Impact des pratiques phytosanitaires et du paysage sur la prédation de proies sentinelles, l'abondance de ravageurs et le niveau de dégâts en vergers de pommiers dans la région de la basse vallée de la Durance (PACA)

Dominante d'approfondissement

Gestion des Milieux Naturels Ouverts et Boisés (GMNOB)

Ruoyin LONG

Année 2015/2016

Photographie de : © Cécile THOMAS & Ruoyin LONG

Deux vergers de pommiers de la basse vallée de la Durance et matériels (cartes de prédation, bandes pièges et logiciels) utilisés pendant le stage.

Nom de l'institut :

AgroParisTech - Centre de Nancy

14 rue Girardet - CS 14216

54042 NANCY cedex

Organisme d'accueil :

INRA – Centre PACA

Plantes et Systèmes de culture Horticoles

Site Agroparc, 84914 AVIGNON cedex 9

Impact des pratiques phytosanitaires et du paysage sur la prédation de proies sentinelles, l'abondance de ravageurs et le niveau de dégâts en vergers de pommiers dans la région de la basse vallée de la Durance (PACA)

Par

Ruoyin LONG

Dominante d'approfondissement

Gestion des Milieux Naturels Ouverts et Boisés (GMNOB)

Maître de stage : Mme Claire LAVIGNE

Tuteur de stage : M. Bernard JABIOL

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLEVES

1 AgroParisTech	**2 TRAVAUX D'ÉLEVES**
TITRE : Impact des pratiques phytosanitaires et du paysage sur la prédation de proies sentinelles, l'abondance de ravageurs et le niveau de dégâts en vergers de pommiers dans la région de la basse vallée de la Durance (PACA)	Mots clés : agro-écologie, proies sentinelles, paysage, mode de production, IFT, taux de prédation, traitements phytosanitaires, vergers de pommiers.
AUTEUR(S) : Ruoyin LONG	Promotion : Année 2015/2016
Caractéristiques : 6 Mo Volumes ; 102 Pages ; 25 Figures ; 15 Tableaux ; 10 Annexes ; 80 bibliographies	

3 CADRE DU TRAVAIL		
ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : INRA – Centre PACA, Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Site Agroparc, 84914 AVIGNON cedex Nom du responsable : Mme Claire LAVIGNE Fonction : Directrice de recherche de l'équipe EPI de PSH		
Nom du correspondant AgroParisTech : M. Bernard JABIOL		
☐ Spécialité	☐ Stage 2A X Stage fin d'études Date de remise : **25/10/2016**	☐ Autre

SUITE À DONNER (réservé au Service des Etudes)
X Consultable et diffusable ☐ Confidentiel de façon permanente ☐ Confidentiel jusqu'au ……/……/…… , puis diffusable

RÉSUMÉ

L'intensification et la mécanisation de l'agriculture ont augmenté la production agricole mondiale, mais elles sont remises en cause du fait de leurs conséquences sur la santé humaine et l'environnement. L'objectif du plan national « Ecophyto », est d'obtenir une réduction progressive du niveau d'usage de produits phytosanitaires tout en maintenant les niveaux de production des cultures. Le projet Sebiopag-Phyto (2014-2017 ; coordonné par S. Petit, UMR Agroécologie, Dijon) rassemble 5 équipes de l'INRA localisées dans 5 types de contextes régionaux, pour produire des connaissances sur les services de régulation des ravageurs fournis par la biodiversité. La méthode des cartes de prédation de proies sentinelles est utilisée pour obtenir des données sur la régulation biologique des ravageurs.

Nous avons analysé les taux de prédation de trois proies sentinelles (pucerons, œufs de carpocapse et graines) récoltées dans 20 vergers de pommiers de la basse vallée de la Durance (PACA) en 2014 et 2015, et récolté les données pour 2016. A l'aide de modèles linéaires généralisés mixtes, nous avons cherché à comprendre les effets des traitements phytosanitaires et des facteurs paysagers sur ces taux de prédation. Nous les avons également mis en regard des abondances et dégâts de deux ravageurs importants, le carpocapse et le puceron cendré.

Les résultats montrent que l'effet des pratiques agricoles est significatif sur la prédation des proies sentinelles, avec généralement des taux de prédation plus élevés en agriculture biologique et pour de plus faibles indices de fréquence de traitement (IFT) ; l'effet des facteurs paysagers est par contre faible dans notre zone d'étude avec un effet positif de la complexité structurelle du paysage à 150 m uniquement pour deux proies et en vergers conventionnels. Les limites de la méthode et les points d'amélioration de l'étude sont discutés, ainsi que des perspectives qui contribueraient au développement de futurs projets.

Mots clefs : agro-écologie, proies sentinelles, paysage, mode de production, IFT, taux de prédation, traitements phytosanitaires, vergers de pommiers.

ABSTRACT

The intensification and mechanization of agriculture have increased global agricultural production, but they are questioned because of their impact on human health and the environment. The objective of the national "Plan Ecophyto"* is to obtain a gradual reduction in the level of use of pesticides while maintaining the levels of crop production. The Sebiopag Phyto-project (2014-2017, coordinated by S. Petit, UMR Agroecology, Dijon) brings together 5 INRA teams located in 5 different regional contexts, to produce knowledge on pest control services provided by the biodiversity. The method of sentinel prey predation cards is used to obtain data on the biological control of pests.

We analyzed the predation rate of three sentinel prey (aphids, codling moth eggs and seeds) from 20 apple orchards in the lower valley of the Durance (PACA) in 2014 and 2015 and collected data for 2016. Using generalized linear mixed models, we sought to understand the effects of phytosanitary treatments and landscape factors on predation rates. We also related them to the abundance and damage of two major pests, codling moth and aphid, in the study orchards.

The results show that the effect of agricultural practices is significant on the predation of sentinel prey, with generally higher predation rates in organic orchards and in orchards with lower treatment frequency index (TFI); the effect of landscape factors is weak in our study area with a positive effect of the structural complexity of the landscape measured within 150 m of the orchards for only two prey and only in conventional orchards. The limitations of the method and points for improvement of the study are discussed, as well as the prospects that would contribute to the development of future projects.

Keywords: agro-ecology, sentinel prey, landscape, production management, predation rates, phytosanitary treatments, apple orchards.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel du centre INRA PACA, spécialement de l'unité PSH pour l'accueil et leur aide qui ont facilité mon intégration au sein de l'équipe.

Je voudrais remercier plus particulièrement :

Ma maître de stage, Madame LAVIGNE Claire (directrice de recherche de l'équipe EPI de PSH), pour son encadrement, son écoute et sa disponibilité ; pour m'avoir apporté attentivement son soutien et ses conseils durant l'ensemble de la durée de mon stage ; spécialement pour avoir pris du temps à corriger l'expression de mon rapport, celui-ci étant écrit par une non francophone à l'origine. Je garderai un très bon souvenir de ce stage grâce à sa gentillesse, à son enthousiasme et aux connaissances qu'elle m'a apportées.

Mon tuteur référent à AgroParisTech, M. JABIOL Bernard, pour son suivi attentif, ses conseils, son aide, pour avoir répondu à mes questions lors de mon stage, pour avoir facilité la communication avec l'école, ainsi que pour m'avoir apportée ses conseils précis sur le rapport et ses corrections.

TOUBON Jean-François, pour m'avoir fourni des données (calendriers de traitements et caractéristiques des vergers) qui m'ont permis de réaliser les analyses et la modélisation ; pour m'avoir apportée des connaissances précises sur les traitements phytosanitaires, les maladies et les dégâts dans les vergers pommiers.

THOMAS Cécile, avec qui j'ai collaboré pendant la phase du terrain, pour son travail qui a permet un très bon déroulement de la phase du terrain de mon stage, pour sa formation et sa confiance qui me permet ensuite de travailler de plus en plus autonome sur le terrain.

THOMAS Cécile, TOUBON Jean-François et BOUVIER Jean Charles, pour leur accompagnement pendant les différentes phases de terrain, pour leurs bonnes humeurs, et pour les échanges enrichissants entre nous.

CORTELLO Jérémy et FRANCOIS Emilie, pour avoir contribué à la préparation des cartes de prédation et pour avoir rédigé la partie concernée dans le matériel et méthode.

COLLARD Blanche, LEFEBVRE Manon, IMBERT Camille, AUVINET Clarisse, DARDOURI Tarek, … pour les bibliographies, les échanges intéressants, les rencontres, les activités, le partage et l'amitié.

L'ensemble des agréables moments et discussions enrichissantes que j'ai pu passer avec les stagiaires, les thésards et les chercheurs de l'unité PSH de l'INRA PACA.

Je suis également très reconnaissante aux agriculteurs de ces vergers SEBIOPAG de nous avoir autorisé l'accès à leurs parcelles.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ
Remerciements 1
TABLE DES MATIÈRES 2
Autres tables 3
Table des figures 3
Table des tableaux 4
Table des annexes 5
Index alphabétique des sigles 6
Avant-propos 7
1 INTRODUCTION 7
1.1 Contexte de l'étude 7
1.2 Les principaux ravageurs en vergers pommiers 7
1.3 La lutte biologique par conservation : s'appuyer sur les prédateurs qui peuvent contribuer au contrôle des ravageurs dans les vergers 8
1.4 Le paysage et le rôle qu'il pourrait jouer sur la régulation des ravageurs 11
1.5 L'importance de mesurer la prédation 12
1.6 Le projet dans lequel s'insère ce stage 12
1.7 Les hypothèses de départ 13
2 DÉVELOPPEMENT STRUCTURE 15
2.1 Matériel et méthode 15
2.1.1 Caractéristiques des parcelles et leur environnement 15
2.1.2 Estimation de la prédation (voir annexes 2 et 3, page 62 à 63) 19
2.1.3 Analyses statistiques 23
2.1.4 Estimation des populations de carpocapses et des dégâts dans les parcelles (voir annexe 4) 27
2.2 Résultats 29
2.2.1 Caractérisation des parcelles 29
2.2.2 Facteurs affectant les taux de prédation 34
2.2.3 Abondance des ravageurs et dégâts 38
2.3 Discussion des résultats 41
2.3.1 Principaux résultats 41
2.3.2 Effets des pratiques et du paysage sur les taux de prédation 41
2.3.3 Limites de l'étude 43
2.3.4 Relation prédation-dégâts 47
2.3.5 Vers des systèmes moins intensifs que l'agriculture biologique et une gestion à l'échelle du territoire ? 48
3 CONCLUSION 50

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 52
Lexiques, glossaires 57
5 ANNEXES 60
TABLE DES ANNEXES RÉPÉTÉE 60
Annexes séparées 72
Annexe 9. – Les noms des colonnes du tableau SEBIOPAG et les significations en français. 72
Annexe 10. – Binned plots et dotplots. Colonne de gauche, sauf effet aléatoire « individu », à droite avec effet aléatoire « individu »*. 74

AUTRES TABLES

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1. – Des différents moyens de lutte intégrée contre les ravageurs (adaptée de Eilenberg et al. 2001). 9

FIGURE 2. – Cycle biologique d'un puceron holocycle diœcique et action possible des ennemis naturels (Ricard et al. 2012). 10

FIGURE 3. – Cycle du carpocapse et de la tordeuse orientale et action possible des auxiliaires (Ricard et al. 2012). 10

FIGURE 4. – Schéma conceptuel de la problématique étudiée (adapté de Benoît et al. 2012). 13

FIGURE 5. – Carte représentant les 20 parcelles (en rouge) et les buffers de 1 km^2*. 18

FIGURE 6. – Représentation schématique de la pose de cartes de prédation en verger de pommier à gauche et à droite des photos des quatre proies sentinelles sur cartes de prédation. 22

FIGURE 7. – Arbre de décision pour l'ajustement des modèles linéaires généralisés mixtes (tiré de Bolker et al. 2009). 25

FIGURE 8. – Moyenne de l'IFT total et de l'IFT chimique selon le mode de production et l'année. . 29

FIGURE 9. – Moyenne de l'IFT total cumulé et de l'IFT chimique cumulé selon le mode de production, la session et l'année. 29

FIGURE 10. – Moyenne du nombre de jours entre le dernier traitement et la date de pose des cartes de prédation dans les vergers selon le mode de production, la session et l'année. 30

FIGURE 11. – Matrice de corrélations entre les variables explicatives – phytosanitaires et paysagères pour l'année 2014 et 2015*. 31

FIGURE 12. – Taux de prédation observés pour les pucerons bas, les graines, les pucerons hauts et les œufs de carpocapses pour les parcelles en agriculture biologique et conventionnelle, en 2014, 2015 et 2016. 32

FIGURE 13. – Taux de prédation observés pour les pucerons bas, les graines, les pucerons hauts et les œufs de carpocapses pour les parcelles en agriculture biologique et conventionnelle, en 2014, 2015 et 2016 en différenciant les deux sessions de pose. 33

FIGURE 14. – Matrice de corrélations entre les taux de prédations des différentes proies aux différentes sessions et années*. 34

FIGURE 15. – Dégâts de carpocapse estimés par la proportion de fruits piqués/1000 fruits pour l'ensemble des vergers en 2014, 2015 et 2016 en considérant séparément ou non les vergers biologiques et les vergers conventionnels. 38

FIGURE 16. – Moyenne des dégâts de carpocapse entre 2014 et 2016 pour les 20 vergers étudiés*. 38

FIGURE 17. – Abondance des larves diaupausantes de carpocapse pour l'ensemble des vergers en 2014 et 2015 en considérant séparément ou non les vergers biologiques et les vergers conventionnels. 39

FIGURE 18. – Nombre moyen de carpocapse par bande piège pour 2014 et 2015 pour les 20 vergers étudiés*. 39

FIGURE 19. – Proportion de rameaux portant au moins une colonie de pucerons cendrés pour l'ensemble des vergers en 2014, 2015 et 2016 en considérant séparément ou non les vergers biologiques et les vergers conventionnels. 40

FIGURE 20. – Moyenne des dégâts de pucerons cendrés entre 2014 et 2016 pour les 20 vergers étudiés. 40

FIGURE 21. – Diversité des adventices selon le mode de production local (extensif vs. intensif) et la composition du paysage (simple vs. complexe)*. 43

FIGURE 22. – Exemple de graphe des résidus groupés et des effets aléatoires « verger » pour le modèle analysant les effets de l'année et du Cumul_IFT_chimique_2012 sur la prédation des œufs de carpocapse*. 45

FIGURE 23. – Intercept et l'intervalle d'effet aléatoire au niveau de la parcelle et de l' « individu » (num_obs) avec l'enveloppe de 95 % de confiance. 46

FIGURE 24. – Dessin (par R. Siélain-Paris 1895) et photo de Plantain* 47

FIGURE 25. – Schéma conceptuel d'une partie du panorama de la problématique 50

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. – Ravageurs consommés par les différentes espèces d'araignées adultes en boite de Petri, en fonction de leur stade. Une x indique une prédation, un 0 indique qu'il n'y a eu aucune prédation (thèse M. Lefebvre en cours à PSH). 11

TABLEAU 2. – Caractéristiques générales des parcelles SEBIOPAG. 15

TABLEAU 3. – Catégories retenues pour la numérisation du paysage. 17

TABLEAU 4. – Les effectifs des cartes et des proies pour la réalisation de la manipulation pour chaque session de pose. 20

TABLEAU 5. – Le nombre d'individus utilisé pour chaque proie, et entre parenthèse indiquant le nombre de cartes de prédation utilisé correspondant. 20

TABLEAU 6. – Dates de pose et de collecte des cartes pour chaque session (protocole 2014, 2015 et 2016). 21

TABLEAU 7. – Données climatiques pendant les périodes de pose des cartes. 22

TABLEAU 8. – Les modèles secondaires réalisés pour les pucerons bas et les carpocapses. 26

TABLEAU 9. – Les modèles incluant les variables paysagères réalisés pour les pucerons bas et les carpocapses. 26

TABLEAU 10. – Valeurs de l'indice de Shannon, de la proportion d'habitat semi naturel et de la longueur d'interface calculés pour les 20 vergers SEBIOPAG aux deux échelles mentionnées. 30

TABLEAU 11. – Résultat des modèles primaires pour les 4 modalités 35

TABLEAU 12. – Résultats des modèles étudiant la pression phytosanitaire sur la prédation des pucerons bas*. 35

TABLEAU 13. – Résultats des modèles étudiant la pression phytosanitaire sur la prédation des œufs de carpocapse* 36

TABLEAU 14. – Effet des variables locales et paysagères sur les taux de prédation des 4 proies en considérant soit l'ensemble des vergers soit uniquement les vergers conventionnels. 37

TABLEAU 15. – Effet des variables locales et paysagères sur les taux de prédation des 4 proies en considérant soit l'ensemble des vergers soit uniquement les vergers conventionnels. 37

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1. – Les cinq sites impliqués dans le projet SEBIOPAG (François E. 2014). 61

ANNEXE 2. – Récapitulatif des proies sentinelles et du matériel utilisé. 62

ANNEXE 3. – Photos des cartes de prédations (François E. 2014) 63

ANNEXE 4. – Des maladies et dégâts des vergers pommiers (© Toubon J. - F. & Long R. 2016) 63

ANNEXE 5. – Température moyenne mensuelle et température minimale mensuelle pendant hiver de l'année 2013 à 2016. 66

ANNEXE 6. – Logiciel et packages utilisés pour les analyses statistiques 66

ANNEXE 7. – Graphes des abondances et dégâts par parcelle et année. 67

ANNEXE 8. – Les données chiffrées des matrices de corrélations entre les variables explicatives – phytosanitaires et paysagères* 69

ANNEXE 9. – Les noms des colonnes du tableau SEBIOPAG et les significations en français. 72

ANNEXE 10. – Binned plots et dotplots. Colonne de gauche, sauf effet aléatoire « individu », à droite avec effet aléatoire « individu ».* 74

INDEX ALPHABETIQUE DES SIGLES

AB = Agriculture Biologique*

AC = Agriculture Conventionnelle

CNRS = Centre national de la recherche scientifique

CRA = Chambre régionale d'agriculture

CTIFL = Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes

DDT = Direction départementale des territoires

EPI = Ecologie de la Production Intégrée*

GEDA = Groupement d'Etude et de Développement Agricole

GRCETA = Groupement régional des centres d'études techniques agricoles

IFT = Indice de Fréquence de Traitement*

INRA = Institut National de la Recherche Agronomique

LTER = Long Term Ecological Research

MAEt = Mesures Agroenvironnementales territorialisées

PACA = Provence-Alpes-Côte d'Azur

PSH = Plantes et Systèmes de culture Horticoles

SAU = Surface Agricole Utile

SEBIOPAG = Services Ecosystémiques assurés par la BIOdiversité dans les Paysages Agricoles

UMR = Unité Mixte de Recherche

UR = Unité de Recherche

AVANT-PROPOS

Mon stage fait partie du projet Sebiopag-Phyto (2014-2017, coordonné par S. Petit, UMR Agroécologie, Dijon, voir annexe 1, page 61). Ce projet rassemble 5 équipes de l'INRA localisées dans 5 types de contextes régionaux, pour produire des connaissances sur les services de régulation des ravageurs fournis par la biodiversité. La méthode des cartes de prédation de proies sentinelles est utilisée pour obtenir des données sur la régulation biologique des ravageurs. Mon stage concernait la région des vergers de la basse vallée de la Durance. L'objectif de mon stage était de participer à la récolte des données de l'année 2016 et d'analyser et de modéliser la relation entre les taux de prédation et les variables décrivant les traitements phytosanitaires et les caractéristiques des paysages autour des vergers pour les données des années 2014 et 2015.

4 INTRODUCTION

4.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, l'intensification et la mécanisation de l'agriculture ont augmenté la production agricole mondiale, ce qui nous permet de produire intensivement les produits pour nourrir la population mondiale croissante. Mais cette filière est très dépendante du pétrole : pour les traitements phytosanitaires, les engrais, les labours et les récoltes avec des engins lourds, etc. Aujourd'hui, l'agriculture moderne est remise en question non seulement par son haut besoin d'énergie, mais aussi par le déclin de la biodiversité dans les milieux agricoles, et par la dégradation de l'environnement, notamment à cause d'utilisation des produits phytosanitaires chimiques et l'abus d'utilisation des engrais (Duru et al. 2015 ; Jankielsohn et al. 2015 ; Horrigan et al. 2002). En arboriculture fruitière, notamment en verger de pommiers, les traitements phytosanitaires sont particulièrement intensifs. En effet, l'arboriculture constitue 4 % en valeur du marché des fongicides et 21 % du marché des insecticides, alors qu'elle ne représente que 1 % de la SAU* (Aubertot, 2005).

Les pesticides chimiques ont des impacts sur l'environnement et la santé humaine (Duru et al. 2015). Il y a donc besoin de réduire leur utilisation tout en maintenant la production. Pour cela, il faut trouver des solutions pour protéger les cultures autrement : raisonner les traitements, mettre à profit les processus écologiques (et les services écosystémiques). Pour cela, il nous faut rechercher les facteurs qui jouent sur la protection des cultures, les leviers qui peuvent être mis en œuvre et en déduire des pistes d'amélioration pour les pratiques agricoles.

4.2 LES PRINCIPAUX RAVAGEURS EN VERGERS POMMIERS

En région méditerranéenne, la culture de la pomme est particulièrement agressée par deux taxa : les pucerons (Homoptera : Aphididae) et les tordeuses des fruits comme le carpocapse (Lepidoptera : Tortricidae). Elle est plus marginalement attaquée par une cochenille, le Pou de San José, *Diaspidiotus perniciosi* (Homoptera : Coccoidea), un acarien, *Panonychus ulmi*, (Acari : Tetranychidae), des mineuses de la feuille (dont *Phyllonoricter blancardella* (Lepidoptera : Gracillariidae)), une zeuzère (*Zeuzera pirina* (Lepidoptera : Cossidae)), plusieurs espèces de tordeuses de la pelure (Lepitoptera : Tortricidae) et enfin des charançons (Coleoptera : Curculionidae). (de Roincé, 2012).

Les insectes ravageurs cibles de la grande majorité des insecticides sont le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea* Passerini) et le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella* L.).

Le puceron cendré

Dans les vergers de pommiers, le puceron cendré est le principal puceron ravageur. Il peut provoquer une diminution de rendement de 30 % (Blommers et al. 2004 ; Deberardinis et al. 1994) à 80 % (Qubbaj et al. 2005) dans les vergers non traités. Le pommier est son hôte primaire. Dans la région méditerranéenne, les œufs commencent à éclore en mars et les colonies de pucerons se développent à partir des fondatrices par la reproduction asexuée. Les adultes ailés migrent vers leur hôte secondaire, le plantain (*Plantago lanceolata*) en mai jusqu'à la fin juin (Bonnemaison, 1959). Les individus ailés retournent sur les pommiers en automne et les femelles pondent leurs œufs à proximité des bourgeons. Les œufs éclosent au printemps.

Dans les vergers de pommiers français, les pucerons sont contrôlés par une moyenne de 2,7 traitements spécifiques (Agreste, 2015), avec des huiles minérales ou des insecticides, surtout en début de saison. La nécessité de contrôler les pucerons par des méthodes non chimiques a stimulé la recherche sur le potentiel des ennemis naturels pour supprimer ces ravageurs dans les vergers de pommiers (Brown et Mathews, 2007 ; Cross et al. 2015 ; Dib et al. 2010). Le puceron est la proie d'un grand nombre de prédateurs arthropodes (Lefebvre et al. soumis ; tab. 1).

Le carpocapse

Le carpocapse est un Lépidoptère de la famille des Tortricidés dont l'adulte mesure environ 18 mm d'envergure. C'est un papillon qui se déplace essentiellement à la tombée du jour. Les adultes qui n'ingèrent que des aliments liquides n'ont aucun impact direct sur les cultures. Ce sont les larves qui causent des dégâts majeurs en consommant exclusivement les fruits. Les espèces hôtes sont principalement le pommier, le poirier, le cognassier et le noyer, et secondairement l'abricotier (Audemard, 1991).

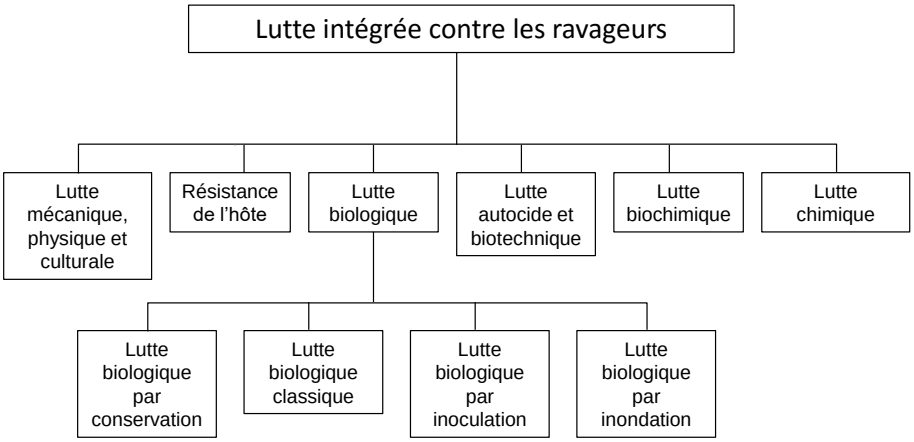
Le carpocapse passe l'hiver sous forme d'une larve diapausante installée dans des anfractuosités de l'écorce du tronc, ou dans le sol au pied des arbres. Dans le sud de la France, cette larve se nymphose à partir de début avril et donne lieu à l'émergence d'un adulte. Cet adulte vit une quinzaine de jours, période durant laquelle il se reproduit. C'est à ce stade que le carpocapse peut potentiellement se déplacer au sein d'un verger, ou entre vergers. Les femelles pondent une cinquantaine d'œufs isolés les uns des autres, sur des feuilles, des rameaux ou directement sur les fruits s'ils sont présents. L'incubation des œufs dure de 1 à 3 semaines selon la température. A l'éclosion, les larves cheminent vers les fruits et cherchent un point de pénétration durant une phase nommé « stade baladeur » qui dure 2 à 5 jours. C'est la principale période durant laquelle la larve est directement exposée aux insecticides ou aux prédateurs, le reste de la vie larvaire se déroulant à l'intérieur du fruit. Les larves creusent une galerie en spirale d'abord juste sous la surface du fruit, puis en direction de la zone des pépins. Cette vie larvaire dure de 20 à 30 jours avec 5 stades successifs ; ensuite, la larve quitte le fruit et cherche un abri pour tisser son cocon. Elle est également accessible aux prédateurs à ce stade. En fonction des conditions climatiques, elle pourra alors soit se nymphoser directement, conduisant à une nouvelle génération dans la même saison, soit entrer en diapause au dernier stade pour passer l'hiver (Ricci 2009, fig. 3).

Dans le sud de la France, on observe de 2 à 3 générations annuelles. Depuis quelques années, on observe de plus en plus de larves de troisième génération ce qui serait lié d'une part au réchauffement climatique qui allonge la durée des conditions favorables à l'émergence des adultes et d'autre part à la plantation de nouvelles variétés de pommes récoltées plus tardivement (Granny Smith, Pink Lady) ce qui prolonge la présence de fruits dans les vergers (Ricci, 2009). Le carpocapse est la cible d'environ 3 traitements insecticides (Agreste, 2015), dans le Sud-Est de la France.

4.3 LA LUTTE BIOLOGIQUE PAR CONSERVATION : S'APPUYER SUR LES PREDATEURS QUI PEUVENT CONTRIBUER AU CONTROLE DES RAVAGEURS DANS LES VERGERS

La lutte biologique par conservation (Conservation biological control) est une des formes de lutte biologique qui peut être proposée dans le cadre d'une protection intégrée des vergers (fig. 1). Elle se base sur une modification de l'environnement ou des pratiques existantes pour protéger et augmenter les ennemis naturels afin de réduire les effets des ravageurs.

FIGURE 1. – Des différents moyens de lutte intégrée contre les ravageurs (adaptée de Eilenberg et al. 2001).



Divers auxiliaires prédateurs pourraient servir pour la régulation des ravageurs en arboriculture fruitière. Par exemples, les acariens prédateurs, les araignées, les coccinelles (larves et adultes), les carabes, les staphylins, les punaises, les névroptères, les larves de syrphes, les forficules, ainsi que les oiseaux insectivores, les rapaces, les petits carnivores, les serpents, et les chauves-souris (Ricard et al. 2012). La plupart sont généralistes mais certains (comme les syrphes aphidiphages) peuvent être spécialisés sur un type de proie (fig. 2, tab. 1).

Dans le Sud-Est de la France, le syrphe ceinturé, *Episyrphus balteatus* (DeGeer) (Diptera : Syrphidae), la coccinelle à deux points *Adalia bipunctata* (L.) et la coccinelle asiatique (*Harmonia axyridis* Pallas) (Coleoptera : Coccinellidae), les forficules et les araignées sont les ennemis naturels les plus abondants du puceron cendré du pommier. Ils attaquent ce puceron en séquence : les araignées puis les syrphes arrivent en premier (de Roincé et al. 2013), suivis par les coccinelles et les forficules (Dib et al. 2010). Le carpocapse possède également de nombreux ennemis naturels (fig. 3). Les ennemis des œufs de carpocapse sont moins connus. Certaines araignées en consomment (tab. 1) mais également des forficules, coccinelles et certaines punaises prédatrices (observations à PSH).

FIGURE 2. – Cycle biologique d'un puceron holocycle diœcique et action possible des ennemis naturels (Ricard et al. 2012).

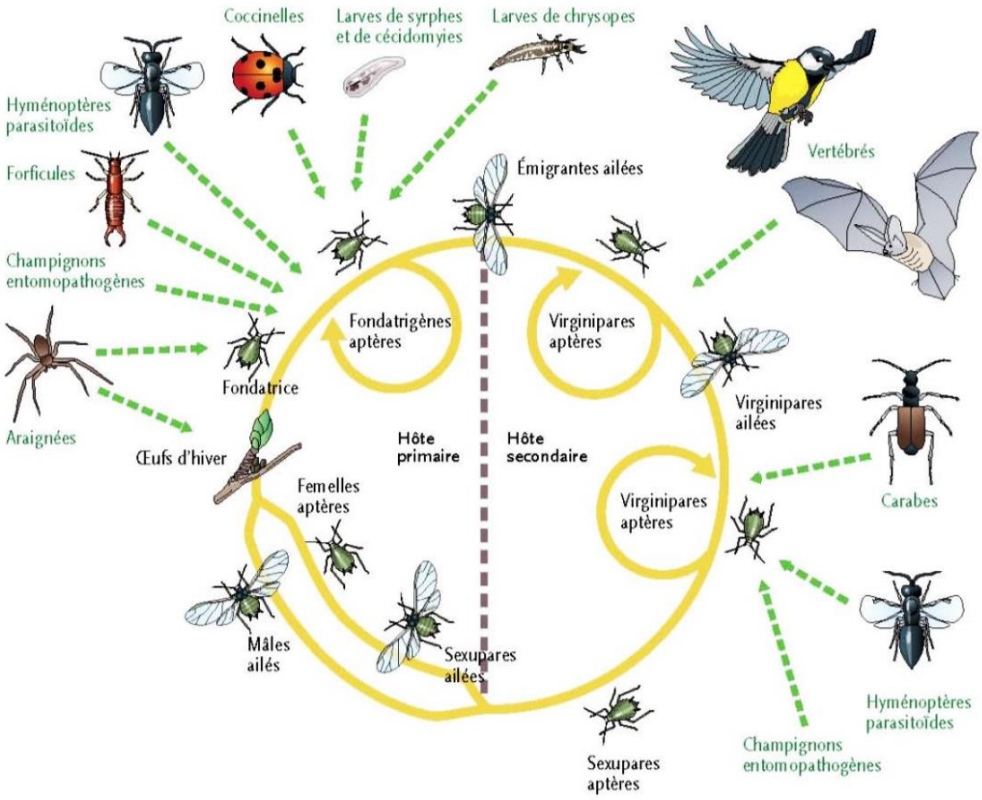


FIGURE 3. – Cycle du carpocapse et de la tordeuse orientale et action possible des auxiliaires (Ricard et al. 2012).

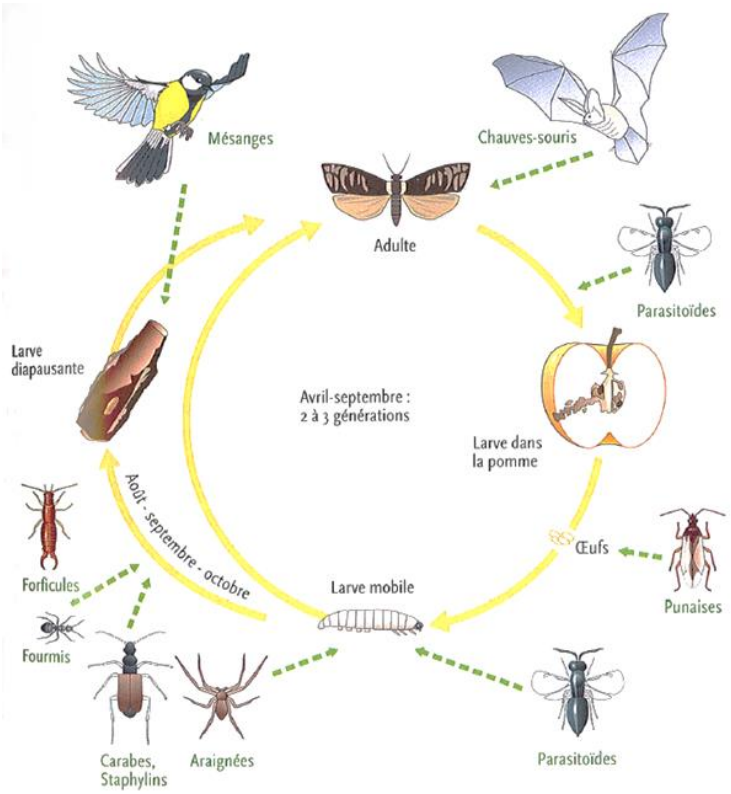


TABLEAU 1. – Ravageurs consommés par les différentes espèces d'araignées adultes en boite de Petri, en fonction de leur stade. Une x indique une prédation, un 0 indique qu'il n'y a eu aucune prédation (thèse M. Lefebvre en cours à PSH).

Ravageurs et leurs stades Araignées adultes	Œufs pucerons cendré	Pucerons cendrés	Œufs carpocapse	Larve néonate carpocapse	Grosse larve carpocapse
Cheiracanthium mildei		×	×	o	×
Anyphaena Accentuata		×	×	o	×
Philodromus cespitum/aureolus	o	×	o	o	×
Icius hamatus	o	×	o	×	o

4.4 LE PAYSAGE ET LE ROLE QU'IL POURRAIT JOUER SUR LA REGULATION DES RAVAGEURS

La gestion du paysage pourrait contribuer à la lutte antiparasitaire d'une façon durable, car la composition du paysage pourrait avoir un impact soit direct sur l'abondance des ravageurs en affectant leur dispersion, mortalité ou reproduction, soit indirect sur les ennemis naturels.

Une méta-analyse de 46 études menées au niveau du paysage rapporte que les ennemis naturels ont une forte réponse positive à la complexité du paysage (Chaplin-Kramer et al. 2011). De même, Veres et al. (2013) décrivent 72 études de cas indépendants, parmi lesquelles 45 signalent un effet de la composition du paysage sur les ravageurs ou leur contrôle biologique, et un taux de parasitisme ou de prédation supérieur dans des paysages avec une proportion plus élevée de zones semi-naturelles ce qui suggère un possible effet suppressif des zones semi-naturelles à l'échelle du paysage sur les ravageurs en champ. Cependant ces deux études ne montrent pas d'effet significatif sur l'abondance des ravageurs. Cela souligne l'intérêt de modéliser et de quantifier l'effet du paysage sur la régulation des bioagresseurs, pour éventuellement approfondir nos connaissances sur cet aspect et trouver des leviers qui nous permettraient d'améliorer la gestion agricole des bioagresseurs par la prédation de leurs ennemis naturels.

La composition des paysages n'est pas la seule composante à considérer. Les communautés d'ennemis naturels dans les systèmes gérés sont plus pauvres et plus semblables entre elles à la fois dans l'espace et le temps que celles des systèmes naturels. Cela accentue l'importance de l'habitat naturel pour le contrôle biologique à l'aide d'une diversité d'ennemis naturels. Les paysages structurellement complexes avec une forte connectivité entre habitats peuvent augmenter la probabilité de la régulation des ravageurs et être les plus favorables pour la lutte biologique par conservation, en particulier les paysages complexes caractérisés par des mosaïques 'cultures-habitats seminaturels' fortement connectées (Tscharntke et al. 2007). Il est donc intéressant de tester et de quantifier la corrélation entre la longueur des interfaces dans les paysages et le taux de prédation par la modélisation statistique.

L'effet du paysage sur la richesse des espèces (et ou sur la prédation) pourrait être contradictoire en fonction des échelles utilisées dans le calcul du modèle statistique. Cela pourrait être dû à « un effet de masse » ou à des effets de complémentation/supplémentation des habitats. Par exemple, dans une étude sur les papillons, Rossi et van Halder (2010) montrent ces effets contradictoires et que les processus à courte distance sont plus importants que les processus à longue-distance. Des différences d'effets entre échelles ont été trouvées dans de nombreuses études (par ex. Concepcion et al. 2012 ; Ricci et al. 2009). Il est donc nécessaire de prendre en compte le paysage à différentes échelles dans les modèles pour tester l'influence paysagère sur le taux de prédation des proies sentinelles.

En résumé, la modélisation des relations entre les taux de prédation et les divers facteurs paysagers à différentes échelles pourrait nous aider à mieux comprendre l'influence paysagère sur le contrôle des ravageurs agricoles, ce qui nous permettrait ensuite de mettre en place des expérimentations pour concevoir la composition et la configuration de paysages agricoles qui maintiennent une diversité d'ennemis naturels généralistes et spécialistes. Ceci nous permettrait donc d'améliorer la gestion agricole des bioagresseurs par la prédation de leurs ennemis naturels.

4.5 L'IMPORTANCE DE MESURER LA PREDATION

Les effets des pratiques agricoles ou du paysage sur l'abondance et la richesse spécifique des prédateurs et des ravageurs sont beaucoup plus étudiées (Dib et al. 2016 ; Lefebvre et al. 2016 ; Sorribas et al. 2016 ; Schmidt-Jeffris et al. 2015 ; Szabó et al. 2014 ; Porcel et al. 2013 ; Ouin et al. 2008 ; Kwaiser et al. 2008 ; Rundlöf et al. 2008b ; Ekroos et al. 2008) que leur prédation ou les dégâts aux cultures (Chaplin-Kramer et al. 2011 ; Veres et al. 2013).

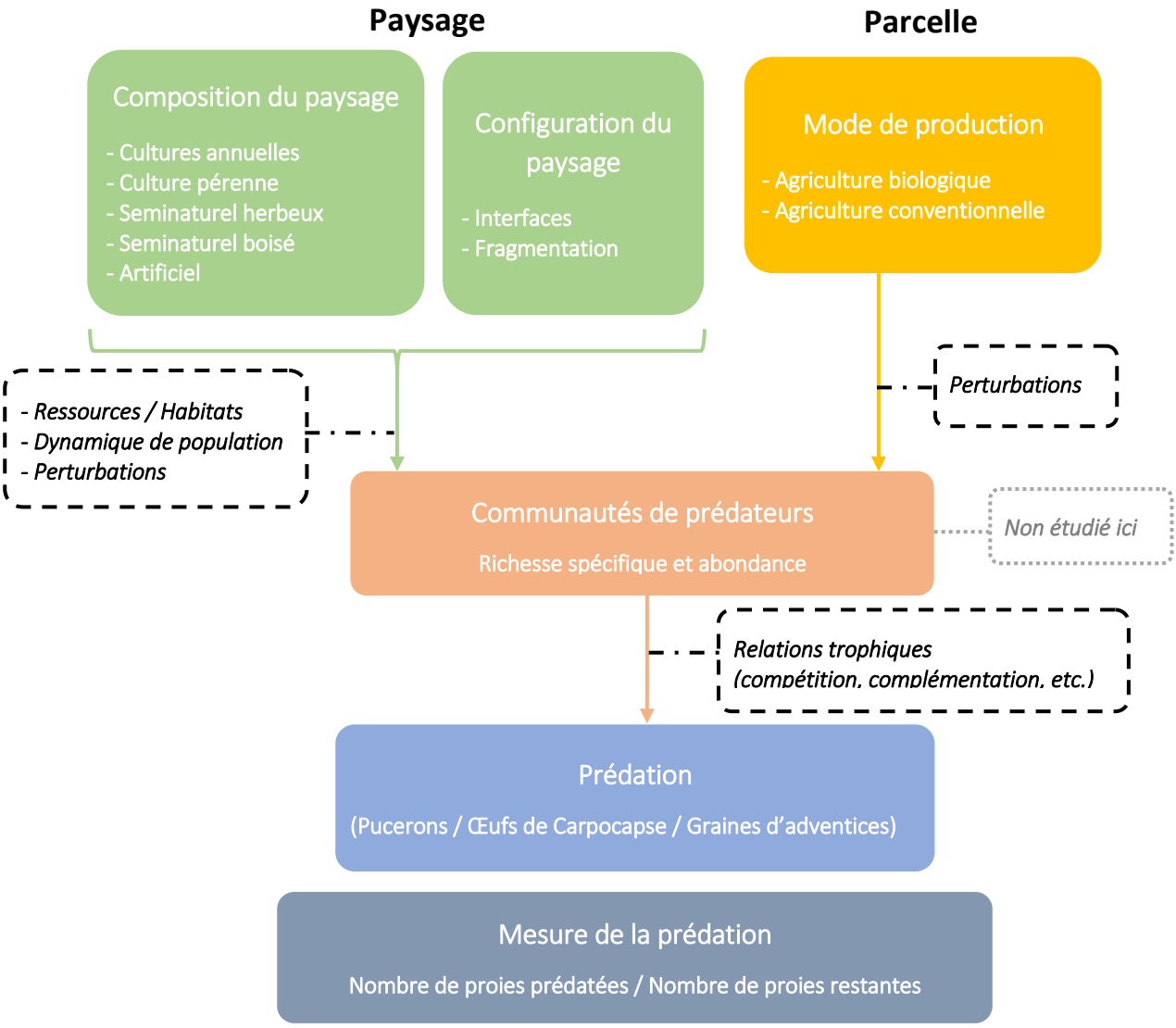
Cependant, les occurrences de prédateurs et de ravageurs ne sont pas toujours liées, ce qui indique que le renforcement des prédateurs n'a pas forcément un effet de contrôle des ravageurs (par ex. Lefebvre et al. 2016). De même, d'après (Chaplin-Kramer et al. 2011), la réponse positive des ennemis naturels à la complexité du paysage ne se traduit pas nécessairement en une réponse positive de contrôle des ravageurs par ces prédateurs, puisque l'abondance de ravageurs ne montre aucune réponse significative à la complexité du paysage. Pourtant, très peu d'études à l'échelle du paysage ont estimé l'impact des ennemis naturels sur les populations des ravageurs, ce qui limite notre compréhension des effets du paysage sur la lutte contre les ravageurs.

Il est donc intéressant d'étudier les taux de prédation. La méthode de la carte de prédation de proies sentinelles est celle qui est privilégiée ici, même si cette approche a des limites comme nous le verrons en discussion. Cette méthode consiste à exposer des proies attachées sur un support ("carte") dans les parcelles et à mesurer la proportion des proies qui est consommée pendant une durée donnée.

4.6 LE PROJET DANS LEQUEL S'INSERE CE STAGE

Le stage s'insère dans le projet Sebiopag-Phyto. L'objectif est de produire des connaissances opérationnelles sur les services de régulation des ravageurs de culture que peut fournir la biodiversité, afin de permettre aux agriculteurs de les mobiliser dans leurs décisions de conduite des cultures. Le projet Sébiopag-Phyto (2014 - 2017 ; projet coordonné par Sandrine Petit (INRA et UMR 1347 Agroécologie, Dijon) rassemble 5 équipes de l'INRA pour produire de nouvelles connaissances à ce sujet dans 5 types de contextes régionaux (voir page dédiée au projet sur le site http://sebiopag.inra.fr). Le degré de régulation des bioagresseurs par les prédateurs au sein des vergers pommiers SEBIOPAG est mesuré dans ce cadre par le taux de prédation des quatre proies sentinelles.

FIGURE 4. – Schéma conceptuel de la problématique étudiée (adapté de Benoît et al. 2012).



4.7 LES HYPOTHESES DE DEPART

Au niveau local (parcellaire) : Nous faisons l'hypothèse que les taux de prédation seront plus élevés en agriculture biologique qu'en agriculture conventionnelle car la première s'appuie plus, a priori, sur le contrôle naturel des ravageurs. Nous faisons également l'hypothèse que la prédation sera plus forte lorsque les pratiques phytosanitaires seront moins intensives.

Au niveau du paysage : Nous faisons l'hypothèse que la diversité de composition et la complexité structurelle du paysage autour d'une parcelle auront une corrélation significativement positive avec le taux de prédation des proies sentinelles. En effet, on suppose que des paysages divers et complexes fournissent des ressources et des habitats pour les prédateurs des ravageurs qui favorisent la dynamique de leurs populations et qui les abritent lorsque les conditions sont défavorables (les traitements phytosanitaires ou des perturbations). Cet effet pourrait évoluer selon des différentes échelles du paysage, avec une influence plus forte à proximité de la parcelle.

5 DÉVELOPPEMENT STRUCTURE

5.1 MATERIEL ET METHODE

5.1.1 Caractéristiques des parcelles et leur environnement

5.1.1.1 Caractéristiques générales des parcelles

Systèmes de production : Jusqu'en 2015, parmi les 20 vergers de pommier SEBIOPAG de la basse vallée de la Durance (voir la carte page 18) il y avait 14 vergers en agriculture conventionnelle et 6 vergers en agriculture biologique. Le verger 177 a été converti en agriculture biologique en 2015. En considérant que la conversion se fait en fin de saison, il est pris en compte comme étant 'conventionnel' dans l'analyse des données de 2014 et 2015.

Surfaces, variétés : Ces vergers de pommiers sont assez petits : leur surface varie entre 0,28 ha et 5,43 ha ; La plupart (12/20) ont une superficie de ou en-dessous de 1 ha, dont la moitié (7/12) ont une superficie de ou en-dessous de 0,5 ha. Neuf variétés des pommes se trouvent cultivées dans ces vingt vergers (tab. 2). Golden est la plus cultivée, elle est présente sur 12 vergers (60 %) en regroupant Early Gold et Golden Extrême avec Golden car ce sont trois clones de golden.

Age et date de conversion à l'agriculture biologique : la plupart des vergers ont plus de 10 ans. Les vergers en agriculture biologique ont été convertis récemment (2007-2015) (tab. 2).

TABLEAU 2. – Caractéristiques générales des parcelles SEBIOPAG.

