



HAL
open science

Évaluation et prévision du risque lié aux populations de limaces nuisibles aux grandes cultures : constitution d'un réseau expérimental permettant de comprendre l'impact des pratiques agricoles et des facteurs environnementaux (RESOLIM)

André Chabert, Pierre Taupin, Joséphine Peigné, Francois Brun, Sébastien Gervois, Céline Robert, Xavier Crebassa, Marion Puysservert, Corinne Lajoie, Pascal Boulin, et al.

► To cite this version:

André Chabert, Pierre Taupin, Joséphine Peigné, Francois Brun, Sébastien Gervois, et al.. Évaluation et prévision du risque lié aux populations de limaces nuisibles aux grandes cultures : constitution d'un réseau expérimental permettant de comprendre l'impact des pratiques agricoles et des facteurs environnementaux (RESOLIM). *Innovations Agronomiques*, 2018, 63, pp.321-335. 10.15454/1.5191186326957144E12 . hal-01837863

HAL Id: hal-01837863

<https://hal.science/hal-01837863>

Submitted on 12 Jul 2018

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Evaluation et prévision du risque lié aux populations de limaces nuisibles aux grandes cultures : constitution d'un réseau expérimental permettant de comprendre l'impact des pratiques agricoles et des facteurs environnementaux (RESOLIM)

Chabert A.¹, Taupin P.², Peigne J.³, Brun F.⁴, Gervois S.⁵, Robert C.⁵, Crebassa X.⁶, Puysservert M.⁶, Lajoie C.⁷, Boulin P.⁸, Thibord J.B.⁹, Mottin E.¹⁰, Charrier M.¹⁰

¹ ACTA, ICLB-Vetagrosup 1 avenue Bourgelat 69 280 Marcy l'étoile

² Arvalis-Institut du végétal, station expérimentale, 91 720 Boigneville

³ ISARA, 23 Rue Jean Baldassini, 69007 Lyon

⁴ ACTA INRA - UMR 1248 AGIR, 24 Chemin de Borde Rouge – Auzeville CS 52627 31326 Castanet Tolosan cedex

⁵ Terres Inovia - Centre de Grignon, Avenue Lucien Brétignières, 78850 Thiverval-Grignon

⁶ De Sangosse, "Bonnal" - CS10005 - 47480 PONT DU CASSE

⁷ Phyteurop, 55, rue Raspail - CS 80105, 92594 Levallois-Perret Cedex

⁸ Bayer SAS Activités Crop Science 16, rue Jean-Marie Leclair CS 90106 69266 Lyon Cedex

⁹ Arvalis-Institut du végétal, 21 Chemin de Pau, 64121 Montardon

¹⁰ Université de Rennes 1, l'UMR 6553 EcoBio, 2 rue du Thabor – CS 46510 – 35065 Rennes Cedex,

Correspondance : andre.chabert@acta.asso.fr

Résumé

En grandes cultures, de par la destruction des semences et des jeunes plantules, les attaques de limaces sont reconnues comme très nuisibles. Ces dégâts sont souvent amplifiés lors de conditions climatiques favorables aux limaces et lors de la mise en œuvre de pratiques culturales réduisant l'intensité du travail du sol. La mise en place d'un réseau conséquent d'observations de plus de 80 parcelles et au sein d'essais avec différents systèmes de cultures a fourni de nombreuses données qui ont été mises en regard avec des informations issues d'autres études et de la bibliographie. Des limaces extraites de ce réseau ont fait l'objet d'études au laboratoire permettant de préciser leur thermotolérance et leur composition biochimique au cours de leur croissance. L'analyse de l'ensemble des données apporte des précisions concernant : la nuisibilité des limaces, leurs traits de vie dans les champs cultivés au cours des saisons, les effets des différentes pratiques agricoles, de la faune auxiliaire et des conditions météorologiques. Ce projet a contribué à la construction d'un outil d'évaluation multicritère du risque limace et d'un modèle conceptuel de dynamique des populations de limaces tenant compte des facteurs climatiques. Néanmoins leur développement informatique reste à faire afin de les rendre disponibles.

Mots-clés : limaces, thermobiologie, systèmes de culture, modélisation, traits de vie.

Abstract: Assessment and prediction of the risk linked to populations of harmful slugs affecting arable crops: creation of an experimental network to understand the impact of agricultural practices and environmental factors (RESOLIM)

In field crops, by the destruction of seeds and young seedlings, slug attacks are recognized as very harmful. This damage is often amplified in climatic conditions favorable to slugs and in the implementation of cultivation practices reducing the intensity of tillage. A large network of observations of more than 80 farmer plots and crop plant trials provided many data that were compared with information from other studies and literature. Slugs sampled from this network were studied in the laboratory in order to specify their thermotolerance and their biochemical composition during their

growth. Data analysis provided details concerning the harmfulness of slugs, their life traits in fields cultivated during the seasons; the effects of different agricultural practices, beneficial organisms and weather conditions. This project contributed to the construction of a multicriteria assessment tool for slug risk and a conceptual model of slug population dynamics taking into account climatic factors. Nevertheless, their computer development remains to be made to make them available.

Keywords: slugs, thermobiology, crop systems, modeling, life traits.

Introduction

Les limaces grises et noires voient leurs populations augmenter les années favorables à leur activité comme ce fut le cas en 2013. Le risque de destruction des semis de colza, de tournesol, de maïs et de céréales à paille (orge, blé...) devient si important que les traitements molluscicides concernent alors plus de 4 millions d'hectares. Cette intensité peut trouver son explication par la conjonction de séquences climatiques très propices, mais aussi par la mise en œuvre de pratiques agricoles favorisant leur développement. Les agriculteurs ont du mal à estimer techniquement ce risque d'attaque car les limaces sont difficiles à détecter au sein des parcelles et leurs traits de vie sont encore mal connus.

Cet enjeu est considérable du fait de la nécessité de limiter le nombre de traitements pour répondre aux objectifs du plan ECOPHYTO et aux impératifs concernant la productivité des exploitations. Ainsi, le projet Casdar RESOLIM « *Evaluation et prévision du risque lié aux populations de limaces nuisibles aux grandes cultures : constitution d'un réseau expérimental permettant de comprendre l'impact des pratiques agricoles et des facteurs environnementaux* » a été construit pour pallier le déficit de la recherche nationale sur ce sujet qui n'a pas été traité en profondeur depuis de nombreuses années.

Dans ce contexte, l'objectif principal a été d'améliorer l'évaluation et la prévision des risques vis-à-vis des limaces. Ce qui suppose des informations pertinentes, mises à jour et suffisamment précises pour évaluer les niveaux de risques à différentes échelles : parcelles, exploitations et régions.

Le projet s'inscrit dans les objectifs de l'axe 5 du plan ECOPHYTO 2018 pour l'élaboration du bulletin de santé des végétaux (BSV). Parmi les modèles disponibles actuellement, un modèle ACTA, utilisé depuis 1999 avec une société privée et depuis 2013 dans le cadre du réseau d'observation en grandes cultures, VIGICULTURES®, pour l'édition du BSV, décrit les périodes favorables à l'activité des limaces. D'autres modèles climatiques existent depuis quelques années en Angleterre (Choi *et al.*, 2004, 2006 ; Willis *et al.*, 2006, 2008) mais aucun d'entre eux n'a été testé en France.

