | femelles en groupes | | laboratoire | (Harris and Svec 1966) |
| 45 jours | 15-21°C | | | | | | Finch and Coaker 1969a) |
| 33 jours | 19°C | | adultes | | pupes hivernantes de 1 ^{ère} génération | laboratoire | (Abu Yaman 1960) |
| 20,6 jours | 19°C | | adultes | | pupes de 2 ^{ème} et 3 ^{ème} générations | laboratoire | (Abu Yaman 1960) |

Dispersion des adultes

Par temps de pluie continue, la dispersion des adultes est réduite, les adultes s'abritent (Miles 1951; Finch and Skinner 1975).

La **dispersion des mâles** est aléatoire et n'est pas affectée par la présence de cultures de Brassica (Hawkes 1974; Hawkes 1975). Dans une expérience de lâcher-recaptures, (Finch and Skinner 1975) montrent que les mâles parcourent environ 100 mètres le 3^{ème} jour, s'accouplent le 4^{ème} jour et effectuent environ 100 mètres par jour les jours suivants. Ils volent contre le vent ou se laissent porter par lui (Finch and Skinner 1975).

La **dispersion des femelles** de moins de 2 jours est faible, celle des femelles âgées de 6 -12 jours est importante en particulier chez les femelles gravides, portant des œufs prêts à être pondus (Finch and Skinner 1975). La distance de dispersion des femelles depuis le site d'infestation est probablement de 2 à 3 km au total (Finch and Skinner 1975). Les auteurs observent que les femelles se déplacent de 100 mètres le 3^{ème} jour, s'accouplent le 4^{ème} jour, puis se déplacent de 1000 mètres par jour le 5^{ème} et le 6^{ème} jour, juste avant le début des pontes (mêmes résultats si les femelles sont relâchées d'une culture hôte ou non-hôte). En moyenne, les femelles sont capturées à 1300 à 1900 mètres du point de lâcher et jusqu'à jusqu'à 2500 mètres les 6 premiers jours de vie.

Haies, bordures et talus

Les haies servent de **lieux d'accouplement et d'alimentation** pour les mâles et les femelles (Hawkes 1972a). Les femelles s'alimentent le matin dans les fleurs des haies et bordures, pondent l'après midi dans les cultures, et retournent dans les haies en fin d'après midi (Hawkes 1972a).

Les haies constituent des **barrières aux déplacements des adultes entre les parcelles** (Hawkes 1973). Les adultes sont attirés vers les haies probablement grâce à des stimuli visuels, mais ces stimuli sont différents de ceux des talus (Hawkes 1973).

Il semble que la hauteur de vol des adultes soit assez faible, de moins de 90 cm ; en effet, le nombre de femelles capturées diminue avec la hauteur de filet vertical (de 0 à 90 cm) (Vernon and Mackenzie 1998). Des essais au champ ont montré qu'un filet-barrière de 1,3 mètre autour d'une parcelle, diminuait le nombre de femelles piégées à l'intérieur de la parcelle par rapport à l'extérieur (Blackshaw, Vernon et al. 2012).

Les différents stades avant l'émergence

Plusieurs auteurs ont étudié la durée des différents stades (œufs, 3 stades larvaires et pupes) (tableau II-6-3) et les conditions affectant la survie des ces stades.

Tableau II-6-3 Durée des différents stades de développement de *D. radicum* en fonction des conditions du milieu, d'après la littérature.

| Stades | Température | Durée du stade | Conditions | Références |
|---------------------|-------------|---|-------------------|------------------------------|
| Œufs | 19-22°C | 2-4 jours | laboratoire | (Harris and Svec 1966) |
| | 15,5°C | 5 jours | | |
| | 25,5°C | 2 jours | | |
| | 30°C | 1-2 jours | | |
| | 20°C | 3,5 jours | laboratoire | (Collier and Finch 1988) |
| | 11°C | 9 jours | laboratoire | (Neveu 1994) |
| | 20°C | 3-4 jours | | |
| Larves L1 | ? | 4 jours | champ, Angleterre | (Hughes and Salter 1959) |
| Larves L2 | ? | 6 jours | | |
| Larves L3 | ? | 10-20 jours | | |
| Larves (dév. total) | 20°C | 17,5 jours | laboratoire | (Collier and Finch 1988) |
| | 11°C | 48 jours | laboratoire | (Harris and Svec 1966) |
| | 19-22°C | 18-22 jours | | |
| Pupes | 20°C | 14 jours | laboratoire | (Collier and Finch 1988) |
| | 11°C | 48 jours | laboratoire | (Biron, Langlet et al. 1998) |
| | 20°C | - Moins de 20 jours (émergences hâtives) - Plus de 30 jours (ém. tardives) | | |
| | 11,8°C | 35,8 jours | | |
| | 29°C | 5 jours | | |

La survie des œufs n'est pas affectée par des températures du sol en dessous de 33°C (mesuré à 2,5 cm de profondeur) mais elle devient très faible à des températures de 40°C (Lepage, Bourgeois et al. 2012). Le taux de survie des œufs augmente avec le taux d'humidité du sol (mesuré à 2,5 cm de profondeur) ; il atteint une valeur maximale (67,2%) à une humidité du sol au-dessus de 25%. En dessous de 25% d'humidité, la mortalité des œufs est élevée (Lepage, Bourgeois et al. 2012).

La survie des larves est faible à une humidité du sol inférieure à 5%, quelle que soit la température (Lepage, Bourgeois et al. 2012).

Le développement optimal des pupes se situe à environ 20°C, entre 16,1°C et 21,7°C [cf in (Coker and Finch 1971)]. Les pupes ont une forte capacité de résistance au froid, qu'elles soient saines ou parasitées par *T. rapae* (Turnock, Jones et al. 1985; Block, Turnock et al. 1987), les pupes étant capables de survivre 47 jours à -45°C (Makarenko 1968a).

Les mâles émergent avant les femelles (Collier and Finch 1985).

Au laboratoire à 19-22°C, la durée d'une génération est de 41 à 61 jours (Harris and Svec 1966), 41,5 jours à 21°C de l'œuf jusqu'au 1^{er} pic de ponte [ou 1112 degrés-jours (avec un zéro de développement à 6,1°C)] (Eckenrode and Chapman 1971a).

Les températures seuil de développement des différents stades ont également été évaluées par différents auteurs et varient de 4 à 7,2°C (Tableau II-6-4).

Tableau II-6-4 Température seuil de développement de *D. radicum* et nombre de degrés jours nécessaires au développement des différents stades, d'après la littérature.

| Stades | Température seuil de développement | Nombre de degrés jours nécessaires au développement de chaque stade | Références |
|--------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| Œufs | 7,2°C | 96 degrés jours > 7,2°C | (De Wilde 1947) in (Hughes and Salter 1959) |
| | 6,67°C | 82 degrés jours | (Eckenrode and Chapman 1971a) |
| Pupes | 5,6°C | 230 degrés jours 259 à 992 degrés jours (émergences tardives) | (Block, Turnock et al. 1987) |
| | 5,6°C | 338 jours | (Coaker and Wright 1963) |
| Pupes diapausantes | | 320 degrés jours > 4°C (émergences hâtives) 280 degrés jours > 7°C et 320 degrés jours >4°C (ém. tardives) | (Biron, Langlet et al. 1998) |
| | 5,6°C | | (Coaker and Wright 1963) |
| | 5,56°C | | (Eckenrode and Chapman 1971a) |
| | 4°C | | (Collier and Finch 1985) |
| Pupes non diapausantes | 6,67°C | | (Eckenrode and Chapman 1971a) |
| Pupes de 1 ^{ère} génération | | 243 degrés jours | (Eckenrode and Chapman 1971a) |

Comportement et incidence des larves

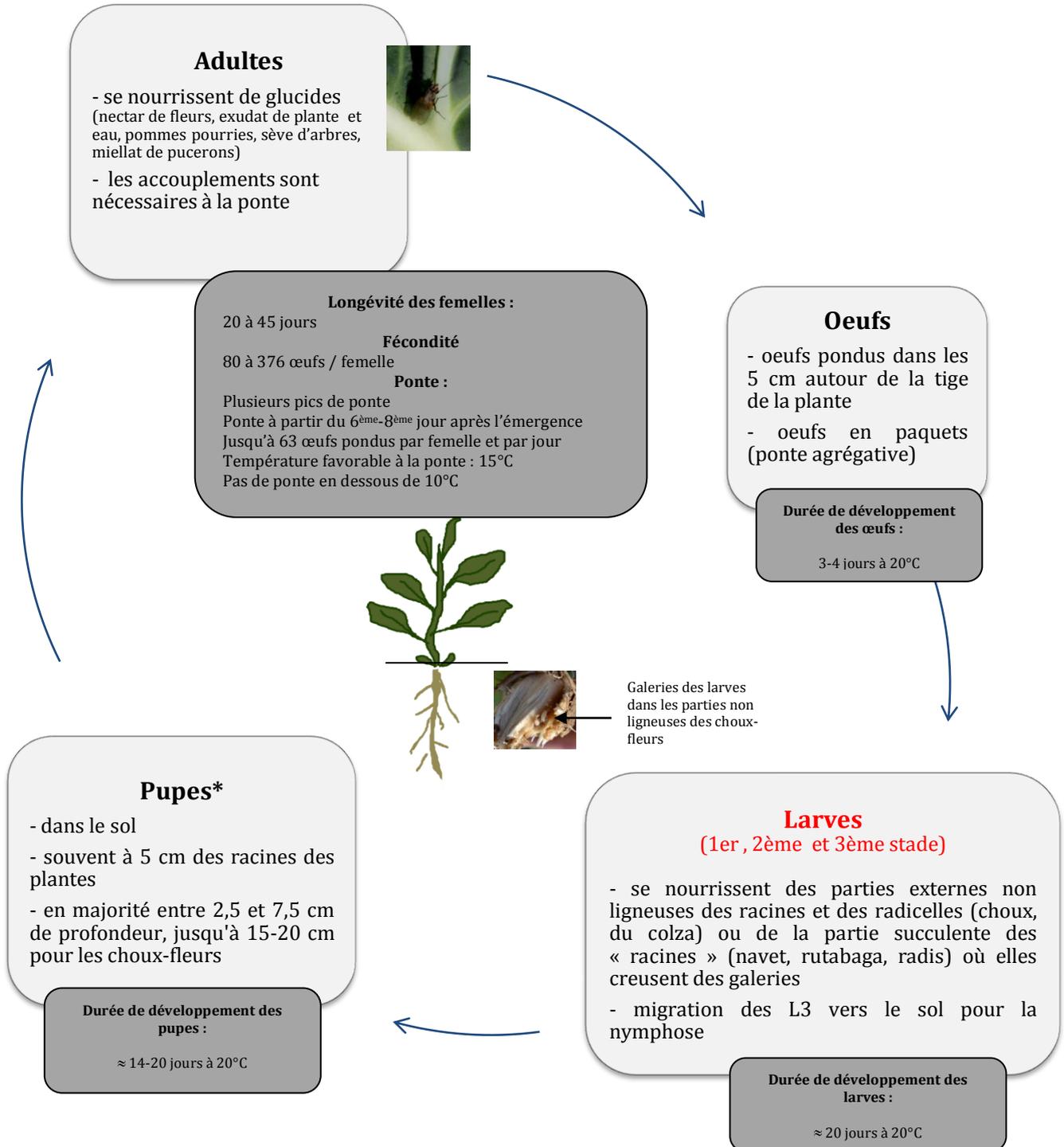
Les larves de 1^{er} stade sont attirées par les odeurs de plantes-hôtes et utilisent un gradient de dioxyde de carbone (Jones and Coaker 1978) comme d'autres ravageurs de racines vivant dans le sol (Johnson and Nielsen 2012). Les odeurs attractives sont constituées d'isothiocyanates (à faibles concentrations) et par d'autres composés (hexanol, hexanal, cis-3-hexen-1-ol, linalool) émis par les racines (Kostal 1992). D'autres odeurs de racines sont au contraire répulsives pour les larves (hexylacetate, cis-3-hexenyl-acetate, benzaldehyde, myrcene, terpinene, alpha-pinene, limonene) (Kostal 1992).

Les larves de 1^{er} stade se déplacent le long de la racine principale, se nourrissent surtout du cortex et creusent des galeries avec leurs pièces buccales en forme de crochets (Abu Yaman 1960). Les larves se nourrissent des parties externes non ligneuses des racines et des radicelles (racines ligneuses des choux, du colza) ou de la partie succulente des « racines » (navet, rutabaga, radis) où elles creusent des galeries (Missonnier 1960).

Secondairement aux dégâts des larves, d'autres pathogènes peuvent se développer, c'est le cas des bactéries responsables de la « pourriture molle » (« soft rot ») ; celles-ci sont contenues dans les fèces des larves et dans le tube gastrique des adultes (Johnson 1930) mais aussi sur les œufs, les larves et l'intérieur des pupes comme sur les adultes (Doane and Chapman 1964) ; il s'agit de micro-organismes des genres

Pseudomonas et *Aerobacter* (Doane and Chapman 1964). Une étude récente indique que plusieurs micro-organismes (en particulier *Serratia*, *Klebsiella*, *Pseudomonas* et *Enterobacter*) sont hébergés dans l'intestin et les fèces des larves mais que ce ne sont pas les mêmes trouvés sur les œufs ; ces micro-organismes seraient impliqués dans la digestion des tissus végétaux par les larves (Lukwinski, Hill et al. 2006).

Le cycle de développement de la mouche du chou est résumé sur la figure II-6-3 ci-dessous.



Capacité à passer l'hiver* : à la fin de l'automne, les larves se transforment en pupes diapausantes qui passeront ainsi l'hiver ; les adultes émergeront au printemps.

Figure II-6-3 Cycle de développement de la mouche du chou *Delia radicum* sur culture de choux

[schéma réalisé d'après les articles (Smith 1927; Miles 1951; Hughes and Salter 1959; Abu Yaman 1960; Swailes 1961; Harris and Svec 1966; Missonnier and Stengel 1966; Finch and Coaker 1969a; Coaker and Finch 1971; Havukkala and Virtanen 1984; Block, Turnock et al. 1987)]

Conclusion :

La mouche du chou *Delia radicum* est un insecte Diptère responsable de dégâts importants en culture de Brassicacées (Crucifères) (les larves en s'alimentant des racines, causent le dépérissement des plantes et les galeries peuvent être le siège d'autres pathogènes). C'est une espèce spécialiste des Brassicacées cultivées (chou, navet, radis, rutabaga, colza) mais aussi sauvages (moutarde, giroflée). Elle présente environ **3 générations par an**. Une génération présente plusieurs stades de développement successifs : les femelles **adultes** accouplées pondent des **œufs**, qui deviennent des **larves** (3 stades larvaires). Les larves se nourrissent des racines en faisant des galeries, puis se transforment en **pupes** dans le sol. Des pupes émergent de nouveaux adultes de la génération suivante. Les pupes peuvent subir une **estivation** (quiescence) et une **diapause hivernale** (provoquée par une baisse des températures ou une baisse de la photopériode).

Les femelles accouplées et prêtes à pondre sont attirées par les **odeurs de plantes-hôtes**, en particulier les isothiocyanates volatils (issus de la dégradation des glucosinolates) et sont sensibles à des **signaux visuels** (couleur et la taille des feuilles) quand elles sont à proximité des plantes. La ponte est ensuite stimulée par des **composés non volatils** (glucosinolates) présents à la surface des feuilles ; d'autres composés (initialement appelés CIF ou Cabbage Identification Factor) extraits des *Brassica* mais aussi des œufs de *D. radicum*, stimulent fortement la ponte. Tous ces composés sont perçus par des récepteurs situés sur les tarses des femelles. Les **œufs** sont pondus de manière **agrégative**, dans les anfractuosités du sol, le plus souvent dans les 5 cm autour du collet des plantes.

Les femelles préfèrent pondre sur des plantes de grande taille ou âgées, et où les micro-organismes sont présents. Les femelles pondent à partir de 6-8 jours après leur émergence et pendant 2 à 4 semaines. Selon les auteurs et les conditions, elles pondent en moyenne de **42 à 376 œufs au cours de leur vie**. La température favorable à la fécondité et à la ponte est de 15°C ; il n'y a pas de ponte en dessous de 10°C.

Les adultes se nourrissent de glucides et de protides issus du nectar, des exsudats de fleurs, de végétaux en décomposition, de sève d'arbres ou de miellat de pucerons. L'apport de glucides est nécessaire pour la maturation des 1^{ers} œufs, l'apport supplémentaire de protides est nécessaire à la maturation des œufs suivants. La fécondité varie selon les espèces végétales visitées pour l'alimentation.

La **longévité** des adultes varie de 20 à 45 jours selon les conditions du milieu, le sexe, la présence de congénères et l'origine des adultes. Elle est plus importante à 19°C qu'à 24°C.

Les femelles peuvent parcourir 2 à 3 km depuis leur lieu d'émergence, après accouplement et maturation des œufs (vers l'âge de 5-10 jours). Les mâles se déplacent moins. La dispersion des adultes est réduite par temps de pluie.

Les haies servent de lieux d'accouplement et d'alimentation pour les adultes. Les femelles s'y nourrissent le matin, pondent dans les cultures l'après-midi et retournent dans les haies en fin d'après-midi. Les haies constituent des barrières aux déplacements des adultes entre les parcelles. En effet, la hauteur de vol des adultes serait de moins d'1 mètre.

Les différents stades ont des durées variables selon les conditions de température et d'humidité. A 20°C, les œufs éclosent au bout de 3-4 jours, le développement des larves dure au total environ une vingtaine de jours, et les pupes se développent en 14-20 jours avant l'émergence des adultes. Certaines pupes se développent en moins de 20 jours (phénotype hâtif), d'autres en plus de 30 jours (phénotype tardif). La température seuil de développement varie de 4 à 7,2°C selon les stades considérés.

Le taux de survie des œufs ne varie pas avec la température (inférieure à 33°C) mais il diminue fortement si l'humidité du sol est inférieure à 25%. Les pupes se développent de façon optimale à 20°C et présentent une très forte capacité de résistance au froid.

Après l'éclosion des œufs, les larves de 1^{er} stade sont attirées par les odeurs de racine des plantes-hôtes. Les larves se nourrissent des racines ; d'autres pathogènes peuvent alors se développer (bactéries de la « pourriture molle »).

Diverses espèces d'ennemis naturels sont connues et identifiées ; certaines ont été utilisées comme agents de lutte biologique.

Certains **champignons entomopathogènes** s'attaquent aux adultes : *Entomophthora muscae*, *E. virulenta* et *Strongwellsea castrans* (Smith 1927; Lahmar 1982; Klingen, Meadow et al. 2000) et également *Cystosporogenes deliaradicarum* (Eilenberg, Damgaard et al. 2000).

D'autres champignons entomopathogènes s'attaquent aux larves : *Metarhizium anisopliae*, *Beauveria bassiana* (Bruck, Snelling et al. 2005) et *Paecilomyces fumosoroseus* (Vanninen, Hokkanen et al. 1999) peuvent être efficaces contre les larves mais *Metarhizium anisopliae* est coûteux à produire (Finch and Collier 2000a).

Des **bactéries *Bacillus thuringiensis*** ont été retrouvées dans l'abdomen des adultes de *Delia radicum* infectés par *Strongwellsea castrans* (Eilenberg, Damgaard et al. 2000). Cependant aucune souche de *Bacillus thuringiensis* n'est connue pour lutter contre les insectes se nourrissant de racines (Finch and Collier 2000a).

Il existe des **nématodes** entraînant la mortalité des larves ou des pupes : *Steinernema feltiae*, *S. carpocapsae*, *S. arenarium*, *Heterorhabditis bacteriophora*, *H. megidis* (Morris 1985; Royer, Belair et al. 1996; Chen, Li et al. 2003; Nielsen 2003). Mais les études menées sur le terrain ne concluent pas à une grande efficacité des nématodes (Finch and Collier 2000a; Chen, Han et al. 2003). Des essais techniques en France en 2005 et 2008 avec des nématodes *Steinernema feltiae* (ENTONEM) n'ont pas donné de résultats concluants sur brocolis et sur navets (Chambre d'Agriculture de Savoie, SERAIL, CTIFL, 2005 et 2008)

Des **acariens** du genre *Thrombidium* sont signalés comme prédateurs ; certains acariens [*Hypoaspis miles* (Acari : Laelapidae)] ont fait l'objet d'essais sous serre et ont entraîné une baisse de 58% des dégâts par les larves (Messelink and Slooten 2004).

Certains coléoptères sont **prédateurs d'œufs et de larves** ; les Carabes des genres *Metallina*, *Trechus* et *Bembidion* et les Staphylinins du genre *Aleochara* (*A. bilineata* G. et *A. bipustulata* L.) sont les prédateurs les plus fréquents (Hughes 1959; Lahmar 1982). Les carabes prédateurs (*Bembidion lampros* et *Trechus quadristriatus*) sont responsables de 30% de mortalité des œufs et des L1 (et non 90% comme l'indique la littérature plus ancienne) ; ils se nourrissent seulement des œufs présents en surface (Kromp 1999). Des lâchers inondatifs d'*Aleochara bilineata* ont été réalisés au champ : le nombre nécessaire d'adultes à relâcher est variable selon les études (20 000 par ha au Danemark (Bromand 1980), 650 000 par ha en Belgique, 2 par plante en Angleterre (Hartfield and Finch 2003) mais les résultats sont peu concluants.

Des études ont montré que certaines odeurs peuvent attirer ces prédateurs ; le diméthyl disulfide DMDS (composé émis par les racines fortement infestées par des larves) augmente le nombre d'*Aleochara* et de carabes *Bembidion* piégés au champ (brocoli), tout en limitant la ponte de *D. radicum* (Ferry, Dugravot et al. 2007; Ferry, Le Tron et al. 2009; Kergunteuil, Dugravot et al. 2012).

Les insectes **parasitoïdes** les plus fréquents sont *Aleochara bilineata* et *Trybliographa rapae* en Europe et au Canada (Wishart, Cohloun et al. 1957; Hemachandra, Holliday et al. 2007a; Hemachandra, Kuhlmann et al. 2007b).

Trybliographa rapae W. (Hyménoptère, Figitidae ex-Eucoilidae) est une petite guêpe dont les femelles pondent leur œuf à l'intérieur des larves de *D. radicum* jusqu'au stade pupa. Le taux de parasitisme varie de 1 à 45% au champ [voir réf. in (Neveu 1998)]. Entre 4% et 20% des larves de *D. radicum* sont inaccessibles au parasitisme de *T. rapae* ; en effet, les femelles *T. rapae* peuvent parasiter des larves à 4 cm de profondeur mais pas à 6 cm (Hemachandra, Kuhlmann et al. 2007b). Des études au laboratoire ont montré les femelles de *T. rapae* sont attirées par les odeurs de feuillage de plantes infestées au niveau des racines, pas par des plantes saines, mais aussi par des odeurs de fleurs (Neveu, Grandgirard et al. 2002; Nilsson, Rannback et al. 2011; Nilsson, Eriksson et al. 2012)

Les parasitoïdes de pupes les plus fréquents sont *Aleochara bilineata* et *A. bipustulata*, alors que *Phygadeuon spp* parasitoïde de divers Muscidae (Hyménoptère, Ichneumonidae) est moins fréquent (Wishart 1957; Sundby and Taksdal 1969; Finch and Collier 1984; Brunel and Fournet 1996).

Conclusion :

La mouche du chou *Delia radicum* possède de nombreux ennemis naturels : champignons entomopathogènes, bactéries, acariens, nématodes, Coléoptères prédateurs d'œufs et de larves, parasitoïdes (petits Hyménoptères capables de pondre dans les larves ou les pupes de *D. radicum*). Ces ennemis naturels participent à diminuer les populations de *D. radicum* mais on connaît mal leur impact réel au champ.

La façon dont les mouches du chou utilisent les éléments du paysage est résumée sur la figure II-6-4 ; cette figure rend compte des incertitudes concernant certains phénomènes.

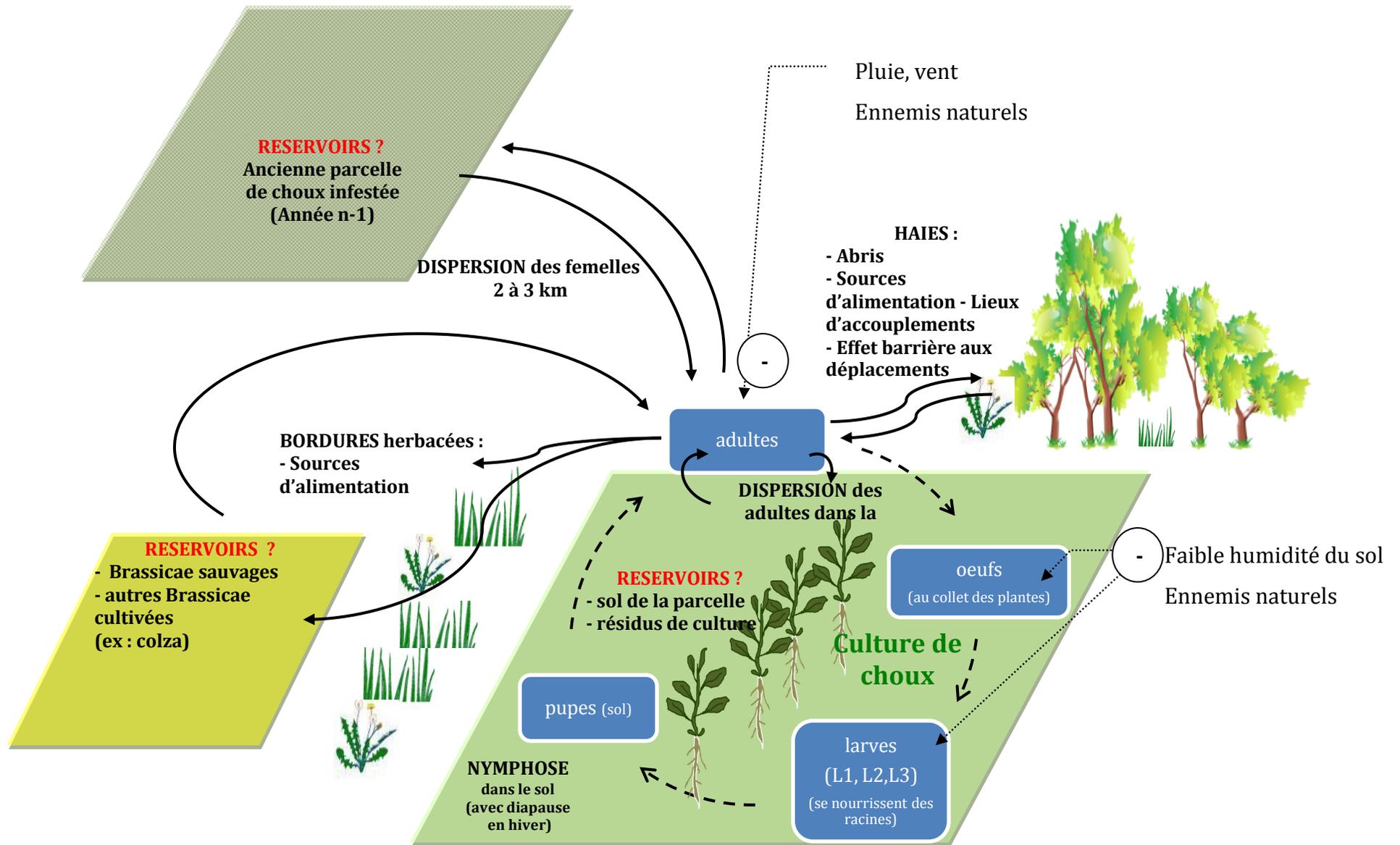


Figure II-6-4 : Déterminants des attaques de *Delia radicum* en culture de choux-fleurs, au sein du paysage agricole

(+ effet positif, - effet négatif ; - - - > développement des stades de l'insecte ; → déplacement des individus adultes ; chaque point d'interrogation signifie l'incertitude de cette donnée)

De nombreux facteurs peuvent favoriser ou au contraire défavoriser le développement et la survie des mouches du chou. Les principaux facteurs mentionnés dans la littérature sont exposés ci-dessous et les effets connus ou supposés des modes de gestion pratiqués sont résumés dans le tableau II-6-5.

Facteurs abiotiques naturels

Il semble que la ponte des femelles soit réduite en cas de pluie (Hughes 1959).

Récemment, une étude au Canada a démontré que les œufs de *D. radicum* sont surtout sensibles à la sécheresse (dans cette étude, les œufs sont déposés à la surface d'un sol dont l'humidité et la température sont mesurées à 2,5 cm de profondeur) (Lepage, Bourgeois et al. 2012). D'après cette étude, seule une humidité inférieure à 25% entraîne une forte mortalité. Une température en dessous de 33°C affecte peu la survie des œufs. La survie des larves augmente avec l'humidité (20 à 100%) et la température du sol (17-29°C). D'autres auteurs ont signalé de fortes infestations sur colza dans les zones où l'humidité du sol est la plus importante [(Griffiths 1986) in (Doddall, Florence et al. 1998)].