Numéro de parcelle local	Surface SAU (ha)	Variété principale	Age ou Année plantation	Année de conversion en Bio
4	1,14	Golden	1975	/
11	0,4	Gala	1991	2011
26	0,48	Early Smith	1987	/
28	2	Golden	1960	/
42	0,47	Akane	1980	2011
51	1	Golden	1991	2007
54	1,59	Gala	1978	/
68	0,6	Braeburn	1996	/
75	2,8	Gala	1988	/
84	0,4	Golden/Akane	avant 1971*	2013
88	1	Golden	1980	/
122	2,2	Golden	1974 + 1979	/
177	1	Golden	1985	2015
185	5,43	Golden	1987	2011
191	0,42	Golden	1977	/
194	0,51	Reine des reinettes	1941	2011
200	1,2	Granny	1988	/
205	1,94	Golden Extrême	1995	/
211	0,28	Golden	1967	/
212	0,5	Early Gold	1989	/

* Akane planté avant 1971 - Golden surgreffe 2012

5.1.1.2 Pression phytosanitaire dans les parcelles : variables phytosanitaires

Nous avons caractérisé la pression phytosanitaire dans les parcelles soit en séparant les parcelles en agriculture biologique et conventionnelle, soit à l'aide de l'IFT (Indice de fréquence des traitements).

IFT : concept

L'IFT est un indicateur permettant d'évaluer la pression phytosanitaire exercée sur chaque parcelle. Il est exprimé en nombre de doses homologuées par hectare appliquées sur la parcelle pendant une campagne culturale (Pingault 2007). Il peut également être calculé pour une période inférieure à la campagne culturale. La dose homologuée est définie comme la dose efficace d'application d'un produit sur une culture et pour un organisme cible (un bioagresseur) donné.

L'IFT mesure aussi indirectement la dépendance des agriculteurs vis-à-vis de ces produits et sert à évaluer directement l'efficacité des politiques publiques qui visent à réduire l'usage de produits phytosanitaires, et les risques liés à cet usage (Pingault N, 2009).

Différents IFT seront utilisés pour caractériser la pression phytosanitaire dans les parcelles échantillonnées selon le type de produits considérés et la période de calcul.

Matériel de calcul de l'IFT : Les calendriers de traitement et leur analyse

Les calendriers du traitement sont des documents faits par les agriculteurs, qui enregistrent les traitements (phytosanitaires, nutritifs, etc.) appliquées sur chaque parcelle durant toute la campagne culturale. Les dates (jj/mm/aa), les noms commerciaux des produits utilisés (ou des matières actives) et les doses (l/ha, kg/ha, l/hl, etc.) correspondantes sont notées ; en outre, le bioagresseur* cible, l'objectif du traitement, la variété cultivée de la parcelle sont souvent aussi indiqués.

Les calendriers de traitement utilisés pour l'analyse statistique des années 2014 et 2015 ont été obtenus auprès des agriculteurs correspondants de chaque verger de pommier dans le réseau SEBIOPAG. Ils ont été ensuite saisis dans une base de données sous forme de « .xlsx ». Grâce à une liste des données des produits phytosanitaires actuels en France (fournie par l'unité PSH, INRA PACA et complétée sur http://e-phy.agriculture.gouv.fr/), le type de produit (bio-contrôle/non bio-contrôle), l'action (insecticide, acaricide, herbicide, fongicide, adjuvant, éclaircissage, bactéricide, divers), la dose de référence autorisée/ha (c'est-à-dire la dose la plus faible pour l'espèce cultivée, tous bioagresseurs confondus) sont obtenus automatiquement lorsqu'un produit est rentré. La quantité de chaque produit utilisée est transformée en unité d'IFT, sur une troisième feuille, comme le rapport de la dose utilisée sur la parcelle/ la dose de référence.

La somme d'IFT appliqués pour une période donnée pour chaque catégorie (IFT insecticide ha, IFT insecticide bio-contrôle, IFT fongicide ha, IFT fongicide ha, IFT bactéricide ha, IFT acaricide ha, IFT herbicide ha, somme IFT insecticide) est calculée pour chaque verger.

Le classement des produits relevant du bio-contrôle a changé en 2015. Pour classer les produits en 'bio-contrôle' ou 'non bio-contrôle', deux critères ont donc été utilisés : soit celui de l'année 2012 (source : GRCETA Basse-Durance), soit celui de l'année 2015 (Note de service DGAL/SDQPV/2016-279 31/03/2016).

Au cours de mon stage, j'ai saisi les calendriers de traitements de l'année 2015 ; celles de l'année 2014 sont vérifiés et complétés.

Le calcul des IFT utilisés dans les modèles statistiques

Pour quantifier les produits phytosanitaires utilisés pour chaque verger pommier, qui auront des effets directs sur les ravageurs potentiels des bioagresseurs, l'indice d'IFT est calculé de la manière suivante :

IFT total

IFT total = IFT insecticide + IFT fongicide + IFT acaricide + IFT bactéricide

IFT chimique

Pour les vergers conventionnels, l'IFT chimique est spécialement calculé afin d'avoir juste les insecticides/acaricides chimiques les plus toxiques pour les arthropodes.

IFT chimique 2012 (ou 2015) = IFT insecticide + IFT acaricide - IFT insecticide bio-contrôle 2012 (ou 2015).

Puisque les produits sont classés différemment selon les critères 2012 ou 2015, l'IFT chimique 2012 est différent de l'IFT chimique 2015. Cependant, seul l'IFT chimique 2012 est ensuite utilisé dans les modèles car ils sont très peu différents.

IFT total cumulé

Pour quantifier les produits phytosanitaires utilisés du début de l'année jusqu'à la pose des cartes de prédation, c'est-à-dire ceux qui auront des effets directs sur les prédateurs potentiels des bioagresseurs pour chaque verger pommier, l'indice d'IFT cumulé est calculé en ne considérant que les traitements antérieurs à la pose des cartes de la manière suivante :

IFT total cumulé = IFT insecticide cumulé + IFT fongicide cumulé + IFT acaricide cumulé + IFT bactéricide cumulé.

IFT chimique cumulé

IFT chimique cumulé est calculé sur le même principe de calcul que l'IFT total cumulé, pour les vergers conventionnels :

IFT chimique 2012 (2015) cumulé = IFT insecticide cumulé + IFT acaricide cumulé - IFT insecticide bio-contrôle 2012 (2015) cumulé

Seul l'IFT chimique 2012 cumulé est utilisé dans les modèles.

Proximité de la pose des cartes aux traitements

Pour explorer l'effet de la proximité de la pose des cartes aux traitements sur le taux de prédation des proies sentinelles, le nombre de jours entre le dernier traitement et la date de pose des cartes de prédation dans les vergers est compté.

Pour tous les vergers (biologique et conventionnel), on considère l'ensemble des traitements considérés dans l'IFT total. De plus pour les vergers conventionnels, on calcule le nombre de jours entre le dernier traitement insecticides ou acaricides et la date de pose des cartes de prédation.

5.1.1.3 Caractérisation du paysage entourant les parcelles : les variables paysagères

5.1.1.3.1 Cartographie du paysage

Les parcelles se situent dans le Nord des Bouches-du-Rhône, à environ 20 km d'Avignon (fig. 5).

La cartographie du paysage a été effectuée à partir de photos aériennes, du registre parcellaire graphique et de relevés de terrain dans le cadre du projet SEBIOPAG. Deux classifications de catégories d'habitats ont été considérées. La plus fine compte 8 types d'habitats, la seconde en compte 4 (tab. 3). La numérisation a été faite sous ArcGIS® sous forme vectorielle. Les calculs des indices ont été faits avec le logiciel Chloé à partir de rasters des couches vectorielles (2 m x 2 m).

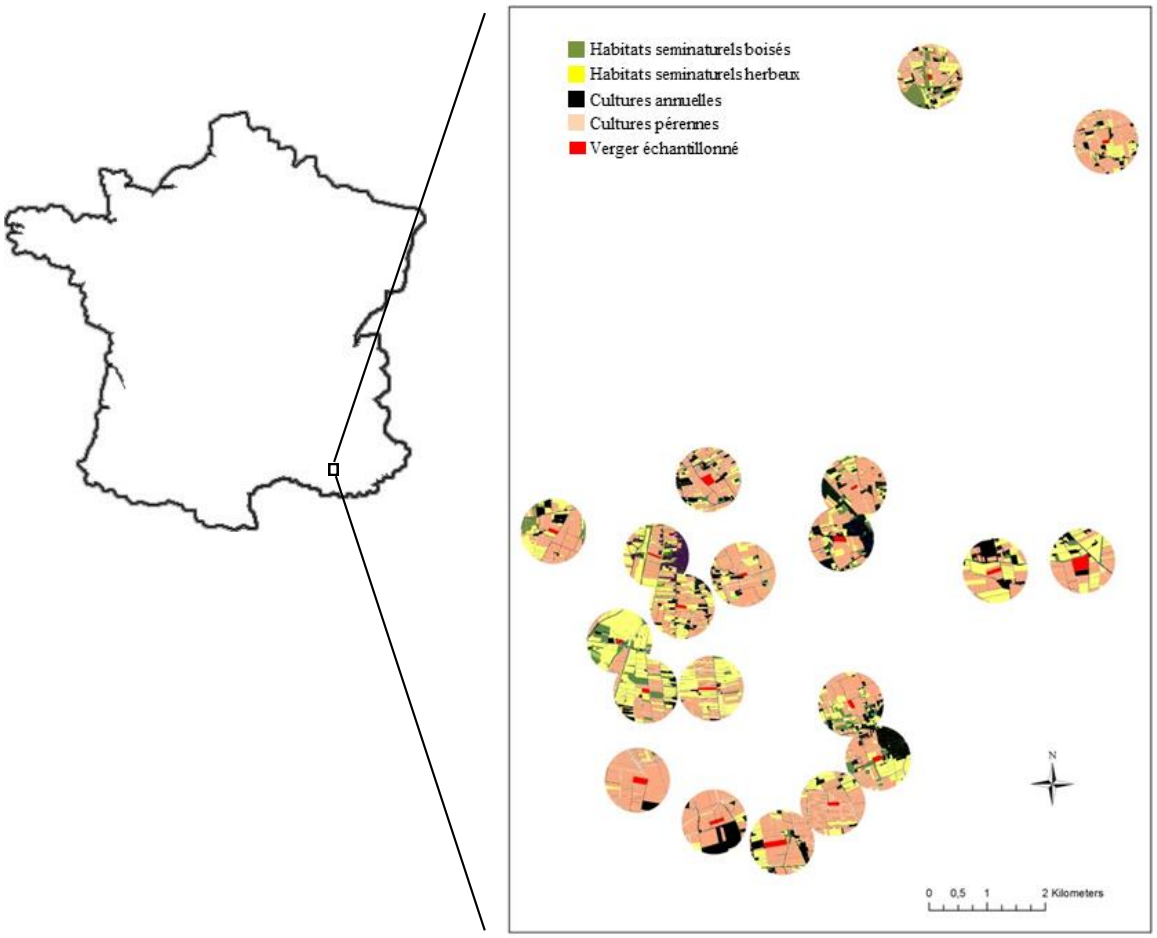
TABLEAU 3. – Catégories retenues pour la numérisation du paysage.

Classification fine	Classification regroupée
Vergers	Culture pérenne
Vignes	Culture pérenne
Cultures annuelles	Cultures annuelles
Prairies	Seminaturel herbeux
Friches herbeuses	Seminaturel herbeux

Bois ou friches boisées	Seminaturel boisé
Artificiel (incl. Serres)	Artificiel
Haies	Seminaturel boisé

'Artificiel' regroupe des routes, des zones urbanisées, des serres…, 'Haies' regroupe les haies qui sont numérisées en 4 m de large, 'Prairie' regroupe les prairies de fauche ou pour le pâturage, 'Cultures annuelles' regroupe les grandes cultures et le maraîchage de plein champ.

FIGURE 5. – Carte représentant les 20 parcelles (en rouge) et les buffers de 1 km².*



*Les occupations du sol correspondent à la classification regroupée (vert : seminaturel boisé ; noir : cultures annuelles ; orange : cultures pérennes ; jaune : seminaturel herbeux).

5.1.1.3.2 Les indices paysagers : proportion d'habitat seminaturel, diversité des habitats et longueurs d'interface

Choix des indices

L'indice de Shannon

L'indice de Shannon caractérise la diversité des couvertures du sol autour des points de pose. La valeur de l'indice augmente quand le nombre de catégories augmente ; pour un nombre de catégories fixe, sa valeur augmente quand elles sont plus équitablement réparties.

Pour le calcul de l'indice de Shannon, nous avons utilisé la classification fine des habitats, en regroupant 'haies' et 'Bois ou friche boisées'.

Pour chaque verger, l'indice est calculé comme :

$$\text{Shannon} = -\sum_{i=0}^{n} (\ln \pi i \times \pi i)$$

où, $n = 7$ et πi est la proportion de la couverture du sol i dans le buffer.

La proportion d'habitat semi-naturel

Cet indice est une mesure de la composition du paysage et notamment de l'utilisation par l'agriculture ; c'est un indice fréquemment utilisé dans la littérature (par ex. Chaplin-Kramer et al. 2011).

Il est calculé comme la somme :

% Seminat = % seminat-boisé + % seminat-herbeux (exprimés en proportion)

Longueur d'interface

Cet indice est un indice de structure du paysage, qui décrit la longueur des zones de contact entre cultures et éléments seminaturels. Plus le paysage est morcelé et les éléments semi naturels mêlés aux parcelles cultivées, plus la longueur d'interface est grande (Tscharntke et al. 2007).

Interface = longueur du bord entre 'bois' et 'culture' + longueur du bord entre 'milieux seminaturel herbeux' et 'culture') (en mètres)

Echelles pour le calcul des indices

La diversité du paysage autour des vergers est calculée à deux échelles : avec un rayon de 560 m et de 150 m autour du centre des points de pose des cartes de prédation, ce qui correspond à des surfaces de 1 km^2 et 0,07 km^2 (7 ha). Le second correspond donc à l'environnement proche des parcelles. Pour préciser les échelles de calcul des indices nous avons rajouté le rayon du buffer à leur nom : 'Shannon_560', 'Seminat_560', 'Interface_culture-seminat_560' ; 'Shannon_150', 'Seminat_150', 'Interface_culture-seminaturel_150'. Les valeurs des indices sont données dans le (tab. 10).

5.1.2 Estimation de la prédation (voir annexes 2 et 3, page 62 à 63)

Les expérimentations comprennent une partie hors terrain qui inclut la préparation des cartes de prédation avant le terrain et le comptage après le terrain pour obtenir les taux de prédation) et la partie sur le terrain qui inclut la pose et le récolte des cartes de prédation dans les vergers de pommier. L'ensemble des manipulations hors terrain ont lieu dans l'insectarium (bâtiment d'élevage d'insectes) de l'unité PSH de l'INRA PACA. Sur le terrain, les poses des cartes se font sur les 20 parcelles décrites plus haut.

5.1.2.1 Préparation des cartes de prédation

5.1.2.1.1 Matériel biologique : les proies sentinelles

Le choix des proies sentinelles sur le site d'Avignon a été fait en commun avec les autres sites du réseau SEBIOPAG. L'objectif était qu'elles soient des bioindicateurs* témoignant du bon fonctionnement de la régulation entre ravageurs et prédateurs et qu'elles incluent au moins un ravageur du pommier. Les espèces choisies sont donc le Carpocapse des pommes, *Cydia pomonella*, de l'ordre des lépidoptères, de la famille des tortricidés, et le Puceron vert du pois, *Acyrthosiphon pisum*, de la famille des aphididés, de l'ordre des homoptères. Ces deux espèces ravageuses vont attirer de nombreux prédateurs tels que des forficules, des araignées, des carabes, des fourmis, des punaises, etc. Enfin, les graines de Pensée des champs (espèce messicole*), *Viola arvensis* L, de la famille des violacés et de l'ordre des malpighiales, ont été choisies, car elles attirent des insectes prédateurs granivores ou omnivores tels que les carabes.

5.1.2.1.2 La préparation des cartes de prédations

Les cartes de prédation sont en papier de verre, un matériel robuste qui permet de résister aux intempéries. Le principe consiste à exposer sur chacune des cartes, une proie sentinelle*, à savoir soit trois pucerons,

soit dix graines ou soit neuf à dix œufs de carpocapse. Ces proies sont collées sur environ un tiers de la carte. Les différentes colles utilisées sont adaptées aux proies qu'elles fixent.

Les cartes sont obtenues par découpage d'un rouleau de papier de verre (50 m × 20 cm), à l'aide d'un massicot. Le format des cartes doit être environ de 5 cm × 5 cm. Pour les sujets qui seront posés au sol (pucerons et graines), un trou est fait au centre de la carte pour une fixation directe au sol avec un clou (acier long 70 mm, diamètre 3 mm). Les cartes non percées sont à fixer dans l'arbre sur les feuilles par les agrafes.

Chaque type de carte : 1 - œufs de Carpocapses, 2 - Puceron bas (Pucerons au sol), 3 - Puceron haut (dans l'arbre) et 4 - graines de Pensée, correspond à ce que nous appellerons une « modalité ».

Cartes des graines (Viola arvensis L.)

Les graines de Pensée des champs sont envoyées par Dijon aux autres sites. Pour cette modalité, les graines sont fixées sur des cartes percées, à l'aide d'une colle à bois SADER diluée dans de l'eau. Pour chaque carte, dix graines sont déposées.

Cartes d'œufs de Carpocapse (Cydia pomonella)

Pour les œufs de carpocapse, l'approvisionnement se fait directement à l'élevage de carpocapses à l'insectarium de PSH. Chaque jour, des feuilles de ponte sont mises en contact avec des carpocapses adultes, qui déposent leurs œufs directement dessus. Ces feuilles sont collectées chaque jour. On découpe ensuite des surfaces de 2 cm de côté maximum contenant neuf à dix œufs intacts. Ces morceaux sont ensuite collés sur un point de colle "SADER tous travaux" en tube appliqué sur les cartes en papier de verre non percée. La conservation de ces cartes se fait à -20°C.

Cartes de pucerons (Acyrthosiphon pisum)

Pour l'ensemble des sites, des pucerons verts du pois (*Acyrthosiphon pisum*) sont commandés auprès de la société Katz biotech. A la réception des pucerons, ils sont installés sur des plants de fèves (*Vicia faba* L.) afin de favoriser le développement de la colonie. Après obtention d'un nombre de pucerons suffisant, trois pucerons non ailés sont sélectionnés puis sont fixés sur chaque support en papier de verre. Pour immobiliser les pucerons, ils sont déposés délicatement à l'aide d'un pinceau sur une carte vaporisée de colle en spray (UHU). Il est important de ne pas détériorer les pucerons pour ne pas fausser les résultats lors de la lecture de prédation. La conservation de ces cartes se fait à -20°C.

TABLEAU 4. – Les effectifs des cartes et des proies pour la réalisation de la manipulation pour chaque session de pose.

Nombre de parcelles	20
Nombre de points par parcelles	10
Nombre de pucerons par carte	3 (±)
Nombre de graines par carte	10 (±)
Nombre d'œufs par carte	10 (±)

TABLEAU 5. – Le nombre d'individus utilisé pour chaque proie, et entre parenthèse indiquant le nombre de cartes de prédation utilisé correspondant.

	Pucerons	**Graines**	**Œufs de Carpocapses**	**Total**
Par point de mesure	6 (2)	10 (1)	10 (1)	(4)
Par parcelle	60 (20)	100 (10)	100 (10)	(40)
Par site pour 1 session	1200 (400)	2000 (200)	2000 (200)	(800)
Par site pour 2 sessions	2400 (800)	4000 (400)	4000 (400)	(1600)

5.1.2.2 Pose et récolte des cartes de prédation dans les parcelles

Sessions et durée d'exposition

Les cartes sont posées et récoltées à deux reprises dans les parcelles, en début de saison quand les feuillages des arbres sont encore jeunes et les principaux ravageurs arrivent tout juste et environ un mois plus tard, quand ravageurs et auxiliaires sont bien établis. Les dates de pose pour 2014, 2015 et 2016 sont données dans le (tab. 6). Les cartes avec les pucerons sont récoltées au bout de 24h, les autres au bout de 4 jours.

TABLEAU 6. – Dates de pose et de collecte des cartes pour chaque session (protocole 2014, 2015 et 2016).

Année	Espèces	Session 1		Session 2	
		Pose	Collecte	Pose	Collecte
2014	*A.pisum*	24 avril	25 avril	13 mai	14 mai
	V.arvensis		28 avril		17 mai
	C.pomonella				
2015	*A.pisum*	23 avril	24 avril	18 mai	19 mai
	V.arvensis		27 avril		22 mai
	C.pomonella				
2016	*A.pisum*	28 avril	29 avril	30 mai	31 mai
	V.arvensis		2 mai		3 juin
	C.pomonella				

Positionnement des cartes

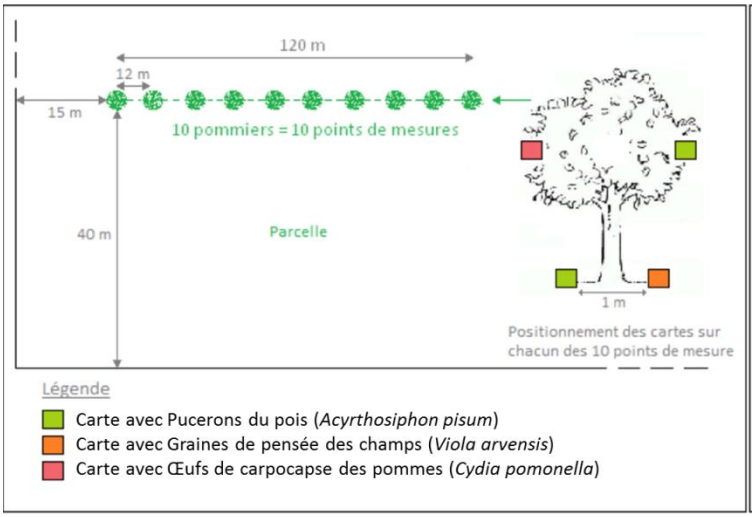
Pour la pose des cartes de prédation en vergers, trois à quatre équipes de deux personnes sont formées afin d'assurer une pose en une seule journée pour avoir les mêmes conditions météorologiques. Lors de la récupération des cartes, les équipes doivent garder le même ordre des parcelles que celui établi lors de la pose. Le principe est appliqué pour les deux sessions.

Tout le long de la manipulation sur le terrain, les cartes doivent être manipulées avec soin. Les cartes sont transportées dans des boites qui assurent que les proies ne se décollent pas et ne s'abiment pas. Sur chaque parcelle, dix points de mesures sont déterminés. Un point de mesure représente un pommier sur lequel sont posées quatre cartes présentant les trois proies décrites précédemment. Ces dix points de mesures sont répartis sur un transect* parallèle au bord de la parcelle et à une distance de 20 m de celui-ci. Dans le cas des vergers étroits, le transect est positionné sur le rang du milieu. Dans le sens du transect, le premier point de mesure est à 15 m du bord de la parcelle, ceux qui suivent sont séparés de 12 m de distance. A chaque point de mesure, on fixe quatre cartes à deux hauteurs différentes, espacées d'environ 50 cm (fig.6) :

- Au sol, une carte de pucerons et une carte de graines, fixées en leur centre avec un clou.

- Dans l'arbre, une carte de pucerons et une carte d'œufs.

FIGURE 6. – Représentation schématique de la pose de cartes de prédation en verger de pommier à gauche et à droite des photos des quatre proies sentinelles sur cartes de prédation.



Celles-ci sont agrafées au feuillage du pommier, sur la face inférieure de la feuille. La hauteur de pose doit être de 1,5 m afin d'avoir un feuillage dense autour de la carte. Les cartes sont placées dans un ordre aléatoire pour chaque point de mesure, cependant en respectant l'exposition du support au Nord, afin d'éviter le dessèchement des proies.

Météo durant les périodes de la pose des cartes de prédation

Les données climatiques pendant la période de pose sont données dans le (tab. 7). Elles sont fournies par la base de données CLIMATIK qui est un outil de mise à disposition de données agroclimatiques de la base de l'INRA aux utilisateurs (Unité Agroclim. 2016). La station météorologique est celle d'Avignon située à environ 20 km des parcelles échantillonnées.

TABLEAU 7. – Données climatiques pendant les périodes de pose des cartes.

Année	Sessions	Jours	Hauteur des précipitations (mm)	Température moyenne (°C)	Vitesse moyenne du vent (mètres par seconde)	Vitesse maximale du vent (mètres par seconde)
2014	S1	24 avril	0	17,4	1,1	6
		25 avril	5,5	15,7	2,4	10
		26 avril	5	16,3	2,1	9
		27 avril	0	14,5	2,2	10
		28 avril	1	14,3	1,7	12
	S2	13 mai	0	14,8	3,5	13
		14 mai	0	15,3	4,9	16
		15 mai	0	15,5	6,3	17
		16 mai	0	15,9	4,9	14
		17 mai	0	18,5	2,2	8
2015	S1	23 avril	0	17	0,9	5
		24 avril	1,5	17,5	1,2	9
		25 avril	0,5	16,5	1,3	7
		26 avril	19,5	17	1,7	7
		27 avril	37,5	13,8	1,7	8

		18 mai	0	19,3	1,3	6
		19 mai	0	17,5	1,9	9
	S2	20 mai	0	15,2	3,5	12
		21 mai	0	15	5,3	18
		22 mai	0	17,7	5,6	15
		28 avril	0	13,3	2,5	10
		29 avril	0	13,8	1,8	7
	S1	30 avril	3,5	10,4	0,9	13
		1 mai	0	9	5,8	20
2016		2 mai	0	15,4	6,6	18
		30 mai	0	18,7	1,5	7
		31 mai	4	16,7	1,6	9
	S2	1 juin	0	17,2	1,2	6
		2 juin	0	18,6	1,1	6
		3 juin	0,5	20,3	1,7	6

5.1.2.3 Lecture des cartes de prédation

Au retour du terrain, les cartes de prédation sont placées dans un congélateur à -20°C jusqu'à leur lecture. Le comptage des graines et des pucerons restant sur chaque carte peut se faire à l'œil nu. Le nombre d'œufs de carpocapses restant est compté à l'aide d'un microscope optique. Les données sont rentrées dans un fichier Excel.

5.1.3 Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel R (version 3.2.4 Revised (2016-03-16 r70336)) et les packages *doBy*, *ggplot2* et *corrplot* pour les graphes et calculs de corrélations et les packages *lme4* et *car* pour les modèles linéaires (voir annexe 6 et 9). Seules les données de 2014 et 2015 ont été analysées car les données d'IFT n'étaient pas disponibles pour 2016.

5.1.3.1 Corrélations entre caractéristiques des parcelles

Nous avons réalisé des tableaux de corrélation de « Spearman » pour mieux connaître le jeu de données et pour explorer les corrélations entre des différents variables phytosanitaires et paysagères, afin de choisir les variables à mettre dans les modèles linéaires. En effet il est déconseillé de mettre dans un même modèle des variables explicatives corrélées.

5.1.3.2 Calcul des taux de prédation et des corrélations entre eux

L'ensemble des données sont répertoriées dans une base de données créée avec le logiciel Excel qui est ensuite exportée en .txt pour être analysée avec R. Les données correspondent aux 10 points de mesures des 20 parcelles des 2 sessions des 3 années pour les 4 modalités (carpocapses, puceron bas, puceron haut et graines de Pensée, cf matériel et méthode).

Les étapes du traitement sont les suivantes :

(1) Calcul du taux de prédation :

$$\text{Proportion de proies restantes} = \frac{\text{Nombre de proies restantes}}{\text{Nombre totale de proies exposés}}$$

Taux de prédation = 1 − proportion de proies restantes

(2) Réalisation des graphes en visualisant les moyennes et les erreurs standard du taux de prédation pour chaque proie, en fonction du mode de production (biologique/conventionnel) de l'année, ou de ces deux facteurs et de la session.

(3) Réalisation des tableaux de corrélation de « Spearman » pour visualiser les corrélations entre les moyenne du taux de prédation des 4 types de proies au niveau de la parcelle entre proies, sessions et années.

5.1.3.3 Modélisation de la relation entre taux de prédation et variables explicatives :

5.1.3.3.1 Choix du type de modèle

Dans cette étude, je cherche à comprendre comment les pratiques agricoles (notamment les traitements phytosanitaires) et le paysage autour des points d'échantillonnage influencent la prédation des proies sentinelles au sein des parcelles. Pour mettre en évidence ces liens, il est donc nécessaire de mettre en relation les taux de prédation avec les variables explicatives. Les modèles doivent prendre en compte la structure des données.

J'ai fait le choix d'utiliser des modèles linéaires généralisés mixtes (fonction *glmer*) avec une distribution binomiale des données. En effet :

- La variable de réponse est une proportion de proies prédatées par carte, les modèles doivent donc être du type binomial.

- En supposant l'existence des différences entre les vergers, et l'homogénéité au sein de chaque verger, les 10 cartes posées dans un même verger sont considérées comme 10 répétitions de chaque échantillon pour chaque session. Comme les différences entre les vergers ne nous intéressent pas (sauf les caractéristiques de la pression phytosanitaires, qui seront décrire par l'indice de Bio (biologique/conventionnel) et l'IFT dans les modèles ; les caractéristiques du paysage autour, qui seront décrites par les variables paysagères) ; et comme on veut écrire dans les modèles que les différentes cartes au sein d'un verger ne sont pas indépendantes et que ce sont les vergers qui constituent le niveau de répétition, il est donc nécessaire de mettre un effet aléatoire « verger ».

- De plus, pour tester la surdispersion des données nous avons introduit un effet aléatoire « numéro d'observation ».

Les résidus des modèles ont été inspectés visuellement avec la fonction *binnedplot* du package *arm*. C'est une fonction qui représente les résidus en fonction des valeurs prédites. Les valeurs prédites sont divisées en intervalles ('bins') et les résidus sont moyennés sur chaque intervalle. Des lignes indiquent les limites de ± 2 d'erreurs standards. Au contraire des graphes des résidus bruts, cela nous permet d'analyser les résidus des modèles régression logistiques, pour lesquels les données sont discontinues. Si un modèle est approprié, 95 % des résidus regroupés par intervalles devraient tomber dans l'enveloppe de ± 2 erreurs standards (Quian, 2009).

Les modèles étaient donc de la forme :

$Y_{ij} \sim \text{Bin}\,(1, p_{ij})$

$\text{logit}\,(p_{ij}) = \eta_1\,(\text{variables phytosanitaires}_{ij}) + \eta_2\,(\text{variables paysagères}_{ij}) + a_i$

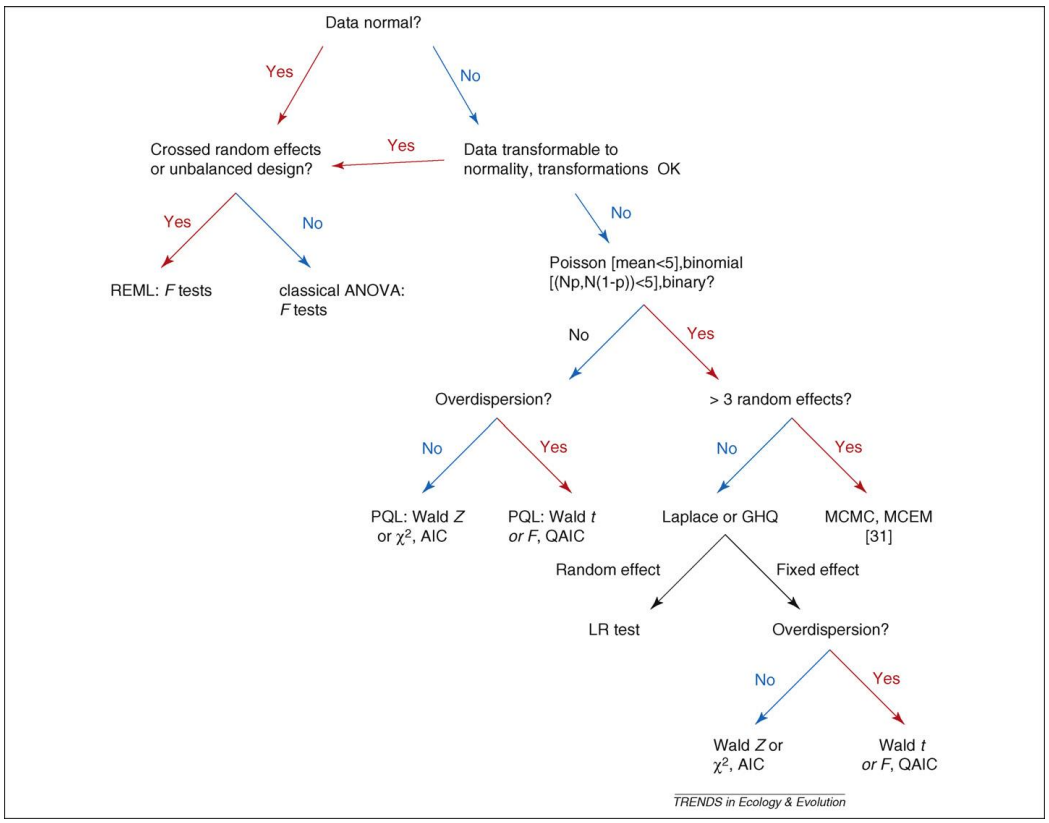
$a_i \sim \text{N}\,(0, \sigma_a^2)$

L'ajustement des modèles aux données a été évalué par leur AIC (critère d'Akaike) pour chaque proie indépendamment (Burham et Anderson 2002).

Au global, le processus de la modélisation statistique décrit correspond à peu de choses près (cf discussion) à ce qui est proposé par Bolker et al. 2009 (fig. 7) : données non normales → non transformable en données normales → données binomiales → un effet aléatoire verger (< 3), ou deux, avec effet aléatoire au niveau

d'observation (< 3) → Laplace approximation, effets fixes → avec sur-dispersion significative → Wald *t* ou *F*, QAIC

FIGURE 7. – Arbre de décision pour l'ajustement des modèles linéaires généralisés mixtes (tiré de Bolker et al. 2009).



5.1.3.3.2 Choix des variables à mettre dans les modèles et test de leurs effets

Une fois le type de modèle choisi, nous avons dû choisir quelles variables mettre dans les modèles. La démarche générale a été la suivante :

- Dans un premier temps, nous avons fait un choix des variables à exclure des modèles car elles étaient trop corrélées avec d'autres variables explicatives.
- J'ai ensuite fait de premiers modèles (primaires) pour voir si les parcelles en agriculture biologique se comportaient comme les parcelles en agricultures conventionnelles, et s'il y avait des interactions entre variable phytosanitaire et année pour voir s'il fallait faire des modèles distincts par année. Ces modèles ne comportaient pas de variables paysagères.
- Des modèles locaux ont ensuite été réalisés basés sur le résultat des modèles primaires avec différentes variables concernant la pression phytosanitaire, pour voir les effets locaux des traitements phytosanitaires sur le taux de prédation pour chaque proie.
- Enfin, les variables paysagères ont été ajoutées dans les modèles locaux en ne conservant que les variables significatives, pour obtenir les modèles finaux qui prendront en compte les effets des traitements phytosanitaires et du paysage en même temps.

Les tests de la significativité des variables ont été faits en comparant chaque modèle complet de référence (contenant toutes les variables) au même modèle à l'exception de la variable (ou de l'interaction) à tester en utilisant la fonction *Anova* (package *car*) et en inspectant les graphes des résidus regroupés par intervalles.
Les effets aléatoires 'vergers' sont estimés par la fonction *glmer* du package *lme4* et visualisés par la fonction *dotplot* du package *ggplot2*.

5.1.3.3.3 La réalisation technique

(1) Saisie des données (les résultats de la lecture des cartes de prédation, les calendriers de traitement et les données paysagères) dans Excel → Importation des données dans R → Fusion des différents tableaux → Obtention d'un tableau de données total ;

(2) Calcul des indices d'IFT et des variables paysagères ;

(3) Réalisation des graphes, des tableaux de corrélation entre les taux de prédation des différentes proies et des variables explicatives ;

(4) Exclusion des variables explicatives trop corrélées ;

(5) Réalisation des modèles primaires pour chaque proie :

Le taux de prédation ~ Bio + Année + Session + Bio*Année + Bio* Session + Année*Session + un effet aléatoire verger (+ un effet aléatoire individu pour modéliser la surdispersion).

(6) A partir des résultats des modèles primaires (cf. résultats : tab. 11), nous avons testé les différentes variables explicatives phytosanitaires dans des modèles locaux par session pour les pucerons bas et les carpocapses (tab. 8) ; Les modèles primaires ont été conservés tels quels pour les pucerons haut et les graines.

TABLEAU 8. – Les modèles secondaires réalisés pour les pucerons bas et les carpocapses.

Vergers	Annee	Bio	Cumul_IFT_total	n_jrs_avant_pose_tous
Tous	X	X		
	X		X	
	X			X
Conventionnel	X		X (Cumul_IFT_chimique_2012)	
	X			X (n_jrs_avant_pose_in_ac)
Bio	X		X	
	X			X

(7) La réalisation des modèles finaux en ajoutant les variables paysagères (aux deux échelles) aux modèles locaux (avec les variables phytosanitaires significatives) pour chaque proie, afin d'explorer la relation entre le taux de prédation et les variables phytosanitaires et paysagères pour chaque proie. Nous n'avons pas assez de données sur les vergers en agriculture biologique (6 vergers au total) et aucune analyse spécifique n'est conduite dessus.

Les modèles finaux testés sont les suivants :

TABLEAU 9. – Les modèles incluant les variables paysagères réalisés pour les pucerons bas et les carpocapses.

Vergers	Proie	Annee	Session	Bio	Annee* Session	Session *Bio	Annee *Bio	IFT_chimique _2012	Shannon	Interface _cult_se minat	Seminat
Tous	Pucerons bas	X	X	X	X	X			X	X	X
	Pucerons haut	X							X	X	X
	Grains	X	X	X	X	X	X		X	X	X
	Carpocapses	X	X	X	X	X			X	X	X

Conventionnels	Pucerons bas	X	X	X			X	X	X
	Pucerons haut						X	X	X
	Grains	X	X			X	X	X	X
	Carpocapses	X	X	X			X	X	X

(8) Réalisation en parallèle avec les étapes précédentes des graphes des résidus regroupés par intervalles ("Binned Residual Plot"s) dans R en utilisant le package *arm*, commande *binnedplot*, pour évaluer si les données correspondent aux hypothèses des modèles GLMER.

(9) Réalisation des "dotplot" en utilisant le package *ggplot2*, commande *dotplot* pour visualiser l'effet aléatoire verger en dessinant la valeur d'intercept estimé par le modèle avec l'enveloppe de l'effet aléatoire (95 % confiance).

(10) Réalisation des graphes montrant les résultats des mesures des dégâts des carpocapses (proportion des fruits piqués par les carpocapses, mesurés sur 1000 fruits) et des pucerons (nombre des colonies de pucerons par arbre, mesurés sur 100 rameaux), ainsi que la valeur moyenne du nombre de carpocapses par bande-piège (mesurés sur 30 bandes-piège par verger) pour alimenter la discussion.

5.1.4 Estimation des populations de carpocapses et des dégâts dans les parcelles (voir annexe 4)

Pour mieux caractériser les parcelles et le contrôle des ravageurs, je me suis également intéressée à l'abondance des carpocapses et aux dégâts dans les parcelles. Les données ont été récoltées par d'autres personnes de l'équipe en 2014, 2015 et 2016 (sauf pour les abondances : 2014 et 2015).

5.1.4.1 Dégâts de carpocapse

Ils sont estimés par la proportion de fruits piqués fin juin, à la fin de la première génération du carpocapse. Cette proportion est estimée par l'observation visuelle de 1000 fruits répartis sur 50 arbres (20 fruits par arbre). Ces arbres sont régulièrement répartis sur deux rangs centraux du verger et 10 fruits sont observés sur chacune des faces de l'arbre.

5.1.4.2 Abondance de carpocapse

L'abondance du carpocapse est estimée en fin de saison en comptant le nombre de larves diapausantes qui passent l'hiver dans les parcelles. Pour ce faire, pour chaque verger, 30 bandes de carton ondulé sont attachées autour des troncs de 30 arbres à environ 15 cm de hauteur au mois de juillet. Les bandes sont récupérées en octobre lorsque toutes les larves diapausantes ont quitté les fruits. Elles sont ramenées au laboratoire et les larves sont comptées.

5.1.4.3 Dégâts de pucerons cendrés

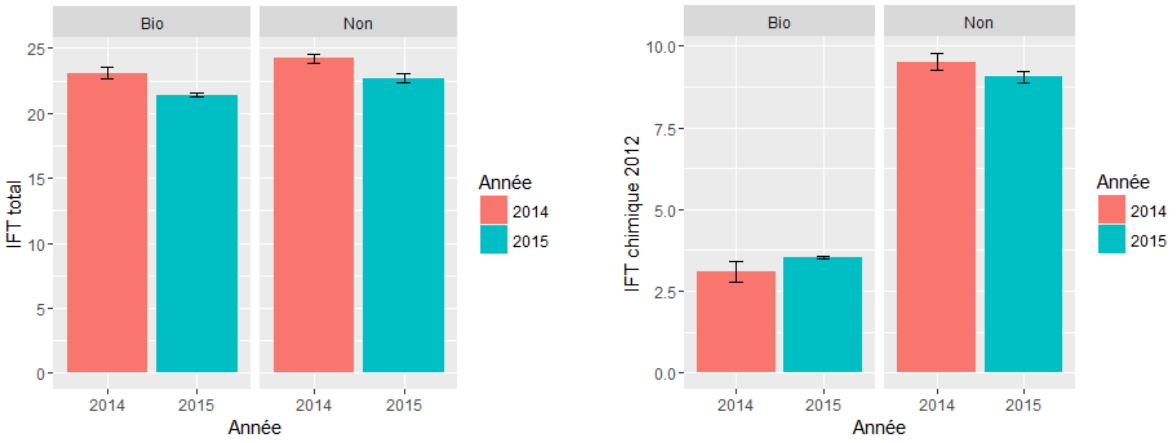
Les dégâts sont estimés par la proportion de rameaux portant au moins une colonie de pucerons cendrés. Cette proportion est estimée sur 100 rameaux pris au hasard sur les arbres utilisés pour les mesures de dégâts de carpocapse (1 rameau par face).

5.2 RESULTATS

5.2.1 Caractérisation des parcelles

5.2.1.1 Caractérisation phytosanitaire des parcelles

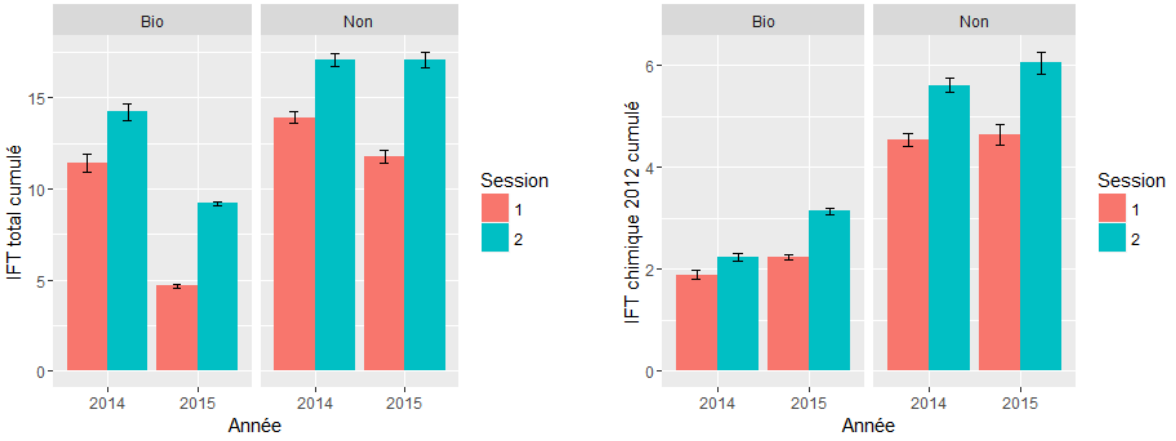
FIGURE 8. – Moyenne de l'IFT total et de l'IFT chimique selon le mode de production et l'année.



Les IFT totaux dans les parcelles varient entre 15,09 et 36,9 en 2014 et entre 14,7 et 36,5 en 2015. La moyenne de l'IFT total des vergers conventionnels est légèrement plus haute que celle des vergers en agriculture biologique pour les années 2014 et 2015. Cependant, la différence est faible par rapport à la quantité totale utilisée. La quantité des traitements phytosanitaires chimiques est, elle, beaucoup plus faible en agriculture biologique dans lesquels de nombreux traitements sont effectués avec des produits de bio-contrôle (virus de la granulose contre le carpocapse, cuivre contre les maladies fongiques).

Lorsque l'on considère l'IFT total, il est un peu plus élevé en 2014 qu'en 2015 mais on ne retrouve pas cette tendance pour les IFT chimiques.

FIGURE 9. – Moyenne de l'IFT total cumulé et de l'IFT chimique cumulé selon le mode de production, la session et l'année.



Lorsque l'on regarde les valeurs d'IFT jusqu'à la date de pose (session 1 ou session 2) on voit la même tendance avec de plus une nette augmentation entre les deux sessions, plus marquée en 2015 qu'en 2014, ce qui pourrait être dû au fait que les sessions étaient séparées par une semaine de plus en 2015 que 2014. On peut noter également que l'IFT total cumulé était plus faible en 2015 qu'en 2014 à la première session. Ce résultat ne se retrouve pas sur l'IFT chimique et est très probablement dû aux fongicides car le printemps 2015 a été très pluvieux.

FIGURE 10. – Moyenne du nombre de jours entre le dernier traitement et la date de pose des cartes de prédation dans les vergers selon le mode de production, la session et l'année.

Le nombre de jours depuis le dernier traitement donne une idée de la fréquence de traitement au moment de la pose. On remarque que les traitements sont plus fréquents en avril qu'en mai, et qu'en moyenne le dernier traitement insecticide ou acaricide avait eu lieu dans les parcelles au moins 7 jours avant la pose des cartes. En revanche le dernier traitement (tous produits confondus) était souvent récent pour les deux premières sessions.

5.2.1.2 Caractérisation du paysage autour des parcelles

TABLEAU 10. – Valeurs de l'indice de Shannon, de la proportion d'habitat semi naturel et de la longueur d'interface calculés pour les 20 vergers SEBIOPAG aux deux échelles mentionnées.

