



**HAL**  
open science

# Influence de la pédologie et des pratiques agricoles sur les communautés de coléoptères carabidés et le biocontrôle de ravageurs et d'auxiliaires

Théo Gayrard

► **To cite this version:**

Théo Gayrard. Influence de la pédologie et des pratiques agricoles sur les communautés de coléoptères carabidés et le biocontrôle de ravageurs et d'auxiliaires. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-01961553

**HAL Id: dumas-01961553**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01961553>**

Submitted on 20 Dec 2018

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

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



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

AGROCAMPUS  
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2018 - 2019

Spécialité :

Génie de l'environnement

Spécialisation (et option éventuelle) :

Préservation et Aménagement des Milieux  
– Ecologie Quantitative

### Mémoire de Fin d'Études

d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

# Influence de la pédologie et des pratiques agricoles sur les communautés de coléoptères carabidés et le biocontrôle de ravageurs et d'auxiliaires.

Par : Théo GAYRARD



**Soutenu à Rennes le 20/09/2018**

#### **Devant le jury composé de :**

Président : Didier Le Cœur

Maîtres de stage : Manuel Plantegenest / Guénola Pères

Enseignant référent : Ivan Bernez

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Sylvie Guiet, Chambre d'agriculture Bretagne,  
chargée de mission agro-écologie.

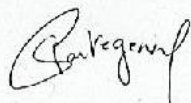
*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST*

## Confidentialité

Non  Oui si oui :  1 an  5 ans  10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible <sup>(1)</sup>.

Date et signature du maître de stage <sup>(2)</sup> : 16/10/2018



A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

## Droits d'auteur

L'auteur<sup>(3)</sup> Gayrard Théo

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui  Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif)  accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : 5/10 26/10/18

## Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui  Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant : 5/11/18





Dépôt numérique de mémoire

ATTESTATION DE CONFORMITE DE LA VERSION NUMERIQUE

Je, soussigné(e),

Nom : [..... *Gaynard* .....]

Prénom : ..... *Théo* .....

Ci-après désigné « l'Auteur »

Atteste que la version numérique de mon mémoire de fin d'études dans sa version définitive (incluant les corrections demandées par le jury de soutenance),

Intitulé :

..... *Influence de la pédologie et des pratiques agricoles sur les communautés de coléoptères carabidés et le biocontrôle de ravageurs et d'auxiliaires* .....

correspond à la version imprimée du document, déposé à la bibliothèque générale d'AGROCAMPUS OUEST (CFR de référence).

A... *Acigné* ..... le *26/10/18*

Signature

*Théo*

Dépôt numérique de mémoire

CONTRAT DE DIFFUSION NUMERIQUE DE MEMOIRE

Entre

AGROCAMPUS OUEST, Institut supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage dont le siège est basé 65 rue de Saint-Brieuc, 35042 RENNES, représenté par son Directeur Général, Grégoire THOMAS

et

L'auteur du mémoire : .....

Nom : ..... *Gaynard* .....

Prénom : ..... *Théo* .....

Adresse

personnelle ..... *6 avenue des marais 35690* .....

..... *Acigné* .....

Intitulé du mémoire :

..... *Influence de la pédologie et des pratiques agricoles sur les communautés de coléoptères carabidés et le biocontrôle de ravageurs et d'auxiliaires* .....



Ci-après désigné auteur,

Article 1

Le présent contrat ne concerne que les mémoires de fin d'études des cursus de formation d'AGROCAMPUS OUEST, déposés suite à la soutenance dans leur version validée par le jury. La diffusion de ces mémoires est conditionnée au visa du responsable de spécialisation/ option, garantissant la prise en compte de l'avis du jury.

Article 2

L'auteur autorise AGROCAMPUS OUEST à diffuser le mémoire sur le site Internet de l'établissement ou sur les plateformes choisies par AGROCAMPUS OUEST en conformité avec la fiche de diffusion correspondante. Le présent contrat a pour objet de permettre à AGROCAMPUS OUEST de diffuser le mémoire dans le respect des droits de propriété intellectuelle de son auteur.

Le présent contrat n'implique pas l'obligation pour AGROCAMPUS OUEST de faire usage de l'autorisation qui lui est donnée. La diffusion effective, tout comme son éventuelle suppression, n'implique en aucun cas une appréciation au bénéfice de l'auteur ou des tiers et n'est pas source de responsabilité à l'égard des tiers.

Article 3

L'auteur demeure responsable du contenu de son œuvre. L'auteur garantit à AGROCAMPUS OUEST qu'il détient tous les droits nécessaires à la diffusion de son œuvre, en particulier les autorisations écrites des titulaires des droits sur les œuvres reproduites, partiellement ou intégralement. En cas de non respect de cette clause, AGROCAMPUS OUEST se réserve le droit de refuser, suspendre ou arrêter la diffusion des parties du mémoire intégrant des documents ou parties de documents pour lesquels les droits de reproduction et de représentation n'auraient pas été acquis.

AGROCAMPUS OUEST ne pourra être tenu responsable de représentations illégales de documents, pour lesquels l'auteur n'aurait pas signalé qu'il n'en avait pas acquis les droits.

Article 4

L'auteur pourra à tout moment retirer l'autorisation de diffusion qu'il accorde par le présent contrat. Pour cela, il devra en aviser formellement AGROCAMPUS OUEST par lettre recommandée avec accusé de réception. AGROCAMPUS OUEST aura alors l'obligation de retirer l'œuvre lors de la plus prochaine actualisation du site de l'établissement et du portail documentaire.

Article 5

L'auteur autorise AGROCAMPUS OUEST à procéder, le cas échéant, au reformatage de son mémoire en vue de l'archivage, de la diffusion ou de la communication dans le respect des autorisations de diffusion définies par lui précédemment.

Article 6

Les autorisations de diffusion données à AGROCAMPUS OUEST n'ont aucun caractère exclusif et l'auteur conserve toutes les autres possibilités de diffusion de son mémoire.

Article 7

L'auteur autorise, à titre gracieux, la cession des droits de diffusion, concernant le mémoire qui lui appartient. Cette autorisation, dans la durée maximale définie par le droit patrimonial, est strictement réservée à la diffusion du mémoire à des fins pédagogiques et de recherche.

Fait à *Acigné*, le *26/10/18*.

Pour  
L'auteur,  
Pour Le Directeur Général

AGROCAMPUS

OUEST,





# Remerciements

---

Les remerciements. Voyons... Il y a énormément de personnes que j'aimerais remercier, de la plus impliquée à la moins concernée (oui, Othello, c'est à toi que je pense (c'est un chat, donc il ne peut pas lire, mais bon)), mais je me contenterais des humains qui m'ont soutenu ou aidés ces 6 derniers mois.

Il me semble de bon ton de remercier en premier mes deux maîtres de stage Manuel Plantegenest et Guénola Pérès, sans qui ce rapport n'aurait sans doute pas vu le jour, en tout cas pas sous cette forme. Vos remarques et encouragements m'ont notamment aidé à ne pas sombrer à la vue de la vacuité de certains résultats, que je ne remercie pas, eux, pour le coup.

Monica, tu es la prochaine sur ma liste. En tant que binôme, tu as été parfaite : disponible, agréable et toujours sympathique, même quand on a bien cru avoir perdu un GPS à 2000 euros. C'était sympa, ça. Mais je ne recommencerais pas tous les jours.

C'est ici que commence les grandes énumérations de noms, alors si vous ne connaissez personnes de l'unité ESP ou de l'UMR SAS, je vous conseille de zapper ce paragraphe. Ce sont deux équipes géniales (quand c'est vrai, il faut le dire) dans lesquelles on se sent tout de suite à l'aise. Bref, des gens bien. Plus particulièrement (là, c'est parti), merci beaucoup à Manu et Kévin, Marc, Yannick, Didier, Pascal et Cécile et Céline de SAS. Merci beaucoup aussi à Yann, Elsa, Ingrid, Michel, Luis, Julien, Estelle, Corentin, et à la Team Jussie Edition 2018 (un très bon cru !). D'ailleurs, on a toujours quelques monstres sur le feu !

Je voudrais aussi remercier mon tuteur Ivan Bernez et les profs (Jacques et Didier) qui, cette année, ont réussi à me faire voir le monde sous un prisme un petit peu différent que l'année précédente, ce que tout bon prof doit savoir faire mais ne sait pas toujours faire. Et tout ça dans la bonne humeur, en plus ! Tant qu'on y est, PAM-EQ 2017/2018 : Merci ! A seulement 10, je crois qu'on a tous passé l'un de nos meilleurs semestres d'enseignement ensemble. Vous avez tous été inspirants, intelligents, essentiels, spirituels, bizarres et hilarants. C'était bien. C'était très bien.

Je vais aussi remercier toutes les petites bêtes mortes en capture, observées, et manipulées sans cérémonie durant ce stage. Ce rapport est loin de rendre hommage à tous leurs rôles dans les agroécosystèmes, mais c'est déjà ça. Tous les insectes mourant par la main de l'homme n'ont pas forcément le droit à ça.

Je remercierai bien ma famille pour son soutien moral, mais c'est difficile quand, à chaque qu'on se voyait, vous me redemandiez sur quoi je travaillais ^^ . Plus sérieusement merci pour les bulles d'air frais le week-end, c'est primordial !

Bon, je crois que j'ai fait le tour... Je rigole, ma puce, bien sûr que tu es dans mes remerciements ! Je t'aurais bien cité en premier mais j'ai préféré garder la meilleure pour la fin. Ne t'inquiète pas, c'était la dernière fois qu'on passe 6 mois loin l'un de l'autre.



# Table des matières

---

Remerciements .....	5
Table des matières .....	6
Table des illustrations.....	7
<b>I - Introduction et contexte :</b> .....	<b>8</b>
A) Sols et services écosystémiques .....	8
B) Les carabes et le biocontrôle.....	9
C) Le projet SOILSERV .....	11
<b>II - Matériel et méthodes :</b> .....	<b>13</b>
A) Contexte et zone d'étude.....	13
B) Campagnes d'échantillonnage.....	13
a) <i>Pièges Barber</i> .....	14
b) <i>Tri manuel</i> .....	15
c) <i>Variables liées au sol</i> .....	15
d) <i>Comptage de pucerons</i> .....	15
C) Démarches statistiques.....	16
a) <i>Description du jeu de données</i> .....	16
b) <i>Impact des paramètres environnementaux sur les communautés carabiques</i> .....	17
c) <i>Analyse des interactions entre les carabes et les autres organismes étudiés</i> .....	18
<b>III - Résultats</b> .....	<b>20</b>
A) Description générale des données.....	20
.....	22
B) L'influence du sol et de la gestion agricole sur les communautés carabiques.....	22
C) Interactions entre carabes et ravageurs de cultures.....	27
D) Interactions entre carabes et auxiliaires de cultures .....	27
E) Géoréférencement des différents taxons et espèces .....	29
<b>IV - Discussion :</b> .....	<b>30</b>
A) Influence des variables pédologiques sur les communautés carabiques .....	30
B) Interactions entre carabes et ravageurs de cultures.....	33
C) Interactions entre carabes et auxiliaires de cultures .....	34
D) Remarques et perspectives pour le projet.....	35
<b>V - Conclusion :</b> .....	<b>37</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>38</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>42</b>



# Table des illustrations

---

Tableau 1 - Mesures effectuées aux différentes périodes .....	14
Tableau 2 - Variables environnementales explicatives utilisées .....	18
Tableau 3 - Intervalles entre observations utilisées pour le calcul des taux d'accroissement .....	19
Tableau 4 - Principales espèces de carabes collectées .....	21
Tableau 5 - Pourcentage de variables sélectionnées par différentes méthodes statistiques .....	22
Tableau 6 - Principaux effets environnementaux sur les abondances de carabes.....	26
Tableau 7 - Effet des abondances de coléoptères carabidés sur les populations de différents ravageurs ...	27
Tableau 8 - Effet des abondances de différents coléoptères carabidés sur les accroissements des abondances de vers de terre .....	29
Figure 1 - Occupation des sols (Hiver 2018) des parcelles étudiées .....	13
Figure 2 - Schématisation d'un piège Barber (SoilServ 2018) .....	14
Figure 3 - Photo d'un piège Barber installé (Mars 2018).....	14
Figure 4 - Photos des trois espèces de pucerons rencontrées en blé d'hiver.....	16
Figure 5 - Abondances moyennes de carabes aux différentes périodes.....	20
Figure 6 - Richesses spécifiques aux différentes périodes.....	20
Figure 7 - Photos des principales espèces collectées.....	21
Figure 8 - Moyennes de vers collectés selon la classe écologique ou le stade de développement .....	22
Figure 9 - Effet du labour sur l'activité-densité des carabes en Juin .....	23
Figure 10 - Effet de la biomasse microbienne sur l'activité-densité des carabes .....	23
Figure 11 - Effet de la rotation sur la richesse spécifique en Juin .....	24
Figure 12 - Principaux effets environnementaux sur les populations de carabes.....	32





# I - Introduction et contexte :

---

## A) Sols et services écosystémiques

La qualité des sols est en grande partie responsable du bon fonctionnement des écosystèmes (Walter et al. 2015). Ces sols sont en effet garants d'une bonne régulation des flux de matière organique et inorganique, notamment des cycles du carbone et de l'azote, mais participent en outre aux services d'approvisionnement (rendement des cultures, ...) et sont une réserve importante de biodiversité. De nombreux auxiliaires des cultures y effectuent tout ou partie de leur cycle. Ces services écosystémiques rendus par les sols, considérés comme des biens publics vitaux pour l'homme (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), sont au cœur de problématiques mondiales actuelles comme celle de la sécurité alimentaire. Celle-ci requière notamment que soit entretenue la fertilité des sols pour permettre une production de nourriture en quantité suffisante, lesquels sont également mis à contribution pour la production de textiles, d'énergie et de matières premières, dans un contexte de croissance de la population mondiale sans précédent. La notion de services écosystémiques, définis de manière anthropocentrique et utilitariste, permet une meilleure appréhension par le grand public et les décideurs de l'importance des processus naturels et de la nécessité de les conserver. Leur évaluation peut se faire par une approche monétaire ou par la mesure de paramètres biophysiques liés à ces services (Walter et al. 2015).

Ainsi, les sols jouent un rôle primordial dans la fourniture de services écosystémiques, notamment en termes d'approvisionnement, de support, de conservation de la biodiversité, de régulation (qualité de l'eau, transferts) et d'auto-entretien (préservation de la qualité des sols) (Adhikari et Hartemink, 2015). Leur position à l'interface entre différents compartiments (air/sol/eau) en fait les pivots de beaucoup de processus écologiques (Barrios, 2007). Une gestion durable des sols doit alors s'attacher à la conservation de tous ces services, et nécessite une bonne compréhension des interactions, positives ou négatives, entre ceux-ci (Groot et al., 2018). Lin et al., (2018) ont ainsi tenté d'estimer les antagonismes et les synergies entre différents services écosystémiques. Les services d'approvisionnement semblent ainsi opposés à beaucoup d'autres alors que les services de régulation, comme le contrôle biologique, sont généralement en synergie. Apprendre à gérer l'ensemble du bouquet de services écosystémiques peut aider à étudier ce réseau complexe (The QUINTESSSENCE Consortium, 2016) et, à terme, à augmenter la résilience des écosystèmes (Bennett et al., 2009).