Précédent culturel

Les rotations culturales sont importantes pour limiter les infestations (Langer 1995), ceci à grande échelle (Helenius 1997).

Choix de la parcelle (environnement) : l'importance des bordures et des parcelles environnantes

L'environnement autour de la parcelle semble avoir de l'importance (Dalthorp and Dreves 2008). En effet, la présence d'un champ attaqué à moins de 400 m augmente la probabilité d'attaques ; la proximité avec des champs précédemment cultivés en Brassica et attaqués semble un facteur de risque d'attaques au printemps ; enfin, les cultures menées près des pépinières (et près des maisons) semblent plus attaquées. Par contre, la proximité d'une rivière et d'autre source potentielle de larves (autre que des cultures, par exemple des restes de cultures ou des mauvaises herbes) n'ont pas d'effet.

Les accouplements et l'alimentation des adultes s'effectuent dans les haies et les bordures fleuries (sources de nectar, pollen, ...) (Coaker and Finch 1971; Hawkes 1972a). Il est probable que la présence de ces bordures provoque une augmentation de l'efficacité de reproduction de *D. radicum* et donc les dégâts (Havukkala and Virtanen 1984) mais cet effet n'a pas été démontré au champ. Les haies constituent également une barrière aux déplacements des adultes entre les parcelles (Hawkes 1973), et peuvent peut être limiter leur dispersion. Ainsi, il est difficile de savoir si les haies ont un rôle bénéfique ou défavorable pour les populations de mouche du chou.

Sol (type, texture, travail du sol)

En laboratoire, une étude a montré que les femelles pondent plus d'œufs dans du substrat organique par rapport à du sable stérilisé (et plus dans du sable humide que dans du sable sec) (Kostal, Baur et al. 2000). L'étude indique que le complexe substrat-racines et les micro-organismes jouent probablement un rôle dans l'acceptation de la plante pour la ponte (il s'agit de substances chimiques volatiles et de contact).

Une étude en culture de navets et rutabagas aux USA montre que la texture du sol (sable/terreau/terreau limoneux/sol argileux) n'a pas d'effets sur les dégâts observés (Dalthorp and Dreves 2008).

Par contre, le travail du sol en hiver permettrait de limiter l'action de *D. radicum*. En effet, des études ont montré que le taux d'émergence de *D. radicum* est plus important dans les parcelles de colza non labourées que dans les parcelles labourées en hiver (Doddall, Florence et al. 1998), ce qui serait lié à des différences de microclimat. Les dégâts racinaires du colza sont également plus importants sans labour qu'avec labour (profond de 15 cm environ) mais le rendement en graines supérieur sans labour (la plus forte humidité du sol non labouré compenserait la pression des larves) (Doddall, Florence et al. 1998).

Apports

Les amendements et fertilisations favorisent l'abondance de *D. radicum*. Avec un apport normal de soufre, on dénombre davantage d'œufs pondus sur colza que lors d'un apport sans soufre (Marazzi, Patrian et al. 2004) ; de plus, on constate une meilleure survie des larves, une meilleure formation de pupes, des taux d'émergence plus élevés, et un poids des adultes plus élevés ; enfin, les femelles venant de plantes fertilisées en soufre émergent 1 à 2 jours plus tôt (Marazzi and Städler 2005). Une autre étude indique qu'un apport de matières organiques augmente les infestations tôt dans la saison [(Read 1958) in (Doddall, Florence et al. 1998)].

Des essais en serre sur radis ont testé que l'apport de matière organique mélangé au sol avait des effets variables selon la nature de l'apport : un apport de compost de déchets verts de jardin ou de tourbe blonde de sphagnes augmente les dégâts par les larves de *D. radicum* contrairement à un apport de terreau de fibres de noix de coco (Messelink and Slooten 2004).

Effet de la densité de plants

La forte densité de plante-hôtes diminuerait l'impact de *D. radicum*. En effet, des travaux ont montré qu'une forte densité de plants de colza est associée à de faibles pontes et de faibles dégâts larvaires (Doddall, Florence et al. 1998), toutefois, le rendement de colza est meilleur avec des interlignes larges (20-30cm). Mais une autre étude donne des résultats moins nets : quand le nombre de racines de navet augmente de 5 à 30 par 0.3 m, le nombre de galeries larvaires dans un rang de 0.3 m augmente progressivement de 8 à 12, mais le nombre de galeries pour 10 racines de navets, diminuent de 16 à 4 (Eckenrode and Chapman 1971b).

Le nombre d'œufs et le nombre de pupes produites par plant de chou-fleur sont plus importants à de faibles densités qu'à de fortes densités de plantes ; néanmoins, le nombre total de ravageur est augmenté avec de fortes densités de plantes (Finch and Skinner 1976).

Irrigation

A notre connaissance, aucune étude n'a traité de l'effet de l'irrigation sur les populations de *D. radicum*. Cependant, si on considère que l'humidité favorise la survie des œufs et des jeunes larves, on peut imaginer qu'un arrosage en cas de présence d'œufs ou de jeunes larves est à éviter.

Cultures intercalaires

Les cultures intercalaires ou plantes compagnes ont des effets variables sur les infestations par *D. radicum* (Finch and Collier 2000a).

La présence de plantes compagnes ou de plantes aromatiques peut diminuer la ponte de *D. radicum*, car le fait de se poser sur plantes non-hôtes interrompt le processus de localisation de plantes-hôtes par les femelles *D. radicum* (Morley, Finch et al. 2005). Ceci est probablement lié au feuillage vert des plantes compagnes, mais ce ne serait pas lié à leur odeur ou à des stimuli de contact (Finch, Billiald et al. 2003).

➤ Trèfle / Brassica

Au laboratoire, les femelles *D. radicum* pondent significativement moins sur Brassica intercalées avec du trèfle que sur Brassica avec sol nu (Finch and Kienegger 1997). Ces derniers auteurs indiquent cependant que la culture intercalaire doit atteindre au moins 50% de la hauteur de la culture et que la culture intercalaire doit restée en place lors de la période critique.

Au champ, les études avec cultures intercalaires de trèfle montrent des résultats variables.

Certaines études montrent une diminution du nombre de mouches. Des cultures intercalaires avec trèfle, ou avec laitue, haricot, spergule des champs réduit le nombre d'œufs, de larves ou de pupes (Tukahirwa and Coaker 1982; Kostal and Finch 1994). Des cultures intercalaires de trèfle avec des choux réduit la ponte et la production de pupes (Theunissen, Booij et al. 1995; McKinlay, McCreath et al. 1996) mais ne diminuent pas les dégâts larvaires (McKinlay, McCreath et al. 1996). Une culture intercalaire de trèfle blanc avec des choux diminue le nombre de pupes hivernantes (Langer 1996), cependant le parasitisme par *T. rapae* reste identique en culture intercalaire par rapport à une monoculture, contrairement au parasitisme par *A.*

bilineata. D'autres études ont un effet positif pour limiter la ponte des mouches mais indiquent que le rendement peut être altéré. Des cultures intercalaires de trèfle avec du chou blanc diminue le nombre d'œufs pondus mais le poids des têtes de choux récoltés est plus faible (Finch and Edmonds 1994). Des cultures intercalaires de chou blanc avec trèfle blanc et trèfle souterrain peuvent réduire significativement le nombre d'œufs par plante ; le rendement en cultures intercalaires est diminué mais du fait de la qualité de la récolte, le résultat financier est meilleur qu'en monocultures (Theunissen, Booij et al. 1995).

D'autres études ne montrent pas d'effet sur la ponte. Des cultures intercalaires de trèfle avec des rutabagas ne diminuent pas le nombre d'œufs mais augmentent le nombre de coléoptères prédateurs (McKinlay 1994; Kromp 1999).

➤ Blé / Colza

Des études au Canada ont montré que la ponte et les dégâts sont réduits dans des cultures intercalaires colza/blé par rapport à monocultures de colza (Hummel, Dossall et al. 2009)

Cependant, le parasitisme de *D. radicum* par *A. bilineata* et *T. rapae* n'est pas favorisé dans les cultures intercalaires colza/blé au Canada ; le nombre d'*A. bilineata* capturés diminue avec la surface de blé (Hummel, Dossall et al. 2010), ce qui est en concordance avec d'autres travaux.

➤ Carottes ou lotier / chou-fleur

Des essais de culture associée de carottes ou de lotier (à raison de 2 graines par mini-motte) avec des choux n'ont pas montré d'effet important sur les dégâts ; cependant, au cours des essais de 2008 à Pleumeur Gautier, les attaques de *D. radicum* étaient faibles et d'autres problèmes sont intervenus comme des problèmes de concurrence entre plantes, des problèmes de désherbage (résultats CTIFL SECL Pleumeur Gautier, Pôle Légumes région Nord, 2008)

Couverts : paillis (ou mulchs)

Au champ, en culture de brocoli ou de chou chinois, l'apport de sable, de cendres de bois, de terre riche en diatomées, ou la pose de collets de papier goudronné autour des plantes-hôtes n'a jamais montré d'effet sur la ponte (Matthews-Gehringer and Hough-Goldstein 1988).

Certaines études ont montré qu'un apport de farine de moutarde (« mustard meal ») provoque une augmentation de la présence d'*A. bipustulata* mais pas d'*A. bilineata* (Riley, Kuhlmann et al. 2007).

Au champ, la pose de fibres de graphite ou celle de fibres EVA (Ethylene vinyl acetate) (Figure II-6-5) à la base des choux réduit la ponte de la mouche (Hoffmann, Kuhar et al. 2001).



Figure II-6-5 :
Fibres EVA à la
base d'un
brocoli

(source de l'image :
<http://www.news.cornell.edu/releases/Feb02/Hoffmann-IPM.bpf.html>)

D'autres études ont testé l'effet de paillis en fibres de bois hydrophiles colorées (« colored hydromulches (sprayed-on wood fibers plus adhesive) ») sur les populations de *D. radicum*. Celles-ci sont moins importantes dans les cultures traitées avec des fibres colorées en bleu par rapport à des cultures sans paillis (Liburd, Casagrande et al. 1998).

Filets couvrants

Au champ, une bâche de polyester tissé, associée ou non à un paillis plastique, diminue le nombre d'œufs pondus (sur chou chinois mais pas sur brocoli) ; de plus, cela ne modifie pas les rendements (Matthews-Gehringer and Hough-Goldstein 1988). Mais cette bâche est efficace seulement si elle est en bon état, si elle est placée avant l'attaque et s'il n'y a pas d'adultes émergeant sous le filet (Finch and Collier 2000a).

Filets verticaux

Plusieurs études montrent l'intérêt des filets verticaux (Vernon and Mackenzie 1998; Pats and Vernon 1999; Bomford, Vernon et al. 2000; Blackshaw, Vernon et al. 2012). Il a été montré que le nombre de femelles capturées dans une parcelle de rutabaga de 5m x 5m diminue avec la hauteur de filet (de 0 à 90 cm) (Vernon and Mackenzie 1998). Un filet de 90 cm (associé à un filet surplombant incliné vers le bas, de 25 cm), diminue de 80 % le nombre de femelles capturées et diminue également les dégâts par rapport à une culture non entourée de filets. De même, l'infestation diminue avec un filet de 120 cm (associé à un filet surplombant incliné vers le bas, de 30 cm), dans une culture de radis de 38 m x 38 m, par rapport à une culture témoin sans filet (Pats and Vernon 1999). Des filets de 135 cm autour d'une parcelle de radis, avec un filet surplombant incliné vers le bas, d'au moins 25 cm, permet de réduire le nombre de mouches piégées et les dégâts (Bomford, Vernon et al. 2000). Une étude récente montre que le nombre de femelles capturées est moins important à l'intérieur qu'à l'extérieur d'une parcelle de rutabaga (de 2,7 ha) entourée d'un filet vertical de 130 cm (associé à un filet incliné vers le bas de 30 cm) (Blackshaw, Vernon et al. 2012).

Modification des dates de culture

Semer tard et récolter tôt est préférable pour éviter les attaques de *D. radicum* (Finch and Collier 2000a).

Cultures pièges

Constatant que navet (et chou chinois) sont attractifs en laboratoire, certains auteurs ont eu l'idée d'associer une culture piège de navets à une culture de brocoli (Rousse, Fournet et al. 2003). Ils ont constaté qu'une culture associée navets/brocolis ne permettait pas de diminuer la ponte de *D. radicum* par rapport à une monoculture de brocolis ; par contre, cela attirait plus de prédateurs *Aleochara* et augmentait le parasitisme des pupes.

Prévision des vols

La prévision des vols d'adultes et de l'apparition des formes jeunes s'effectue grâce à des **modèles dits « degrés-jours »** c'est-à-dire basés sur les températures cumulées. Il a été mis au point à partir des années 60-70 (Coaker and Wright 1963; Eckenrode and Chapman 1972; Wyman, Libby et al. 1977; Collier and Finch 1985; Collier, Finch et al. 1991; Phelps, Collier et al. 1993; Finch, Collier et al. 1996; Johnsen, Gutierrez et al. 1997; Finch and Collier 2000a; Broatch, Dossall et al. 2006). En Angleterre, ce genre de modèle prend en compte le 1^{er} février comme date appropriée pour calculer le nombre de degrés-jours ; la température de base considérée est une température du sol de 4°C ; la température du sol est mesurée à 6 cm de profondeur (Collier and Finch 1985). Ainsi, il y a 50% des émergences de printemps si 179±8 degrés-jours du sol au-delà de 4°C, 230±10 jours degrés-jours de l'air au-delà de 4°C ; de plus, les mâles émergent avant femelles (Collier and Finch 1985). Depuis, le modèle a évolué : il utilise la température du sol pour les stades œufs-larves-pupes, la température de l'air pour le stade adulte, et tient compte des périodes d'estivation et de diapause hivernale (Collier, Finch et al. 1991)

Aux Etats-Unis, le modèle développé utilise 4,3°C et 30°C comme seuil de développement minimal et maximal, à partir du 1er janvier (Dreves, Dalthorp et al. 2006).

Dans l'ouest de la France, le modèle (adapté du modèle SWAT allemand) prend en compte la somme des températures journalières moyennes au-dessus de 4°C, à partir du 1^{er} janvier (par exemple pour une journée à 9°C suivie d'une journée à 12°C, on compte 5°C+8°C = 12°C). Quand cette somme atteint 300°C, on considère que les émergences des adultes puis les pontes sont proches et qu'il faut adopter des mesures de protection pour limiter les pontes (d'après le site http://draaf.haute-normandie.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/FT_mouche_chou_23VI09_cle42d683.pdf datant de 2008).

Surveillance des populations par piégeage

La surveillance des populations de *D. radicum* permet de déterminer les périodes à risques.

Elle s'effectue grâce au **comptage d'adultes** piégés dans des bols jaunes (pièges Finch contenant de l'eau savonneuse) (Finch 1993; Finch, Collier et al. 1996) (Figure II-6-6).



Figure II-6-6 : Bol jaune permettant le piégeage des adultes *D. radicum*.

En France, elle s'effectue surtout grâce au **comptage des œufs** par examen visuel des pièges à feutrine disposés autour du collet des chou (environ 10 pièges par parcelle) (Figure II-6-7) (ou éventuellement par examen visuel du sol). Le comptage des œufs semble être une méthode plus fiable que celui des adultes (Blackshaw, Vernon et al. 2012) ; des études antérieures l'indiquaient déjà (cf réf. in



Figure II-6-7 Piège à œufs en feutrine permettant le comptage des œufs de *D. radicum*

Cette surveillance permet de cibler les périodes d'application d'insecticides (Finch and Collier 2000a). Les seuils d'intervention sont variables. En France, le seuil de nuisibilité est fixé à 7 œufs par piège à feutrine et par semaine ; tout dépassement de ce seuil est indiqué aux producteurs pour leur permettre d'effectuer les traitements éventuels.

Insecticides

En plus de tenter de réduire le nombre d'applications d'insecticides en s'appuyant sur les méthodes de prévisions des vols et sur la surveillance des populations par piégeage, les méthodes d'applications évoluent et recommandent de traiter de préférence seulement autour de la base de la plante à 1-2 cm sous la surface du sol où les larves s'alimentent, de pulvériser (arroser) les mini-mottes en masse avec un insecticide, juste avant la plantation et d'utiliser des semences pelliculées/enrobées d'insecticides (Finch and Collier 2000a).

Actuellement, très peu de substances actives insecticides sont autorisées. En 2012, sont autorisés le chlorpyrifos-éthyl pour le traitement des semences ou des plants, le spinosad pour le traitement des plants, la théfluthrine pour le traitement du sol, la lambda-cyhalothrine pour le traitement des parties aériennes, (d'après le site <http://e-phy.agriculture.gouv.fr/> consulté en août 2012). De plus, des essais techniques sur chou-fleur ont montré que leur efficacité, aux doses pratiquées, est variable ou limitée (résultats CTIFL, Pôle Légumes région Nord, 2008). Par exemple, l'application après plantation au collet de spinosad (SUCCESS 4), ou de bifenthrine (TALSTAR), ne diminue pas le pourcentage de pieds véreux par rapport au témoin non traité alors que l'application après plantation au collet de microgranulés de Tefluthrine (FORCE 1.5G) le diminue. L'application sur mini-mottes avant plantation de Chlorpyrifos-ethyl (DURSBAN) et de spinosad (SUCCESS 4) est efficace. L'application après plantation au collet d'huile de Neem (VITANEEM) n'est pas efficace. Par contre, le pelliculage des semences avec du Chlorpyrifos éthyl (PYRISTAR) diminue le pourcentage de pieds véreux.

Substances agissant sur le comportement ou le développement de l'insecte (allélochimiques)

Face à la diminution du nombre de substances actives insecticides autorisées contre *D. radicum*, des recherches sont en cours pour trouver d'autres substances capable de limiter la ponte de *D. radicum* ou le développement des larves. En laboratoire, l'application d'acide jasmonique au pied de brocolis induit une augmentation de la teneur en glucosinolates (notamment indoliques) et une forte diminution de la survie des larves de *D. radicum* (mais aucune corrélation entre ces 2 facteurs n'a été montrée) (Pierre, Dugravot et al.

2012). Mais dans cette même étude, l'application d'acide jasmonique au pied de navets augmente la teneur en glucosinolates et augmente la survie des larves. Il semble donc que l'effet de l'acide jasmonique varie selon l'espèce végétale.

Au champ, le diméthyle disulfide DMDS (à certaines concentrations) déposé au pied de brocolis, diminue la ponte de *D. radicum* (Ferry, Le Tron et al. 2009; Kergunteuil, Dugravot et al. 2012) (sans toutefois diminuer le nombre de larves ou de pupes récoltées et les dégâts sur les plantes (Ferry, Le Tron et al. 2009)). Ce composé qui est émis par les racines de navets fortement infestées par les larves de *D. radicum*, attire les coléoptères prédateurs des œufs (*Aleochara sp* et *Bembidion sp*) à certaines concentrations (Ferry, Dugravot et al. 2007). Cependant le DMDS ne modifie pas le nombre d'œufs consommés par les prédateurs (Ferry, Le Tron et al. 2009; Kergunteuil, Dugravot et al. 2012). Ces travaux ont été poursuivis dans l'optique d'une stratégie « push-pull » (pousser-tirer) (qui consiste à utiliser des substances ou des plantes qui repoussent l'insecte loin de la culture à protéger et corrélativement des substances ou de plantes attractives). Des résultats récents ont montré qu'au champ, le (Z)-3-hexenyl acetate (une odeur verte émanant des plantes récemment endommagées) stimule fortement la ponte de *D. radicum* (lorsque ce composé émane d'un diffuseur d'odeurs placé au pied de brocolis) (Kergunteuil, Dugravot et al. 2012). Dans cette étude, d'autres substances synthétiques ont été testées et certaines tendent à être intéressantes : le méthyl-salicylate augmente la proportion de zones où les œufs de *D. radicum* sont consommés par les prédateurs alors que l'acétophénone la diminue. Les auteurs soulignent que ces travaux doivent être approfondis mais suggèrent que DMDS et méthyl-salicylate pourraient être utilisés dans la culture à protéger, tandis que l'hexenyl acetate pourrait être placé au bord de la culture pour y attirer *D. radicum* dans une stratégie « push-pull ».

Variétés résistantes à *D. radicum*

La résistance des plantes vis-à-vis des larves de la mouche du chou (antibiose) est due à la forte teneur en matière sèche (Birch 1988) et au taux de lignification important des racines plantes (qui augmente d'ailleurs avec l'âge de la plante) . Ainsi, la survie des larves est plus faible sur des plantes dont les racines sont fortement lignifiées (chou-fleur) ou sur des plantes aux racines réduites (moutarde blanche, choux chinois) (Bligaard 1999). Il existe également le même genre de résistance pour *Brassica fruticulosa*, *B. incana*, et *B. spinescens* ; au contraire, certaines variétés de choux *B. oleracea* sont sensibles et en particulier la variété de choux de Bruxelles « Oliver » (Ellis, Pink et al. 1999). Certains auteurs notent une résistance génétique chez plusieurs souches de choux ligneux sauvages (*Brassica fruticulosa*) (Jyoti, Shelton et al. 2001; Jensen, Felkl et al. 2002; Felkl, Jensen et al. 2005)

La résistance s'exprime aussi par le fait que la ponte est plus faible auprès de certaines espèces. Une étude au champ montre que le colza *B. napus* est plus résistant aux infestations de *D. radicum* que le navet *B. rapa* car la ponte y est moins élevée (Doddall, Florence et al. 1998).

L'espèce moutarde blanche *Sinapis alba* est assez résistante, en particulier la souche souche *S. alba* Cornell Alt 543 (elle diminue la ponte, le poids et la survie des larves, pupes, adultes et diminue les dégâts) (Jyoti, Shelton et al. 2001). Une variété d'hybrides *S. alba x Brassica napus* (colza) l'est aussi (Doddall, Good et al. 2000). Des rutabagas ont été rendus résistants par croisement indirect avec *S. alba* (Malchev, Fletcher et al. 2010).

Tableau II-6-5 : Modes de gestion favorables ou défavorables au développement de *Delia radicum* et de ses ennemis naturels, d'après la littérature et perspectives en Basse-Normandie

| Pratique culturale ou mode de gestion | | Modalité | Effet connu ou supposé | Modes de gestion envisageables en Basse-Normandie mais effet à vérifier | Perspectives : questions posées |
|---------------------------------------|---|--|---|--|--|
| Précédent | Rotation | Durée et position par rapport au cycle de développement de l'insecte | les rotations seraient défavorables au développement de <i>D. radicum</i> (effet supposé, non démontré) | choisir des parcelles avec un précédent sans Brassicacae | Quelle est l'influence d'un précédent de type « céréales » ? d'une interculture ou d'un engrais vert ? |
| | Sol nu, jachère | | non connu | | |
| | Interculture ou engrais verts | | non connu | | |
| Choix de la parcelle | Taille de la parcelle | | non connu | choisir des parcelles éloignées d'au moins 400 m des autres Brassicacae | <p>Les haies et bordures favorisent-elles le développement des populations ? (préciser quelles haies ou bordures)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Quelles espèces végétales sont sources de nourriture pour les femelles ? ➤ Les haies ont-elles un rôle important pour limiter le déplacement des adultes ? ➤ Existe-il des plantes-hôtes alternatives dans les bordures ? Si oui, peut-on concrètement envisager de les éliminer ou de les éviter ? <p>Quelles sont les principales sources de mouches au printemps ? (autres parcelles, bordures ?)</p> |
| | Espacement de la parcelle par rapport à des parcelles proches de même culture | | présence d'un champ de Brassicacae attaqué à moins de 400 m favoriserait les attaques par <i>D. radicum</i> | | |
| | Environnement de la parcelle | <p>Haies, bordures, bandes enherbées, zones boisées, rivière... (refuges ?)</p> <p>Pas de bordures, haies...</p> | <p>- haies et bordures fleuries = lieux d'accouplements, d'abris et d'alimentation</p> <p>- haies = barrières aux déplacements des adultes</p> <p>- sol des parcelles cultivées : lieux d'hivernation des pupes</p> <p>- autres Brassicacae environnantes : plantes-hôtes possibles</p> | <p>choisir des parcelles avec ou sans haies ??</p> <p>choisir une parcelle éloignée d'autres plantes susceptibles de servir de refuge ou d'hivernation</p> <p>éliminer les éventuelles plantes-hôtes</p> | |
| Sol | Type de sol | | pas d'effet de la texture / nature du sol sur les dégâts observés (sable/terreau/limons/argile) | | |
| | Texture du sol | | | | |
| | Travail du sol | Pas de labour | labour profond (15 cm) en hiver diminue le taux d'émergence des adultes au printemps | favoriser les labours de 15 cm de profondeur en hiver | Le labour profond limite-t-il les dégâts en culture de choux ? comment agit-il ? en réduisant significativement la survie des pupes ? |
| | | <p>Labour peu profond par rapport au cycle de développement de l'insecte - Binage buttage ...</p> <p>Labour profond par rapport au cycle de développement de l'insecte</p> | | | |
| Culture de choux | Variétés résistantes | | - certaines variétés de Brassicacae seraient plus ou moins résistantes | utiliser des variétés résistantes, croisées avec la moutarde blanche <i>Sinapis alba</i> | Rechercher d'autres variétés résistantes : croisées avec <i>Brassica fruticulosa</i> (chou ligneux) par exemple ? |
| | Date de semis/plantation | | - le semis ou la plantation tardive permettrait de limiter les dégâts | reculer la date de plantation des choux pour éviter le 1 ^{er} vol ? | <p>Quelles pratiques de plantation seraient défavorables aux mouches du chou ?</p> <p>- A quelle date faut-il reculer la date de plantation des choux pour éviter le 1^{er} vol ?</p> |
| | Densité de plantation | | - forte densité de plantes (colza) - > diminution des pontes et dégâts | | |
| | Largeur entre les rangs | | non connu | | |

| | | | | | |
|--|--|--------------------------------------|--|--|--|
| | Stade sensible de la culture | Stade phénologique | non connu | | - quelle densité de choux pourrait permettre de limiter les pontes, sans amoindrir les rendements ? - Peut-on envisager de récolter précocement ? quand ? quel est l'intérêt ? - la récolte des restes de choux peut-elle permettre de diminuer les populations ? (si les mouches sont capables de se développer sur des restes de cultures) |
| | | Taille des plantes | ponte préférentielle pour des plantes de grande taille | | |
| | Date de récolte | | une récolte précoce permettraient de limiter les dégâts | récolter précocement ? | |
| | Cultures pièges | | un essai avec des cultures pièges de navet n'a pas montré de diminution des pontes dans la culture principale | | Identifier et tester différentes cultures pièges |
| Apports : fertilisation, amendements | Apports | Fumier, matières organiques | - apport trop important de soufre augmente le nombre de mouches (œufs, larves) - apport de fumier augmente les infestations | limiter les apports soufrés et les apports de matières organiques (fumiers) | Quelle est la quantité minimale d'engrais à apporter, de façon à avoir un bon rendement sans favoriser trop les mouches ? |
| | | Soufre | - pas d'effet d'apports de sable, cendres, de terre de diatomées, sur la ponte | | |
| | | Autres : cendres, sable, calcaire... | | | |
| Irrigation | faible | | | limiter l'irrigation si des œufs ou des jeunes larves sont présentes | Est-ce que l'irrigation augmente vraiment les dégâts par les mouches ? |
| | importante | | l'humidité importante favorise la survie des œufs et larves | | |
| Cultures intercalaires (plantes compagnes) | | | - cultures intercalaires trèfle/Brassica : pourraient diminuer les pontes et les larves (à vérifier) - intérêt des cultures intercalaires blé/colza | favoriser les cultures intercalaires avec du trèfle, du blé ? | Quel mode de culture intercalaire trèfle/Brassica fonctionne bien ? Chercher d'autres cultures intercalaires |
| Couverts : paillages, mulchs | | | - fibres d'EVA au pied des choux peut limiter la ponte - paillis de fibres de bois hydrophiles et colorés en bleu peut diminuer les populations - pas d'effet de pose de papier goudronné au collet des choux | favoriser les fibres d'EVA ou les fibres de bois hydrophiles colorées au pied des choux ? (difficile à mettre en œuvre compte tenu des surfaces ?) | Tester d'autres paillis ? |
| Prévision et surveillance des vols | Modèles de prévision Surveillance des vols des adultes et/ou des pontes (piégeage) | | efficacité des modèles de prévision des vols pour alerter intérêt des suivis des populations grâce aux pièges en feutrine (suivi des pontes) | continuer l'utilisation des modèles de prévision des vols continuer la surveillance des populations par le piégeage des œufs (plutôt que le piégeage des adultes) | affiner les modèles de prévision des vols |
| Traitements chimiques insecticides | Traitement des parties aériennes | | lambda-cyhalothrine | - limiter au maximum le nombre de traitements en s'appuyant sur les modèles de prévision et les surveillances, afin d'éviter les résistances aux insecticides | Encourager la diminution de l'emploi de pesticides auprès des producteurs (pour favoriser les régulations naturelles) |
| | Traitement du sol | | théfluthrine | | |
| | Traitement des semences ou des plants | | chlorpyrifos-éthyl (semences, plants) ou spinosad (plants) | | |
| | Modalités d'application (par bande, en granulés, moment...) | | - traiter au plus près de la plante - traitements foliaires de préférence l'après midi (moment des vols et ponte des femelles dans les cultures), si la température est supérieure à 10°C et en absence de pluie (ponte possible) | - appliquer les insecticides au plus près des pieds de choux - traiter les parties aériennes l'après midi, si les températures sont supérieures à 10°C et en absence de pluie | - améliorer les techniques d'application des insecticides |
| | Intervalle entre les applications | | non connu ou variable selon les substances | | |
| | Substances répulsives, réduisant la ponte ou le développement | | - huile de Neem pas efficace - DMDS peut limiter la ponte et attirer les prédateurs et le méthyl-salicylate peut augmenter la prédation des œufs (effet répulsif « push ») - (Z)-3-hexenyl acetate peut stimuler la ponte (effet attractif « pull ») | favoriser les applications de substances répulsives dans la culture et de substances attractives en bordure de culture (test) | - confirmer l'intérêt de ces substances chimiques répulsives ou attractives dans une stratégie push-pull - rechercher d'autres substances |

| | | | | | |
|--|--|--|---|--|---|
| Barrières physiques | Filets anti-insectes | Filets couvrants, bâches | intérêt des filets couvrants (bâches de polyester tissé) pour limiter les pontes en début de culture | placer des filets couvrants en début de culture, avant l'attaque et dans des parcelles où il ne risque pas d'y avoir des adultes émergents sous le filet | |
| | | Filets verticaux | intérêt des filets verticaux (90 à 130 cm) pour limiter la présence des femelles dans la culture (les adultes volent à moins d'un mètre) | placer des filets verticaux d'au moins 90 cm autour des parcelles | comment utiliser les filets verticaux ? |
| Auxiliaires ou ennemis naturels | Champignons entomopathogènes | | plusieurs espèces connues (<i>Entomophthora</i> , <i>Cystosporogenes</i> / adultes ; <i>Metarhizium</i> , <i>Beauveria</i> , <i>Paecilomyces</i> / larves) | | Comment favoriser l'impact des ennemis naturels (lutte biologique par conservation) ? |
| | Bactéries entomopathogènes | | <i>Bacillus thuringiensis</i> présentes dans l'abdomen des adultes mais pas d'effet léthal | | |
| | Nématodes entomopathogènes | | plusieurs nématodes connus (<i>Steinernema</i> , <i>Heterorhabditis</i>) | | |
| | Prédateurs | Favorisation des prédateurs naturels | - prédateurs connus : acariens (<i>Thrombidium</i> , <i>Hypoaspis</i>), coléoptères carabes (<i>Metallina</i> , <i>Trechus</i> et <i>Bembidion</i>) et Staphylins (<i>Aleochara bilineata</i> et <i>A. bipustulata</i>) | | |
| | | Lâchers inondatifs | lâchers inondatifs d' <i>A. bilineata</i> peu concluants | | |
| Parasitoïdes | Favorisation des parasitoïdes naturels | - parasitoïdes connus : Hyménoptères <i>Trybliographa rapae</i> (parasite les larves), coléoptères <i>Aleochara</i> (parasite des pupes) | | | |
| Conduite en cas d'attaques importantes | Arrachage de la culture | | non connu | | Comment limiter les attaques en cas de fortes infestations ? arracher, enfouir, labourer ? Est-ce que les mouches peuvent se développer sur les résidus de cultures dans le sol ? |
| | Enfouissement | | non connu | | |
| | Labour | | non connu | | |

Conclusion :

De nombreux facteurs influencent le maintien et le développement des mouches du chou au champ. Voici un résumé des principaux effets signalés dans la littérature.