Ces différents modèles demandent à être améliorés à partir d'une meilleure connaissance des réponses des limaces aux conditions thermiques et hydriques, en particulier durant les phases estivales et hivernales qui sont déterminantes dans la dynamique des populations. Les objectifs de ce projet étaient de fournir, par différentes voies de recherche, de nouvelles connaissances destinées à l'analyse et l'amélioration de ces modèles.

1. Principaux objectifs et organisation du projet

Le projet Casdar RESOLIM a été structuré en trois actions dont les résultats combinés répondent à l'objectif principal de mieux appréhender l'évolution actuelle des populations de limaces et le risque associé.

Action 1 : Capitaliser les connaissances et méta-analyses

L'objectif de cette action était de rassembler le plus grand nombre de connaissances et de données pour optimiser les études de terrain, de laboratoire et les évaluations de modèles qui ont été mises en œuvre dans le cadre des actions 2 et 3.

Action 2 : Influence des pratiques agricoles et des facteurs environnementaux sur les populations de limaces dans le cadre d'un réseau expérimental.

Les objectifs de cette action étaient de :

- Caractériser et quantifier les effets du travail du sol, des différentes pratiques agricoles, de la faune auxiliaire, des cultures et du climat sur le développement des limaces.
- Evaluer la nuisibilité des limaces à partir d'une base de données d'essais rassemblant de nombreuses études.
- Etudier les réponses des limaces au sein du réseau expérimental en suivant l'évolution de la structure des populations de limaces dans les parcelles cultivées et de déterminer l'influence des facteurs trophiques, cultures en place, cultures intermédiaires.
- Conduire au laboratoire des études de thermobiologie et de composition des limaces en métabolites primaires afin d'acquérir des données sur les traits de vie des limaces impossibles à obtenir par des études de terrain.

Action 3 : Conception d'outils d'aide à la décision

Les deux principaux objectifs ont été d' :

- Utiliser les modèles existants et les comparer avec les données expérimentales du projet.
- Envisager de nouvelles voies d'amélioration des modèles via les méthodes d'évaluation multicritères et la conception d'un modèle dynamique des populations.

2. Matériels et méthodes

Le projet RESOLIM s'est basé sur un réseau d'observation de limaces de 82 parcelles réparties dans les principales zones de grandes cultures concernant 20 départements (01,02,08,14,18,21,32, 35,37,38,47,54,60,61,69,76,80,85,89,91) et présentant les principales grandes cultures (*nombre de parcelles/années, culture : 23, blé ; 26, colza ; 13, maïs ; 5, orge printemps ; 1, orge d'hiver ; 6, soja ; 1, trèfle ; 1, bettrave ; 3, féverole ; 2, prairie ; 1, tournesol.*).

Ces suivis réalisés dans 82 parcelles représentent un total de 843 données de piégeage. Ils ont été réalisés dans 21 parcelles dites « biologie » destinées à suivre le développement de différentes générations de limaces sur une période de 2 ans et dans 61 parcelles dites « nuisibilité » estimant l'activité/densité de limaces durant la période de sensibilité des cultures aux attaques. Les parcelles « biologie » ont fait l'objet d'un piégeage hebdomadaire de limaces en période d'activité à l'aide de 12 pièges de type INRA (Hommay, 1995), les parcelles « nuisibilité » ne l'ont fait seulement autour du semis avec 6 pièges. Les limaces issues de certaines parcelles « biologie » ont été prélevées mensuellement pour les études de laboratoire.

Ce réseau, ainsi constitué, a également permis de fournir à l'université de Rennes I (UMR 6553 EcoBio) des limaces afin de réaliser des études de thermobiologie basées sur les travaux de Bale (1985), Cook (2004) et Ansart *et al.*, 2014, ainsi que des analyses biochimiques des tissus de limaces à partir des méthodologies utilisées par Storey *et al.*, 2007 et Nicolai *et al.*, 2011. Dans le cadre de ce projet, nous avons essentiellement étudié les données sur la limace grise (*Deroceras reticulatum*) espèce la plus fréquente, tandis que les données des limaces noires (*Arion hortensis* et *A. distinctus* selon Welter-Schultes, 2012), moins fréquentes, n'ont été que partiellement analysées.

En terme d'analyse de données, nous nous sommes également basés sur un projet enveloppe recherche ACTA de 1995 à 1997 qui grâce à un suivi de 43 parcelles et la réalisation de 640 piégeages a permis de mettre au point un premier modèle de prévision du risque limaces.

Au début 2014, nous avons également pu réaliser plus de 600 enquêtes agriculteurs sur leur perception de la nuisibilité des limaces et sur les stratégies de protection mises en place. Par ailleurs, nous avons pu extraire des données de piégeage de limaces du réseau de Surveillance Biologique du Territoire (SBT). Sans pouvoir être présentées dans le cadre de cet article, ces données ont pu largement corroborer et enrichir les résultats obtenus.

Pour la partie modélisation de ce projet, nous avons réalisé une analyse fonctionnelle de 10 modèles, nous avons ensuite identifié ceux qui étaient suffisamment renseignés, utilisables avec les données météorologiques disponibles et qui correspondent aux objectifs du projet RESOLIM. Les modèles de Chabert *et al.*,(1999) et de Choi *et al.*,(2004) ont été programmés sous R. Le premier modèle a été également développé dans la cadre de Vigiculture® et est régulièrement utilisé dans le cadre de la rédaction des bulletins de santé des végétaux (Siné *et al.*, 2010). A partir des données météorologiques de chaque date et chaque site de l'ensemble des lieux d'observation du réseau de piégeage, ces modèles ont été comparés aux données de terrain.

Par ailleurs, il a été décidé de construire des méthodes d'évaluations multicritères utilisant le système DEXi (Bohanec *et al.*, 2008 ; Aubertot *et al.*, 2013) afin de réaliser un outil d'évaluation *a priori* d'un système de culture et de son environnement proche vis-à-vis du risque limaces (Brun *et al.*, 2014).

3. Résultats

3.1 Action 1 : Capitaliser les connaissances et méta-analyses

Afin d'avoir une approche de types « méta-analyses », nous avons rassemblé de la documentation sur différents critères d'intérêt en fin de projet. Ainsi, plus de 280 articles sont rassemblés sous le logiciel en ligne ZOTERO. Cette analyse des données de la bibliographie a permis de réaliser :

1) Une synthèse sur les méthodes de piégeage afin d'établir en toute connaissance de cause les modes opératoires relatifs aux différentes expérimentations du projet et au réseau de piégeage.

L'analyse fine de 22 publications internationales (articles scientifiques ou ouvrages généralistes) a permis de réaliser les protocoles d'expérimentation pour le suivi des parcelles « nuisibilité » et des parcelles « biologie » du réseau de piégeage via l'analyse d'informations relatives à l'utilisation des pièges, à la durée de mise en place, au délai de collecte et à la répartition sur les parcelles.

2) Une synthèse sur les effets des pratiques agricoles sur les populations de limaces. Selon la démarche utilisée dans le cadre des méta-analyses, les données quantitatives des publications sont extraites des articles, analysées et des variables intermédiaires sont calculées pour rassembler les données et les formuler de manière à ce qu'elles soient facilement renseignées par les utilisateurs. Cela nous a permis de rassembler les informations concernant l'effet de l'ensemble des pratiques agronomiques et d'avoir une idée de la gamme de variations selon les différents contextes rencontrés. Ces différents éléments ont été rassemblés dans l'outil DEXi_limaces présenté dans l'action 3 de ce projet et dans son mode d'emploi.