Ainsi, l'adaptation de nos systèmes de production, aujourd'hui majoritairement basés sur l'utilisation d'intrants variés (fertilisants, carburants, produits phytopharmaceutiques, ...) nuisant autant aux caractéristiques biologiques que physiques du sol (Navntoft, 2006, Batàry et al., 2012), doit se faire dans cette perspective de gestion durable, basée sur la compréhension et le pilotage des réseaux écologiques (Mulder et al. 2017). La prédation naturelle fournit, par exemple, une alternative aux produits phytosanitaires visant à éliminer les ravageurs. Cette prédation est notamment réalisée par des organismes liés au sol comme les carabes.



## B) Les carabes et le biocontrôle

Les carabes constituent une famille de l'ordre des coléoptères (Coleoptera : Carabidae). Ils mesurent de 2 mm à plus de 2 cm et sont caractérisés notamment par, des antennes filiformes à 11 segments et la présence de 5 tarseaux aux pattes postérieures. Leur diversité spécifique (l'Office pour les insectes et leur environnement (OPIE) recense entre 900 et 1000 espèces de carabes en France) est associée à une diversité de régimes alimentaires (omnivore, carnivore spécialisé ou généraliste et phytophage). Ces régimes varient notamment en fonction de leur taille et font des carabes les prédateurs de beaucoup d'autres familles d'animaux et de végétaux. De plus, leur taxonomie relativement stable, leur richesse spécifique, leur distribution mondiale, leur caractère bioindicateur, leur bonne plasticité écologique (Raitif, 2015, Lövei et al. 1996) et la disponibilité d'une méthode d'échantillonnage relativement simple (pièges Barber), en font des candidats idéaux pour la recherche (Kotze et al. 2011).

La méthode Barber, décrite il y a plus de 80 ans, présente de nombreux avantages mais également certains inconvénients. Premièrement, c'est l'une des méthodes les plus simples et les moins coûteuses pour échantillonner les carabes. Les répétitions sont faciles à mettre en place (pièges éloignés de quelques mètres de distance). En revanche, les individus piégés sont presque exclusivement des adultes. La biologie et l'identification des larves de carabes sont aujourd'hui bien moins renseignées (Kotze et al. 2011). Ensuite, il s'agit d'une méthode destructive. Enfin, ces pièges ne mesurent pas la densité absolue de carabes, mais bien l'activité-densité. Ce type de piège a donc tendance à surreprésenter les espèces très mobiles (Raitif, 2015). Une espèce peu représentée dans les captures sera donc soit moins présente sur la zone, soit moins mobile dans le milieu.

Les carabes sont considérés comme des auxiliaires de cultures, contribuant au service de biocontrôle des ravageurs. Ainsi, selon diverses études, ils consomment des pucerons ainsi que des taupins et des limaces, mais aussi des vers de terre (Laroche, 1990). Le caractère omnivore de beaucoup d'espèces en fait des prédateurs généralistes, pouvant réaliser une prédation intra-gilde (Lang, 2002). L'étude de l'efficacité de ces prédateurs naturels en cultures céréalières a fait l'objet d'un travail conséquent. Beaucoup de paramètres (surface des parcelles, présence d'éléments semi-naturels, capacité de vol des individus (Schellhorn, 2014), couvert végétal, itinéraire technique ou encore humidité, ...) conditionnent l'efficacité des carabes en culture céréalière intensive avec des effets variables selon l'espèce (Holland et al., 1999).

Les études réalisées se sont attachées à mesurer leur répartition et leur efficacité de prédation sur les ravageurs. Bien que leurs mouvements soient difficiles à appréhender étant donnée la diversité de leurs modes de déplacements (Schellhorn et al., 2014, Kulkarni et al., 2017), et que certaines espèces semblent même ne pas changer de champ durant toute la saison (Holland et al. 2004), certains éléments de réponses ont été proposés. La densité du couvert végétal, l'humidité et le type de sol, responsables de microclimats au sol semblent être les facteurs les plus importants régissant la dispersion des carabes dans un champ de blé. (Doddall et al. 2016, Frank et Reichhart, 2004, Jarosik, 2000, Honek et al. 2003, Kotze et al. 2011, Warner et al. 2017, Joern et Laws, 2013, Holland et Luff, 2000, Decaëns, 1998).



La composition des communautés carabiques trouvées dans les parcelles varie également en fonction de paramètres de gestion des parcelles. Par exemple, le travail du sol remanie les communautés, généralement en faveur des plus petits carabes (Aviron et al. 2017, Bouthier et al. 2014, Duflot, 2014, Rabourdin et al., 2011). Même si la composition des communautés varie peu entre un champ blé en agriculture biologique et un champ de blé en conventionnelle, il y a plus d'individus dans les parcelles biologique (Kromp, 1989). Sans surprise, l'application de traitements phytosanitaires réduit la présence de plusieurs espèces de carabes (Navntoft, 2006). En revanche, elle semble en favoriser certaines autres, qui ne sont plus consommées par les premières après ces traitements (Geiger et al. 2010). La gestion du paysage est également importante, puisque la diversité des communautés trouvées dans les parcelles augmente avec la quantité de haies et d'éléments semi-naturels présents à proximité (Aviron et al., 2005, Alignier et al., 2014). L'abondance des prédateurs généralistes semble augmenter en présence de haies (Chaplin-Kramer et al., 2011). Ces éléments-semi naturels sont primordiaux pour le cycle de vie de nombreux carabidés car ils fournissent des sites d'hivernation ou de refuge (Al Hassan et al. 2013, Deconchat et al. 2015, Blitzer et al., 2012, Frank et Reichhart, 2004). En règle générale, la diversité des éléments du paysage détermine la diversité et l'abondance des ennemis naturels de ravageurs (Schellhorn et al., 2015, Duflot, 2014, Landis et al., 2000). La dynamique inter-parcellaire de ces coléoptères en contexte agricole a également pu être observée. Il semble que les cultures d'hiver, comme le blé, agissent comme des sources de carabes, alors les cultures d'été, comme le maïs, agissent comme des puits (Duflot, 2014).

Les carabes rendent un service de biocontrôle en culture céréalière dont l'efficacité est variable (Deconchat et al., 2015). L'efficacité de prédation sur les taupins, les limaces (Bohan et al., 2000, Oberholzer et Frank, 2003, Symondson, 1994), les pucerons (Collins et al., 2002, Lang, 2002) et les graines de mauvaises herbes (Bohan et al. 2011) varie, notamment selon la température ou la proximité de bois ou de haies (Schneider et al., 2013, Blitzer et al., 2012).

La prédation des pucerons par les carabes dépend notamment de la finesse du paysage (taille du plus petit élément du paysage, Al Hassan et al. 2013). Il apparaît également une préférence pour *Metopolophium dirhodum* sur les deux autres espèces de pucerons généralement présentes dans les cultures de blé (*Sitobion avenae* et *Rhopalosiphum padi*), lorsque les trois sont disponibles (Bilde et Toft, 1997, Winder et al., 2005). Thies et al. (2011), ont également démontré une synergie entre prédateurs vivant au sol et prédateurs vivant dans la végétation pour la consommation de pucerons.

De plus, Kamenova et al., en 2018, ont montré qu'il existait deux groupes trophiques parmi les carabes en culture de céréales, en fonction des réseaux alimentaires dans lesquels ils s'insèrent. On parle de « *green web* » pour le réseau alimentaire basé sur les producteurs primaires du milieu (la culture, en l'occurrence) et de « *brown web* » pour celui basé sur les débris organiques de la parcelle (Zou et al., 2016). Ces deux réseaux alimentaires sont donc liés par des effets *bottom-up* et *top-down*, les prédateurs de l'un réduisant les ressources de l'autre (moins de débris végétaux lors de la consommation de plantes en amont). Ainsi, certains carabes feraient partie de la « *brown web* » et d'autres de la « *green web* ».



Il est possible que les carabes généralistes produisent également des dis-services, par exemple par prédation d'autres auxiliaires des cultures, comme les vers de terre. En effet, les vers de terre ont un rôle primordial dans la dynamique de la matière organique, la circulation de l'eau et des nutriments par formation de tunnels et d'agrégats dans le sol (espèces architectes) (Barrios, 2007, Lavelle et al., 2006). Les vers de terre, dont la prédation, bien est avérée pour plusieurs espèces carabiques (Symondson, 2000), ne semble cependant pas constituer des proies préférentielles pour les espèces étudiées (Fawki et al., 2005, Juen et Traugott, 2007). De plus, ils consomment peu les vers les plus gros ou les plus enfouis, comme les anéciques, mais plutôt les épigés, en surface et plus petits, qui n'ont qu'un rôle mineur dans la production des services écosystémiques cités plus haut (King et al., 2010). En revanche, cette prédation peut compenser le manque de proies dans certaines parcelles, à diverses périodes de l'année, notamment en hiver (Lövei et al., 2005) et donc permettre d'accroître la fourniture du service de régulation des ravageurs.

### C) Le projet SOILSERV

SOILSERV est un projet principalement français, regroupant différentes unités de recherche de l'INRA : UMR SAS (Sol Agro et hydrosystème Spatialisation), UMR SMART (Structures et Marchés Agricoles, Ressources et Territoires) et UMR IGEPP (Institut de Génétique Environnement et Protection des Plantes), associant toutes trois l'INRA et Agrocampus Ouest à Rennes ainsi que l'US Infosol d'Orléans. Il se propose d'évaluer les services écosystémiques (et leurs *drivers*) rendus par les sols et la macrofaune qu'ils hébergent à différentes échelles (parcelle, exploitation, paysage) dans les agroécosystèmes. Il vise également à analyser leur prise en compte dans les décisions prises par les gestionnaires des territoires et les agriculteurs.

Ainsi, SOILSERV est un projet interdisciplinaire (hydrologie, sciences du sol, écologie, économie, ...) articulé autour de trois axes de recherche :

- L'évaluation biophysique des Services Ecosystémiques des Sols (SES) à différentes échelles spatiales, à l'aide de descripteurs issus de mesures ou d'indicateurs plus accessibles.
- La prédiction, à ces échelles spatiales, des propriétés du sol.
- L'intégration des SES dans les chaînes de décisions, d'une part dans les modèles de gestion des exploitations agricoles et, d'autre part, dans les stratégies de développement du territoire.

Plus spécifiquement, le rôle de l'INRA IGEPP au sein de ce projet est d'étudier les services et dis-services écosystémiques apportés par la macrofaune du sol, notamment le biocontrôle apporté par les carabes sur divers ravageurs et auxiliaires de cultures, comme les taupins, les limaces, les pucerons et les vers de terre. Ce projet offre ainsi la possibilité de croiser des données pédologiques, tant physiques que biologiques, et des données écologiques sur la présence de différentes guildes (prédateurs, ravageurs). Ainsi, SOILSERV se propose





d'analyser les interactions entre différents composants de la macrofaune du sol, auparavant peu étudiées, comme celle entre carabidés et vers de terre, par exemple.

Un autre aspect du travail consiste à établir un géoréférencement de la présence des différentes espèces de carabes sur la zone d'étude. En effet, cette année à été conduite la première campagne de terrain pour ce projet. Cette base de données sur la présence de carabidés pourra, dans les années à venir, servir à cibler telles ou telles parcelles pour les étudier plus spécifiquement.

Ainsi, mon travail dans ce projet consistait à répondre à deux questions de recherche :

- (1) Quels paramètres environnementaux (liés au sol et à la gestion des cultures) influencent l'activité-densité des carabes à différentes périodes de l'année ?
- (2) Quelles interactions les carabes entretiennent-ils avec d'autres organismes, ravageurs comme les taupins ou les pucerons, ou auxiliaires de culture comme les vers de terre ? Quelles sont les conséquences de ces interactions sur les services écosystémiques ?

Plusieurs hypothèses de travail ont été proposées. La première est que les carabes sont influencés par certains paramètres biophysiques du sol (densité apparente, rotation des culture, ...) ainsi que par la gestion des parcelles (labour, rotations, ...). Plus spécifiquement, nous supposons que certains facteurs comme la quantité d'éléments grossiers, le pH ou la biomasse microbienne ont un impact sur l'abondance et la composition de ces communautés.

Une autre hypothèse est qu'en culture céréalière intensive, les carabes consomment à la fois des ravageurs, mais aussi des auxiliaires de cultures, comme les vers de terre et peuvent donc impacter négativement les services écosystémiques auxquels ces-derniers participent.

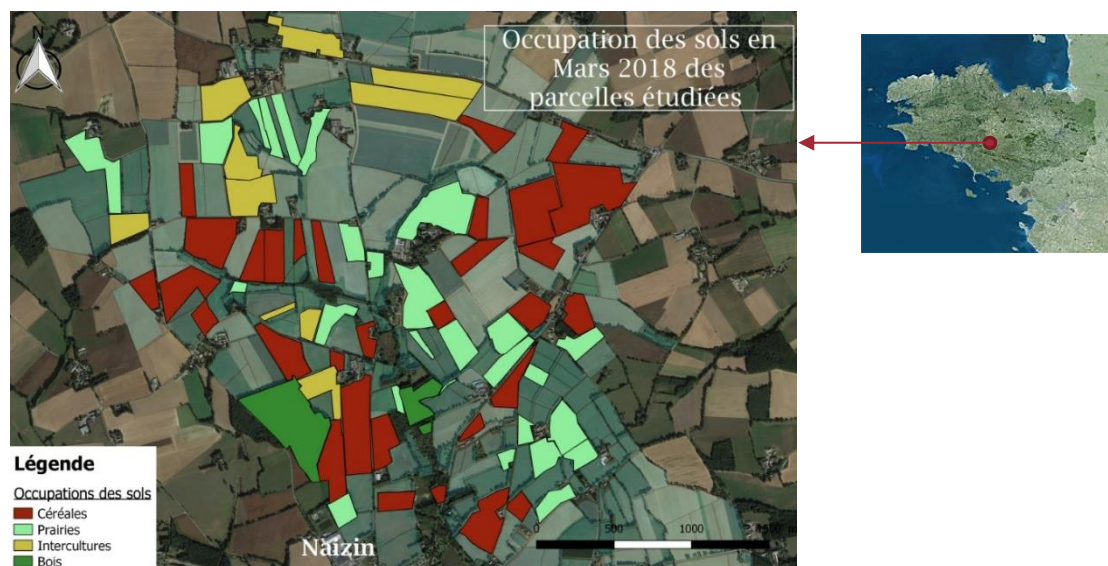
Afin de répondre à ces deux questions, un dispositif de surveillance a été mis en place entre Mars et Juin 2018 sur plus de 70 parcelles situées sur le territoire de Naizin, commune du Morbihan. Après avoir recueilli des individus par piégeage Barber et tri manuel d'échantillons de sol et les avoir identifiés, des analyses statistiques par des modèles linéaires furent effectuées. Dans un premier temps, nous détaillerons les méthodes utilisées ainsi que la zone d'étude, puis nous nous intéresserons aux résultats tirés des différentes campagnes de terrain effectuées de Mars à Juin. Enfin, nous discuterons les résultats obtenus.