Les **facteurs climatiques** jouent un rôle important. Par exemple, la pluie limite le comportement de ponte ; une humidité très faible (inférieure à 25%) réduit fortement la survie des œufs ; la température influence peu la survie des œufs (sauf au-delà de 33°C) ; par contre, la survie des larves augmente avec l'humidité (20% à 100%) et la température du sol (17°C à 29°C).

Le choix du **précédent cultural** et l'importance des rotations à grande échelle sont mentionnées dans la littérature. Une étude prouve que la proximité avec un champ de Brassicées attaquées à moins de 400 mètres augmente la probabilité d'attaque, tout comme la proximité d'un champ précédemment attaqué.

Les **haies et les bordures fleuries** sont le lieu des accouplements et de l'alimentation des adultes, ce qui favoriserait la reproduction de *D. radicum* et augmenterait les dégâts mais aucune étude n'en a apporté la preuve. Les haies constituent aussi des barrières aux déplacements des adultes.

La **nature du sol** (sol sableux/terreau/terreau limoneux/sol argileux) n'a pas d'effet sur les dégâts par *D. radicum*. Par contre, il a été montré qu'un **labour** profond de 15 cm en hiver limitait le taux d'émergence des adultes ainsi que les dégâts racinaires du colza ; toutefois le rendement est meilleur sans labour.

La **fertilisation** soufrée favorise la ponte de *D. radicum* ainsi que le développement des larves. L'apport de matières organiques semble également augmenter les dégâts mais l'impact est variable selon la nature des matières organiques.

Une forte **densité de plantes** tend à limiter la ponte et les dégâts moyens par plante mais le rendement peut être diminué.

L'effet de l'**irrigation** sur le développement de la mouche du chou n'a pas été étudié ; cependant, on peut penser que limiter les arrosages en cas de présence d'œufs et de larves permet de diminuer la survie de ces jeunes stades.

Beaucoup d'études ont été réalisées avec des plantes compagnes ou **plantes intercalaires**. La plupart des études en cultures intercalaires choux/trèfle montrent une diminution du nombre d'œufs pondus, de larves ou de pupes de *D. radicum* par rapport à des monocultures de choux ; le rendement en cultures intercalaires est plus faible mais comme la récolte est de bonne qualité, le résultat financier est meilleur qu'en monocultures. L'association blé/colza diminue également la ponte et les dégâts.

Les **paillis (ou mulch)** ont des effets variables selon leur nature. Aucun effet n'a été montré avec l'apport de sable, de cendres de bois, de terre riche en diatomées, ou la pose de collets de papier goudronné autour des plantes-hôtes. Par contre, la pose de fibres de graphite ou celle de fibres EVA (Ethylene vinyl acetate) ou un paillis en fibres de bois hydrophiles colorées à la base des plantes ont pu montrer une réduction de la ponte.

Les **filets couvrants** (bâches de polyester tissé) donnent de bons résultats pour limiter la ponte, sans modifier les rendements, mais à condition qu'ils soient en bon état, qu'ils soient placés avant l'attaque et sans adultes émergents dessous.

Plusieurs études avec des **filets verticaux** d'au moins 90 cm autour des parcelles, donnent des résultats intéressants ; en effet, ceux-ci peuvent être efficaces pour diminuer l'arrivée des mouches, les pontes ou les dégâts à l'intérieur de la parcelle.

Certains auteurs signalent qu'on peut également agir sur les **dates de cultures** en semant tard et en récoltant tôt pour éviter les attaques de *D. radicum* mais à notre connaissance, aucune étude ne le montre.

Des essais avec des cultures pièges de navets, en association avec des brocolis n'ont pas montré de diminution du nombre d'œufs par rapport à des cultures de brocolis seuls.

Afin de mieux gérer les problèmes liés à *D. radicum*, les producteurs s'appuient sur des **modèles dits « degrés-jours »**. Ces modèles prévoient les dates d'apparition des adultes (des œufs et des larves) en s'appuyant sur les températures journalières cumulées au fil du temps et sur la connaissance du cycle de développement de *D. radicum* en fonction des températures. La **surveillance des populations** en temps réel est également utile pour avertir les producteurs des attaques. En France, depuis plusieurs années maintenant, cette surveillance s'effectue par piégeage des adultes et surtout par comptage des œufs au niveau de pièges en feutrine disposés au collet des plantes. Le seuil de nuisibilité est fixé à une moyenne de 7 œufs par piège et par semaine, sur les 10 pièges posés dans la parcelle.

Très peu de **substances insecticides** sont autorisées contre la mouche du chou. Les résultats d'efficacité de ces insecticides sont variables selon leur nature, selon les essais et les années. Ainsi, des études récentes sont mises en œuvre pour trouver de **nouvelles substances** capables d'agir sur *D. radicum*. Certaines substances semblent prometteuses. En particulier le diméthyle disulfide DMDS (composé qui est émis par les racines de navets fortement infestées par les larves de *D. radicum*) diminue la ponte au champ, sans toutefois diminuer le nombre de larves ou les dégâts sur les plantes. Il peut également attirer les coléoptères prédateurs des œufs, cependant il ne modifie pas le nombre d'œufs consommés par prédation. D'autres substances ont récemment été testées au champ : il a été démontré que le (Z)-3-hexenyl acetate (une odeur verte émanant des plantes récemment endommagées) induit une stimulation de la ponte ; le méthyl-salicylate augmente la proportion de zones où les œufs de *D. radicum* sont consommés par les prédateurs. Les auteurs de cette dernière étude suggèrent d'utiliser des substances pour repousser la mouche du chou hors dans la culture et d'autres pour l'attirer à l'extérieur de la culture, dans une stratégie « push-pull ». Cependant, d'autres essais doivent être réalisés pour confirmer et approfondir ces résultats au champ.

Certaines espèces ou variétés de Brassica (*Brassica fruticulosa* ou *Sinapis alba*) sont peu propices au développement des larves. Des croisements avec ces espèces ont donc été mis en œuvre et ont conduit à la création de **variétés** de colza ou de rutabagas plus **résistantes**.

Ainsi, en bilan des pratiques culturales testées pour lutter contre la mouche du chou, on peut lister quelques propositions qui peuvent être intéressantes (Tableau II-6-5). Certaines propositions méritent d'être vérifiées (elles ont donc été signalées par un point d'interrogation).

Précédent cultural :

Eviter toute culture de Brassicées

Choix de la parcelle :

Choisir des parcelles éloignées d'au moins 400 mètres des parcelles avec Brassicées, a fortiori attaquées

Haies et bordures fleuries ??? (leurs effets sont mal connus)

Sol : Effectuer un labour profond de 15 cm en hiver

Apports :

Limiter les fertilisations soufrées et l'apport de matières organiques

Densité de plants

Favoriser une densité élevée de plants ?

Irrigation

Peut-être limiter les arrosages en cas de présence d'œufs ou de larves (l'humidité favorise leur développement)

Cultures intercalaires

Favoriser les cultures intercalaires de trèfle ou de blé ?

Mulches

Déposer des fibres de graphite/ fibres EVA ou de bois colorées au pied des plantes ?

Filets couvrants

Installer des bâches de polyester tissé, surtout en début de culture

Filets verticaux

Installer des filets verticaux d'au moins 90 cm autour des parcelles

Surveillance et prévision

S'appuyer sur les modèles de prévision des vols d'adultes, des pontes et des larves

Surveiller les pontes grâce au relevé des pièges en feutrine (plutôt que le relevé des adultes)

Insecticides et autres substances actives

Limiter les applications de pesticides en s'appuyant sur les surveillances et les prévisions

Appliquer les insecticides au plus près des pieds de choux

Traiter les parties aériennes l'après midi, si les températures sont supérieures à 10°C et en absence de pluie

Confirmer l'action de certaines substances réduisant la ponte de la mouche et attractives pour ses prédateurs (DMDS, methyl-salicylate) ou de substances augmentant la ponte (hexenyl-acetate) utilisables sur des plantes au bord de la culture.

Variétés résistantes

Utiliser des variétés résistantes

Compte tenu des effets plus ou moins démontrés des modes de gestion et des traits de vie de la mouche du chou, plusieurs **questions** peuvent être soulevées :

Quels sont les effets des **haies** et des **bordures fleuries**, sur le maintien ou le développement des populations de la mouche du chou ? (préciser quelles haies ou bordures) Pour répondre à cette question, d'autres interrogations émergent :

- Quelles espèces végétales constituent une ressource alimentaire pour les adultes ? (l'apport de nectar et de pollen favorisent la reproduction)
- Les haies présentent-elles un intérêt pour limiter les déplacements des adultes ?
- Existe-t-il des plantes-hôtes alternatives dans les bordures ? (sur lesquelles la mouche peut se développer et qui seraient donc un réservoir important de mouches) Si c'est le cas, peut-on envisager de les limiter ou de les éviter ?
- Finalement, les effets des haies sont-ils bénéfiques ou défavorables ?

Quelles sont les **sources principales de mouches adultes** au printemps ? Les adultes viennent-ils majoritairement des parcelles proches et précédemment infestées au cours de l'année n-1 ? Viennent-ils d'autres plantes-hôtes (colza, mauvaises herbes des bordures) ?

Le **labour** profond est-il réellement efficace ? Comment agit-il ? Réduit-il significativement la survie des pupes dans le sol ?

Comment améliorer la résistance des plantes ? Croiser les variétés avec *Brassica fruticulosa* (chou ligneux) ?

Peut-on envisager de reculer la date des semis de choux ? (pour éviter l'impact du 1^{er} vol sur les jeunes plants) ? Quelle date peut-on proposer ?

Est-ce intéressant d'augmenter la densité de plantation pour limiter les pontes ?

Peut-on envisager de récolter précocement ? Quand ? Dans quel but ?

La récolte des restes de choux (au lieu de l'enfouissement) peut-elle permettre de diminuer les populations ? (si les mouches sont capables de se développer sur des restes de cultures)

Quelles cultures pièges peuvent être testées ? Comment peuvent-elles être placées ? Quand ?

Quelle quantité minimale de fertilisants doit-on apporter ? (pour limiter l'impact de la mouche, sans diminuer trop les rendements)

Une irrigation limitée permet-elle de réduire la survie d'éventuels œufs ou jeunes larves ? (si irrigation il y a)

Est-ce vraiment intéressant d'envisager les cultures intercalaires avec du trèfle ou du blé par exemple ? N'existe-t-il pas d'autres cultures intercalaires possibles ?

Est-il envisageable ou réaliste d'utiliser des fibres au pied de chaque chou pour limiter la ponte ? N'existe-t-il pas d'autres paillages envisageables ?

Comment pourrait-on utiliser des filets verticaux pour limiter l'impact de la mouche ?

Des perspectives peuvent s'ouvrir pour affiner les modèles de prévision des vols.

Améliorer les techniques d'application des insecticides afin de diminuer les doses et de cibler mieux les stades visés.

Il est intéressant de continuer à rechercher des plantes ou des substances qui attireraient les mouches hors de la culture, et en même temps des substances qui éviteraient la ponte par les mouches dans la culture.

Il est important de continuer à rechercher des variétés résistantes.

Est-ce que les résidus de cultures (choux étêtés) généralement enfouis dans le sol en fin de culture, peuvent être des sources importantes de mouches en cas de fortes infestations ? est-ce que l'arrachage, l'enfouissement ou le labour peut limiter les attaques suivantes ?

Enfin l'idée de favoriser la **régulation naturelle** des populations de *D. radicum* est très intéressante à long terme. Elle nécessite d'encourager la diminution de l'emploi de pesticides auprès des producteurs. Cependant, elle se heurte à des difficultés importantes. Il est d'abord long et difficile d'évaluer précisément l'impact des ennemis naturels. De plus, comment peut-on envisager d'augmenter leur impact ? Par exemple, les haies et bordures peuvent favoriser les ennemis naturels, mais peuvent aussi améliorer la reproduction des femelles mouches du chou. Ainsi, augmenter la surface en haies et bordures est-elle une stratégie judicieuse pour lutter contre la mouche du chou ? Cette question n'a pas de réponse évidente. Seules des études à long terme et sur une vaste étendue peuvent permettre d'y répondre.

Références bibliographiques sur la mouche du chou

- Abu Yaman, I. K. (1960). "Natural control in cabbage root fly populations and influence of chemicals." Meded. Landbouwhogesschool Wageningen **60**: 1-57.
- Baguette, M. and T. Hance (1997). "Carabid beetles and agricultural practices: Influence of soil ploughing." Biological Agriculture & Horticulture **15**(1-4): 185-190.
- Baur, R., V. Kostal, et al. (1996b). "Preference for plants damaged by conspecific larvae in ovipositing cabbage root flies: Influence of stimuli from leaf surface and roots." Entomologia Experimentalis et Applicata **81**(3): 353-364.
- Birch, A. N. E. (1988). "Field and glasshouse studies on components of resistance to root fly attack in swedes." Annals of Applied Biology **113**: 89-100.
- Biron, D., X. Langlet, et al. (1998). "Expression of early and late-emerging phenotypes in both diapausing and non-diapausing *Delia radicum* L. pupae." Entomologia Experimentalis et Applicata **87**(2): 119-124.
- Biron, D. G., D. Coderre, et al. (2005). "Larval respiratory systems of two anthomyiid flies, *Delia radicum* and *Delia antiqua* (Diptera : Anthomyiidae)." Canadian Entomologist **137**(2): 163-168.
- Blackshaw, R. P., R. S. Vernon, et al. (2012). "Reduction of *Delia radicum* attack in field brassicas using a vertical barrier." Entomologia Experimentalis et Applicata: n/a-n/a.
- Bligaard, J. (1999). "Damage thresholds for cabbage root fly *Delia radicum* (L.) in cauliflower assessed from pot experiments." Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science **49**(1): 57-64.
- Block, W., W. J. Turnock, et al. (1987). "Cold resistance and overwintering survival of the cabbage root fly, *Delia radicum* (Anthomyiidae) and its parasitoid, *Trybliographa rapae* (Cynipidae), in England." Oecologia **71**(3): 332-338.
- Bomford, M. K., R. S. Vernon, et al. (2000). "Importance of collection overhangs on the efficacy of exclusion fences for managing cabbage flies (Diptera : Anthomyiidae)." Environmental Entomology **29**(4): 795-799.
- Broatch, J. S., L. M. Dossall, et al. (2006). "Using degree-day and logistic models to predict emergence patterns and seasonal flights of the cabbage maggot and seed corn maggot (Diptera : Anthomyiidae) in Canola." Environmental Entomology **35**(5): 1166-1177.
- Bromand, B. (1980). "Investigations on the biological control of the cabbage rootfly (*Hylemya brassicae*) with *Aleochara bilineata*." Bulletin SROP **3**: 49-62.
- Bruck, D. J., J. E. Snelling, et al. (2005). "Laboratory bioassays of entomopathogenic fungi for control of *Delia radicum* (L.) larvae." Journal of Invertebrate Pathology **89**(2): 179-183.
- Brunel, E. (1971). "Influence de la plante hôte (espèce et stade végétatif) sur les captures de *Psila rosae* Fab. (Diptera, *Psilidae*) au moyen de pièges jaunes." Meded. Fac. Landbouwwet. Rijksuniv. Gent **36**: 241-249.
- Brunel, E. (1977). "Etude de l'attraction périodique de femelles de *Psila rosae* Fabr. par la plante-hôte et influence de la végétation environnante." Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique **265**: 373-389.
- Brunel, E. (1979). "Etude de l'ovogenèse de *Psila rosae* Fab. (Diptère Psilidés) : rôle de la température, de l'alimentation et de la plante-hôte." Annales De Zoologie Ecologie Animale **11**(2): 227-246.
- Brunel, E. (1987). "Analyse des vols de la mouche du chou *Delia radicum* en France en 1984, 1985 et 1986." Annales de l'Association Nationale de la Protection des Plantes: 523-529.
- Brunel, E. and J. P. Cancela Da Fonseca (1977). "Utilisation des séries chronologiques dans l'étude du cycle biologique et des fluctuations de population de *Psila rosae* Fabr. (Diptères Psilidae) tilization of time-series." Annales De Zoologie Ecologie Animale **9**(3): 515-535.
- Brunel, E. and S. Fournet (1996). "Fauna associated with the cabbage root fly in sequential sowings of turnips." IOBC-WPRS Bulletin **19**(11): 140-146.

- Chen, S., J. Li, et al. (2003). "Effect of temperature on the pathogenicity of entomopathogenic nematodes (*Steinernema* and *Heterorhabditis* spp.) to *Delia radicum*." Biocontrol **48**(6): 713-724.
- Chen, S. L., X. Y. Han, et al. (2003). "Biological control of *Delia radicum* (Diptera : Anthomyiidae) with entomopathogenic nematodes." Applied Entomology and Zoology **38**(4): 441-448.
- Coaker, T. H. and S. Finch (1971). The cabbage root fly, *Erioischia brassicae* (Bouché). R. N. V. R. S. f. 1970. Warwick: 23-42.
- Coaker, T. H. and D. W. Wright (1963). "The influence of temperature on the emergence of the cabbage root fly (*Erioischia brassicae* (Bouché)) from overwintering pupae." Annals of Applied Biology **52**(2): 337-343.
- Collier, R. H. and S. Finch (1985). "Accumulated temperatures for predicting the time of emergence in the spring of the cabbage root fly, *Delia radicum* (L.) (Diptera, Anthomyiidae)" Bulletin of Entomological Research **75**(3): 395-404.
- Collier, R. H. and S. Finch (1988). "Thermal requirements for cabbage root fly, *Delia radicum*, development." Bulletin OILB/SROP: 89-94.
- Collier, R. H., S. Finch, et al. (1989). "Laboratory studies on late-emergence in the cabbage root fly (*Delia radicum*)." Entomologia Experimentalis Et Applicata **50**(3): 233-240.
- Collier, R. H., S. Finch, et al. (1991). "A simulation model for forecasting the timing of attacks of *Delia radicum* on cruciferous crops." Bulletin OEPP **21**(3): 419-424.
- Dalthorp, D. and A. J. Dreves (2008). "Spatio-temporal ecology and management of cabbage maggot." Environmental Entomology **37**(2): 409-418.
- de Jong, R., N. Maher, et al. (2000). "Rutabaga roots, a rich source of oviposition stimulants for the cabbage root fly." Chemoecology **10**(4): 205-209.
- de Jong, R. and E. Städler (1999). "The influence of odour on the oviposition behaviour of the cabbage root fly." Chemoecology **9**(4): 151-154.
- de Jong, R. and E. Städler (2001). "Complex host marking in the cabbage root fly." Chemoecology **11**: 85-88.
- De Wilde, J. (1947). "De koolvlieg en Zijn Bestrijding." Meded. TuinVoorDienst. **45**: 1-70.
- Degen, T. and E. Stadler (1996). "Influence of natural leaf shapes on oviposition in three phytophagous flies: A comparative study." Entomologia Experimentalis Et Applicata **80**(1): 97-100.
- Doane, J. F. and R. K. Chapman (1964). "The relation of the cabbage maggot, *Hymenya brassicae* (Bouché), to decay in some cruciferous crops." Entomologia Experimentalis et Applicata **7**: 1-8.
- Dosdall, L. M., L. Z. Florence, et al. (1998). "Tillage regime, row spacing, and seeding rate influence infestations of root maggots (*Delia* spp.) (Diptera : Anthomyiidae) in canola." Canadian Journal of Plant Science **78**(4): 671-681.
- Dosdall, L. M., A. Good, et al. (2000). "Identification and evaluation of root maggot (*Delia* spp.) (Diptera : Anthomyiidae) resistance within Brassicaceae." Crop Protection **19**(4): 247-253.
- Dosdall, L. M., M. J. Herbut, et al. (1996a). "The effect of seeding date and plant density on infestations of root maggots, *Delia* spp, (Diptera: Anthomyiidae), in canola." Canadian Journal of Plant Science **76**(1): 169-177.
- Dosdall, L. M. and F. C. Stevenson (2005). "Managing Flea Beetles (spp.) (Coleoptera: Chrysomelidae) in Canola with Seeding Date, Plant Density, and Seed Treatment." Agron. J. **97**(6): 1570-1578.
- Dreves, A. J., D. Dalthorp, et al. (2006). "Spring emergence and seasonal flight of *Delia radicum* L. (Diptera : Anthomyiidae) in western Oregon." Environmental Entomology **35**(2): 465-477.
- Eckenrode, C. J. and R. K. Chapman (1971a). "Effect of various temperatures upon rate of development of the cabbage maggot under artificial conditions" Annals of the Entomological Society of America **64**(5): 1079-1083.
- Eckenrode, C. J. and R. K. Chapman (1971b). "Observations on cabbage maggot activity under field conditions." Annals of the Entomological Society of America **64**(6): 1226-1230.
- Eckenrode, C. J. and R. K. Chapman (1972). "Seasonal adult cabbage maggot populations in the field in relation to thermal-unit accumulations." Annals of the Entomological Society of America **65**(1): 151-156.

- Eilenberg, J., P. H. Damgaard, et al. (2000). "Natural coprevalence of *Strongyloides castrans*, *Cystosporogenes deliaradicacae*, and *Bacillus thuringiensis* in the host, *Delia radicum*." Journal of Invertebrate Pathology **75**(1): 69-75.
- Ellis, P. R., D. A. C. Pink, et al. (1999). "Identification of high levels of resistance to cabbage root fly, *Delia radicum*, in wild Brassica species." Euphytica **110**(3): 207-214.
- Ellis, P. R., J. D. Taylor, et al. (1982). "The role of microorganisms colonising radish seedlings in the oviposition behaviour of cabbage root fly, *Delia radicum*." Proceedings of the 5th International Symposium on Insect-Plant Relationships, Wageningen, the Netherlands, 1-4 March 1982: 131-137.
- Felkl, G., E. B. Jensen, et al. (2005). "Tolerance and antibiosis resistance to cabbage root fly in vegetable Brassica species." Entomologia Experimentalis et Applicata **116**(1): 65-71.
- Ferry, A., S. Dugravot, et al. (2007). "Identification of a widespread monomolecular odor differentially attractive to several *Delia radicum* ground-dwelling predators in the field." Journal of Chemical Ecology **33**(11): 2064-2077.
- Ferry, A., S. Le Tron, et al. (2009). "Field evaluation of the combined deterrent and attractive effects of dimethyl disulfide on *Delia radicum* and its natural enemies." Biological Control **49**(3): 219-226.
- Finch, S. (1980). Chemical attraction of plant-feeding insects to plants. Applied Biology. T. H. Coaker. London & New York, Academic Press. **5**: 67-143.
- Finch, S. (1993). "Integrated pest-management of the cabbage root fly and the carrot fly." Crop Protection **12**(6): 423-430.
- Finch, S. and C. M. Ackley (1977). "Cultivated and wild host-plants supporting populations of the cabbage root fly." Annals of Applied Biology **85**: 13-22.
- Finch, S., H. Billiald, et al. (2003). "Companion planting - do aromatic plants disrupt host-plant finding by the cabbage root fly and the onion fly more effectively than non-aromatic plants?" Entomologia Experimentalis Et Applicata **109**(3): 183-195.
- Finch, S. and T. H. Coaker (1969a). "A method for the continuous rearing of the cabbage root fly *Erioischia brassicae* (BCH.) and some observations on its biology." Bulletin of Entomological Research **58**: 619-627.
- Finch, S. and T. H. Coaker (1969b). "Comparison of nutritive values of carbohydrates and related compounds to *Erioischia brassicae*." Entomologia Experimentalis et Applicata **1**(2): 441-453.
- Finch, S. and R. H. Collier (1983). "Emergence of flies from overwintering populations of cabbage root fly pupae." Ecological Entomology **8**(1): 29-36.
- Finch, S. and R. H. Collier (1984). "Parasitism of overwintering pupae of cabbage root fly, *Delia radicum* (L.) (Diptera : Anthomyiidae), in England and Wales." Bulletin of Entomological Research **74**(1): 79-86.
- Finch, S. and R. H. Collier (2000a). "Integrated pest management in field vegetable crops in northern Europe - with focus on two key pests." Crop Protection **19**(8-10): 817-824.
- Finch, S. and R. H. Collier (2000b). "Host-plant selection by insects - a theory based on 'appropriate/inappropriate landings' by pest insects of cruciferous plants." Entomologia Experimentalis et Applicata **96**(2): 91-102.
- Finch, S., R. H. Collier, et al. (1996). "A review of work done to forecast pest insect attacks in UK horticultural crops." Crop Protection **15**(4): 353-357.
- Finch, S. and G. Edmonds (1994). "Undersowing cabbage crops with clover - the effects on pest insects, ground beetles and crop yield." IOBC-WPRS Bulletin **17**(8): 159-167.
- Finch, S. and M. Kienegger (1997). "A behavioural study to help clarify how undersowing with clover affects host-plant selection by pest insects of brassica crops." Entomologia Experimentalis et Applicata **84**(2): 165-172.
- Finch, S. and G. Skinner (1975). "Dispersal of the cabbage root fly " Annals of Applied Biology **81**(1): 1-19.