3) Par ailleurs de nombreuses informations complémentaires ont été rassemblées via l'analyse de la bibliographie, la mise en place d'essais analytiques, la réalisation d'enquêtes auprès d'agriculteurs et l'analyse de réseaux d'observation dont celui de RESOLIM. Leurs compilations et leurs comparaisons ont permis de renseigner : i) Les caractéristiques des différents traits de vie des limaces dans des parcelles de grandes cultures, ii) l'influence des facteurs environnementaux, notamment microclimatiques, sur l'activité et la croissance des limaces iii) l'influence de la présence de la faune auxiliaire.

3.2 Action 2 : Influence des pratiques agricoles et des facteurs environnementaux sur les populations de limaces dans le cadre d'un réseau expérimental.

3.2.1 Influence des pratiques agricoles et de la faune auxiliaire prédatrice sur les populations de limaces

Dans la littérature scientifique, nous avons recensé 25 essais de type « analytique » de 1994 à 2004 concernant les effets du travail du sol sur les limaces. Il apparaît en moyenne sur l'ensemble des études que les populations de limaces sont 5 fois plus importantes en semis direct qu'en labour et qu'elles sont 3 fois plus importantes en semis direct qu'en travail superficiel. L'effet des différentes pratiques semble être moins important à partir de l'analyse des données du réseau d'observation du projet RESOLIM.

Certaines données du réseau d'observations du SBT sont d'une plus faible ampleur. Ainsi, dans les parcelles non labourées, il y a 1,6 fois plus de limaces qu'en labour. Le déchaumage a un effet positif puisque les parcelles concernées ont 2,3 fois moins de limaces que les parcelles non déchaumées. Les parcelles déclarées en semis direct ont 1,4 fois plus de limaces que les parcelles en semis traditionnel. Dans les parcelles limoneuses, il y a eu 1,25 fois plus de limaces que dans celles plus argileuses.

Dans les études réalisées à Boigneville sur des comparaisons de systèmes de cultures, il y a eu une relation entre le nombre de limaces et de carabes capturés. En effet, dans cette situation, les captures de carabes sont 2 fois plus importantes quand les populations de limaces y sont environ 3,5 fois plus faibles.

3.2.2 Évaluation de la nuisibilité des limaces et des règles de décision associées à leur présence

A partir de 2015, il a été constitué une base de données d'essais « nuisibilité » rassemblant les études RESOLIM, les études du projet de l'enveloppe recherche ACTA de 1995 à 1997 et de nombreux essais des instituts techniques et de firmes phytosanitaires. 250 observations de dégâts de limaces ont été répertoriées sur différentes cultures : blé (111), colza (76), tournesol (22), maïs (16), orge (19) et autres cultures (6). L'analyse des relations entre le nombre de limaces et les pertes de plantes en culture de colza indique que pour une même densité de piégeage, le pourcentage de pertes est très variable. Dès 0 à 2 limaces par m², les pertes peuvent aller de 0 à 100 %, néanmoins la médiane est de 12 % ce qui est bien inférieur aux catégories de piégeage supérieures à 2 limaces par m² dont les médianes dépassent 30 %.

En culture de blé (Figure 1), à partir d'un effectif de 20 limaces au m² (correspondant à la valeur médiane des 29 données retenues), nous constatons une croissance importante des dégâts en végétation. Néanmoins, une grande variabilité rend difficile l'établissement d'un seuil de nuisibilité comme dans le cas du colza.

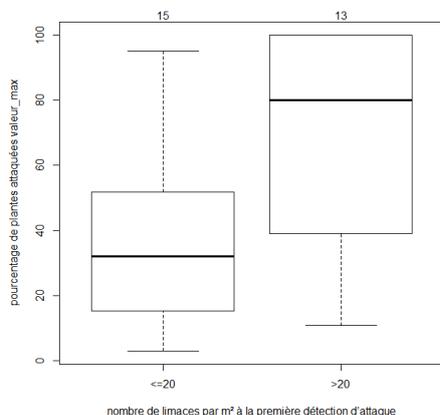


Figure 1 : Relation en culture de blé entre le nombre de limaces par m² et le pourcentage de plantes attaquées.

Des essais d'explication de cette variabilité pour les blés ont été testés en incluant dans l'analyse le type de travail du sol, le stade et le type de sol sans pour autant améliorer la situation. Ainsi, à partir de ce jeu de données, il n'a pas été possible d'établir une relation directe et stricte entre un nombre de limaces piégées et un niveau de dégâts. Les sources d'hétérogénéité peuvent provenir de nombreux facteurs : le travail du sol, le précédent, le stade de la culture, le type de sol et les conditions climatiques à différents stades. Une nouvelle analyse de ces données serait nécessaire à la lumière d'un nouveau développement de la modélisation qui tiendrait compte du climat lors des piégeages et de ses conséquences sur l'expression des dégâts. En tout état de cause l'apport de ces études est important car la gamme de variabilités des piégeages et de l'expression des dégâts est maintenant connue dans un large éventail de situations. La quantité de données rassemblées pourra certainement être valorisée dans un volet de modélisation d'un nouveau projet de recherche.

3.2.3 Mesure des réponses des limaces au sein du réseau expérimental

Réseau de piégeage « biologie » et facteurs trophiques

L'objectif de cette action était de suivre l'évolution de la structure des populations de limaces dans les parcelles cultivées et de déterminer l'influence des facteurs trophiques.

3.2.3.1 Biologie des limaces

Le projet RESOLIM nous a permis de reformuler les données du réseau de piégeage de limaces mis en place durant la période 1995-1997 et de décrire le cycle de vie de la limace grise. Ainsi, à l'époque des semis de colza, les limaces viennent d'éclore et restent de petite taille pendant un mois, puis leur croissance s'accélère. Les individus de cette génération « automnale » restent présents jusqu'au mois de mars suivant, période où une nouvelle génération « printanière » apparaît dans la culture de colza pour se développer jusqu'au mois de juillet.

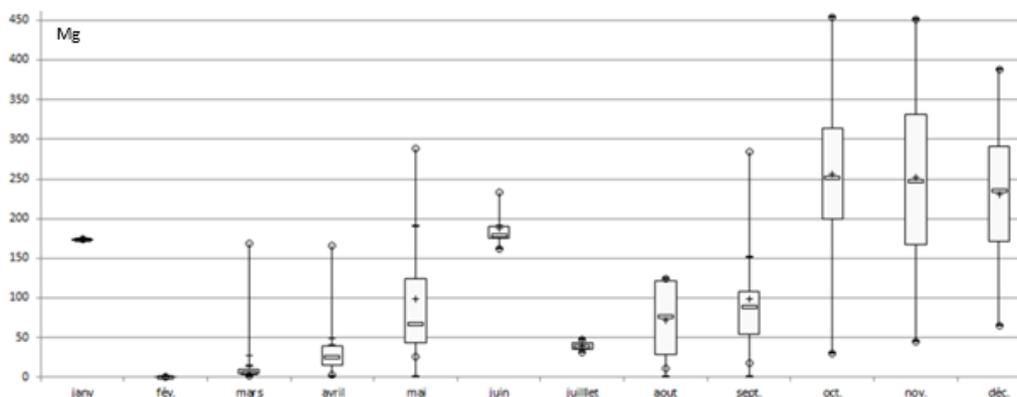


Figure 2 : Évolution de la biomasse en mg des limaces et de la variabilité associée de l'ensemble du réseau de parcelles du projet RESOLIM 2013-2015 (Remarques : l'unité du graphique correspond à la masse de limaces qui ont été conservées dans de l'alcool puis pesées après être essuyées : masse alcoolique)

Dans le réseau de piégeage de RESOLIM (Figure 2), nous retrouvons les deux pics de développement, un au printemps et un à l'automne, correspondant aux deux générations de limaces. Il est à noter que les limaces deviennent nettement plus grosses en automne, ce qui sera mis en relation avec les analyses des métabolites primaires présentées dans l'action 2.3.4 de ce projet qui indiquent, à cette époque, une phase de reproduction active des limaces.