Numéro de parcelle local	Shannon_560	Seminat_560	Interf._culture-seminat_560	Shannon_150	Seminat_150	Interf._culture-seminaturel_150
4	1,65	0,39	18592	1,58	0,61	1250
11	1,69	0,44	23276	1,47	0,29	3932
26	1,57	0,29	23956	0,32	0,26	1822
28	1,7	0,63	33490	1,65	0,44	894
42	1,32	0,85	5622	0,28	0,81	378
51	1,75	0,38	21108	0,29	0,23	2054
54	1,45	0,14	14390	0,26	0,05	1314
68	1,53	0,4	19744	0,28	0,32	3704
75	1,52	0,28	19280	0,23	0,11	1512
84	1,48	0,24	35012	1,36	0,17	3292
88	1,51	0,63	25662	0,3	0,55	1908
122	1,6	0,31	40496	0,28	0,15	3266
177	1,56	0,45	14300	0,28	0,34	2088
185	1,49	0,49	14966	0,28	0,22	454
191	1,64	0,26	29150	0,27	0,17	580
194	1,61	0,45	13982	0,3	0,23	636
200	1,33	0,33	33854	0,26	0,22	3386
205	1,3	0,15	28676	0,25	0,11	2132
211	1,82	0,58	26496	1,52	0,62	1818
212	1,36	0,3	37182	1,53	0,37	2234

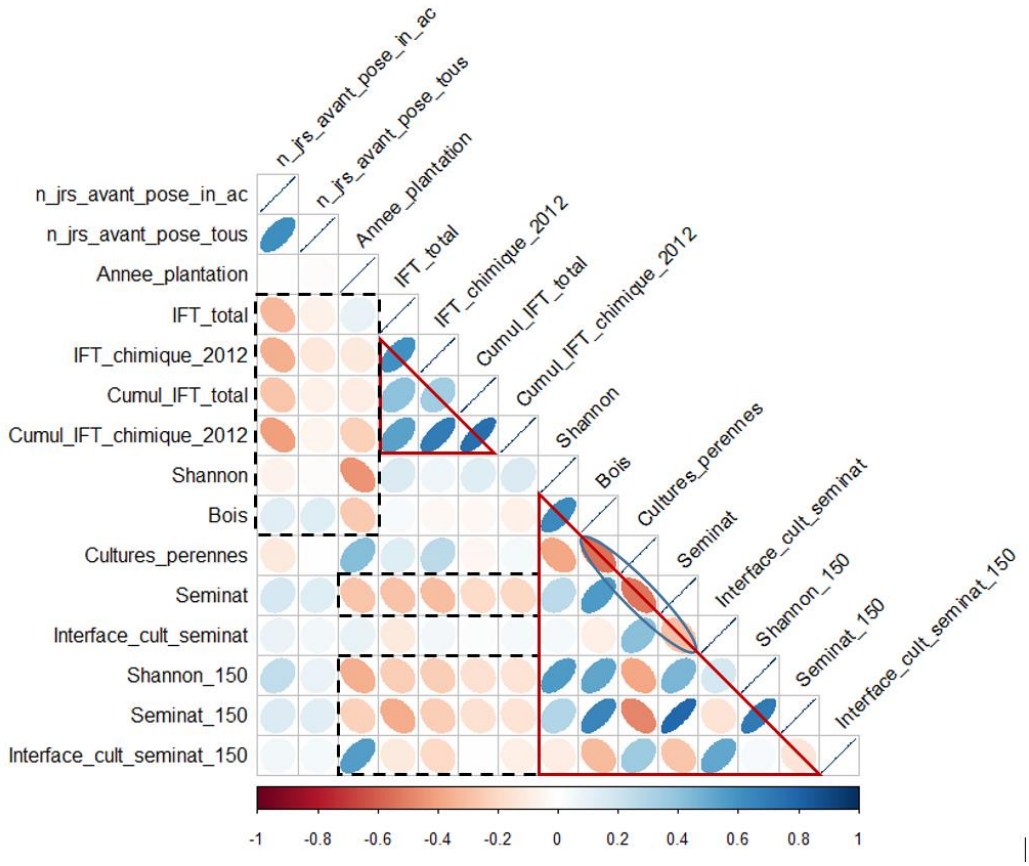
Pour les 20 vergers, l'indice de 'Shannon_560' varie entre 1,3 et 1,82 ; l'indice de 'Shannon_150' varie entre 0,23 et 1,65. Pour une même parcelle, l'indice de 'Shannon_560' est plus grand que l'indice de 'Shannon_150', sauf la parcelle 212. Pour la parcelle 4 et la parcelle 28, leur indice de 'Shannon_150' est très proche de leur indice de 'Shannon_560'. Cela signifie que pour ces 20 vergers, la diversité du paysage est en général plus grande lorsque l'on considère une grande superficie que le voisinage autour du centre des points de pose des cartes de prédation. Cela semble assez logique car l'utilisation du territoire est plus homogène à cette échelle.

La proportion d'habitat seminaturel 'Seminat_560' varie entre 0,14 et 0,85, à peu près dans la même gamme que 'Seminat_150' (0,05 - 0,81). Pour une même parcelle, l'indice 'Seminat_560' est souvent plus grand que l'indice de 'Seminat_150', sauf pour les parcelles 4, 211 et 212. Cela correspond au fait que les vergers sont plutôt dans des ilots de zones cultivées, sauf ces trois dernières parcelles.

La longueur d''Interface_cult-seminat_560' varie entre 5622 m et 40496 m ; l'indice de 'Interface_culture-seminaturel_150' varie entre 378 m et 3932 m. Pour une même parcelle, l'indice de 'Interface_cult-seminat_560' est toujours beaucoup plus grand que l'indice de 'Interface_culture-seminaturel_150' (de 5,33 à 50,26 fois plus grand selon les vergers) ce qui est logique puisque la surface considérée est environ 14 fois plus grande.

5.2.1.3 Corrélation entre variables explicatives

FIGURE 11. – Matrice de corrélations entre les variables explicatives – phytosanitaires et paysagères pour l'année 2014 et 2015.*



* Les corrélations positives sont en bleu, les corrélations négatives en rouge et l'intensité de la couleur permet de visualiser la valeur de la corrélation. 'Shannon' signifie 'Shannon_560' ; 'Bois' signifie 'Bois_560' ; 'Culture_perennes' signifie ''Culture_perennes_560' ; 'Seminat' signifie 'Seminat_560' ; 'Interface_cult_seminat_560' signifie 'Interface_cult_seminat_560'. Les données chiffrées sont dans l'annexe 8.

- Variables phytosanitaires :

Parmi les variables explicatives phytosanitaires, les variables d'IFT : 'IFT_total', 'IFT_chimique_2012', 'Cumul_IFT_total' et 'Cumul_IFT_chimique_2012' sont fortement et positivement corrélées entre elles ($0,34 < r^2 < 0,75$), notamment 'IFT_chimique_2012' et 'Cumul_IFT_chimique_2012' ($r^2 = 0,7$), 'Cumul_IFT_total' et 'Cumul_IFT_chimique_2012' ($r^2 = 0,75$). Les variables décrivant le nombre de jours entre le dernier traitement et la pose 'n_jrs_avant_pose_tous' et celle décrivant le nombre de jours entre le dernier traitement chimique et la pose 'n_jrs_avant_pose_in_ac', sont aussi très positivement corrélés entre elles ($r^2 = 0,62$).

Il est donc approprié de sélectionner une seule de ces variables pour analyser l'effet des traitements phytosanitaires dans les modèles. Les variables 'Cumul_IFT_total' et 'n_jrs_avant_pose_tous' seront testées séparément lorsque l'on analysera la prédation dans tous les vergers ou les vergers en agriculture biologique ; 'Cumul_IFT_chimique_2012' et 'n_jrs_avant_pose_in_ac' seront testéees uniquement pour les vergers conventionnels.

- Variables paysagères :

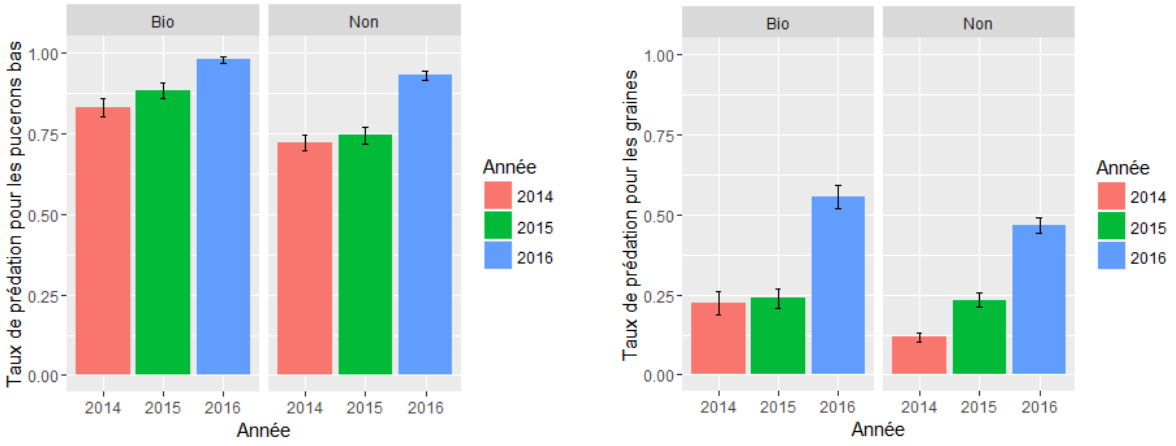
A une échelle donnée (150 m ou 560 m) les trois variables paysagères (shannon, interface et proportion d'habitats semi-naturels) sont peu corrélées, sauf l'indice de Shannon et la proportion d'habitat seminaturels à 150 m. On va donc les conserver pour les modèles statistiques. On peut remarquer que l'indice de Shannon et la proportion d'habitat semi-naturels à 560 m sont fortement corrélés à la proportion de bois ($r^2 = 0,63$ et $r^2 = 0,57$) et que la proportion d'habitats seminatuels est corrélée négativement à la proportion de cultures pérennes ($r^2 = - 0,53$).

5.2.1.4 Présentation générale des taux de prédation

Les données de prédation sont présentées sur les figures ci-dessous (fig. 12). Les données manquent pour la session 1 de l'année 2016 pour les parcelles 4, 11, 28, 51, 54, 88, 122, 200 car les cartes ont été arrachées par un fort mistral ; Les données de prédation de la Session 2 de l'année 2014 pour la parcelle 84 sont également manquantes.

La moyenne du taux de prédation pour les pucerons bas est la plus haute, en comparant avec la moyenne du taux de prédation des autres proies (des graines (*Viola arvensis* L.), d'œufs de lépidoptères (*Cydia pomonella*), et des pucerons (*Acyrthosiphon pisum*) hauts). En moyenne, les parcelles en agriculture biologiques ont un meilleur taux de prédation pour toutes les proies, avec une faible différence pour les graines en 2015.

FIGURE 12. – Taux de prédation observés pour les pucerons bas, les graines, les pucerons hauts et les œufs de carpocapses pour les parcelles en agriculture biologique et conventionnelle, en 2014, 2015 et 2016.



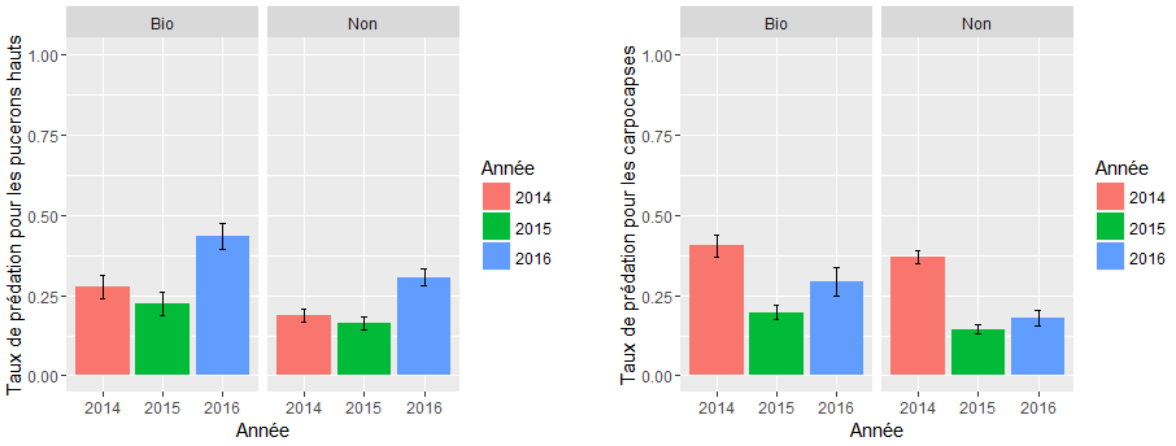
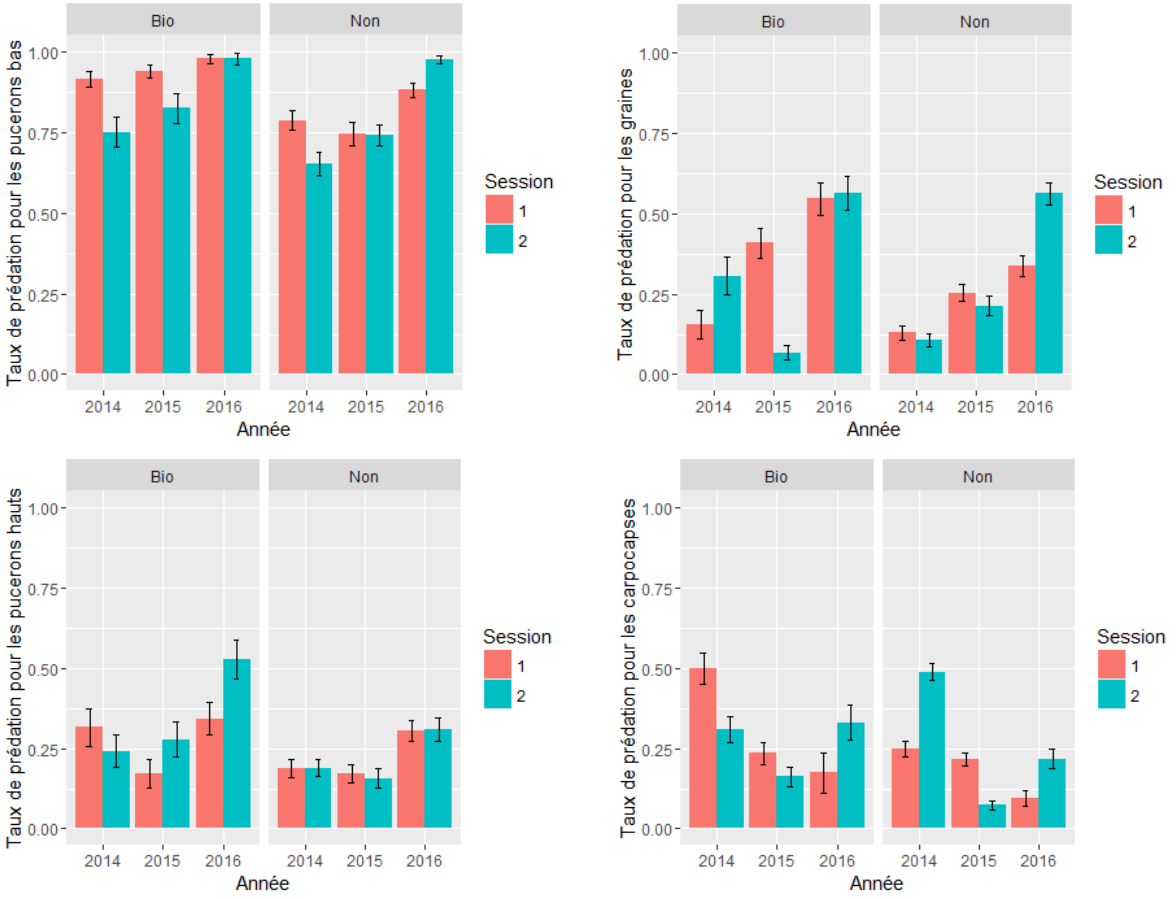


FIGURE 13. – Taux de prédation observés pour les pucerons bas, les graines, les pucerons hauts et les œufs de carpocapses pour les parcelles en agriculture biologique et conventionnelle, en 2014, 2015 et 2016 en différenciant les deux sessions de pose.

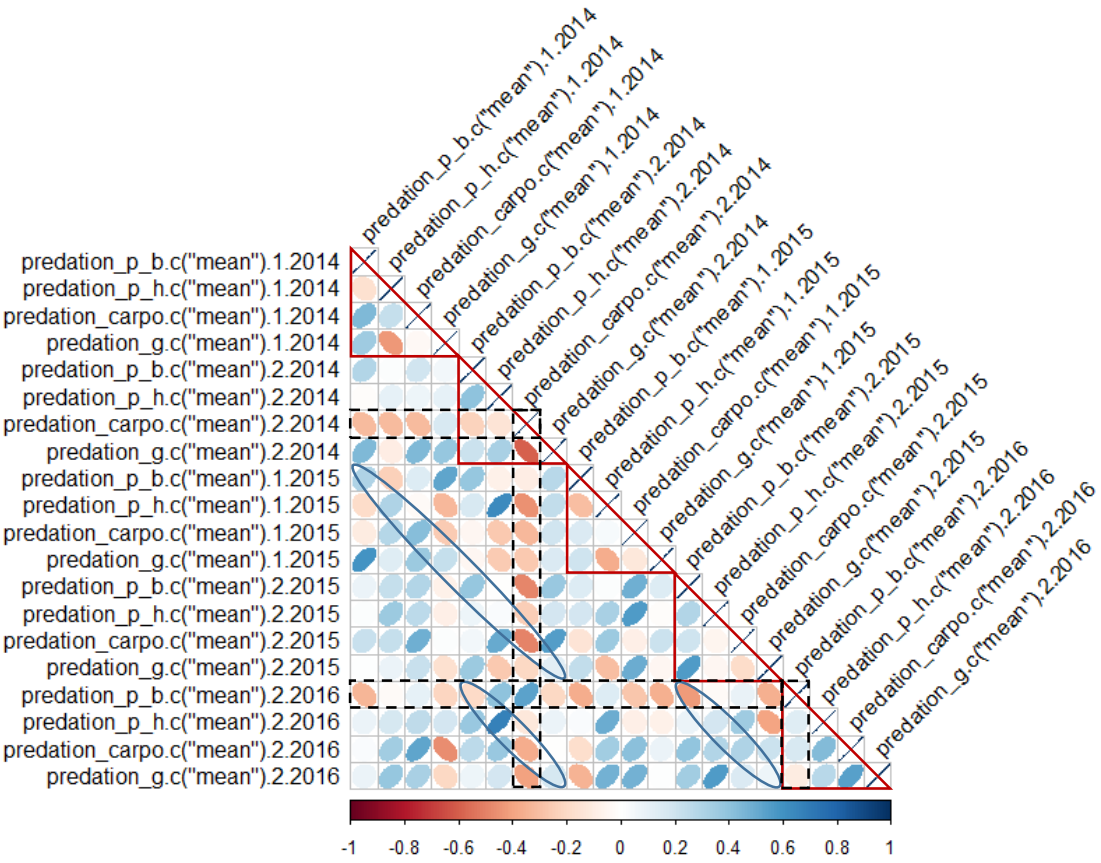


Si l'on voit clairement des différences de taux de prédation entre deux sessions pour une même proie, une année donnée, il ne semble pas y avoir de règle générale. Par exemple, la moyenne du taux de prédation pour les pucerons bas de la Session 1 est plus haute que celle de la Session 2, en 2014 et 2015 mais pas en 2016. De même, pour les parcelles en agriculture biologique, le taux de prédation pour les graines de la session 2 est généralement plus haut que celui de la session 1 mais il était très bas en 2015.

5.2.1.5 Corrélation entre les taux de prédation

La matrice a été calculée en retirant les données de la session 1 pour 2016 car il y avait trop de données manquantes.

FIGURE 14. – Matrice de corrélations entre les taux de prédations des différentes proies aux différentes sessions et années.*



* Les corrélations positives sont en bleu, les corrélations négatives en rouge et l'intensité de la couleur permet de visualiser la valeur de la corrélation. p_b : pucerons bas, p_h : pucerons haut, carpo : œufs de carpocapse, g : graines. 'mean' signifie 'la moyenne du taux de prédation au niveau de parcelle'. Les chiffres donnent la session suivie de l'année. Les triangles rouges contiennent les corrélations entre deux proies à une même session une même année, les ovales bleus contiennent les corrélations entre années pour une même session pour une même proie. Les pointillés noirs surlignent le cas particuliers de la prédation des œufs de carpocapse en session 2 de 2014 et du puceron bas en session 2 de 2016.

On note que les taux de prédations sont relativement indépendants et que les taux de prédation, pour une même session, ne sont pas systématiquement corrélés. On note cependant que les taux de prédation des deux proies posées au sol (graines et pucerons bas) ont tendance à être corrélées positivement (pour une même session) ce qui n'est pas le cas des deux proies attachées dans la canopée (œufs de carpocapse et pucerons hauts). On peut remarquer que deux données se comportent de façon atypique : le taux de prédation du carpocapse en session 2 de 2014 et, moins fortement, du puceron bas en session 2 de 2016, ont tendance à être négativement corrélés avec toutes les autres valeurs.

5.2.2 Facteurs affectant les taux de prédation

5.2.2.1 Modèles locaux

Modèles primaires

Ces modèles analysaient l'effet sur la prédation de l'année, la session, le fait que les parcelles soient en agriculture biologique ou conventionnelle et leurs interactions. Tous les graphes des résidus regroupés par intervalles (binned residual plots) et des dotplots des modèles primaires pour chaque proie se trouvent en annexe 10.

TABLEAU 11. – Résultat des modèles primaires pour les 4 modalités.

	Annee	Session	Bio	Annee*Session	Session*Bio	Annee*Bio
Pucerons bas	.	***	*	**	**	ns
Pucerons haut	.	ns	ns	ns	ns	ns
Grains	***	***	ns	***	***	***
Carpocapses	***	ns	*	***	***	ns

* : p < 0.05 ; ** : p < 0.01 ; *** : p < 0.001 ; ns : non significatif.

Pucerons bas : Les trois facteurs : l'année ('Annee'), la session ('Session') et le mode de production ('Bio') sont significatifs ; les interactions entre 'Annee' et 'Session', ainsi qu'entre 'Session' et 'Bio' sont significatives aussi. L'effet de la pression phytosanitaire dépend donc de la session et de l'année. Les modèles pour étudier plus en détail l'effet de la pression phytosanitaire seront donc faits selon les différentes sessions.

Pucerons haut : l'année ('Annee') est le seul facteur significatif et il n'y a pas d'interactions significatives. L'effet de la pression phytosanitaire ne dépend donc pas de l'année et le modèle est gardé tel quel.

Graines : l'année ('Annee') et la session ('Session') sont significatifs mais pas le mode de production ('Bio') en effet pur, en revanche les interactions entre 'Annee' et 'Bio', 'Session' et 'Bio' sont significatives, ainsi qu'entre 'Annee' et 'Session'. Toutes les interactions étant significatives, on garde le modèle entier.

Carpocapses : l'année ('Annee') et le mode de production ('Bio') sont significatifs ; la session ('Session') n'est pas significative en effet pur, mais les interactions entre 'Annee' et 'Session' et 'Session' et 'Bio' sont significatives. Les modèles pour étudier plus en détail l'effet de la pression phytosanitaire seront donc faits selon les différentes sessions.

Modèles secondaires pour étudier plus en détail l'effet de la pression phytosanitaire locale

Ces modèles visent à mieux comprendre ce qui est important dans la pression phytosanitaire. Celle-ci est donc décrite par différentes variables.

TABLEAU 12. – Résultats des modèles étudiant la pression phytosanitaire sur la prédation des pucerons bas.*

Vergers	Annee (2015)	Bio (Non bio)	Cumul_IFT	n_jrs_avant_pose	AIC
Session 1					
Tous	-0,176 (ns)	-1,191 (*)			867,09
	-0,468 (*)		-0,079 (*)		832,62
	-0,303 (**)			0,068 (ns)	836,88
Conventionnel	-0,275 (ns)		-0,120 (ns)		698,53
	-0,304 (.)			0,034 (*)	695,30
Bio	-0,545 (ns)		-0,121 (ns)		136,11
	-0,069 (*)			0,083 (*)	137,68
Session 2					
Tous	0,446 (**)	-0,478 (ns)			1094,44
	0,332 (*)		-0,021 (ns)		1066,83
	0,380 (*)			-0,019 (ns)	1067,02
Conventionnel	0,501 (**)		-0,166 (**)		766,60
	0,393 (*)			0,017 (ns)	772,12
Bio	0,170 (ns)		-0,002 (ns)		298,17
	0,339 (ns)			0,099 (.)	294,03

* Chaque ligne correspond à un modèle différent. Pour les vergers conventionnels le Cumul-IFT et le nombre de jours avant pose ne prennent en compte que les insecticides et acaricides chimiques (cf. matériel et méthode : 2.1.1.2, Proximité de la pose des cartes aux traitements). * : p < 0.05 ; ** : p < 0.01 ; *** : p < 0.001 ; ns : non significatif.

Ces modèles confirment l'intérêt de considérer les données par session car l'effet de l'année est très différent : les taux sont plus élevés en 2014 qu'en 2015 pour la session 1 alors qu'ils sont plus élevés en 2015 qu'en 2014 pour la session 2, sauf pour les vergers en agriculture biologique. L'effet de la pression phytosanitaire est attendu quand il est significatif, avec des taux de prédation plus faibles en agriculture conventionnelle, quand l'IFT est plus élevé ou quand le dernier jour de traitement avant la pose des cartes est plus proche.

TABLEAU 13. – Résultats des modèles étudiant la pression phytosanitaire sur la prédation des œufs de carpocapse.*

Vergers	Annee (2015)	Bio (Non bio)	Cumul_IFT	n_jrs_avant_pose	AIC
Session 1					
Tous	-0,519 (***)	-0,798 (**)			2031,00
	-0,457 (***)		-0,009 (ns)		1939,97
	-0,362 (**)			-0,020 (ns)	1939,80
Conventionnel	-0,194 (.)		-0,136 (**)		1306,18
	-0,210 (*)			0,018 (*)	1311,63
Bio	-0,758 (**)		0,040 (ns)		599,60
	-1,199 (*)			0,033 (*)	600,80
Session2					
Tous	-2,008 (***)	0,290 (ns)			1927,05
	-2,289 (***)		-0,051 (***)		1796,93
	-2,204 (***)			-0,027 (*)	1805,44
Conventionnel	-2,725 (***)		-0,062 (ns)		1222,37
	-2,841 (***)			0,026 (**)	1216,86
Bio	-1,367 (***)		-0,102 (*)		515,71
	-0,951 (***)			-0,069 (**)	514,66

* Chaque ligne correspond à un modèle différent. Pour les vergers conventionnels le Cumul-IFT et le nombre de jours avant pose ne prennent en compte que les insecticides et acaricides chimiques (cf. matériel et méthode : 2.1.1.2). * : p < 0.05 ; ** : p < 0.01 ; *** : p < 0.001 ; ns : non significatif.

Les résultats sont un peu moins clairs pour la prédation du carpocapse avec une prédation toujours plus faible en 2015, plus faible quand l'IFT est plus élevé mais différents effets du nombre de jours écoulés depuis le dernier traitement. Si en agriculture conventionnelle on obtient le résultat attendu (plus de prédation quand le dernier traitement est plus lointain) ce n'est pas le cas en agriculture biologique pour la session 2. Nous avons vu que les taux de prédation du carpocapse de la session 2 de 2014 avaient un comportement atypique qui réapparait ici.

Tous les graphes des résidus regroupés par intervalles (binned residual plots) et les graphiques des effets aléatoires de ces modèles se trouvent en annexe 10.

5.2.2.2 Effets du paysage sur la prédation

Paysage : (S = 1 km^2), r = 560 m

TABLEAU 14. – Effet des variables locales et paysagères sur les taux de prédation des 4 proies en considérant soit l'ensemble des vergers soit uniquement les vergers conventionnels.

Vergers	Proie	Annee (2015)	Session(2)	Bio (Non bio)	Annee(2015) *Session(2)	Session(2) *Bio(Non)	Annee(2015) *Bio(Non)	IFT_chimique _2012	Shannon _560	Interface_cult _seminat_560	Seminat _560	AIC
Tous	Pucerons bas	-0,154(.)	-1,487(***)	-1,186(.)	0,587(**)	0,779(**)			0,094(ns)	-0,034(ns)	0,018(ns)	2037,27
	Pucerons haut	-0,210(.)							-0,162(ns)	0,092(ns)	1,005(ns)	1912,50
	Grains	0,567(***)	-0,129(***)	-1,272(ns)	-1,067(***)	0,513(***)	0,914(***)		0,161(ns)	0,166(ns)	0,731(ns)	4774,44
	Carpocapses	-0,499(***)	-0,181(ns)	-0,740(*)	-1,494(***)	0,983(***)			-0,140(*)	0,080(ns)	0,408(ns)	4103,95
Conventionnels	Pucerons bas	-0,255(ns)	-0,760(***)		0,711(**)				0,159(ns)	-0,032(ns)	-0,049(ns)	1539,95
	Pucerons haut								-0,010(ns)	0,236(ns)	-0,752(ns)	1210,35
	Grains	0,976(***)	-0,249(**)					0,138(***)	-0,057(ns)	0,405(*)	0,199(ns)	2903,55
	Carpocapses	-0,200(***)	1,071(***)		-2,463(***)				-0,164(ns)	0,061(ns)	0,425(ns)	2699,94

Paysage : (S = 0,07 km^2), r = 150 m

TABLEAU 15. – Effet des variables locales et paysagères sur les taux de prédation des 4 proies en considérant soit l'ensemble des vergers soit uniquement les vergers conventionnels.

Vergers	Proie	Annee (2015)	Session(2)	Bio (Non bio)	Annee(2015) *Session(2)	Session(2) *Bio(Non)	Annee(2015) *Bio(Non)	IFT_chimique _2012	Shannon _150	Interface_cult_ seminat_150	Seminat _150	AIC
Tous	Pucerons bas	-0,154(.)	-1,490(***)	-1,205(.)	0,586(**)	0,782(**)			-0,015(ns)	-0,184(ns)	0,008(ns)	2036,31
	Pucerons haut	-0,210(.)							-0,046(ns)	0,174(ns)	0,116(ns)	1913,10
	Grains	0,567(***)	-0,128(***)	-1,277(ns)	-1,068(***)	0,513(***)	0,915(***)		-0,025(ns)	0,200(ns)	0,014(ns)	4775,31
	Carpocapses	-0,501(***)	-0,181(ns)	-0,714(.)	-1,492(**)	0,983(**)			-0,065(ns)	0,084(ns)	0,073(ns)	4107,04
Conventionnels	Pucerons bas	-0,260(ns)	-0,759(***)		0,711(**)				-0,168(ns)	-0,266(ns)	0,155(ns)	1538,89
	Pucerons haut								0,181(ns)	0,364(*)	-0,200(ns)	1207,78
	Grains	0,975(***)	-0,250(**)					0,115(***)	0,078(ns)	0,143(ns)	-0,074(ns)	2909,03
	Carpocapses	-0,202(***)	1,072(***)		-2,460(***)				-0,0004(ns)	-0,001(ns)	-0,068(ns)	2702,731

Il n'y a pas beaucoup d'effets significatifs des facteurs paysagers sur le taux de prédation. On observe uniquement un effet significatif positif de la proportion d'habitat seminaturel sur la prédation des graines (à 560 m) et celle des pucerons hauts (à 150 m) lorsque l'on ne considère que les vergers conventionnels.

Tous les graphes des résidus regroupés par intervalles (binned residual plots) et des dotplots des effets aléatoires des modèles avec les facteurs paysagers pour chaque proie à ces deux échelles se trouvent en annexe 10.

5.2.3 Abondance des ravageurs et dégâts

5.2.3.1 Les abondances et dégâts des carpocapses

Les dégâts dus au carpocapse sont faibles. Ils varient en moyenne entre 0.34 % et 0.17 % selon les années et sont équivalents en agriculture biologique et en agriculture conventionnelle (fig. 15). On note une diminution de la proportion de fruits piqués entre 2014 et 2016 mais cette tendance ne se retrouve pas lorsque l'on considère vergers en agriculture biologique et vergers conventionnels séparément.

FIGURE 15. – Dégâts de carpocapse estimés par la proportion de fruits piqués/1000 fruits pour l'ensemble des vergers en 2014, 2015 et 2016 en considérant séparément ou non les vergers biologiques et les vergers conventionnels.

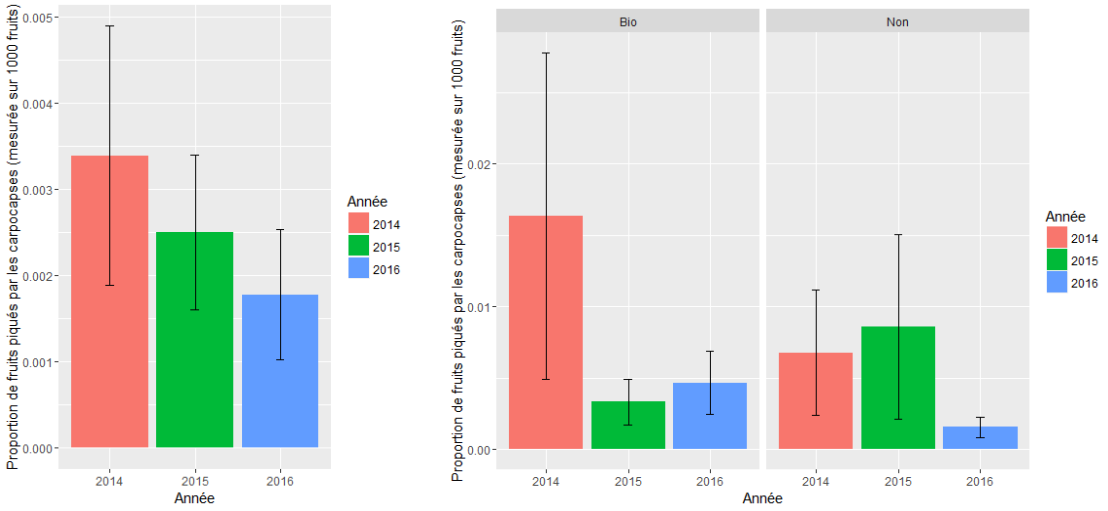
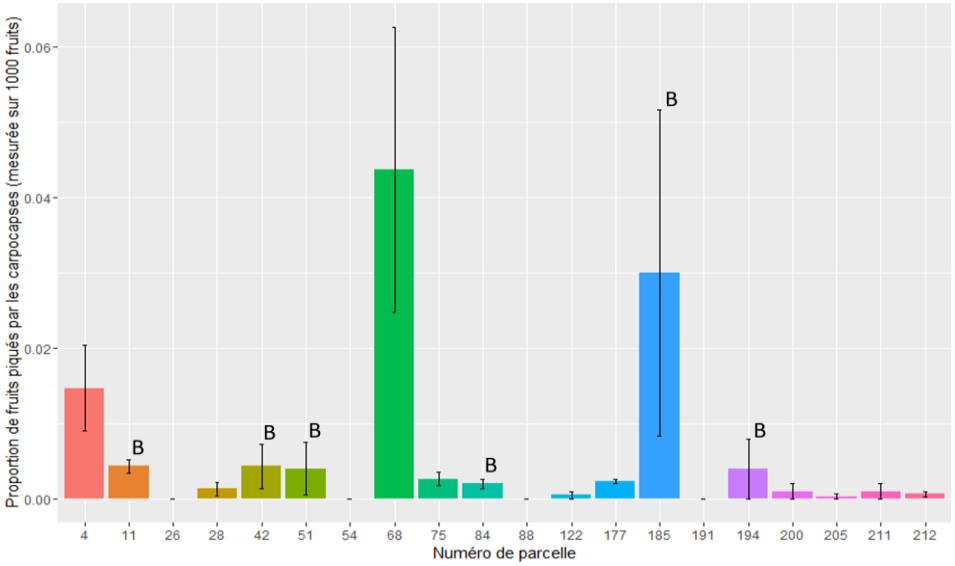


FIGURE 16. – Moyenne des dégâts de carpocapse entre 2014 et 2016 pour les 20 vergers étudiés.*



* 'B' : verger biologique.

Lorsque l'on regarde les données de chaque verger séparément (fig. 16), on note une grande variabilité entre vergers, certains (par exemple le 68 et le 185) ont des dégâts plus importants en moyenne. De plus, la variation entre les différentes années pour un même verger n'est pas négligeable car les valeurs d'erreurs standards sont très importantes par rapport aux moyennes. A noter que pour l'année 2015, les données sont manquantes pour les vergers 26, 54, 122 et 211, qui sont tous des vergers conventionnels. Il faut donc rester prudent concernant les graphes qui sont faits d'après la totalité des données ; en revanche, nous pouvons quand même prendre en compte le résultat de l'année 2015 pour les vergers en agriculture biologique quand ils sont présentés séparés des vergers conventionnels. Le détail par année est visible dans l'annexe 7.

Les résultats concernant l'abondance du carpocapse ne montrent pas la même tendance à une diminution que leurs dégâts car il y avait plus de carpocapses en 2015 qu'en 2014. La différence entre vergers en agriculture conventionnelle et vergers en agriculture biologique est très marquée en 2015 et moins en 2014 (fig. 17). La variabilité entre parcelle est moins forte que pour les dégâts, seules 3 parcelles, dont une en agriculture conventionnelle (4) et deux en agriculture biologiques (51 et 185), ont de forts niveaux de population (fig.18).

FIGURE 17. – Abondance des larves diaupausantes de carpocapse pour l'ensemble des vergers en 2014 et 2015 en considérant séparément ou non les vergers biologiques et les vergers conventionnels.

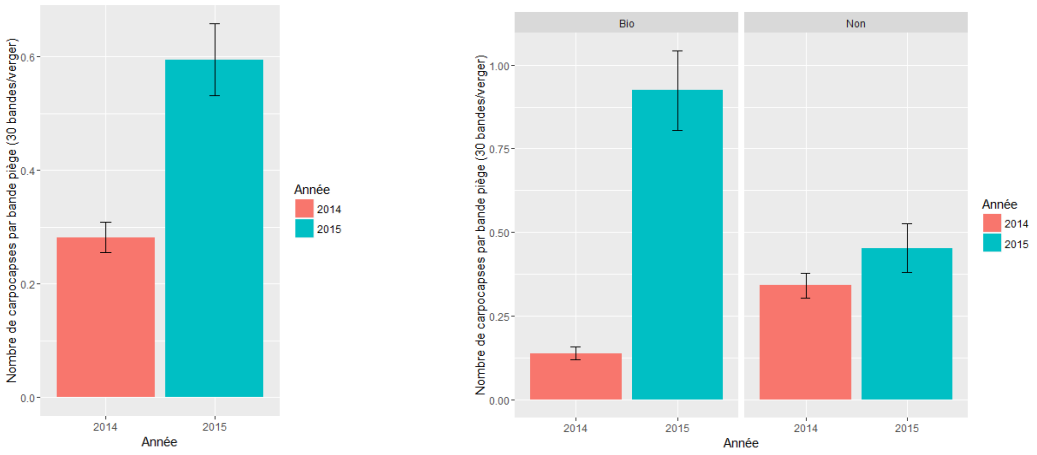
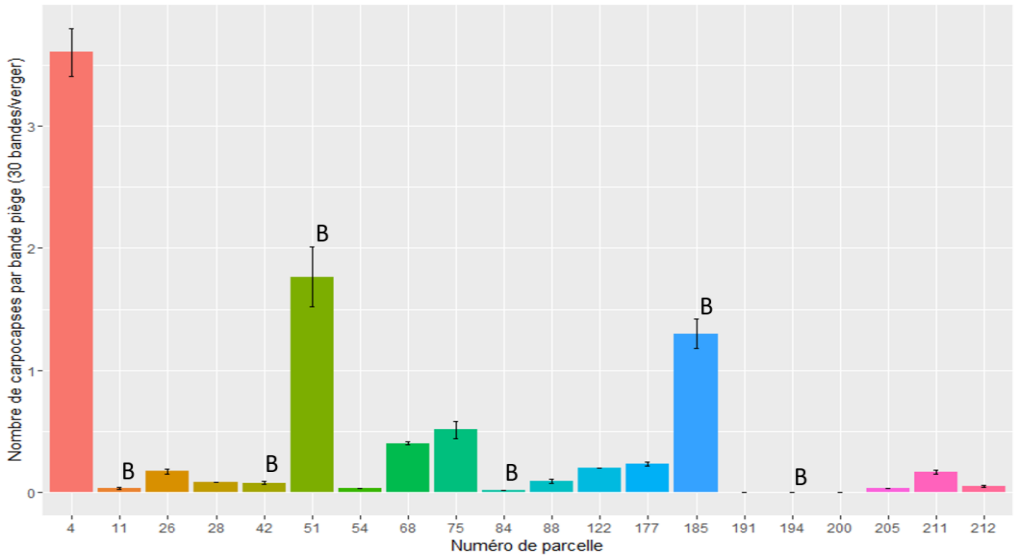


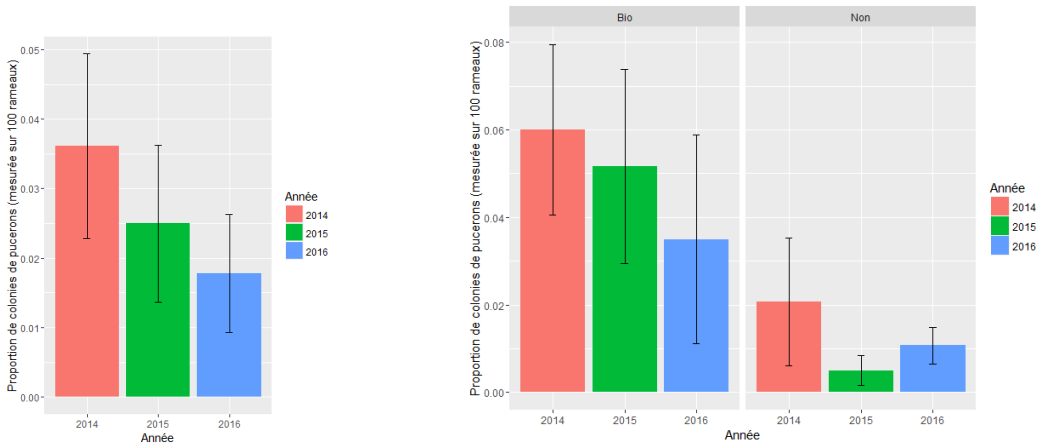
FIGURE 18. – Nombre moyen de carpocapse par bande piège pour 2014 et 2015 pour les 20 vergers étudiés.*



* 'B' : verger biologique.

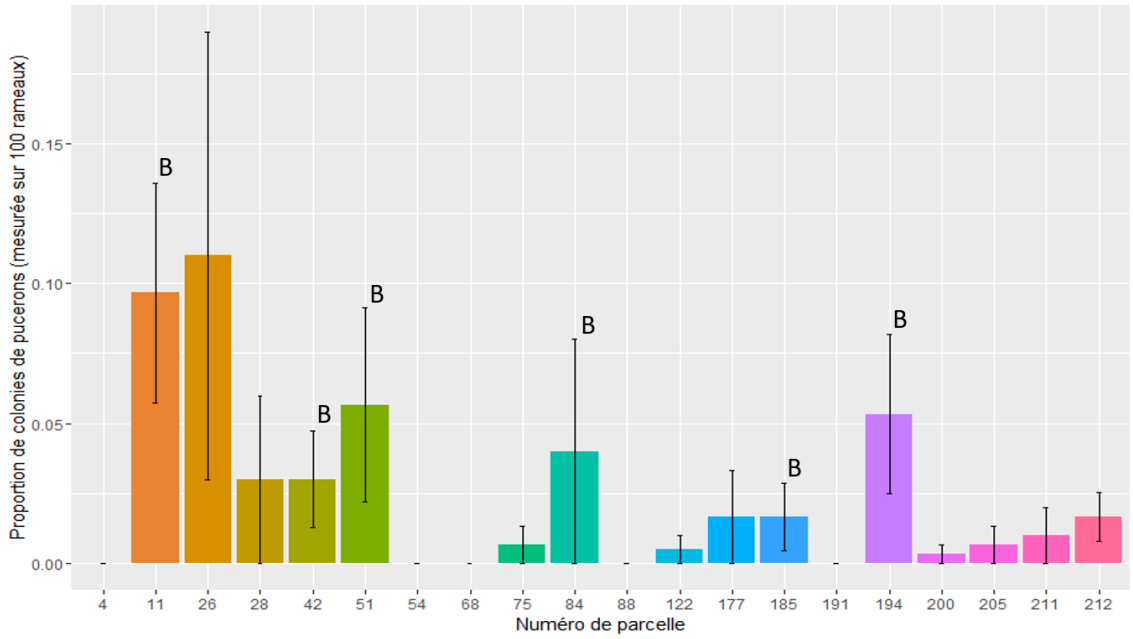
5.2.3.2 Les dégâts de pucerons cendrés

FIGURE 19. – Proportion de rameaux portant au moins une colonie de pucerons cendrés pour l'ensemble des vergers en 2014, 2015 et 2016 en considérant séparément ou non les vergers biologiques et les vergers conventionnels.



Les dégâts de pucerons sont ici encore faibles et de l'ordre du seuil de tolérance des agriculteurs qui est de 2 %. On observe la même tendance que pour le carpocapse avec une diminution en moyenne entre 2014 et 2016 mais cette fois les dégâts sont plus élevés en agriculture biologique qu'en conventionnel. La variabilité entre parcelles est encore élevée, et la variabilité entre années pour une même parcelle peut être très forte (par exemple la parcelle 26) (fig. 20).

FIGURE 20. – Moyenne des dégâts de pucerons cendrés entre 2014 et 2016 pour les 20 vergers étudiés.



* 'B' : verger biologique.

5.3 DISCUSSION DES RESULTATS

5.3.1 Principaux résultats

Nous avons trouvé que la prédation dépend principalement de la toxicité des programmes de protection des cultures ce qui est cohérent avec la bibliographie (Monteiro et al. 2013 ; Birkhofer 2016). Le taux de prédation est généralement plus haut dans les vergers en agriculture biologique que dans les vergers conventionnels, ce qui est aussi cohérent avec la bibliographie (Ogburn et al. 2016 ; Evans et al. 2016) ; il est négativement corrélé avec l'IFT total et l'IFT chimique, spécialement le dernier. Nous avons également trouvé un faible effet du paysage, et uniquement pour les vergers conventionnels (cf. résultats : 2.2.2). La différence entre les années est, elle, significative pour chaque proie, spécialement pour les graines et les œufs de carpocapses.

Les taux de prédation ont été très variables entre types de proies, entre sessions et entre années (fig. 12 & fig. 13).

Nous voyons une tendance à l'augmentation du taux de prédation pour les pucerons bas et les graines au cours des trois années, tendance qui est différente de celle des taux de prédation des pucerons haut et des œufs de carpocapses. De même, les taux de prédation du puceron bas et des graines ont tendance à être corrélés (cf. résultats : 2.2.1.5). Puisque les cartes de prédation pour les pucerons bas et les graines sont toutes déposées au sol, et les cartes de prédation pour les pucerons hauts et les carpocapses sont toutes déposées dans les arbres, cela indique qu'il pourrait y avoir des facteurs différents qui affectent la prédation, dus à une séparation verticale de ces deux types de proies. Par exemple, les différences pourraient se trouver en terme de la fréquence de la présence des prédateurs/de la prédation, des types de prédateurs qui sont présents au sol ou dans la frondaison, d'une gestion agricole structurée verticalement (les traitements insecticides/acaricides sont plus ciblés vers la partie haute d'un arbre que vers le sol, alors que les traitements herbicides sont plus ciblés vers le sol, etc.), le micro climat peut aussi différer.

Puisque les traitements phytosanitaires et le paysage sont relativement stables d'après les calendriers de traitements et la numérisation des cartes, la forte variation entre années indique qu'il y a d'autres facteurs qui jouent des rôles importants sur les taux de prédation. Ils ne sont pas faciles à identifier car il y a beaucoup de facteurs qui pourraient avoir joué, mais il serait possible de cibler les facteurs qui changent beaucoup selon les années. Il est également possible qu'il y ait des fortes interactions entre ces facteurs. On peut noter par exemple que la température pendant la Session 2 est un peu plus basse en 2014 qu'en 2015 et 2016, et que le mistral a soufflé pendant les premiers jours de la Session 1 en 2014. Ceci pourrait conduire à moins d'activité des prédateurs, qui pourraient donc potentiellement avoir eu des effets sur le taux de prédation.