- Finch, S. and G. Skinner (1976). "Effect of plant density on populations of cabbage root fly (*Erioischia brassicae* (Bché)) and cabbage stem weevil (*Ceutorhynchus quadridens* (Panz)) on cauliflowers." Bulletin of Entomological Research **66**(1): 113-123.
- Finch, S. and G. Skinner (1980). "Mortality of overwintering pupae of the cabbage root fly (*Delia brassicae*)." Journal of Applied Ecology **17**(3): 657-655.
- Gouinguene, S. P. D., T. Poiger, et al. (2006). "Eggs of cabbage root fly stimulate conspecific oviposition: Evaluation of the activity and determination of an egg-associated compound." Chemoecology **16**(2): 107-113.
- Gouinguene, S. P. D. and E. Stadler (2005). "Comparison of the sensitivity of four *Delia* species to host and non-host plant compounds." Physiological Entomology **30**(1): 62-74.
- Gouinguene, S. P. D. and E. Städler (2006). "Comparison of the egg-laying behaviour and electrophysiological responses of *Delia radicum* and *Delia floralis* to cabbage leaf compounds." Physiological Entomology **31**(4): 382-389.
- Griffiths, G. C. D. (1986). "Relative abundance of the root maggots *Delia Radicum* L. and *Delia floralis* Fallen (Diptera Anthomyiidae) as pests of canola in Alberta Canada." Quaestiones Entomologicae **22**(4): 253-260.
- Hardman, J. A. and P. R. Ellis (1978). "Host plant factors influencing the susceptibility of cruciferous crops to cabbage root fly attack " Entomologia Experimentalis et Applicata **24**(3): 393-397.
- Harris, C. R. and H. J. Svec (1966). "Mass rearing of cabbage maggot under controlled environmental conditions, with observations on the biology of cyclodiene-susceptible and resistant strains." Journal of Economic Entomology **59**(3): 569-573.
- Hartfield, C. and S. Finch (2003). "Releasing the rove beetle *Aleochara bilineata* in the field as a biological agent for controlling the immature stages of the cabbage root fly, *Delia radicum*." Bulletin OILB/SROP **26**(3): 127-133.
- Havukkala, I. and M. Virtanen (1984). "Oviposition of single females of the cabbage root flies *Delia radicum* and *Delia floralis* (Diptera, Anthomyiidae) in the laboratory." Annales Entomologici Fennici **50**(3): 81-84.
- Hawkes, C. (1972a). "The diurnal periodicity and cycle of behaviour of the adult cabbage root fly *Erioischia brassicae* ." Annals of Applied Biology **70**: 109-118.
- Hawkes, C. (1973). "Factors affecting the aggregation of the adult cabbage root fly (*Erioischia brassicae* Bouché) at hedges." Journal of Applied Ecology **10**(3): 695-703.
- Hawkes, C. (1973). "Factors affecting the aggregation of the adult cabbage root fly (*Erioischia brassicae* Bouché) at hedges." Journal of Applied Ecology **10**(695-703).
- Hawkes, C. (1974). "Dispersal of adult cabbage root fly (*Erioischia brassicae*) (Bouché)) in relation to a brassica crop." Journal of Applied Ecology **11**(1): 83-93.
- Hawkes, C. (1975). "Physiological condition of adult cabbage root fly *Erioischia brassicae* (Bouché) attracted to host-plants." Journal of Applied Ecology **12**(2): 497-506.
- Hawkes, C. and T. H. Coaker (1976). "Behavioural responses to host-plant odours in adult cabbage root fly (*Erioischia brassicae* (Bouche))." Symp. Biol. Hung. The host-plant in relation to insect behaviour and reproduction. **16**: 85-89.
- Hawkes, C. and T. H. Coaker (1979). "Factors affecting the behavioural-responses of the adult cabbage root fly *Delia brassicae*, to host plant odour." Entomologia Experimentalis et Applicata **25**(1): 45-58.
- Hemachandra, K. S., N. J. Holliday, et al. (2007a). "Comparative assessment of the parasitoid community of *Delia radicum* in the Canadian prairies and Europe: A search for classical biological control agents." Biological Control **43**: 85-94.
- Hemachandra, K. S., U. Kuhlmann, et al. (2007b). "Spatial patterns of *Trybliographa rapae* parasitism of *Delia radicum* larvae in oilseed rape and cauliflower." Journal of Applied Entomology **131**(5): 338-346.
- Hoffmann, M. P., T. P. Kuhar, et al. (2001). "Nonwoven fiber barriers for control of cabbage maggot and onion maggot (Diptera : Anthomyiidae)." Journal of Economic Entomology **94**(6): 1485-1491.

- Hughes, R. D. (1959). "The natural mortality of *Erioischia brassicae* (Bouché) (Diptera : Anthomyiidae) during the egg stage of the first generation." Journal of Animal Ecology **28**(2): 343-357.
- Hughes, R. D. and D. D. Salter (1959). "Natural mortality of *Erioischia brassicae* (Bouché) (Diptera : Anthomyiidae) during the immature stages of the first generation." Journal of Animal Ecology **28**: 231-241.
- Hummel, J. D., L. M. Dossdall, et al. (2009). "Effects of Canola-Wheat Intercrops on *Delia* spp. (Diptera: Anthomyiidae) Oviposition, Larval Feeding Damage, and Adult Abundance." Journal of Economic Entomology **102**(1): 219-228.
- Hummel, J. D., L. M. Dossdall, et al. (2010). "Responses of the parasitoids of *Delia radicum* (Diptera: Anthomyiidae) to the vegetational diversity of intercrops." Biological Control **55**(3): 151-158.
- Hurter, J., T. Ramp, et al. (1999). "Oviposition stimulants for the cabbage root fly: isolation from cabbage leaves." Phytochemistry **51**(3): 377-382.
- Jensen, E. B., G. Felkl, et al. (2002). "Resistance to the cabbage root fly, *Delia radicum*, within Brassica fruticulosa." Euphytica **124**(3): 379-386.
- Johnsen, S., A. P. Gutierrez, et al. (1997). "Overwintering in the cabbage root fly *Delia radicum*: A dynamic model of temperature-dependent dormancy and post-dormancy development." Journal of Applied Ecology **34**(1): 21-28.
- Johnson, D. E. (1930). "The relation of the cabbage maggot and other insects to the spread and development of soft rot of cruciferae." Phytopathology **20**(11): 857-872.
- Johnson, S. and U. Nielsen (2012). "Foraging in the Dark – Chemically Mediated Host Plant Location by Belowground Insect Herbivores." Journal of Chemical Ecology: 1-11.
- Jones, O. T. and T. H. Coaker (1978). "A basis for host plant finding in phytophagous larvae." Entomologia Experimentalis et Applicata **24**(3): 472-484.
- Jyoti, J. L., A. M. Shelton, et al. (2001). "Identifying sources and mechanisms of resistance in crucifers for control of cabbage maggot (Diptera : Anthomyiidae)." Journal of Economic Entomology **94**(4): 942-949.
- Kergunteuil, A., S. Dugravot, et al. (2012). "Selecting volatiles to protect brassicaceous crops against the cabbage root fly, *Delia radicum*." Entomologia Experimentalis et Applicata **144**(1): 69-77.
- Klingen, I., R. Meadow, et al. (2000). "Prevalence of fungal infections in adult *Delia radicum* and *Delia floralis* captured on the edge of a cabbage field." Entomologia Experimentalis et Applicata **97**(3): 265-274.
- Kostal, V. (1992). "Orientation behavior of newly hatched larvae of the cabbage maggot, *Delia radicum* (L.) (Diptera : Anthomyiidae), to volatile plant metabolites." Journal of Insect Behavior **5**(1): 61-70.
- Kostal, V. (1993). "Oogenesis and oviposition in the cabbage root fly, *Delia radicum* (Diptera, Anthomyiidae) influenced by food quality, mating and host-plant availability" European Journal of Entomology **90**(2): 137-147.
- Kostal, V., R. Baur, et al. (2000). "Exploration and assessment of the oviposition substrate by the cabbage root fly, *Delia radicum* (Diptera : Anthomyiidae)." European Journal of Entomology **97**(1): 33-40.
- Kostal, V. and S. Finch (1994). "Influence of background on host-plant selection and subsequent oviposition by the cabbage root fly (*Delia radicum*)." Entomologia Experimentalis et Applicata **70**(2): 153-163.
- Kromp, B. (1999). "Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement." Agriculture Ecosystems & Environment **74**(1-3): 187-228.
- Lahmar, M. (1982). Contribution à l'étude de la biologie de la mouche du chou : *Hylemya brassicae* Bouché (Diptera : Anthomyiidae) dans les conditions de l'ouest de la France. Thèse, Université de Rennes 1: 73 pp.
- Langer, V. (1995). "Pests and diseases in organically grown vegetables in Denmark - a survey of problems and use of control methods." Biological Agriculture & Horticulture **12**(2): 151-171.

- Langer, V. (1996). "Insect-crop interactions in a diversified cropping system: Parasitism by *Aleochara bilineata* and *Trybliographa rapae* of the cabbage root fly, *Delia radicum*, on cabbage in the presence of white clover." Entomologia Experimentalis et Applicata **80**(2): 365-374.
- Lepage, M. P., G. Bourgeois, et al. (2012). "Effect of Soil Temperature and Moisture on Survival of Eggs and First-Instar Larvae of *Delia radicum*." Environmental Entomology **41**(1): 159-165.
- Liburd, O. E., R. A. Casagrande, et al. (1998). "Evaluation of Various Color Hydromulches and Weed Fabric on Broccoli Insect Populations." Journal of Economic Entomology **91**(1): 256-262.
- Lukwinski, A. T., J. E. Hill, et al. (2006). "Biochemical and taxonomic characterization of bacteria associated with the crucifer root maggot (*Delia radicum*)." Canadian Journal of Microbiology **52**(3): 197-208.
- Makarenko, G. N. (1968a). "Resistance to cold in *Trybliographa rapae* West (Cynipidae) and its host, the spring and summer cabbage flies." Trudy Vsesoyuznogo Inst Zashchity Rastenii **31**: 276-288.
- Malchev, I., R. Fletcher, et al. (2010). "Breeding of rutabaga (*Brassica napus* var. *napobrassica* L. Reichenb.) based on biomarker selection for root maggot resistance (*Delia radicum* L.)." Euphytica **175**(2): 191-205.
- Marazzi, C., B. Patrian, et al. (2004). "Secondary metabolites of the leaf surface affected by sulphur fertilisation and perceived by the cabbage root fly." Chemoecology **14**(2): 87-94.
- Marazzi, C. and E. Städler (2005). "Influence of sulphur plant nutrition on oviposition and larval performance of the cabbage root fly." Agricultural and Forest Entomology **7**: 277-282.
- Matthews-Gehring, D. and J. A. Hough-Goldstein (1988). "Physical barriers and cultural practices in cabbage maggot (Diptera: Anthomyiidae) management on broccoli and Chinese cabbage." Journal of Economic Entomology **81**(1): 354-360.
- McDonald, R. S. and M. K. Sears (1992). "Assessment of larval feeding damage of the cabbage maggot (Diptera, Anthomyiidae) in relation to oviposition preference on canola." Journal of Economic Entomology **85**(3): 957-962.
- McKinlay, R. G. (1994). "Effect of intercropping swedes with clover on the level of cabbage root fly damage and numbers of carabid ground beetles." IOBC-WPRS Bulletin **17**(8): 168-172.
- McKinlay, R. G., M. McCreath, et al. (1996). "Undersowing cabbages with clover and its effect on the infestation levels of the cabbage root fly." Bulletin OILB/SROP **19**(11): 122-127.
- Messelink, G. and M. v. Slooten (2004). "Effects of soil-dwelling predators and organic treatments on the cabbage root fly *Delia radicum* (Diptera: Anthomyiidae) in greenhouse radish." Proc. Neth. Entomol. Soc. Meet. **15**: 87-91.
- Miles, M. (1951). "Factors affecting the behaviour and activity of the cabbage root fly *Erioischia brassicae* Bouché." Ann. App. Biol. **38**: 425-432.
- Missonnier, J. (1960). Contribution à l'étude du cycle biologique et de la diapause de *Chortophila brassicae* Bouché (Diptera : Muscidae). Compte Rendu de l'Académie des Sciences. Paris. **251**.
- Missonnier, J. and M. Stengel (1966). "Etude des facteurs de fécondité des adultes de *Chortophila brassicae* b., *Hylemyia antiqua* meig. et *Pegomyia betae* curt. ." Ann. Epiphyties. **17**(1): 5-41.
- Morley, K., S. Finch, et al. (2005). "Companion planting-behaviour of the cabbage root fly on host plants and non-host plants." Entomologia Experimentalis Et Applicata **117**(1): 15-25.
- Morris, O. N. (1985). "Susceptibility of 31 species of agricultural insect pest to the entomogenous nematodes *Steinernema feltiae* and *Heterorhabditis bacteriophora*." Canadian Entomologist **117**(4): 401-407.
- Mukerji, M. K. and D. G. Harcourt (1970). "Spatial pattern of the immature stages of *Hylemyia brassicae* on cabbage. ." Can. Entomol. **102** 1216-1222.
- Nair, K. S. S. and F. L. McEwen (1974). "Dispersal of adult cabbage maggot, *Hylemyia brassicae*." Environmental Entomology **3**(3): 563-565.
- Nair, K. S. S. and F. L. McEwen (1975). "Ecology of the cabbage maggot, *Hylemyia brassicae* (Diptera : Anthomyiidae), in rutabaga in southwestern ontario, with some observations on other root maggots." Can. Entomol. **107**(1): 343-354.

- Nair, K. S. S. and F. L. McEwen (1976a). "Host selection by the adult cabbage maggot, *Hylemya brassicae* (Diptera : Anthomyiidae) : effect of glucosinolates and common nutrients on oviposition. ." Can. Entomol. **108**: 1021-1030.
- Nair, K. S. S. and F. L. McEwen (1976b). "The relationship between glucosinolate content of cruciferous plants and oviposition preferences of *Hylemya brassicae* (Diptera : Anthomyiidae)." Can. Entomol. **108**: 1031-1036.
- Neveu, N. (1994). Interaction *Delia radicum* (Diptera : Anthomyiidae) - Crucifères : étude du fonctionnement ovarien et application à l'analyse comportementale en olfactomètre. Rennes, Rapport de DEA "Biologie des populations et Eco-éthologie": 34p.
- Neveu, N. (1998). Sélection de l'hôte chez *Trybliographa rapae* W. (Hymenoptera: Figitidae), parasitoïde de la mouche du chou *Delia radicum* L. (Diptera: Anthomyiidae); perspectives d'application en lutte biologique. Thèse de doctorat. Rennes, Université de Rennes 1
- Neveu, N., J. Grandgirard, et al. (2002). "Systemic release of herbivore-induced plant volatiles by turnips infested by concealed root-feeding larvae *Delia radicum* L." Journal of Chemical Ecology **28**(9): 1717-1732.
- Nielsen, O. (2003). "Susceptibility of *Delia radicum* to steinernematid nematodes." Biocontrol **48**(4): 431-446.
- Nilsson, U., A. Eriksson, et al. (2012). "Male and female *Trybliographa rapae* (Hymenoptera: Figitidae) behavioural responses to food plant, infested host plant and combined volatiles." Arthropod-Plant Interactions **6**(2): 251-258.
- Nilsson, U., L. M. Rannback, et al. (2011). "Comparison of nectar use and preference in the parasitoid *Trybliographa rapae* (Hymenoptera: Figitidae) and its host, the cabbage root fly, *Delia radicum* (Diptera: Anthomyiidae)." Biocontrol Science and Technology **21**(9): 1117-1132.
- Nottingham, S. F. and T. H. Coaker (1985). "The olfactory response of cabbage root fly *Delia radicum* to the host plant volatile allylisothiocyanate." Entomol. exp. appl. **39**(3): 307-316.
- Nottingham, S. F. and T. H. Coaker (1987). "Changes in flight track angles of cabbage root fly, *Delia radicum*, in diffuse clouds and discrete plumes of the host-plant volatile allylisothiocyanate. ." Entomologia Experimentalis Et Applicata **43**: 275-278.
- Pats, P. and R. S. Vernon (1999). "Fences excluding cabbage maggot flies and tiger flies (Diptera : Anthomyiidae) from large plantings of radish." Environmental Entomology **28**(6): 1124-1129.
- Phelps, K., R. H. Collier, et al. (1993). "Monte-Carlo simulation method for forecasting the timing of pest insect attacks." Crop Protection **12**(5): 335-342.
- Pierre, P. S., S. Dugravot, et al. (2012). "Broccoli and turnip plants display contrasting responses to belowground induction by *Delia radicum* infestation and phytohormone applications." Phytochemistry **73**: 42-50.
- Prokopy, R. J., R. H. Collier, et al. (1983). "Visual detection of host plants by cabbage root flies." Entomologia Experimentalis et Applicata **34**(1): 85-89.
- Read, D. C. (1958). "Factors influencing infestation and injury of rutabagas by root maggots (Diptera : Anthomyiidae) in Prince Edwards Island. I. Field studies." Canadian Journal of Plant Science **38**: 188-198.
- Riley, K. J., U. Kuhlmann, et al. (2007). "Can mustard seed meal increase attacks by *Aleochara* spp. on *Delia radicum* in oilseed rape?" Biocontrol Science and Technology **17**(3): 273-284.
- Roessingh, P., E. Städler, et al. (1997). "Tarsal chemoreceptors and oviposition behaviour of the cabbage root fly (*Delia radicum*) sensitive to fractions and new compounds of host-leaf surface extracts." Physiological Entomology **22**(2): 140-148.
- Roessingh, P., E. Städler, et al. (1992). "Oviposition and tarsal chemoreceptors of the cabbage root fly are stimulated by glucosinolates and host-plant extracts." Entomologia Experimentalis et Applicata **65**(3): 267-282.
- Rousse, P., S. Fournet, et al. (2003). "Trap cropping to control *Delia radicum* populations in cruciferous crops: first results and future applications." Entomologia Experimentalis Et Applicata **109**(2): 133-138.

- Royer, L., G. Belair, et al. (1996). "Attractiveness of cabbage maggot (Diptera: Anthomyiidae) to entomopathogenic steinernematid nematodes." Journal of Economic Entomology **89**(3): 614-620.
- Smith, K. M. (1927). "A study of *Hylemyia (Chortophila) brassicae* Bouché, the cabbage root fly and its parasites with notes on some other dipterous pests of cruciferous plants." Ann. Appl. Biol. **14** 312-329.
- Sundby, R. A. and G. Taksdal (1969). "Surveys of parasites of *Hylemyia brassicae* (Bouché), and *H. floralis* (Fallén) (Diptera : Muscidae) in Norway." Norsk. ent. Tidsskr. **16**: 97-106.
- Swales, G. E. (1961). "Laboratory studies on mating and oviposition of *Hylemyia brassicae* (Bouché) (Diptera : Anthomyiidae)." Can. Entomol. **93**(11): 940-944.
- Theunissen, J., C. J. H. Booij, et al. (1995). "Effects of intercropping white cabbage with clovers on pest infestation and yield." Entomologia Experimentalis et Applicata **74**(1): 7-16.
- Traynier, R. M. M. (1967a). "Effect of host plant odour on the behaviour of the adult cabbage root fly, *Erioischia brassicae*." Entomologia Experimentalis et Applicata **10**: 321-328.
- Traynier, R. M. M. (1967b). "Stimulation of oviposition by the cabbage root fly *Erioischia brassicae*." Entomol. exp. appl. **10**: 401-412.
- Tukahirwa, E. M. and T. H. Coaker (1982). "Effect of mixed cropping on some insect pests of brassicas - reduced *Brevicoryne brassicae* infestations and influences on epigeal predators and the disturbance of oviposition behavior in *Delia brassicae*." Entomologia Experimentalis et Applicata **32**(2): 129-140.
- Turnock, W. J., T. H. Jones, et al. (1985). "Effects of cold stress during diapause on the survival and development of *Delia radicum* (Diptera : Anthomyiidae) in England." Oecologia **67**(4): 506-510.
- Vanninen, I., H. Hokkanen, et al. (1999). "Attempts to control cabbage root flies *Delia radicum* L., and *Delia floralis* (Fall.) (Dipt., Anthomyiidae) with entomopathogenic fungi: laboratory and greenhouse tests." Journal of Applied Entomology-Zeitschrift Fur Angewandte Entomologie **123**(2): 107-113.
- Vernon, R. S. and J. R. Mackenzie (1998). "The effect of exclusion fences on the colonization of rutabagas by cabbage flies (Diptera : Anthomyiidae)." The Canadian Entomologist **130**(2): 153-162.
- Vernon, R. S. and J. R. Mackenzie (1998). "The effect of exclusion fences on the colonization of rutabagas cabbage flies (*Diptera : Anthomyiidae*)." Canadian Entomologist **130**(2): 153-162.
- Walgenbach, J. F., C. J. Eckenrode, et al. (1993). "Emergence patterns of *Delia radicum* (Diptera, Anthomyiidae) populations from North Carolina and New York " Environmental Entomology **22**(3): 559-566.
- Wallbank, B. E. and G. A. Wheatley (1979). "Some responses of cabbage root fly *Delia brassicae* to allyl isothiocyanate and other volatile constituents of crucifers." Annals of Applied Biology **91**: 1-12.
- Wishart, G. (1957). "Surveys of parasites of *Hylemyia spp* (Diptera : Anthomyiidae) that attack cruciferous crops in Canada." The Canadian Entomologist **89**: 450-554.
- Wishart, G., E. H. Cohloun, et al. (1957). "Parasites of *Hylemyia spp.* (Diptera: Anthomyiidae) that attack cruciferous crops in Europe." The Canadian Entomologist **89**: 510-517.
- Wyman, J. A., J. L. Libby, et al. (1977). "Cabbage maggot management aided by predictions of adult emergence." Journal of Economic Entomology **70**(3): 327-331.
- Yamamura, K. (1999). "Relation between plant density and arthropod density in cabbage fields." Researches on Population Ecology **41**(2): 177-182.

7- Etat des connaissances sur la mouche de la carotte *Psila rosae* (F.)

a- Culture de carottes

Les semis de carottes au champ en Basse-Normandie s'effectuent généralement en avril, mai ou juin selon les zones de production : en avril-mai dans certaines zones de Créances ou dans la zone du Mont St Michel, de fin mai à mi-juin dans d'autres zones de Créances ou du Val de Saire (Figure II-7-1).

La récolte se déroule de fin août à fin avril, toutes variétés confondues. On remarque donc que les carottes sont présentes dans la zone de production pendant presque toute l'année.

La rotation culturale varie selon les régions. Sur la côte ouest, la culture de carottes s'effectue avec une succession habituelle de 2 cultures de carottes, suivies d'une culture de poireaux. Dans le Val de Saire, la rotation courante est une culture de carottes (ou d'autres Apiacées) tous les 4 ou 5 ans (en alternance avec des céréales, des choux ou des poireaux). Dans la zone du Mont St Michel, la rotation est une culture de carottes tous les 4 ans ou plus.

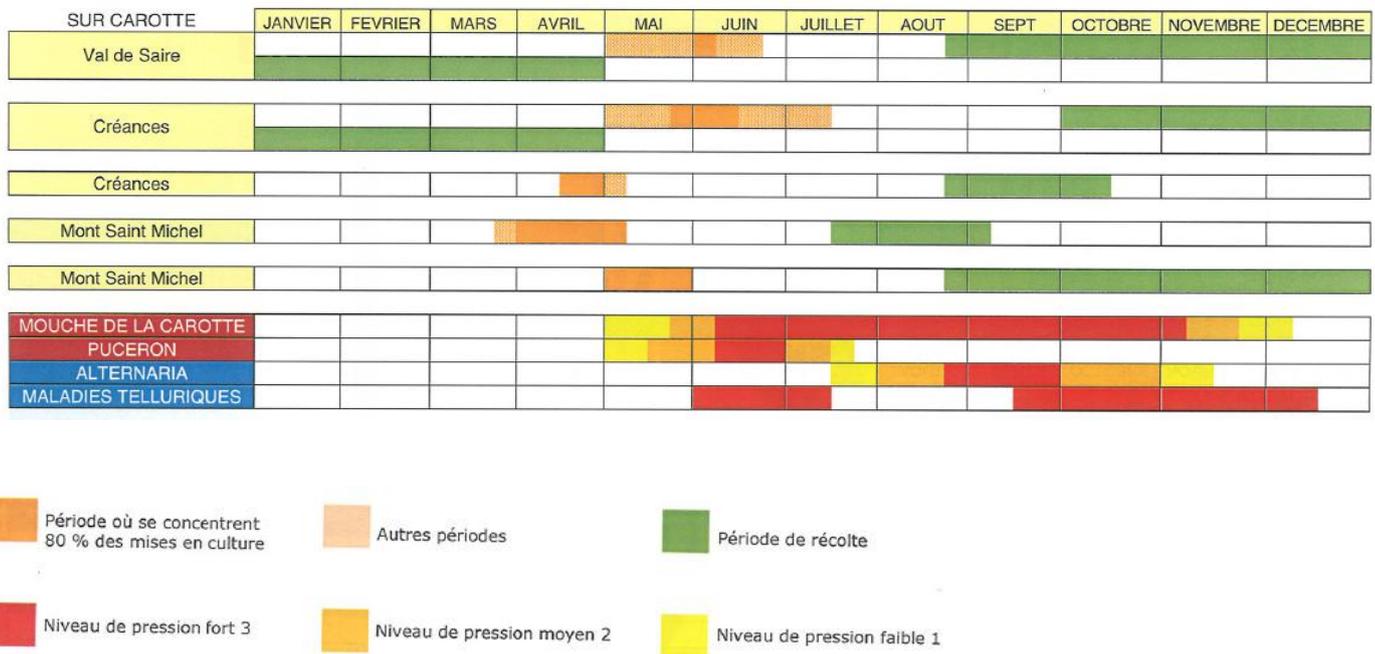


Figure II-7-1 : Phases de culture de carotte et risques phytosanitaires en Basse-Normandie (rapport SILEBAN- CDAM : Réduire l'usage des pesticides dans les exploitations légumières, 2012).

b- Traits de vie de la mouche de la carotte

La mouche de la carotte *Psila rosae* (F.) est un insecte Diptère de la famille des Psilidae.

C'est un ravageur important d'Apiacées (Ombellifères) cultivées et sauvages (Hardman, Ellis et al. 1990) : carotte, céleri, panais, cerfeuil, fenouil, aneth, cigüe, berce, ache etc. Ce sont les larves qui sont responsables des dégâts lorsqu'elles s'alimentent des racines. Sur les semis de carotte, les jeunes larves attaquent d'abord les racines latérales ou l'extrémité de la racine principale, et quand la racine atteint un diamètre suffisant, les galeries passent de la racine principale à la région hypocotylaire et parfois à la base des cotylédons (Petherbridge 1943). D'autres auteurs font les mêmes observations : les larves jeunes (de 1^{er} stade) attaquent d'abord les radicelles (points de rouille visibles à l'extrémité de la racine) puis ce sont les larves âgées (larves de 2^{ème} et 3^{ème} stade) qui sont responsables de dégâts dans la racine principale (Wheatley and Freeman 1982; Villeneuve, Letouze et al. 2007). Les galeries creusées par les larves rendent les carottes impropres à la vente.

P. rosae est une espèce qui présente environ **3 vols d'adultes par an** dans l'Ouest de la France : un 1^{er} vol au printemps (de fin avril à début juillet), un 2^{ème} (adultes issus de la 1^{ère} génération) en juillet-août et un 3^{ème} vol d'adultes (issus de la 2^{ème} génération) à partir de septembre et pendant l'automne (Brunel and Cancela Da Fonseca 1977). Les vols et l'intensité des attaques sont très variables selon les années et les lieux (Kettunen, Havukkala et al. 1988). Certains auteurs ont remarqué des pullulations tous les 5 à 7 ans (Brunel and Cancela Da Fonseca 1977).

Les adultes volent quand le vent est faible ou nul et si les températures se situent entre 12 et 18°C ; les vols n'ont pas lieu en dessous de 7°C ou au-dessus de 25°C (Finch, Freuler et al. 1999).

En Bretagne, il faut 910 degrés-jours (températures prises à 2 mètres sous abri météo) pour obtenir 50% des sorties d'adultes de la 1^{ère} génération (1^{er} vol) (Villeneuve and Leteinturier 1994).

Actuellement dans l'ouest de la France, le suivi des populations s'effectue par comptage d'adultes piégés chaque semaine sur des plaques jaunes engluées disposées dans les champs. La figure II-7-2 montre les résultats de ce piégeage en 2012 (courbe rouge) et de 2000 à 2011 (courbe bleue) [Bulletin de Santé du Végétal n° 15 du 22 août 2012, à l'adresse http://draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV_Legumes_industries_2012_No15_-_version_2_cle8daf31.pdf).