Néanmoins, la variabilité est assez importante et les jeunes stades peuvent être rencontrés pendant de longues périodes, suggérant que les éclosions s'étalent sur la saison. Des données de différentes parcelles ont permis de calculer une vitesse de croissance pondérale des limaces dans différentes situations. Il apparaît que cette vitesse peut varier de 2 à 7 mg par jour durant la période de

développement automnal du colza. Cette forte variabilité serait due à des facteurs exogènes tels que les conditions climatiques régionales de l'année et la quantité de végétation disponible.

3.2.3.2 Analyse des facteurs trophiques

Les cultures en place

Pour les deux cultures les plus représentatives, le blé et le colza, on observe 2,5 limaces par piège sur les parcelles de blé, 3 limaces par piège sur les parcelles de colza. Les deux cultures sont donc autant favorables à la présence des limaces l'une que l'autre. On retrouve nettement moins de limaces en culture de maïs. Les mêmes tendances ont été constatées lors de l'analyse du maximum de captures. En revanche, le blé étant moins appétant que le colza, les limaces le détruisent moins vite. Dans les suivis de pièges de limaces effectués dans le cadre du BSV, les effectifs varient dans la même gamme de capture que dans le cas du réseau RESOLIM (de 0,6 à 2,8 limaces par piège).

Dans les suivis de pièges de limaces effectués dans le cadre de la SBT, les captures de limaces grises dans les parcelles de blé à l'automne sont nettement plus importantes lorsque les précédents sont des cultures d'hiver. Ainsi, les données issues du réseau de parcelles RESOLIM et celles observées dans le cadre du BSV fournissent des tendances similaires en termes de présence des populations de limaces dans les différentes cultures. Dans ces deux cas, il semble que la végétation des cultures de printemps soit moins favorable au développement des limaces du fait de leur moindre capacité à couvrir le sol, de la moindre appétence des plantes développées et de l'assèchement du sol en profondeur durant la période estivale.

Les cultures intermédiaires

Un essai spécifique a été réalisé pour étudier la sensibilité des différentes cultures aux attaques de limaces. Dans cet essai, des limaces ont été introduites dans des cages placées à l'extérieur quinze jours après le semis des différentes cultures (3-4 feuilles des plantes) et les dégâts occasionnés ont été suivis pendant trois semaines (Figure 3).

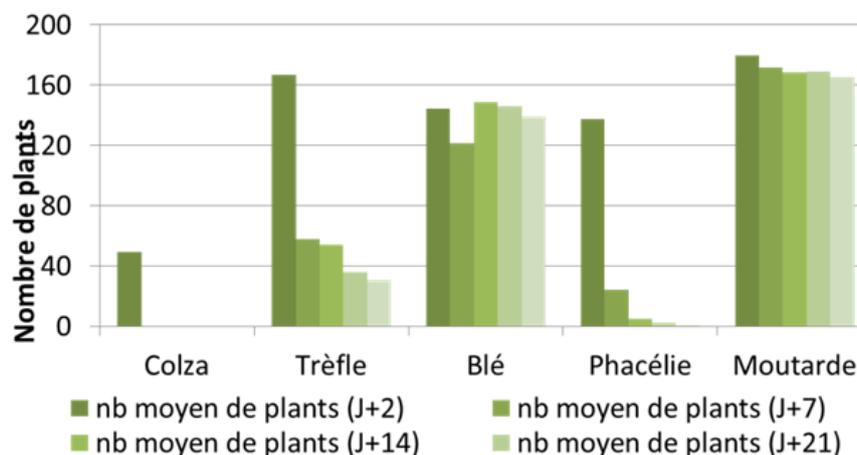


Figure 3 : Essai de sensibilité des différentes cultures (Colza, Trèfle, Blé, Phacélie et Moutarde) aux attaques de limaces de 2 à 21 jours après apport de limaces (RESOLIM 2013)

D'après l'essai mené, les espèces les plus appétentes sont le colza et le trèfle (Figure 3). La phacélie est également détruite par les limaces. Dans d'autres expérimentations réalisées où les limaces ont attaqué la phacélie à un stade plus développé que 3-4 feuilles, cette espèce n'a pas été détruite aussi facilement par les limaces. Seule la moutarde blanche n'a été que très peu attaquée par les limaces.

Les limaces sur le trèfle ont eu une prise de poids nettement supérieure à celles rencontrées dans les autres modalités. Ainsi, la mise en place d'engrais vert moins appétant permettrait de réduire le risque

de développement des populations de limaces. En complément de ces données, les enquêtes auprès d'agriculteurs du projet RESOLIM indiquent que sur sol nu présentant des repousses de cultures, les dégâts rencontrés sur la culture suivante tendent à augmenter. Ainsi, comme la végétation implantée, les repousses peuvent constituer un abri et une alimentation pour les limaces.

3.2.3.3 Thermobiologie

Bien que *D. reticulatum* soit un ravageur cosmopolite, ses réponses physiologiques aux contraintes environnementales ont fait l'objet de peu d'études (Cook, 2004 ; Rollo, 1991 ; Mottin *et al.*, 2014, 2015). L'objectif de ce travail était d'évaluer la capacité de résistance et la thermotolérance au froid chez la limace grise en tenant compte de son stade de développement, afin de contribuer à l'optimisation de la prévision des risques « limace » dans les sites agricoles. La température de congélation des individus a été utilisée comme un marqueur de leur condition physiologique.

Cinq sites ont fait l'objet de récoltes par piégeage, Agen (Anthé) 47, Ivoy-le-Pré (18), Crézancy (02), Toussieu (69) et Doignies (Mons 59). Les individus de Mons et Ivoy-le-Pré ont été collectés sur une large gamme pondérale au cours des deux saisons, automnale (septembre, octobre, novembre) et printanière (mai, juin, juillet). Ayant connaissance des masses pondérales et des températures de congélation (Tc) par individu, par mois et par population, nous avons voulu savoir s'il était possible d'expliquer la dichotomie des Tc en deux sous-populations par (i) le site d'origine et (ii) par la masse pondérale.