5.3.2 Effets des pratiques et du paysage sur les taux de prédation

Par rapport à l'hypothèse de départ, les taux de prédation dans les vergers conventionnels ne sont pas extrêmement bas par rapport aux vergers en agriculture biologique. Plusieurs effets peuvent expliquer ce résultat. De plus l'effet du paysage est rarement significatif dans nos modèles statistiques, et il l'est uniquement pour les vergers conventionnels mais pas dans les modèles pour tous les vergers.

5.3.2.1 Au niveau local

Au niveau local, d'abord, certains traitements chimiques peuvent avoir des effets non négligeables dans les vergers biologiques. Sur les graphiques d'IFT total (fig. 8), la quantité de produits phytosanitaires utilisés au total dans les vergers en agriculture biologique mesurée par la méthode de l'IFT est quand même très proche de celle des vergers conventionnels dans notre étude. Les valeurs de l'IFT total et l'IFT chimique utilisés dans les vergers en agriculture biologique et conventionnelle (graphes de 9.2.1.1), sont cohérents avec ce que l'on sait par ailleurs (Seznec, 2016). D'après le graphe d'IFT chimique 2012 (fig. 8) qui montre la quantité de produits phytosanitaires chimiques utilisés au total dans les vergers (critère de produits bio-

contrôle : 2012 (cf. matériel et méthode 2.1.1.2, matériel de calcul de l'IFT)), la quantité de produits phytosanitaires chimiques utilisés dans les vergers conventionnels est beaucoup plus élevée que dans les vergers en agriculture biologique dans notre zone d'étude, mais il y a quand même certains traitements chimiques dans les vergers biologiques, par exemples des produits à base d'huiles minérales contre les pucerons ou à base de soufre contre les maladies, qui ne sont pas négligeables (Seznec, 2016).

Cela pourrait avoir affecté les prédateurs et diminué le taux de prédation dans les vergers en agriculture biologique.

Deuxièmement, d'après la bibliographie (Dib et al. 2016 ; Maalouly et al. 2013 ; Monteiro et al. 2013) et le résultat de notre étude, l'abondance de bioagresseurs dans les vergers conventionnels est généralement plus basse par rapport aux vergers en agriculture biologique en raison du traitement chimique intensif. Cela pourrait augmenter l'attractivité des proies sur les cartes de prédation pour les prédateurs dans les vergers conventionnels qui n'ont pas autant de proies ; alors que dans les vergers en agriculture biologique, il y a plus de proies naturelles vivantes qui pourraient être plus attractives pour les prédateurs que les proies collées sur les cartes de prédation. Cela pourrait aussi avoir augmenté le taux de prédation dans les vergers conventionnels par rapport aux vergers en agriculture biologique, ce qui pourrait donc diminuer la différence des résultats entre ces deux systèmes.

Enfin, ce ne sont très probablement pas les mêmes communautés des bioagresseurs et des prédateurs dans les vergers biologiques et conventionnels à cause de la sélection par les produits phytosanitaires. De nombreuses études ont montré que la diversité des arthropodes est différente en agriculture conventionnelle et biologique (Marliac et al. 2016 ; Aurelian et al. 2015 ; Gkisakis et al. 2015). Des études sur des insectes prédateurs (par ex. forficules, araignées, observations PSH) et des ravageurs (par ex. carpocapse (Reyes et al. 2012 ; Yang et al. 2016), puceron vert non migrant du pommier (Aphis pomi) (Tamaš et al. 2015)) dans les vergers conventionnels, montrent aussi qu'ils pourraient avoir une résistance contre plusieurs produits chimiques à la fois. De plus, c'est souvent une caractéristique héritable. Si les prédateurs sont résistants, le taux de prédation pourrait être haut même s'il y a beaucoup de traitements chimiques.

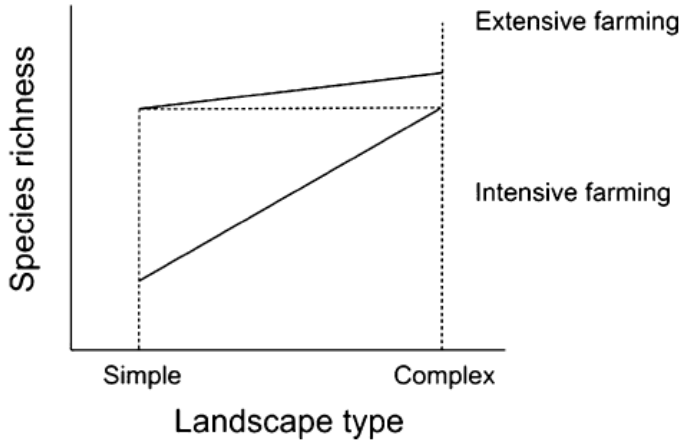
5.3.2.2 Des effets du paysage

Il pourrait également y avoir des effets atténuateurs ou compensateurs de l'environnement paysager des parcelles conventionnelles. En effet, les prédateurs généralistes montrent des réponses positives cohérentes à la complexité du paysage à travers toutes les échelles de mesure (Chaplin-Kramer et al. 2011).

Les milieux naturels ou semi-naturels autour des vergers pourraient fournir des habitats quand les conditions ne sont pas favorables dans les vergers (quand il y a des traitements phytosanitaires ou des perturbations) pour les prédateurs (Rossi & Van, 2010). Pour les vergers conventionnels, cet effet pourrait être plus fort que pour les vergers en agriculture biologique car les conditions sont plus difficiles quand il y a des traitements chimiques. C'est cette idée que propose l'étude de Tscharntke et al. (2005) (fig. 21), selon laquelle un paysage avec une complexité structurelle améliore la diversité locale dans les agroécosystèmes*, probablement grâce à des organismes ayant des fortes capacités pour se déplacer, recoloniser les parcelles, et pour utiliser une diversité de ressources. La complexité du paysage pourrait compenser l'impact d'une gestion locale intensive, ce qui est notamment le cas pour les vergers conventionnels (Tscharntke et al. 2005). Au contraire, la biodiversité au sein de la parcelle ne serait pas si dépendante de la compensation paysagère pour les vergers en agriculture biologique, avec une gestion locale moins intensive.

Cela pourrait aussi expliquer pourquoi l'effet du paysage est parfois significatif dans nos modèles statistiques pour les vergers conventionnels mais pas dans les modèles pour tous les vergers.

FIGURE 21. – Diversité des adventices selon le mode de production local (extensif vs. intensif) et la composition du paysage (simple vs. complexe).*



* Ce schéma pourrait avoir une valeur générale d'après Tscharntke et al. (2005).

Enfin, les vergers en agriculture biologique sont mélangés avec les vergers conventionnels dans le paysage, ce qui favorise les interactions potentielles entre la gestion des ravageurs de ces deux systèmes. En effet pendant les périodes de traitements phytosanitaires des vergers conventionnels, des ravageurs des vergers conventionnels à proximité pourraient venir dans les parcelles biologiques. En combinant cela avec le fait que les vergers biologiques sont traités, cela pourrait avoir baissé le taux de prédation des proies dans les vergers en agriculture biologique. Par contre le taux de prédation des proies dans les vergers conventionnels pourrait être augmenté grâce à l'abri pour les prédateurs fourni par les vergers en agriculture biologique situés autour d'eux. De plus, d'après l'étude de Monteiro et al. (2013), le taux de prédation d'œufs de carpocapse sentinelles est plus bas pour les vergers entourés par des vergers conventionnels. Dans notre zone d'étude, la plupart de vergers sont proches les uns des autres, avec environ 95 % des vergers en agriculture conventionnelle ; parmi les vergers en agriculture biologique dans notre étude, la plupart sont donc entourés par des vergers conventionnels.

Enfin, le degré de dépendance du taux de parasitisme ou du taux de prédation aux pratiques agricoles ou au paysage peut être différent pour des proies différentes (Birkhofer et al. 2016).

5.3.3 Limites de l'étude

5.3.3.1 D'un point de vue biologique

Généralement, la prédation plus tôt dans l'année a un effet plus significatif sur la réduction des ravageurs qu'une prédation plus tard dans l'année, en éliminant la production des bio-agresseurs pour les futures générations (Diehl et al. 2013b). Cela est bien pris en compte dans notre étude par la première session de pose des cartes, fin avril début mai, et un peu moins par la deuxième session mi-mai à fin mai. Cependant, le besoin de protection pour les pommiers dure toute l'année. Ce serait bien si nous pouvions savoir la dynamique de la population des bioagresseurs, des prédateurs et l'effet de la prédation durant toute l'année, ainsi que les mécanismes de leur survie pendant la période la plus difficile (hiver, en termes de la température, voir annexe 5) pour trouver les leviers permettant de gérer les populations des ravageurs.

Il y a également des questions sur la mesure de la prédation. Il pourrait y avoir des prédateurs qui n'auraient pas prédaté les proies si elles étaient vivantes (par ex. les fourmis, les escargots) ou des prédateurs qui auraient prédaté les proies si elles étaient vivantes mais qui ne s'attaquent pas aux proies mortes (araignées ?). On n'est donc pas sûr de cibler la bonne communauté de prédateurs.

Enfin, d'après Chaplin-Kramer et al. 2011, il faut concentrer les futurs efforts de la recherche sur la mesure de la dynamique des populations plutôt que sur des données d'abondance ou de prédation statiques pour mieux caractériser la relation entre la complexité du paysage et des services de lutte contre les ravageurs de leurs ennemis naturels.

5.3.3.2 Sur la caractérisation des parcelles

Le critère IFT utilisé pour quantifier les traitements dans les vergers de pommiers ont des avantages, mais aussi des limites. En effet :

- l'unité employée (nombre de doses homologuées par ha) permet d'agréger des substances actives très différentes (i.e. possédant des doses efficaces d'application très différentes) ;
- il prend en compte les quantités réellement appliquées au cours d'une campagne et tient compte des traitements à dose réduite, ce que ne fait pas l'indicateur « nombre de traitements » : en effet, un IFT égal à 1 correspond aussi bien à un seul traitement appliqué à pleine dose qu'à deux traitements appliqués à demi-dose.

En revanche, il n'intègre pas les propriétés de la spécialité commerciale utilisée : il ne tient compte en effet ni de certaines caractéristiques spécifiques de chaque produit phytosanitaire (comme le comportement dans l'environnement, la solubilité, la volatilité, la toxicité pour les organismes non ciblés, l'écotoxicité pour le milieu, etc.) (Pingault N, 2009).

Cela pourrait avoir introduit des biais pour la quantification des influences des produits phytosanitaires sur l'environnement et l'écosystème, notamment si les produits de bio-contrôle peuvent être moins toxiques.

De plus d'autres pratiques agricoles n'ont pas été considérées comme le travail du sol pour le désherbage, la forme ou la variété des arbres.

5.3.3.3 D'un point de vue statistique

L'analyse statistique des données a posé de nombreux problèmes.

5.3.3.3.1 Concernant les données et l'indépendance de chaque verger

Par rapport au besoin de la modélisation et au nombre de variables qu'on souhaite tester, les données dont on dispose ne sont pas suffisantes. Il n'y a au total que 20 vergers dans le réseau SEBIOPAG, et pas beaucoup de vergers en agriculture biologique par rapport aux conventionnels (6/14). De plus, parmi les vergers en agriculture biologique, dans notre étude, les vergers 11-42-194 ont le même agriculteur. Cela pourrait avoir introduit des biais dans le résultat de notre analyse. Car si ces trois vergers étaient considérés comme non indépendants, surtout en termes de la gestion et des traitements du verger, on pourrait considérer qu'il n'y a en effet que 4 échantillons pour les vergers biologiques.

Ce sera bien si on pouvait éventuellement développer un réseau de recherche sur les vergers dans plusieurs endroits (même mondial) avec les mêmes paramètres à saisir (location, altitude, surface, climat, pratiques agricoles, paysage, dégât, etc.) afin de mieux comprendre les processus et trouver les leviers de la régulation des ravageurs par la prédation de leurs ennemis naturels via la méthode de la modélisation statistique.

Il y avait également quelques données manquantes (cartes envolées ou IFT manquant par exemple). Tous les modèles n'ont donc pas pu être faits sur exactement le même jeu de données. Les résultats d'AIC des modèles secondaires (locaux) pour la même proie, la même session et le même groupe de vergers sont comparables entre eux, sauf les modèles pour tous les vergers lorsque l'on a la variable 'Bio' ou la variable 'Cumul_IFT' car il manquait deux calendriers de traitements. Les modèles avec les facteurs paysagers ne sont pas comparables entre proies.

5.3.3.3.2 La surdispersion des données

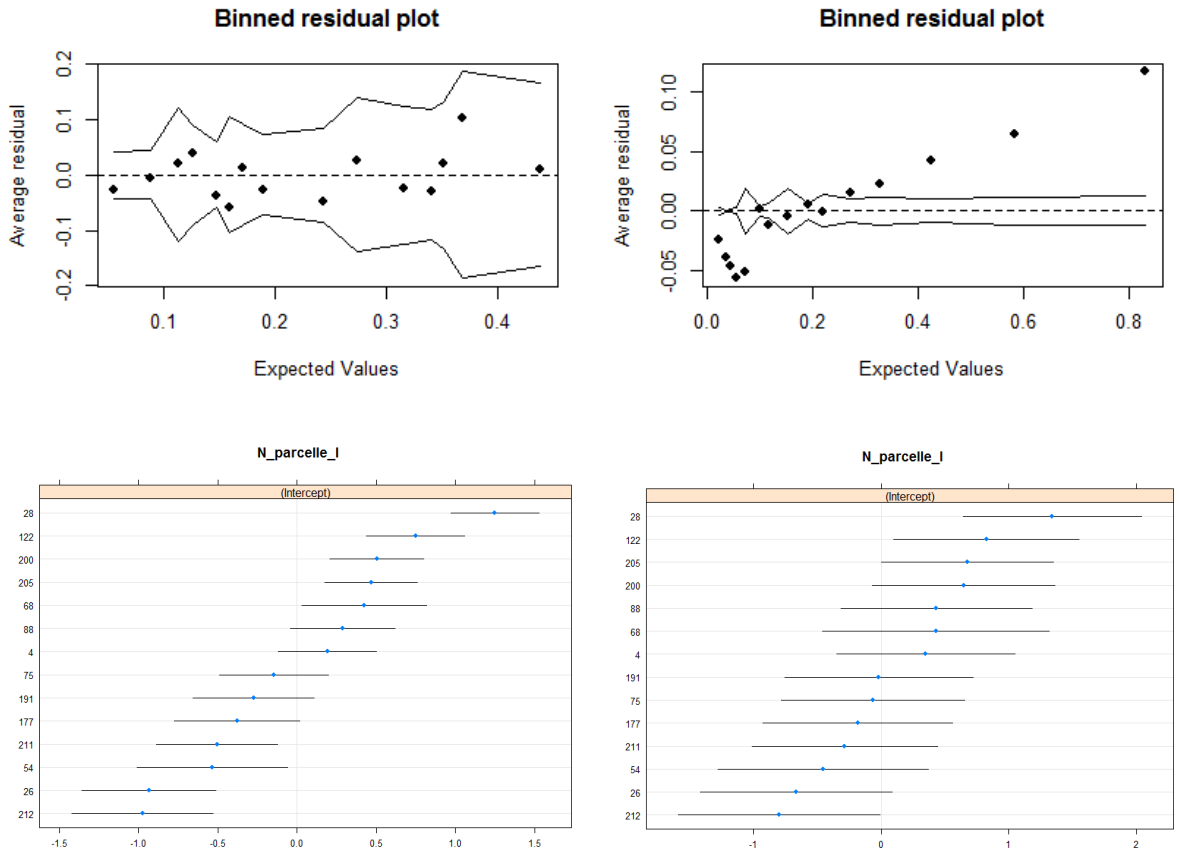
Les résultats présentés dans la partie « résultat » ne prennent pas en compte une éventuelle surdispersion des données bien que celle-ci soit parfois peut-être significative. Ceci s'explique par une mauvaise convergence des modèles lorsque nous avons pris en compte de la surdispersion ainsi que par un problème dans les graphes de résidus. Le graphe de droite montre les résidus avec surdispersion (en rajoutant un effet aléatoire « individu statistique ») et celui de gauche sans surdispersion pour le modèle analysant les effets de l'année et du Cumul_IFT_chimique_2012 sur la prédation des œufs de carpocapse. On voit que les

résidus sont bien meilleurs dans le premier cas. Le modèle avec l'effet aléatoire verger et l'effet aléatoire individu n'est pas bien ajusté, puisque la plupart des résidus regroupés sont tombés en dehors de l'enveloppe de confiance (95 %). Cela est probablement dû au fait qu'il n'y a pas beaucoup de données disponibles, et que la surdispersion est très importante, car d'après Harrison (2014), il y a une corrélation positive entre l'ampleur de la surdispersion et le degré de biais dans les estimations des paramètres (Harrison, 2014).

La (fig. 22) montre l'intercept et l'intervalle d'effet aléatoire « verger » avec l'enveloppe des 95 % de confiance sans (à gauche) et avec (à droite) l'effet aléatoire « individu statistique ». Le modèle avec l'effet aléatoire « individu » estime moins de différences entre les vergers par rapport au modèle sans l'effet aléatoire « individu ». Cela est probablement dû au fait qu'une part d'explication des données est contenue dans l'effet aléatoire « individu » au lieu des effets fixes dans ce modèle, qui accorde donc relativement moins de poids aux variables explicatives. Les valeurs prédites par le modèle sont donc moins sensibles aux facteurs explicatifs par rapport aux modèles sans l'effet aléatoire « individu » (Harrison, 2014). On remarque cependant que l'ordre des différents vergers est globalement respecté.

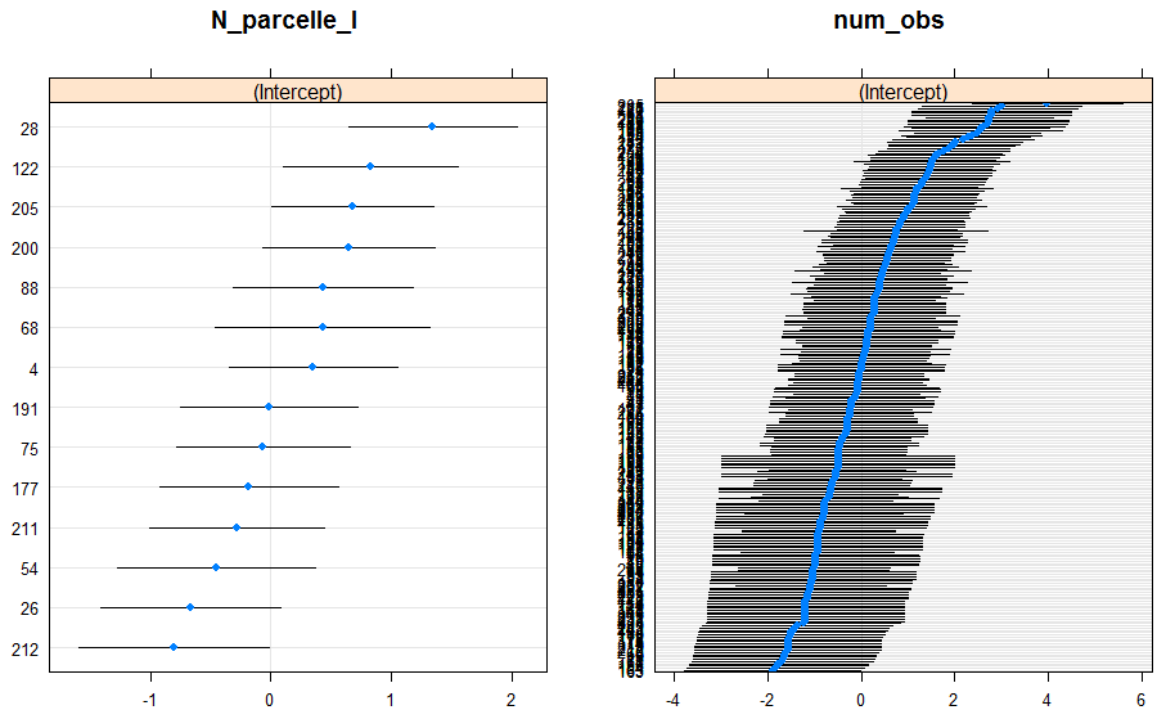
Ceci est cohérent avec la (fig. 23) L'intervalle d'effet aléatoire au niveau d'observation est environ deux fois plus grand que l'intervalle d'effet aléatoire au niveau de parcelle. Cela indique qu'il y a probablement beaucoup de bruits dans les données au niveau des individus. C'est cohérent avec la déduction d'après les deux graphes des résidus regroupés par intervalles correspondants : soit il n'y a pas assez de données disponibles, soit la surdispersion est très importante.

FIGURE 22. – Exemple de graphe des résidus groupés et des effets aléatoires « verger » pour le modèle analysant les effets de l'année et du Cumul_IFT_chimique_2012 sur la prédation des œufs de carpocapse.*



* A gauche le modèle ne considère pas de surdispersion, à droite si.

FIGURE 23. – Intercept et l'intervalle d'effet aléatoire au niveau de la parcelle et de l' « individu » (num_obs) avec l'enveloppe de 95 % de confiance.



Nous n'avons pas eu le temps d'envisager d'autres façons de traiter la surdispersion. Une possibilité aurait été d'utiliser le QAIC (the quasi-likelihood AIC) ; Cependant, la valeur du QAICc est sensible aux données manquantes (NA) dans la base de données. Il faut soit enlever les NAs, soit calculer les moyennes des données pour la même valeur du facteur pour remplacer les NAs (CSU ; Mazerolle M. J.). Puisqu'on n'a pas assez de données et cela risque de fausser le résultat, on a finalement décidé de calculer l'AIC pour donner une idée de l'ajustement des modèles. Nous aurions également pu tenter d'ajuster une loi beta-binomiale mais n'avons pas eu le temps de reprendre les analyses.

5.3.3.3.3 Facteurs pas pris en compte dans les modèles

De nombreux facteurs n'ont pas été pris en compte dans les modèles qui ont peut-être affecté les taux de prédation. On pourrait en particulier considérer différemment les effets des traitements et du paysage.

Les cinq pistes qui me semblent prioritaires sont :

- Prendre en compte le parasitisme (Birkhofer et al. 2016).

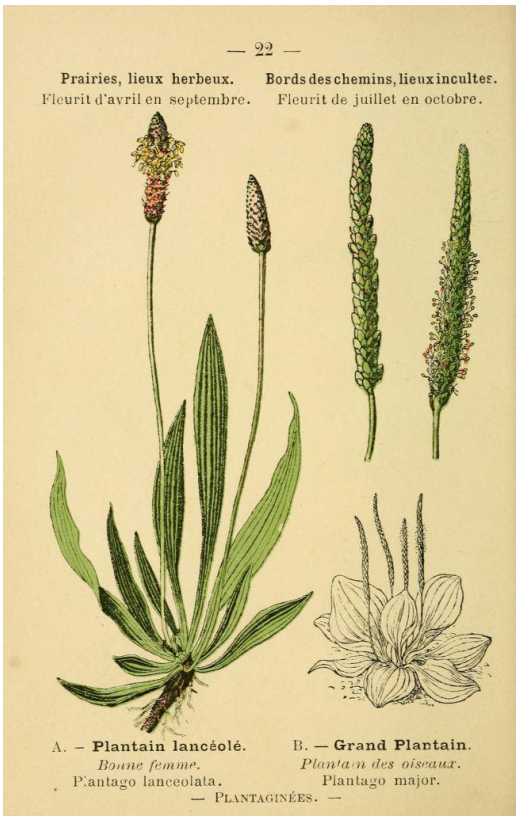
- Prendre en compte les différences de toxicité entre produits bio-contrôle/non bio-contrôle et au sein de ces catégories.

- Prendre en compte l'historique sur le long terme des paysages car cela peut influencer les prédateurs présents. Un mémoire d'ingénieur précédent (Toulet, 2015) a montré que la zone d'étude n'était pas homogène du point de vue historique.

- Prendre en compte les traitements phytosanitaires à l'échelle du paysage. Par exemple, on peut éventuellement ajouter un facteur qui considère la proportion des vergers en agriculture biologique/conventionnels dans le paysage. D'après Monteiro et al. (2013) les pratiques de protection des cultures à l'échelle du paysage peuvent avoir influé sur les taux de prédation. La seule variable paysagère significative dans cette étude était la proportion de vergers conventionnels dans un rayon de 50 m et de 100 m autour des vergers avec les proies sentinelles.

- Prendre en compte l'enherbement entre les rangs d'arbres et sa composition floristique. Il serait intéressant de savoir si le recouvrement, la composition ou la diversité de la couverture du sol influencent les prédateurs dans les vergers, et si oui, quels types de prédateurs (au sol, et dans la frondaison). Par exemple, d'après Diehl et al. (2013a), la richesse des espèces d'araignées qui construisent des toiles et la richesse des proies (au niveau de l'ordre) augmentent avec la diversité des plantes et de la couverture de la végétation. Par ailleurs, de nombreuses espèces herbacées peuvent être hôtes des ravageurs ou proies alternatives et affecter indirectement les taux de prédation. Par exemple, d'après (de Roincé, 2012) et (Hullé, 1998), les plantes hôtes secondaires des pucerons des pommiers incluent : des plantains (pour le puceron cendré, *Dysaphis plantaginea* Passerini), des graminées (pour le puceron vert migrant du pommier, *Rhopalosiphum insertum* Walker) et des aubépines (pour le puceron lanigère du pommier, *Eriosoma lanigerum* Hausmann). Pendant les expérimentations nous avons noté qu'il y a pas mal de vergers dans le réseau SEBIOPAG qui ont du plantain sur l'inter-rang, cela pourrait donc avoir facilité le développement des populations de pucerons cendrés au sein de ces vergers.

FIGURE 24. – Dessin (par R. Siélain-Paris 1895) et photo de Plantain.*



* en haut à droit, le plantain lancéolé : http://l-univers-de-babette.over-blog.com/article-30732586.html ;

en bas à droit, le grand plantain : http://raf.dessins.free.fr/2bgal/img.php?id_img=21908.

5.3.4 Relation prédation-dégâts

Des études montrent qu'il y a une relation négative entre la diversité des prédateurs et l'abondance des ravageurs (Letourneau, 2009), mais en général la relation entre l'abondance des prédateurs, le taux de prédation et le niveau de dégât n'est pas évidente (Chaplin-Kramer et al. 2011). Par exemple, l'augmentation de l'abondance des prédateurs ne se traduit pas forcément par un niveau de prédation plus haut. Il n'est donc pas très évident de faire un lien entre taux de prédation et dégâts.

Si l'on tente de mettre en relation les taux de prédation et les dégâts observés dans les parcelles, d'après les résultats des années 2014 et 2016 visualisés par année pour les vergers conventionnels et les résultats des

années 2014-15-16 pour les vergers en agriculture biologie (fig. 12 & fig. 15), un taux de prédation plus haut de carpocapses correspond à des dégâts plus importants en totalité (par année). La relation est donc positive et non négative. Cela pourrait être dû au fait qu'il y ait plus de carpocapses et aussi plus de prédateurs dans certaines parcelles. D'ailleurs, lorsque l'on regarde parcelle par parcelle (annexe 7), les dégâts sévères ne sont pas totalement liés aux taux de prédations. Il y a probablement d'autres facteurs qui déclenchent des dégâts de carpocapses sous certaines conditions à certains moments donnés.

Enfin, la méthode des proies sentinelles n'est peut-être pas capable de montrer précisément la prédation des bio-agresseurs par les prédateurs dans ces vergers (cf plus haut la discussion méthodologique) et aucune relation n'est peut-être attendue.

5.3.5 Vers des systèmes moins intensifs que l'agriculture biologique et une gestion à l'échelle du territoire ?

Par rapport à l'hypothèse de départ, les taux de prédation en vergers biologiques sont presque toujours plus hauts que ceux des vergers conventionnels, mais l'effet n'est pas toujours significatif. Cet effet peut être dû à des problèmes statistiques, mais il pourrait y avoir plusieurs hypothèses pour expliquer cette faible différence entre modes de production agricole.

Premièrement, l'agriculture biologique est un mode de production qui utilise moins de traitements phytosanitaires chimiques, ce qui a des effets positifs sur l'environnement et l'écosystème par rapport à l'agriculture conventionnelle d'après (Wyss et al. 2006 ; Pimentel et al. 2005 ; Tuck et al. 2014 ; Rundlöf et al. 2008a). Cependant, les vergers récemment convertis en agriculture biologique ont normalement besoin d'une période de transition d'environ 3 ans, pour que les effets des pesticides chimiques diminuent et qu'ils rentrent dans une production biologique normale (et vendent donc leurs produits en agriculture biologique). Notre échantillon de vergers biologiques n'est donc pas homogène car les vergers en agriculture biologique dans notre étude ne sont pas tous convertis depuis plus de 3 ans.

Deuxièmement, il est aussi possible que l'agriculture biologique soit aussi un système intensif ; il y a également une utilisation de produits chimiques qui pourraient être nuisibles pour l'environnement, pour les ennemis des cultures et pour l'homme, des labours et des passages d'engins lourds dans le verger qui pourraient perturber l'habitat, le sol et donc la dynamique des prédateurs et des ravageurs. C'est aussi d'un point de vue, un système à fort niveau d'intrant et à haut rendement'.

Si cette supposition est vraie, il serait peut-être plus intéressant d'essayer d'autres systèmes agricoles pour profiter et favoriser les services écologiques, et prendre en compte plus complètement la production et l'environnement (Ratnadass et al. 2012). Selon Straub et al. (2013 et 2014) ou Letourneau et al. (2011), l'intensité des ravageurs et les dégâts des plantes seraient significativement plus élevés en monoculture que dans les polycultures avec des plantes qui ne partagent pas les mêmes ravageurs. Cela s'expliquerait par le fait que les plantes non hôtes augmentent le mouvement des phytophages et leur vulnérabilité à la prédation. Il serait donc intéressant d'essayer de favoriser des plantes non hôtes dans les vergers de pommiers pour diminuer l'abondance des ravageurs et pour augmenter leur vulnérabilité à la prédation. D'autres propositions peuvent être faites (par ex. la permaculture, la stratégie push-pull, etc.).

Il faudrait également gérer la protection des cultures à une échelle plus grande que la parcelle. En particulier, les effets de voisinage expliquent que d'après Bianchi et al. (2013), il vaut mieux éviter un taux intermédiaire de gestion en agriculture biologique dans l'ensemble du paysage. Si on mélange les vergers en agriculture biologique et les vergers conventionnels, cela pourrait conduire à une densité de ravageurs plus haute que dans les cas où il y a soit un taux bas ou soit un taux haut d'agriculture biologique dans l'ensemble du paysage (Bianchi et al. 2013). Par ailleurs (Chaplin-Kramer et al. 2011) la réponse des prédateurs généralistes aux habitats naturels tend à se produire à des échelles spatiales plus grandes que pour les prédateurs spécialistes, ce qui suggère que les stratégies d'aménagement du territoire afin d'améliorer le contrôle naturel des ravageurs devraient différer selon si les prédateurs dominants sont des généralistes ou des spécialistes.

6 CONCLUSION

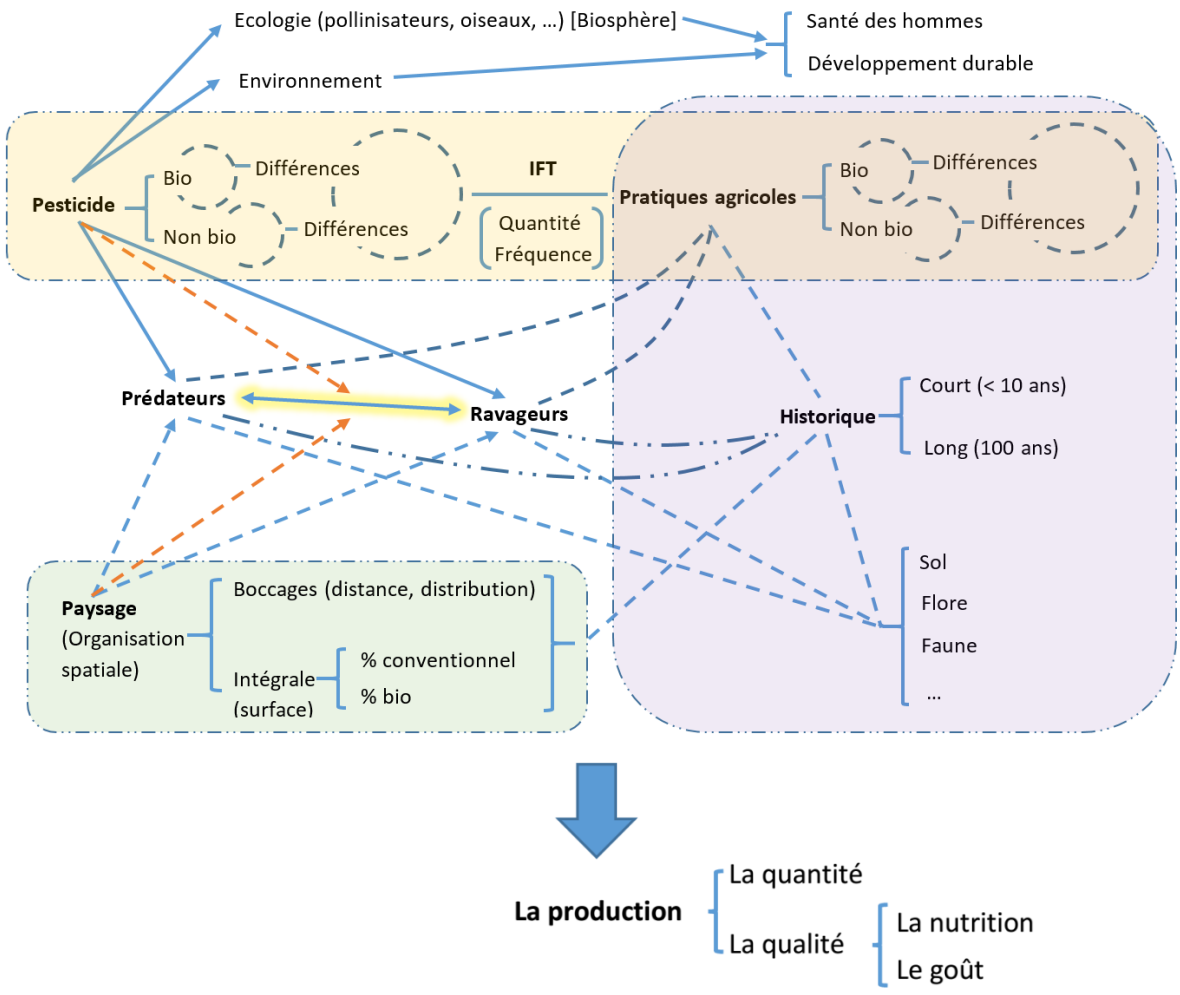
L'objectif de ce stage était de comprendre les effets du mode de production agricole (spécialement des traitements phytosanitaires) et des variables paysagères sur le contrôle des ravageurs par la prédation de leurs ennemis naturels en utilisant des données de cartes de prédation.

Les résultats montrent que le taux de prédation des proies sentinelles en vergers conventionnels est généralement plus bas que celui des vergers en agriculture biologique et qu'il est de plus affecté par les valeurs d'IFT. Cependant, ces effets ne sont pas toujours significatifs. Dans la plupart de cas, les variables paysagères n'ont pas d'effet significatif sur le taux de prédation des proies sentinelles dans notre zone d'étude, mais ils ont parfois des effets significatifs pour les vergers conventionnels avec plus de prédation quand les paysages sont structurellement plus complexes.

Au cours de ce stage, en analysant les résultats et écrivant la discussion j'ai mis en évidence qu'il y a en fait beaucoup de facteurs qui pourraient avoir joué sur le taux de prédation des ravageurs par leurs ennemis naturels. Cela indique que ce qu'on connait n'est qu'une très petite partie du panorama (fig. 25).

Par rapport à l'objectif final qui est de trouver des leviers potentiels qui nous permettraient de renforcer la lutte biologique par conservation pour augmenter le service écosystémique local de régulation des ravageurs dans les exploitations agricoles afin de remplacer l'utilisation de certains produits phytosanitaires pour lutter contre les bioagresseurs des cultures, en d'autres mots, de diminuer l'utilisation des produits phytosanitaires tout en maintenant la production, il y a encore beaucoup de travail à réaliser avec des enjeux forts.

FIGURE 25. – Schéma conceptuel d'une partie du panorama de la problématique.



Dernier point mais pas des moindres, il y a plusieurs aspects de la production (quantitatif/qualitatif), qui ne sont pas négligeables et que nous n'avons pas considéré ici. Ce que nous avons visé ici est plutôt l'aspect quantitatif qui concerne principalement le dégât mais l'aspect qualitatif est aussi important, notamment pour les fruits consommés frais.

Pour prendre des décisions plus efficaces et mener à bien des actions de changement des pratiques agricoles, un point de vue plus systémique est probablement nécessaire pour faire face aux défis, sans cependant chercher à tout expliquer.

7 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Actu-Environnement. 2014. *Agroécologie*. SARL Cogiterra. http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/agroecologie.php4.

Agreste, Pratiques phytosanitaires en arboriculture - Des traitements phytosanitaires dans les vergers de pommiers variables selon les bassins de production, Numéro 323 - mars 2015. http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/primeur323.pdf.

Arboriculture. 2013. *Les bioagresseurs*. Ecophytopic. http://arboriculture.ecophytopic.fr/arbo/surveillance/les-bioagresseurs.

Aubertot JN, Barbier JM, Carpentier A, Gril JJ, Guichard L, Lucas P, Savary S, Savini I & Voltz M. 2005. *Pesticides agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*. INRA et Cemagref. http://www.observatoirepesticides.fr/upload/bibliotheque/704624261252893935317453066156/pesticides_synthese_inra_cemagref.pdf.

Audemard, H., 1991. Population dynamics of the codling moth. In: Van der Guest, L.P.S., Evenhuis, H.H. (Eds.), World Crop Pests: Tortricid Pest, their Biology, Natural Enemies and Control, pp. 329-338.

Aurelian, V. M., Evenden, M. L., & Judd, G. J. (2015). Diversity and abundance of arthropod by-catch in semiochemical-baited traps targeting apple clearwing moth (Lepidoptera: Sesiidae) in organic and conventional apple orchards in British Columbia, Canada. *The Canadian Entomologist*, *147*(02), 227-243.

Benoît, M., Rizzo, D., Marraccini, E., Moonen, A. C., Galli, M., Lardon, S., ... & Bonari, E. (2012). Landscape agronomy: a new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landscape ecology*, *27*(10), 1385-1394.

Bianchi, F. J. J., Ives, A. R., & Schellhorn, N. A. (2013). Interactions between conventional and organic farming for biocontrol services across the landscape.*Ecological Applications*, *23*(7), 1531-1543.

Birkhofer, K., Arvidsson, F., Ehlers, D., Mader, V. L., Bengtsson, J., & Smith, H. G. (2016). Organic farming affects the biological control of hemipteran pests and yields in spring barley independent of landscape complexity. *Landscape Ecology*, *31*(3), 567-579.

Blommers, L.H.M., Helsen, H.H.M., Vaal, F.W.N.M., 2004. Life history data of the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Pass.) (Homopt., Aphididae) on plantain and as migrant to apple. J. Pest Sci. 77, 155–163. doi:10.1007/s10340-004-0046-5.

Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., & White, J. S. S. (2009). Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in ecology & evolution*, *24*(3), 127-135.

Bonnemaison, L., 1959. Le puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea* Pass.) Morphologie et biologie – Méthodes de lutte. Ann. INRA Série C Epiphyties, III., 257–322.

Brown, M. W., Mathews, C. R., 2007. Conservation biological control of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Passerini), in eastern North America. Environmental Entomology 36,1131–1139.

Brulez B. 2013. *Environnement : les bioindicateurs, définition, rôles et limites*. Suite101. http://suite101.fr/article/environnement--les-bioindicateurs-definition-roles-et-limites-a32112#.U5cBUXZsrXS.

Brunet, N., Guichard, L., Omon, B., Pingault, N., Pley-Ber, E., & Seiler, A. (2008). L'indicateur de fréquence de traitements (IFT): un indicateur pour une utilisation durable des pesticides. *Courrier de l'envieonnement de l'INRA (le)*, (56), 131-141. http://www7.inra.fr/dpenv/pdf/brunetc56.pdf.

Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). Information and likelihood theory: a basis for model selection and inference. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*, 49-97.

Chaplin-Kramer, R., O'Rourke, M. E., Blitzer, E. J., & Kremen, C. (2011). A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology letters*, *14*(9), 922-932.

COLLECTIF. (2013). *Guide de reconnaissance des messicoles*. Direction du développement économique et de l'aménagement du territoire. http://www.eure-en-ligne.fr/webdav/site/eure-en-ligne/shared/pdf/Messicoles/20140115_guide_messicoles.pdf.

COLLECTIF. (1999). *Outils de pilotage : Bonnes pratiques en arboriculture fruitière. Production raisonnée, intégrée (Hortipratic). CTIFL*.

Concepcion, E. D., Díaz, M., Kleijn, D., Baldi, A., Batary, P., Clough, Y., ... & Marshall, E. J. P. (2012). Interactive effects of landscape context constrain the effectiveness of local agri-environmental management. *Journal of Applied Ecology*, *49*(3), 695-705.

Cross, J., Fountain, M., Marko, V., Nagy, C., 2015. Arthropod ecosystem services in apple orchards and their economic benefits. Ecol. Entomol. 40, 82–96. doi:10.1111/een.12234.

CSU. (date de consultation : 09/2016). AIC, AICc, QAIC, and AICc. *MARK Program Help File Contents*. http://warnercnr.colostate.edu/~gwhite/mark/markhelp/qaicc.htm.

Deberardinis, E., Baronio, P., Baumgartner, J., 1994. The effect of aphid (*Dysaphis plantaginea* Pass, Hom, Aphididae) feeding on apple fruit growth. Ecological Modelling 72, 115-127.

de Roincé, C. B. (2012). *Biodiversité et aménagements fonctionnels en verger de pommiers: Implication des prédateurs généralistes vertébrés et invertébrés dans le contrôle des ravageurs* (Doctoral dissertation, AgroParisTech).

de Roincé, C. B., Lavigne, C., Mandrin, J. F., Rollard, C., & Symondson, W. O. C. (2013). Early-season predation on aphids by winter-active spiders in apple orchards revealed by diagnostic PCR.*Bulletin of entomological research*, *103*(02), 148-154.

Dib, H., Sauphanor, B., & Capowiez, Y. (2016). Effect of management strategies on arthropod communities in the colonies of rosy apple aphid, Dysaphis plantaginea Passerini (Hemiptera: Aphididae) in south-eastern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *216*, 203-206.

Dib, H., Simon, S., Sauphanor, B., Capowiez, Y., (2010). The role of natural enemies on the population dynamics of the rosy apple aphid, Dysaphis plantaginea Passerini (Hemiptera: Aphididae) in organic apple orchards in south-eastern France. Biol. Control 55, 97–109. doi:10.1016/j.biocontrol.2010.07.005.

Diehl, E., Mader, V. L., Wolters, V., & Birkhofer, K. (2013a). Management intensity and vegetation complexity affect web-building spiders and their prey.*Oecologia*, *173*(2), 579-589.

Diehl, E., Sereda, E., Wolters, V., & Birkhofer, K. (2013b). Effects of predator specialization, host plant and climate on biological control of aphids by natural enemies: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, *50*(1), 262-270.

Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M. A., Justes, E., ... & Sarthou, J. P. (2015). How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*(4), 1259-1281.

Eilenberg, J., Hajek, A., & Lomer, C. (2001). Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*, *46*(4), 387-400.

Ekroos, J., Piha, M., & Tiainen, J. (2008). Role of organic and conventional field boundaries on boreal bumblebees and butterflies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *124*(3), 155-159.

Evans, T. A., & Gleeson, P. V. (2016). Direct measurement of ant predation of weed seeds in wheat cropping. *Journal of Applied Ecology*.

François, E. (2014). *Etude de la prédation d'organismes sentinelles en vergers de pommiers commerciaux dans le cadre du contrôle biologique par conservation* (Rapport de stage de fin d'étude, IUT d'Avignon).

Harrison, X. A. (2014). Using observation-level random effects to model overdispersion in count data in ecology and evolution. *PeerJ*, *2*, e616.

Horrigan, L., Lawrence, R. S., & Walker, P. (2002). How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. *Environmental health perspectives*, *110*(5), 445.

Hullé, M. (1998). *Les pucerons des arbres fruitiers: cycles biologiques et activités de vol*. Editions Quae.

Jankielsohn, A. (2015). The hidden cost of eating meat in South Africa: what every responsible consumer should know. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, *28*(6), 1145-1157.

Jauzein, P. (1997). La notion de messicole: tentative de définition et de classification. *Le monde des plantes*, *458*, 19-23.

Kwaiser, K. S., & Hendrix, S. D. (2008). Diversity and abundance of bees (Hymenoptera: Apiformes) in native and ruderal grasslands of agriculturally dominated landscapes. *Agriculture, ecosystems & environment*, *124*(3), 200-204.

Lefebvre M., Franck P., Olivares J., Ricard J.-M., Mandrin J.-F., Lavigne C. (soumis) Spider predation on rosy apple aphid in conventional, organic and insecticide-free orchards and its impact on aphid populations. Biological Control.

Lefebvre, M., Franck, P., Toubon, J. F., Bouvier, J. C., & Lavigne, C. (2016). The impact of landscape composition on the occurrence of a canopy dwelling spider depends on orchard management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *215*, 20-29.

Letourneau, D. K., Armbrecht, I., Rivera, B. S., Lerma, J. M., Carmona, E. J., Daza, M. C., ... & Mejía, J. L. (2011). Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecological Applications*, *21*(1), 9-21.

Letourneau, D. K., Jedlicka, J. A., Bothwell, S. G., & Moreno, C. R. (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.

Maalouly, M., Franck, P., Bouvier, J. C., Toubon, J. F., & Lavigne, C. (2013). Codling moth parasitism is affected by semi-natural habitats and agricultural practices at orchard and landscape levels.*Agriculture, ecosystems & environment*, *169*, 33-42.

Marliac, G., Mazzia, C., Pasquet, A., Cornic, J. F., Hedde, M., & Capowiez, Y. (2016). Management diversity within organic production influences epigeal spider communities in apple orchards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *216*, 73-81.

Mazerolle M. J. (date de consultation : 09/2016). *Computing AIC, AICc, QAIC, and QAICc*, http://artax.karlin.mff.cuni.cz/r-help/library/AICcmodavg/html/AICc.html.

Monteiro, L. B., Lavigne, C., Ricci, B., Franck, P., Toubon, J. F., & Sauphanor, B. (2013). Predation of codling moth eggs is affected by pest management practices at orchard and landscape levels. *Agriculture, ecosystems & environment*, *166*, 86-93.

Ogburn, E. C., Bessin, R., Dieckhoff, C., Dobson, R., Grieshop, M., Hoelmer, K. A., ... & Pote, J. M. (2016). Natural enemy impact on eggs of the invasive brown marmorated stink bug, Halyomorpha halys (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae), in organic agroecosystems: A regional assessment. *Biological Control*, *101*, 39-51.

Ouin, A., Martin, M., & Burel, F. (2008). Agricultural landscape connectivity for the meadow brown butterfly (Maniola jurtina). *Agriculture, ecosystems & environment*, *124*(3), 193-199.