## II - Matériel et méthodes :

### A) Contexte et zone d'étude

La zone d'étude du projet SoilServ se situe dans le département du Morbihan sur la commune de Naizin. Ce département fournit à lui seul 36 % de la production agricole de Bretagne, première région agricole de France. Même si l'activité agricole du département est majoritairement tournée vers l'élevage laitier, porcin ou de volailles (70 % de la production totale du département), les cultures céréalières s'étendent sur 37 % de la SAU, soit plus de 136 000 ha (AGRESTE, 2015), tandis que les prairies occupent environ 43 % de la SAU (160 000 ha environ). Le paysage de la zone d'étude représente bien ces proportions, étant principalement composé de prairies et de cultures de blé tendre d'hiver et de maïs. La zone d'étude s'étend sur environ 438 hectares. La majorité des exploitations sont de type polyculture-élevage intensif, l'élevage étant soit laitier, soit porcin. Les exploitations en agriculture biologique sont également présentes et certaines des parcelles qui ont accueilli cette étude sont conduites suivant ce mode d'exploitation.



### B) Campagnes d'échantillonnage

Trois campagnes d'échantillonnage ont été menées au cours de cette étude. La première fut réalisée en Mars 2018, en 93 points répartis sur 74 parcelles d'occupations du sol variées (prairies, céréales, intercultures et bois notamment). Les deux autres, mi-mai et mi-juin 2018, en 29 points répartis sur 24 parcelles différentes, toutes en céréales d'hiver (essentiellement blé, hormis une parcelle en orge et une en méteil biologique). Notre choix s'est porté sur le blé car les pucerons des céréales sont un des ravageurs modèles du projet.

Les trois campagnes différaient dans leurs objectifs et par les mesures réalisées. Des pièges Barber ont été déposés durant chaque campagne, mais le comptage des pucerons ne fut



effectué qu'en Juin. En parallèle, des prélèvements de sol (en Mars), ainsi que du tri manuel de vers de terre (en Mars et en Mai) ont été effectuées. La date du premier relevé (très précoce pour les carabes) a été décidée car plus favorable à la capture des vers de terre. Une mesure de vitesse d'infiltration fut également mesurée en Mai. Le tableau suivant (n°1) récapitule les différents relevés effectués.

Période	Mesures	Répétitions
<b>Mars 2018</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Description du profil de sol</li> <li>- Biomasse microbienne</li> <li>- Teneur en carbone organique</li> <li>- Densité apparente</li> <li>- Tri manuel des vers de terre</li> <li>- <b>Pose de pièges Barber</b></li> </ul>	93 points
<b>Mai 2018</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Infiltration</li> <li>- Tri manuel des vers de terre</li> <li>- <b>Pose de pièges Barber</b></li> </ul>	29 points
<b>Juin 2018</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comptage des pucerons (2 fois)</li> <li>- <b>Pose de pièges Barber</b></li> </ul>	29 points

Tableau 1- Mesures effectuées aux différentes périodes

### a) Pièges Barber

La capture des carabes a été réalisée par la pose de pièges Barber (schéma en figure n°2, ci-contre), de 500 mL (10 centimètres de diamètre), entourés par un tube en PVC pour prévenir l'effondrement de terre dans le piège (French et al., 2001) et munis d'entonnoir pour maximiser la capture et éviter la capture de petits

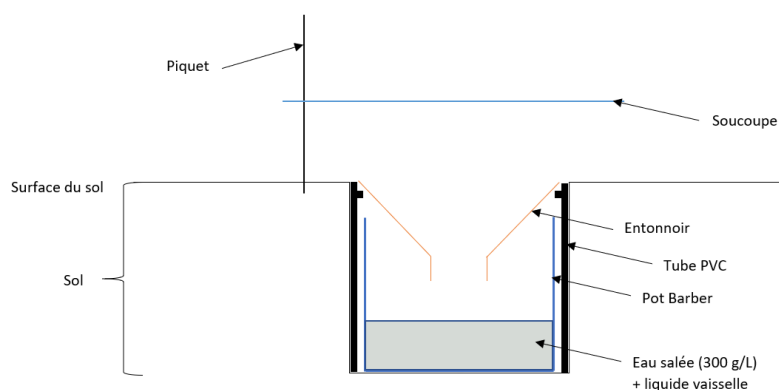


Figure 2 - Schématisation d'un piège Barber (SoilServ 2018)



Figure 3 - Photo d'un piège Barber installé (Mars 2018)

vertébrés (Lange et al., 2011). Ces pièges étaient également surmontés d'une soucoupe pour éviter l'infiltration d'eau de pluie dans les pots Barber. Une solution d'eau salée savonneuse (300 g/L de sel) était versée dans le piège pour éviter la sortie d'individus et garantir leur bonne conservation pendant la période d'échantillonnage (7 jours). Le liquide doit être inodore pour éviter l'attraction ou la répulsion d'espèces de carabes particulières. Deux pièges étaient posés en chaque point.

Les carabes récoltés dans les pièges ont ensuite été déterminés à l'espèce à l'aide de la clé de détermination CarabiSAD (Roger et al., 2013). Cette clé inclut un nombre important d'espèces (165 environ), dont les plus fréquentes en milieu agricole en France.



Les espèces de carabes capturées ont ensuite été caractérisés selon deux traits : leur taille et leur régime alimentaire. Les différentes espèces ont été placées dans quatre catégories de taille (T1 : <5mm ; T2 : 5-10mm ; T3 : 10-15mm ; T4 : >15mm) selon la taille moyenne des adultes, d'après la littérature. De même, quatre modalités de régimes alimentaires ont été utilisées : Spécialistes collembophages, Carnivores généralistes, Phytophages et Omnivores (Schirmel et al. 2012). Le mode de locomotion, de reproduction et l'habitat préférentiel ont aussi été renseignés (Annexe n°1) (Deraison, 2010, Marie, 2012).

Beaucoup d'autres invertébrés furent récoltés dans les pots Barber, notamment des araignées, des collemboles, des staphylins ou des diptères et hyménoptères. Ceux-ci n'ont été identifiés qu'à l'ordre, faute de temps et de compétences pour aller à l'espèce ou au genre. Toutefois, une tentative d'identification des staphylins fut effectuée à l'aide de clés britanniques (Lott et Anderson, 2011), mais l'identification, même au genre était très incertaine et ces données n'ont donc pas été retenues dans cette étude.

### *b) Tri manuel*

Les vers de terre et les larves de taupins ont été collectés par tri manuel de blocs de terre de 25\*25 cm<sup>2</sup> sur 30 cm de profondeur. La température du sol à 15cm de profondeur a également été mesurée. Une solution diluée d'AITC (isothiocyanate d'allyl, molécule aromatique issue de la moutarde) fut également versée dans le trou formé afin de faire remonter les vers de terre se trouvant plus en profondeur, le plus souvent anéciques ou épi-anéciques. Nous avons ensuite déterminé ces vers jusqu'à l'espèce et parfois à la sous-espèce, en collaboration avec l'UMR SAS. Ils ont également été pesés, afin de décrire la répartition de la biomasse en vers de terre sur la zone d'étude. Les vers de terre ont été caractérisés selon leur classe écologique (endogés, anéciques, épigés, épi-anéciques), leur espèce et leur stade de développement (juvénile, subadulte, adulte).

### *c) Variables liées au sol*

Diverses mesures biophysiques du sol ont été effectuées et traitées par l'UMR SAS, notamment lors de la première campagne de Mars. Les données de densité apparente, de biomasse microbienne, et de morphologie des sols (profondeur, hydromorphie) présentées dans ce rapport sont tirées de ces observations. Plusieurs autres mesures de sol et de gestion des parcelles ont directement été importées du projet MOSAIC, réalisé sur la commune de Naizin entre 2013 et 2017. Parmi elles, les informations concernant le labour et les rotations ont été relevées. Le pH, la texture du sol et le contenu en carbone organique du sol ont également été sélectionnés. Ces variables ont été utilisées en tant que variables explicatives de la présence des carabes. Elles ont été choisies en commun avec l'UMR SAS pour les analyses afin de fournir une certaine cohérence au projet, mais aussi car ces variables sont pertinentes vis-à-vis de la macrofaune liée au sol en champ cultivé (Holopainen et al., 1995, labour, texture, historique, ...). Le tableau n°2 décrit les variables conservées et utilisées dans le jeu de données.

### *d) Comptage de pucerons*

En France, les cultures de céréales, comme le blé et l'orge, peuvent être ravagées par différents nuisibles. La présence de pucerons dans ces cultures est ainsi particulièrement suivie





et documentée (Al Hassan et al. 2013, Menalled et al. 2018, Thies et al., 2011). On observe principalement trois espèces de pucerons des céréales en Bretagne :

- *Metopolophium dirhodum*, le « puceron des céréales et du rosier » se présente sur le feuillage et n'est néfaste qu'en cas d'infestation importante.
- *Rhopalosiphum padi*, le « puceron des céréales et du merisier à grappe » se rencontre sur maïs et céréales d'hiver, à l'automne principalement.
- *Sitobion avenae*, le « puceron des épis » est le plus suivi car il pullule sur les épis à l'épiaison et à la période du remplissage des grain, et peut ainsi directement impacter le rendement.

Les comptages de pucerons ont été effectués les semaines du 18 et du 25 juin, donc assez tardivement sur le blé (stade laiteux/pâteux). Les conditions météorologiques des semaines précédentes ayant été pluvieuses, le blé était encore assez vert pour la prospection. En chaque point d'étude, dix séries de cinq talles ont été aléatoirement choisies sur lesquelles les pucerons ont été dénombrés.



Figure 4 - Photos des trois espèces de pucerons rencontrées en blé d'hiver

## C) Démarches statistiques

### a) Description du jeu de données

Le jeu de données utilisé pour cette étude se présente avec les individus (les points) observés aux différentes périodes (Mars, Mai et Juin) en lignes, et les différentes variables en colonnes. Ainsi, pour Mars, ce jeu de données comportait 93 individus. En Mai et en Juin, il en comptait 29. Seuls 22 de ces points faisaient partie des points observés en Mars. Les points ont été définis au cours du projet MOSAIC en 2013. A cette date, une grille avec un point tous les 300 mètres avaient été dressée. Par ailleurs, plusieurs points avaient été ajoutés aléatoirement sur la zone afin de réaliser un krigeage, et de pouvoir effectuer une vérification croisée des modèles de prédiction issus de ce krigeage.

En conséquence, certains couples de points sont très proches (à quelques dizaines de mètres), et dans la même parcelle, et ne peuvent donc pas être considérés comme indépendants. Le jeu de données comportait plusieurs couples de ce type, dont trois échantillonnés en Mai et en Juin, et parmi eux, deux couples également échantillonnés en Mars. Pour toutes les variables quantitatives mesurées sur ces couples, une moyenne des données sur les deux points fut réalisée. Ainsi, le nombre de points indépendants observés aux trois périodes était seulement



de 20. Les analyses statistiques présentées ci-dessous ont donc été réalisées avec des nombres d'individus différents selon la ou les périodes considérées.

Plusieurs types de variables ont été recueillis, notamment des variables relatives aux propriétés du sol et d'autres caractérisant la gestion des parcelles (principalement les rotations et le travail du sol). Certaines de ces données, du fait de leur stabilité dans le temps ont pu être directement extraites du projet MOSAIC. Les variables d'abondance des organismes étudiés (carabes, vers de terre, staphylins, collemboles, etc.) proviennent des captures des pièges Barber et des tris manuel. Le jeu de données ne comprend, pour tous les taxons autres que les vers de terre et les taupins, que les données issues des pièges Barber (addition des valeurs des deux pots posés par points). Ce choix est dû au fait que ces deux méthodes n'échantillonnent pas la même chose (activité-densité dans un cas et densité de carabes sur une certaine surface dans l'autre), et ne peuvent donc être considérées de la même manière. Au contraire, les données d'abondance et de biomasse des vers de terre ne sont issues que du tri manuel.

### *b) Impact des paramètres environnementaux sur les communautés carabiques*

Les variables pédologiques et de gestion des parcelles ont été choisies en commun avec l'UMR SAS (pour des raisons de cohérence du projet et des cartes créées à partir des données) selon leur intérêt pour les deux types d'organismes étudiés : les vers de terre et les carabes. Ainsi, les variables de gestion choisies furent le travail superficiel du sol, le labour profond (moyennes du nombre d'inversions d'horizons sur les 4 dernières années) et l'historique de la parcelle comprenant 4 catégories, issues d'une classification des parcelles réalisées après une analyse en composantes principales (ACP) : majorité de maïs dans la rotation, majorité de céréales (blé), au moins deux années en cultures maraîchères depuis 2013, au moins deux ans en prairies depuis 2013.

Les variables pédologiques mesurées en 2018 furent la densité apparente, la biomasse microbienne, la température du sol à 15 cm de profondeur, la teneur en eau massique, et des variables descriptives du sol selon la méthode 4 critères (Annexe n°2) utilisée à l'UMR SAS (profondeur, substrat et hydromorphie). Le pH, la texture (quantité de sables, limons et argiles), et le carbone organique dans le sol ont été reprises du projet MOSAIC (2013).

Une sélection des variables d'intérêt à insérer dans le modèle linéaire était nécessaire. La méthode utilisée est décrite ci-après. Les analyses ont toutes été conduites avec RStudio 1.1.383.

- Après le renseignement de l'ensemble des variables explicatives potentielles (voir tableau n°2), les modèles contenant toutes les combinaisons de variables sont construits au moyen de la fonction `dredge()` du package MuMIn (1.40.4). Ensuite, ces modèles sont ajustés aux données et classés selon le critère d'information d'Akaike (AIC), du plus faible au plus élevé.
- Un sous-ensemble de modèles correspondant à ceux ayant un AIC au maximum supérieur de 4 points au plus faible AIC des modèles précédemment calculés est formé avec la fonction `get.models()` de MuMIn (1.40.4).
- Le modèle moyen de ce sous-ensemble est ensuite calculé afin de définir au mieux, parmi les variables explicatives présentes, lesquelles ont un impact significatif dans les



meilleurs modèles proposés. Ceci fut réalisé grâce à la fonction `model.avg()` de MuMIn (1.40.4).