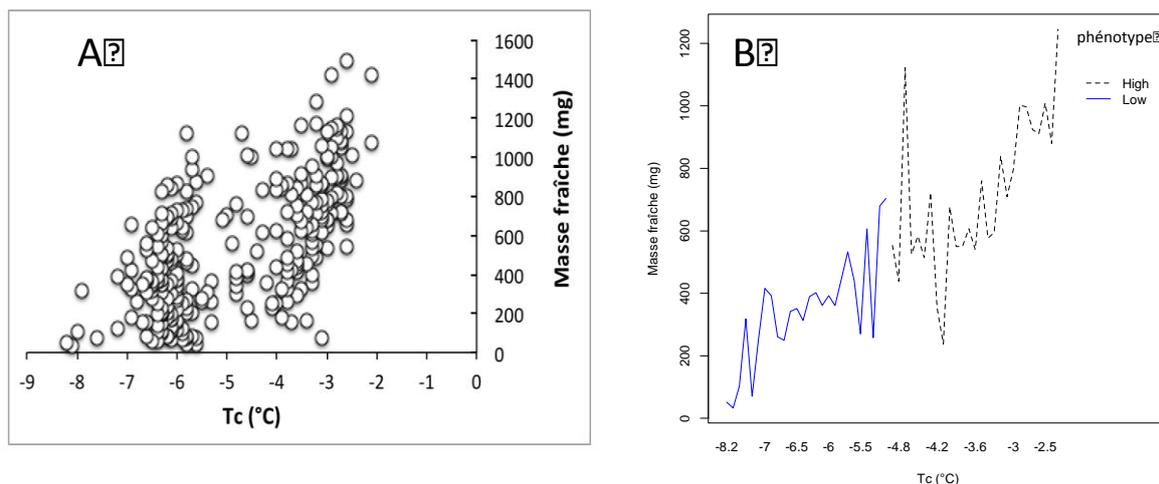


Figure 4 : Température de congélation (Tc) des limaces *Deroceras reticulatum*, en lien avec la masse pondérale individuelle (A) ou avec la masse pondérale moyenne (B); les deux phénotypes, High (Tc > -5°C) et Low (Tc ≤ -5°C).

La mesure de la Tc nous a permis de mettre à jour deux phénotypes d'après la moyenne globale de Tc située à -5,04°C, le phénotype « low » à Tc inférieure à -5°C et le phénotype « high » à Tc supérieure à -5°C, le premier dominant au printemps où les limaces pèsent en moyenne 500 mg et le second dominant à l'automne où les limaces atteignent une masse fraîche de 1g en moyenne (Figure 4). Nous avons testé différents modèles ANCOVAs (distribution gaussienne) en insérant une covariable quantitative, la masse pondérale des individus, et en considérant que la distribution en deux phénotypes de la variable mesurée, la Tc, pourrait s'expliquer par deux facteurs :

- 1- Le facteur site, Mons et Ivoy-le-Pré,
- 2- Le facteur saisonnier représenté ici par les mois de prélèvement à l'automne 2013 (sept, oct, nov) et au printemps 2014 (mai, juin, juillet).

La covariable masse fraîche est corrélée à la Tc, les limaces les plus grosses de fin d'automne, reproductrices, étant les moins tolérantes au gel du fait, notamment, que les plus grosses ont un volume d'eau plus élevé qui favorise la formation de cristaux de glace (Storey, 1997 ; Ansart et Vernon, 2003 ; Slotsbo *et al.*, 2011). Les limaces de fin de saison automnale sont donc plus fragiles face au gel, mais elles atteignent la maturité sexuelle à différents moments de la saison selon le site géographique.

Les résultats de l'étude de la survie aux températures « chaudes » montrent l'impact de la température et de l'humidité relative de l'air sur la mortalité et la perte en eau chez la limace grise. Une température de 32°C (= estivale) n'est pas supportée par les limaces qui n'y survivent pas plus de 24h. A cette température, la perte en eau corporelle atteint et dépasse 30% pour un taux d'humidité compris entre 20% et 70%, ce qui confirme les travaux de Rollo (1991). Les dérèglements climatiques actuels qui produisent des pics de chaleur imprévisibles devraient donc affecter les populations de limaces grises et réduire les recrutements de nouveau-nés en fin d'été.

3.2.3.4 Métabolites primaires

Des composés glucidiques et protéiques peuvent s'accumuler dans les différents tissus des limaces en réponse à un stress thermique. Sachant que la présence de ces composés dépend de l'alimentation que peuvent se procurer les limaces, une approche biochimique permet de savoir si, selon la culture pratiquée, selon la culture intermédiaire installée et d'autres facteurs agronomiques, la limace *D. reticulatum* peut manifester une plus faible résistance aux stress thermiques au cours de son cycle de vie. Résister à un stress va représenter un coût énergétique d'autant plus important que la région sera soumise à des variations climatiques saisonnières contrastées. Ce coût pourra se répercuter sur la survie puis sur les capacités de reproduction de l'individu.

– Saison automnale 2013

Les limaces nées à la fin de l'été ont une croissance rapide et peuvent atteindre leur maturité sexuelle avant l'hiver, mais il y a une forte hétérogénéité interindividuelle et inter-populationnelle. Ainsi, les limaces de Mons (59) et d'Ivoy-le-Pré (18) ayant servi aux analyses biochimiques ont atteint en moyenne 500 mg de masse fraîche alors que celles récoltées à Crézancy (02), Anthé (47) et Toussieu (69) étaient deux fois moins lourdes.

Les limaces de Mons et d'Ivoy-le-Pré s'enrichissent en sucres qui interviendront dans la reproduction, le galactose comme monomère du galactogène, l'arabinose, le glucose et le mannose comme composants notamment des polysaccharides du mucus lors de l'accouplement.

Les limaces des trois autres populations s'enrichissent de septembre à novembre en substrats énergétiques du cycle de Krebs (fumarate, succinate, malate), en ornithine et putrescine qui conduisent à la formation de polyamines abondantes dans les cellules à croissance rapide, en acides aminés variés. Tous ces composés traduisent avec clarté le fait que les limaces d'Anthé, Crézancy et Toussieu sont en phase de croissance tissulaire, notamment celle de l'appareil reproducteur qui occupera, à maturité, les deux-tiers du corps.

– Saison printanière 2014

Les limaces d'Anthé prélevées en hiver sont de masse pondérale identique sur 3 mois (# 250 mg MF) et sont comparables à celles de Toussieu et d'Ivoy-le-Pré prélevées en mai. En juin, celles de Mons de Toussieu sont comparables entre elles. Les limaces sont, de janvier à mai, en phase de croissance car les substrats énergétiques du cycle de Krebs, ceux indicateurs de croissance tissulaire (putrescine, spermidine), et les acides aminés caractérisent la population d'Anthé de janvier à mars et celle de Toussieu d'avril à mai. De mai à juin, à Toussieu, les limaces se sont enrichies en substrats caractéristiques de réponses au stress thermique (trehalose) et à la mise en place d'une respiration anaérobie (voies du succinate et du lactate). Il est à noter la faiblesse du vecteur « galactose »

(nécessaire à la synthèse de vitellus), car si les limaces doivent répondre à un stress environnemental (chaleur, sécheresse), c'est au détriment de l'activité de reproduction.

Ainsi, les limaces d'automne et de printemps-été présentent des profils en métabolites qui illustrent clairement leur état physiologique : phase de croissance, phase de reproduction, réponse à un stress.