Pimentel, D., Hepperly, P., Hanson, J., Douds, D., & Seidel, R. (2005). Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience*, *55*(7), 573-582.

Pingault N. 2007. *Améliorer la qualité de l'eau : un indicateur pour favoriser une utilisation durable des produits phytosanitaires*. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/ift_article_de_presentation_de_lhistorique_de_lift_-_2007.pdf.

Pingault, N. 2009. Produits phytosanitaires et protection intégrée des cultures : l'indicateur de fréquence de traitement (IFT) P. 72. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_nese090332A3.pdf.

Porcel, M., Ruano, F., Cotes, B., Peña, A., & Campos, M. (2013). Agricultural management systems affect the green lacewing community (Neuroptera: Chrysopidae) in olive orchards in Southern Spain. *Environmental entomology*, *42*(1), 97-106.

Qian, S. S. (2009). *Environmental and ecological statistics with R*. CRC Press.

Qubbaj, T., Reineke, A., Zebitz, C.P.W., 2005. Molecular interactions between rosy apple aphids, Dysaphis plantaginea, and resistant and susceptible cultivars of its primary host Malus domestica. Entomol. Exp. Appl. 115, 145–152. doi:10.1111/j.1570-7458.2005.00255.x.

Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., & Habib, R. (2012). Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for sustainable development*, *32*(1), 273-303.

Reyes, M., Rocha, K., Alarcón, L., Siegwart, M., & Sauphanor, B. (2012). Metabolic mechanisms involved in the resistance of field populations of Tuta absoluta (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) to spinosad. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *102*(1), 45-50.

Ricard, J. M., Garcin, A., Jay, M., & Mandrin, J. F. (2012). Biodiversité et régulation des ravageurs en arboriculture fruitière. *CTIFL, Paris, France*.

Ricci B. (2009) Dynamique spatiale et dégâts de carpocapse dans la basse vallée de la Durance. Thèse de l'université d'Avignon et des Pays du Vaucluse.

Rivière, J. L. (1993). Les animaux sentinelles. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, *20*(20), 59-68.

Robic MC. 2004. *Section, Transect*. Hypergéo. http://www.hypergeo.eu/spip.php?article345.

Rossi, J. P., & Van Halder, I. (2010). Towards indicators of butterfly biodiversity based on a multiscale landscape description. *Ecological Indicators*, *10*(2), 452-458.

Rundlöf, M., Bengtsson, J., & Smith, H. G. (2008a). Local and landscape effects of organic farming on butterfly species richness and abundance. *Journal of Applied Ecology*, *45*(3), 813-820.

Rundlöf, M., Nilsson, H., & Smith, H. G. (2008b). Interacting effects of farming practice and landscape context on bumble bees. *Biological Conservation*, *141*(2), 417-426.

Schmidt-Jeffris, R. A., Beers, E. H., & Crowder, D. W. (2015). Phytoseiids in Washington commercial apple orchards: biodiversity and factors affecting abundance. *Experimental and Applied Acarology*, *67*(1), 21-34.

Seznec, E., (2016) Traitements bio - Toxiques naturellement, *Que Choisir* : 1 septembre 2016 – N°550, page 22-25.

Sorribas, J., González, S., Domínguez-Gento, A., & Vercher, R. (2016). Abundance, movements and biodiversity of flying predatory insects in crop and non-crop agroecosystems. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*(2), 1-9.

Straub, C. S., Simasek, N. P., Dohm, R., Gapinski, M. R., Aikens, E. O., & Nagy, C. (2014). Plant diversity increases herbivore movement and vulnerability to predation. *Basic and Applied Ecology*, *15*(1), 50-58.

Straub, C. S., Simasek, N. P., Gapinski, M. R., Dohm, R., Aikens, E. O., & Muscella, S. (2013). Influence of nonhost plant diversity and natural enemies on the potato leafhopper, Empoasca fabae, and pea aphid, Acyrthosiphon pisum, in alfalfa. *Journal of pest science*, *86*(2), 235-244.

Szabó, Á., Pénzes, B., Sipos, P., Hegyi, T., Hajdú, Z., & Markó, V. (2014). Pest management systems affect composition but not abundance of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) in apple orchards.*Experimental and applied acarology*, *62*(4), 525-537.

Tamaš, N., Dojnov, B., Margetić, A., Vujčić, M., Špirović, B., Miletić, N., ... & Vujčić, Z. (2015). Resistance to common organophosphate and carbamate insecticides in Aphis pomi (Hemiptera: Aphididae). *Fruits*, *70*(3), 135-142.

Toulet, L. (2015). *Analyse-diagnostic de la plaine arboricole du Comtat* (Synthèse du mémoire de stage de fin d'étude, AgroParisTech).

Tscharntke, T., Bommarco, R., Clough, Y., Crist, T. O., Kleijn, D., Rand, T. A., ... & Vidal, S. (2007). Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biological control*, *43*(3), 294-309.

Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., & Thies, C. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management.*Ecology letters*, *8*(8), 857-874.

Tuck, S. L., Winqvist, C., Mota, F., Ahnström, J., Turnbull, L. A., & Bengtsson, J. (2014). Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, *51*(3), 746-755.

Unesco. 2009. *Les agroécosystèmes*. United Nations Educational, Scientific And Cultural Organization. http://www.unesco.org/mab/doc/icc/2009/f_agroecosystems.pdf.

Veres, A., Petit, S., Conord, C., & Lavigne, C. (2013). Does landscape composition affect pest abundance and their control by natural enemies? A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *166*, 110-117.

Wyss, E., & Pfiffner, L. (2006, August). Biodiversity in organic horticulture – an indicator for sustainability and a tool for pest management. In *XXVII International Horticultural Congress-IHC2006: International Symposium on Sustainability through Integrated and Organic 767* (pp. 75-80).

Yang, X. Q., Wu, Z. W., Zhang, Y. L., & Barros-Parada, W. (2016). Toxicity of Six Insecticides on Codling Moth (Lepidoptera: Tortricidae) and Effect on Expression of Detoxification Genes. *Journal of economic entomology*, *109*(1), 320-326.

LEXIQUES, GLOSSAIRES

Agriculture Biologique (AB) est un signe officiel de qualité et d'origine qui garantit un mode de production agricole basé sur le respect des cycles naturels des plantes et des animaux et sur les complémentarités sol-plantes, plantes-animaux et animaux-sols. *http://www.chambres-agriculture.fr/agriculteur-et-politiques/agriculture-biologique/*.

Agroécologie : démarche scientifique attentive aux phénomènes biologiques qui combine développement agricole et protection/régénération de l'environnement naturel (Actu-Environnement 2014).

Agroécosystème : produit de la modification de l'écosystème par l'Homme, qui constitue un espace d'interaction entre ses savoirs et ses pratiques et la diversité des ressources naturelles (Unesco 2009).

Bioagresseur : terme regroupant tous les organismes pouvant engendrer des dommages sur les cultures. Il peut s'agir d'agents pathogènes responsables de maladies, de ravageurs ou de plantes adventices (Arboriculture 2013).

Bioindicateur : représente soit une espèce animale ou végétale, soit une communauté (groupe d'espèces vivantes) qui présente la particularité de révéler significativement, par sa présence, la transformation d'un écosystème donné (Brulez 2013).

Espèce messicole : les messicoles sont des plantes annuelles à germination préférentiellement hivernales habitant dans les moissons. Ces espèces présentent la particularité de fleurir dans les cultures et de s'adapter au rythme des travaux des champs (Jauzein P. 1997 ; COLLECTIF. 2013).

Indice de fréquence de traitement (IFT) : indicateur permettant d'évaluer la pression phytosanitaire exercée sur chaque parcelle. Il est exprimé en nombre de doses homologuées par hectare appliquées sur la parcelle pendant une campagne culturale (Pingault 2007 & 2009).

Plan Ecophyto :

> Un plan qui vise à réduire progressivement l'utilisation des produits phytosanitaires (communément appelés pesticides) en France tout en maintenant une agriculture économiquement performante. C'est une initiative lancée en 2008 à la suite du Grenelle Environnement. Le plan est piloté par le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt. *http://agriculture.gouv.fr/ecophyto-kesako-0*.
>
> Plan Ecophyto se divise en deux parties :
>
> Plan Ecophyto I : Initié en 2008, le plan Ecophyto I avait pour objectif de réduire de 50 % l'utilisation des produits phytopharmaceutiques dans un délai de 10 ans, si possible. Ce plan était construit autour de 9 axes et comportait plus de 110 actions. Il s'inscrit dans le cadre de la directive européenne 2009/128 d'utilisation des produits phytopharmaceutiques compatible avec le développement durable, qui demande à ce que « les États membres aient recours à des plans d'action nationaux visant à fixer des objectifs quantitatifs, des cibles, des mesures, des calendriers et des indicateurs en vue de réduire les risques et les effets de l'utilisation des pesticides sur la santé humaine et l'environnement et à encourager le développement et l'introduction de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et de méthodes ou de techniques de substitution en vue de réduire la dépendance à l'égard de l'utilisation des pesticides ». *http://www.chambres-agriculture.fr/agriculteur-et-politiques/ecophyto/*.
>
> Plan Ecophyto II : réduire l'usage, les risques et les impacts des produits phytosanitaires : réduire de 25 % d'ici 2020 le recours aux produits phytosanitaires, en mobilisant l'ensemble des solutions techniques disponibles et efficaces ; réduire de 50 % à l'horizon 2025 le recours aux produits phytosanitaires. Ce dernier objectif impliquant des mutations profondes des systèmes de productions sera l'objet de la révision du plan Ecophyto prévue à l'horizon 2020. *http://www.chambres-agriculture.fr/agriculteur-et-politiques/ecophyto/plan-ecophyto-2/*.
>
> *http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/151022_ecophyto.pdf*.

Production intégrée (exploitation agricole intégrée) : Définition OILB-SROP, 1993 : Système agricole de production d'aliments et des autres produits de haute qualité qui utilise des ressources et des mécanismes de régulation naturels pour remplacer des apports dommageables à l'environnement et qui assure à long terme une agriculture viable. Les principaux objectifs recherchés en production intégrée sont : 1) Obtenir des quantités de denrées agricoles nécessaires à l'alimentation humaine et qui répondent à une qualité garantie sur des critères mesurables ou détectable, pour une plus grande satisfaction des consommateurs ; 2) faire exprimer les potentialités des terroirs et des plantes ; 3) maintenir le revenu des agriculteurs et un tissu social sur l'ensemble des territoires ; 4) sauvegarder ou mettre en place des agroécosystèmes qui ne perturbent pas l'environnement et permettent une meilleure gestion de l'espace rural (agencement des parcelles, rotation des cultures …) en préservant la faune sauvage, l'eau et l'environnement ; 5) rechercher une plus grande diversité écologique au niveau des aires de production ; 6) rechercher un meilleur équilibre dans les cycles des éléments nutritifs en valorisant au mieux les ressources naturelles et les mécanismes régulateurs et sauvegarder la fertilité des sols ; 7) assurer une protection phytosanitaire raisonnée (COLLECTIF 1999).

Production fruitière intégrée (PFI) : Définition donnée par l'OILB : une production économique de fruits de haute qualité donnant la priorité aux méthodes écologiquement plus sûres, minimisant les effets secondaires indésirables et l'utilisation des produits agrochimiques, afin d'améliorer la protection de l'environnement et la santé humaine (COLLECTIF 1999).

Proie sentinelle : système d'animaux sentinelles défini comme un dispositif destiné à collecter, systématiquement et régulièrement, des données sur des animaux exposés à la pollution environnementale ; ces données sont ensuite analysées pour identifier les dangers potentiels pour la santé de l'homme et de l'environnement (Rivière 1993). L'expression est ici adaptée à une exposition à de la prédation par des auxiliaires.

Transect : dispositif d'observation de terrain ou la représentation d'un espace, le long d'un tracé linéaire (Robic 2004).

8 ANNEXES

TABLE DES ANNEXES RÉPÉTÉE

ANNEXE 1. – Les cinq sites impliqués dans le projet SEBIOPAG (François E. 2014). 61

ANNEXE 2. – Récapitulatif des proies sentinelles et du matériel utilisé. 62

ANNEXE 3. – Photos des cartes de prédations (François E. 2014)..... 63

ANNEXE 4. – Des maladies et dégâts des vergers pommiers (© Toubon J. - F. & Long R. 2016)..... 63

ANNEXE 5. – Température moyenne mensuelle et température minimale mensuelle pendant hiver de l'année 2013 à 2016..... 66

ANNEXE 6. – Logiciel et packages utilisés pour les analyses statistiques 66

ANNEXE 7. – Graphes des abondances et dégâts par parcelle et année. 67

ANNEXE 8. – Les données chiffrées des matrices de corrélations entre les variables explicatives – phytosanitaires et paysagères*..... 69

ANNEXE 9. – Les noms des colonnes du tableau SEBIOPAG et les significations en français..... 72

ANNEXE 10. – Binned plots et dotplots. Colonne de gauche, sauf effet aléatoire « individu », à droite avec effet aléatoire « individu ». 74

ANNEXE 1. – Les cinq sites impliqués dans le projet SEBIOPAG (François E. 2014).

Sites de recherche	Paysage	Système(s) de production	Contexte et évolution	Partenariat local établi
Rennes (UMR) ZA et LTER Armorique (Atlantique)	Bocage à taille parcellaire variable, pourcentage prairies et densité de haies variables	Polyculture élevage intensif	Augmentation du nombre d'exploitation en AB, forte hausse de la taille des exploitations en AC	CRA Bretagne, Inter Bio Bretagne (IBB)
Chizé (CNRS) ZA et LTER Plaine et Val de sèvre (Atlantique)	Openfield, taille parcellaire variable, bocage	Céréaliculture intensive, encore forte présence d'élevage hors sol	Intensification en cours mais Natura 2000 et MAEt couvrant 20 % (réduction IFT, culture pérenne, AB)	AgroBIO Poitou Charente, DDT
Toulouse (UMR) LTER Vallées et Coteaux de Gascogne (Atlantique-Méditerranéen)	Bocage sur relief accidenté avec couvert forestier important	Polyculture-élevage intensif : céréales, maïs, oléoprotéagineux	Spécialisation tardive des exploitations, peu AB	CRA Midi Pyrénées
Dijon (UMR) Plaine et plateaux de côte d'or (Continentale)	Openfield en plaine de Saône, mosaïque de cultures, praires et forêts sur les plateaux	Céréaliculture, polyculture-élevage	Augmentation du nombre d'exploitations en AB, conversion au semis direct sous couvert	GEDA de la Tille
Avignon (UR PSH) Vergers de la basse vallée de la Durance Projet ZA (Méditerranéen)	Plaine à dominante de vergers avec forte densité de haies	Arboriculture intensive	Conversion en AB, Protection Intégrée*	GRCETA Basse Durance

ANNEXE 2. – Récapitulatif des proies sentinelles et du matériel utilisé.

Nom des espèces (Latin)	***Acyrthosiphon pisum***	***Cydia pomonella***	***Viola arvensis***
Nom des espèces (Français)	Pucerons vert du pois	Œufs de Carpocapse des pommes et des poires	Graines de Pensée des champs
Exemple de l'individu adulte			
Exemple de la carte de prédation			
Stade de développement	Puceron adulte	Œuf	Graine
Carte utilisée	Percée et non percée	Non percée	Percée
Colle utilisée	UHU liquide	SADER	SADER diluée (1/2)
Nombre de proies	3	10	10

Source des images :

Acyrthosiphon pisum : Joseph Berger, Bugwood.org. Numéro d'image : 5438884. http://www.insectimages.org/browse/detail.cfm?imgnum=5438884

Viola arvensis : La Flore Bibliographie. Canopé académie de Besançon. http://canope.ac-besancon.fr/flore/Violaceae/especes/viola_arvensis.htm

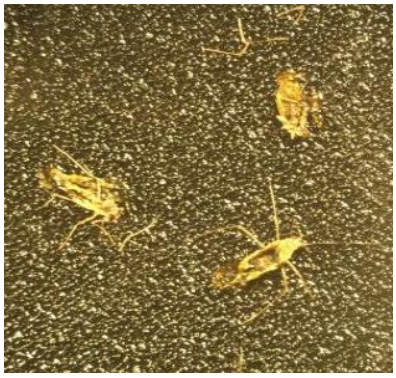
Cydia pomonella : Todd M. Gilligan and Marc E. Epstein, TortAI : Tortricids of Agricultural Importance, USDA APHIS ITP, Bugwood.org., et BASF.

http://www.insectimages.org/browse/detail.cfm?imgnum=5482428 ; et

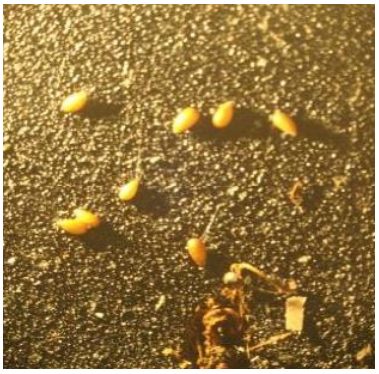
http://www.agro.basf.fr/agroportal/fr/fr/cultures/arboriculture/insecticides_des_arbres_fruitiers/carpocapses_des_pommes_et_des_poires.html.

Exemples des cartes de prédations : François E. (2014).

ANNEXE 3. – Photos des cartes de prédations (François E. 2014).



3 pucerons sur 3



8 graines sur 10

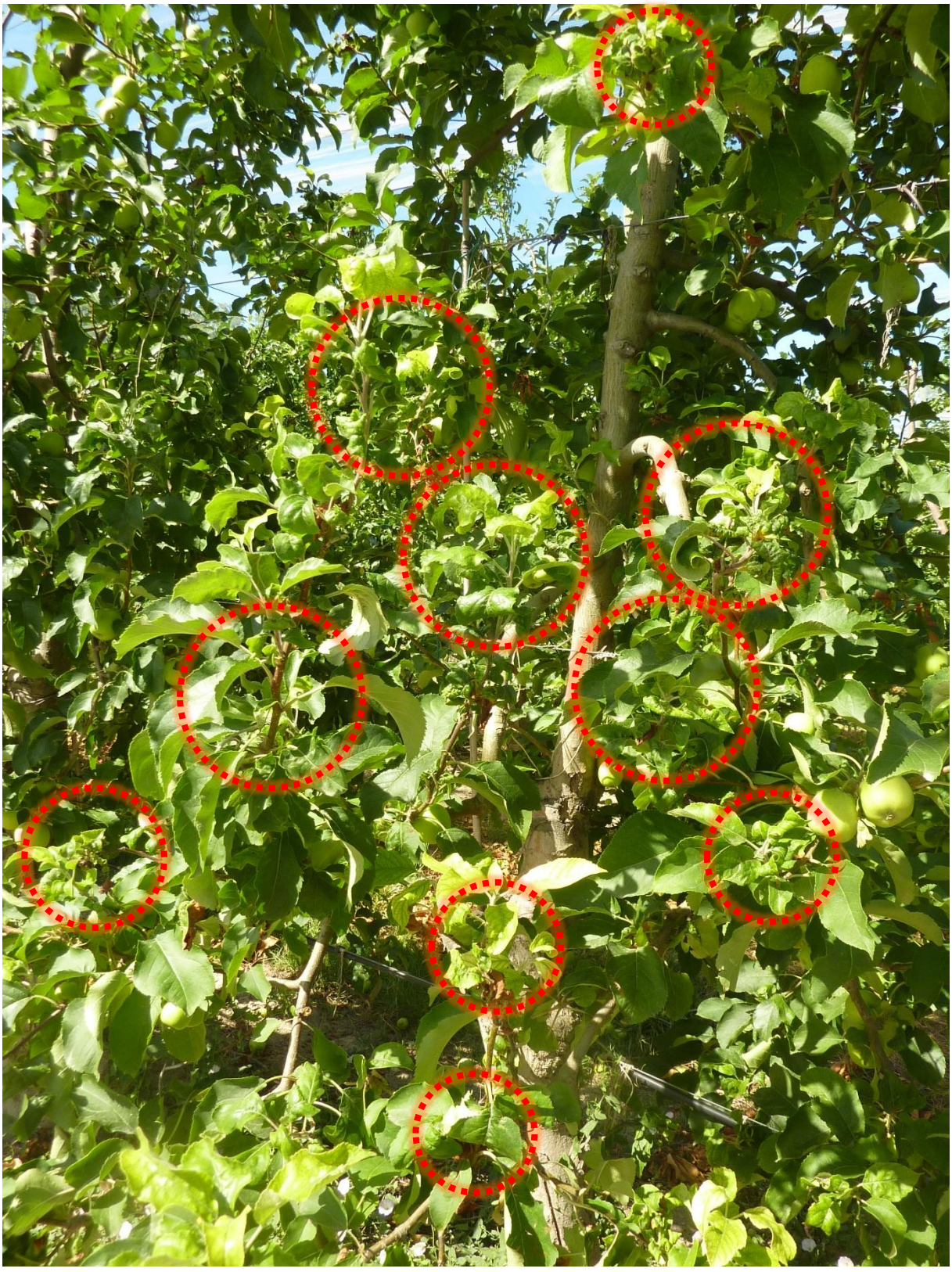
* Lecture de la prédation des graines de Pensée des champs et des Pucerons.

ANNEXE 4. – Des maladies et dégâts des vergers pommiers (© Toubon J. - F. & Long R. 2016).

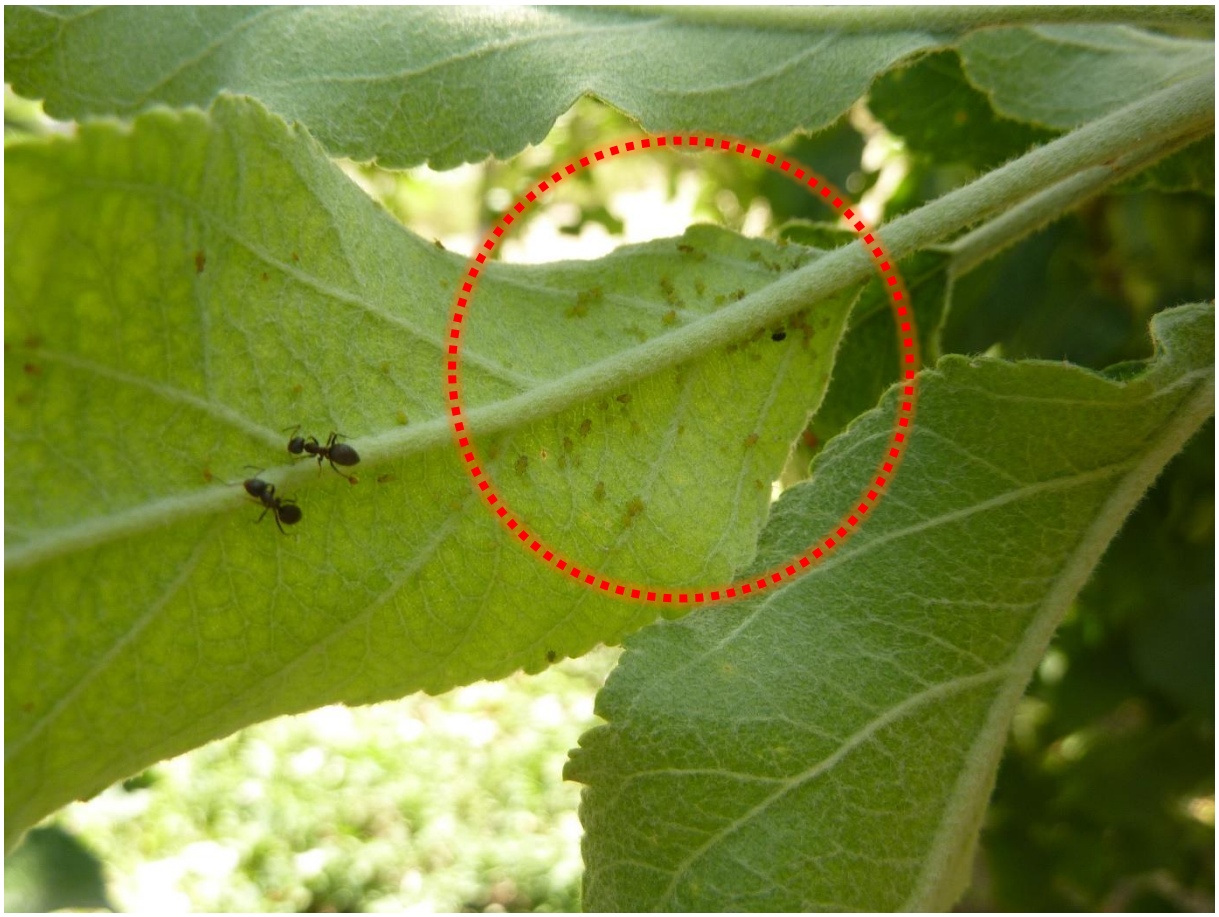
A : Carpocapse ; B : Puceron cendré ; C : Puceron vert ; D : Puceron lanigère ; E : Vestige de pucerons cendrés avec des momies.

A :

B :



C :



D :

E :

ANNEXE 5. – Température moyenne mensuelle et température minimale mensuelle pendant hiver de l'année 2013 à 2016.

Année	Mois	Température moyenne mensuelle (°C)	Température minimale mensuelle (°C)	Manipulation correspondante
2013	11	8,8	5,9	
	12	7,3	3,5	
2014	1	8,6	5,3	2014
	2	8,7	4,3	
	3	11,1	5,2	
	11	12,5	9,1	
	12	7,8	4,9	
2015	1	6,7	3	2015
	2	5,8	2,6	
	3	11,1	6,9	
	11	11,4	7	
	12	10,5	7,1	
2016	1	7,7	4,2	2016
	2	8,7	4,2	
	3	9,8	4,8	

ANNEXE 6. – Logiciel et packages utilisés pour les analyses statistiques

Logiciel :

R, R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Packages :

- Graphes, tableaux de corrélation :

package *ggplot2*, H. Wickham. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2009.

package *doBy*, (2016). doBy: Groupwise Statistics, LSmeans, Linear Contrasts, Utilities. R package version 4.5-15. http://CRAN.R-project.org/package=doBy.

package *corrplot*, Taiyun Wei (2013). corrplot: Visualization of a correlation matrix. R package version 0.73. https://CRAN.R-project.org/package=corrplot.

package *arm*, Andrew Gelman and Yu-Sung Su (2016). arm: Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models. R. package version 1.9-1. http://CRAN.R-project.org/package=arm.

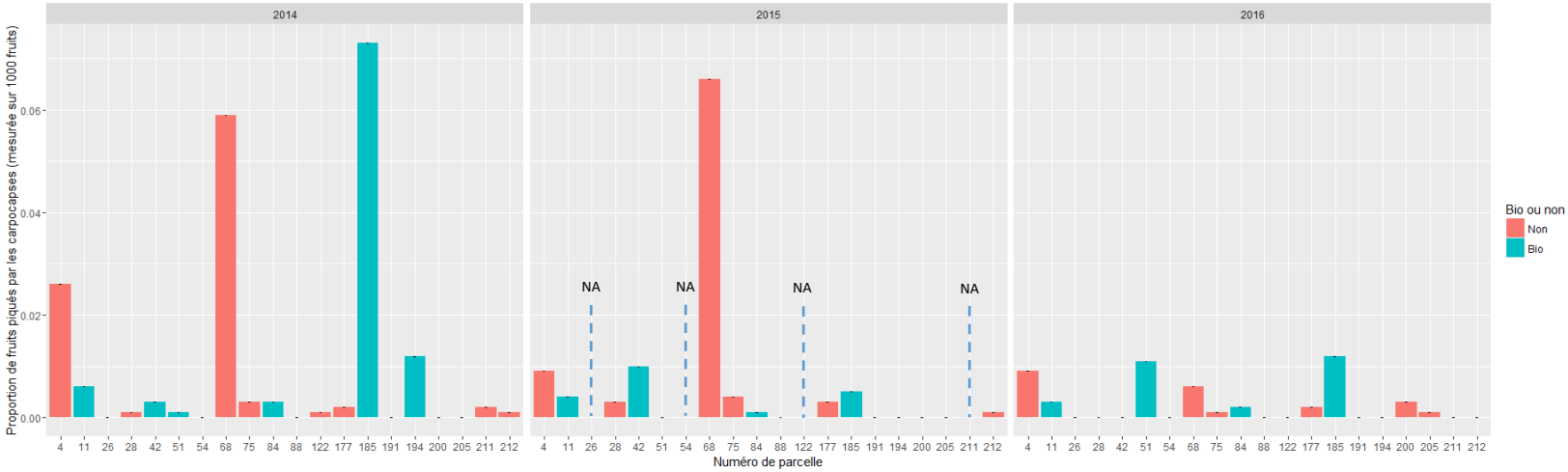
- Modèles :

commande *glmer*, package *lme4*, Douglas Bates, Martin Maechler, Ben Bolker, Steve Walker (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. Journal of Statistical Software, 67(1), 1-48. doi:10.18637/jss.v067.i01.

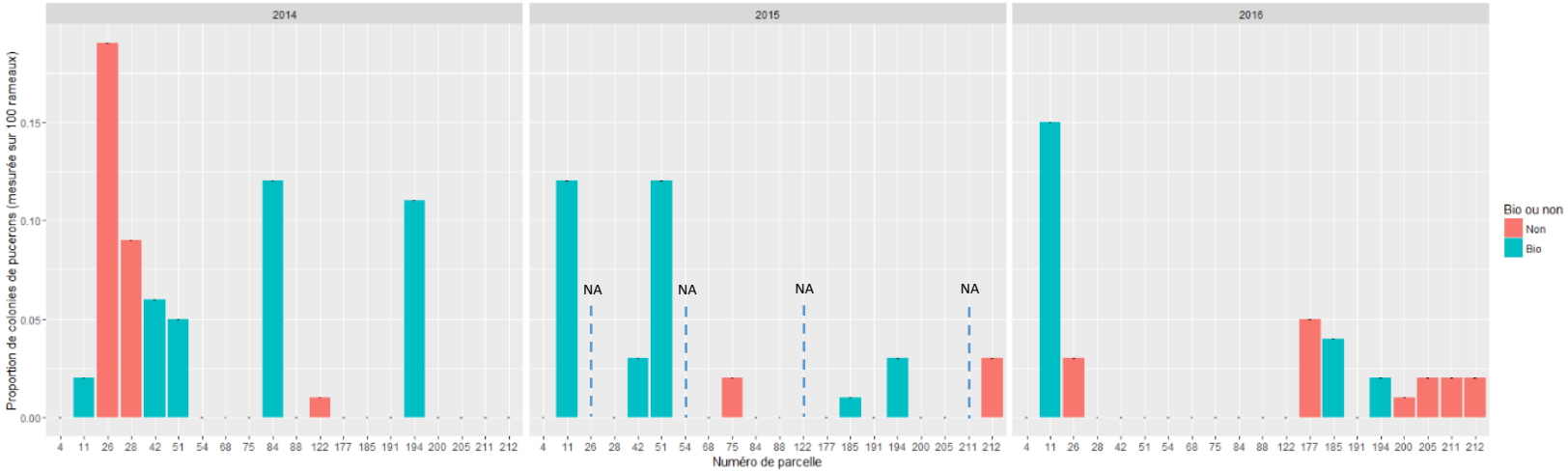
ANNEXE 7. – Graphes des abondances et dégâts par parcelle et année.

A : dégats de carpocapse, B : dégats de puceron, C : abondance des larves diapausantes de carpocapse.

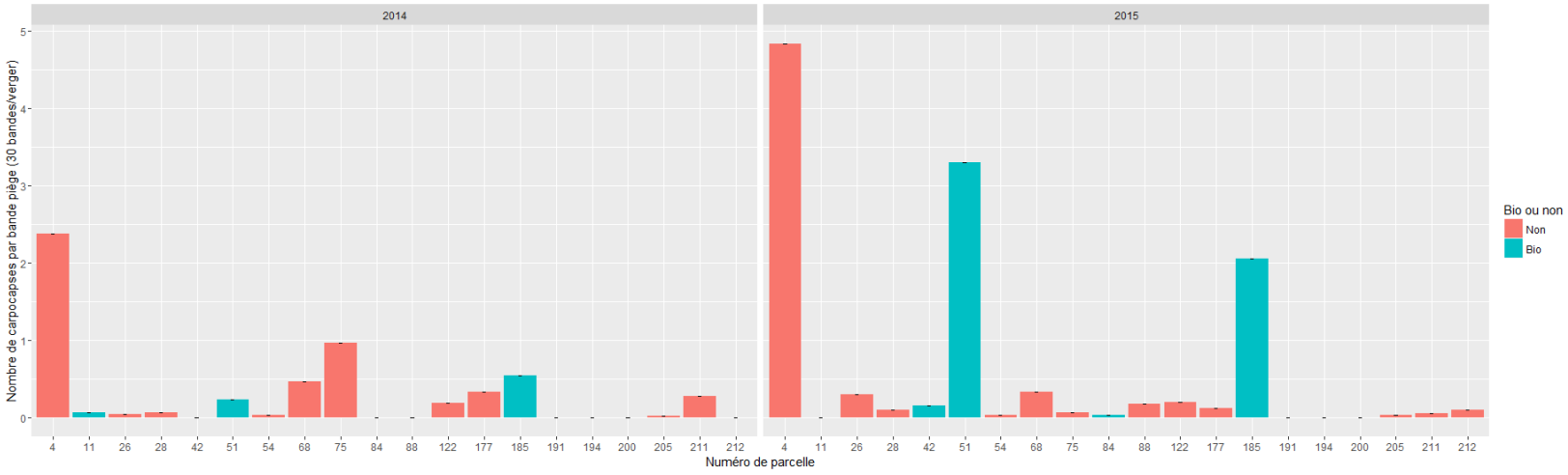
A :



B :


2014
2015
2016
Proportion de colonies de pucerons (mesurée sur 100 rameaux)
0.00
0.05
0.10
0.15
NA
4 11 26 28 42 51 54 68 75 84 88 122 177 185 191 194 200 205 211 212
Numéro de parcelle
Bio ou non
Non
Bio

C :

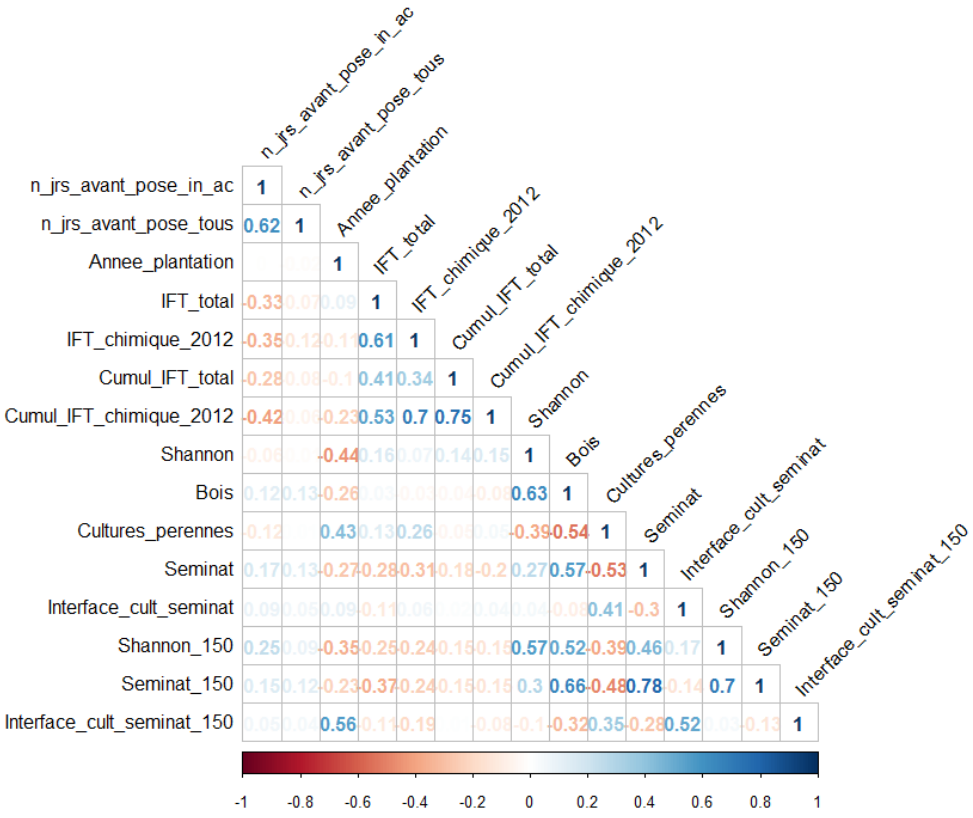

2014
2015
Nombre de carpocapses par bande piège (30 bandes/verger)
0
1
2
3
4
5
4 11 26 28 42 51 54 68 75 84 88 122 177 185 191 194 200 205 211 212
Numéro de parcelle
Bio ou non
Non
Bio

ANNEXE 8. – Les données chiffrées des matrices de corrélations entre les variables explicatives – phytosanitaires et paysagères.*

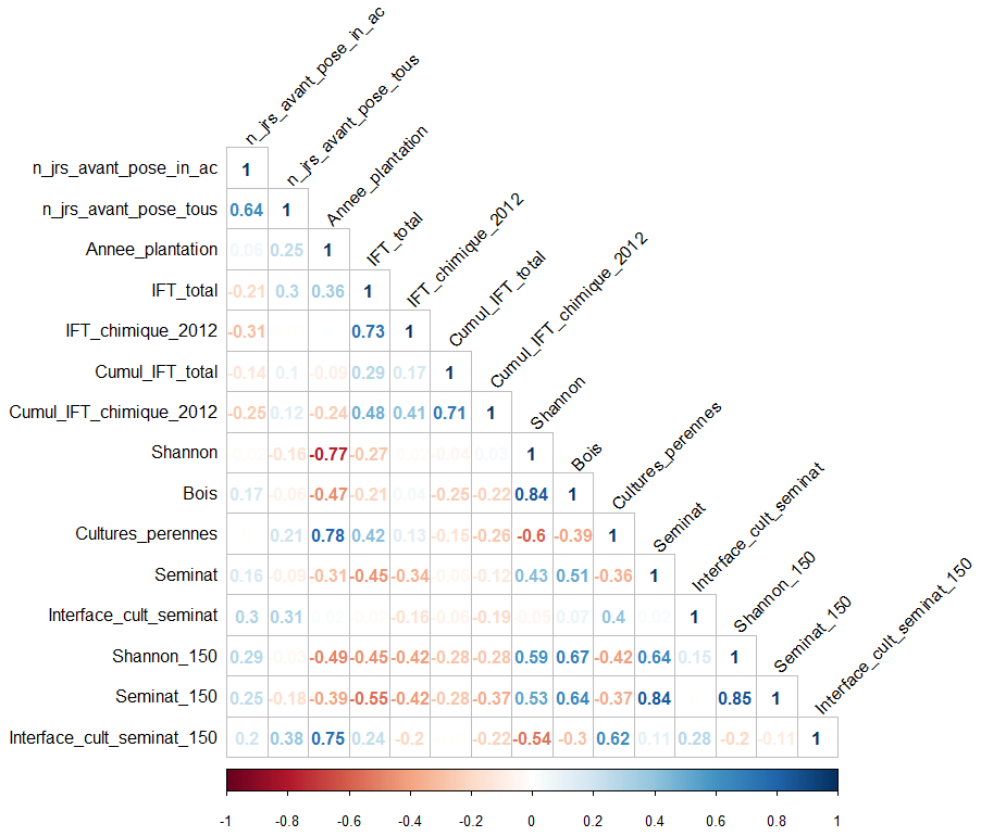
*A : pour tous les vergers, l'année 2014 et 2015 ; B : pour les vergers conventionnels, l'année 2014 ; C : pour les vergers conventionnels, l'année 2015 ; D : pour les vergers biologiques, l'année 2014 ; E : pour les vergers biologiques, l'année 2015.

Les corrélations positives sont en bleu, les corrélations négatives en rouge et l'intensité de la couleur permet de visualiser la valeur de la corrélation.

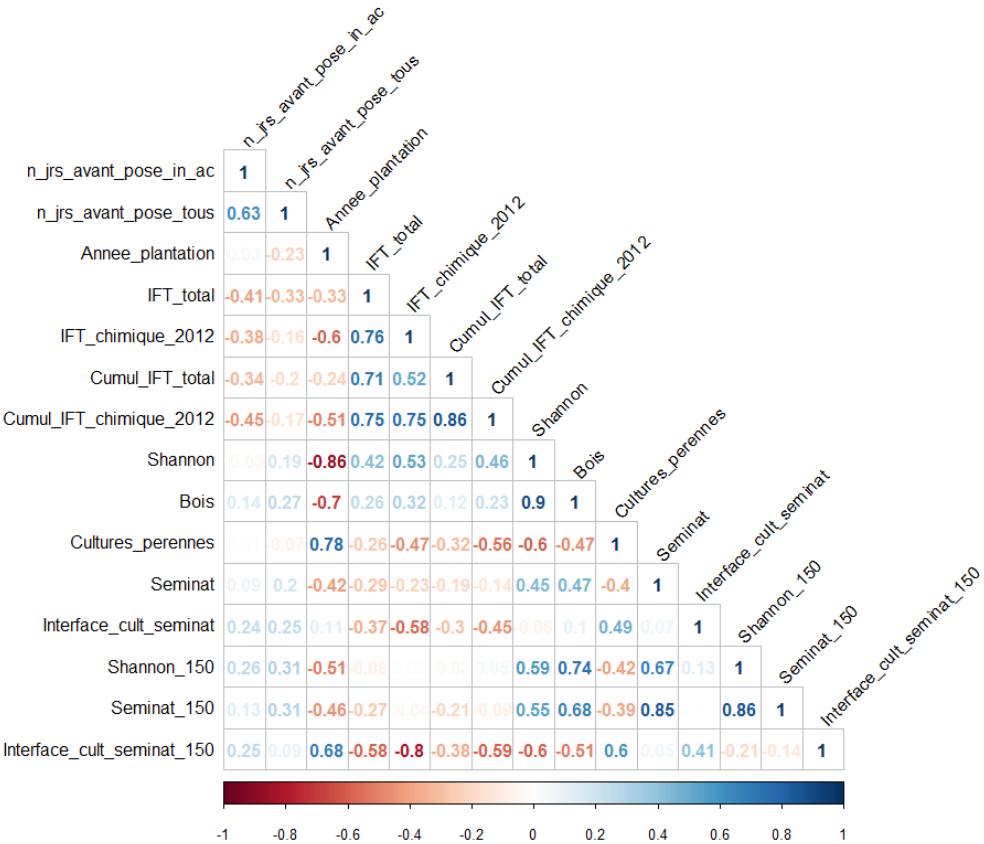
A :



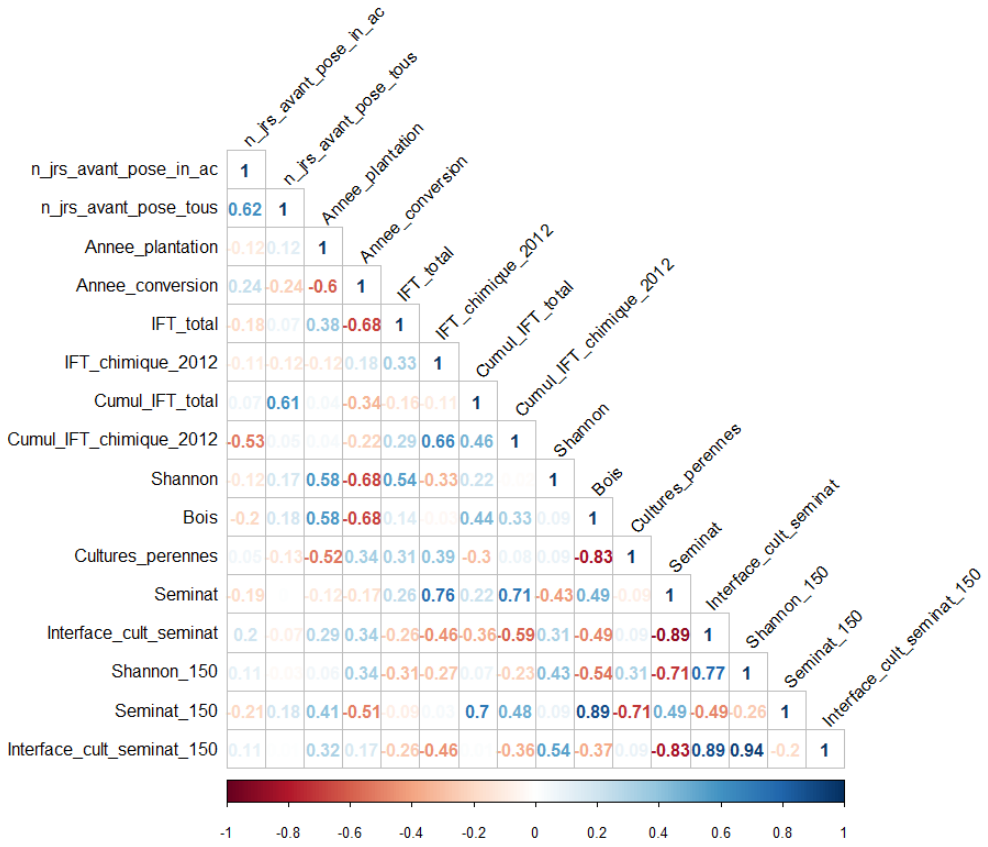
B :


n_jrs_avant_pose_in_ac
n_jrs_avant_pose_tous
Annee_plantation
IFT_total
IFT_chimique_2012
Cumul_IFT_total
Cumul_IFT_chimique_2012
Shannon
Bois
Cultures_perennes
Seminat
Interface_cult_seminat
Shannon_150
Seminat_150
Interface_cult_seminat_150
-1 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1

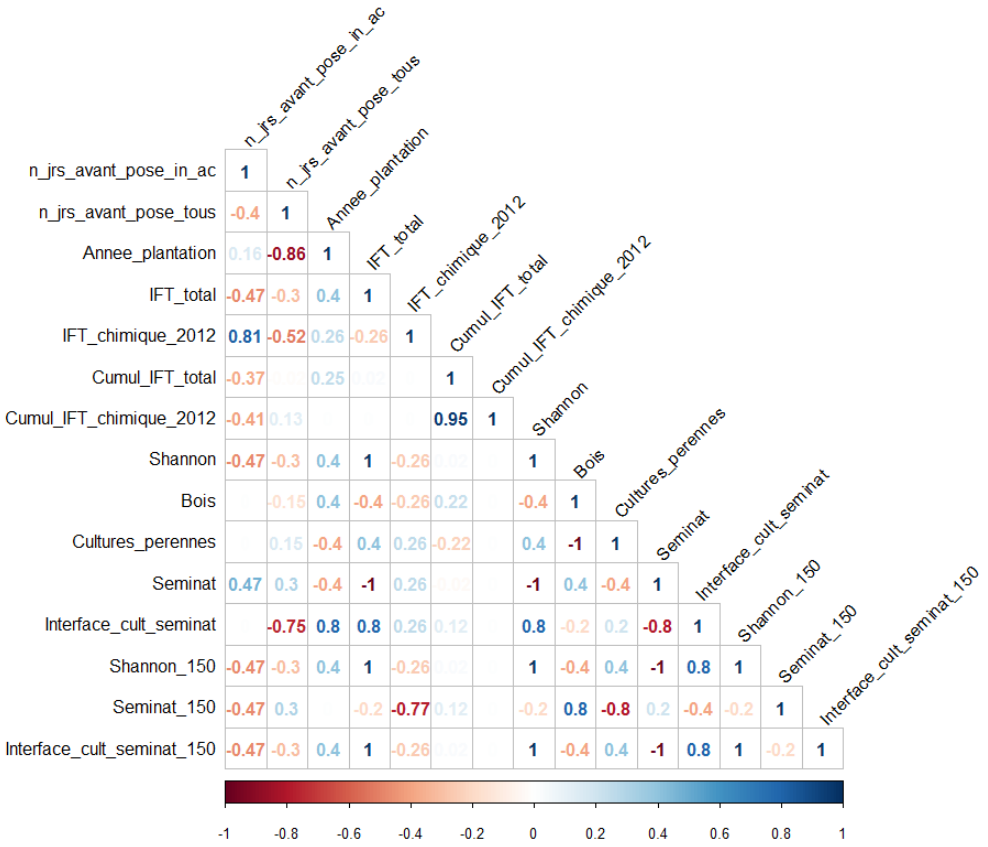
C :


n_jrs_avant_pose_in_ac
n_jrs_avant_pose_tous
Annee_plantation
IFT_total
IFT_chimique_2012
Cumul_IFT_total
Cumul_IFT_chimique_2012
Shannon
Bois
Cultures_perennes
Seminat
Interface_cult_seminat
Shannon_150
Seminat_150
Interface_cult_seminat_150
-1 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1

D :


n_jrs_avant_pose_in_ac
n_jrs_avant_pose_tous
Annee_plantation
Annee_conversion
IFT_total
IFT_chimique_2012
Cumul_IFT_total
Cumul_IFT_chimique_2012
Shannon
Bois
Cultures_perennes
Seminat
Interface_cult_seminat
Shannon_150
Seminat_150
Interface_cult_seminat_150
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1

E :


n_jrs_avant_pose_in_ac
n_jrs_avant_pose_tous
Annee_plantation
IFT_total
IFT_chimique_2012
Cumul_IFT_total
Cumul_IFT_chimique_2012
Shannon
Bois
Cultures_perennes
Seminat
Interface_cult_seminat
Shannon_150
Seminat_150
Interface_cult_seminat_150
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1

ANNEXES SEPAREES

ANNEXE 9. – Les noms des colonnes du tableau SEBIOPAG et les significations en français.