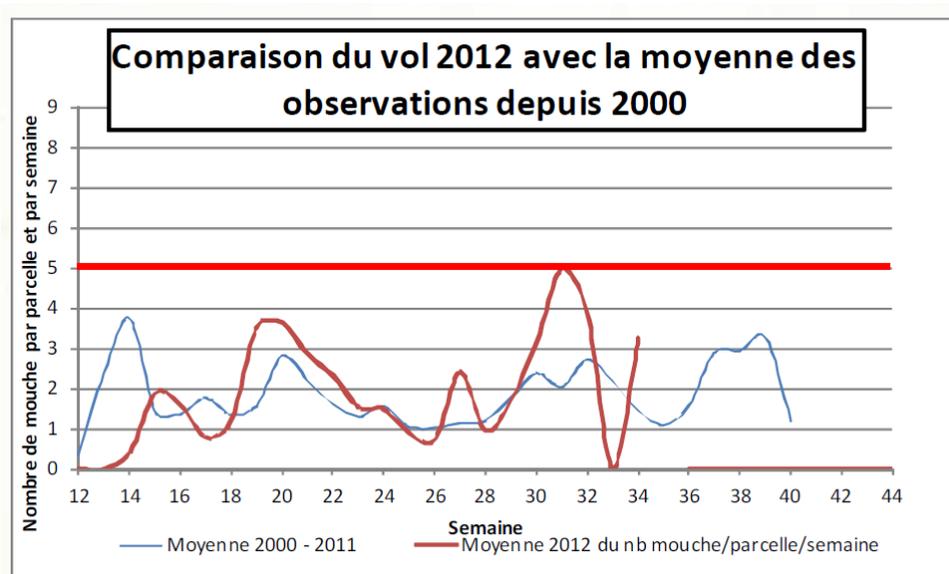
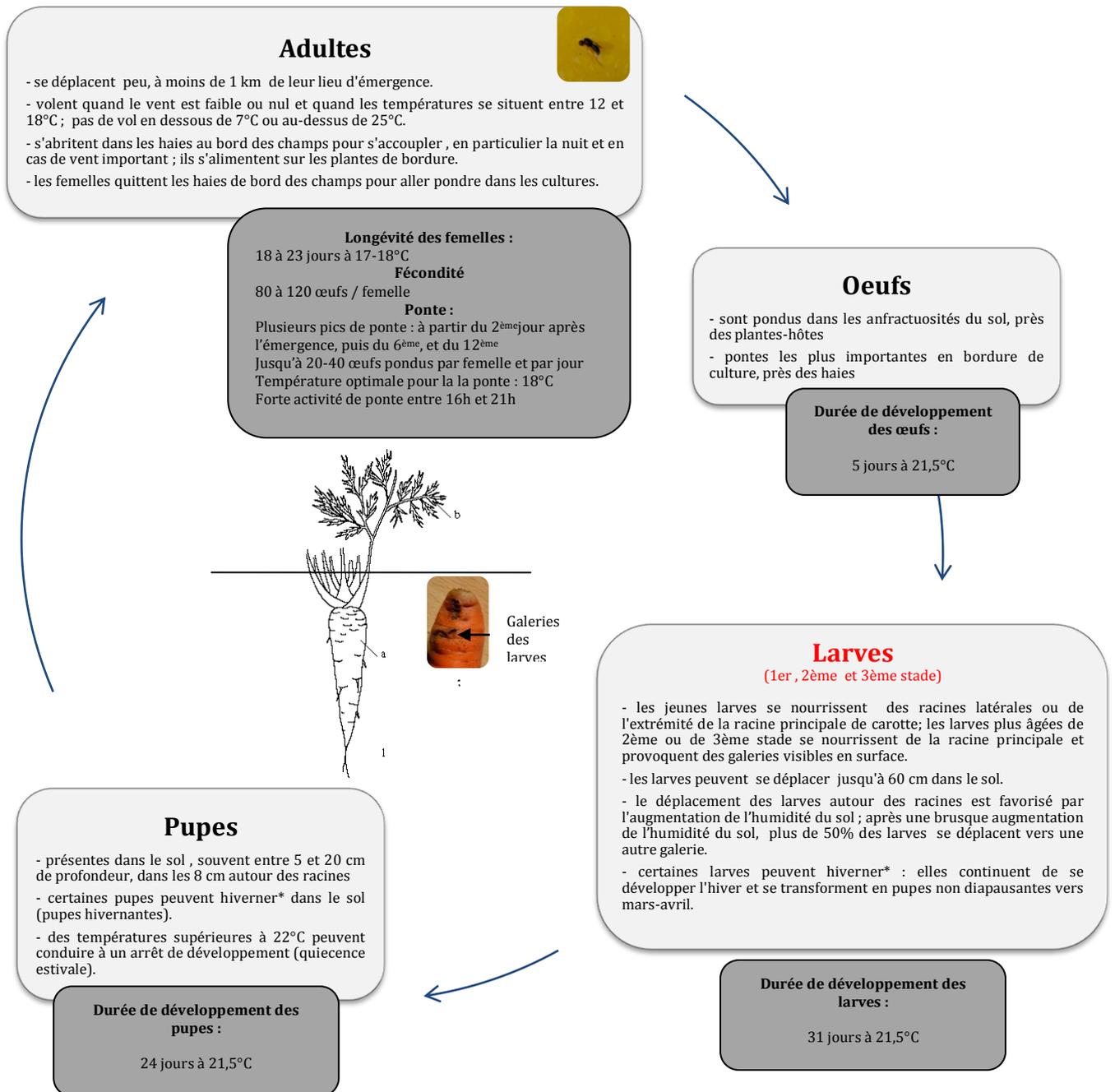


Figure II-7-2: Evolution du nombre moyen d'adultes de mouche de la carotte piégés par semaine et par parcelle, en Bretagne en 2012 (courbe rouge) et de 2000 à 2011 (courbe bleue).

Le cycle de développement de la mouche de la carotte présente plusieurs stades présentés sur la figure II-7-3.



Capacité à passer l'hiver* : à l'automne, certaines larves (20 à 55%) se transforment en pupes diapausantes qui passent alors l'hiver dans le sol (Collier, Elliott et al. 1994); d'autres larves continuent de se développer l'hiver et se transforment en pupes non diapausantes vers mars-avril (Collier, Elliott et al. 1994; Collier and Finch 1996).

Figure II-7-3 : Cycle de développement de *Psila rosae* sur culture de carottes

[Schéma réalisé d'après les articles cités dans le texte; dessin réalisé d'après le site <http://www.inra.fr/hyppz/CULTURES/3c---026.htm> : Carotte de 1ère année - a; racine orange, pivotante et charnue; b: feuilles composées découpées, disposées en rosette).

La mouche de la carotte est une espèce capable de réaliser une **diapause l'hiver**. En automne, certaines larves (20 à 55%) se transforment en pupes diapausantes qui passent alors l'hiver dans le sol (Collier, Elliott et al. 1994) ; d'autres larves continuent de se développer l'hiver en se nourrissant des racines de carottes et se transforment en pupes non diapausantes vers mars-avril (Collier, Elliott et al. 1994; Collier and Finch 1996). La diapause hivernale est induite avant le stade pupes, à la fin de l'été ou en automne, avec la baisse de la longueur du jour et de la baisse des températures en dessous de 15°C (McLeod, Whistlecraft et al. 1985; Villeneuve and Leteinturier 1992b); (Villeneuve and Leteinturier 1992b) ou si les pupes se sont formées à des températures de 10-16°C (Burn and Coaker 1981).

En **été**, l'espèce peut être soumise à une **quiescence** des pupes lorsque les températures sont supérieures à 22-24°C (Villeneuve and Leteinturier 1992b; Collier and Finch 1996).

Comportement des femelles en relation avec la recherche de la plante-hôte et la ponte

Les femelles localisent les plantes-hôtes grâce à des **signaux visuels** [(forme découpée des feuilles, la couleur (verte, jaune ou orange) (Degen and Stadler 1996; Degen and Stadler 1997)] et grâce à **différentes odeurs de feuilles** : des études par électroantennographie montrent que les femelles sont sensibles aux odeurs « vertes » (1-hexanol, trans-2-hexen-1-ol and cis-3-hexen-1-ol, leurs isomères cis-2-hexen-1-ol et trans-3-hexen-1-ol, l'alcool 1-heptanol, l'ester cis-3-hexenyl acetate et les aldéhydes de feuilles hexanal, heptanal et trans-2-hexenal) et des odeurs de spécifiques d'Apiacées (trans-methyl-iso-eugenol, β -caryophyllene, linalool et trans-2-nonenal) mais aussi grâce à des odeurs de propenylbenzène (trans-asarone) (Guerin and Visser 1980; Guerin, Stadler et al. 1983).

Des **substances de contact sur la cire des feuilles** de carottes stimulent la ponte (des propenylbenzènes, des coumarines et un polyacéthylène) (Städler and Buser 1984). L'odeur des racines serait également attractive ou favoriserait la ponte (Maki and Ryan 1989).

Avant la ponte, les femelles explorent la plante en effectuant des trajets circulaires autour de la base de la tige (pétiole) et en exécutant des mouvements verticaux avec leur l'abdomen et des extensions de leur ovipositeur (Degen, Stadler et al. 1999a).

Caractéristiques de la ponte

Les femelles possèdent des œufs (ovocytes) en formation dans des ovarioles. Le développement des œufs est optimal si l'alimentation est riche en glucides et protéines et si la température avoisine 17-18°C (Brunel 1979). L'accouplement est nécessaire pour déclencher la ponte (Brunel 1979). La ponte s'effectue en plusieurs fois (dès le 2^e jour après l'émergence, le 6^e jour et le 12^e jour) et la fécondité peut atteindre au total de 80 à 120 œufs pondus (Brunel 1979). Les femelles déposent entre 20 et 40 œufs par ponte (Collier and Finch 1996). Les œufs sont déposés dans les anfractuosités du sol, près des plantes-hôtes (Smith 1922; Eilenberg 1987) ou exceptionnellement au niveau des pétioles des feuilles de carottes. La température optimale de ponte est de 18°C (Brunel 1979).

L'activité de ponte est plus importante de 16h à 21h (Degen, Stadler et al. 1999a). La ponte des femelles de 2^eme génération, est plus importante sur les carottes saines que sur carottes déjà infestées par des larves de la 1^{ère} génération (Vincent and Finch 1999).

La carotte est la culture la plus attractive pour le 1^{er} vol, la moins attractive pour le 3^{ème} vol (au profit du panais) (Brunel 1971). Le nombre d'œufs déposés augmente avec la taille du feuillage mais il semble que les plantes soient plus attractives quand les feuilles ne sont pas trop grandes (entre 5 et 20 cm de hauteur) et ne couvrent pas entièrement le sol (Brunel 1971; Hardman, Ellis et al. 1990). Les carottes jeunes, avant le stade 2 feuilles vraies, ne sont pas acceptées comme site de ponte (Philipsen and Eilenberg 1988). Par contre, les pontes sont plus importantes aux bords des parcelles (Wright and Ashby 1946a).

Alimentation des adultes

Les adultes se nourrissent au bord des parcelles, probablement sur les plantes et les arbres.

Longévité

La longévité moyenne d'un adulte en été ou en automne (mesurée sur le terrain, dans cages évitant la prédation par les oiseaux) est de 17 jours (Villeneuve and Leteinturier 1992b). La longévité des femelles varie entre 18 et 23 jours (Brunel 1979). La longévité des femelles diminue avec la température (elle est de 44 jours \pm 13 à 11,5°C, 11 jours \pm 4 à 24°C), celle des mâles également (28 jours \pm 11 à 11,5°C, 9 jours \pm 5 à 24°C) (Collier and Finch 1996).

Dispersion des adultes

Les adultes se déplacent généralement à moins de 1 km de leur lieu d'émergence, ils parcourent environ 100 m par jour (Finch and Collier 2004). Ils volent quand le vent est faible ou nul et quand les températures se situent entre 12 et 18°C ; les vols s'arrêtent en dessous de 7°C ou au-dessus de 25°C (Finch, Freuler et al. 1999).

Haies et bordures

Les adultes s'abritent dans les haies d'arbres au bord des champs, en particulier la nuit et en cas de vent important ; on peut les retrouver à 6-10 m de hauteur dans les arbres (Baker, Ketteringham et al. 1942; Collier and Finch 2009). Ils s'y regroupent pour s'accoupler et s'alimenter. Les femelles quittent ensuite les haies de bord des champs pour aller pondre dans les cultures (Collier and Finch 2009).

Un grand nombre d'adultes peuvent être observés en mai-juin dans les aulnes, saules, chênes, aubépines, pommiers, pruniers et cerisiers ou sur des plantes telles que la grande cigüe et le cerfeuil sauvage (Brunel 1977). Lors de période de vol, en Pologne, on capture d'un grand nombre d'adultes sur différentes plantes refuges : la carotte sauvage (*Daucus carota*), le pissenlit (*Taraxacum officinale*), la grande chélideine (*Chelidonium majus*), le lamier blanc (*Lamium album*), l'ortie rouge (*Lamium purpureum*), l'ortie dioïque (*Urtica dioica*), la cigüe tachée (*Conium maculatum*) (Legutowska and Plaskota 1986).

Durée des différents stades à différentes températures

Les durées de développement mesurées au laboratoire varient selon les températures (Collier and Finch 1996), comme l'indique le tableau II-7-1 ci-dessous.

Tableau II-7-1- Durée des différentes phases de développement de *Psila rosae* au laboratoire, en fonction des températures (d'après (Collier and Finch 1996))

| Température | 21,5°C | 24°C | 9°C |
|-------------------------------------|-------------------|------|-------|
| Durée des différentes phases | | | |
| Délai avant la ponte | - (non renseigné) | 4 j | 28 j |
| Incubation des œufs | 5 j | - | 25 j |
| Développement des larves | 31 j | - | 145 j |
| Développement des pupes | 24 j | - | 84 j |
| Développement total (œufs – adulte) | 60 j | - | 254 j |

D'autres auteurs signalent une durée d'incubation de 5 à 15 jours selon la température (Villeneuve and Leteinturier 1992b); des durées de développement à 20°C de 8,2 jours pour la larve de 1^{er} stade, 12,1 jours pour la larve de 2^{ème} stade et de 19,3 jours pour la larve de 3^{ème} stade [Städler 1971 in (Villeneuve, Letouze et al. 2007)] ; une durée de développement des pupes de 25 jours à 18-20°C (Villeneuve and Leteinturier 1992b) ; au champ en Angleterre, une durée de développement total (de l'œuf à adulte) entre mi-mai et début septembre, de 84 à 100 jours (Collier and Finch 1996).

En Angleterre, les températures seuil de développement de *P. rosae* ont été estimées : il n'y a pas de développement des œufs en dessous de 4,1- 6°C, des larves en dessous de 2°C, des pupes en dessous de 1,5-5°C (Collier and Finch 1996). La température seuil de développement des pupes est de 5,5°C selon un autre auteur [(Coppock 1974) in (Brunel and Cancela Da Fonseca 1977)].

Comportement et incidence des larves

Les larves ont une grande capacité à trouver les racines de plantes-hôtes : les larves peuvent se déplacer jusqu'à 60 cm le long et entre les rangs de carottes. Le déplacement des larves autour des racines est favorisé par l'augmentation de l'humidité du sol ; après une brusque augmentation de l'humidité du sol, plus de 50% des larves se déplacent vers une autre galerie (Jones and Coaker 1980). Les larves de 1ère génération se déplacent plus que les larves de 2ème génération.

Tous les stades larvaires sont attirés par les odeurs de CO₂ et par les odeurs de racines de carotte ou par l'eugénol de méthyle, à certaines concentrations (Jones and Coaker 1977). D'autres composés volatiles issus des racines de carottes sont également attractifs : le bomyl acetate, le 2,4-dimethyl styrene, l'α-ionone, le SbT-ionone et le biphenyl (Ryan and Guerin 1982). Les jeunes larves s'attaquent aux racines latérales puis les larves âgées creusent des galeries dans la racine principale (Wheatley and Freeman 1982; Villeneuve, Letouze et al. 2007). A la fin de leur développement, les larves sortent des racines et se transforment en pupes. Les pupes sont situées autour des racines, dans les 8 cm autour de la racine, jusqu'à environ 5 cm de profondeur dans le sol (Petherbridge 1943) mais pouvant s'enfoncer jusqu'à 20 cm de profondeur (Villeneuve and Leteinturier 1992b; Villeneuve, Letouze et al. 2007).

Conclusion :

La mouche de la carotte *Psila rosae* est un **insecte Diptère** responsable de dégâts importants en culture d'Apiacées (Ombellifères) (les larves s'alimentent des racines et causent le dépérissement des plantes jeunes ou creusent des galeries qui peuvent rendre les légumes invendables). C'est une espèce spécialiste des **Apiacées** cultivées (carottes, céleri, panais, persil...) mais aussi sauvages (carotte sauvage, cigüe, berce, ache...). Elle présente environ **3 générations par an**. Chaque génération présente plusieurs stades de développement successifs : les femelles **adultes** accouplées pondent des **œufs** au pied des plantes ; ces œufs donnent des **larves** (3 stades larvaires) qui se nourrissent des racines puis qui se transforment en **pupes** dans le sol. Des pupes émergent de nouveaux adultes de la génération suivante. Certaines pupes peuvent subir une **diapause en hiver** (provoquée par une baisse des températures et une diminution de la photopériode). En été, les pupes peuvent ralentir leur développement (on parle de **quiescence estivale**) quand les températures sont supérieures à 22-24°C.

Les femelles localisent les plantes-hôtes grâce à des **signaux visuels** (forme découpée et couleur des feuilles, couleur) et grâce à différentes **odeurs de feuilles**. Ce sont des **substances de contact sur les feuilles** et des **odeurs de racines** qui stimulent les femelles à pondre leurs œufs à proximité des plantes dans les anfractuosités du sol.

Les femelles pondent à partir du 2^{ème} jour après leur émergence et au total **entre 80 et 120 œufs au cours de leur vie**. La température optimale de ponte est de 18°C. La ponte s'effectue l'après midi entre 16h et 21h. Les plantes semblent plus attractives quand les feuilles ne sont pas trop grandes (entre 5 et 20 cm de hauteur) et ne couvrent pas entièrement le sol. Les carottes jeunes, avant le stade 2 feuilles vraies, ne sont pas acceptées comme site de ponte.

Les femelles ont une longévité moyenne de **17 à 23 jours**.

Les femelles pondent davantage en bord de parcelle, en particulier à proximité des haies. Les adultes se regroupent dans les haies et les bordures de parcelles pour s'alimenter et s'accoupler, en particulier la nuit et en cas de vent important. Ils peuvent s'y trouver jusqu'à 6-10 mètres de hauteur.

Les adultes se déplacent généralement à **moins de 1 km de leur lieu d'émergence**. Ils volent quand le vent est faible ou nul et quand les températures se situent entre 12 et 18°C ; les vols s'arrêtent en dessous de 7°C ou au-dessus de 25°C.

Les différents stades ont des durées de développement variables selon les conditions de température et d'humidité. A 21,5°C, les œufs éclosent au bout de 5 jours, le développement des larves dure 31 jours, celui des pupes 24 jours avant l'émergence des adultes. La température seuil de développement varie de 2°C à 6°C selon les stades considérés.

Les larves sont capables de se déplacer sur 60 cm pour atteindre les racines de plantes-hôtes ; elles sont également capables de quitter leur galerie et d'en coloniser une autre si l'humidité du sol est importante. Les larves sont attirées par le CO₂ et les odeurs de racines de carotte.

c- Ennemis naturels connus de la mouche de la carotte

Les mouches peuvent être infestées par des champignons entomopathogènes du groupe des entomophtorales (Eilenberg and Philipsen 1988).

Il n'existe pas de préparation de *Bacillus thuringiensis* efficace contre les insectes se nourrissant de racines (Finch 1993), ni de nématodes efficaces contre *P. rosae* (Finch and Collier 2000).

Plusieurs espèces de coléoptères prédateurs Carabidae (dont *Trechus quadristriatus*, *Pterostichus melanarius*) et de staphylins (*Aleochara bipustulata*) sont présentes en culture conventionnelle et biologique de carottes en région Wallonne. Les carabes sont plus abondants en culture conventionnelle, les staphylins plus abondants en culture biologique (Albert, Hastir et al. 2003).

Plusieurs espèces d'insectes parasitoïdes sont mentionnées dans la littérature : *Dacnusa* (= *Chorebus*) *gracilis* (Braconidae), *Loxotropa* (= *Basalys*) *tritoma* (Proctotrupeoidea) sont des parasites des larves de la mouche de la carotte tandis qu'*Aleochara sparsa* (Staphylinidae) et *Kleidotoma psiloides* (Eucoilinae) parasite les pupes (Hardman and Ellis 1982).

Conclusion :

Les ennemis naturels de la mouche de la carotte *Psila rosae* sont des champignons entomopathogènes, des insectes coléoptères prédateurs et des parasitoïdes (petits Hyménoptères capables de pondre dans les larves ou les pupes de *P. rosae*). Ils sont cités dans la littérature mais on connaît mal leur impact réel au champ.

La façon dont la mouche de la carotte utilise les éléments du paysage agricole pour effectuer son cycle de développement est résumé sur la figure II-7-4 ; cette figure rend compte des incertitudes (mentionnées par des points d'interrogation) concernant certains phénomènes.

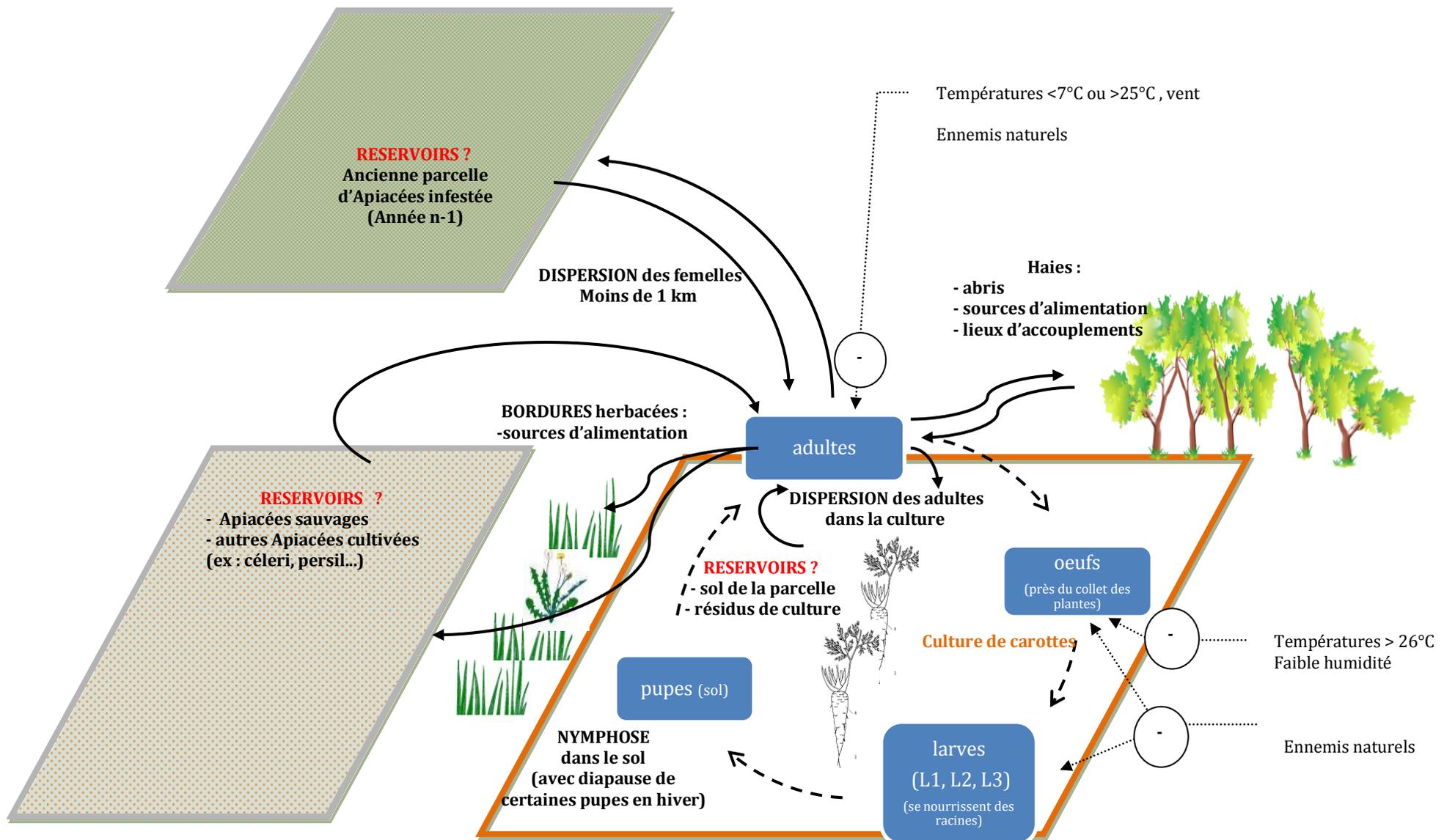


Figure II-7-4 : Déterminants des attaques de *Psila rosae* en culture de carottes, au sein du paysage agricole

(+ effet positif, - effet négatif ; - - - > développement des stades de l'insecte ; → déplacement des individus adultes ; chaque point d'interrogation signifie l'incertitude de cette donnée)

De nombreux facteurs favorisent ou défavorisent le développement ou la survie des mouches de la carotte. Les principaux facteurs mentionnés dans la littérature et les effets connus ou supposés des modes de gestion pratiqués, sont développés ci-dessous et sont résumés dans le tableau II-7-2.

Facteurs abiotiques

Certains auteurs montrent une mortalité importante des œufs et surtout des jeunes larves (L1) lors de fortes températures ($> 26\text{ °C}$) et en cas de sécheresse (Vincent and Finch 1999; Degen, Stadler et al. 1999b). Les larves plus âgées résistent mieux (Vincent and Finch 1999).

Le déplacement des larves est réduit si les températures sont inférieures à 15 °C (Jones and Coaker 1980). On constate un ralentissement du développement des pupes quand les températures dépassent 24 °C (Collier and Finch 1996). Le vol des adultes s'arrête en dessous de 7 °C et au dessus de 25 °C (Finch, Freuler et al. 1999).

Précédent cultural

Des expériences au champ ont montré que les dégâts sont réduits en effectuant une rotation des cultures de carottes tous les ans (Dabrowski and Legutowska 1976; Kettunen, Havukkala et al. 1988; Collier and Finch 2009).

Choix de la parcelle (environnement) : l'importance des bordures et des parcelles

Il est important d'espacer les cultures de carottes d'au moins 1 km par rapport à une culture l'année précédente (Legutowska and Plaskota 1986; Sunley 2009). En effet, peu de mouches se déplacent à plus de 1 km d'une culture infestée (Finch and Collier 2004; Collier and Finch 2009).

On peut souligner le fait que des grandes parcelles ouvertes sont moins attaquées que des parcelles entourées de haies (Wright and Ashby 1946a; Legutowska and Plaskota 1986). De même, il est recommandé d'éviter le développement de plantes-hôtes sauvages près des parcelles cultivées car les espèces sauvages de Petite ciguë, Chérophylle, Torilis, Grande ciguë, sont des réservoirs potentiels de mouches (Hardman and Ellis 1982). En effet, les mouches adultes se réfugient dans les haies et certaines plantes de bordure pour s'alimenter et s'accoupler.

Sol (type, texture, travail du sol)

Une étude indique que les sols tourbeux-limoneux sont les moins attaqués, et que les sols de loess (limoneux) sont plus attaqués (Legutowska and Plaskota 1986). Une autre montre que les dégâts observés sont les mêmes sur carottes au champ en sol tourbeux et en sol minéral (Maki and Ryan 1989).

Restes de culture

Il est conseillé de ne pas laisser les carottes en place en automne, afin de ne pas favoriser la ponte des femelles ; il vaut mieux les enfouir profondément (Villeneuve and Leteinturier 1992b; Villeneuve, Bosc et al. 2004). D'autres auteurs suggèrent de récolter toutes les carottes en automne pour limiter l'impact des mouches l'année suivante (Petherbridge 1943; Ester and van Rozen 2009). De plus, il est important d'arracher tôt les carottes infestées, dès l'apparition des 1ers symptômes, pour diminuer les dégâts lors d'un 2ème vol (Collier and Finch 2009).

Apports (fertilisation)

Certains auteurs indiquent que l'emploi de fumier au printemps est à éviter car les adultes de *P. rosae* seraient attirés par les odeurs de fumier (Legutowska and Plaskota 1986).

Une étude indique que des cendres répandues autour des plants diminuent la ponte de la mouche de la carotte (Kettunen, Havukkala et al. 1988).

Effets de la densité de plants

A notre connaissance, aucune étude n'a traité de l'effet de la densité de plantation sur les dégâts de la mouche de la carotte.

Irrigation

Aucune étude sur l'effet de l'irrigation sur les dégâts de la mouche de la carotte n'a été publiée. Cependant, comme il a été souligné plus haut, les œufs et les jeunes larves subissent une forte mortalité en cas de sécheresse (Vincent and Finch 1999; Degen, Stadler et al. 1999b). De plus, les larves présentent une forte capacité à se déplacer autour des carottes ou d'une carotte à une autre, jusqu'à 60 cm quand l'humidité du sol augmente fortement. Par conséquent, l'irrigation doit être limitée.