Nous avons mis en évidence pour la première fois que la limace grise *Deroceras reticulatum* présentait deux phénotypes physiologiques au stade juvénile (Masse pondérale ≤ 300 mg) où les individus en croissance ont soit une tolérance partielle au gel ($T_c = -6,1 \pm 0,6^\circ\text{C}$), soit ne le tolèrent pas et congèlent à des températures faiblement négatives ($T_c = -3,3 \pm 0,5^\circ\text{C}$). Lorsque les individus acquièrent la maturité sexuelle, l'accumulation de composés glucidiques en vue de l'activité de reproduction représente une dépense énergétique forte qui se fait au détriment de leur tolérance au froid. Ainsi, les limaces adultes sont d'autant moins tolérantes au gel qu'elles ont une forte masse pondérale (≥ 500 mg) ce qui caractérise les limaces d'automne. Ces résultats novateurs soulignent l'existence d'un compromis (trade-off) entre capacité de reproduction et capacité de tolérance au gel.

Les changements des caractéristiques physiologiques des limaces lors de baisses de température et lors des phases d'entrée en reproduction peuvent expliquer certains comportements au champ qui ont des conséquences déterminantes dans la dynamique de population. Les différentes températures minimales et maximales et humidités létales que peuvent supporter les limaces sont maintenant nettement caractérisées.

4. Action 3 : Conception d'outils d'aide à la décision

Une analyse comparative de 10 modèles existants du point de vue de leurs formalismes et des sorties de simulation a été réalisée pour élaborer un modèle conceptuel intégrant les connaissances existantes de l'action 1 et les connaissances acquises dans le cadre de RESOLIM. Les modèles ont été classés selon les estimations qu'ils proposent d'effectuer :

1. Impact du système de production végétal sur l'effectif de la population de limaces : Chabert et al, 2014, Chabert *et al.*, 2016 a et b.
2. Dynamique de la population de limaces en fonction des conditions climatiques et du couvert : Shirley *et al.*, 2001 ; Choi *et al.*, 2004 ; Choi *et al.*, 2006 ; Willis *et al.*, 2006 ; Schley et Bees, 2002 ; Schley et Bees, 2003 a et b ; Bees *et al.*, 2006.
3. Activité de la population de limaces en fonction des conditions climatiques : Young et Port, 1989 ; Young *et al.*, 1993 ; Young *et al.*, 1991 a et b ; Chabert *et al.*, 1999.

Après la réalisation de cette typologie, deux approches complémentaires ont été sélectionnées :

- L'évaluation multicritère du risque limaces à partir des descriptions des systèmes de cultures permettant de prendre *a priori* des décisions d'ordre stratégique sur leur gestion.
- Le développement de modèles d'évolution de l'activité ou de la densité des populations de limaces, de risques de disséminations ou d'attaques en vue d'une évaluation du risque. L'évaluation sera tactique si destinée à l'application de traitements ou encore stratégique si faite à l'échelle pluriannuelle.

4.1 Méthode d'évaluation multicritère

Les différents éléments bibliographiques de l'action 1 ont été rassemblés pour la construction d'un outil d'évaluation multicritères DEXi_limace qui est destiné à évaluer *a priori* le risque limaces à l'échelle parcellaire. Les données d'entrée correspondent à la description du système de culture de la parcelle considérée et de son environnement proche. Chaque élément du système de culture et de

l'environnement proche de la parcelle, pouvant avoir un impact sur la population des limaces, a été identifié et caractérisé (Figure 5).

Les critères de bases nécessaires à la description des parcelles à évaluer (« ou les feuilles de l'arbre ») font l'objet d'un classement entre eux du point de vu de l'agriculteur, de « très défavorables » à très favorables. Ce classement s'effectue selon l'impact positif ou négatif du critère sur le risque limace. Les différents critères de base sont agrégés à l'aide de tableaux de contingence pour constituer des critères dits « agrégés » qui peuvent également s'agréger entre eux.

Ces éléments rassemblés dans le logiciel DEXi, sont ensuite pondérés entre eux d'après les informations issues de la bibliographie ou à dire d'experts. Des tests de sensibilité de l'arbre ont été effectués pour équilibrer l'influence des différents facteurs entre eux.

Pour environ 20 systèmes de culture, l'outil s'est montré capable de distinguer ceux qui étaient reconnus comme les plus favorables aux limaces. Sans être exhaustif, des tests de comparaison ont été effectués avec les parcelles étudiées dans le cadre de RESOLIM. Les classements obtenus ont été assez souvent pertinents. Cet outil est actuellement adapté à la comparaison de systèmes de culture assez différents entre eux, mais reste encore trop généraliste et pourrait faire l'objet d'adaptations à des échelles plus locales. Ces modifications nécessiteraient de revoir une partie de la formalisation et d'ajouter ou de modifier certains critères.

Un des intérêts majeurs de cette démarche est de permettre de rassembler les connaissances éparses. Cet outil est conçu pour l'animation d'ateliers de conception de nouveaux systèmes de culture. Il est ainsi possible d'explorer rapidement le champ des possibles en évaluant les conséquences de la mise en œuvre de telle ou telle pratique.

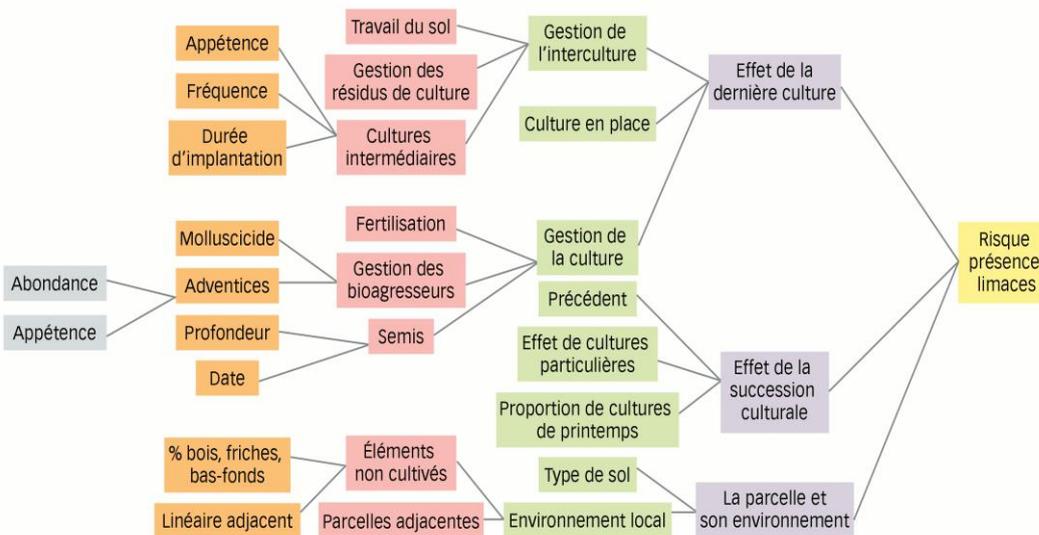


Figure 5 : Modèle qualitatif et agrégatif Dexi-limaces

4.2 Apport de nouvelles voies d'amélioration des modèles issues des données de RESOLIM

Pour réaliser des calculs de corrélation entre l'activité des limaces à l'automne et les conditions météorologiques, l'activité des limaces est caractérisée par le nombre de limaces par piège sur l'ensemble des captures réalisées dans le cadre de RESOLIM pendant les automnes 2013 et 2014. Sur chaque site d'étude, les captures sont mises en relation avec les données locales, c'est-à-dire les températures minimales et maximales mesurées à la station la plus proche (moyenne des 4 derniers

jours avant le piégeage) et les précipitations mesurées à la station la plus proche (moyenne des 4 derniers jours avant le piégeage).