"N_parcelle_l" : Numéro de parcelle local.

"Annee" : Année.

"Session" : Session.

"pose_gr_bas" : Nombre de graines de Pensée posés en bas (au sol).

"reste_gr_bas" : Nombre de graines de Pensée restés en bas (au sol).

"pose_puce_bas" : Nombre de pucerons posés en bas (au sol).

"reste_puce_bas" : Nombre de pucerons restés en bas (au sol).

"pose_puce_haut" : Nombre de pucerons posés en haut (dans l'arbre).

"reste_puce_haut" : Nombre de pucerons restés en haut (dans l'arbre).

"pose_carpo" : Nombre des œufs de Carpocapses posés en haut (dans l'arbre).

"reste_carpo" : Nombre des œufs de Carpocapses restés en haut (dans l'arbre).

"Cumul_IFT_insec" : IFT d'insecticide cumulé depuis le début d'année.

"Cumul_IFT_insec_bio_2015" : IFT d'insecticide bio-contrôle cumulé depuis le début d'année (selon les réglementations 2015).

"Cumul_IFT_insec_bio_2012" : IFT d'insecticide bio-contrôle cumulé depuis le début d'année (selon les réglementations 2012).

"Cumul_IFT_fongi" : IFT de fongicide cumulé depuis le début d'année.

"Cumul_IFT_fongi_bio_2015" : IFT de fongicide bio-contrôle cumulé depuis le début d'année (selon les réglementations 2015).

"Cumul_IFT_bacte" : IFT de bactéricide cumulé depuis le début d'année.

"Cumul_IFT_acari" : IFT d'acaricide cumulé depuis le début d'année.

"Cumul_IFT_herbi" : IFT d'herbicide cumulé depuis le début d'année.

"n_jrs_avant_pose_in_ac" : Nombre de jours entre le dernier traitement insecticides ou acaricides et la date de pose des cartes de prédation (spécifiquement les traitements insecticides et acaricides, pour les vergers conventionnels).

"n_jrs_avant_pose_tous" : Nombre de jours entre le dernier traitement de tous les produits et la date de pose des cartes de prédation (tous les traitements inclus, pour tous les vergers (bio et conventionnel)).

"IFT_insec" : IFT d'insecticide de l'année.

"IFT_insec_bio_2015" : IFT d'insecticide bio-contrôle de l'année (selon les réglementations 2015).

"IFT_insec_bio_2012" : IFT d'insecticide bio-contrôle de l'année (selon les réglementations 2012).

"IFT_fongi" : IFT de fongicide de l'année.

"IFT_fongi_bio_2015" : IFT de fongicide bio-contrôle de l'année (selon les réglementations 2015).

"IFT_bacte" : IFT de bactéricide de l'année.

"IFT_acari" : IFT d'acaricide de l'année.

"IFT_herbi" : IFT d'herbicide de l'année.

"Annee_plantation" : Année de la plantation du verger (pour tous les vergers).

"Annee_conversion" : Année de la conversion du verger (pour les vergers en agriculture biologique).

"IFT_total" : IFT total de l'année = IFT d'insecticide de l'année + IFT de fongicide de l'année + IFT d'acaricide de l'année + IFT de bactéricide de l'année.

"IFT_chimique_2012" : IFT chimique 2012 = IFT insecticide + IFT acaricide - IFT insecticide bio-contrôle 2012.

"IFT_chimique_2015" : IFT chimique 2015 = IFT insecticide + IFT acaricide - IFT insecticide bio-contrôle 2015.

"Cumul_IFT_total" : IFT total cumulé = IFT insecticide cumulé + IFT fongicide cumulé + IFT acaricide cumulé + IFT bactéricide cumulé.

"Cumul_IFT_chimique_2012" : IFT chimique 2012 cumulé = IFT insecticide cumulé + IFT acaricide cumulé - IFT insecticide bio-contrôle 2012 cumulé.

"Cumul_IFT_chimique_2015" : IFT chimique 2015 = IFT insecticide + IFT acaricide - IFT insecticide bio-contrôle 2015.

"predation_p_b" : Taux de prédation pour les pucerons bas.

"predation_p_h" : Taux de prédation pour les pucerons haut.

"predation_carpo" : Taux de prédation pour les carpocapses.

"predation_g" : Taux de prédation pour les graines.

"Bio" : Bio-contrôle ou non.

"Shannon" : la valeur de l'indice de Shannon (calculé avec un rayon de 560 m).

"Bois" : % des arbres (calculé avec un rayon de 560 m).

"Cultures_perennes" : % des vergers et des vignes (calculé avec un rayon de 560 m).

"Seminat" : % Seminat = % seminat-bois + % seminat-herb, OU % Seminat = % haies + % bois + % prairie + % friche herb (calculé avec un rayon de 560 m).

"Interface_cult_seminat" : Interface = longueur du bord entre 'bois' et 'culture' + longueur du bord entre 'milieux herbeux' et 'culture' (calculé avec un rayon de 560 m).

"Shannon_150" : la valeur de l'indice de Shannon (calculé avec un rayon de 150 m).

"Seminat_150" : % Seminat = % seminat-bois + % seminat-herb, OU % Seminat = % haies + % bois + % prairie + % friche herb (calculé avec un rayon de 150 m).

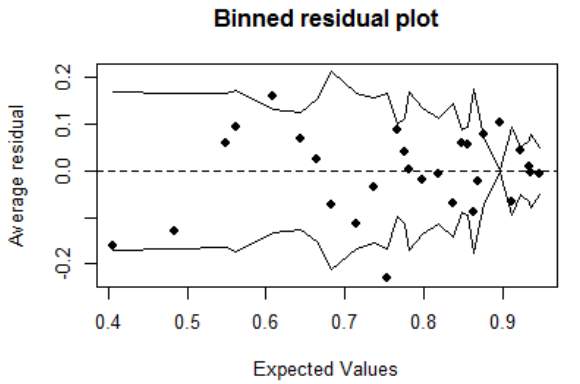
"Interface_cult_seminat_150" : Interface = longueur du bord entre 'bois' et 'culture' + longueur du bord entre 'milieux herbeux' et 'culture' (calculé avec un rayon de 150 m).

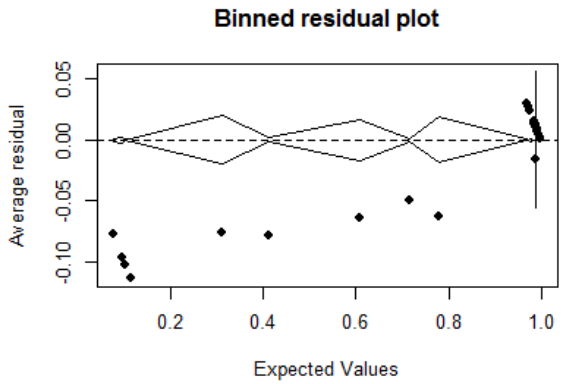
ANNEXE 10. – Binned plots et dotplots. Colonne de gauche, sauf effet aléatoire « individu », à droite avec effet aléatoire « individu »*.

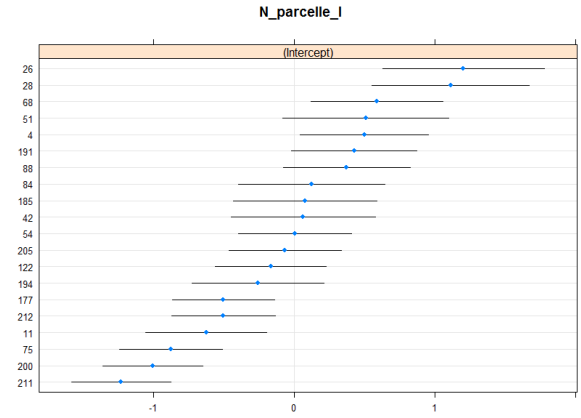
Binned plots et dotplots pour les modèles primaires :

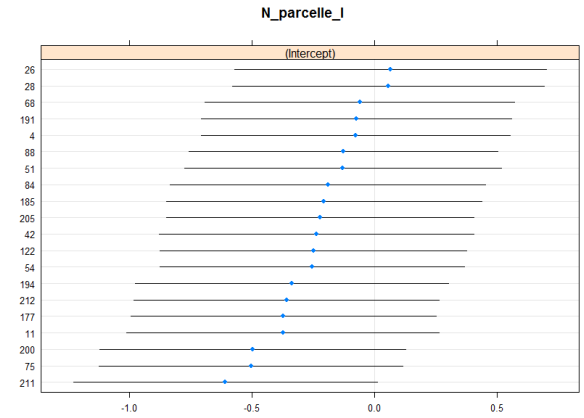
* pour les modèles primaires : A1 (puceron bas), A2 (puceron haut), A3 (graine), A4 (carpocapse), en correspondance avec (cf. résultats : tab. 11) ; pour les modèles secondaires et tertiaires : les graphes sont mis dans le même ordre que dans les tableaux des résultats des modèles (cf. résultats : tab. 12 – tab. 15), avec leur nom de fichier en bas.

A1 :

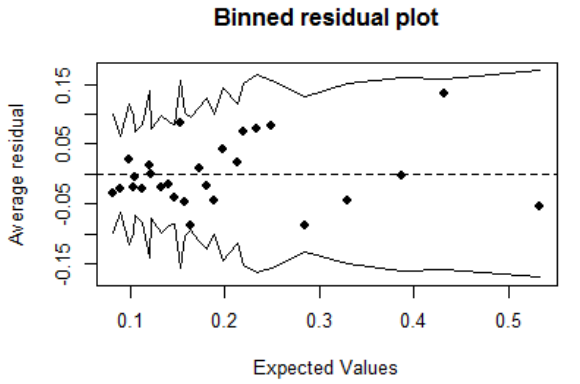


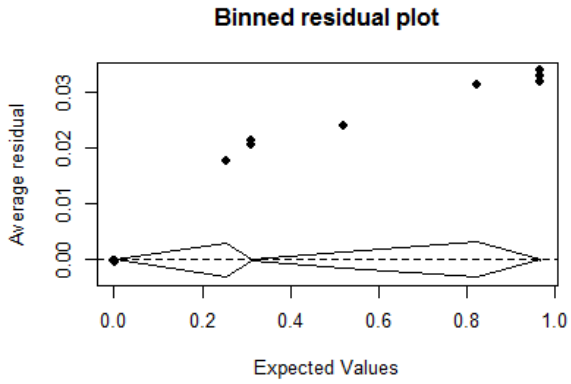


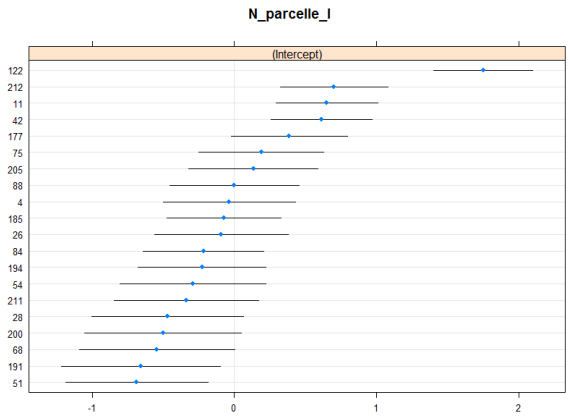


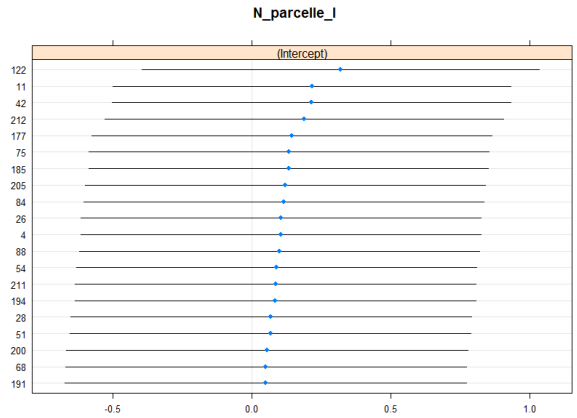


A2 :

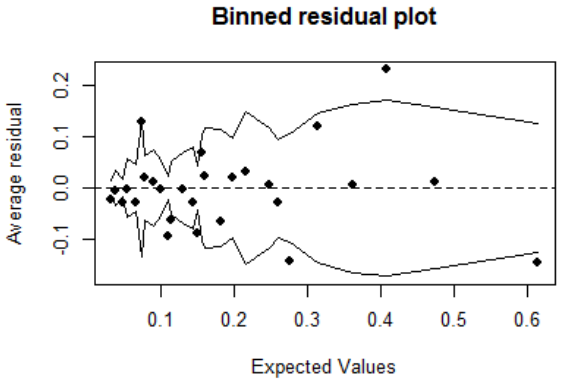


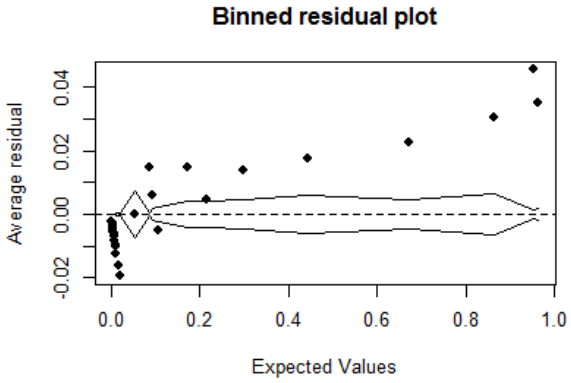


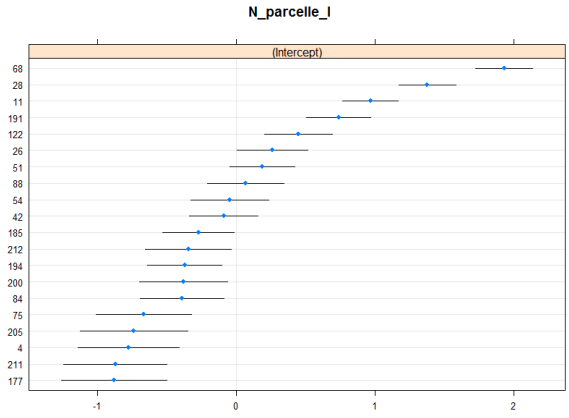

N_parcelle_I
(Intercept)
122
212
11
42
177
75
205
88
4
185
26
84
194
54
211
28
200
68
191
51
-1
0
1
2

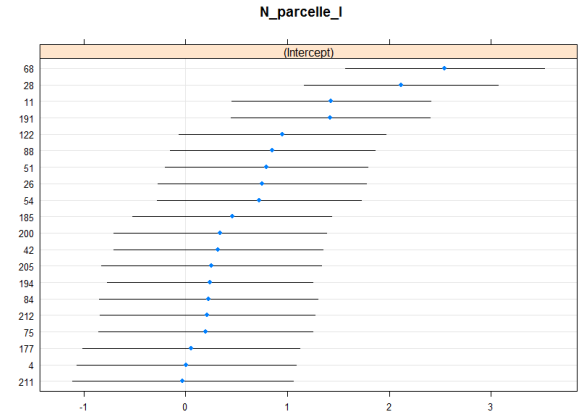

N_parcelle_I
(Intercept)
122
11
42
212
177
75
185
205
84
26
4
88
54
211
194
28
51
200
68
191
-0.5
0.0
0.5
1.0

A3 :

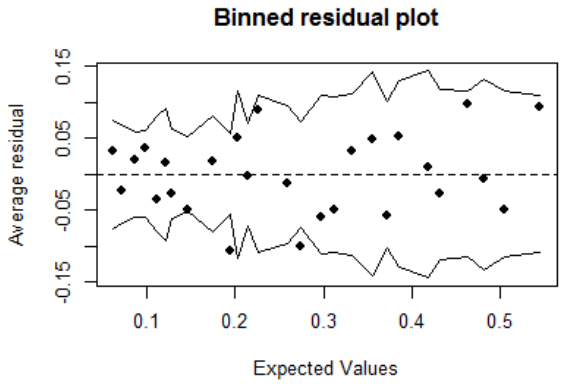

Binned residual plot
Average residual
-0.1
0.0
0.1
0.2
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
Expected Values

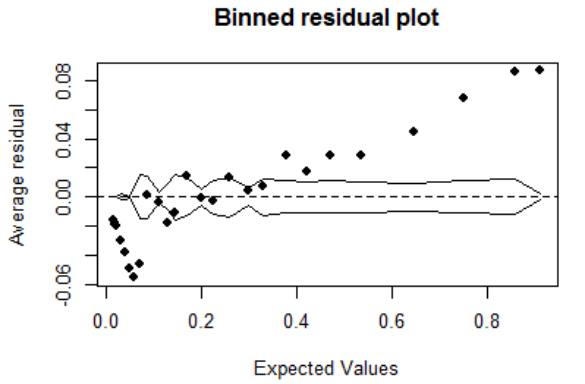

Binned residual plot
Average residual
-0.02
0.00
0.02
0.04
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Expected Values

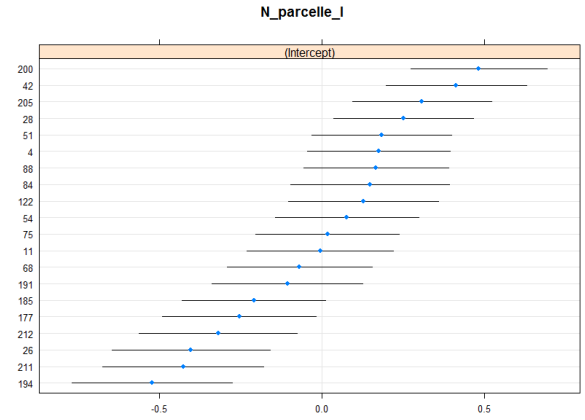

N_parcelle_I
(Intercept)
68
28
11
191
122
26
51
88
54
42
185
212
194
200
84
75
205
4
211
177
-1
0
1
2

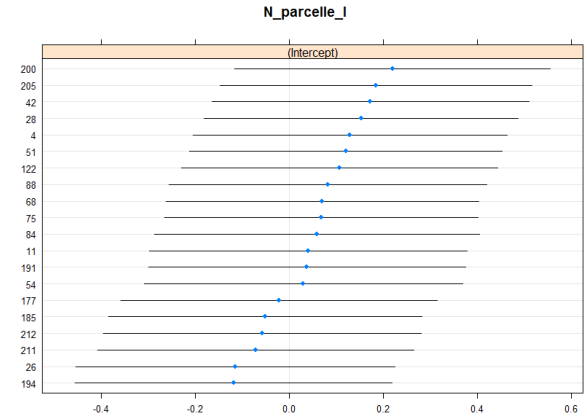

N_parcelle_I
(Intercept)
68
28
11
191
122
88
51
26
54
185
200
42
205
194
84
212
75
177
4
211
-1
0
1
2
3

A4 :



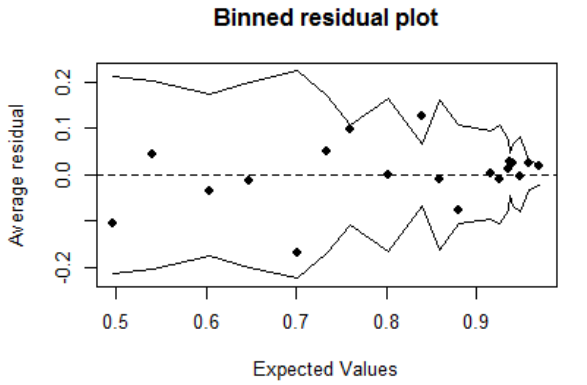


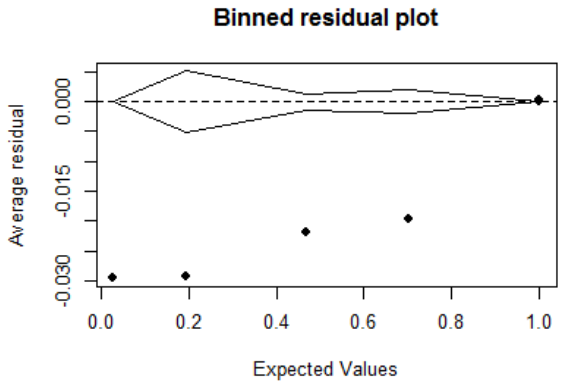




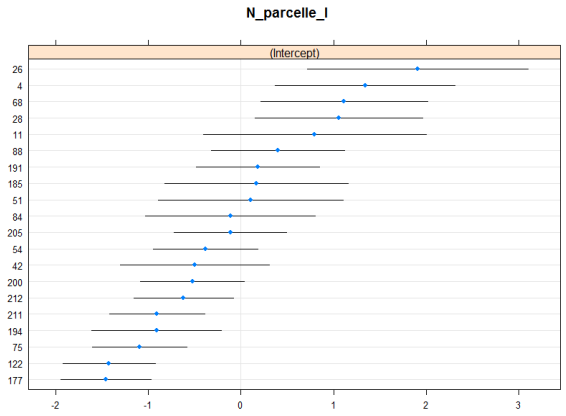
Binned plots et dotplots pour les modèles secondaires :

Pucerons session 1

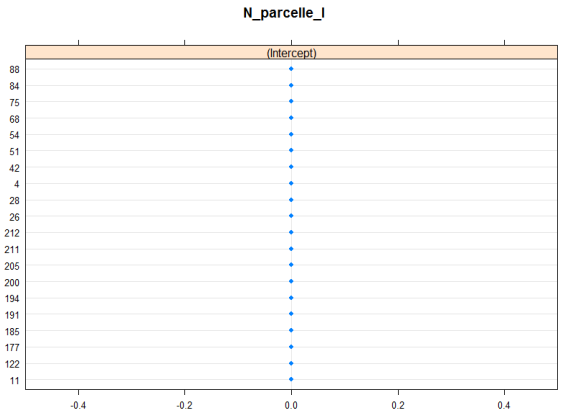




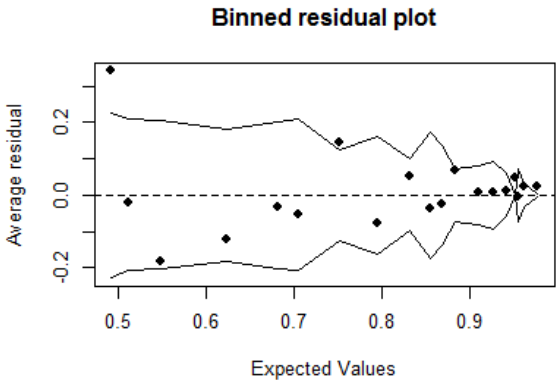
binnedplot_p_b_2e_mod01_S1_bio

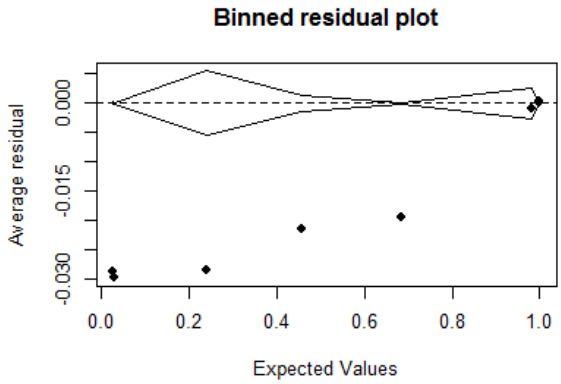


dotplot_p_b_2e_mod01_S1_bio

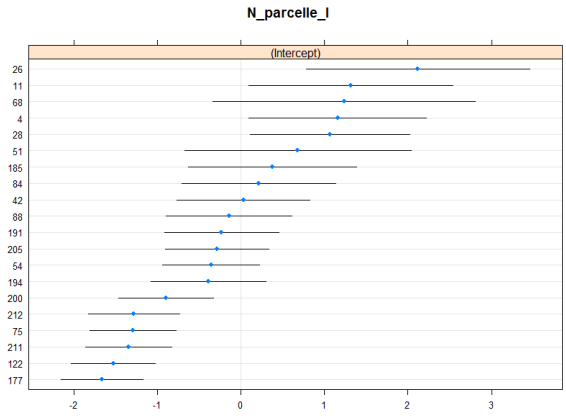


dotplot_p_b_2e_mod01_S1_bio_nobs

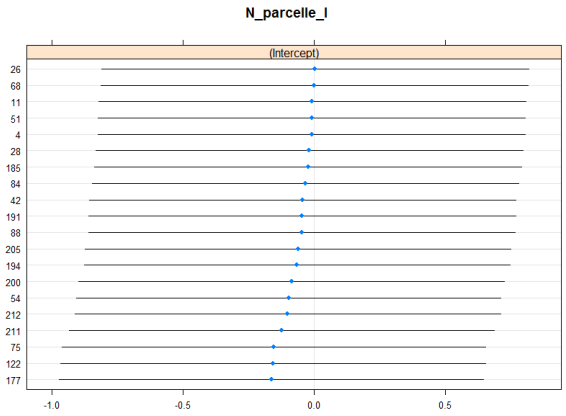




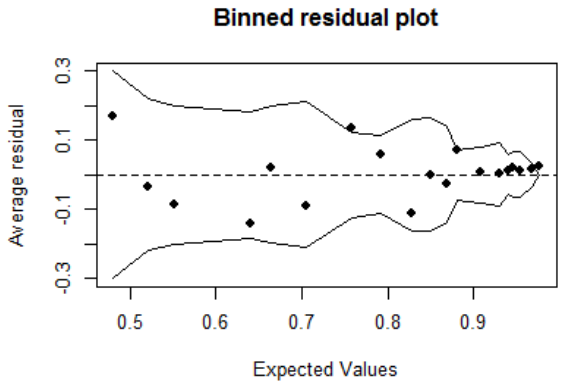
binnedplot_p_b_2e_mod02_S1_cumifttotal

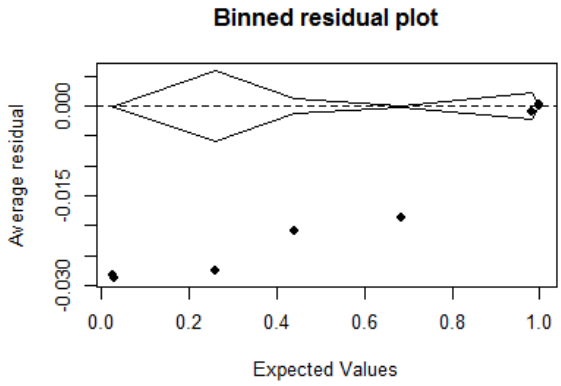


dotplot_p_b_2e_mod02_S1_cumifttotal

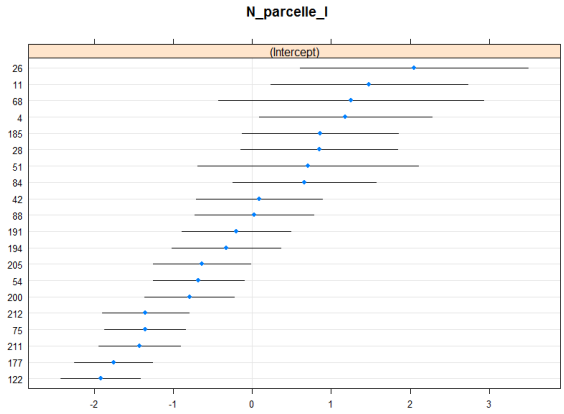


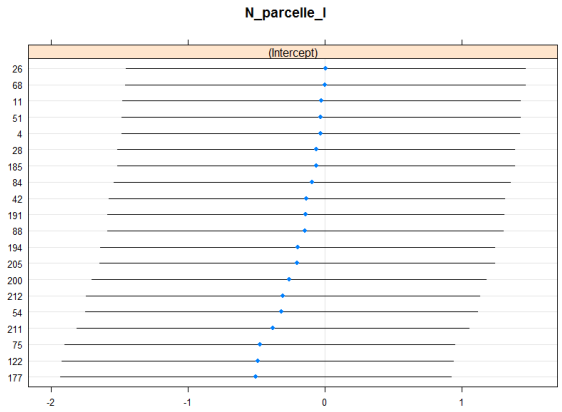
dotplot_p_b_2e_mod02_S1_cumifttotal_nobs





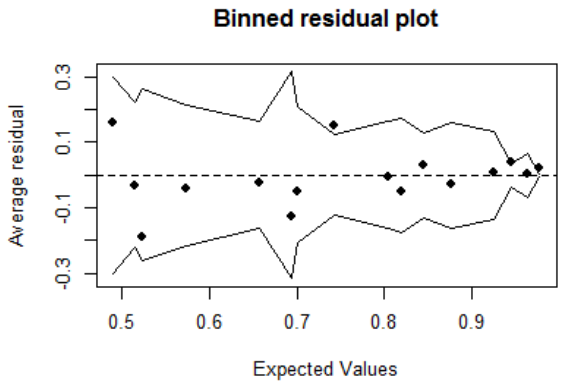
binnedplot_p_b_2e_mod03_S1_njaptous

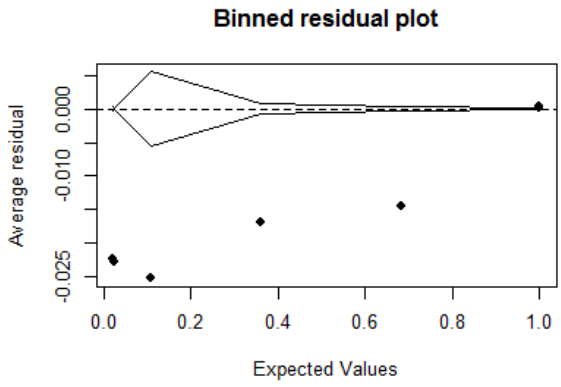




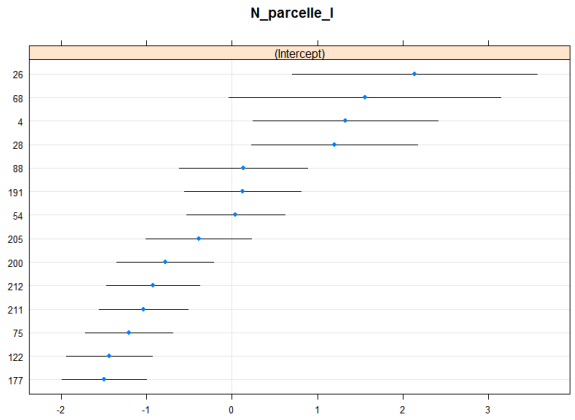
dotplot_p_b_2e_mod03_S1_njaptous

dotplot_p_b_2e_mod03_S1_njaptous_nobs

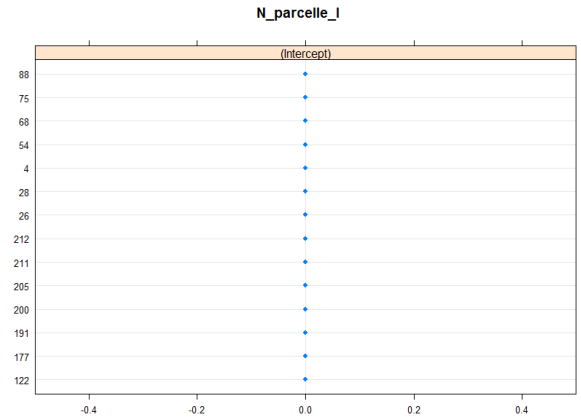




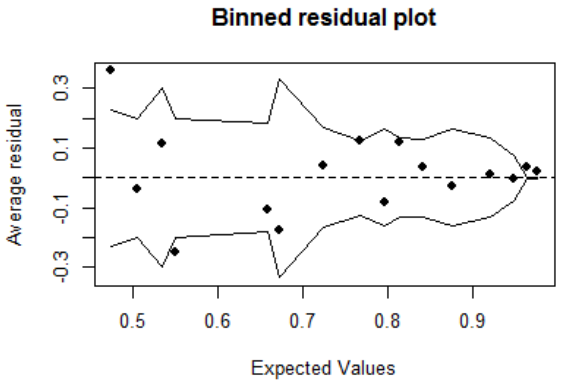
binnedplot_p_b_2e_mod04_S1_cumiftchimi

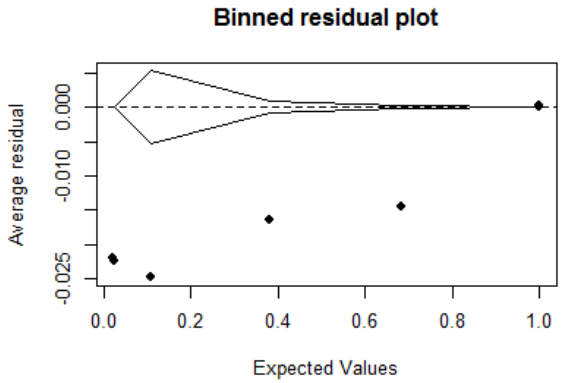


dotplot_p_b_2e_mod04_S1_cumiftchimi

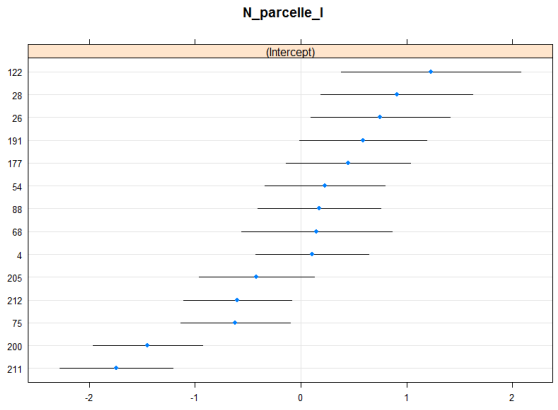


dotplot_p_b_2e_mod04_S1_cumiftchimi_nobs

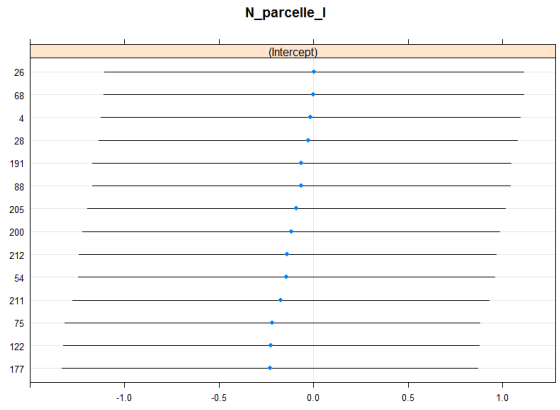




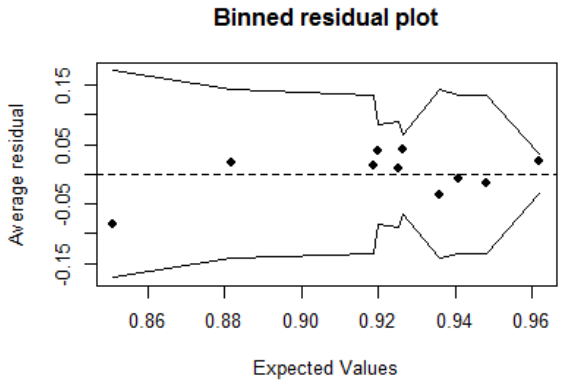
binnedplot_p_b_2e_mod05_S1_njrsapinac

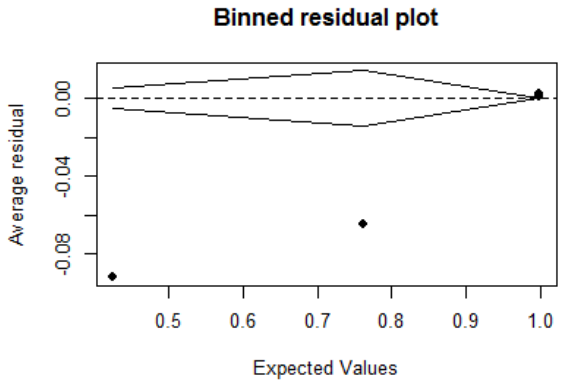


dotplot_p_b_2e_mod05_S2_njrsapinac

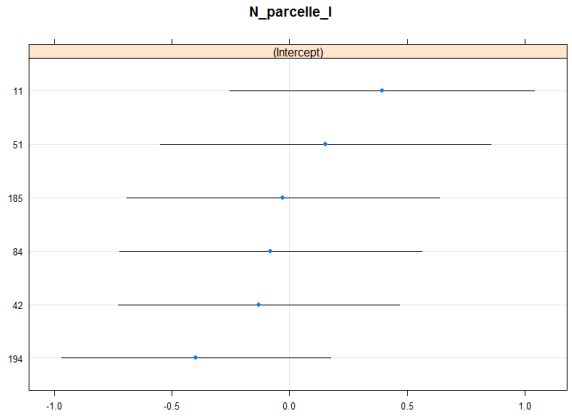


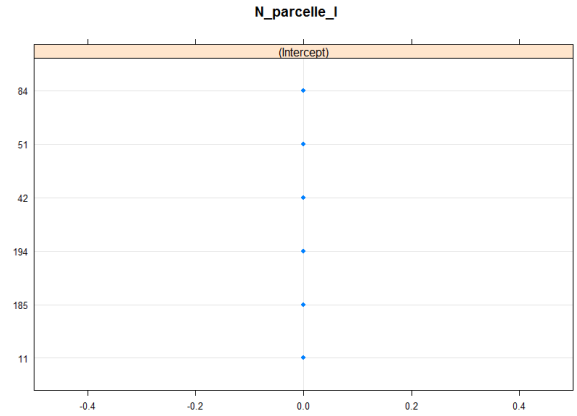
dotplot_p_b_2e_mod05_S1_njrsapinac_nobs



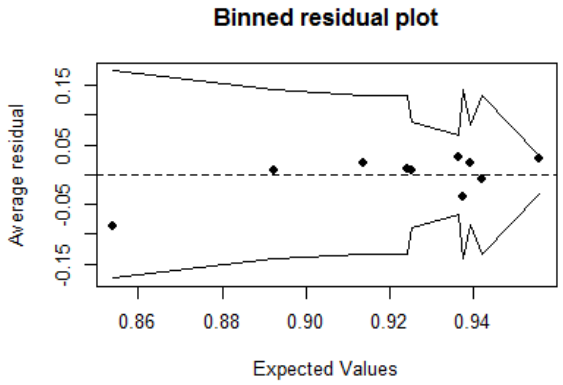


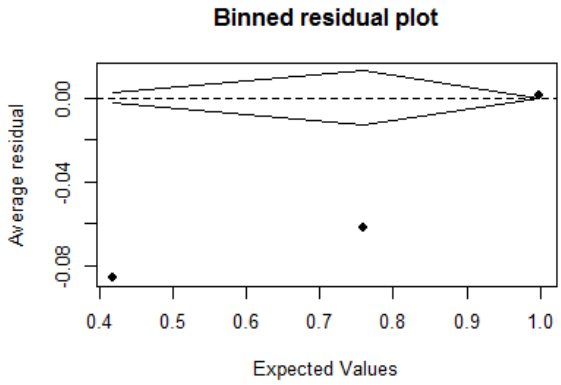
binnedplot_p_b_2e_mod06_S1_cumulifttotal_bio



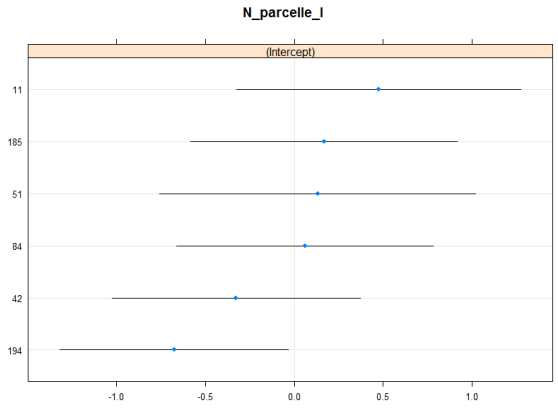


dotplot_p_b_2e_mod06_S1_cumulifttotal_bio dotplot_p_b_2e_mod06_S1_cumulifttotal_bio_nobs

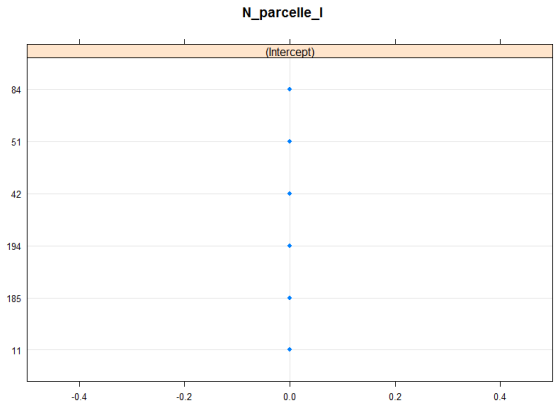




binnedplot_p_b_2e_mod07_S1_njaptous_bio

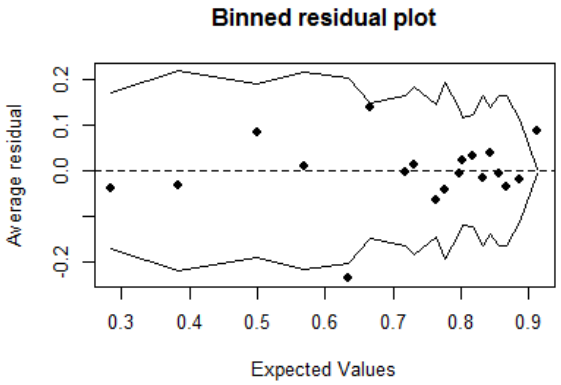


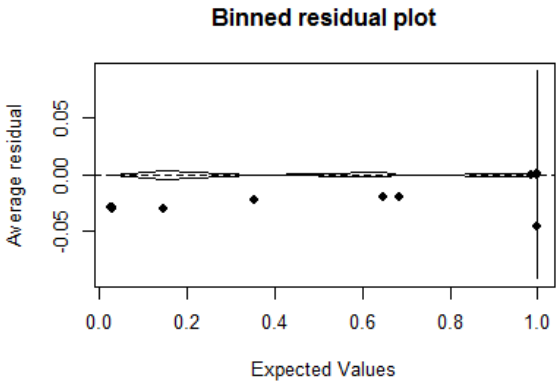
dotplot_p_b_2e_mod07_S1_njaptous_bio



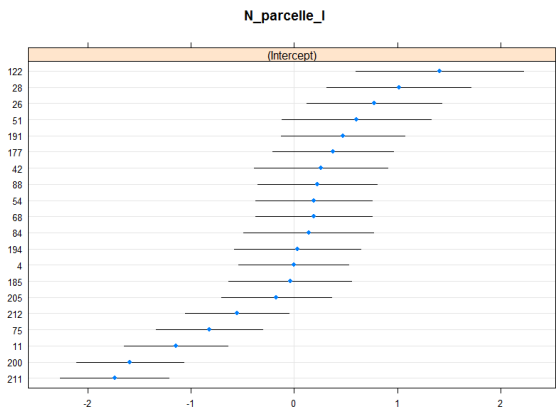
dotplot_p_b_2e_mod07_S1_njaptous_bio_nobs