- Afin de calculer les effets de l'environnement sur les individus étudiés, l'UMR SAS utilise la fonction `cubist()` du package Cubist 0.2.1. Il s'agit d'une méthode basée sur l'identification d'un arbre de régression optimal. Elle est fondée sur une logique similaire à la fonction `randomForest()` du package randomForest 4.6-14, à ceci près que `cubist()` renvoie un unique arbre. Nous avons comparé ces trois méthodes, le *model averaging*, Cubist et randomForest pour sélectionner les variables d'intérêt pour le modèle final, afin de vérifier la cohérence de nos résultats. Enfin, le modèle final ne contenant que les variables sélectionnées par au moins l'une des méthodes était réalisé avec la fonction `glm()`.

Code	Variable explicative	Unité	Gamme	Couleurs
Carbone	Carbone organique dans le sol (2013)	g/kg	14 => 204	Texture
D_TILL	Nombre de labours profonds (moyennées sur la rotation)	Nb	0 => 5	
S_TILL	Nombre de travail du sol superficiel / an (moyenné sur la rotation)	Nb	0 => 3	
ARG	Quantité d'argile (< 2 µm) par kilogramme de sol	g/kg	135 => 355	
LIM_F	Quantité de limons fins (2/20 µm) par kilogramme de sol	g/kg	270 => 450	
LIM_G	Quantité de limons grossiers (20/50 µm) par kilogramme de sol	g/kg	135 => 370	
SAB_F	Quantité de sables fins (50/200 µm) par kilogramme de sol	g/kg	40 => 120	Gestion
SAB_G	Quantité de sables grossiers (200/2000 µm) par kilogramme de sol	g/kg	30 => 180	
DA	Densité apparente	g/cm3	0,4 => 1,5	
HIST	Historique de la parcelle (5 dernières années) : C : Majorité de céréales ; M : Majorité de maïs ; P : 2 ans en prairies ; Mar : 2 ans en cultures maraîchères	g/cm3	0,4 => 1,5	
PH	pH du sol		3 => 7,2	Autres Pédologiques
BM	Biomasse microbienne (référence internationale)	mg C/kg	100 => 1650	
Temp_Mai	Température du sol (à 15 cm de profondeur) en Mars 2018	°C	3,8 => 7,4	
Temp_Mai	Température du sol (à 15 cm de profondeur) en Mai 2018	°C	11,1 => 15,8	
Ten_eau	Pourcentage d'humidité (moyenne sur 0-25cm)		0,24 => 0,96	
Prof_2018	Classe de profondeur du premier obstacle (profondeur rhizofonctionnelle) estimée en 2018 (Annexe n°2) 1: >1m ; 2: 80-100cm ; 3 : 60-80cm ; 4 : 40-60cm			
Hydrom_2018	Classe d'hydromorphie estimée en 2018 (présence d'oxydo-réduction) (Annexe n°2) 0: absence ; 1: faible (>80 cm) ; 2: forte (>80cm) ; 3: faible (>40cm) ; 4: forte (>40cm) ; 5: faible en surface ; 6 : forte en surface ; 7: horizon(s) rédoxiqes sur toute l'épaisseur du sol			
Elem_gr	Éléments grossiers dans le sol (Pourcentage)		0 => 0,4	

Tableau 2 - Variables environnementales explicatives utilisées

### c) Analyse des interactions entre les carabes et les autres organismes étudiés

Notre but était de décrire l'impact de la présence des carabes selon leur espèce sur les dynamiques des autres populations étudiées, (vers de terre, larves de taupins, pucerons et limaces). Nous avons supposé que l'équation régissant cette interaction pouvait être approchée par :



$$\frac{d\ln(N)}{dt} = r - \sum_{i=1}^M \alpha_i P_i$$

où, pour  $M$  espèces de prédateur,  $N$  est la population de proies,  $P$  la population d'une espèce de prédateur,  $r$  le taux d'accroissement naturel des proies et  $\alpha$  un coefficient d'efficacité de prédateur sur les proies. En pratique,  $\frac{d\ln(N)}{dt}$  est estimé par  $\frac{\ln(N_{t+\Delta t}) - \ln(N_t)}{\Delta t}$ , où  $\Delta t$  est l'intervalle entre deux observations successives.

On formule ainsi l'hypothèse que l'interaction entre les carabes et les ravageurs/auxiliaires peut être localement traduite par une relation linéaire entre les accroissements du logarithme des effectifs de proies et les abondances de prédateurs. Il est important de noter que ce modèle ne prend, par exemple, pas en compte les variables environnementales qui peuvent avoir un rôle considérable sur la quantité de proies, mais se concentre uniquement sur l'effet de la prédation, regroupant tous les autres effets dans le terme d'accroissement naturel,  $r$ .

Les caractéristiques du jeu de données utilisées selon les taxons sont présentées dans le Tableau n°3.

Proie (auxiliaire ou ravageur)	$\Delta t$	Nombre de points
Vers de terre	2 mois (Mars à Mai)	24 points
Taupins	2 mois (Mars à Mai)	24 points
Pucerons	1 semaine (en Juin)	18 points
Limaces	1 mois (Mai à Juin)	11 points

Tableau 3 - Intervalles entre observations utilisées pour le calcul des taux d'accroissement

Plusieurs observations contenaient un nombre important de 0. Or, l'utilisation du logarithme interdit ce type de données. Les 0 furent donc remplacés par des 0,01. Les espèces de carabes (utilisées comme variables explicatives) ayant un nombre trop faible d'observations (moins de 5 individus sur une période) furent retirées du jeu de données ou regroupées sous leur genre. Ces genres sont signifiés par un « *sp.* » dans les résultats (ex : *Harpalus sp.*). Nous avons choisi de ne pas réaliser de correction de Bonferroni pour tests multiples car trop conservatrice au vue de la modestie du jeu de données. En conséquence, la significativité de certains résultats est à interpréter avec précaution.





### III - Résultats

#### A) Description générale des données

##### Carabes

Au total, sur les trois périodes d'échantillonnage, 1461 carabes ont été capturés dans 302 pièges Barber posés sur ces périodes puis identifiés au laboratoire. Sur ce total, seuls 170 carabes ont été récoltés durant la campagne de Mars, pour 186 pièges Barber. Les campagnes de Mai et Juin ont respectivement permis de capturer 402 et 889 carabes. Les abondances par pièges ont donc significativement augmenté durant la

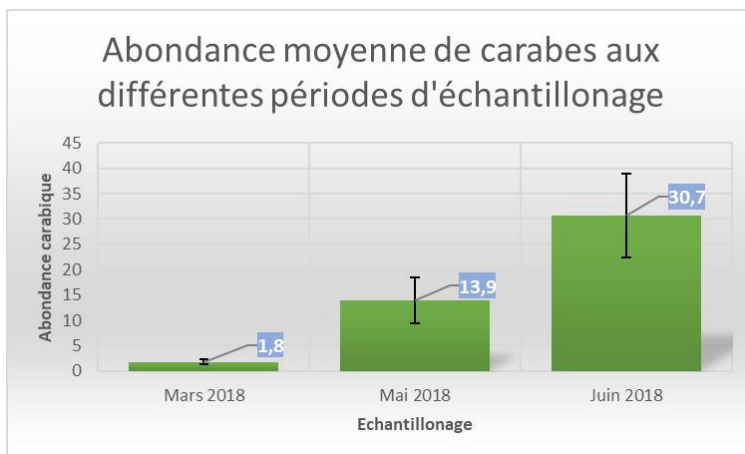


Figure 5 - Abondances moyennes de carabes aux différentes périodes

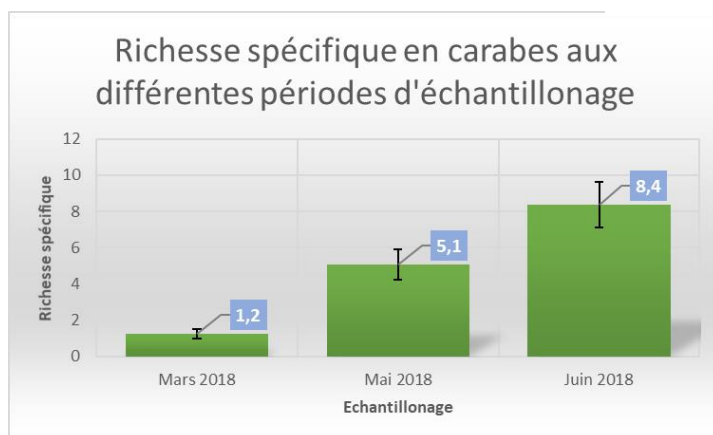


Figure 6 - Richesses spécifiques aux différentes périodes

Mars :  $1,2 \pm 0,3$  ; Mai :  $5,1 \pm 0,8$  ; Juin :  $8,4 \pm 1,3$  ; Figure n°6). Les espèces majoritairement trouvées étaient des espèces communes dans ce type de milieu (Raitif, 2015). Il est cependant à noter que les espèces majoritaires n'étaient pas les mêmes selon la période considérée. En particulier, *Trechus gr. quadristriatus* représentait 28,6% des captures en Mars et 15,8 % en Juin mais seulement 3 % en Mai. Le tableau n°4 récapitule ainsi les espèces majoritairement capturées. Les carabes ont ensuite été regroupés selon leur taille et leur régime alimentaire. La description des espèces est présentée en annexe (Annexe n°1).

période d'échantillonnage :  $1,8 \pm 0,5$  en Mars,  $13,9 \pm 4,5$  en Mai et  $30,7 \pm 8,2$  en Juin (Figure n°5). Ceci est en grande partie dû aux grandes différences des périodes d'échantillonnage.

De même, les richesses spécifiques globales trouvées par piège ont augmenté de Mars à Juin de manière significative (Mars :  $1,2 \pm 0,3$  ;

Période d'échantillonnage	Espèces	Pourcentage d'apparition
Mars	<i>Trechus gr. quadristriatus</i>	28,64 %
	<i>Phyla obtusa</i>	21,64 %
	<i>Poecilus cupreus</i>	12,14 %



Mai	<i>Poecilus cupreus</i>	37,56 %
	<i>Nebria brevicollis</i>	11,78 %
	<i>Nebria salina</i>	10,00 %
	<i>Demetrias atricapillus</i>	8,44 %
Juin	<i>Poecilus cupreus</i>	30,60 %
	<i>Trechus gr. quadristriatus</i>	15,75 %
	<i>Pterostichus melanarius</i>	12,26 %
	<i>Loricera pilicornis</i>	7,65 %
	<i>Metallina lampros</i>	7,20 %
	<i>Pseudophonus rufipes</i>	6,75 %

Tableau 4 - Principales espèces de carabes collectées



Figure 7 - Photos des principales espèces collectées

### Vers de terre

Lors des tris manuels de Mars, 3574 vers de terre furent collectés sur les 93 points sondés, soit en moyenne environ 38 vers de terre par point alors qu'en Mai, seuls 386 individus furent récoltés sur 29 points, soit environ 13 vers par points. Une majorité (67%) de ces individus étaient des endogés, vivant dans le sol et creusant des galeries souterraines horizontales. Les épigés, vivant plus près de la surface, ne représentaient que 11 % des vers collectés alors que les anéciques et épi-anéciques, creusant des galeries verticales et souvent jugés responsables d'une infiltration facilitée de l'eau dans le sol, constituaient environ 22 % des échantillons. Pour ce qui est des stades de développement, une majorité de juvéniles fut observée aux deux périodes d'échantillonnage. Les adultes étaient ensuite les plus représentés (environ 36 %). Enfin, les subadultes correspondaient à 14 % des vers récoltés.



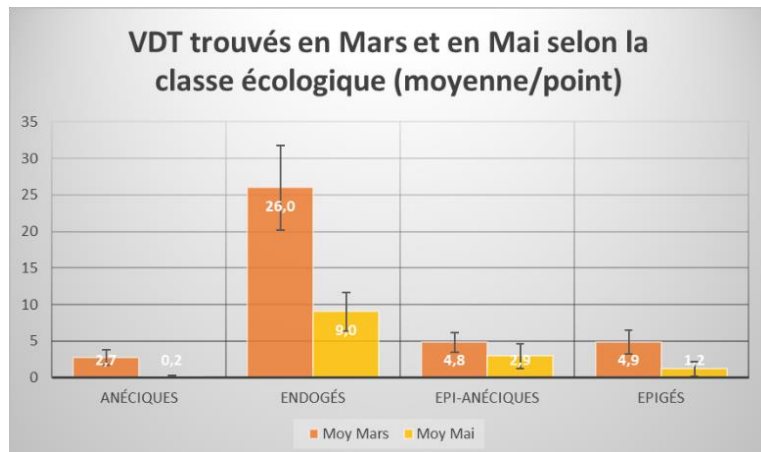
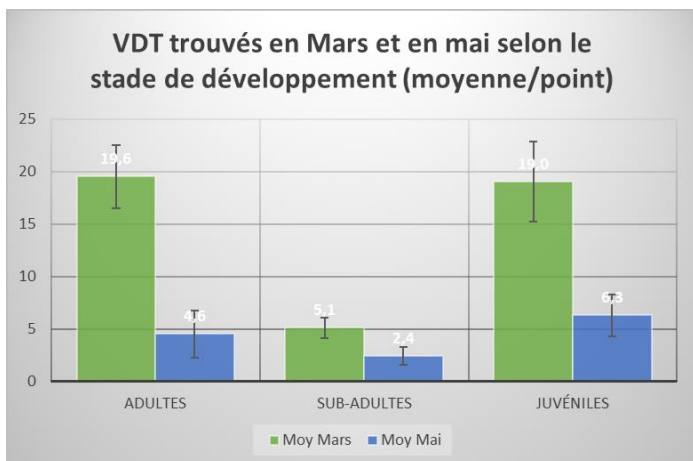


Figure 8 - Moyennes de vers collectés selon la classe écologique ou le stade de développement

### Sélection des variables explicatives

La comparaison des méthodes utilisées pour la sélection des variables (*model averaging* (MuMin), *regression tree* (cubist et randomForest)) ne conduit pas systématiquement à l'identification des mêmes variables d'intérêt, même sur un jeu de données qui ne possédait qu'une quinzaine de variables explicatives. Ainsi, l'utilisation d'une seule de ces méthodes pourrait aboutir à une perte relativement importante d'information. Le tableau n°16 présente

Méthode	% de variables
MuMin seul	40,16%
RdF seul	21,93%
Cubist seul	6,77%
Cubist / RdF	4,46%
RdF / MuMin	14,29%
Cubist / MuMin	2,90%
MuMin / RdF / Cubist	9,49%
<b>Total</b>	<b>100,00%</b>

ces résultats. On peut voir qu'en moyenne, seules 9,49 % des variables sont sélectionnées par les trois méthodes. 26,68 % des variables sont en moyenne sélectionnées par au moins deux des méthodes. Cependant, la méthode MuMin a tendance à sélectionner plus de variables différentes des deux autres méthodes. Ainsi, selon la méthode employée, la sélection des variables pour le modèle final sera bien différente. Le modèle final étant un modèle linéaire, les variables sélectionnées par le *model averaging* sont généralement conservées. En effet, 67 % en moyenne des variables incluses dans le modèle final avaient été sélectionnées par MuMin.