Lorsque les températures sont plus basses que les températures optimales d'activité des limaces (entre 12 et 15°C), les captures augmentent lorsque les températures progressent (pente positive avec T°C). Lorsque les températures sont plus élevées que les températures optimales, les captures augmentent lorsque les températures décroissent (pente négative avec T°C). Ces travaux permettront certainement de revoir les équations liées à la température du modèle.

Lorsque les précipitations sont importantes l'activité augmente, mais lorsque les précipitations sont moins fortes, aucune corrélation n'a pu être mise en évidence avec ce jeu de données. Ces éléments varient dans le même sens que ceux inclus dans le modèle ACTA utilisé dans le cadre de la SBT, néanmoins de nombreux paramètres pourront être révisés à la lumière de ces données. Ces dernières pourraient être également associées aux nouvelles données issues des travaux d'écophysiologie réalisés dans le cadre de RESOLIM. Elles concernent principalement les températures minimales et maximales de survies des limaces et la caractérisation des périodes de croissance pondérale et de reproduction des limaces.

Tableau 1 : Corrélations effectuées entre l'activité des limaces estimée par les niveaux de captures de *Deroceras reticulatum* sous les pièges et les températures et la pluviométrie à l'automne sur l'ensemble de piégeage de RESOLIM (moyenne mobile de j-4 à j).

Période automnale	Température moyenne 2013 et 2014	Sens de la corrélation avec la température minimale	Sens de la corrélation avec la température maximale	Précipitation journalière (mm/jour) moy. 2013 et 2014	Sens de la corrélation avec la pluviométrie
1er septembre – 30 septembre	16,8	Négative	Négative	2,3	Non significative
15 septembre – 15 octobre	14,8	Non significative	Non significative	4,7	Positive
1 octobre – 31 octobre	14,6	Non significative	Non significative	2,5	Non significative
15 octobre – 15 novembre	10,7	Positive	Positive	5,1	Positive
1 novembre – 30 novembre	8,7	Positive	Positive	2,2	Non significative
15 novembre – 15 décembre	4,8	Non significative	Non significative	0,77	Non significative

5. Utilisation des modèles et perspectives d'améliorations

Le modèle de Choi *et al.*, 2006 permet le suivi des populations de limaces sans relation avec les dégâts. Le modèle ACTA permet de déterminer le risque d'attaque des limaces en fonction des années. Ces deux modèles sont basés uniquement sur des critères climatiques. Le conseil ne peut pas être effectué à la parcelle. Ces modèles ont été construits pour décrire l'évolution des populations de limaces et leur utilisation comme modèle prédictif peut encore être optimisé. Pour améliorer la qualité de la prédiction du risque d'attaque de limaces à l'aide de ces modèles couplés aux nouvelles données issues de RESOLIM, on pourrait envisager d'associer un modèle conceptuel avec une note de risque parcellaire basée sur :

- 1) Les méthodes de gestion agronomique de la parcelle (travail du sol, culture en place, précédent...) et le contexte pédologique. La note de risque pourrait être attribuée à l'aide d'un modèle de type DEXi_limaces.
- 2) Des piégeages réalisés à la parcelle, cela donnerait une indication sur l'évolution des populations.

5.1 Coupler les modèles avec les observations réalisées dans le cadre de la surveillance biologique du territoire (SBT)

Durant le projet, nous avons comparé, dans quelques cas, différentes variables issues des observations avec le modèle climatique ACTA utilisé dans le cadre de la SBT. Ces approches nous ont permis de mettre en évidence quelques tendances caractérisant l'influence du climat sur les populations de limaces en général.

Les apports des observations réalisées dans le cadre de la SBT sont très intéressants sur différents plans. A grandes échelles, cela permettra de caractériser les années ou les saisons favorables aux limaces et de réaliser de nombreuses comparaisons entre les données de piégeages et les modèles afin d'ajuster ces derniers au mieux. A plus petite échelle, les analyses individuelles des différentes parcelles à l'aide de données complémentaires climatiques et agronomiques ont le potentiel d'apporter des informations concernant l'effet de ces facteurs sur la dynamique des populations de ce ravageur.

5.2 Assembler les données pour construire un modèle dynamique des populations

L'étude de la croissance pondérale des limaces dans une série de parcelles « biologie » a permis de quantifier la vitesse de développement des limaces en culture de blé et de colza. Ces données couplées à des hypothèses sur le nombre d'œufs produits par individu est une voie pour estimer l'effectif de la génération suivante.

Le projet RESOLIM a permis d'inventorier un grand nombre de données sur la biologie des limaces dont l'assemblage permettrait de construire un modèle. Cela pourra certainement se faire dans un futur projet incluant une partie plus importante en termes de développement de modèle. Ainsi, des travaux en cours de réalisation dans le cadre du projet Casdar ARENA ont pour objectif l'estimation de la prédation des limaces par les carabes.

Conclusion et enseignements tirés des travaux de RESOLIM

Ce projet réalisé durant des années très favorables à l'activité des limaces a permis de suivre leur activité saisonnière dans plus de 20 parcelles. Lors des périodes été-automne 2013 et hiver-printemps 2015, la succession des générations a été très rapide et était influencée par les couverts des parcelles concernées. Ces observations n'avaient pas été possibles lors du projet de recherche réalisé dans la période 1995-1997 ce qui posait de nombreuses questions sur les traits de vie des limaces dans les parcelles de grandes cultures et plus particulièrement en terme de succession des générations.

Les analyses de suivis expérimentaux apportent des données quantitatives relatives aux descriptions des traits de vie de la limace grise (*Deroceras reticulatum*) dans les conditions du territoire métropolitain français. Ils permettent de réaliser différentes simulations de leurs générations printanière et automnale. Les données comparées aux modèles existants fournissent également de nombreuses informations concernant l'ampleur de variabilité de la structure de la population à ces deux périodes et sur plusieurs années.

Ces travaux ont permis de quantifier les effets des pratiques agronomiques (choix des cultures utilisées, choix de l'interculture, travail du sol, type de sol) favorables aux limaces, de rassembler ces connaissances dans un outil d'évaluation multicritère : DEXi_limaces (Chabert *et al.*, 2014).

Ainsi, ce projet a apporté des précisions pour le calcul de différents paramètres à inclure dans les modèles utilisables par des outils de prévision de l'impact des facteurs agronomiques et météorologiques. Leur assemblage pour construire un modèle conceptuel de dynamique des populations reste à faire en vue de tester puis de diffuser des outils de prévision opérationnels. Cet outil

pourra notamment tenir compte des interactions entre l'influence des facteurs agronomiques et environnementaux.

Ce projet a permis de relancer la recherche en écophysologie sur ce sujet qui était suspendue depuis les années 1990. Ces nouvelles informations contribueront certainement à la phase d'assemblage des données nécessaires à la construction d'un modèle conceptuel puis ensuite à la phase de développement des outils.