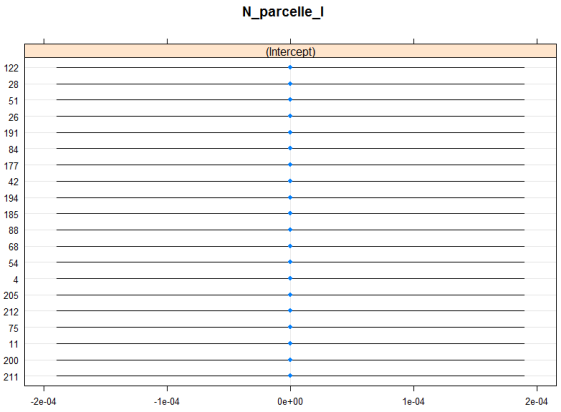
Pucerons session 2





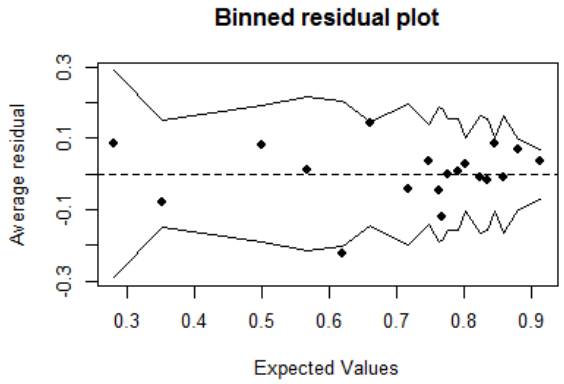
binnedplot_p_b_2e_mod01_S2_bio

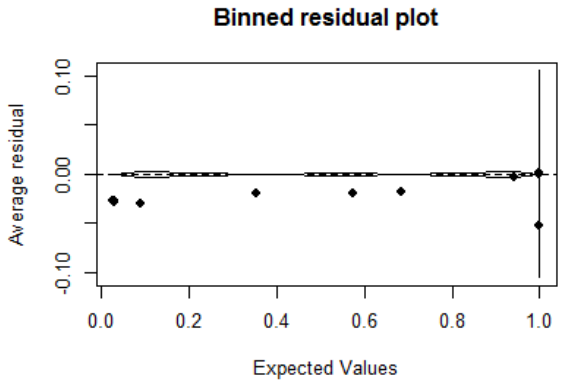




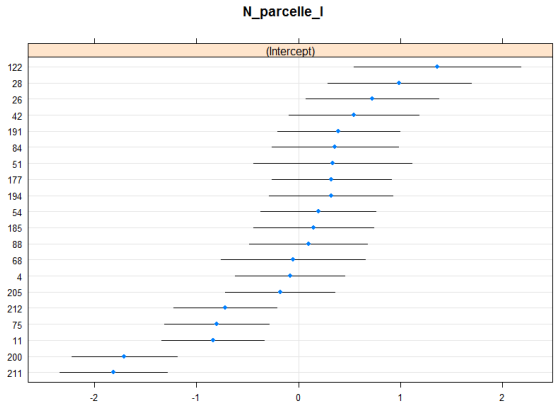
dotplot_p_b_2e_mod01_S2_bio

dotplot_p_b_2e_mod01_S2_bio_nobs

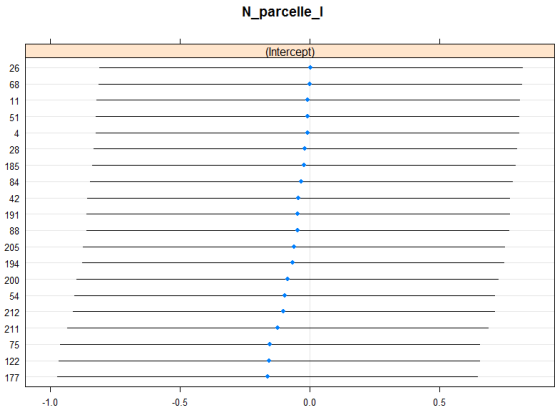




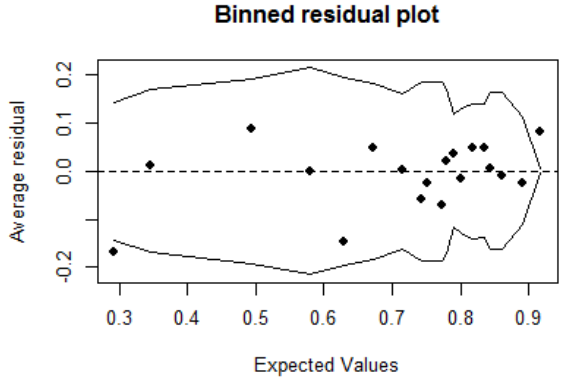
binnedplot_p_b_2e_mod02_S2_cumifttotal

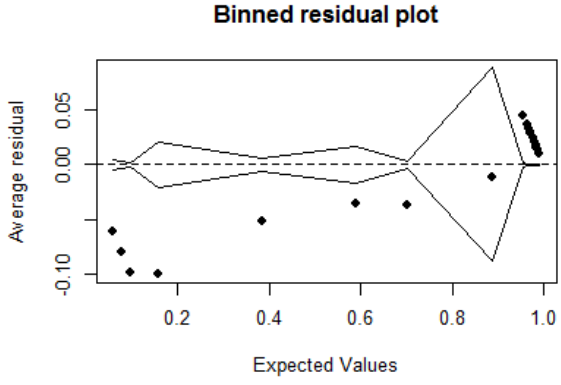


dotplot_p_b_2e_mod02_S2_cumifttotal

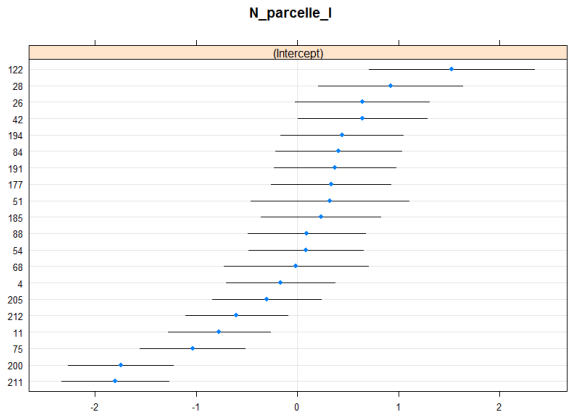


dotplot_p_b_2e_mod02_S1_cumifttotal_nobs

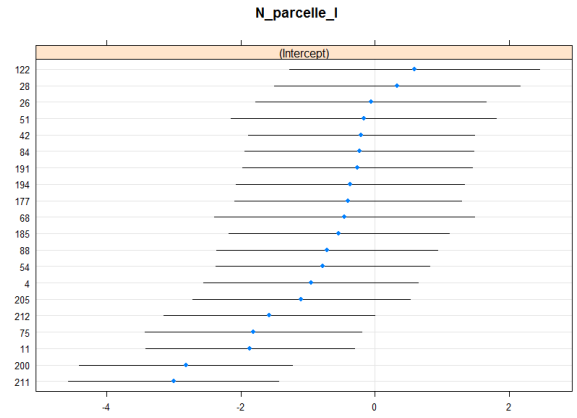




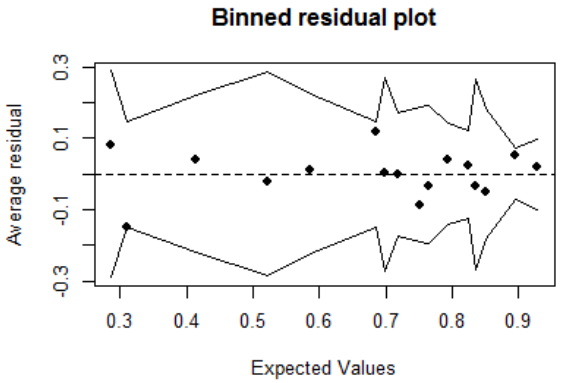
binnedplot_p_b_2e_mod03_S2_njaptous

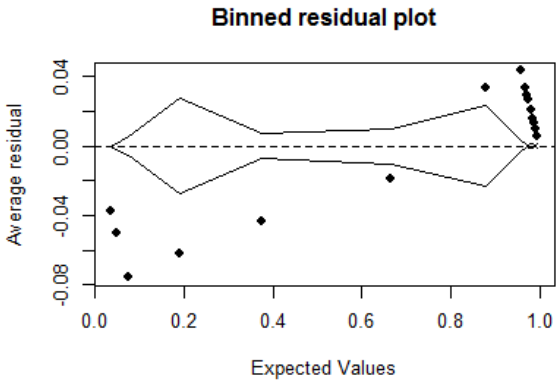


dotplot_p_b_2e_mod03_S2_njaptous

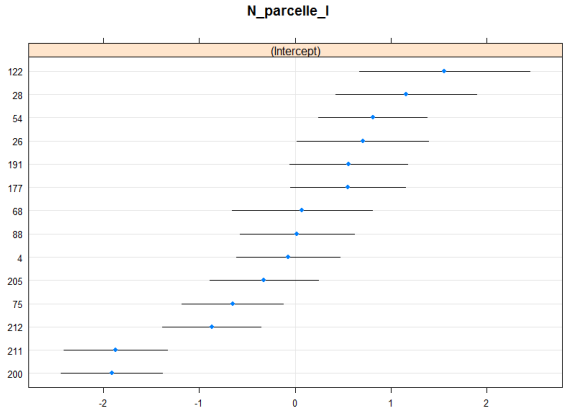


dotplot_p_b_2e_mod03_S2_njaptous_nobs

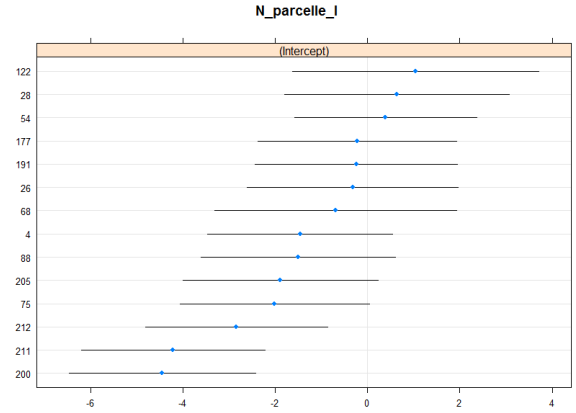




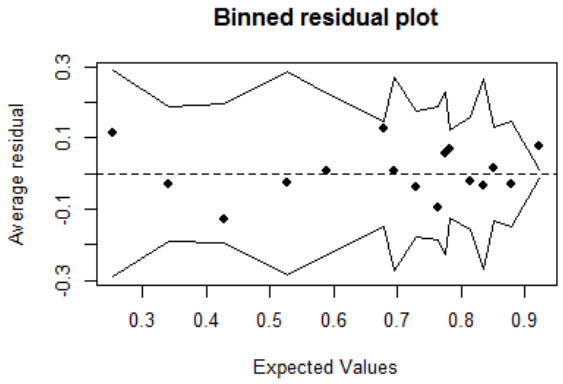
binnedplot_p_b_2e_mod04_S2_cumiftchimi

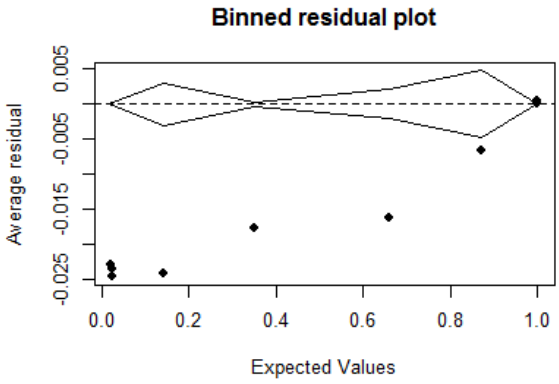


dotplot_p_b_2e_mod04_S2_cumiftchimi

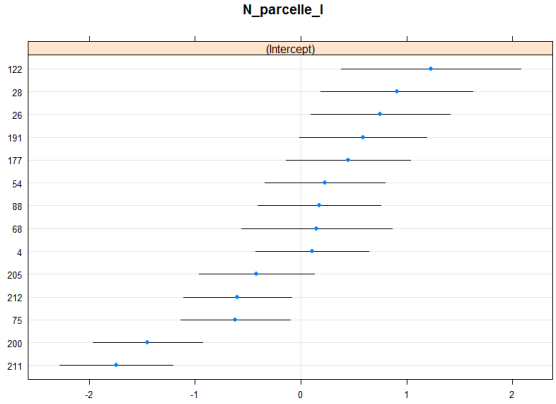


dotplot_p_b_2e_mod04_S2_cumiftchimi_nobs

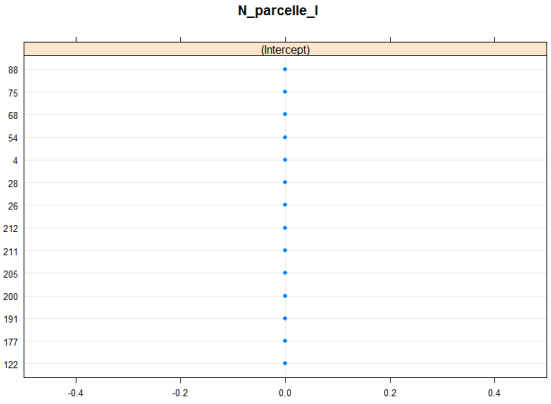




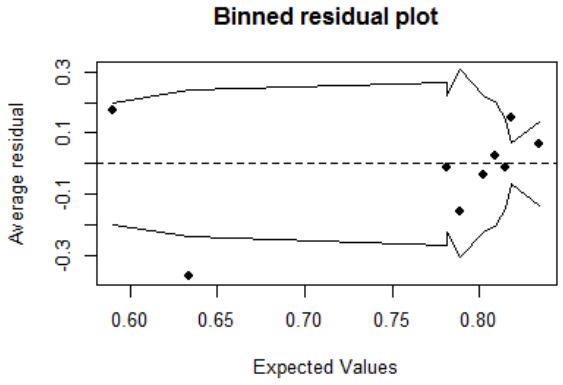
binnedplot_p_b_2e_mod05_S2_njrsapinac

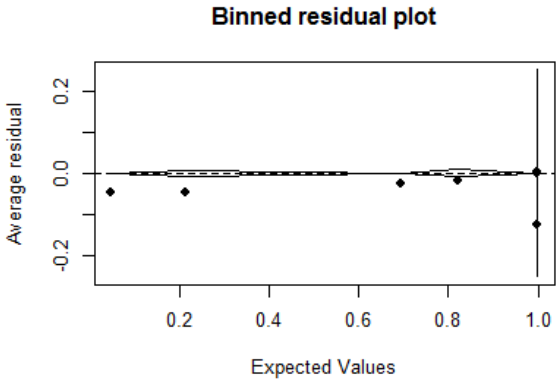


dotplot_p_b_2e_mod05_S2_njrsapinac

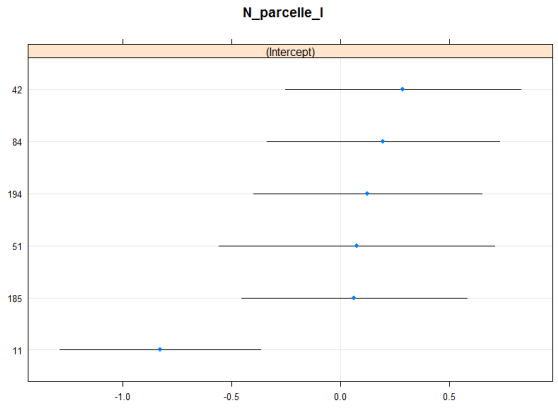


dotplot_p_b_2e_mod05_S2_njrsapinac_nobs

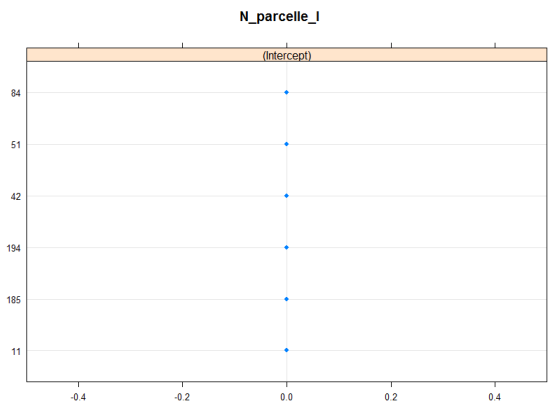




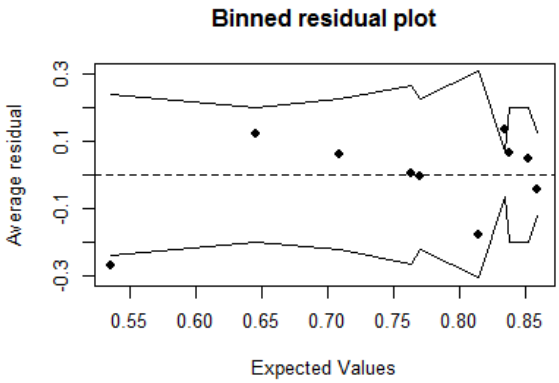
binnedplot_p_b_2e_mod06_S2_cumulifttotal_bio

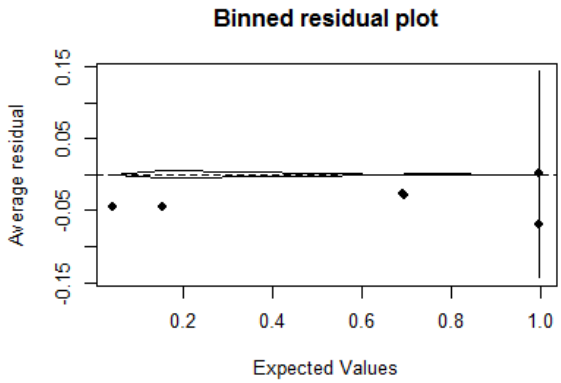


dotplot_p_b_2e_mod06_S2_cumulifttotal_bio

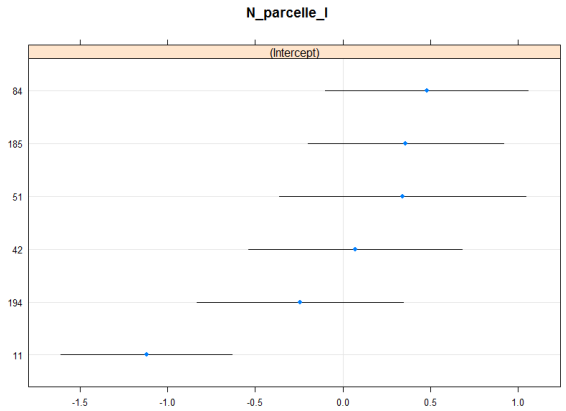


dotplot_p_b_2e_mod06_S2_cumulifttotal_bio_nobs

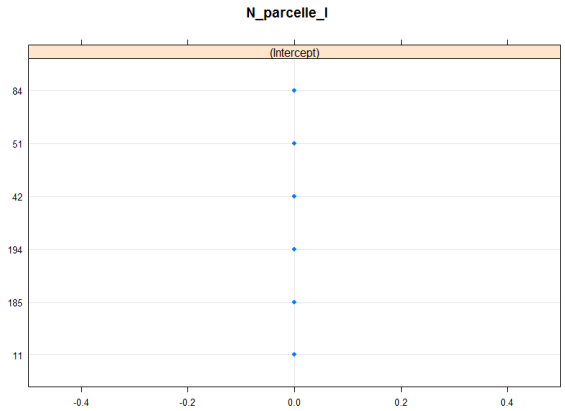




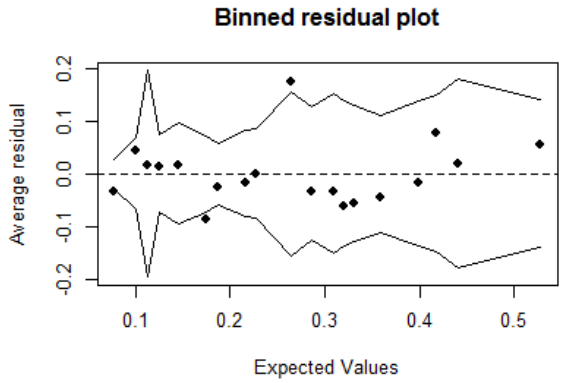
binnedplot_p_b_2e_mod07_S2_njaptous_bio

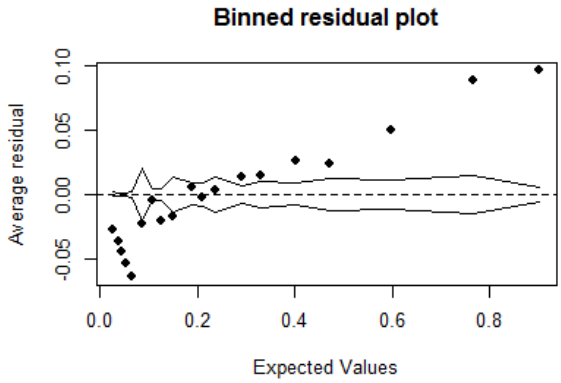


dotplot_p_b_2e_mod07_S2_njaptous_bio

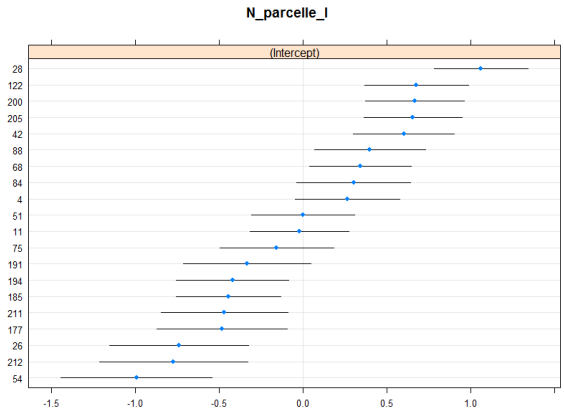


dotplot_p_b_2e_mod07_S2_njaptous_bio_nobs

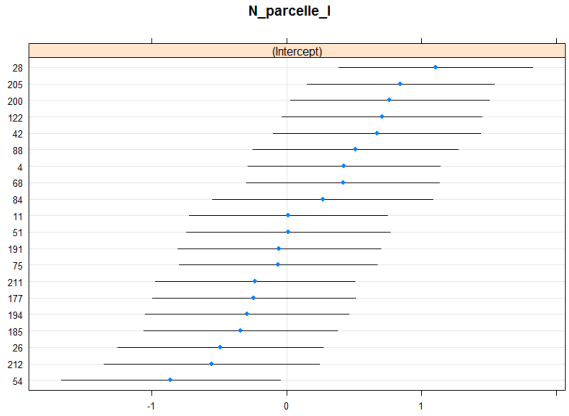




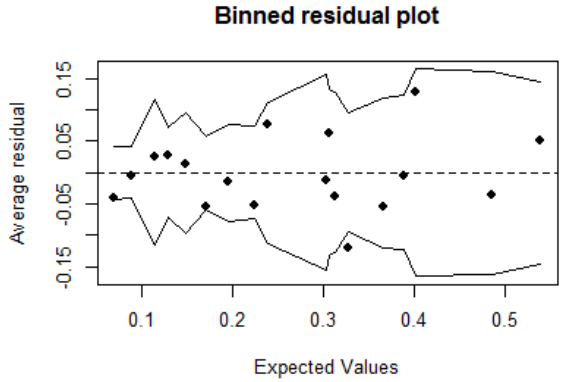
binnedplot_carpo_2e_mod01_S1_bio

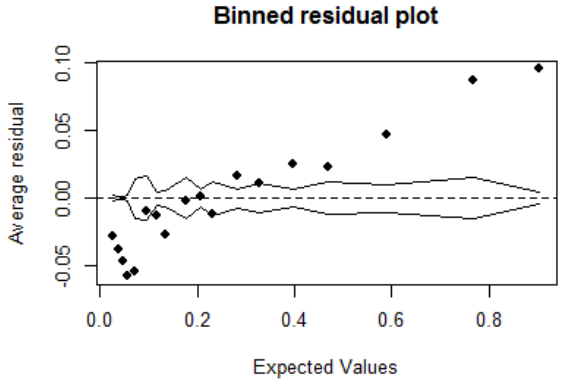


dotplot_carpo_2e_mod01_S1_bio

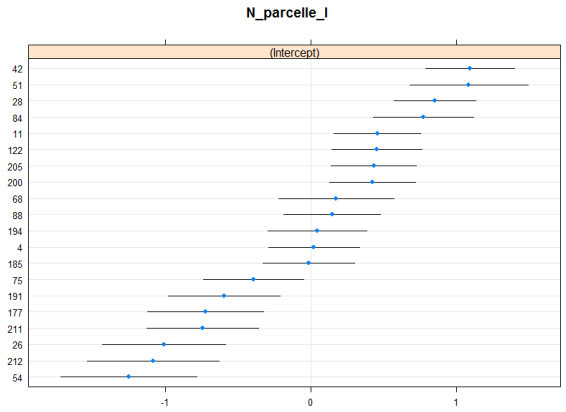


dotplot_carpo_2e_mod01_S1_bio_nobs

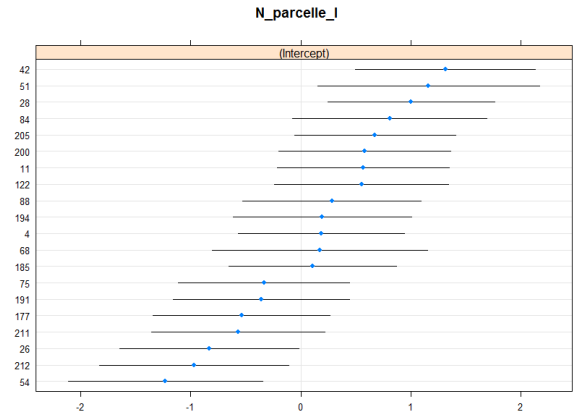




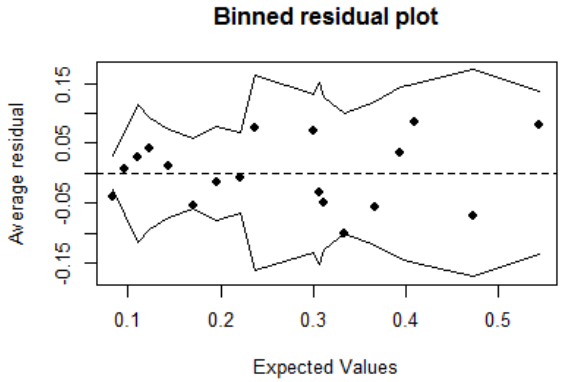
binnedplot_carpo_2e_mod02_S1_cumifttotal

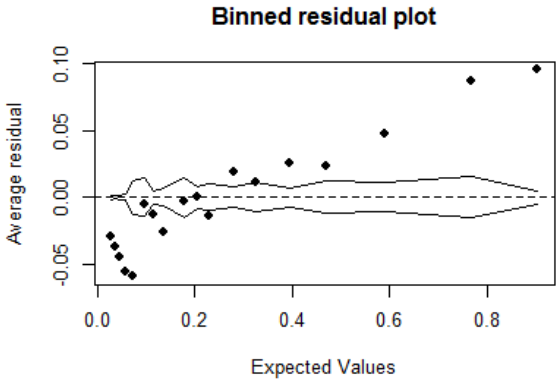


dotplot_carpo_2e_mod02_S1_cumifttotal

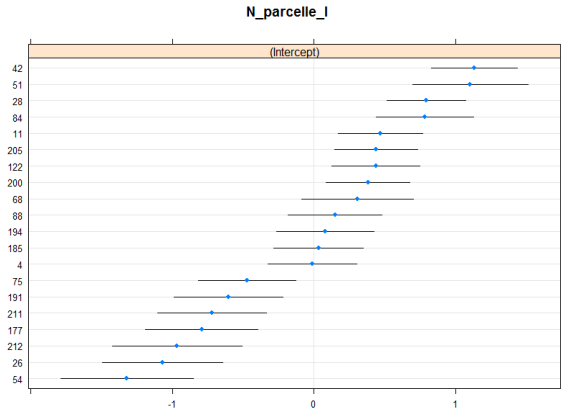


dotplot_carpo_2e_mod02_S1_cumifttotal_nobs

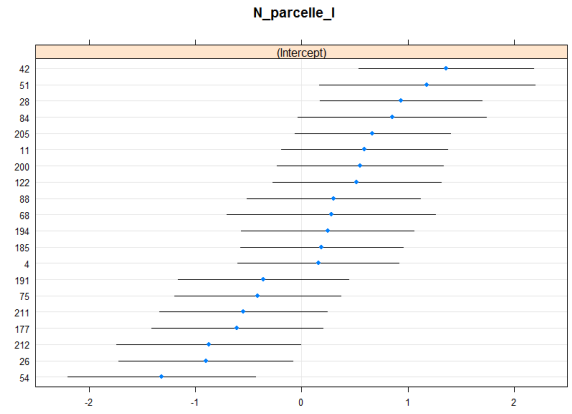




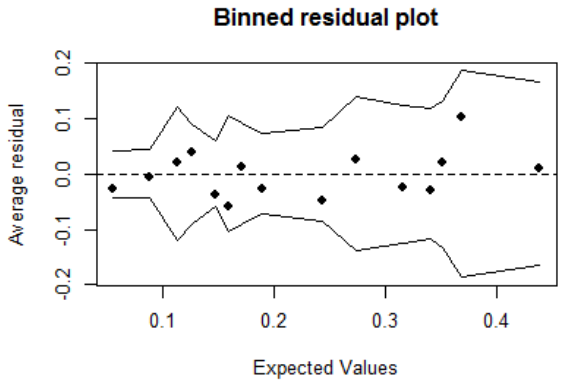
binnedplot_carpo_2e_mod03_S1_njaptous

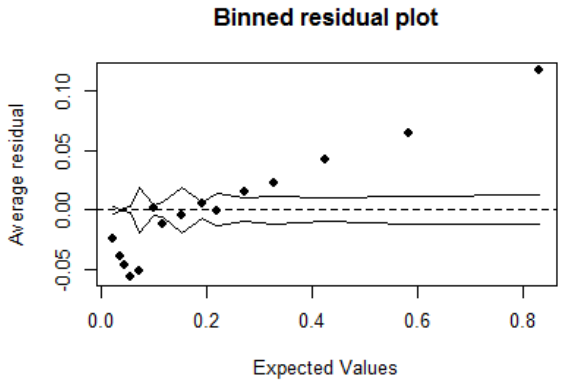


dotplot_carpo_2e_mod03_S1_njaptous

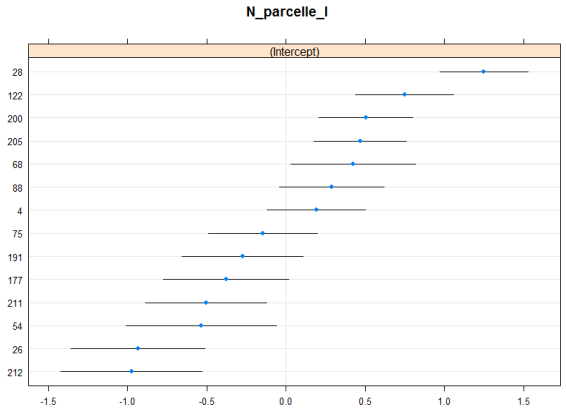


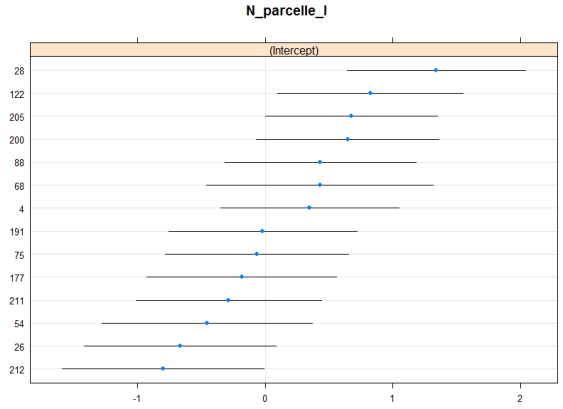
dotplot_carpo_2e_mod03_S1_njaptous_nobs





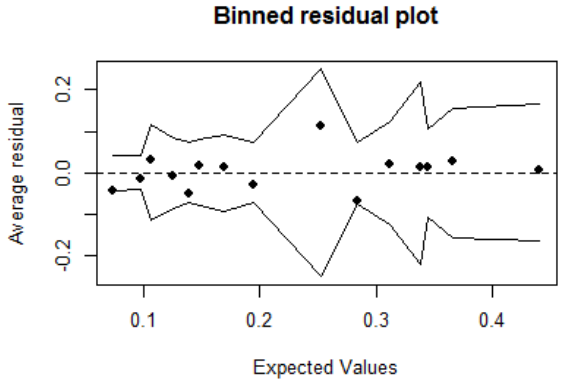
binnedplot_carpo_2e_mod04_S1_cumiftchimi

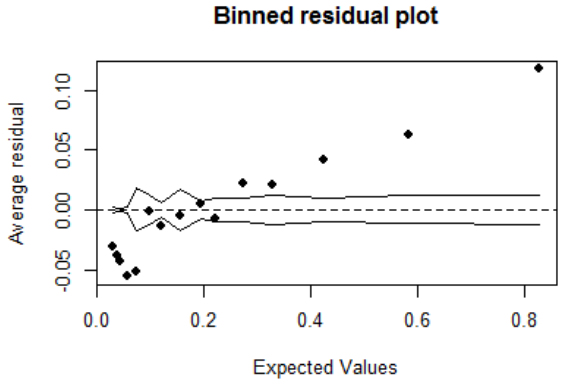




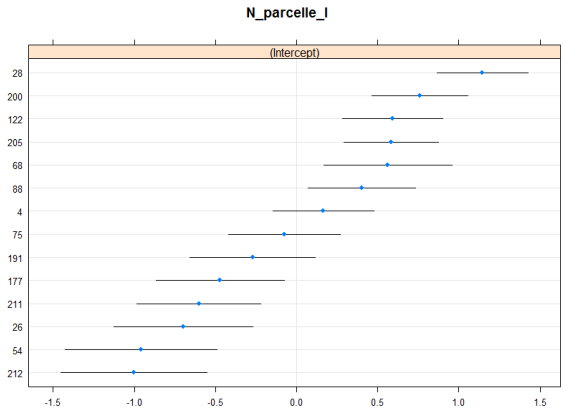
dotplot_carpo_2e_mod04_S1_cumiftchimi

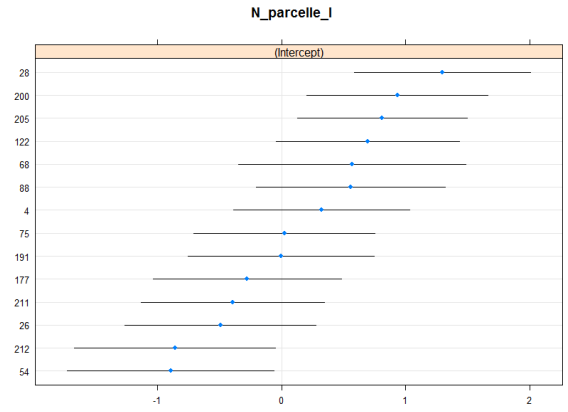
dotplot_carpo_2e_mod04_S1_cumiftchimi_nobs



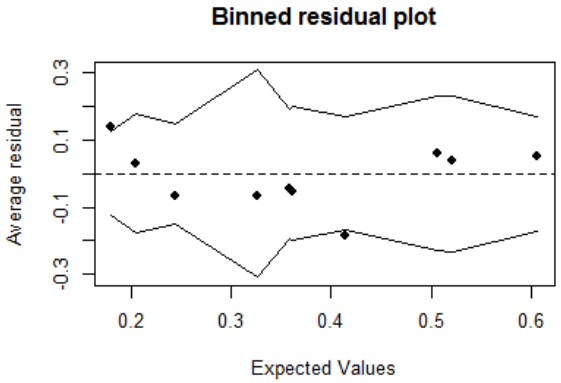


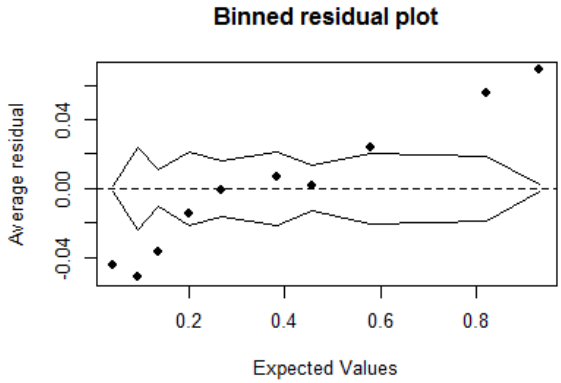
binnedplot_carpo_2e_mod05_S1_njrsapinac



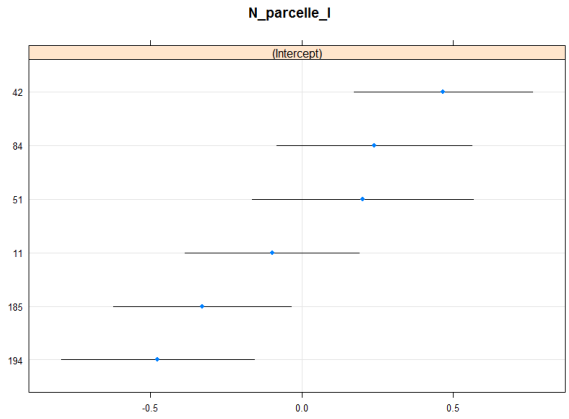


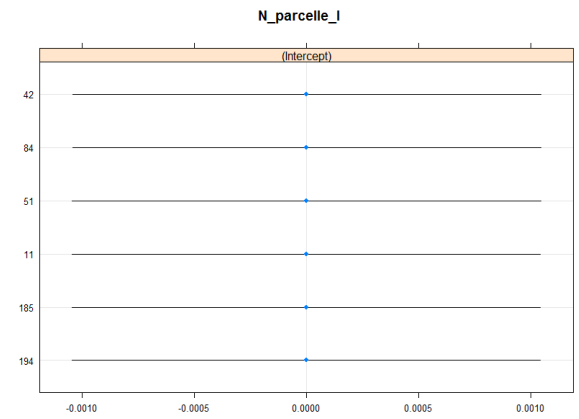
dotplot_carpo_2e_mod05_S1_njapinac dotplot_carpo_2e_mod05_S1_njapinac_nobs





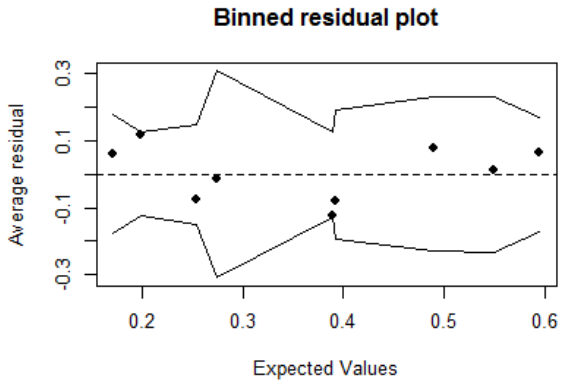
binnedplot_carpo_2e_mod06_S1_cumulifttotal_bio

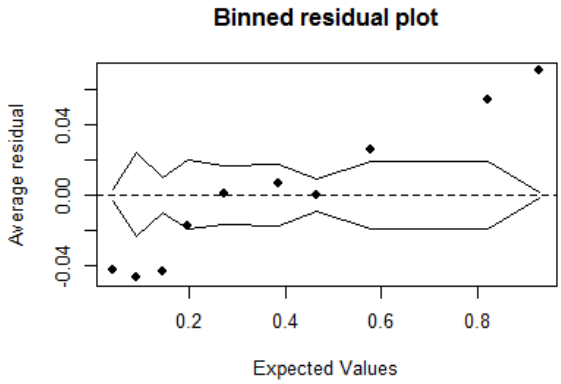




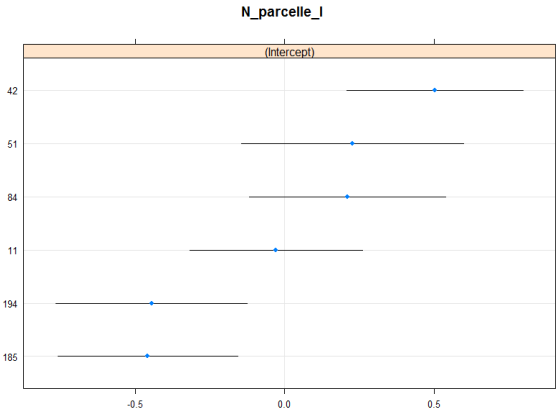
A gauche : dotplot_carpo_2e_mod06_S1_cumulifttotal_bio

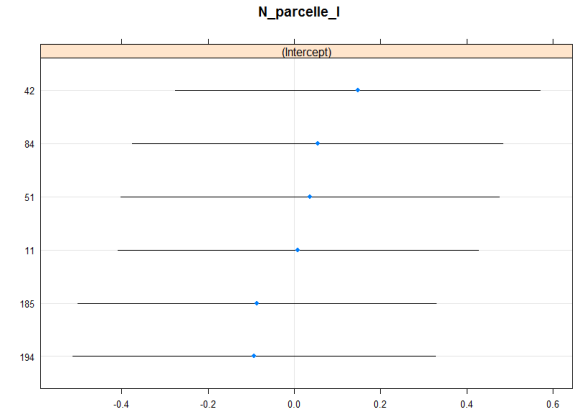
A droit : dotplot_carpo_2e_mod06_S1_cumulifttotal_bio_nobs





binnedplot_carpo_2e_mod07_S1_njaptous_bio

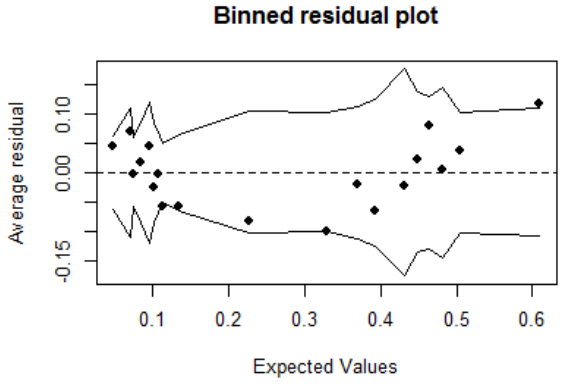


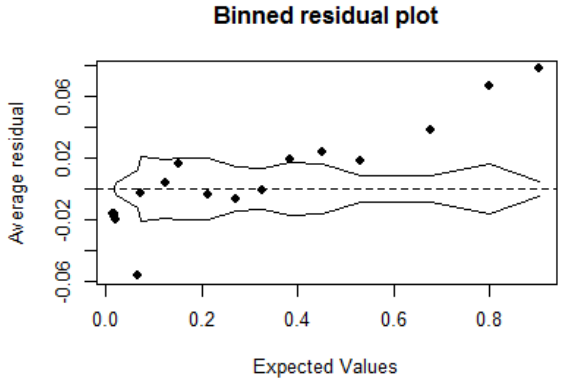


dotplot_carpo_2e_mod07_S1_njaptous_bio

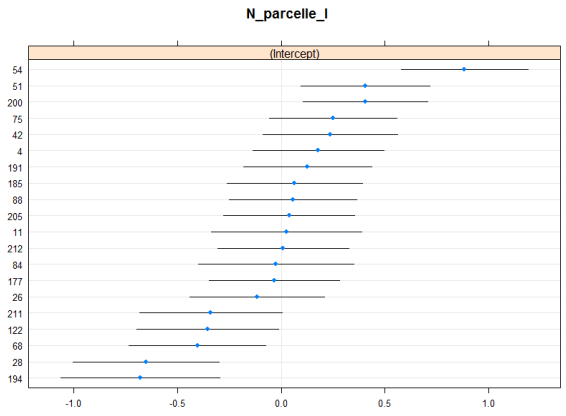
dotplot_carpo_2e_mod07_S1_njaptous_bio_nobs

Carpocapses session 2

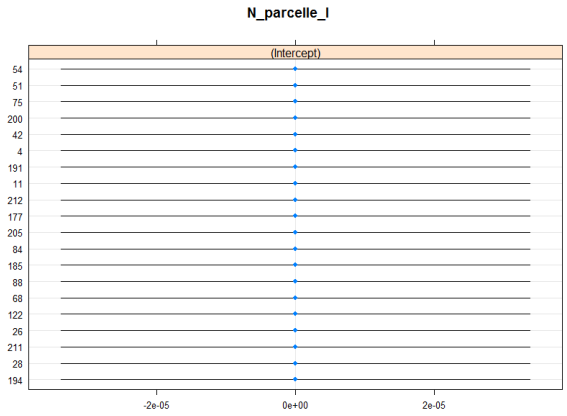




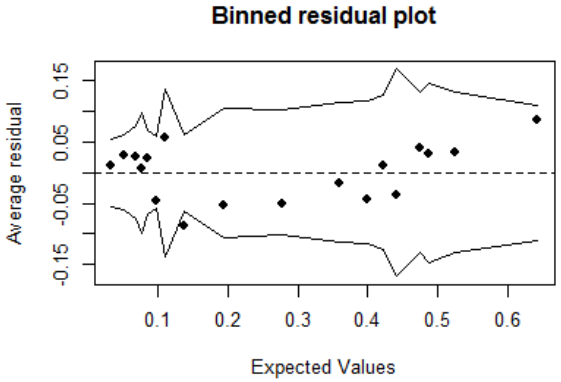
binnedplot_carpo_2e_mod01_S2_bio

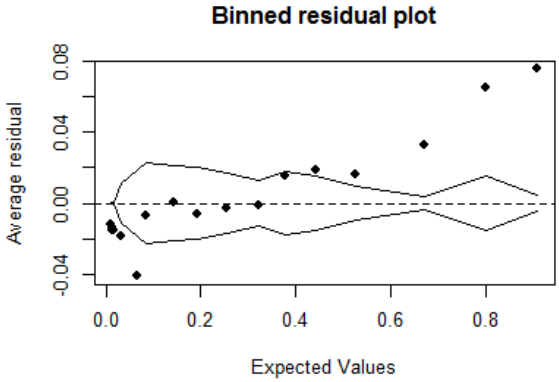


dotplot_carpo_2e_mod01_S2_bio

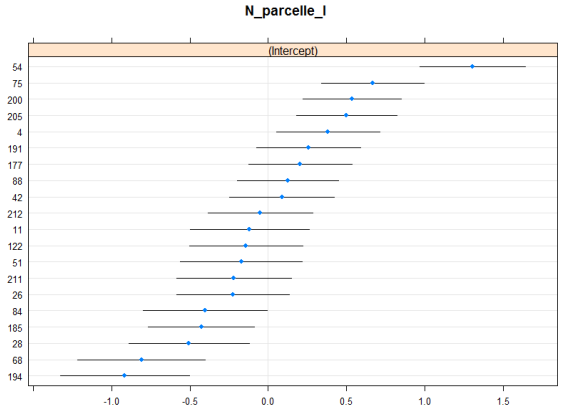


dotplot_carpo_2e_mod01_S2_bio_nobs

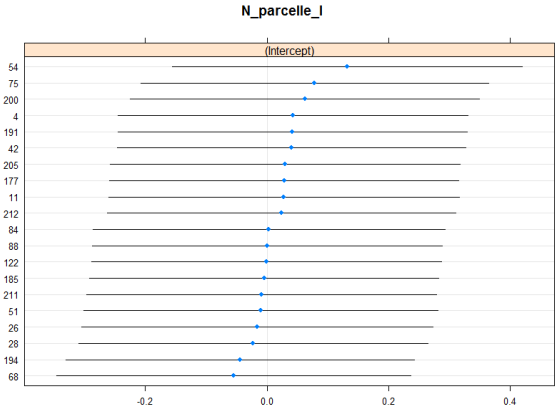




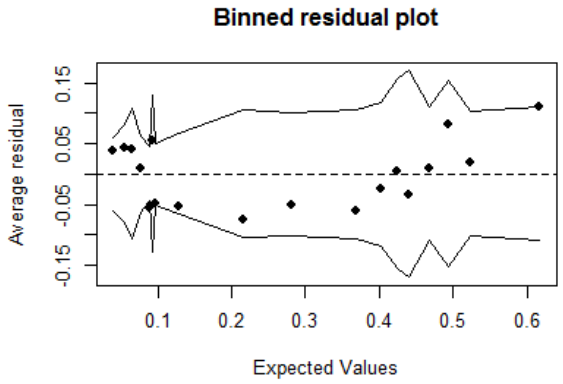
binnedplot_carpo_2e_mod02_S2_cumifttotal