Cultures intercalaires

Intercaler des cultures d'oignons avec des carottes n'est pas efficace selon une étude (Kettunen, Havukkala et al. 1988). Cependant, une autre étude montre que cette culture intercalaire oignons / carottes peut réduire les dégâts par la mouche mais seulement quand les oignons sont jeunes et en pleine croissance (Uvah and Coaker 1984). Une étude récente montre également que les cultures intercalaires d'oignons peuvent diminuer les dégâts sur les carottes tout en préservant un bon rendement (Wierzbicka and Majkowska-Gadomska 2012).

Des parcelles de cultures intercalaires luzerne /carottes présentent moins de dégâts sur carottes que des monocultures de carottes dans 2 essais sur 4, selon le degré d'attaques par la mouche (Ramert and Ekbohm 1996). Dans cet essai, le nombre de mouches adultes capturées est plus faible mais les prédateurs ne sont pas plus abondants. En serre, les cultures intercalaires luzerne/carottes reçoivent moins d'œufs que des monocultures de carottes. Les auteurs de ces études émettent l'idée d'intercaler des cultures de luzerne avec carottes au milieu de la parcelle, et de garder sur les bords des champs seulement des carottes (servant comme « fosse » ou comme culture piège), qui seraient récoltées rapidement (Ramert and Ekbohm 1996).

Couverts : paillis (ou mulchs)

Il ne semble pas y avoir eu d'études traitant de l'effet des paillis sur la mouche de la carotte.

Filets couvrants

L'utilisation de filets tissés (mailles de fibres de polyéthylène) dès le début des pontes est un bon moyen de limiter les dégâts par la mouche de la carotte (Collier and Finch 2009).

Filets verticaux

Les filets verticaux ne se sont pas toujours avérés efficaces dans plusieurs études, sans doute parce que les mouches peuvent voler assez haut, au dessus d'1,7 mètres ; elles se regroupent dans les haies d'arbres autour des champs et sont capturées en grand nombre dans des pièges collants placés à 6-10 m de hauteur, près des arbres (Coaker and Hartley 1988; Collier and Finch 2009).

Modification des dates de cultures

Il est conseillé de semer tardivement pour éviter le 1er vol et de récolter tôt pour éviter le 2ème vol (Legutowska and Plaskota 1986; Ellis, Hardman et al. 1987) mais les rendements sont faibles car les carottes ne sont pas cultivées suffisamment longtemps (Finch 1993).

En effet, une étude aux Pays-Bas a montré que des champs semés avant le premier vol ont plus de mouches lors du second vol que les champs semés plus tardivement (Groot, Everaarts et al. 2009). Ainsi, il a été montré qu'en Angleterre, semer tardivement (mi juin ou mi-mai plutôt que fin mars) permet de limiter les dégâts liés au 2ème vol (Collier and Finch 2009)

Ne pas laisser les carottes en place à l'automne est également un moyen de limiter l'impact des mouches l'année suivante (Petherbridge 1943; Ester and van Rozen 2009).

Prévision des vols

La prévision des sorties des adultes et de l'apparition des formes jeunes (œufs, larves) de la mouche de la carotte s'effectue grâce à des **modèles dits « degrés-jours »** basés sur des températures cumulées et sur les taux de développement de chaque stade de l'insecte.

En Angleterre, un modèle a été développé à Wellesbourne ; les données météorologiques proviennent de 30 stations standard situées dans les grandes régions de culture. Les données à intégrer sont les températures locales maximales et minimales et la température du sol du champ. (Finch 1993). Ce modèle prévoit 10 à 50% des émergences et des pontes mais ne prévoit pas la sévérité des attaques (qui dépend de la taille de la population d'insectes présente localement) (Collier and Finch 2009). Une option du modèle tient compte de la date de semis (Collier and Finch 2009).

En Allemagne, le même genre de modèle de simulation a été développé et se nomme SWAT (Ester and van Rozen 2009). Dans l'ouest de la France, les vols sont prédits avec le modèle SWAT.

Surveillance des populations par piégeage

La surveillance des populations de *P. rosae* permet de déterminer les périodes à risques, au cours desquelles les dégâts sont visibles.

Dans l'Ouest de la France, elle s'effectue grâce au **comptage d'adultes piégés sur des plaques jaunes engluées** (3 plaques par parcelle) (figure II-7-5). Ce comptage a lieu une fois par semaine.

Cette surveillance, associée aux prévisions des vols, permet de cibler les périodes d'application des insecticides. En France, le seuil d'intervention est fixé à 5 adultes piégés par parcelle et par semaine.



Figure II-7-5 : Pièges jaunes englués dans une parcelle de céleri.

Insecticides

Il existe probablement des problèmes de résistance vis-à-vis des insecticides (Villeneuve, Maignien et al. 2010).

Actuellement, très peu de substances insecticides sont autorisées contre la mouche de la carotte : la téfluthrine est utilisable pour le traitement du sol, la lambda cyhalothrine pour le traitement des parties aériennes (d'après le site <http://e-phy.agriculture.gouv.fr/> consulté en août 2012).

Il est conseillé de réaliser des pulvérisations, de préférence par temps chaud, et entre 16h et 18h, au moment de la présence des femelles dans les parcelles (Collier and Finch 2009).

Substances répulsives, réduisant la ponte, l'alimentation ou le développement

A notre connaissance, aucun article scientifique ne fait état de recherche de produits répulsifs ou limitant le développement de la mouche de la carotte.

Résistance variétale

Plusieurs études ont recherché des phénomènes de résistances chez diverses variétés (Ellis and Hardman 1981; Ellis, Freeman et al. 1984; Kettunen, Havukkala et al. 1988; Maki and Ryan 1989; Ellis 1999). La variété de carottes de Nantes « Sytan » est souvent mentionnée comme résistante (Ellis and Hardman 1980; Ellis 1999). Une espèce de carotte sauvage *Daucus capillifolius* présente une résistance importante et des croisements ont été réalisés avec cette espèce pour produire des variétés partiellement résistantes à *P. rosae* (Finch 1993; Collier and Finch 2009). D'autres variétés seraient également intéressantes : « Fly away » et « Resistafly » au Royaume-Uni (Ellis 1999; Collier and Finch 2009) ou « Vertou » (Maki and Ryan 1989).

Tableau II-7-2 : Modes de gestion favorables ou défavorables au développement de *Psila rosae* et de ses ennemis naturels, d'après la littérature et perspectives en Basse-Normandie

| Pratique culturale ou mode de gestion | | Modalité | Effet connu ou supposé | Modes de gestion envisageables en Basse-Normandie mais effet à vérifier | Perspectives : questions posées |
|---------------------------------------|---|---|--|--|---|
| Précédent | Rotation | Durée et position par rapport au cycle de développement de l'insecte | les rotations annuelles sont défavorables au développement de <i>P. rosae</i> ; elles diminuent les dégâts (effet démontré) | choisir des parcelles avec un précédent sans Apiacée | Quelle est l'influence d'un précédent de type « céréales » ? d'une interculture ou d'un engrais vert ? |
| | Sol nu, jachère | | non connu | | |
| | Interculture ou engrais verts | | non connu | | |
| Choix de la parcelle | Taille de la parcelle | | non connu | | <p>Les haies sont favorables aux mouches de la carotte et accentue les dégâts aux bords des parcelles.</p> <p>Les bordures herbacées ont-elles un rôle dans le maintien ou le développement des populations ?</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Quelles espèces végétales sont sources de nourriture pour les femelles ? ➤ Existe-il des plantes-hôtes alternatives dans les bordures ? Si oui, peut-on concrètement envisager de les éliminer ou de les éviter ? ➤ Les haies peuvent-elles avoir un rôle important pour favoriser ou limiter le déplacement des adultes ? <p>Quelles sont les principales sources de mouches au printemps ? (autres parcelles, bordures ?)</p> |
| | Espacement de la parcelle par rapport à des parcelles proches de même culture | | les mouches adultes se déplacent mais à moins de 1 km d'une culture infestée | choisir des parcelles éloignées d'au moins 1 km des autres Apiacées cultivées, en particulier l'année précédente, et a fortiori si la parcelle est attaquée | |
| | Environnement de la parcelle | <p>Haies, bordures, bandes enherbées, zones boisées, rivière... (refuges ?)</p> <p>Pas de bordures, haies...</p> | <p>- haies et bordures fleuries = lieux d'accouplements, d'abris et d'alimentation</p> <p>- attaques plus importantes aux abords des haies</p> <p>- sol des parcelles cultivées : lieux d'hivernation des pupes</p> <p>- autres Apiacées environnantes : plantes-hôtes possibles</p> | <p>choisir des parcelles de grande taille et « ouvertes » sans haies</p> <p>choisir des parcelles éloignées d'autres Apiacées susceptibles de servir de plantes hôtes ou d'alimentation</p> <p>éliminer les éventuelles plantes-hôtes Apiacées</p> | |
| Sol | Type de sol | | - pas d'étude montrant nettement l'influence de la texture ou de la nature du sol sur les dégâts observés | | Est-ce que la nature ou la texture de certains sols peuvent être défavorables au développement de la mouche de la carotte ? |
| | Texture du sol | | | | |
| | Travail du sol | <p>Pas de labour</p> <p>Labour peu profond par rapport au cycle de développement de l'insecte - Binage buttage ...</p> <p>Labour profond par rapport au cycle de développement de l'insecte</p> | | - pas d'étude indiquant l'effet du travail du sol sur le développement de la mouche de la carotte | |

| | | | | | | |
|--|--|--------------------------------------|--|--|--|---|
| Culture de carottes | Variétés résistantes | | - certaines variétés de carottes seraient plus ou moins résistantes | utiliser des variétés résistantes, croisées avec la carotte sauvage <i>Daucus capillifolius</i> | Poursuivre les recherches sur les variétés résistantes : croisées avec <i>Daucus capillifolius</i> (carotte sauvage) par exemple ? | |
| | Date de semis/plantation | | - le semis ou la plantation tardive permettrait de limiter les dégâts liés au 2 ^{ème} vol (en limitant le développement des mouches du 1 ^{er} vol) | reculer au maximum la date de semis des carottes pour éviter le 1 ^{er} vol et donc les dégâts du 2 ^{ème} vol | Quelles pratiques de plantation seraient défavorables aux mouches de la carotte ? - A quelle date faut-il reculer la date de semis des carottes pour éviter le 1 ^{er} vol ? - Est-ce que la densité de carottes a un effet sur la ponte ? - Peut-on envisager de récolter précocement ? quand ? - la récolte de toutes les carottes peut-elle permettre de diminuer les populations ? (les mouches sont probablement capables de se développer sur les carottes laissées en place en automne) | |
| | Densité de plantation | | non connu | | | |
| | Largeur entre les rangs | | non connu | | | |
| | Stade sensible de la culture | Stade phénologique | | - pas de ponte sur les carottes avant 2 feuilles vraies | | |
| | | Taille des plantes | | - ponte préférentielle sur des plantes dont le feuillage n'est pas trop grand (entre 5 et 20 cm de hauteur) et ne couvrent pas le sol | | |
| | Date de récolte | | | ne pas laisser les carottes en place à l'automne pour limiter l'impact des mouches l'année suivante | récolter les carottes en automne, ne pas les laisser en place, surtout si elles présentent des dégâts | |
| Cultures pièges | | | non connu | | Identifier et tester différentes cultures pièges | |
| Apports : fertilisation, amendements | Apports | Fumier, matières organiques | - apport de fumier attirerait les adultes ? (non démontré) - apport de cendres limiterait la ponte ? (à vérifier) | limiter l'apport de fumier ? | Quel est l'effet des apports (matières organiques...) sur la ponte de la mouche de la carotte ? et sur les dégâts ? doit-on limiter les fertilisations ? | |
| | | Soufre | | | | |
| | | Autres : cendres, sable, calcaire... | | | | |
| Irrigation | faible | | | | | |
| | importante | | l'humidité importante favorise la survie des œufs et larves et le déplacement des larves d'une galerie à une autre ou d'une carotte à une autre | limiter l'irrigation | | |
| Cultures intercalaires (plantes compagnes) | | | - cultures intercalaires oignons/carottes potentiellement intéressantes - intérêt des cultures intercalaires luzerne/carottes, à vérifier | favoriser les cultures intercalaires avec des oignons tester les cultures intercalaires avec des céréales ? | Quel mode de culture intercalaire oignons/carottes fonctionne bien ? Chercher d'autres cultures intercalaires | |
| Couverts : paillages, mulchs | | | - non connu | | Tester des paillis ? | |
| Prévision et surveillance des vols | Modèles de prévision Surveillance des vols des adultes et/ou des pontes (piégeage) | | efficacité des modèles de prévision des vols pour alerter intérêt des suivis des populations grâce aux piégeages des adultes (pour déterminer les vols) | continuer l'utilisation des modèles de prévision des vols continuer la surveillance des populations mais tester le piégeage des œufs (plutôt que le piégeage des adultes) | Affiner les modèles de prévision des vols Améliorer la surveillance des populations (plutôt par le piégeage des œufs ?) | |
| Traitements chimiques insecticides | Traitement des parties aériennes | | lambda-cyhalothrine | - limiter au maximum le nombre de traitements en s'appuyant sur les modèles de prévision et les surveillances, afin d'éviter les résistances aux insecticides | Encourager la diminution de l'emploi de pesticides auprès des producteurs (pour favoriser les régulations naturelles) | |
| | Traitement du sol | | théfluthrine | | | |
| | Traitement des semences ou des plants | | - | | | |
| | Modalités d'application (par bande, en granulés, moment...) | | - traitements foliaires de préférence par temps chaud, et de 16h à 21h (moment des vols et ponte des femelles dans les cultures) | - traiter les parties aériennes par temps chaud et de 16h à 21h | - améliorer les techniques d'application des insecticides | |
| | Intervalle entre les applications | | non connu | | | |
| | Substances répulsives, réduisant la ponte ou le développement | | | - non connu | | - rechercher et tester des substances capables de limiter la ponte, le développement des œufs et des larves |

| | | | | | | |
|--|--|--|---|--|---|--|
| Barrières physiques | Filets anti-insectes | Filets couvrants, bâches | efficacité des filets couvrants tissés pour limiter les pontes en début de culture | placer des filets couvrants en début de culture, avant l'attaque et dans des parcelles où il ne risque pas d'y avoir des adultes émergents sous le filet | | |
| | | Filets verticaux | -inefficacité des filets verticaux car les adultes ont la capacité de voler à plusieurs mètres de hauteur | | | |
| Auxiliaires ou ennemis naturels | Champignons entomopathogènes | | Entomophtorales connues | | Comment favoriser l'impact des ennemis naturels (lutte biologique par conservation) ? | |
| | Bactéries entomopathogènes | | pas de bactéries entomopathogènes connues | | | |
| | Nématodes entomopathogènes | | pas de nématodes entomopathogènes connues | | | |
| | Prédateurs | Favorisation des prédateurs naturels | Prédateurs coléoptères connus : - carabes (en particulier <i>Trechus quadristriatus</i> et <i>Pterostichus melanarius</i>) - Staphylins (<i>Aleochara bipustulata</i>) | | | |
| | | Lâchers inondatifs | non connu | | | |
| Parasitoïdes | Favorisation des parasitoïdes naturels | Parasitoïdes connus : - Hyménoptères : <i>Dacnusa</i> (= <i>Chorebus</i>) <i>gracilis</i> (<i>Braconidae</i>) et <i>Loxotropa</i> (= <i>Basalys</i>) <i>tritoma</i> (<i>Proctotrupoidea</i>) (parasites des larves) - Coléoptères <i>Aleochara sparsa</i> (<i>Staphylinidae</i>) et Hyménoptères <i>Kleidotoma psiloides</i> (<i>Eucoilinae</i>) (parasites des pupes) | | | | |
| Conduite en cas d'attaques importantes | Arrachage de la culture | | l'effet n'a pas été étudié/publié mais il est conseillé ne pas laisser en place une culture qui présente des dégâts ; certains auteurs suggèrent d'arracher rapidement les carottes infestées, d'autres auteurs d'enfourir profondément | | Comment limiter les attaques en cas de fortes infestations ? arracher, enfouir, ou labourer ? Il est probable que les mouches peuvent se développer sur les résidus de cultures dans le sol, et peuvent pondre de nouveau sur des carottes déjà infestées | |
| | Enfouissement | | | | | |
| | Labour | | | | | |

Conclusion :

De nombreux facteurs peuvent influencer le maintien et le développement des mouches de la carotte *Psila rosae* au champ. Voici un résumé des principaux effets signalés dans la littérature.

Parmi les **facteurs climatiques**, des températures élevées (> 26°C) ou à une faible humidité relative du sol augmente la mortalité des œufs et des jeunes larves. Les larves se déplacent peu si les températures sont inférieures à 15°C. Les pupes ralentissent leur développement à une température supérieure à 24°C. Les adultes ne volent pas en dessous de 7°C et au dessus de 25°C.

Le **précédent cultural** est un facteur important pour limiter les dégâts dus à la mouche de la carotte. Une rotation des cultures de carotte tous les ans est conseillée. Il est important d'espacer les cultures de carottes d'au moins 1 km par rapport à une culture de carottes l'année précédente.

Le **choix de la parcelle** est tout aussi important : il est judicieux de prévoir de grandes parcelles ouvertes, sans haies et sans plantes-hôtes en bordure de parcelle. En effet, il a été démontré que les femelles se regroupent dans les haies et les bordures pour s'alimenter et s'accoupler et qu'elles retournent pondre dans les cultures dans la journée.

Le **type de sol** a peut être une influence sur les dégâts (une étude montre que les dégâts dans les sols tourbeux/limoneux sont moins élevés que dans les sols limoneux) mais cela mérite d'être confirmé car une autre étude observe des résultats contradictoires.

Pour limiter l'impact de la mouche de la carotte, les carottes ne doivent pas rester en place en automne et être récoltées rapidement, surtout si elles présentent des dégâts.

A notre connaissance, l'effet de la **fertilisation** n'a pas été étudié. Seul un auteur signale que les adultes sont attirés par des odeurs de fumier mais aucun essai ne le prouve. Un apport de cendres diminuerait la ponte mais cet effet est à vérifier. Aucune étude n'a traité de l'effet de la densité de plantation ou de l'irrigation sur les dégâts de la mouche de la carotte. Cependant, comme une forte humidité favorise la survie des œufs et des jeunes larves, ainsi que le déplacement des larves, on peut penser qu'il faut limiter l'irrigation.

Les **cultures intercalaires** oignons/carottes peuvent être intéressantes et méritent d'être davantage étudiées. Les cultures luzerne/carottes ne donnent pas de résultats positifs nets pour lutter contre la mouche de la carotte.

Les **méthodes de paillage** mériteraient peut être d'être explorées.

L'utilisation de **filets couvrants tissés** est avantageuse mais il est nécessaire de le placer au bon moment et de bien connaître le début des pontes. Les **filets verticaux** n'ont pas donné de résultats satisfaisants car les adultes de la mouche de la carotte ont la capacité de voler assez haut.

Il est judicieux de **semmer tardivement** au printemps, pour éviter le 1^{er} vol de mouches et donc pour limiter les dégâts liés au 2^{ème} vol. **Récolter précocement** les carottes est un moyen de limiter l'impact du ravageur l'année suivante.

Des **modèles** basés sur les températures cumulées et la biologie de l'insecte, ont été développés pour prévoir les sorties des adultes et l'apparition des formes jeunes. Ces modèles sont utiles et complémentaires de la **surveillance des populations** de la mouche de la carotte. Actuellement, cette surveillance s'effectue avec des plaques jaunes qui capturent les adultes mais on peut se poser la question de leur pertinence. Est-ce que la surveillance des pontes n'est pas un meilleur critère (comme pour la mouche du chou) ?

Les **insecticides** posent des problèmes de résistance et ceux autorisés sont de moins en moins nombreux. Pour être efficace, l'application d'insecticides est préférable par temps chaud et entre 16h et 18h pour atteindre le maximum de femelles adultes dans la parcelle. Aucune étude scientifique n'a été publiée sur l'effet d'autres substances qui pourraient repousser la mouche de la carotte.

Les essais pour produire et sélectionner des **variétés** de carottes **résistantes** à la mouche de la carotte doivent être poursuivis.

Ainsi, en bilan des pratiques culturales testées pour lutter contre la mouche de la carotte, on peut lister quelques propositions qui peuvent être intéressantes (Tableau II-5-2). Certaines d'entre elles méritent d'être vérifiées (elles ont donc été signalées par un point d'interrogation)

Précédent culturel :

Eviter toute culture d'Apiacées

Choix de la parcelle :

Choisir des parcelles éloignées d'au moins 1 km de parcelles avec Apiacées, a fortiori attaquées par *P. rosae*.

Choisir des parcelles de grande taille et non entourées de haies

Choisir des parcelles éloignées d'autres Apiacées sauvages ou cultivées, éliminer si possible les Apiacées sauvages

Sol : ?

Apports : Limiter l'apport de fumier ?

Irrigation :

Peut-être limiter les arrosages en cas de présence d'œufs ou de larves (l'humidité favorise leur développement et leur déplacement)

Cultures intercalaires

Favoriser les cultures intercalaires d'oignons

Tester des cultures intercalaires avec des céréales ?

Mulches / Paillis : ?

Filets couvrants

Installer des filets tissés, surtout en début de culture

Filets verticaux

(Inefficaces car les mouches ont la capacité de voler à plusieurs mètres de hauteur)

Surveillance et prévision

S'appuyer sur les modèles de prévision des vols d'adultes, des pontes, des larves

Surveiller les adultes grâce au relevé des pièges sur plaques jaunes

Tester d'autres méthodes de surveillance plus précises : piégeage des œufs sur feutrine ?

Insecticides et autres substances actives

Limiter les applications de pesticides en s'appuyant sur les surveillances et les prévisions

Traiter les parties aériennes par temps chaud, de 16h à 21h

Rechercher et tester des substances capables de limiter la ponte (substances répulsives), le développement des œufs et des larves (substances ovicides et larvicides)

Variétés résistantes

Utiliser des variétés résistantes

Compte tenu des effets plus ou moins démontrés des modes de gestion et des traits de vie de la mouche de la carotte, plusieurs **questions** peuvent être soulevées :

Les haies sont favorables car elles constituent des abris pour les adultes (accouplements, alimentation). En revanche, les bordures herbacées ont-elles un rôle important ? Quels végétaux fleuris constituent une ressource alimentaire pour les femelles adultes ? (l'apport de nectar et de pollen favorisent la reproduction) est-ce que les plantes-hôtes alternatives des bordures constituent un réservoir important ? si oui, peut-on envisager de les limiter ?

Les haies constituent-elles un corridor de déplacement des adultes ou limitent-elle leurs déplacements ?

Quelles sont les sources principales de mouches adultes à partir d'avril ? Les adultes viennent-ils majoritairement des parcelles proches et/ou précédemment infestées au cours de l'année n-1 ? Viennent-ils d'autres plantes-hôtes (Apiacées sauvages) ?

Est-ce que les labours pourraient limiter la survie des pupes en hiver et donc l'émergence des adultes au printemps ? quand faudrait-il les envisager ? à quelle profondeur ? Est-ce que d'autres types de travail du sol (binage, buttage) peut réduire la survie des œufs et des jeunes larves ?

Quel est l'effet des fertilisations (préciser lesquelles) sur la ponte de la mouche de la carotte et sur les dégâts ? Est-ce qu'une réduction des fertilisations permet de limiter l'impact de la mouche de la carotte ?

Les cultures intercalaires avec des oignons, des céréales ou autres méritent peut-être d'être explorées, tout comme les mulches.

Peut-on envisager de reculer la date des semis de carottes ? (pour éviter l'impact du 1^{er} vol sur les jeunes plants et donc les dégâts liés au 2^{ème} vol) ? A quelle date (en juin (semaines 22-24) plutôt qu'en mai (semaine 18-20)) ? Peut-on récolter plus précocement ? Quand ? Récolter toutes les carottes en automne est-il un bon moyen de limiter les populations ?

Peut-on envisager de mettre en place des cultures pièges (ou des substances) pour attirer les mouches de la carotte à certains endroits, loin des cultures ?

Il est intéressant de rechercher des plantes ou des substances qui éviteraient la ponte par les mouches dans les cultures ou qui empêcheraient le développement des œufs et des larves.

Il est important de continuer à rechercher des variétés résistantes.

La surveillance des populations de la mouche de la carotte ne serait-elle pas meilleure si on surveillait les pontes, plutôt que les adultes ?

A plus long terme, il est certainement primordial de favoriser les **régulations naturelles** (lutte biologique par conservation). Il est donc nécessaire d'encourager la diminution de l'emploi de pesticides auprès des producteurs. Cependant, cette méthode nécessite de connaître mieux l'impact des ennemis naturels, ce qui n'est pas le cas.

En conclusion, de très nombreux facteurs déterminent l'arrivée et le développement de la mouche de la carotte. Ces facteurs sont variables dans le temps et l'espace, et assez mal connus. Beaucoup de questions sont posées. En l'état actuel des connaissances, il est difficile de déterminer les risques liés à la mouche de la carotte pour une parcelle.

Références bibliographiques sur la mouche de la carotte

- Albert, S., P. Hastir, et al. (2003). "Agricultural biodiversity and control of carrot fly." Notes Fauniques de Gembloux(50): 3-8.
- Baker, F. T., I. E. Ketteringham, et al. (1942). "Observations on the biology of the carrot fly (*Psila rosae* Fab.) : assembling and oviposition." Annals of Applied Biology **29**: 115-125.
- Brunel, E. (1971). "Influence de la plante hôte (espèce et stade végétatif) sur les captures de *Psila rosae* Fab. (*Diptera*, *Psilidae*) au moyen de pièges jaunes." Meded. Fac. Landbouwwet. Rijksuniv. Gent **36**: 241-249.
- Brunel, E. (1977). "Etude de l'attraction périodique de femelles de *Psila rosae* Fabr. par la plante-hôte et influence de la végétation environnante." Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique **265**: 373-389.
- Brunel, E. (1979). "Etude de l'ovogenèse de *Psila rosae* Fab. (Diptère Psilidés) : rôle de la température, de l'alimentation et de la plante-hôte." Annales De Zoologie Ecologie Animale **11**(2): 227-246.
- Brunel, E. (1987). Analyse des vols de la mouche du chou *Delia radicum* en France en 1984, 1985 et 1986. Annales de l'Association Nationale de la Protection des Plantes: 523-529.
- Brunel, E. and J. P. Cancela Da Fonseca (1977). "Utilisation des séries chronologiques dans l'étude du cycle biologique et des fluctuations de population de *Psila rosae* Fabr. (Diptères Psilidae) tilization of time-series." Annales De Zoologie Ecologie Animale **9**(3): 515-535.
- Brunel, E. and S. Fournet (1996). "Fauna associated with the cabbage root fly in sequential sowings of turnips." IOBC-WPRS Bulletin **19**(11): 140-146.
- Burn, A. J. and T. H. Coaker (1981). "Diapause and overwintering of the carrot fly, *Psila rosae* (F) (Diptera:Psilidae) " Bulletin of Entomological Research **71**(4): 583-590.
- Coaker, T. H. and D. R. Hartley (1988). "Pest management of *Psila rosae* on carrot crops in the eastern region of England." Bulletin IOBC/SROP **9**(1): 40-52.
- Collier, R. and S. Finch (2009). "A review of research to address carrot fly (*Psila rosae*) control in the UK." Bulletin OEPP **39**(2): 121-127.
- Collier, R. H., M. S. Elliott, et al. (1994). "Development of the overwintering stages of the carrot fly, *Psila rosae* (Diptera, Psilidae)." Bulletin of Entomological Research **84**(4): 469-476.
- Collier, R. H. and S. Finch (1996). "Field and laboratory studies on the effects of temperature on the development of the carrot fly (*Psila rosae* F)." Annals of Applied Biology **128**(1): 1-11.
- Coppock, L. J. (1974). "Notes on the biology of carrot fly in Eastern England." Plant Pathology **23**(3): 93-100.
- Dabrowski, Z. T. and H. Legutowska (1976). "The effect of field location and cultural practices on carrot infestation by the carrot fly, *Psila rosae* (F)." Wiadomosci Ekologiczne **22**: 265-277.
- Degen, T. and E. Stadler (1996). "Influence of natural leaf shapes on oviposition in three phytophagous flies: A comparative study." Entomologia Experimentalis Et Applicata **80**(1): 97-100.
- Degen, T. and E. Stadler (1997). "Foliar form, colour and surface characteristics influence oviposition behaviour of the carrot fly." Entomologia Experimentalis Et Applicata **83**(1): 99-112.
- Degen, T., E. Stadler, et al. (1999a). "Host-plant susceptibility to the carrot fly, *Psila rosae*. 1. Acceptability of various host species to ovipositing females." Annals of Applied Biology **134**(1): 1-11.
- Degen, T., E. Stadler, et al. (1999b). "Host-plant susceptibility to the carrot fly, *Psila rosae*. 2. Suitability of various host species for larval development." Annals of Applied Biology **134**(1): 13-26.
- Eilenberg, J. (1987). "Abnormal egg-laying behavior of female carrot flies (*Psila rosae*) induced by the fungus entomophthora muscae." Entomologia Experimentalis Et Applicata **43**(1): 61-65.
- Eilenberg, J. and H. Philipsen (1988). "The occurrence of Entomophthorales on the carrot fly *Psila rosae* in the field during 2 successive seasons." Entomophaga **33**(2): 135-144.
- Ellis, P. R. (1999). "Exploiting the resistance in carrots and wild umbelliferae to the carrot fly, *Psila rosae* (F)." Bulletin OILB/SROP **22**(10): 45-52.