Tableau 5 - Pourcentage de variables sélectionnées par différentes méthodes statistiques

### B) Influence des caractéristiques pédologiques et de la gestion agricole sur les communautés carabiques

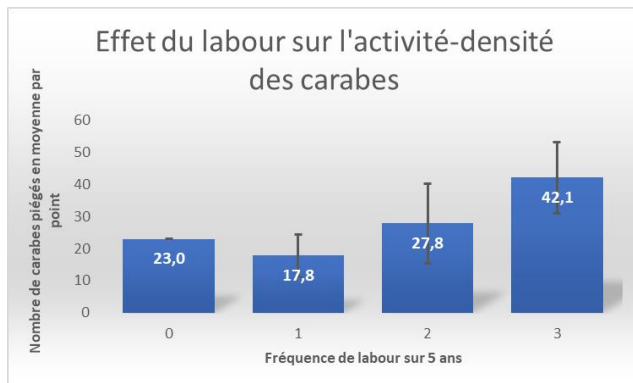
L'abréviation « c/p » signifie ici : carabe par point. Sauf précisions, ces estimations sont réalisées pour la période de Juin, généralement la plus riche en carabes. Elles sont donc, dans la plupart des cas, à mettre en relation avec la moyenne de 30,7 carabes par point citée plus haut (Figure n°5). Ces valeurs correspondent pour les variables quantitatives à la variation résultant de l'augmentation d'une unité de la variable considérée (Tableau n°2), en dehors de la biomasse



microbienne (ici en g de carbone/kg de sol plutôt qu'en mg) et des textures (en hg/kg de sol). Les indices de significativité présentés dans les parties suivantes représentent les p-value suivantes : ‘\*’ < 0,05 ; ‘\*\*’ < 0,01 ; ‘\*\*\*’ < 0,001.

### Activité-densité totale

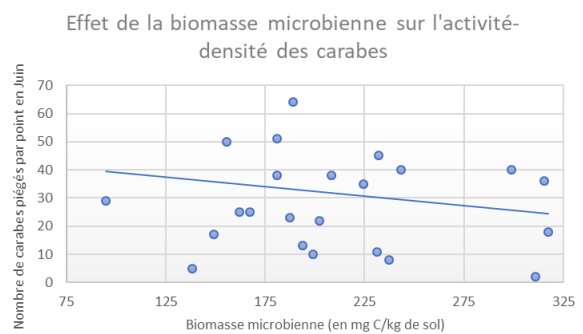
L'activité-densité des carabes est positivement corrélée à la fréquence de **labour** (+ 1 c/p/labour dans la rotation, p-value<2.10<sup>-16</sup>, Figure n°9), ainsi qu'à **l'augmentation du pH** (+ 2 c/p par point de pH (5<pH<7), p-value=0,0128).



**Figure 9 - Effet du labour sur l'activité-densité des carabes en Juin**

dernières années). Cet effet se trouve renforcé avec les anciennes prairies en Juin (+ 1,8 c/p p-value<2.10<sup>-16</sup>). En revanche, une augmentation de la **biomasse microbienne** semble desservir les populations carabiques d'après le modèle (-13,6 c/p/g de carbone/kg de sol ; p-value=1,46.10<sup>-13</sup>, cette tendance est montrée dans la figure n°10), ainsi qu'une élévation de la **densité apparente** (-5 c/p/g/cm<sup>3</sup>, p-value=2.10<sup>-6</sup>). En Mars, nous avons pu observer une augmentation d'1 c/p dans les intercultures (phacélie et moutarde, pour la plupart ; p-value=0,012). Une augmentation de la **température du sol** (+ 1°C, à 15 cm sous la surface) en Mars se traduit selon le modèle retenu par une augmentation de 0,3 c/p (p-value=0,015), alors qu'en Mai, une même augmentation provoque une diminution de 0,2 c/p (p-value=3\*10<sup>-7</sup>).

De plus, les parcelles dont **l'historique** était diversifiée, et non basée uniquement sur une rotation blé-mais semble contenir plus d'individus. Par exemple, en Juin, les parcelles présentant la modalité « Mar » (cultures maraîchères dans les 5 dernières années, principalement de pommes de terre, dans la région) avaient significativement plus de carabes (+0,9 c/p, p-value=4,47.10<sup>-8</sup>) que celles de modalité « C » (majorité de céréales durant les 5



**Figure 10 - Effet de la biomasse microbienne sur l'activité-densité des carabes**

L'**hydromorphie** du sol a également un effet. En Mars comme en Juin, une faible hydromorphie (classes 1 et 2 de la méthode 4 critères (Annexe n°2)) se traduit par une augmentation d'environ 1 c/p (p-value=0,004) par rapport aux 30,7 c/p en Juin. En revanche, une forte hydromorphie (classe 6) engendre une perte d'environ 2 c/p en Mars (p-value=0,004).





### Richesse spécifique

La **profondeur du sol** (de l'horizon d'altération C ou de la roche mère) semble affecter la richesse spécifique des communautés carabiques rencontrées sur Naizin. Ainsi, moins le sol est profond, moins la communauté carabiques est diversifiée ( $-2$  Sp/p ;  $p$ -value= $4.10^{-5}$ ). A toutes les périodes, la **biomasse microbienne** est inversement corrélée à la richesse spécifique ( $-44,5$  Sp/p/gC/kg de sol ;  $p$ -value= $8.10^{-5}$  ; elle varie entre 0,1 et 1,6 gC/kg). Les parcelles anciennement en prairie semblent contenir au contraire une plus grande richesse spécifique que les autres ( $+ 5,5$  Sp/p,  $p$ -value= $0,013$  d'après le modèle).

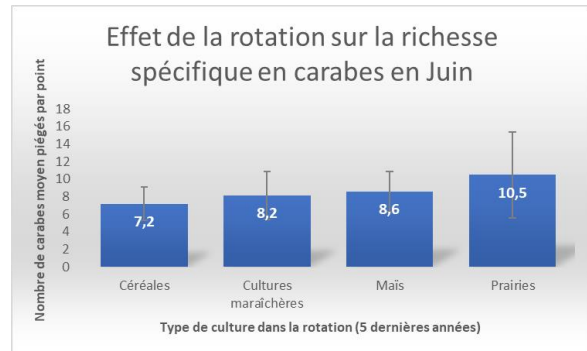


Figure 11 - Effet de la rotation sur la richesse spécifique en Juin

### Impacts environnementaux sur les espèces omnivores

La majorité des carabes récoltés présente un régime alimentaire omnivore (68% des individus en Juin). En conséquence, les résultats observés sur l'abondance totale des carabes sont largement influencés par les variables environnementales qui déterminent l'abondance des espèces omnivores. On retrouve ainsi un effet positif du **labour** ( $+ 1,5$  c/p/labour ;  $p$ -value= $2.10^{-10}$ ), du **pH** (en Mars notamment,  $+6$  c/p par point de pH ;  $p$ -value= $0,002$ ) et un effet négatif, plus flagrant en Mars qu'en Juin cependant, de la **densité apparente** ( $-7,3$  c/p/g/cm<sup>3</sup> ;  $p$ -value= $7.10^{-4}$ ) et de la **teneur en eau massique** ( $-0,05$  c/p/% ;  $p$ -value= $0,032$ ) et de la **biomasse microbienne** ( $- 21$  c/p/gC/kg de sol ;  $p$ -value= $2,4.10^{-7}$ ). On retrouve également un effet négatif de la **profondeur de sol** sur l'abondance d'omnivores. Par exemple, pour un sol de classe 4 (profondeur entre 40 et 60 cm), un effet de  $-2$  c/p,  $p$ -value= $4.10^{-5}$  est observé. L'activité-densité des carabes semble favorisée dans les parcelles dont la rotation fut plus diversifiée lors des 5 dernières années.

On note cependant des différences avec l'abondance totale. On trouve un effet positif de la quantité de **carbone organique** dans le sol ( $+0,08$  c/p/g/kg ;  $p$ -value= $0,013$ ) en Juin comme en Mai. La **texture du sol** donne également d'autres résultats. La quantité d'**argile** ( $+0,07$  c/p/g/kg ;  $p$ -value= $5,3.10^{-8}$ ), ainsi que de **limons grossiers** ( $+2,1$  c/p/100g/kg ;  $p$ -value= $3,5.10^{-5}$ ) augmente nettement l'activité-densité des carabes omnivores dans la parcelle. On observe également, en Juin, un effet positif de l'augmentation du pourcentage d'**éléments grossiers** dans le sol ( $+0,15$  c/p/% ;  $p$ -value= $1,8.10^{-7}$ ).

### Impacts environnementaux sur les espèces phytophages

La quantité réduite de phytophages récoltés dans nos parcelles, aux trois périodes concernées, n'a pas permis de dégager un effet significatif des variables environnementales sélectionnées.



### Impacts environnementaux sur les espèces carnivores

Des effets significatifs des variables environnementales sur les abondances de carabes carnivores n'ont été mis en évidence qu'en Mai et en Juin. En effet, un seul individu carnivore a été collecté en Mars. Nous ne pouvons donc tirer aucune conclusion pour cette période. En Mai, la population de carabes carnivores est principalement composée d'individus appartenant au genre *Nebria sp.* (> 90 %), dont l'essentiel des captures a été réalisé en deux points parmi les vingt-neuf. La **profondeur de sol** semble affecter les carabes carnivores de la même manière que pour les omnivores (-1 c/p pour une classe 4 ; p-value=0,004). Une diversité dans l'**historique** de la parcelle est toujours favorable (+3 c/p pour des parcelles ayant eu une activité maraîchère notable ces 5 dernières années ; p-value=1,6.10<sup>-12</sup>). La **biomasse microbienne** semble également corrélée négativement à l'activité-densité des carabes carnivores (-14,7 c/p/gC/kg ; p-value=2.10<sup>-4</sup>). De nouveau, la **densité apparente** et la **teneur en eau massique** ont un fort effet négatif (-4 c/p/g/cm<sup>3</sup> et 0,5 c/p/% ; p-value=2,8.10<sup>-4</sup>). La quantité d'**éléments grossiers**, elle, est positivement corrélée aux deux périodes à l'activité-densité de ces carabes (+0,44 c/p/% en Mai ; p-value=5,3.10<sup>-6</sup> et +1 c/p en Juin ; p-value=1.10<sup>-4</sup>). Au contraire une augmentation des **températures** du sol de 1°C en Mai se traduit par une réduction de la quantité de carabes piégés (-1,3 c/p ; p-value=1,6.10<sup>-8</sup>).

### Impacts environnementaux sur les espèces collembofages

Le **travail superficiel** du sol semble favoriser la présence des espèces collembofages (+0,5 c/p, p-value=0,002). En Mars, la **teneur en eau massique** dans le sol est négativement corrélée à leur présence (-0,1 c/p/%, p-value=0,028) et en Juin, elle semble au contraire la favoriser (+6 c/p, p-value=0,0036). Sur les parcelles cultivées marquées par la présence d'une prairie dans la rotation au cours de ces 5 dernières années, l'activité-densité des collembofages semble diminuer (-1,5 c/p, p-value=0,025). Un effet de la quantité de **limons grossiers** est également constaté (-1,7 c/p/100g/kg, p-value=3,7.10<sup>-5</sup>).

### Impacts environnementaux selon la classe de taille des espèces

L'**historique** de la parcelle semble expliquer en partie l'activité-densité des carabes de petite taille (T1 : <5mm). Par exemple, une parcelle avec un passé prairial aura, plus de carabes de taille T1 (+1,8 c/p : p-value=1,8.10<sup>-14</sup>). Nous retrouvons également une relation négative avec la **biomasse microbienne** (-8 c/p/gC/kg ; p-value=0,002). Ici, la **profondeur de sol** joue un rôle inverse à ce qui a été vu précédemment : plus le sol est profond, moins il y a de carabes de taille 1 (Classe 3 : profondeur entre 60 et 80 cm ; +1,9 c/p ; p-value=6.10<sup>-7</sup>). La **teneur en eau**, en Mars, présente également un effet négatif sur les abondances des carabes de cette classe de taille (-0,13 c/p/% ; p-value=3,4.10<sup>-4</sup>).

Concernant les carabes de classe de taille T2 (5 à 10 mm), les résultats n'ont pu être analysés que pour Mai et Juin, pour lesquels des effectifs suffisants ont été capturés. Contrairement aux observations effectuées pour les autres classes de carabes, la **teneur en eau massique**, aux deux périodes, semble favoriser la présence des carabes appartenant à la classe de taille T2 dans les parcelles (+0,08 c/p/% ; p-value=6.10<sup>-4</sup>). En Mai, l'effet négatif général de la **biomasse microbienne** sur l'activité-densité des carabes est également observé pour les carabes appartenant à cette classe de taille (-9 c/p/gC/kg ; p-value=0,007). En Juin, un effet



positif des **limons grossiers** (+0,8 c/p/100g/kg de sol ; p-value=0,012), et des **éléments grossiers** (+0,07 c/p/% ; p-value=0,005) est constaté dans le modèle. En revanche, des effets négatifs du **travail superficiel du sol** (-0,44 c/p ; p-value=0,0036) et de la quantité de **carbone organique** (-0,08 c/p/g/kg ; p-value=0,0015) sont observés.

Pour les carabes de classe de taille T3 (10 à 15 mm), les résultats n'ont pu être analysés que pour Mai et Juin. Sur les deux périodes, l'activité-densité des carabes s'accroît avec la présence de cultures maraîchères dans la **rotation** (+1,2 c/p ; p-value=6,6.10<sup>-9</sup>) et avec la présence de prairies (+2,3 c/p ; p-value<2.10<sup>-16</sup>). Un effet négatif du **labour** (-0,5 c/p/labour ; p-value=1,3.10<sup>-7</sup>) se distingue en Mai, alors qu'un effet positif équivalent de ce-dernier (+0,5 c/p ; p-value=1,2.10<sup>-7</sup>) est observé en Juin. Une **hydromorphie** trop faible ou trop forte est associée à de faibles abondances (Classe 6 : forte densité de tâches d'hydromorphie dès la surface ; -1,6 c/p ; p-value=7.10<sup>-4</sup>) alors que les classes intermédiaires sont associées à des abondances plus fortes (Classe 4 : forte densité de tâches d'hydromorphie entre 40 et 80 cm de profondeur ; +3 c/p ; p-value=1,6.10<sup>-9</sup>). En Mai, une augmentation de la **température** se traduit par une réduction des abondances de carabes appartenant à cette classe de taille (pour 1°C, -0,3 c/p ; p-value=8,2.10<sup>-7</sup>). Sur la même période, la **teneur en eau massique** semble également négativement corrélée au nombre de carabes dans les pièges Barber (-0,11 c/p/% ; p-value=3,5.10<sup>-5</sup>).