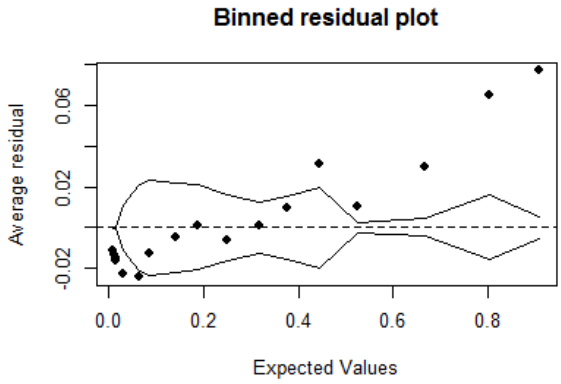


dotplot_carpo_2e_mod02_S2_cumifttotal

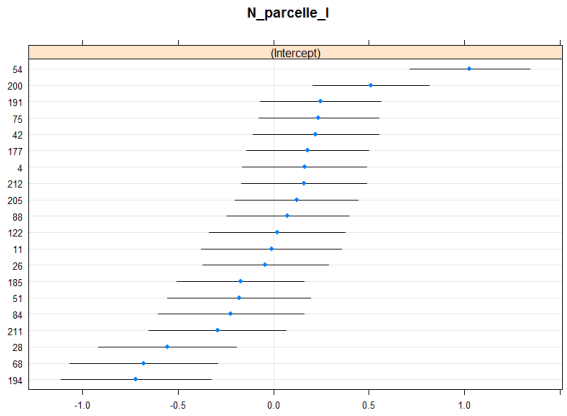


dotplot_carpo_2e_mod02_S2_cumifttotal_nobs

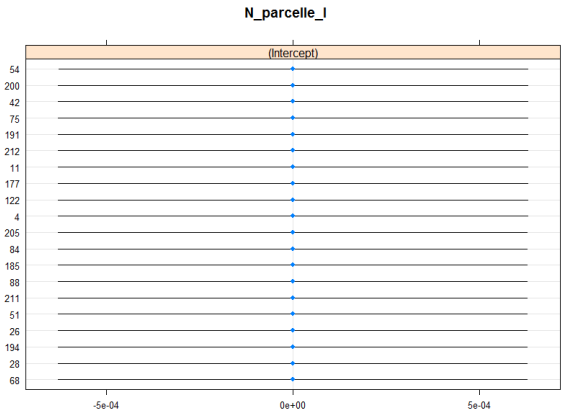




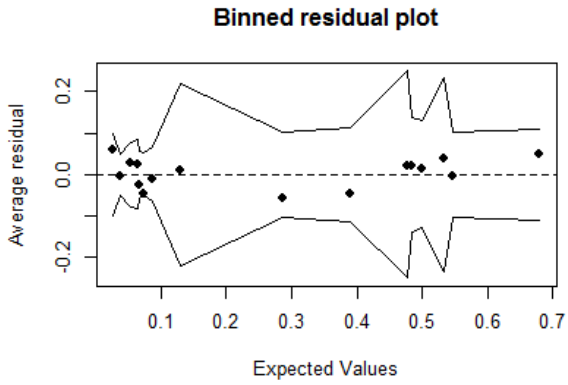
binnedplot_carpo_2e_mod03_S2_njaptous

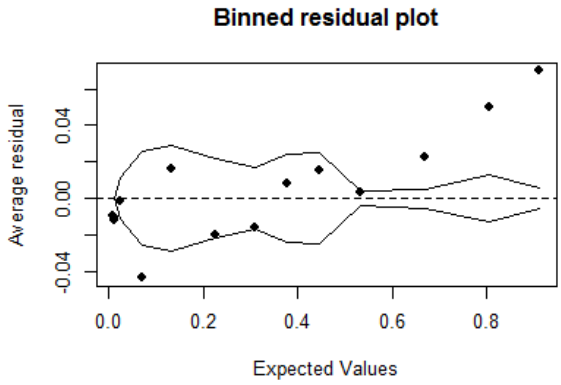


dotplot_carpo_2e_mod03_S2_njaptous

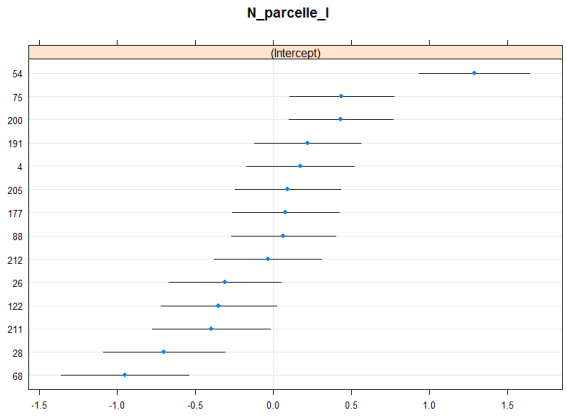


dotplot_carpo_2e_mod03_S2_njaptous_nobs

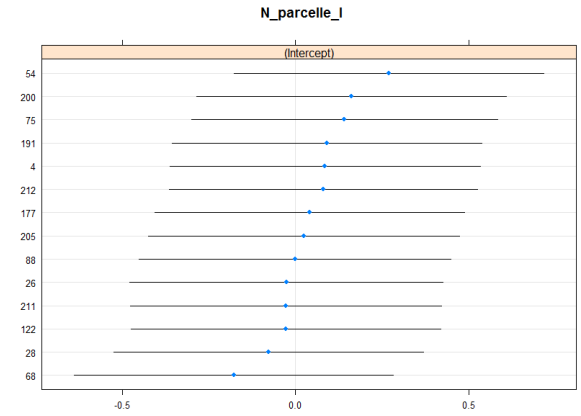




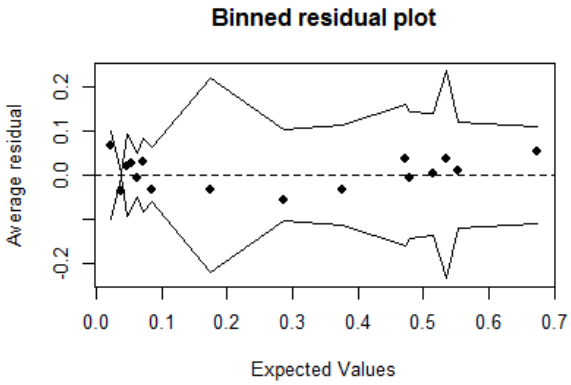
binnedplot_carpo_2e_mod04_S2_cumiftchimi

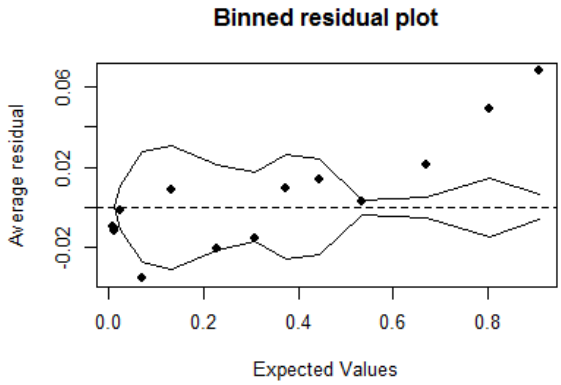


dotplot_carpo_2e_mod04_S2_cumiftchimi

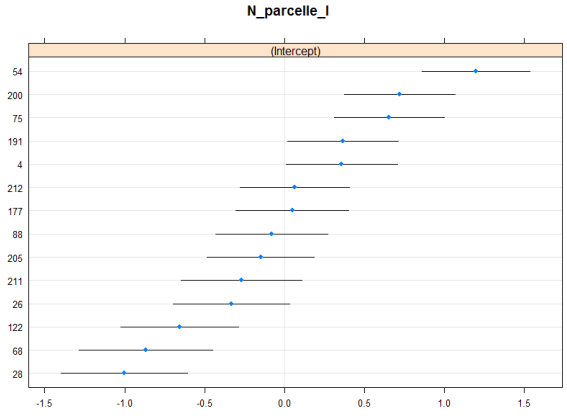


dotplot_carpo_2e_mod04_S2_cumiftchimi_nobs

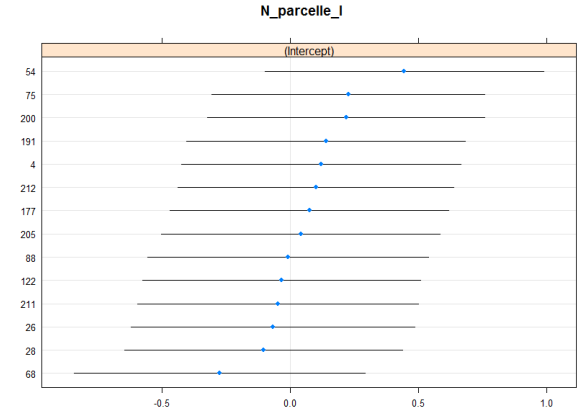




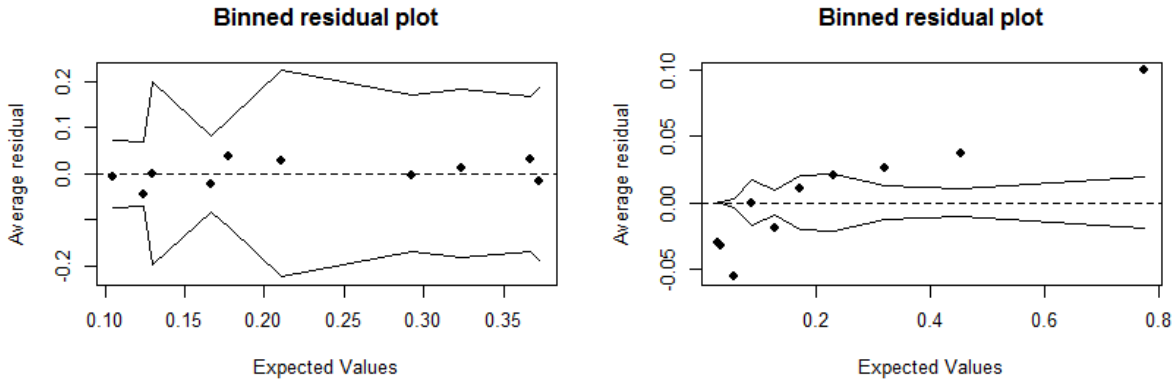
binnedplot_carpo_2e_mod05_S2_njrsapinac



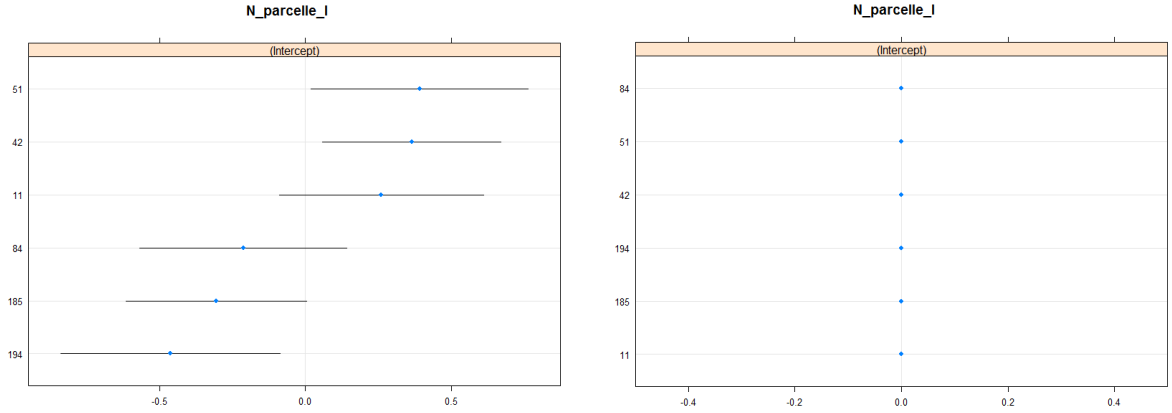
dotplot_carpo_2e_mod05_S2_njapinac



dotplot_carpo_2e_mod05_S2_njapinac_nobs

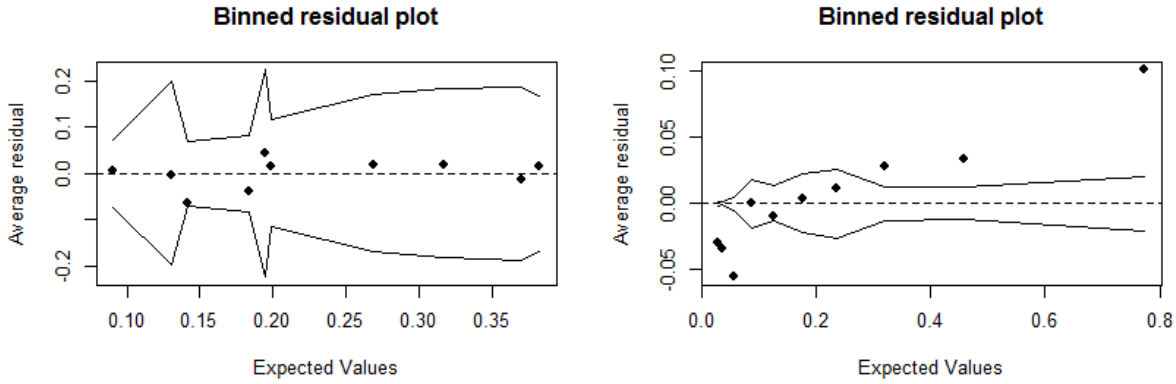


binnedplot_carpo_2e_mod06_S2_cumulifttotal_bio

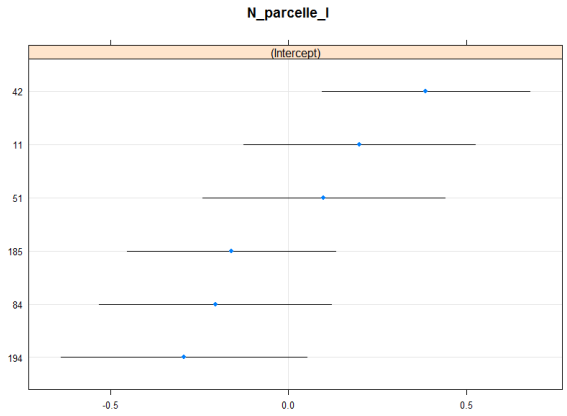


A gauche : dotplot_carpo_2e_mod06_S2_cumulifttotal_bio

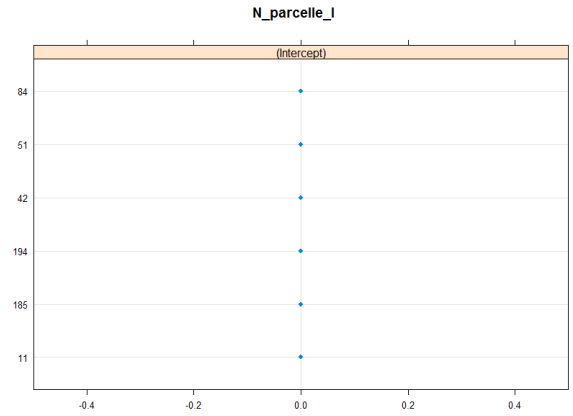
A droit : dotplot_carpo_2e_mod06_S2_cumulifttotal_bio_nobs



binnedplot_carpo_2e_mod07_S2_njaptous_bio



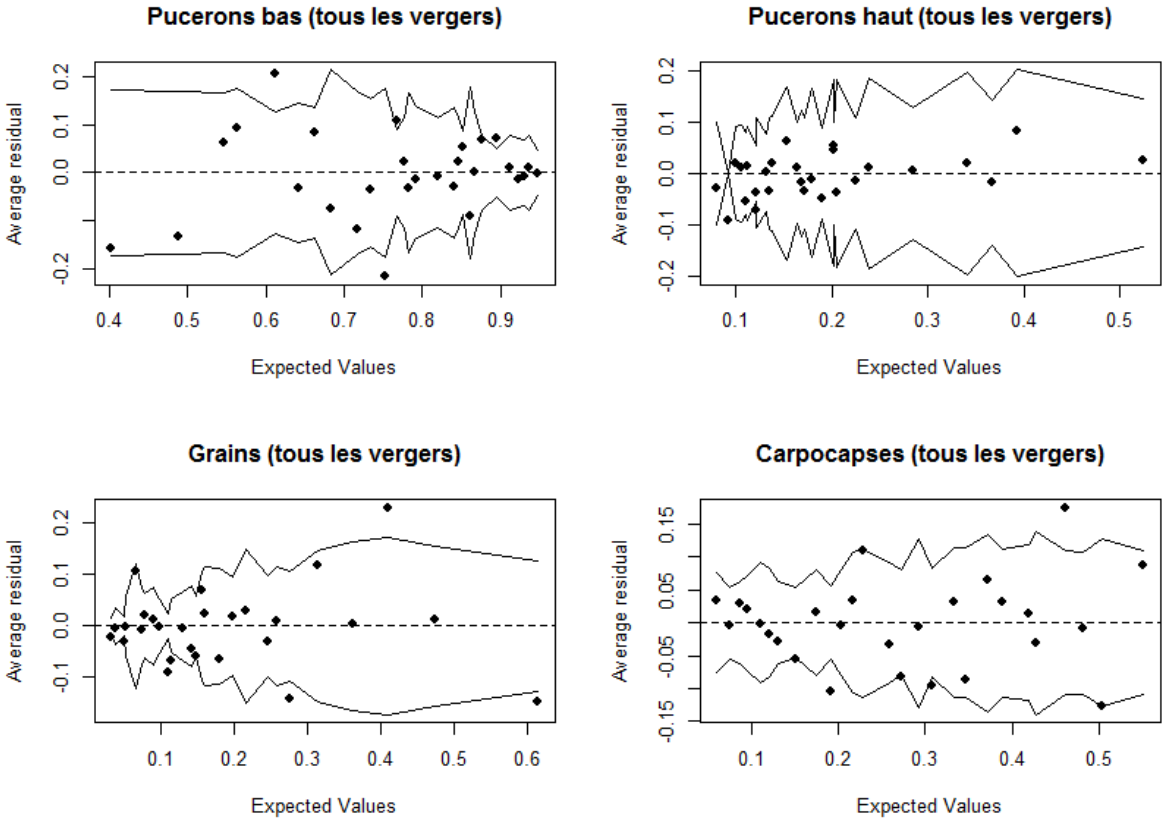
dotplot_carpo_2e_mod07_S2_njaptous_bio



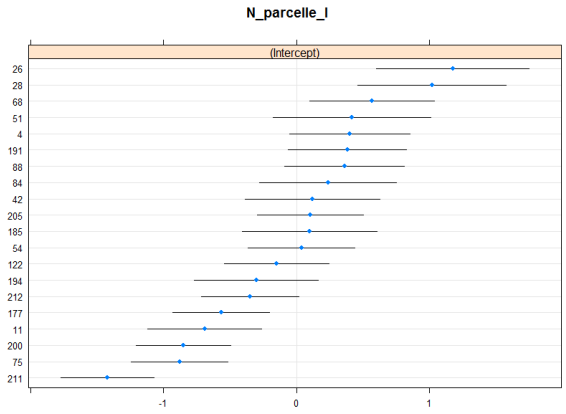
dotplot_carpo_2e_mod07_S2_njaptous_bio_nobs

Binned plots et dotplots pour les modèles tertiaires (avec les facteurs paysagers) :

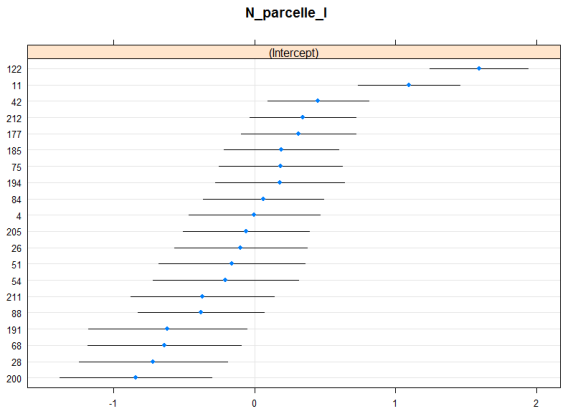
Pour tous les vergers, (S = 1 km^2), r = 560 m :



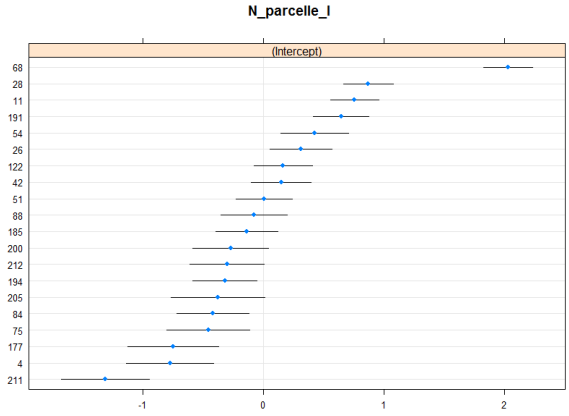
binnedplot_paysage_4proies_1ttlesvergers



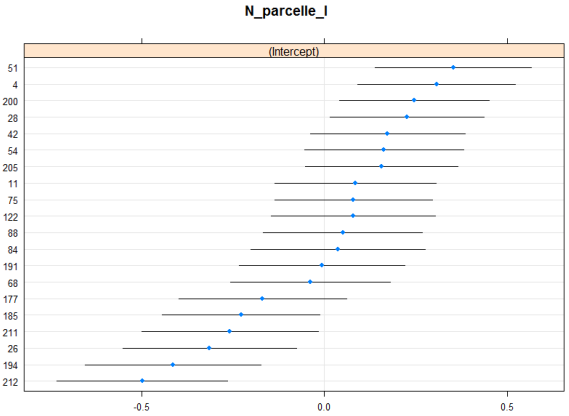
dotplot_p_b_paysage_ttlesvergers_acfspay



dotplot_p_h_paysage_ttlesvergers_acfspay

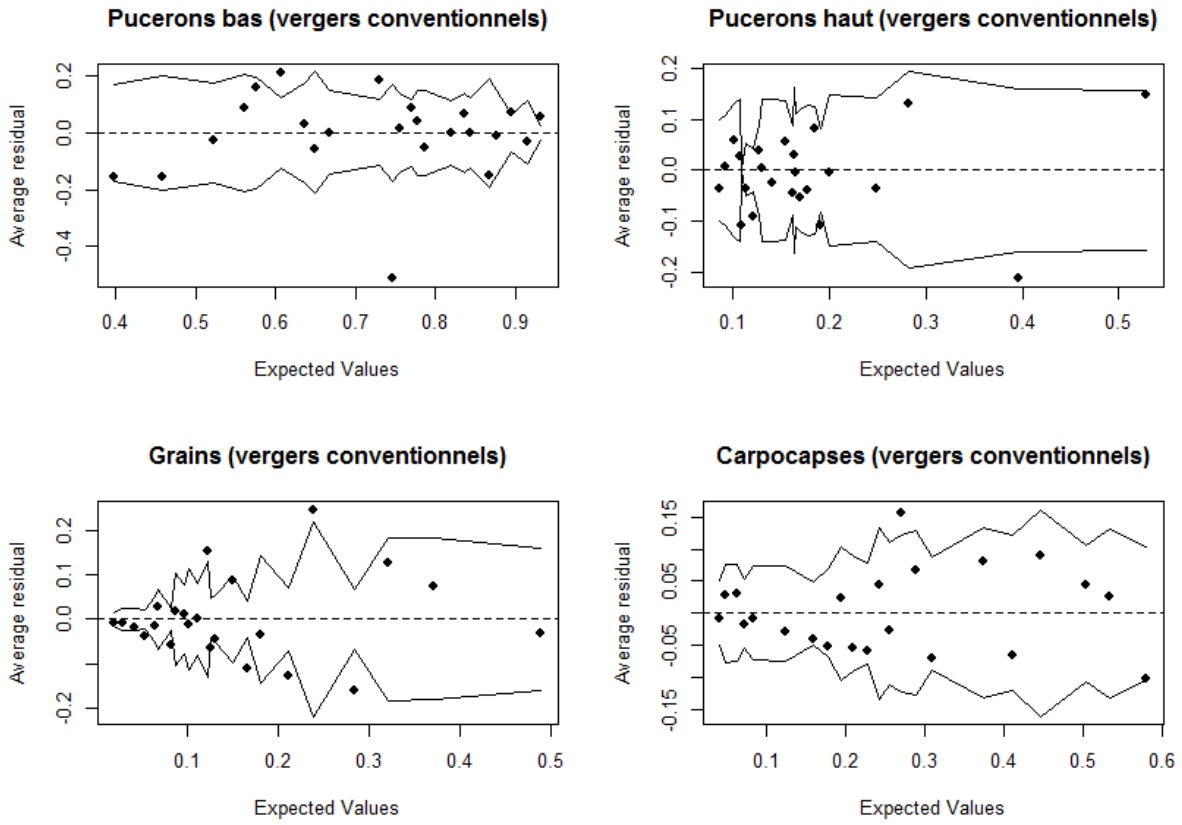


dotplot_gr_paysage_ttlesvergers_acfspay

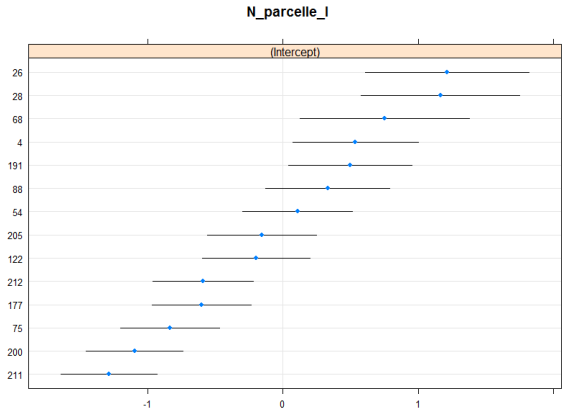


dotplot_carpo_paysage_ttlesvergers_acfspay

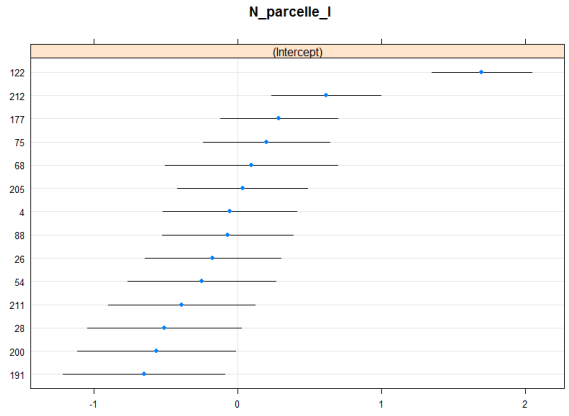
Pour les vergers conventionnels, (S = 1 km^2), r = 560 m, (1ère étape : sans facteurs paysagers) :



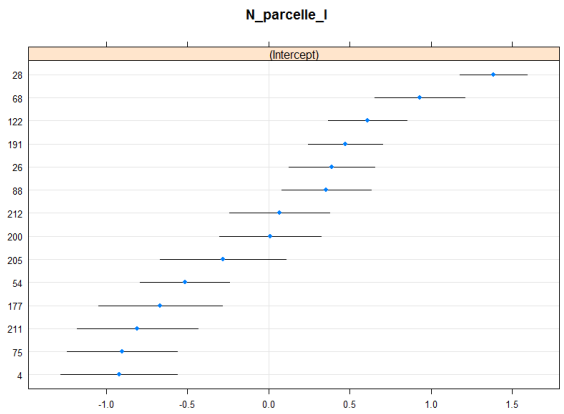
binnedplot_paysage_4proies_conv_1er_etape_ssfspay



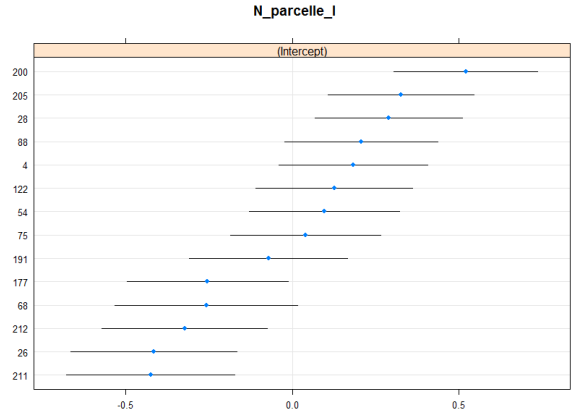
dotplot_paysage_p_b_conv_1er_etape_ssfspay



dotplot_paysage_p_h_conv_1er_etape_ssfspay

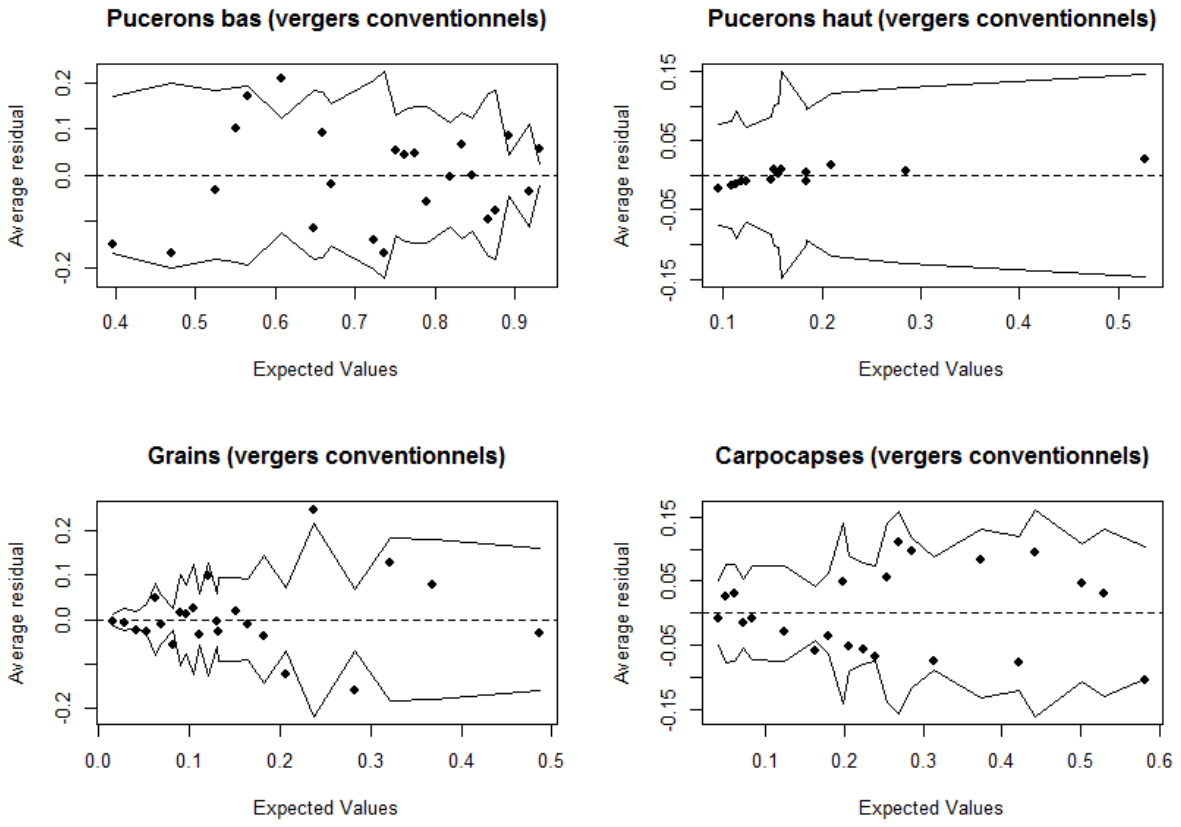


dotplot_paysage_gr_conv_1er_etape_ssfspay

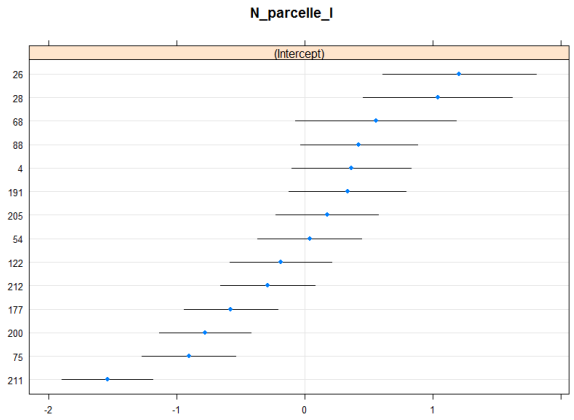


dotplot_paysage_carpo_conv_1er_etape_ssfspay

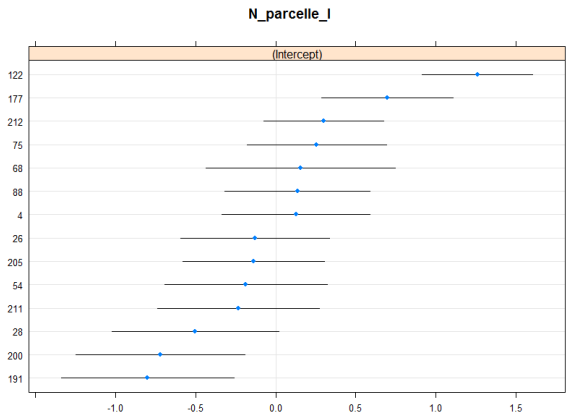
Pour les vergers conventionnels, (S = 1 km^2), r = 560 m, (2ème étape : avec facteurs paysagers) :



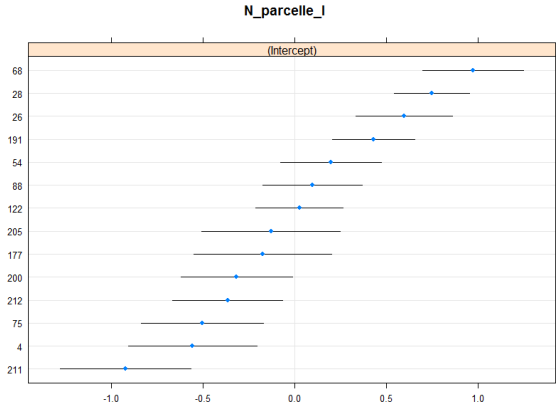
binnedplot_paysage_4proies_conv_2e_etape_acfspay



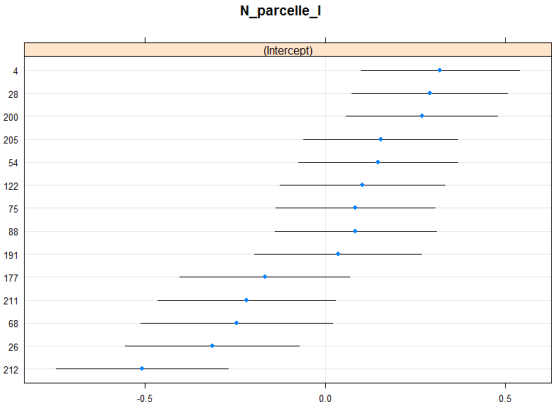
dotplot_paysage_p_b_conv_2e_etape_acfspay



dotplot_paysage_p_h_conv_2e_etape_acfspay

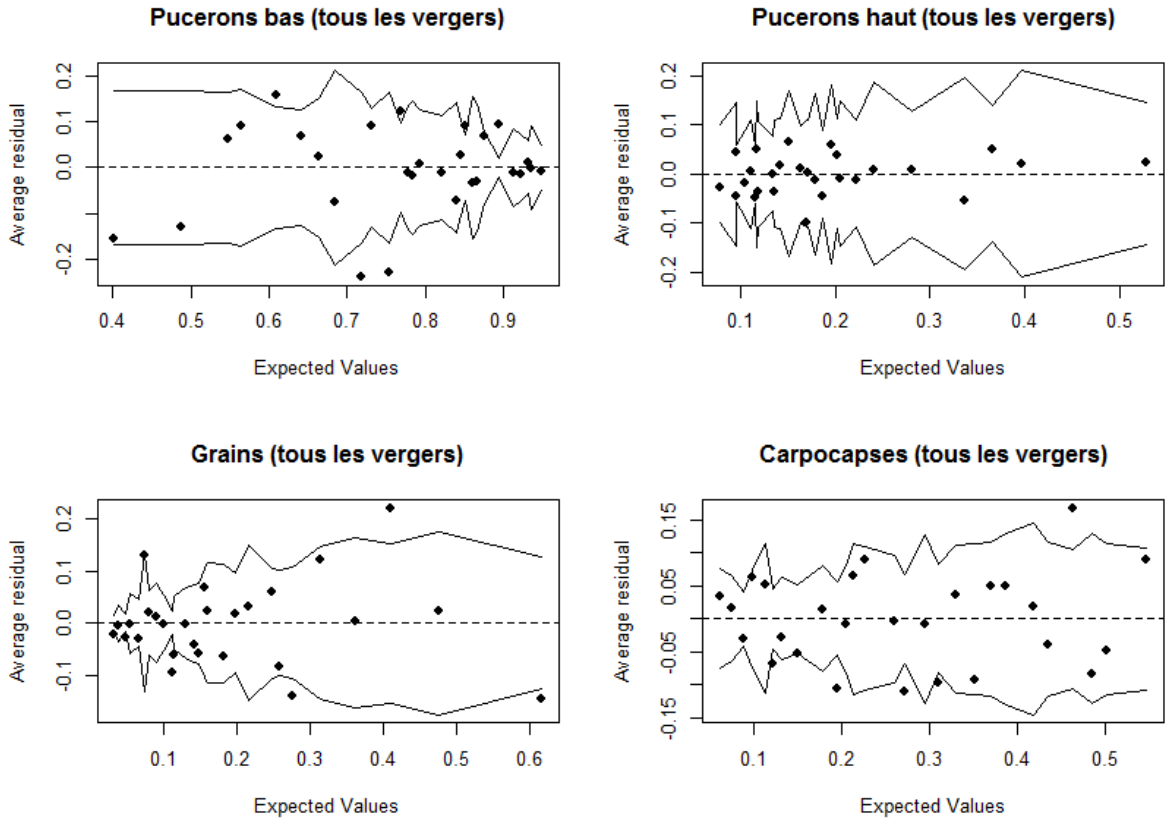


dotplot_paysage_gr_conv_2e_etape_acfspay

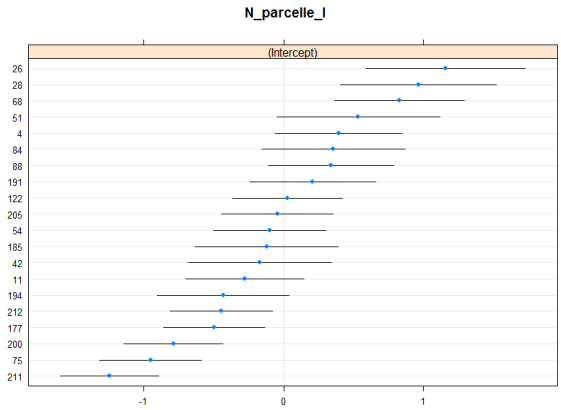


dotplot_paysage_carpo_conv_2e_etape_acfspay

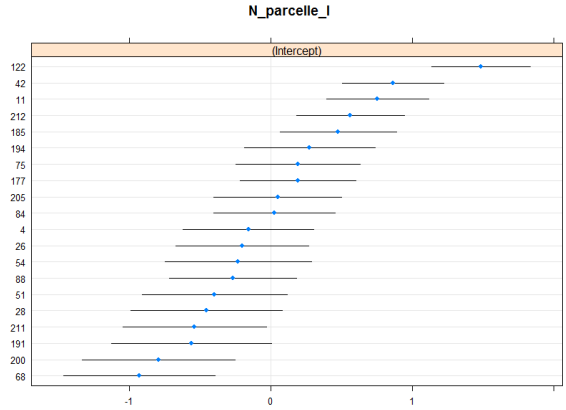
Pour tous les vergers, (S = 0,07 km^2), r = 150 m, (avec facteurs paysagers) :



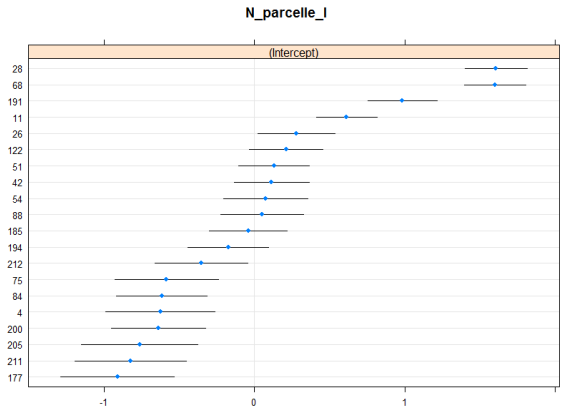
binnedplot_paysage_4proies_ttlesvergers_2e_etape_acfspay_150



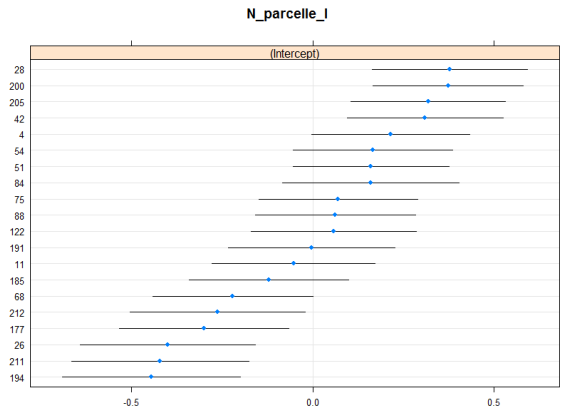
dotplot_paysage_p_b_ttlesvergers_150



dotplot_paysage_p_h_ttlesvergers_150

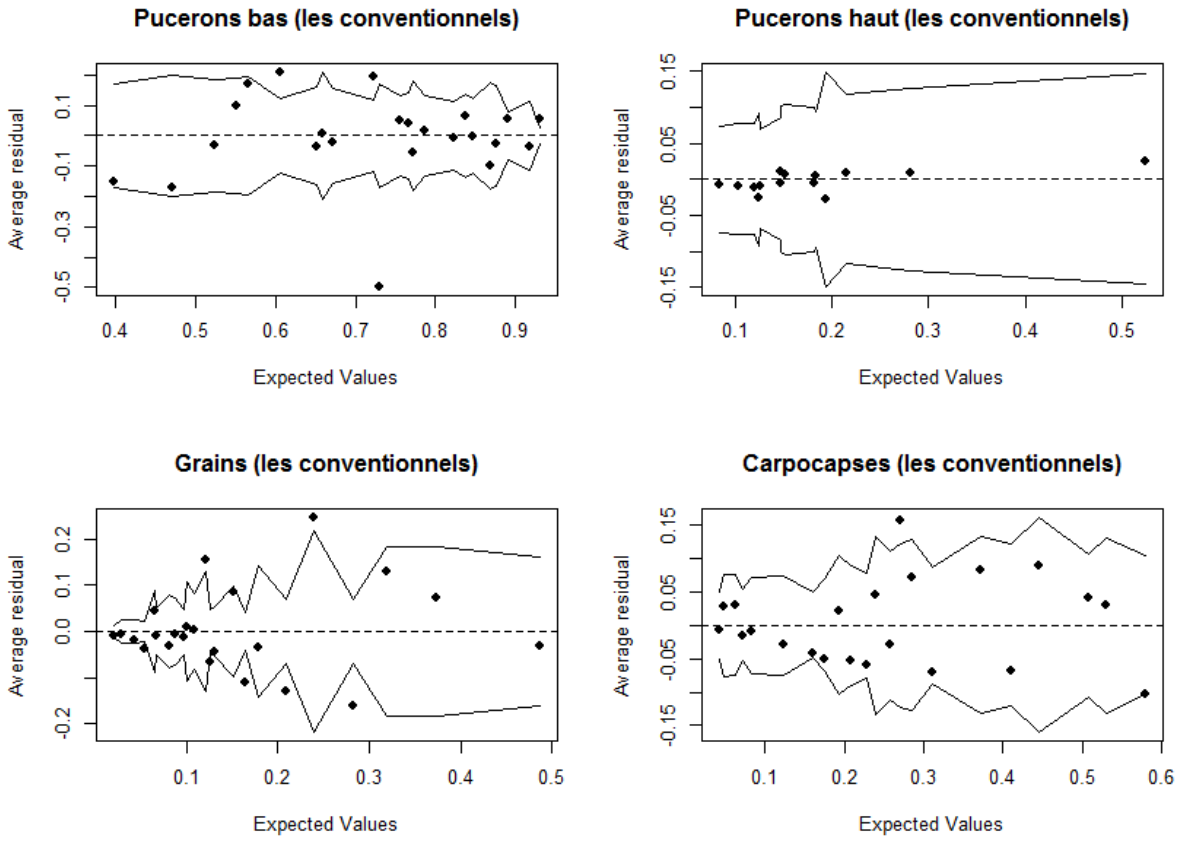


dotplot_paysage_gr_ttlesvergers_150

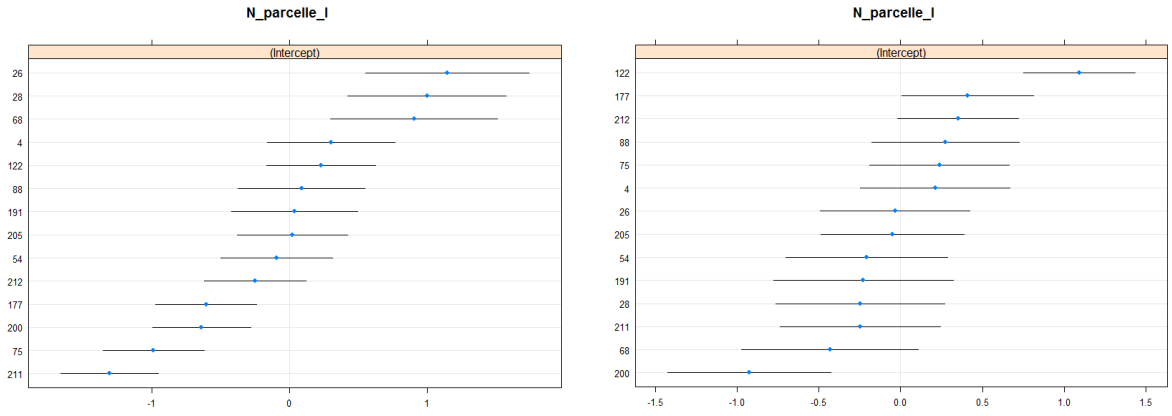


dotplot_paysage_carpo_ttlesvergers_150

Pour les vergers conventionnels, (S = 0,07 km^2), r = 150 m, (avec facteurs paysagers) :

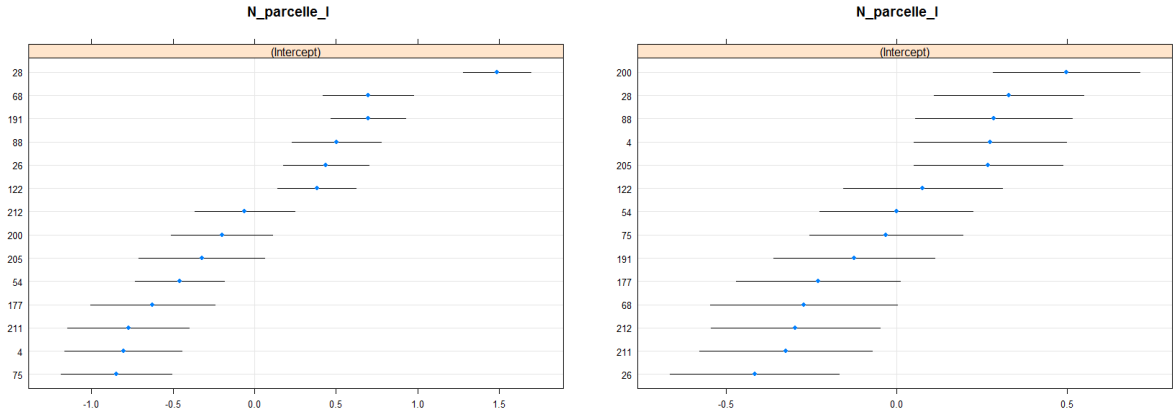


binnedplot_paysage_4proies_conv_2e_etape_acfspay_150b



A gauche : dotplot_paysage_p_b_conv_2e_etape_acfspay_150

A droit : dotplot_paysage_p_h_conv_2e_etape_acfspay_150



A gauche : dotplot_paysage_gr_conv_2e_etape_acfspay_150

A droit : dotplot_paysage_carpo_conv_2e_etape_acfspay_150