- Ellis, P. R., G. H. Freeman, et al. (1984). "Differences in the relative resistance of 2 carrot cultivars to carrot fly attack over 5 seasons." *Annals of Applied Biology* **105**(3): 557-564.
- Ellis, P. R. and J. A. Hardman (1980). "Carrot fly. A new way to resist attack." *Grower* **93**(20): 55, 57-58.
- Ellis, P. R. and J. A. Hardman (1981). "The consistency of the resistance of 8 carrot cultivars to carrot fly attack at several centers in Europe." *Annals of Applied Biology* **98**(3): 491-497.
- Ellis, P. R., J. A. Hardman, et al. (1987). "The complementarity effects of plant resistance and the choice of sowing and harvest times in reducing carrot fly (*Psila rosae*) damage to carrots " *Annals of Applied Biology* **111**(2): 415-424.
- Ester, A. and K. van Rozen (2009). "State of the art regarding carrot fly control in practice and possibilities in the future for Western and Northern Europe." *Bulletin OEPP* **39**(2): 138-142.
- Finch, S. (1993). "Integrated pest-management of the cabbage root fly and the carrot fly." *Crop Protection* **12**(6): 423-430.
- Finch, S. and R. H. Collier (2000). "Integrated pest management in field vegetable crops in northern Europe - with focus on two key pests." *Crop Protection* **19**(8-10): 817-824.
- Finch, S. and R. H. Collier (2004). "A simple method - based on the carrot fly - for studying the movement of pest insects." *Entomologia Experimentalis Et Applicata* **110**(3): 201-205.
- Finch, S., J. Freuler, et al. (1999). "Monitoring populations of the carrot fly *Psila rosae*." *Monitoring populations of the carrot fly /i Psila rosae/*: vii + 108 pp.
- Groot, T. V. M., T. C. Everaarts, et al. (2009). "Supervised control of the carrot fly in the Netherlands; insights from a dirty dataset." *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* **39**(2): 128-133.
- Guerin, P. M., E. Stadler, et al. (1983). "Identification of host plant attractants for the carrot fly, *Psila rosae*." *Journal of Chemical Ecology* **9**(7): 843-861.
- Guerin, P. M. and J. H. Visser (1980). "Electroantennogram responses of the carrot fly, *Psila rosae*, to volatile plant components." *Physiological Entomology* **5**(2): 111-119.
- Hardman, J. A. and P. R. Ellis (1982). "An investigation of the host range of the carrot fly." *Annals of Applied Biology* **100**(1): 1-9.
- Hardman, J. A., P. R. Ellis, et al. (1990). "Further investigations of the range of the carrot fly, *Psila rosae* (F.) " *Annals of Applied Biology* **117**(3): 495-506.
- Jones, O. T. and T. H. Coaker (1977). "Oriented responses of carrot fly larvae, *Psila rosae*, to plant odors, carbon-dioxide and carrot root volatiles " *Physiological Entomology* **2**(3): 189-197.
- Jones, O. T. and T. H. Coaker (1980). "The dispersal behaviour of carrot fly larvae (*Psila rosae*) and factors affecting it." *Workshop sessions*: 483.
- Jones, O. T. and T. H. Coaker (1980). "DISPERSIVE MOVEMENT OF CARROT FLY (*PSILA-ROSAE*) LARVAE AND FACTORS AFFECTING IT." *Annals of Applied Biology* **94**(2): 143-152.
- Kettunen, S., I. Havukkala, et al. (1988). "Non-chemical control of carrot rust fly in Finland." *Annales Agriculturae Fenniae* **27**(2): 99-105.
- Legutowska, H. and E. Plaskota (1986). "Influence of environmental conditions and cultural practices on two pests of vegetable crops: the carrot fly (*Psila rosae* Fab.) and the leek moth (*Acrolepiopsis assectella* Z.)." *Colloques de l'INRA*(36): 61-73.
- Maki, A. and M. F. Ryan (1989). "Root mediated effects in carrot resistance to the carrot fly, *Psila rosae*." *Journal of Chemical Ecology* **15**(6): 1867-1882.
- McLeod, D. G. R., J. W. Whistlecraft, et al. (1985). "An improved rearing procedure for the carrot rust fly (Diptera, Psilidae) with observations on life history and conditions controlling diapause induction and termination " *Canadian Entomologist* **117**(8): 1017-1024.
- Petherbridge, F. R. (1943). "Further investigations on the biology and control of the carrot fly (*Psila rosae* F.)." *Annals of Applied Biology* **30**(4): 348-358.
- Philipsen, H. and J. Eilenberg (1988). "Some factors influencing the measured population size of carrot flies (*Psila rosae* F.)." *Acta Horticulturae*(219): 81-91.

- Ramert, B. and B. Ekbom (1996). "Intercropping as a management strategy against carrot rust fly (Diptera: Psilidae): A test of enemies and resource concentration hypotheses." Environmental Entomology **25**(5): 1092-1100.
- Ryan, M. F. and P. M. Guerin (1982). "BEHAVIORAL-RESPONSES OF THE CARROT FLY LARVA, PSILA-ROSAE, TO CARROT ROOT VOLATILES." Physiological Entomology **7**(3): 315-324.
- Smith, K. M., Ed. (1922). Insect Pests of the Horticulturalist : their Nature and Control. London, Benn Bros.
- Städler, E. and H. R. Buser (1984). "Defense chemicals in leaf surface wax synergistically stimulate oviposition by a phytophagous insect." Experientia **40**: 1157-1159.
- Sunley, R. (2009). "EPPPO Workshop on Carrot Fly (*Psila rosae*) : integrated approaches for pest control." Bulletin OEPP/EPPO Bulletin **39**(2): 113-115.
- Uvah, III and T. H. Coaker (1984). "Effect of mixed cropping on some insect pests of carrots and onions." Entomologia Experimentalis Et Applicata **36**(2): 159-167.
- Villeneuve, F., J. P. Bosc, et al. (1997). "Thrips tabaci on leeks and directed control." Infos-CTIFL (Paris)(128): 39-43.
- Villeneuve, F., J. P. Bosc, et al. (2004). "Mouche de la carotte : prévision des risques et protection." Culture Légumière **82**: 23-25.
- Villeneuve, F. and J. Leteinturier (1992b). La carotte, état des connaissances, CTILF. **tome 1**: 227p.
- Villeneuve, F. and J. Leteinturier (1994). "Vers une prévision du niveau des populations de mouche de la carotte (*Psila rosae* FAB., Diptère, Psilidae)." First International Workshop on Carrot, C.T.I.F.L. **354**.
- Villeneuve, F., P. Letouze, et al. (2007). "Carrot fly: searching for new means of control." Infos-Ctifl(232): 25-33.
- Villeneuve, F., G. Maignien, et al. (2010). "Ravageur Mouche de la carotte : Une année 2010 sous tension." Culture légumière **119**: 22-24.
- Vincent, J. and S. Finch (1999). "Monitoring carrot fly populations, and the effect of low soil moisture on the mortality of eggs and first-instar larvae." Bulletin OILB/SROP **22**(5): 89-96.
- Wheatley, G. A. and G. H. Freeman (1982). "A method of using the proportions of undamaged carrots or parsnips to estimate the relative population densities of carrot fly (*Psila rosae*) larvae, and its practical applications." Annals of Applied Biology **100**(2): 229-244.
- Wierzbicka, B. and J. Majkowska-Gadomska (2012). "The effect of biological control of the carotte fly (*Psila rosae*) on the yield and quality of carrot (*Daucus carota* L.) storage roots." Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus **11**(2): 29-39.
- Wright, D. W. and D. G. Ashby (1946a). "Bionomics of the carrot fly (*Psila rosae* F.) I. The infestation and sampling of carrot crops." Annals of Applied Biology **33**(1): 69-77.

III- ETUDE DE TERRAIN

L'objectif de cette étude était d'évaluer le risque ou le potentiel d'infestation d'une nouvelle culture en fonction de l'environnement passé récent de la parcelle, c'est à dire les éléments paysagers de bordure et les cultures adjacentes proches des années passées. Pour réaliser ce travail, nous avons exploité les données cartographiques des 12 parcelles de référence (Etude de 2010 menée par M. Renault, avec le soutien de France Agrimer dans le cadre du programme EcoPhytoSys Légumes), en prenant en compte les éléments paysagers (nature des séparations entre les parcelles) et les cultures adjacentes présentes dans un rayon d'environ 500 m depuis 2010.

1) Matériel et méthodes



Parmi les 57 parcelles mises à disposition par les producteurs de la Manche dans le cadre du projet EcoPhytoSys, 12 parcelles avaient été retenues pour être suivies. Elles se situent sur 8 sites repérés par les lettres A à F et H à J, sur la figure III-1 ci-contre. Ces 12 parcelles sont présentées dans le tableau III-1 ci-dessous.

Figure III-1 Carte des 9 sites de la Manche, où se situent les 12 parcelles étudiées dans le programme EcoPhytoSys-Légumes

Tableau III-1 : Informations sur les 12 parcelles des producteurs

| Zone | Site (8 sites) | n° Parcelle EcoPhyto-sys (12 parcelles) | Producteur | Nom des parcelles | N° Ilot | Lieu-dit | Canton |
|-------------------------|--------------------------|---|------------|--------------------------------------|-------------------|---------------|---------------------|
| Zone 1 : Val de Saire | A : Les Grands Colins | 1 | O. J. | le fond | 12 | la_bergerie | gatteville_le_phare |
| | B : Les Epureux | 7 | L. H. | epureux mouton | 1 | les_epureux | gatteville_le_phare |
| | C : Cœur du Val de Saire | 16 | O. L. | les benicodes | 13 | les_perrons | anneville_en_saire |
| | D : Quettehou | 29 | A. P. | 667 | 10 | hameau_de_sey | quettehou |
| Zone 2 : Côte Ouest | E : Portbail | 38 | J. H. | bizique | 6 | les_mielles | portbail |
| | | 41 | | vassard bâtiment | 4 | les_mielles | portbail |
| | F : Bretteville sur Ay | 45 | L.G. | noellot 1 | 1 | noellot | bretteville_sur_ay |
| | | 46 | | noellot 2 | 1 | noellot | bretteville_sur_ay |
| | H : Lessay | 49 | L. JM. | la cote maison et la mere chanteloup | 24 | la_battonerie | lessay |
| I : Créances | 54 | J. P. | le_broc | 59 | hammeau_duneville | creances | |
| Zone 3 : Mont St Michel | J : Mont St Michel | 36 | G.B. | digue | | les_grevettes | beauvoir |
| | | 21 | | maison | | les_grevettes | beauvoir |

En première approche, seules quelques informations ont été recueillies, pour chaque parcelle étudiée (« parcelle cible ») :

- Historique des assolements de la parcelle cible depuis 2012
- Nature des séparations entre les parcelles (haies continues/discontinues, arbustives ou arborescentes, talus herbacées, aucune séparation).
- Nature des cultures majoritaires dans la zone (connues en 2010)
- Estimation de la fréquence des cultures (en %) dans les parcelles adjacentes dans un rayon d'environ 500 m autour de la parcelle cible, en 2010 et en 2011 lorsqu'elles étaient connues (sans tenir compte des zones bâties, des sols nus, friches, dunes ou prairies).

2) Résultats et discussion

Les résultats de cette première approche sont regroupés dans le tableau III-2. Il en ressort que les parcelles étudiées se situent dans des zones de production où seules quelques cultures dominent le paysage au fil du temps. Par exemple, les parcelles à Bretteville sur Ay et à Créances sur la côte Ouest sont largement dominées par les cultures de poireaux et de carottes. Les parcelles dans le Val de Saire sont cultivées majoritairement avec choux, poireaux, carottes en alternance avec du blé.

Les séparations entre les parcelles sont importantes en général. Elles sont majoritairement constituées de haies arbustives et de talus dans le Val de Saire et sur la côte Ouest, tandis que ces séparations sont absentes dans la zone du Mont St Michel.

En bilan de cette première approche, **le paysage agricole dans la Manche apparaît donc plutôt constant avec des cultures légumières récurrentes** (poireaux, carottes, choux) **et des bordures de parcelles plutôt riches en haies et talus enherbés** (sauf dans la zone du Mont St Michel).

3) Conclusion

Sachant que les insectes ravageurs étudiés (thrips du poireau, mouche du chou et mouche de la carotte) ont la capacité de se disperser d'une parcelle à l'autre au cours du temps, le paysage agricole de la Manche constitue donc un paysage très favorable à l'installation et au développement de ces insectes. En effet, les insectes y trouvent une grande disponibilité en plantes-hôtes (parcelle cible, parcelles adjacentes, cultures précédentes) et des éléments linéaires (haies et talus) comme lieux d'abri, d'alimentation ou d'accouplement.

Par conséquent, compte tenu de l'environnement des 12 parcelles, il n'est pas possible d'évaluer potentiel d'infestation d'une culture par les 3 insectes ravageurs étudiés.

De plus, il est largement admis que les populations d'insectes dans les cultures présentent une très grande variabilité selon les parcelles et les années. Ainsi, l'influence du paysage sur les dynamiques d'insectes ravageurs, doit porter nécessairement sur de très nombreuses parcelles (un nombre de 12 parcelles étant insuffisant). C'est la raison pour laquelle, il ne nous a pas semblé judicieux à ce stade, d'étudier plus précisément ces parcelles et leur environnement.

Pour avoir une bonne idée des phénomènes liés aux déplacements et au développement des populations d'insectes dans la zone de production de la Manche, il faudrait envisager des études de grande envergure sur au moins 30 parcelles, et sur plusieurs années avec un suivi approfondi des populations de ravageurs.

Tableau III-2 : Principales caractéristiques des 12 parcelles cibles dans les zones de production légumière de la Manche (les croix indiquent que les parcelles n'ont pas été suivies ou qu'elles n'ont pas fait l'objet de cultures légumières).

| Site (8 sites) | n° Parcelle (12 parcelles) | Nom des parcelles | Assolement de la parcelle cible automne 2010 | Assolement de la parcelle cible 2011 | Assolement de la parcelle cible 2012 | Nature des séparations entre les parcelles | Cultures majoritaires dans la zone en 2010 | Fréquence des cultures dans les parcelles adjacentes 2010 | Fréquence des cultures dans les parcelles adjacentes 2011 |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|--|
| A : Les Grands Colins | 1 | le fond | sol nu / chou | blé | x | haies arbustives discontinues talus herbacés parfois aucune séparation | chou, poireau, carotte, maïs, blé, salade | chou 67% poireau 22% blé 11% | chou 40% poireau 20% maïs 20% blé 20% |
| B : Les Epureux | 7 | epureux mouton | poireau | blé | céleri branche | haies arbustives discontinues talus herbacés parfois aucune séparation | chou, poireau, carotte, maïs, blé, salade | blé 44% chou 33% poireau 11% maïs 11% | chou 83 % maïs 17% |
| C : Cœur du Val de Saire | 16 | les benicodes | ? | blé | x | haies arbustives discontinues talus herbacés parfois aucune séparation | chou, poireau, carotte, maïs, blé, persil, salade | x | poireau 27% chou 27 % blé 27% carotte 9% betterave 9% |
| D : Quettehou | 29 | 667 | chou | blé | x | haies arbustives et arborescentes | maïs, blé, chou, poireau, carotte (+ élevages) | x | poireau 46% blé 27% chou 18% herbe 9% |
| E : Portbail | 38 | bizique | carotte | carotte | x | haies arbustives continues talus herbacés | poireau, carotte (sol sableux) | carotte 80% poireau 20% | maïs 66% poireau 17% carotte 17% |
| | 41 | vassard bâtiment | | maïs | x | | | x | |
| F : Bretteville sur Ay | 45 | noellot 1 | carotte | orge/ rutabaga/ poireau | carotte | haies arbustives continues talus herbacés | poireau, carotte (sol sableux) | carotte 67% poireau 22% maïs 11% | carotte 67% poireau 33% |
| | 46 | noellot 2 | | | | | | | |
| H : Lessay | 49 | la cote maison et la mere chanteloup | salade/sol nu | maïs | x | haies arborescentes | prairie, maïs, blé, poireau, carotte (+ élevages) | poireau 25% chou 25% panais 25% blé 25% | maïs 43% luzerne 29% carotte 14% blé 14% |
| I : Créances | 54 | le_broc | carotte | poireau | carottes | talus herbacés (hauteur 1,5m) | poireau, carotte | carotte 57% poireau 29% chou 14% | poireau 50% carotte 37,5% herbe 12,5% |

| Site | n° Parcelle | Nom des parcelles | Assolement de la parcelle cible automne 2010 | Assolement de la parcelle cible 2011 | Assolement de la parcelle cible 2012 | Nature des séparations entre les parcelles | Cultures majoritaires dans la zone en 2010 | Fréquence des cultures dans les parcelles adjacentes 2010 | Fréquence des cultures dans les parcelles adjacentes 2011 |
|--------------------|-------------|-------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|---|
| J : Mont St Michel | 36 | digue | maïs | céleri | x | pas de séparation quelques haies de peupliers | maïs, blé, poireau, céleri, carotte, salade (sol = tangué) | maïs 37% carotte 26% blé 16% poireau 10,5% engrais vert (moutarde) 10,5% | x |
| | 21 | maison | salade | céleri | x | | | blé 75% maïs 25 % | x |

L'objectif de l'étude était d'analyser comment les insectes ravageurs posant problème dans la Manche (thrips du poireau *Thrips tabaci*, mouche du chou *Delia radicum*, et mouche de la carotte *Psila rosae*), s'installent et se développent dans les parcelles cultivées et quels sont les facteurs impliqués dans ces phénomènes. A terme, cette étude avait pour ambition de trouver des leviers permettant la lutte contre ces insectes.

Plusieurs points de l'étude apportent des éclaircissements intéressants.

➤ Tout d'abord, la littérature sur l'**écologie du paysage** permet de prendre conscience que la survie de l'espèce ne se limite pas à la seule parcelle cultivée, à un moment donné. En effet, le paysage agricole moderne peut être considéré comme un espace hétérogène et fragmenté, composé de **sites d'habitat** utiles à l'insecte considéré (ex : parcelles cultivées avec les plantes-hôtes de l'insecte), d'**éléments linéaires** reliant ces sites (ex : bordures, haies...servant d'abris, de sources de nourriture...) et d'une **matrice paysagère** non utilisée par l'insecte. Les populations de ces insectes ainsi fragmentées, forment des métapopulations (ensembles de populations locales occupant différents sites d'habitats) qui effectuent des **mouvements** entre ces sites d'habitats, ce qui permet la survie de l'espèce au sein du paysage et au fil des années. Ces mouvements sont liés à de nombreux facteurs, en particulier à la répartition des habitats favorables, au mode de déplacement et à la capacité de dispersion de l'espèce, aux saisons et aux couverts végétaux, aux pratiques agricoles, et aux ennemis naturels. De nombreuses études montrent notamment l'importance des **habitats semi-naturels** (bois, haies, bordures des parcelles, jachères, prairies) pour le maintien des ennemis naturels des ravageurs.

La littérature concernant l'**impact des pratiques culturales** sur les ravageurs de cultures et leurs ennemis naturels montre des résultats variables. Malgré tout, quelques tendances peuvent être retenues. Une diversité végétale importante dans le paysage et l'utilisation de variétés résistantes tendent à réduire les dégâts liés aux insectes. La fertilisation azotée, les labours, les rotations sur plusieurs années et les modifications de date de semis ou de récolte, peuvent participer à diminuer les dégâts aux cultures. L'usage des pesticides est à limiter car il est connu pour leur effet néfaste sur les ennemis naturels des insectes ravageurs.

La littérature s'accorde à affirmer que pour limiter l'impact des populations d'insectes ravageurs dans les cultures, tout en réduisant les intrants, il est nécessaire de **favoriser à la fois l'action des ennemis naturels des ravageurs et la capacité des plantes à se défendre contre ces ravageurs**, à travers l'aménagement du paysage et la conduite de pratiques agricoles appropriées. Cela implique donc de prendre en considération **l'échelle spatiale du paysage agricole et une échelle temporelle pluri-annuelle**.

➤ Ensuite, nous avons répertorié les informations les plus importantes connues, pour comprendre l'installation des 3 ravageurs dans les cultures de poireaux, choux et carottes.

Voici ci-dessous un résumé des informations les plus importantes sur ces 3 insectes (*conclusions des parties II- 5 à 7*)

- **Le thrips du poireau *Thrips tabaci*** est un petit insecte responsable de dégâts importants en culture de poireau (tâches argentées sur les feuilles de poireau, liées à l'alimentation des larves et adultes). On le rencontre sur les poireaux et les oignons mais aussi sur de très nombreuses plantes cultivées (choux, colza, laitues, luzerne, blé, concombre...) et sur des mauvaises herbes de nombreuses familles (moutarde des champs, pissenlits...). Il localise les plantes par leur couleur. Il est considéré comme ayant de fortes capacités de dispersion, en particulier l'été par temps chaud.

Les adultes et les larves vivent entre les feuilles de poireaux et se nourrissent du contenu des cellules de feuilles. La reproduction ne nécessite pas la recherche de partenaires sexuels, les femelles pondent des œufs qui donneront des larves puis des nymphes qui deviendront des femelles. Il semble qu'une alimentation glucidique et protidique soit indispensable pour la ponte. Les protéines pourraient provenir du pollen des fleurs.

Dans nos régions, ce sont probablement les adultes et les larves qui passent l'hiver dans les poireaux, le blé, la luzerne, les mauvaises herbes mais aussi dans le sol des champs ou des bordures. On ne sait pas si cette espèce subit une diapause en hiver ou une quiescence. Il a été démontré que les adultes peuvent survivre à 10°C mais sont inactifs et ne se reproduisent pas. La longévité des femelles augmente quand les températures diminuent ; ainsi, on signale que les femelles peuvent vivre environ 87 jours à 15°C. Le développement des différents stades est ralenti lorsque les températures diminuent.

Les températures relativement élevées (20-25°C) constituent des conditions favorables au développement des différents stades et à la reproduction. En effet, la durée de développement de l'œuf à l'adulte est plus courte lorsque les températures sont plus élevées. La fécondité des femelles est plus importante aux alentours de 20-23°C.

Les traits de vie mentionnés ci-dessus peuvent ainsi expliquer en partie le nombre important de générations par an (5 à 6 générations dans l'ouest de la France) et l'explosion des populations de thrips en été.

Il possède de nombreux ennemis naturels : prédateurs (ex : chrysopes, syrphes, coccinelles, thrips prédateurs etc.), parasitoïdes (petits Hyménoptères capables de pondre dans les larves de thrips), champignons et nématodes entomopathogènes. On ne connaît pas de bactéries capables de limiter les thrips. Les ennemis naturels participent à diminuer les populations de thrips mais selon certains auteurs, leur influence est mineure.

- **La mouche du chou *Delia radicum*** est un insecte Diptère responsable de dégâts importants en culture de Brassicacées (Crucifères) (les larves en s'alimentant des racines, causent le dépérissement des plantes et les galeries peuvent être le siège d'autres pathogènes). C'est une espèce spécialiste des Brassicacées cultivées (chou, navet, radis, rutabaga, colza) mais aussi sauvages (moutarde, giroflée). Elle présente environ **3 générations par an**. Une génération présente plusieurs stades de développement successifs : les femelles **adultes** accouplées pondent des **œufs**, qui deviennent des **larves** (3 stades larvaires). Les larves se nourrissent des racines en faisant des galeries, puis se transforment en **pupes** dans le sol. Des pupes émergent de nouveaux adultes de la génération suivante. Les pupes peuvent subir une **estivation** (quiescence) et une **diapause hivernale** (provoquée par une baisse des températures ou une baisse de la photopériode).

Les femelles accouplées et prêtes à pondre sont attirées par les **odeurs de plantes-hôtes**, en particulier les isothiocyanates volatils (issus de la dégradation des glucosinolates) et sont sensibles à des **signaux visuels** (couleur et la taille des feuilles) quand elles sont à proximité des plantes. La ponte est ensuite stimulée par des **composés non volatils** (glucosinolates) présents à la surface des feuilles ; d'autres composés (initialement appelés CIF ou Cabbage Identification Factor) extraits des *Brassica* mais aussi des œufs de *D. radicum*, stimulent fortement la ponte. Tous ces composés sont perçus par des récepteurs situés sur les tarses des femelles. Les **œufs** sont pondus de manière **agrégative**, dans les anfractuosités du sol, le plus souvent dans les 5 cm autour du collet des plantes.

Les femelles préfèrent pondre sur des plantes de grande taille ou âgées, et où les micro-organismes sont présents. Les femelles pondent à partir de 6-8 jours après leur émergence et pendant 2 à 4 semaines. Selon les auteurs et les conditions, elles pondent en moyenne de **42 à 376 œufs au cours de leur vie**. La température favorable à la fécondité et à la ponte est de 15°C ; il n'y a pas de ponte en dessous de 10°C.

Les adultes se nourrissent de glucides et de protides issus du nectar, des exsudats de fleurs, de végétaux en décomposition, de sève d'arbres ou de miellat de pucerons. L'apport de glucides est nécessaire pour la maturation des 1^{ers} œufs, l'apport supplémentaire de protides est nécessaire à la maturation des œufs suivants. La fécondité varie selon les espèces végétales visitées pour l'alimentation.

La **longévité** des adultes varie de 20 à 45 jours selon les conditions du milieu, le sexe, la présence de congénères et l'origine des adultes. Elle est plus importante à 19°C qu'à 24°C.

Les femelles peuvent parcourir 2 à 3 km depuis leur lieu d'émergence, après accouplement et maturation des œufs (vers l'âge de 5-10 jours). Les mâles se déplacent moins. La dispersion des adultes est réduite par temps de pluie.

Les haies servent de lieux d'accouplement et d'alimentation pour les adultes. Les femelles s'y nourrissent le matin, pondent dans les cultures l'après-midi et retournent dans les haies en fin d'après-midi. Les haies constituent des barrières aux déplacements des adultes entre les parcelles. En effet, la hauteur de vol des adultes serait de moins d'1 mètre.

Les différents stades ont des durées variables selon les conditions de température et d'humidité. A 20°C, les œufs éclosent au bout de 3-4 jours, le développement des larves dure au total environ une vingtaine de jours, et les pupes se développent en 14-20 jours

avant l'émergence des adultes. Certaines pupes se développent en moins de 20 jours (phénotype hâtif), d'autres en plus de 30 jours (phénotype tardif). La température seuil de développement varie de 4 à 7,2°C selon les stades considérés.

Le taux de survie des œufs ne varie pas avec la température (inférieure à 33°C) mais il diminue fortement si l'humidité du sol est inférieure à 25%. Les pupes se développent de façon optimale à 20°C et présentent une très forte capacité de résistance au froid.

Après l'éclosion des œufs, les larves de 1^{er} stade sont attirées par les odeurs de racine des plantes-hôtes. Les larves se nourrissent des racines ; d'autres pathogènes peuvent alors se développer (bactéries de la « pourriture molle »).

La mouche du chou possède de nombreux ennemis naturels : champignons entomopathogènes, bactéries, acariens, nématodes, Coléoptères prédateurs d'œufs et de larves, parasitoïdes (petits Hyménoptères capables de pondre dans les larves ou les pupes de *D. radicum*).

- **La mouche de la carotte *Psila rosae* est un insecte Diptère** responsable de dégâts importants en culture d'Apiacées (Ombellifères) (les larves s'alimentent des racines et causent le dépérissement des plantes jeunes ou creusent des galeries qui peuvent rendre les légumes invendables). C'est une espèce spécialiste des **Apiacées** cultivées (carottes, céleri, panais, persil...) mais aussi sauvages (carotte sauvage, cigüe, berce, ache...). Elle présente environ **3 générations par an**. Chaque génération présente plusieurs stades de développement successifs : les femelles **adultes** accouplées pondent des **œufs** au pied des plantes ; ces œufs donnent des **larves** (3 stades larvaires) qui se nourrissent des racines puis qui se transforment en **pupes** dans le sol. Des pupes émergent de nouveaux adultes de la génération suivante. Certaines pupes peuvent subir une **diapause en hiver** (provoquée par une baisse des températures et une diminution de la photopériode) tandis que certaines larves sont capables de continuer leur développement sur les plantes en hiver. En été, les pupes peuvent ralentir leur développement (on parle de **quiescence estivale**) quand les températures sont supérieures à 22-24°C.