Pour les carabes de grande taille (T4 : >15 mm), seuls les individus de Juin sont en abondance suffisante pour faire ressortir des effets significatifs des variables environnementales. Cette classe est exclusivement représentée par *Pterostichus melanarius*. Le **labour** (+1,3 c/p ; p-value=2,8.10<sup>-15</sup>) et le **pH** (+1,2 c/p par point de pH ; p-value=0,004) ont encore une fois un effet positif sur l'activité-densité des populations carabiques. De même, la **densité apparente** montre à nouveau un effet négatif (-10 c/p/g/cm<sup>3</sup>, p-value=8,2.10<sup>-5</sup>), ainsi que la **biomasse microbienne** (-15 c/p/gC/kg, p-value=1,3.10<sup>-4</sup>). La présence de **limons fins** (-3,4 c/p/100g/kg ; p-value=1,2.10<sup>-4</sup>), **limons grossiers** (-2,2 c/p/100g/kg, p-value=4,2.10<sup>-5</sup>) et **sables fins** (-7,7 c/p/100g/kg de sol ; p-value=2,5.10<sup>-6</sup>) est associée à une réduction de l'activité-densité des carabes de grande taille.

Effets globaux		Effets spécifiques	
D_Till	+	S_Till	
HIST_P	+	T1	+
HIST_Mar	+	T2	-
BM	-	Collembophages	+
DA	-	Temp	
Prof	-	T3	+
Ten_eau	-	Carnivores	-
Elem_gr	+	Abondance totale	+ (Mars)/- (Mai)
pH	+	Hydrom_2018	
		T3 et abondance totale	+ : (40-60cm) - : surface

Tableau 6 - Principaux effets environnementaux sur les abondances de carabes



## C) Interactions entre carabes et ravageurs de cultures

### Limaces

La quantité de limaces récoltées sur le terrain ne fut pas suffisante (20 individus en Mai et 6 en Juin) pour déterminer une quelconque prédation d'une espèce de carabes sur les limaces. Les pièges Barber ne permettent pas un échantillonnage convenable des limaces.

### Larves de taupins

Les taupins ayant été récoltés en tri manuel, les données utilisées furent celles de Mars (70 individus sur 24 points) et de Mai (70 individus). Ainsi, les abondances de carabes choisies pour ces analyses furent, de la même manière, celles capturées en Mars et en Mai. Deux espèces de carabes présentent des abondances négativement corrélées au taux d'accroissement des populations de larves de taupins : *Asaphidion gr. flavipes* (p-value=0.009 \*\*) et *Metallina lampros* (p-value=0.005 \*\*).

### Pucerons

La quasi-totalité des pucerons capturés étaient de l'espèce *M.dirhodum* (environ 95 %). Les tests ont donc été effectués uniquement sur cette espèce. Sur les 29 points, seuls 221 pucerons ont été comptés la première semaine, et 145 la deuxième. Seuls deux effets significatifs ont été observés sur les pucerons. Le premier était un léger effet positif des populations d'araignées sur le taux d'accroissement des pucerons (p-value=0.02 \*). Le second était un effet positif, plus important, des carabes du genre *Calathus sp.* sur ces mêmes populations de pucerons en champ de blé (p-value=0.02 \*).

	Pucerons	Taupins	Limaces
Ca_sp.	+		
As_fl		-	
Me_la		-	
Araignées	+		
Staphylins		+	

Tableau 7 - Effet des abondances de coléoptères carabidés sur les populations de différents ravageurs

## D) Interactions entre carabes et auxiliaires de cultures

### Impact des abondances de carabes sur la population totale de vers de terre

Tous les résultats présentés ici portent sur les abondances de carabes et de vers de terre collectés en Mars, puis en Mai par les méthodes des pots Barber pour les premiers et du tri manuel pour les seconds. Le premier effet constaté est un effet négatif sur le taux d'accroissement des vers de terre des abondances de *Nebria brevicollis* (p-value=3,6\*10<sup>-4</sup> \*\*\*). En revanche, les abondances de *Nebria salina* ont, elles, un effet positif sur ce taux d'accroissement (p-value=2,2.10<sup>-4</sup> \*\*\*). La distribution des abondances des *Nebrias sp.* dans le jeu de données est très déséquilibrée (la plupart des individus piégés en 2 points et les 27 autres présentant entre 0 et 2 carabes), un modèle sans ces espèces fut également construit. Dans ce nouveau modèle, la présence d'*Anchomenus dorsalis* en forte abondance est positivement





corrélée au taux d'accroissement des populations globales de vers de terre (p-value=0.025 \*). L'effet est négatif pour *Loricera pilicornis* (p-value=0.049 \*).

### Impacts des abondances de carabes selon le stade de développement

Pour ce qui est du taux d'accroissement des abondances de vers au stade **juvénile**, seuls des effets, inversés par rapport au test précédent, des abondances de *Nebria salina* (négatif) et de celles de *Nebria brevicollis* (positif) sont significatifs (p-values =  $4,4 \cdot 10^{-4}$  et  $3,6 \cdot 10^{-4}$ , respectivement). D'autre part, lorsqu'on retire les *Nebrias sp.* du modèle, on observe les mêmes effets significatifs de *Loricera pilicornis* (négatif) et de *Anchomenus dorsalis* (positif).

Le taux d'accroissement des abondances de **subadultes** est significativement influencé par les abondances de trois espèces de prédateurs. Les abondances de *Loricera pilicornis* sont positivement corrélées à ce taux d'accroissement (p-value=0.0095\*\*) et les abondances en araignées négativement (p-value=0.002\*\*). Un troisième effet, négatif, plus incertain d'*Anchomenus dorsalis* est observé (p-value=0.1). On peut cependant le noter face à la redondance de cette espèce dans les tests précédents.

On retrouve pour le taux d'accroissement des abondances de vers **adultes** les effets des abondances de *Nebria salina* (négatif, p-value= $5,5 \cdot 10^{-4}$  \*\*\*) et de *Nebria brevicollis* (positif, p-value=0.0016 \*\*). Un autre effet positif, de *Demetrias atricapillus* est cependant notable (p-value= $8 \cdot 10^{-4}$  \*\*\*).

### Impacts des abondances de carabes selon la classe écologique

La classe écologique de chaque espèce est notamment déterminée par son habitat, plus particulièrement la profondeur de son milieu de vie. Nous avons ici tenté de déterminer dans quelle mesure l'effet de la présence de certaines espèces de carabes sur la dynamique des populations de vers de terre dépendait de leur type écologique. Les tests effectués n'ont mis en évidence aucun effet significatif de la présence des carabes sur les vers de terre anéciques et endogés. En revanche, certaines espèces de carabes semblent avoir un effet sur le taux d'accroissement des épigés et des épi-anéciques entre Mars et Mai. Ainsi, les abondances de *Metallina lampros* influencent positivement le taux d'accroissement des populations de vers de terre **épigés** (p-value=0,045 \*). Un effet opposé est observé pour *Demetrias atricapillus* (p-value=0,049 \*). En outre, de fortes abondances d'*Anchomenus dorsalis* (p-value=0,026 \*) et de *Nebria salina* (p-value= $1,2 \cdot 10^{-4}$  \*\*\*) semblent se traduire par une réduction des populations d'**épi-anéciques**. Au contraire, les abondances de *Nebria brevicollis* (p-value=0,0013 \*\*) et l'abondance globale de staphylins (p-value=0,014 \*) influencent positivement le taux d'accroissement des populations d'épi-anéciques.

### Selon l'espèce ou la sous-espèce

Bien qu'aucun effet de la présence des carabes sur la dynamique globale des populations de vers de terre endogés n'ait été mis en évidence, deux espèces de vers de terre endogés semblent être en partie influencées par la présence de certains carabes : *Allobophora chlorotica chlorotica typica* (ACCT) et *Aporrectodea rosea rosea* (ARR). Ainsi, les abondances



d'*Anchomenus dorsalis* (p-value=0.03 \*) et d'*Asaphidion gr. flavipes* (p-value=0.02 \*) influencent négativement le taux d'accroissement des populations d'ACCT alors qu'un effet opposé est observé pour les abondances de *Nebria brevicollis* (p-value=0.04 \*). Seul un impact négatif de l'abondance de staphylins sur les populations d'ARR fut constaté (p-value=0,041\*).

Trois espèces d'épi-anéciques paraissent également influencées par la présence de prédateurs : *Lumbricus terrestris* (LT), *Lumbricus rubellus rubellus* (LRR) et *Lumbricus castaneus* (LC). L'abondance d'araignées (p-value=0.004 \*\*) et d'*Anchomenus dorsalis* (0.02 \*) influencent négativement le taux d'accroissement des populations de LT. Un effet opposé est observé pour les abondances de staphylins (p-value=0.016 \*) et de carabes de l'espèce *Metallina lampros* (p-value=0.03 \*). Pour ce qui est des taux d'accroissement de LRR et de LC, des effets négatifs relativement plus importants que précédemment, de l'abondance d'*Anchomenus dorsalis* (p-value=0.012 \* ; 0.003 \*\* respectivement) et d'*Asaphidion gr. flavipes* (p-value=0.03 \* ; 0.004 \*\*) furent observés. Un effet positif des abondances de *Loricera pilicornis* (p-value=0.014 \*) fut également constaté.

	Ab_Tot	Juvéniles	Subadultes	Adultes	Epigés	Epi-anéciques	ACCT	ARR	LT	LRR	LC
An_do	+	+	-			-	-		-	-	-
As_fl							-			-	-
Me_la					+				+		
Ne_sa	+	-		-		-					
Ne_br	-	+		+		+	+				
Lo_pi	-	-	+								+
De_at				+	-						
Araignées			-						-		
Staphylins						+		-	+		

Tableau 8 - Effet des abondances de différents coléoptères carabidés sur les accroissements des abondances de vers de terre

## E) Géoréférencement des différents taxons et espèces

Le géoréférencement des données d'abondances par espèce des carabes a pour objectif principal la surveillance à long-terme de la présence des espèces de carabes. Des cartographies basées sur les résultats des modèles linéaires ont été produites. Ces cartes permettent de visualiser les zones riches en carabes et en vers de terre, parmi les 74 parcelles sondées en Mars. Ces cartes sont présentées en Annexe n°3. Elles pourront par exemple servir à orienter la sélection des points d'observation dans les prochaines années.



## IV - Discussion :

---

### A) Influence des variables pédologiques sur les communautés carabiques

Nos résultats ont montré plusieurs effets récurrents et persistants, quels que soient la taille ou le régime alimentaire des espèces carabiques considérées. Ainsi, plusieurs variables influencent significativement l'activité-densité et/ou la richesse spécifique en carabes présents sur une parcelle, comme la biomasse microbienne, l'historique parcellaire, le labour et le travail superficiel du sol, le pH, la quantité d'éléments grossiers, la densité apparente ou encore le teneur en eau massique.

La biomasse microbienne, mesure la quantité de carbone contenue dans les bactéries et champignons du sol, et est presque toujours négativement corrélée avec les abondances des populations carabiques observées quel que soit le groupe d'espèces considéré. Une compétition entre certaines proies de carabes et les bactéries et champignons du sol pour la ressource de matière organique morte pourrait expliquer cette corrélation.

La diversité de l'historique parcellaire (présence de prairies ou de cultures maraîchères dans la rotation notamment) est généralement associée à une augmentation de l'activité-densité des carabes dans les parcelles en blé d'hiver. L'effet positif de la diversité des cultures dans la rotation sur les abondances et la diversité carabique a déjà été montré (Landis, 2000). En effet, les carabes, malgré une plasticité importante, marquent des préférences pour certains milieux. Par exemple, alors qu'*Anisodactylus binotatus* préfère les milieux humides (Valembert, 1997 dans Chabrol et Desmichel, 2000), *Poecilus cupreus* fréquente les milieux ouverts et secs, comme les cultures de blé. Le jeu de données ne comptait que deux parcelles sur vingt-neuf ayant été en prairie au cours des 5 années précédant l'étude. Cependant, une nette augmentation de l'activité-densité des carabes dans ces parcelles fut constatée. D'après la bibliographie, les perturbations des milieux cultivés (traitements chimiques notamment) impactent les populations carabiques. Ainsi, les prairies présentent généralement plus d'espèces (Raitif, 2015). En conséquence, en système cultural, le manque de diversité dans la rotation réduit la présence de carabes et ainsi les potentialités de biocontrôle sur les différents taxons discutés ici.

Le labour présente, quant à lui, des effets qui varient selon les espèces considérées. A titre d'exemple, alors que l'abondance totale des carabes paraît être généralement favorisée par un labour profond, les carabes de classe de taille 3 (10 à 15 mm) semblent, eux, en souffrir. D'après la littérature, les effets du labour sur les populations de carabes sont ambigus. Certaines études émettent l'idée que la machinerie de labour épargnerait les plus petites espèces, impactant alors principalement les plus grandes (T4, > 15 mm), plus facilement blessées ou enterrées. D'autres soutiennent au contraire que les carabes de grande taille peuvent s'échapper plus rapidement de la zone de labour que les petits (Hatten et al., 2007).

Nos résultats permettent d'affiner les interprétations. En effet, seul l'effet d'un travail superficiel du sol est significatif pour les espèces de taille T1 (positif) et de taille T2 (négatif), alors que le labour profond affecte les plus grands carabes, T3 (négativement) et T4



(positivement). Pour les plus petits carabes, l'hypothèse selon laquelle la machinerie de labour épargnerait les plus petites espèces, ici dans le cas d'un travail de surface, semble vérifiée. Les carabes de taille T1 ne sont ni enterrés, ni blessés alors que ceux de taille T2 subissent plus de pertes. Des résultats similaires sont observés pour les communautés piégées en Mars, composées principalement de carabes T1. Au contraire, pour les espèces de plus grandes tailles (T3 et T4), un labour profond blesserait plus facilement les T3, qui n'auraient alors pas le loisir d'échapper aux machines, comme le suggère la littérature, contrairement aux T4.

Par ailleurs, les résultats observés témoignent également de l'activité des carabes. Il est effectivement très probable que le labour impacte l'abondance des carabes par la mortalité qu'il induit directement sur ces espèces mais aussi sur leurs proies. Mais cette opération, dans le cas d'un impact positif, peut également simplement, par l'aération et le nivellement renouvelé du sol, favoriser le déplacement des carabes au sol et donc leur capture. Il serait intéressant pour les prochaines campagnes de connaître la profondeur de labour pourrait apporter des précisions quant à la possibilité qu'il affecte les larves dans le sol.

Milius et al., en 2006, ont décrit chez plusieurs familles de carabes, des récepteurs antennaires au pH. Ils ont montré qu'une variation de pH d'une unité était perçue par les individus. L'hypothèse selon laquelle le pH du sol modifie la sélection de l'habitat par les carabes a déjà été proposée par Holopainen et al., en 1995. Effectivement, une augmentation de pH semble affecter positivement l'abondance de *Pterostichus melanarius*, espèce généralement très répandue en champ de blé. Les pH mesurés en Juin s'échelonnaient entre 5 et 7, écart suffisant pour être perçu. Ainsi, en champ de blé d'hiver, *Pterostichus melanarius* semble préférer ceux dont le pH est relativement plus élevé, dans la gamme de pH observée dans notre étude. Par ailleurs, le pH détermine aussi probablement la qualité de l'habitat.