Ce projet RESOLIM est un exemple d'écologie fonctionnelle sur un cas concret d'un ravageur des grandes cultures bénéficiant d'une flexibilité phénotypique durant son développement et dont les traits de vie sont régulés par les facteurs agronomiques et climatiques. Un caractère de généralité applicable à d'autres bioagresseurs émane de cette étude.

Références bibliographiques

- Ansart A., Vernon P., 2003. Cold hardiness in mollusks. *Acta Oecologica*, 24: 95-102.
- Ansart A., Guiller A., Moine O., Martin M-C., Madec L., 2014. Is cold hardiness size-constrained? A comparative approach in land snails. *Evolutionary Ecology*, 28: 471-493.
- Aubertot J-N., Robin M-H., 2013. Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict injury profile as a function of cropping practices, and abiotic and biotic environment. I. Conceptual bases. *PLOS ONE*.
- Bale J.S., 1985. Supercooling characteristics of adults, juveniles and eggs of the slug *Deroceras reticulatum* (Mull.). *CryoLetters* 6: 400-401.
- Bees M., Angulo O., Lopez-Marcos J., Schley D., 2006. Dynamics of a Structured Slug Population Model in the Absence of Seasonal Variation. *Mathematical Models & Methods in Applied Sciences* 16, no. 12: 1961–1985. doi :10.1142/S0218202506001777.
- Bohanec M., Messéan A., Scatasta S., Angevin F., Griffiths B., Krogh P., 2008. A qualitative multiattribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecological Modelling* 215, 247–261.
- Bowler K., 2005. Acclimation, heat shock and hardening. *Journal of Thermal Biology*, 30: 125-130.
- Brun F., Chabert A., Gervois S., Mottin E. Michel L., 2014. Utiliser les systèmes d'aide à la décision pour gérer le risque limace en grande culture *Phytoma*, N° 677 octobre 30-35.
- Chabert, A., 1999. Prévion des Attaques de limaces : Mise au point d'un système d'aide à la Décision par la modélisation de la mise en Activité des limaces. In ANPP - 5ème Conférence Internationale Sur Les Ravageurs En Agriculture, Montpellier, 7-8-9 Décembre 1999 - Tome II, 469–476. Paris: ANPP.
- Chabert A., Mottin E., Brun F., 2014. Dossier ravageurs souterrains - Face aux limaces : les années à forte pression, des mesures prophylactiques à prendre. *Phytoma*, juin 2014, n°674, 16.
- Chabert A., Peigne J., 2016a. Limaces dommageables aux cultures : biologie et nuisibilité. *Phytoma* 694 mai, 24-27.
- Chabert A., Peigne J., 2016b. Impact des pratiques culturales sur les limaces et leurs dégâts. *Phytoma* 694 mai, 28-32.
- Choi Y., Bohan D., Powers S., Wiltshire C., Glen D., and Semenov M., 2004. Modelling *Deroceras reticulatum* (Gastropoda) Population Dynamics Based on Daily Temperature and Rainfall. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 103, no. 3: 519–525. doi:10.1016/j.agee.2003.11.012.
- Choi Y., Bohan D., Potting R., Semenov M., Glen D., 2006. Individual Based Model of Slug Population and Spatial Dynamics. *Ecological Modelling* 190: 336–350. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.04.019.
- Cook R., 2004. The tolerance of the field slug *Deroceras reticulatum* to freezing temperatures. *CryoLetters*, 25: 187-194.
- Hommay G., 1995. Contribution à la biologie et à l'écologie des limaces (Mollusques Gastéropodes Pulmonés) de grandes cultures, Ph.D. Université de Rennes I, France, 318p.

- Mottin E., Chabert A., Charrier M., 2014. Etude inter-populationnelle de la tolérance au froid chez la limace grise *Deroceras reticulatum*. 10ème CIRA, 22-23 octobre.
- Mottin E., Chabert A., Charrier M., 2015. Supercooling ability of the early life stages of a pest slug, *Deroceras reticulatum*. *Revue d'Écologie*, 70: 42-48.
- Nicolai A., Filser J., Lenz R., Bertrand C., Charrier M., 2011. Adjustment of metabolite composition in the haemolymph to seasonal variations in the land snail *Helix pomatia*. *Journal of Comparative Physiology B*, 181:457-466.
- Rollo C.D., 1991. Endogenous and exogenous regulation of activity in *Deroceras reticulatum*, a weather-sensitive terrestrial slug. *Malacologia*, 33(1-2):199-220.
- Schley D., Bees M., 2002. A Discrete Slug Population Model Determined by Egg Production. *Journal of Biological System* 10, no. 3: 243–264. doi:10.1142/S0218339002000585.
- Schley D., Bees M., 2003b. Delay Dynamics of the Slug *Deroceras reticulatum*, an Agricultural Pest. *Ecological Modelling* 162: 177–198.
- Shirley M., Rushton S., Young A., Port G., 2001. Simulating the Long-term Dynamics of Slug Populations: a Process-based Modelling Approach for Pest Control. *Journal of Applied Ecology* 38, 2: 401–411. doi:10.1046/j.1365-2664.2001.00606.x.
- Sine M., Morin E., Simonneau D., Brochard M., De Cosnac G., Escriou H., 2010. VIGICULTURES® – An early warning system for crop pest management. IAALD XIIIth World Congress organized by Agropolis International, 26-29 April 2010, Montpellier, France.
- Slotsbo S., Hansen L.M., Holmstrup M., 2011. Low temperature survival in different life stages of the Iberian slug, *Arion lusitanicus*. *Cryobiology*, 62:68-73.
- Storey K.B., 1997. Organic solutes in freezing tolerance. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 117A: 319-326.
- Storey K., Storey J., Churchill T., 2007. Freezing and anoxia tolerance of slugs: a metabolic perspective. *Journal of Comparative Physiology B*, 177: 833-840.
- Welter-Schultes F., 2012. European non-marine molluscs, a guide for species identification. p.469, Göttingen, Planet Poster Editions.
- Willis J., Bohan D., Choi Y., Conrad K., Semenov M., 2006. Use of an Individual-based Model to Forecast the Effect of Climate Change on the Dynamics, Abundance and Geographical Range of the Pest Slug *Deroceras reticulatum* in the UK. *Global Change Biology* 12: 1643–1657. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01201.x.
- Willis J., Bohan D., Powers S., Choi Y., Park J., Gussin E., 2008. The importance of temperature and moisture to the egg-laying behaviour of a pest slug, *Deroceras reticulatum*. *Annals of Applied Biology*, 153: 105-115.
- Young A., Port G., 1989. The Effect of Microclimate on Slug Activity in the Field. In 1989 BCPC Symposium Proceedings - Slugs and Snails in World Agriculture - Monograph N°41, 263–269. Thornton Heath: The British crop protection council.
- Young A., Port G., 1991a. The Influence of Soil Moisture Content on the Activity of *Deroceras reticulatum* (Muller). *Journal of Molluscan Studies* 57: 138–140. doi:10.1093/mollus/57.1.138.
- Young, A., Port G., Emmett B., Green D., 1991b. Development of a Forecast of Slug Activity: Models to Relate Slug Activity to Meteorological Conditions. *Crop Protection* 10, 5: 413–415.
- Young A., Port G., and Green D., 1993. Development of a Forecast of Slug Activity: Validation of Models to Predict Slug Activity from Meteorological Conditions. *Crop Protection* 12, no. 3: 232–236.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)