Les femelles localisent les plantes-hôtes grâce à des **signaux visuels** (forme découpée et couleur des feuilles, couleur) et grâce à différentes **odeurs de feuilles**. Ce sont des **substances de contact sur les feuilles** et des **odeurs de racines** qui stimulent les femelles à pondre leurs œufs à proximité des plantes dans les anfractuosités du sol.

Les femelles pondent à partir du 2^{ème} jour après leur émergence et au total **entre 80 et 120 œufs au cours de leur vie**. La température optimale de ponte est de 18°C. La ponte s'effectue l'après midi entre 16h et 21h. Les plantes semblent plus attractives quand les feuilles ne sont pas trop grandes (entre 5 et 20 cm de hauteur) et ne couvrent pas entièrement le sol. Les carottes jeunes, avant le stade 2 feuilles vraies, ne sont pas acceptées comme site de ponte.

Les femelles ont une longévité moyenne de **17 à 23 jours**.

Les femelles pondent davantage en bord de parcelle, en particulier à proximité des haies. Les adultes se regroupent dans les haies et les bordures de parcelles pour s'alimenter et s'accoupler, en particulier la nuit et en cas de vent important. Ils peuvent s'y trouver jusqu'à 6-10 mètres de hauteur.

Les adultes se déplacent généralement à **moins de 1 km de leur lieu d'émergence**. Ils volent quand le vent est faible ou nul et quand les températures se situent entre 12 et 18°C ; les vols s'arrêtent en dessous de 7°C ou au-dessus de 25°C.

Les différents stades ont des durées de développement variables selon les conditions de température et d'humidité. A 21,5°C, les œufs éclosent au bout de 5 jours, le développement des larves dure 31 jours, celui des pupes 24 jours avant l'émergence des adultes. La température seuil de développement varie de 2°C à 6°C selon les stades considérés.

Les larves sont capables de se déplacer sur 60 cm pour atteindre les racines de plantes-hôtes ; elles sont également capables de quitter leur galerie et d'en coloniser une autre si l'humidité du sol est importante. Les larves sont attirées par le CO₂ et les odeurs de racines de carotte.

Les ennemis naturels de la mouche de la carotte *Psila rosae* sont des champignons entomopathogènes, des insectes coléoptères prédateurs et des parasitoïdes (petits Hyménoptères capables de pondre dans les larves ou les pupes de *P. rosae*).

Il ressort de cette étude que de très nombreux facteurs ont une influence sur les populations d'insectes. Quel que soit l'insecte considéré, certains facteurs semblent communs aux espèces étudiées et déterminants pour expliquer leur installation et leur développement au sein des cultures.

Tout d'abord, les **facteurs abiotiques** (température et humidité de l'air ou du sol, vent, pluie) influencent fortement les dynamiques de population et les vols d'adultes. D'ailleurs les modèles de prévision des vols et des jeunes stades reposent essentiellement sur ces facteurs. D'une façon générale, la baisse des températures ralentit le développement des différents stades. Le vent et la pluie diminue la présence des adultes mouches dans les cultures, et induisent une probable mise à l'abri dans les haies ou les bordures. Les fortes humidités

peuvent défavoriser la survie de certaines espèces comme le thrips, mais au contraire favoriser celle des stades jeunes tels que les œufs ou les larves de 1^{er} stade des mouches.

Les **réservoirs d'individus** ayant passé l'hiver, et émergeants ou devenant actifs au printemps, constituent un élément essentiel à considérer. Les stades qui survivent en hiver sont situés soit dans les plantes ou le sol (larves et nymphes de thrips), soit dans le sol pour les mouches (larves et pupes).

La **dispersion des adultes** ailés est un autre facteur important à considérer. La distance de dispersion des adultes est connue chez les mouches (celle des femelles mouches du chou est de 2-3 km, celle des femelles mouches de la carotte de moins d'1 km) mais pas chez les thrips. De même, on connaît les hauteurs de vol des mouches adultes (moins d'1 mètre chez la mouche du chou, plusieurs mètres chez la mouche de la carotte) mais on ne connaît pas celle des thrips.

Pour tous les insectes étudiés, **l'alimentation des femelles** conditionnent leur fécondité et leur longévité. En effet, il a été montré que les femelles mouches atteignent un nombre optimal d'œufs pondus si elles disposent de sources de glucides et de protéines (nectar et pollen). L'abondance des espèces végétales fleuries dans les haies, les bordures, les talus ou même les cultures, semble donc un élément du paysage, favorable à au développement des populations. La recherche de partenaires sexuels et **les accouplements** jouent également un rôle important pour les mouches, mais ils ne sont pas nécessaires pour les thrips, qui ont une reproduction parthénogénétique.

D'autres facteurs déterminants peuvent contrôler les populations d'insectes ravageurs : les **ennemis naturels**.

Tous ces facteurs jouent un rôle clé dans les dynamiques des populations d'insectes au champ. Cependant, ces facteurs ne sont pas assez bien connus ou ils semblent insuffisants pour expliquer ces dynamiques dans le paysage (Tableau IV-1).

En effet, plusieurs « zones d'ombre » demeurent.

Concernant les réservoirs d'adultes, il n'est pas aisé de savoir avec précision le lieu d'hivernation ou la proportion d'individus concernés. Ainsi, les thrips hivernent-ils majoritairement dans les cultures d'Alliacées ? ou hivernent-ils plutôt dans les bordures (mauvaises herbes) ?

Connaître les capacités de dispersion des espèces est fondamental. La distance de dispersion des adultes est connue chez la mouche du chou (2 à 3 km) et chez la mouche de la carotte (moins d'un km) mais on ne connaît pas celle des thrips du poireau. Les dispersions d'insectes sont limitées en cas de pluie ou de vent fort. Dans le paysage, il apparaît également important de connaître le rôle de certains éléments pour la dispersion des individus et de déterminer à quelle échelle ils jouent un rôle. Par exemple, quel est le rôle des haies dans la dispersion des mouches du chou ou de la carotte ? Les haies jouent-elles le rôle de corridors entre les parcelles cultivées ou au contraire sont-elles des barrières aux déplacements ? Finalement, il semble primordial de connaître **l'échelle spatiale fonctionnelle** de chaque espèce (ce qui semble correspondre à l'étendue minimale du paysage que l'espèce utilise pour survivre) et à notre connaissance, cette échelle n'a pas été déterminée pour les 3 espèces étudiées.

La littérature mentionne la présence des ennemis naturels mais on connaît mal leur impact réel au champ car il est difficile de le mesurer, en particulier pour les espèces de petite taille comme les thrips.



Tableau IV-1: Principaux facteurs-clés (déterminant l'installation et le développement des insectes ravageurs) et leurs limites

| Facteurs-clés | Limites |
|---|---|
| Facteurs abiotiques (température, humidité, vent...) | Facteurs non maîtrisables |
| Réservoirs d'individus | Réservoirs pas toujours bien connus |
| Dispersion des adultes | Dispersion mal connue, en particulier chez certaines espèces (thrips) |
| Alimentation des femelles (apport de protéines nécessaires, en plus de l'apport de glucides, pour permettre une ponte optimale) | Alimentation des femelles peu étudiée |
| Ennemis naturels | Espèces connues mais leur impact réel est mal connu |

- Les **modes de gestion actuellement utilisés se situent au niveau de la parcelle** et peuvent ponctuellement aider à limiter les dégâts ou la présence et la ponte des 3 ravageurs.

Les principaux effets des modes de gestion sont résumés ci-dessous ; certains sont discutés.

- **Précédent culturel** : généralement, on considère que les rotations sont utiles et qu'il est préférable d'éviter, les cultures de même famille végétale, l'année précédente ; cependant, aucune étude ne le démontre. En effet, les cultures hôtes sont généralement dominantes à l'échelle du paysage et compte tenu des capacités de dispersion importantes des insectes, il peut donc être difficile de montrer l'effet positif des rotations. Aucune étude ne s'est penchée sur l'effet des précédents de type sol nu ou jachère ou interculture.

- **Choix de la parcelle**. Il est généralement admis qu'il faut éloigner la culture des autres cultures de même famille végétale. Ceci est supposé mais non démontré pour les thrips (peut être parce que le thrips est une espèce polyphage). Par contre, ça a été démontré chez la mouche du chou (éloigner les cultures de Brassicées d'au moins 400 mètres) et la mouche de la carotte (éloigner les cultures d'Apiacées d'au moins 1 km). L'environnement de la parcelle semble avoir de l'importance. Pour les thrips, la proximité de zones boisées diminuerait les attaques par rapport à des cultures ouvertes ; ce serait peut être dû à un effet barrière des arbres/arbustes ou aux ennemis naturels plus abondants. Chez les mouches, les haies constituent des zones d'alimentation et d'accouplements pour les adultes. Chez la mouche du chou, les haies pourraient aussi avoir un effet barrière, limitant les mouvements des adultes entre les parcelles. Les bordures fleuries (bandes enherbées, talus) peuvent aussi jouer le rôle d'abris et d'alimentation pour les mouches. On peut également s'interroger sur la présence de plantes-hôtes permettant le développement des ravageurs et leur survie en hiver, dans ces bordures. Est-ce que d'autres Brassicacées/Apiacées dans les bordures servent au développement des mouches du chou ou de la carotte ? Est-ce d'autres plantes de bordures servent au développement des thrips du poireau (espèce polyphage) ? Si c'est le cas, peut-on imaginer les éliminer ? Et si on les élimine, ne risque-t-on pas de diminuer l'impact positif des ennemis naturels ?

- **Sol**. Aucune étude ne montre que la nature de sol a une influence sur les dégâts observés par les 3 ravageurs. Par contre, le travail du sol semble être un facteur à prendre en compte. Par exemple, l'aération du sol pourrait atténuer les dégâts par les thrips ; les labours profonds (15 cm) en hiver diminuent le taux d'émergence des mouches du chou au printemps ; aucune étude n'a examiné l'influence du travail du sol sur la mouche de la carotte.

- **Cultures**. Il existe des variétés plus ou moins résistantes aux 3 ravageurs et beaucoup d'auteurs indiquent qu'il est nécessaire de continuer les recherches dans cette voie, afin de d'améliorer la capacité des plantes-hôtes à stimuler leurs défenses ou compenser les agressions. Agir sur les dates de cultures permet d'éviter les périodes de présence des ravageurs à un moment où la plante est encore fragile. D'après la littérature, la plantation tardive des poireaux, choux et le semis tardif de carottes permet de limiter les dégâts. Cependant, il serait judicieux de savoir quand reculer ces plantations ou semis. L'influence de la densité de plantation n'a pas été étudiée (sauf pour la mouche du chou, pour qui une forte densité de colza diminue les pontes et les dégâts). Les stades

sensibles de la culture sont peu connus ; néanmoins, on sait que la mouche du chou préfère pondre sur des plantes de grande taille et que la mouche de la carotte ne pond que sur des carottes à partir du stade 2 feuilles vraies et de préférence sur des plantes dont le feuillage n'est pas trop grand (entre 5 et 20 cm de hauteur) et ne couvre pas le sol. Une récolte précoce peut limiter les dégâts ultérieurs des mouches ; mais on ne sait pas si elle pourrait limiter les dégâts des thrips. Les cultures pièges de phacélie ou de sarrasin pourraient être intéressantes contre le thrips mais celles de navets n'ont pas données de résultats probants contre la mouche du chou et aucune étude n'a porté sur les cultures pièges contre la mouche de la carotte.

- **Apports.** Les apports importants d'azote ou de soufre, respectivement dans les cultures de poireaux ou de choux, augmentent le nombre de ravageurs. Il est donc important de limiter ces apports. Cependant, on peut se demander quelle est la quantité minimale d'engrais à apporter de façon à avoir un bon rendement, sans favoriser trop les ravageurs ? Les autres types d'apports ont été peu étudiés ou n'ont pas montré d'effets intéressants (peut être qu'un amendement calcaire limiterait les thrips ? un apport de cendres diminuerait les pontes de la mouche de la carotte ?)

- **Irrigation.** Les forts arrosages entraînent une mortalité importante des thrips. Au contraire, les fortes humidités favorisent la survie des jeunes stades de mouches ; il semble donc préférable de limiter les irrigations dans les cultures de choux et de carottes.

- **Cultures intercalaires.** Les cultures intercalaires peuvent donner de bons résultats mais à condition qu'elles n'entrent pas en compétition avec la culture. Trèfle, phacélie ou sarrasin semblent des cultures intercalaires potentiellement intéressantes vis-à-vis des thrips du poireau, trèfle (?) ou blé contre la mouche du chou, oignons ou luzerne(?) contre la mouche de la carotte.

- **Couverts.** On connaît mal l'effet des paillages sur les 3 ravageurs. Le dépôt de fibres EVA (Ethylene vinyl acetate) ou un paillis en fibres de bois hydrophiles colorées à la base des plantes ont pu entraîner la réduction de la ponte par la mouche du chou ; cependant, on peut se poser la question de la faisabilité de cette technique, si on considère l'étendue importante des cultures. Un paillage avec du blé semble permettre de diminuer le nombre de larves de thrips par rapport à un sol nu (sauf en cas de fortes infestations).

- **Prévision et surveillance des vols.** Prévoir l'apparition des différents stades (vols d'adultes, œufs, larves) par l'utilisation de modèles est d'une grande utilité. La surveillance des populations par piégeage (piégeage d'adultes ou d'œufs) est une méthode complémentaire. Plusieurs auteurs remarquent que le piégeage d'adultes ne reflète pas bien les populations ; il semble que le comptage d'œufs sur les plantes soit un meilleur critère. La surveillance peut se faire aussi par contrôle visuel des stades présents sur les plantes

- **Traitements.** L'utilisation massive d'insecticides ont conduit parfois à des lignées d'insectes résistants (cas des thrips) ; cette utilisation doit donc être la plus limitée possible, d'autant que ces insecticides agissent également sur les ennemis naturels. Les techniques d'application se doivent aussi d'être améliorées, pour que les insecticides atteignent au plus près leur cible (au pied des choux ou entre les feuilles de poireaux par exemple (cf. tableau II-5-1 page 38-39). Connaître les moments des déplacements et des pontes des femelles dans les cultures, permet d'atteindre le maximum d'individus. Ainsi, la littérature indique qu'il est préférable de traiter les feuilles de poireau en début d'après midi par temps chaud ; traiter les feuilles de chou l'après midi, quand les températures sont supérieures à 10°C et en absence de pluie ; traiter les feuilles de carotte par temps chaud et de préférence entre 16h et 21h. Certaines substances peuvent être répulsives ou réduire la ponte ou le développement. Pour lutter contre les thrips, l'application sur les feuilles d'huile essentielles, de kaolin ou de pyriproxyfen (?) peut s'avérer efficace. L'huile de Neem pulvérisée sur le feuillage ne semble pas utile pour lutter contre la mouche du chou ; par contre, le DMDS déposé au pied des choux peut limiter la ponte de la mouche du chou et attirer ses prédateurs, le méthyl-salicylate peut augmenter la prédation des œufs (ces substances ont un effet répulsif « push »). Le (Z)-3-hexenyl acetate peut stimuler la ponte (son effet est attractif « pull »). Certains auteurs suggèrent qu'il serait utile de confirmer l'intérêt de ces substances chimiques répulsives (dans la culture), et attractives (en bordure de culture) dans une stratégie push-pull. A notre connaissance, il n'y a pas eu d'essais sur l'effet de substances répulsives contre la mouche de la carotte. Continuer à rechercher des substances répulsives, ovicides ou larvicides est une perspective à développer.

- **Barrières physiques.** Utiliser des filets couvrants, en particulier en début de culture, est une stratégie pertinente pour éviter les pontes des 3 ravageurs. Toutefois, il s'assurer de placer des filets en bon état, avant les attaques et sans qu'aucun adulte n'émerge sous le filet. L'utilisation de filets verticaux est pertinente pour la mouche du chou ; les femelles qui volent à une hauteur de moins de 1 mètre sont arrêtées par les filets (90 à 130 cm) qui les empêchent de pénétrer dans les cultures. Par contre, l'intérêt des filets verticaux n'est pas connu pour lutter contre les thrips et l'intérêt est nul pour la mouche de la carotte car les femelles sont capables de voler à plusieurs mètres de hauteur.

- **Auxiliaires ou ennemis naturels.** De nombreux ennemis naturels de ravageurs (champignons, bactéries ou nématodes entomopathogènes, insectes prédateurs et parasitoïdes) sont connus mais comme il a été dit plus haut, il est difficile de se faire une idée de leur impact réel au champ.

- **Conduite en cas d'attaques importantes.** Aucune étude n'indique de conduite à tenir en cas d'infestations importantes par le thrips du poireau ou la mouche du chou. Par contre, il est conseillé d'arracher rapidement les carottes attaquées par la mouche de la carotte, ou de les enfouir profondément par labour.

Ces modes de gestion peuvent apporter des solutions ponctuelles à l'attaque des ravageurs mais il ressort de cette étude que leur mode d'action n'est pas toujours bien établi, peut être parce que de nombreux autres facteurs influencent les résultats (zone géographique, conditions pédo-climatiques, lignée de ravageurs, niveaux de populations, variétés végétales...). D'autres études complémentaires seraient bienvenues pour préciser l'effet de ces modes de gestion en Basse-Normandie.

➤ **L'étude de terrain** que nous avons menée détermine le contexte des cultures légumières en Basse-Normandie. Le paysage agricole dans la Manche apparaît plutôt constant avec des cultures légumières récurrentes (poireaux, carottes, choux) et des bordures de parcelles plutôt riches en haies et talus enherbés (sauf dans la zone du Mont St Michel). L'abondance des cultures légumières comme plantes-hôtes et l'abondance des éléments linéaires (haies, talus) constituant des lieux d'abris, d'alimentation et d'accouplements pour les ravageurs rendent donc le contexte paysager très favorable aux déplacements des ravageurs et à leur survie au sein du paysage.

➤ Très peu d'études se sont intéressées à l'effet du paysage (à une échelle supérieure à celle de la parcelle étudiée) sur les populations des 3 insectes ravageurs qui nous intéressent ici. En effet, ces études sont longues, coûteuses et difficiles à mettre en œuvre. Cependant, pour avoir une bonne idée des phénomènes liés au développement des populations d'insectes dans la zone de production légumière de la Manche, il faudrait envisager des études de grande envergure sur au moins 30 parcelles, et sur plusieurs années avec un suivi approfondi des populations de ravageurs. Ainsi, mieux connaître les successions des stades sur le terrain, les éléments qui permettent la survie des ravageurs dans le paysage et l'échelle spatiale fonctionnelle des 3 espèces constituerait des atouts pour progresser.

En conclusion, cette étude a permis d'établir la liste des principaux facteurs déterminant l'installation et le développement de chaque insecte ravageur (thrips du poireau *Thrips tabaci*, mouche du chou *Delia radicum* et mouche de la carotte *Psila rosae*). Cela a été possible par une **synthèse approfondie des connaissances bibliographiques** existantes sur les 3 ravageurs (cycles, mode de vie, effets des modes de gestion et du paysage...) au plan international. Ensuite, cette étude a permis de faire le **point sur les connaissances manquantes et les questions** que l'on peut encore se poser. De plus, elle présente l'avantage d'être sous une forme **accessible et facile à lire**. Par exemple, les tableaux présentant les effets des modes de gestion seront facilement consultables et pourront être mis en parallèle avec d'autres bio-agresseurs pour une culture donnée. Finalement, cette synthèse **apporte des éléments de discussion indispensables pour construire des systèmes de cultures économes en intrants**. Cependant, du fait de la multitude et de la complexité des facteurs, l'étude ne permet pas fournir de recommandations « toutes faites » pour lutter contre ces 3 ravageurs.

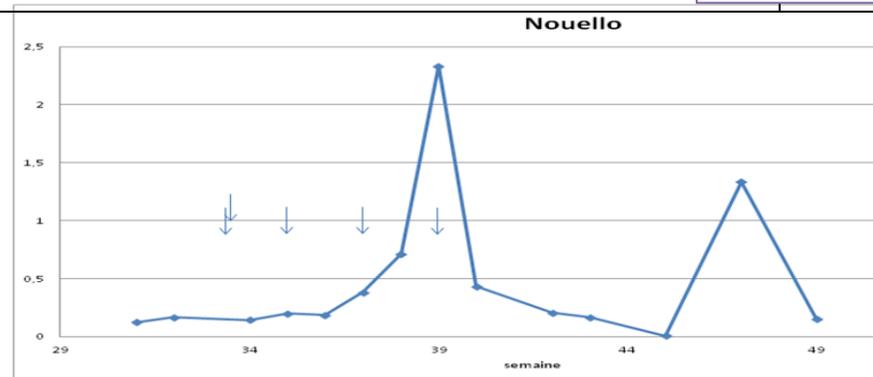
De plus, l'étude de terrain montre que la zone agricole de la Manche (où se situent les 12 parcelles) est une zone favorable aux 3 insectes, car les plantes-hôtes (poireau, carotte, chou) sur lesquelles les insectes se développent sont fréquentes et les haies et talus qui sont des lieux potentiels d'abri, d'alimentation ou d'accouplement, sont également fréquents. Cette étude conclut que d'autres informations sont nécessaires pour mieux comprendre les phénomènes liés à ces insectes **à l'échelle du paysage et au fil des ans**.

Il est probable que c'est tout un ensemble de pratiques maîtrisées (à ces échelles là), qui permettra de limiter les populations à un niveau acceptable (équilibre ravageurs/ennemis naturels) en évitant les pullulations. Il serait sans doute souhaitable de s'intéresser aux ravageurs, non seulement lorsqu'ils sont visibles (à la belle saison) mais aussi lorsqu'ils sont « cachés » en particulier en hiver (dernière génération de l'année (annexes V-1 à 3)). A terme, c'est la collaboration des différents acteurs de la filière [centres de recherches (université, INRA), centres techniques et producteurs] qui permettra d'imaginer ces ensembles de pratiques et de construire des systèmes de culture innovants.

Annexe V- 1 : Culture de poireau et thrips du poireau – Exemple de culture sur la côte Ouest en 211

| | janvier | | février | | mars | | avril | | mai | | juin | | juillet | | août | | septembre | | octobre | | novembre | | décembre | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--|---|---------|---|------|---|-------|---|-----|----|------|----|---------|----|------|----|-----------|---|---------|----|----------|----|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| sem. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 |
| présence de cultures poireaux | | | | | | | | | | | | | | | | | | plantation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Risque thrips | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Stades supposés des thrips | hibernation des thrips (adultes et larves) : dans le sol des cultures de poireaux ? dans d'autres plantes : mauvaises herbes ? autres cultures ? Gén. 6 hivernante ? autre gén. ? | | | | | | | | | | | | | | | | | Succession de 5-6 générations (d'après les données du modèle de prévision 2011) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Gén. 6 hivernante ? | | | | | | | | | | | |

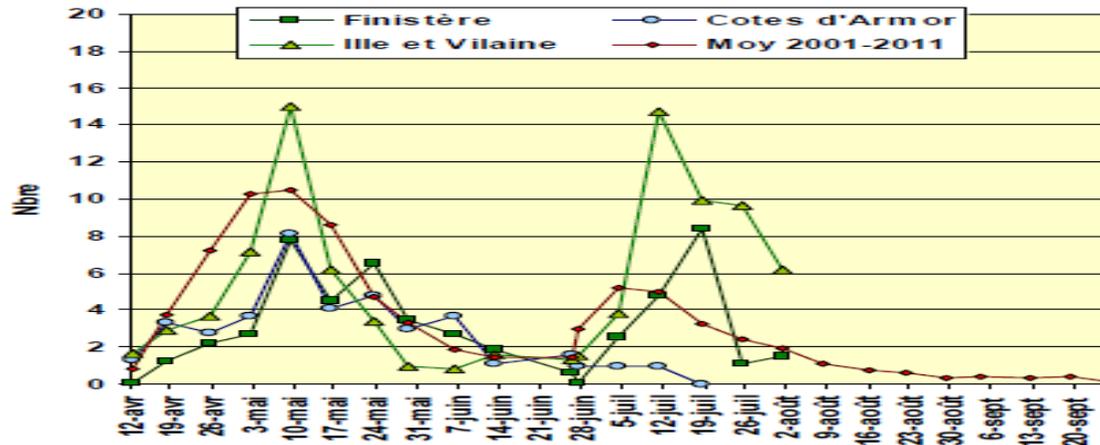
Evolution du nombre en thrips adultes piégés sur une parcelle de la Côte Ouest en Normandie en 2011.



Annexe V- 2 : Culture de choux et mouche du chou

| | janvier | | | février | | | | mars | | | | | avril | | | | | mai | | | | | juin | | | | | juillet | | | | | août | | | | septembre | | | | octobre | | | | novembre | | | | décembre | | | |
|-----------------------------|---|---|---|---------|---|---|---|------|---|----|----|----|-------|------------------------------------|----|----|----|-----|--------------|----|----|----|------|----|----|----|----|---------|---------------|----|----|----|------|----|----|----|-----------|----|----|----|---------|----|----|----|----------|----|----|----|----------|----|----|----|
| sem. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 |
| cultures | plantation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Risque mouche | | | | | | | | | | | | | | risque élevé | | | | | risque moyen | | | | | | | | | | risque faible | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Stades supposés des mouches | diapause des pupes dans le sol des cultures de choux ou d'autres Brassicæ | | | | | | | | | | | | | <p>Succession de 3 générations</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

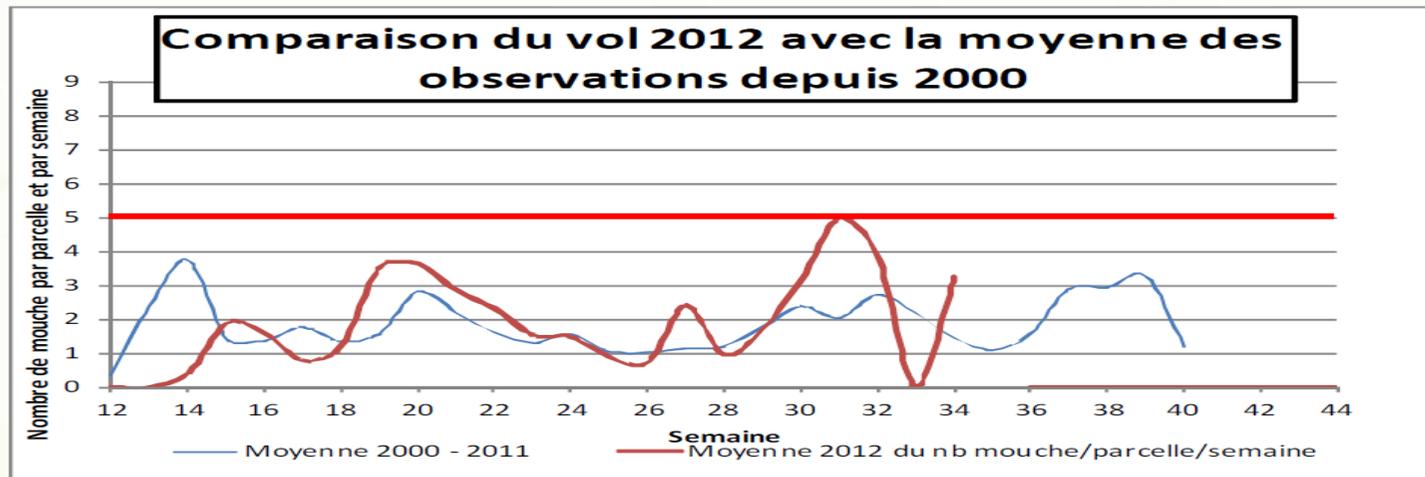
Evolution du nombre moyen d'œufs de mouche du chou par piège, en Bretagne au cours d'une année, en 2012 et de 2001 à 2011.



Annexe V- 3 : Culture de carottes et mouche de la carotte

| | janvier | | février | | mars | | avril | | mai | | juin | | juillet | | août | | septembre | | octobre | | novembre | | décembre | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---|---|---------|---|------|---|-------|---|---------------------------------|----|------|----|---------|----|------|----|-----------|---------------|---------|-----------|--------------|----|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------------|----|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| sem | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 |
| culture | plantation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| risque mouche carotte | | | | | | | | | | | | | | | | | | risque faible | | risq. moy | risque élevé | | | | | | | | | | | | | | | | | risque moyen | | risq. faibl | | | | | | | | | | | | |
| Stades supprimés des mouches | - diapause de certaines pupes dans le sol des cultures de carottes ou d'autres Apiacées - certaines larves continuent leur développement l'hiver sans diapause | | | | | | | | Succession de 3 générations | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Evolution du nombre moyen d'adultes de mouche de la carotte piégés par semaine et par parcelle, en Bretagne en 2012 (courbe rouge) et de 2000 à 2011 (courbe bleue).





BIO-STUDIES



EcoPhytoSys-Légumes



111