Le fort effet négatif de la densité apparente et de la teneur en eau massique du sol peut s'interpréter comme une préférence de la majorité des espèces de carabes pour des milieux au sol peu humide et peu compact. Ces deux variables sont fortement corrélées (Coefficient de corrélation : 0,72) dans notre étude. Plus la densité apparente est élevée, mieux l'eau s'infiltre entraînant un accroissement de la teneur en eau. Les deux variables ont tout de même été conservées dans les analyses, puisque la première dépend aussi du substrat, et la seconde des précipitations. Plusieurs auteurs ont déjà identifié le rôle de la teneur en eau du sol et de sa densité apparente sur la composition des communautés carabiques (Luff et al., 1992, Holopainen et al., 1995). Yamazaki et al. 2003, ont mis en évidence une augmentation des abondances et de la richesse spécifique dans les zones plus sèches, notamment à l'état larvaire. Les sols humides et compacts seraient peu favorables au développement des larves, par un effet direct sur leur survie mais également indirect sur les ressources disponibles (quantité de proies, ...).

Une particularité chez les carabes de taille T2 est néanmoins observée : la teneur en eau du sol semble pour ces espèces favoriser leur activité densité, en Mai comme en Juin. Cette catégorie de taille est principalement représentée à ces deux périodes par *Loricera pilicornis* et *Anchomenus dorsalis*, deux espèces connues pour apprécier les environnements humides (Deraison, 2010) qui montrent, dans les champs de blé, habituellement plus secs que d'autres milieux, une nette préférence pour ceux dont le sol est plus humide.



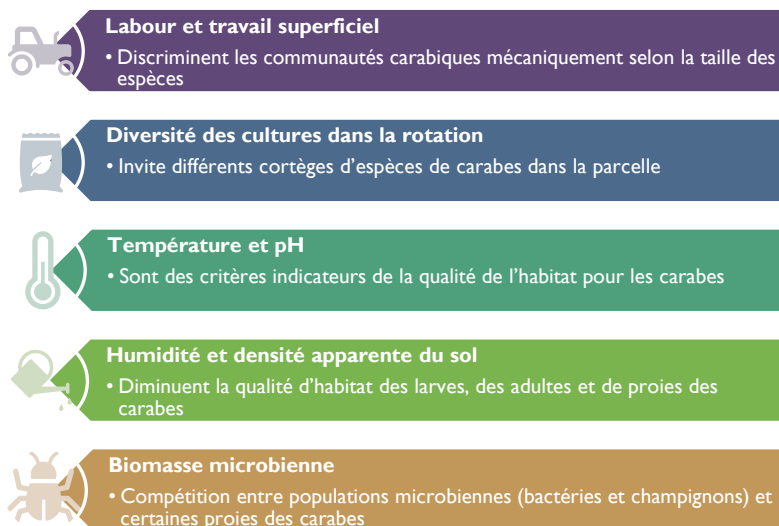


Les abondances de collembophages présentent aussi une relation particulière avec ces deux variables. En Mars, une humidité du sol élevée se traduit par une diminution des abondances de ce groupe et en Juin, l’opposé est observé. Une explication possible est qu’à ces deux périodes, ce sont des espèces différentes qui dominent cette catégorie (*Trechus gr. quadristriatus* en Mars et le couple *Asaphidion gr. flavipes*/*Demetrius atricapillus* en Juin). Ainsi, il s’agirait de préférences spécifiques et non liées au régime alimentaire. On peut aussi supposer que l’humidité moyenne des parcelles varie en fonction des saisons, et que ces espèces préfèrent les zones plus sèches en période humide et inversement, probablement aussi selon l’impact de ce paramètre sur leurs proies préférentielles.

De nombreux facteurs abiotiques, comme l’hydromorphie, et la texture du sol ont déjà été décrits comme des critères de choix d’habitats pour les coléoptères carabiques (Thiele, 2012). Dans nos résultats, les carabes semblent éviter les sols limoneux, ainsi que ceux présentant une trop forte hydromorphie, ou du moins une hydromorphie plus proche de la surface. De même, la diversité des carabes semble diminuer dans les parcelles aux sols peu profonds. Ces résultats peuvent être liés au fait que le sol est à la fois un lieu de développement des carabes, mais également le lieu de développement de proies potentielles.

Il semble qu’une augmentation de la température soit favorable en Mars et délétère en Mai. Là encore, il est possible que les préférences thermiques des carabes correspondent aux zones les plus chaudes en Mars et les plus fraîches en Mai. Comme pour le pH, les carabes sont très sensibles aux variations de température (Koivula, 2011). Ces résultats peuvent également résulter de différences dans les préférences des espèces majoritaires.

Un effet de l’occupation du sol l’année d’étude a également été observé avec un plus grand nombre d’individus dans les parcelles en intercultures (phacélie et moutarde principalement). Cela peut être dû aux particularités des itinéraires techniques mis en œuvre dans ces parcelles ou à la présence d’un cortège d’espèces de carabes associées aux intercultures. Il serait donc intéressant de surveiller, durant les prochaines années du projet, l’activité-densité des carabidés dans les maïs après interculture près de Naizin.



D’après notre étude, la parcelle optimale pour la meilleure activité-densité de carabidés dispose d’une rotation longue et diversifiée. Elle est labourée plusieurs fois durant cette rotation. Son sol ni trop humide ni trop dense pour accueillir les œufs et larves de carabes ainsi que leurs proies potentielles. Il est aussi caractérisé par un pH proche du neutre, favorable aux populations carabiques. Sa biomasse microbienne également relativement faible, pour ce type de milieu.

Figure 12 - Principaux effets environnementaux sur les populations de carabes



## B) Interactions entre carabes et ravageurs de cultures

Peu de résultats sur les interactions entre carabes et ravageurs ont été mis en évidence par notre étude. Malgré une littérature abondante sur le régime alimentaire de *Metallina lampros* (Laroche, 1990), prédateur généraliste ayant des préférences pour des œufs ou larves de diptères et de lépidoptères, aucune source bibliographique ne mentionne une consommation de larves d'élatéridés. Seules quelques études attestent de la consommation de taupins, au stade larvaire ou adulte, par les carabidés (Fox et MacLellan, 1956). En conséquence, il est possible que les effets d'*Asaphidion gr. flavipes* et de *Metallina lampros* observés résultent d'une réelle prédation de cette espèce sur des élatéridés à l'état larvaire. Le régime alimentaire d'*Asaphidion gr. flavipes*, en revanche, se compose, selon la littérature (Laroche, 1990), en majorité de collemboles. Il est donc, pour cette espèce, plus difficile d'imaginer une consommation de larves de taupins dans le sol si la proie préférentielle est disponible en surface. De plus, la capacité des carabes (notamment de petite taille, comme ces deux espèces) à se mouvoir en profondeur n'est pas souvent relevée dans la bibliographie. Cela dit, les élatéridés remontent en surface à l'automne et au printemps pour profiter des conditions favorables (température et humidité) où ils deviennent plus accessibles aux prédateurs aériens.

L'impact positif des populations d'araignées sur le taux d'accroissement des populations de pucerons peut assez facilement s'interpréter. En effet, les pucerons (plus particulièrement *M.dirhodum*) ne constituent pas des proies préférentielles des araignées. En revanche, il est possible, qu'elles consomment différents prédateurs de pucerons (Toft, 1995). La présence de chrysopidés, syrphidés et de coccinellidés, proies potentielles d'un bon nombre d'espèces d'araignées, fut observée sur le terrain à plusieurs reprises. Ainsi, par effet *top-down* sur les prédateurs de pucerons, les araignées présentes pourraient favoriser le développement des populations de pucerons. Il ne s'agit que d'une hypothèse, qui pourra être confirmée ou infirmée par l'identification des taxons des araignées récoltées et leur régime alimentaire. Cependant les pucerons furent assez rares dans les parcelles et les données sont donc peu fiables. Un effet positif similaire, des espèces du genre *Calathus* (ici *Calathus erratus*, *Calathus fuscipes* et *Calathus melanocephalus*) fut constaté. Le régime des *Calathus sp.*, principalement carnivores, se compose notamment de mouches (œufs), de vers, de pucerons et de végétaux divers. Cet effet peut donc s'interpréter de la même manière que pour les araignées.

L'observation des pucerons, peu nombreux, fut tardive (deux dernières semaines de Juin). Ces dates furent sélectionnées par rapport aux dates des relevés de Mai. La campagne de Mai aurait dû également être faite plus tôt mais par manque de moyen humains, elle fut retardée. Les campagnes de Mai et de Juin ne devaient pas se suivre il a donc fallu attendre fin Juin pour la dernière. Il serait plus pertinent de la réaliser une ou deux semaines plus tôt. Ainsi, le calendrier des suivis peut aussi expliquer la faiblesse des résultats sur les pucerons.

Cette année, aucune méthode efficace de piégeage des limaces ne fut mise en place dans les champs. En effet, les pots Barber n'ont pas piégé suffisamment d'individus pour permettre de réaliser des tests statistiques fiables. Il sera donc intéressant, pour les prochaines années de SoilServ, d'installer des pièges plus adaptés. L'INRA effectue des piégeages à l'aide de piège dit « Bayer », qui sont des feutres avec une face en aluminium, humidifiées de 50 cm de côté



fixées au sol par des sardines. Ce type de piège pourrait fournir un indicateur plus pertinent et utilisable de la densité de limaces présentes dans la parcelle.

### C) Interactions entre carabes et auxiliaires de cultures

Les prédateurs des vers de terre sont nombreux et diversifiés. Il a notamment été prouvé que certains carabes pouvaient en consommer (Symondson et al., 2000), ainsi que des araignées (Nyfeller, 2001). La régulation des espèces de vers de terre par les carabes étudiés par effet *top-down* reste cependant hypothétique. Une autre explication aux effets négatifs des abondances d'espèces de carabes comme *Anchomenus dorsalis* ou *Nebria salina* sur le taux d'accroissement de vers de terre, notamment de petits endogés (ACCT) et d'épi-anéciques (LC, LRR) serait que leur présence indique des paramètres environnementaux défavorables à ces vers.

Les espèces *Anchomenus dorsalis* et *Asaphidion gr. flavipes* se distinguent par une corrélation négative de leur abondance avec le taux d'accroissement des populations de vers de terre. Ces effets négatifs peuvent être interprétés comme directs (consommation) ou indirects (marqueur d'un milieu de vie défavorisant les proies, limitation des ressources des proies ou favorisation de prédateurs directs des proies, par exemple). Alors que les vers de terre se nourrissent surtout de matière morte (Shipitalo et al., 1988, Martin et al., 1992), les deux espèces discutées ici ont un régime carnivore, parfois complété marginalement de végétaux. Ainsi, la limitation du taux d'accroissement des vers de terre par ces espèces de carabes par effet *bottom-up* semble peu vraisemblable.

Il semble que le régime alimentaire d'*Anchomenus dorsalis* puisse comprendre des vers (Laroche, 1990), quand celui des *Asaphidion* est principalement composé de collemboles et d'autres coléoptères. Ainsi, la consommation directe semble être l'explication la plus plausible pour cette espèce-ci, qui consommerait effectivement des vers de terre. Il est cependant à noter que l'effet d'*Anchomenus dorsalis* est inversé pour l'abondance totale et pour celle des juvéniles. D'autre part, les anéciques et épi-anéciques peuvent avoir un effet positif sur les collemboles, les galeries leur fournissant des échappatoires contre la prédation, notamment des carabes collemboles (Salmon et al., 2010). Ainsi, ces carabes seraient défavorisés en présence de nombreux anéciques. La relation négative observée pour *Asaphidion gr. flavipes* ici pourrait également être issue de ce processus.

*Demetrias atricapillus* semble pouvoir consommer des vers de terre épigés. Le manque de littérature sur cette espèce empêche cependant de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Certains carabes, comme *Loricera pilicornis* semblent favoriser le taux d'accroissement des vers de terre entre Mars et Mai. Plusieurs interprétations sont également possibles. De même que précédemment, il est possible que certains paramètres environnementaux favorables à cette espèce le soient pour les vers. *Loricera pilicornis* étant un carnivore généraliste (collemboles, araignées, diptères, autres coléoptères), il est également plausible que cette espèce consomme des prédateurs directs de vers de terre (notamment d'épi-anéciques). Cette hypothèse est cependant à nuancer du fait qu'un effet négatif fut observé sur les vers juvéniles et l'abondance totale. Ces inversions pourraient être dues au fait que *Loricera pilicornis* et *Anchomenus*



*dorsalis* ne consomment que certains types de vers de terre. Il est à noter que les *Nebrias spp.* peuvent effectivement avoir des lombrics dans leur régime alimentaire (Laroche, 1990). Dans notre cas, les effets de *N. salina* et de *N. brevicollis* sont toujours inversés. Vis-à-vis des vers de terre, ces deux espèces auraient un comportement opposé. La littérature indique seulement que *Nebria brevicollis*, malgré les effets positifs constatés, consomme des vers de terre. Les différentes espèces de *Nebria spp.* semblent cependant avoir des régimes alimentaires similaires (Laroche, 1990). La différence constatée dans nos résultats serait alors due à une simple faiblesse du jeu de données, présentant trop peu de points pour dégager un effet fiable, et une répartition des *Nebria spp.* déséquilibrée. Il serait cependant intéressant de creuser le rôle de ces carabes.

Le caractère nocturne de certains carabes peut également influencer les prédatons. En effet, le vers épi-anéciques ne ressortent en surface que lorsque les conditions sont favorables, c'est-à-dire par temps frais et humide. La nuit serait donc, pour les carabes, le moment opportun pour consommer ce type de vers. Parmi les espèces de carabes citées, *Anchomenus dorsalis*, *Loricera pilicornis* et les *Nebrias spp.* présentent une activité nocturne. Cela soutiendrait l'hypothèse d'une prédation des épi-anéciques par *Anchomenus*. Au contraire, alors qu'il était suspecté de prédateur les épi-anéciques, *Asaphidion gr. flavipes* n'est actif, selon la littérature, qu'en journée (Marie, 2012). Comme supposé plus haut, un processus écologique plus complexe serait à l'origine de la relation constatée dans nos résultats.

Enfin, pour ce qui est des effets des araignées et des staphylins, nous nous contenterons de noter l'intérêt d'aller plus loin dans l'identification de ces taxons pour pouvoir discuter d'éventuels effets sur les vers de terre. Tout comme pour les carabes, cet ordre et cette famille contiennent autant d'espèces que de rôles écologiques potentiellement différents en agroécosystèmes, limitant l'interprétation à ce stade. Nous nous satisferons ainsi de noter que les seuls effets significatifs trouvés pour les araignées étaient négatifs et de supposer alors une possible prédation, déjà notée dans la littérature (Nyffeler, 2001).

## D) Remarques et perspectives pour le projet

Le projet SoilServ est innovant, du fait de l'étude des interactions entre deux services : le biocontrôle et l'entretien de la qualité des sols. Peu d'études sur le long-terme abordent la complexité des interactions entre les différents compartiments de la macrofaune du sol, en lien avec les propriétés du sol lui-même et de la gestion des parcelles. Beaucoup de moyens techniques et humains ont été mis en œuvre pour ce projet cette année. Cependant, pour un projet d'une telle ampleur, une surveillance plus régulière de la biodiversité semble nécessaire à l'obtention de résultats fiables.

Dans l'idéal, un monitoring des carabes toutes les deux semaines et des vers de terre tous les mois en Mars, Avril et Mai serait bénéfique (Schirmel et al., 2010, Spence et Niemelä, 1994). Effectuer également une surveillance des limaces avec des pièges adaptés est primordial pour explorer la prédation des carabes sur ces-dernières. En outre, identifier en amont de l'étude les dates limites pour les différentes mesures permettrait d'éviter les écueils rencontrés,





concernant le suivi des populations de pucerons, notamment. Cela dit, toutes ces mesures sont très complexes à mettre en place et requièrent la disponibilité de beaucoup de personnel au même moment.

Beaucoup d'espèces composant la macrofaune du sol sont non seulement dépendantes du type de culture sur la parcelle, mais aussi du paysage. Il a été montré que les communautés les plus mobiles, comme celles des carabes réagissaient différemment à la fréquence d'éléments semi-naturels comme les haies. Ainsi, certains points près des haies, pouvant servir de lieu d'hibernation ou de passage, peuvent présenter des valeurs d'abondance biaisées. De plus, l'environnement direct autour de ces points n'est pas homogène. Le position des points n'étant pas modifiable, du fait de l'utilisation de données de 2013, il serait judicieux de prendre en compte dans les analyses des variables rendant compte du contexte paysager.

Pour toutes ces raisons, les résultats discutés sont à approfondir les prochaines années. En effet, beaucoup de paramètres non pris en compte dans cette étude (météo, proximité de traitements, ...) jouent sur la macrofaune du sol. En quelques points, les relevés de Mai ont été réalisés peu après un fongicide et ceux de Juin peu après un pesticide, ce qui impacte assurément la quantité de pucerons sur les plants.

Le modèle théorique qui sous-tend nos analyses possède certaines faiblesses. En effet, notre modèle suppose, par exemple, qu'un carabe puisse consommer une infinité de proie et ne prend pas non plus en compte les faibles probabilités de rencontre en cas de faibles abondances. De plus, les approximations effectuées pour gérer les nombreuses valeurs nulles et ajuster les modèles linéaires (transformer les 0 en 0,01) biaisent probablement les résultats. La méthode de sélection de variables est également critiquable. En fonction du but visé (simple prédiction ou identification de variables explicatives), le choix d'une seule méthode de sélection semble judicieux. MuMin permet d'inclure l'effet de plus de paramètres et d'expliquer plus en détail les données, en revanche, il ne s'agit que de tests linéaires. Cubist permet de contourner cette limite et peut rendre compte d'effets plus complexes.



## V - Conclusion :

---

Mon rôle était (1) d'identifier les paramètres environnementaux orientant l'activité-densité des carabes et (2) de caractériser les interactions entre des carabidés avec les ravageurs et des auxiliaires en cultures de blé d'hiver, puis d'identifier leurs impacts sur les services écosystémiques.

Pour apporter une réponse à la première question, nous pouvons (i) reconnaître les effets des caractéristiques de l'habitat sur les abondances de carabes (notamment pour la température, le pH, la diversité culturale dans la rotation, l'humidité, la densité apparente et la biomasse microbienne), (ii) que cette sélection est également très souvent fonction des traits écologiques des différentes espèces de carabes et (iii) des pratiques culturales comme le labour.

Ainsi, la diversification des cultures dans les rotations permet l'apport d'espèces de carabes diverses dans la parcelle. Le travail du sol du sol discrimine les espèces de carabes et leurs proies selon leurs tailles. De paramètres comme le pH et la température, la teneur en eau massique du sol et la densité apparente modifie la qualité des habitats pour les carabidés, à l'état larvaire et adulte. Certains de ces paramètres ont également un effet indirect sur les populations de carabidés car ils modifient également l'habitat de leurs proies.

Nous avons également pu apporter certains éléments de réponse à la deuxième question. Pour ce qui est des ravageurs en général (limaces en particuliers), de meilleures méthodes de capture et des dates de comptage plus appropriées (pour les pucerons) préciseraient les résultats. En ce qui concerne les interactions avec les vers de terre, quelques éléments sont notables. *Anchomenus dorsalis* pourrait avoir un effet sur la dynamique des populations de vers épi-anéciques. L'étude suggère également l'effet d'autres espèces (*Loricera pilicornis* et *Nebria sp.* notamment) qu'il conviendra de confirmer par des études ultérieures.

Cette étude manque cruellement de répétitions temporelles, en particulier dans le comptage de carabes et de ravageurs. Le principal moyen de pallier ce problème serait d'effectuer plus de relevés, mais cela demanderait encore plus de moyens humains. Un autre moyen serait de concentrer les efforts, pour tous les échantillonnages, sur un ou deux types de cultures, afin de réduire le nombre de points échantillonnés.

Pour conclure, certaines espèces de carabes se répartissent sur la zone d'étude en fonction de paramètres édaphiques et environnementaux. La consommation de ravageurs, comme d'auxiliaires de cultures fut envisagée, supposant des impacts positifs sur certains services écosystémiques (biocontrôle notamment) et négatifs sur d'autres (services rendus par les vers de terre). Cela dit, la consommation de vers de terre semble marginale. La répercussion sur les services écosystémiques reste donc à prouver. Cependant, au vu de nos résultats, nous pouvons faire l'hypothèse qu'une présence importante de carabidés réduirait l'apport des populations de vers de terre au service d'entretien de la qualité des sols.



# Bibliographie

---

- Adhikari, K., Hartemink, A.E., 2016. Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma* 262, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- AGRESTE Bretagne, 2015. Tableaux de l'agriculture bretonne. Direction régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R5316A02.pdf>
- Al Hassan, D., Georgelin, E., Delattre, T., Burel, F., Plantegenest, M., Kindlmann, P., Butet, A., 2013. Does the presence of grassy strips and landscape grain affect the spatial distribution of aphids and their carabid predators? *Agricultural and Forest Entomology* 15, 24–33. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2012.00587.x>
- Alignier, A., Raymond, L., Deconchat, M., Menozzi, P., Monteil, C., Sarthou, J.-P., Vialatte, A., Ouin, A., 2014. The effect of semi-natural habitats on aphids and their natural enemies across spatial and temporal scales. *Biological Control* 77, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.06.006>
- Aviron, S., Burel, F., Baudry, J., Schermann, N., 2005. Carabid assemblages in agricultural landscapes: impacts of habitat features, landscape context at different spatial scales and farming intensity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 108, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.02.004>
- Barrios, E., 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64, 269–285. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>
- Batáry, P., Holzschuh, A., Orsi, K.M., Samu, F., Tscharntke, T., 2012. Responses of plant, insect and spider biodiversity to local and landscape scale management intensity in cereal crops and grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 146, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.018>
- Bennett, E.M., Peterson, G.D., Gordon, L.J., 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services: Relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters* 12, 1394–1404. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>
- Bilde, T., Toft, S., 1997. Consumption by carabid beetles of three cereal aphid species relative to other prey types. *Entomophaga* 42, 21–32. <https://doi.org/10.1007/BF02769876>
- Blitzer, E.J., Dormann, C.F., Holzschuh, A., Klein, A.-M., Rand, T.A., Tscharntke, T., 2012. Spillover of functionally important organisms between managed and natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 146, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.09.005>
- Bohan, D.A., Bohan, A.C., Glen, D.M., Symondson, W.O., Wiltshire, C.W., Hughes, L., 2000. Spatial dynamics of predation by carabid beetles on slugs. *Journal of Animal Ecology* 69, 367–379. <https://www.jstor.org/stable/2693471>
- Bohan, D.A., Boursault, A., Brooks, D.R., Petit, S., 2011. National-scale regulation of the weed seedbank by carabid predators: Carabid seed predation. *Journal of Applied Ecology* 48, 888–898. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02008.x>
- Bouthier, A., Pelosi, C., Villenave, C., Peres, G., Hedde, M., Ranjard, L., Vian, J.F., Peigne, J., Cortet, J., Bispo, A., 2014. Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. Faut-il travailler le sol 85–108. [https://www.researchgate.net/profile/Mickael\\_Hedde/publication/270895717\\_Impact\\_du\\_travail\\_du\\_sol\\_sur\\_son\\_fonctionnement\\_biolgique/links/551026f60cf27d62b913a670.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mickael_Hedde/publication/270895717_Impact_du_travail_du_sol_sur_son_fonctionnement_biolgique/links/551026f60cf27d62b913a670.pdf)
- 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: Pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters* 14, 922–932. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01642.x>
- Collins, K.L., Boatman, N.D., Wilcox, A., Holland, J.M., Chaney, K., 2002. Influence of beetle banks on cereal aphid predation in winter wheat. *Agriculture, ecosystems & environment* 93, 337–350. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00340-1)
- Decaëns, T., Dutoit, T., Alard, D., Lavelle, P., 1998. Factors influencing soil macrofaunal communities in post-pastoral successions of western France. *Applied Soil Ecology* 9, 361–367. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00090-0)
- Deconchat, M., Vialatte, A., Brin, A., Sheeren, D., 2015. Concepts et méthodes de l'écologie des paysages pour aider à mieux gérer les services écosystémiques. 42p. [http://oatao.univ-toulouse.fr/17491/1/deconchat\\_17491.pdf](http://oatao.univ-toulouse.fr/17491/1/deconchat_17491.pdf)
- Deraison, H., 2010. Analyse de la structure de la communauté de Carabidae en système céréalier intensif. Université Rennes 1. 32p. [https://osur.univ-rennes1.fr/EFCE/e107\\_files/downloads/2010\\_stage\\_Deraison\\_Helene.pdf](https://osur.univ-rennes1.fr/EFCE/e107_files/downloads/2010_stage_Deraison_Helene.pdf)
- Driscoll, D.A., 2010. Few beetle species can be detected with 95% confidence using pitfall traps. *Austral Ecology* 35, 13–23. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.02007.x>
- Dufлот, R., 2013. Hétérogénéité fonctionnelle et biodiversité : quel est le rôle des interfaces ou lisières dans les paysages agricoles ? (PhD Thesis). Université Rennes 1. 157p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01019974/document>
- Fawki, S., Smerup, S., Toft, S., 2005. Food preferences and food value for the carabid beetles *Pterostichus melanarius*, *P. versicolor* and *Carabus nemoralis*, in : Proceedings of the 11th European Carabidologist Meeting. European Carabidology 2003. DIAS Report. pp. 99–109. [https://www.researchgate.net/profile/Shams\\_Fawki/publication/261171431\\_Food\\_preferences\\_and\\_food\\_value](https://www.researchgate.net/profile/Shams_Fawki/publication/261171431_Food_preferences_and_food_value)



[for the carabid beetles \*Pterostichus melanarius\* P. \*versicolor\* and \*Carabus nemoralis\*/links/00b495346ae050527a000000.pdf](#)

- Fox, C.J.S., MacLellan, C.R., 1956. Some Carabidae and Staphylinidae Shown to Feed on a Wireworm, *Agriotes sputator* (L.), by the Precipitin Test. *The Canadian Entomologist* 88, 228–231. <https://doi.org/10.4039/Ent88228-5>
- Frank, T., Reichhart, B., 2004. Staphylinidae and Carabidae overwintering in wheat and sown wildflower areas of different age. *Bulletin of Entomological Research* 94, 209–217. <https://doi.org/10.1079/BER2004301>
- French, B.W., Elliott, N.C., Berberet, R.C., Burd, J.D., 2001. Effects of riparian and grassland habitats on ground beetle (Coleoptera: Carabidae) assemblages in adjacent wheat fields. *Environmental Entomology* 30, 225–234. <https://naldc.nal.usda.gov/download/3996/PDF>
- García, A.F., Griffiths, G.J., Thomas, C.G., 2000. Density, distribution and dispersal of the carabid beetle *Nebria brevicollis* in two adjacent cereal fields. *Annals of Applied Biology* 137, 89–97. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2000.tb00040.x>
- Garcin, A., Picault, S., Ricard, J.-M., 2011. Le Point sur les carabes : les carabes en cultures fruitières et légumières. *Le Point sur* 31, Ctifl, 8p. <https://www.animateur-nature.com/Sites/pdf/PSCarabes.pdf>
- Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W.W., Emmerson, M., Morales, M.B., Ceryngier, P., Liira, J., Tschardt, T., Winqvist, C., Eggers, S., Bommarco, R., Pärt, T., Bretagnolle, V., Plantegenest, M., Clement, L.W., Dennis, C., Palmer, C., Oñate, J.J., Guerrero, I., Hawro, V., Aavik, T., Thies, C., Flohre, A., Hänke, S., Fischer, C., Goedhart, P.W., Inchausti, P., 2010. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic and Applied Ecology* 11, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.12.001>
- Groot, J.C.J., Yalaw, S.G., Rossing, W.A.H., 2018. Exploring ecosystem services trade-offs in agricultural landscapes with a multi-objective programming approach. *Landscape and Urban Planning* 172, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.12.008>
- Hatten, T.D., Bosque-Pérez, N.A., Labonte, J.R., Guy, S.O., Eigenbrode, S.D., 2007. Effects of Tillage on the Activity Density and Biological Diversity of Carabid Beetles in Spring and Winter Crops. *Environmental Entomology* 36, 356–368. [https://doi.org/10.1603/0046-225X\(2007\)36\[356:EOTOTA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2007)36[356:EOTOTA]2.0.CO;2)
- Holland, J.M., Perry, J.N., Winder, L., 1999. The within-field spatial and temporal distribution of arthropods in winter wheat. *Bulletin of Entomological Research* 89, 499–513. <https://doi.org/10.1017/S0007485399000656>
- Holland, J.M., Winder, L., Woolley, C., Alexander, C.J., Perry, J.N., 2004. The spatial dynamics of crop and ground active predatory arthropods and their aphid prey in winter wheat. *Bulletin of Entomological Research* 94, 419–431. <https://doi.org/10.1079/BER2004323>
- Holland, J.M., Luff, M.L., 2000. The effects of agricultural practices on Carabidae in temperate agroecosystems. *Integrated Pest Management Reviews* 5, 109–129. <https://doi.org/10.1023/A:1009619309424>
- Holopainen, J.K., Bergmann, T., Hautala, E.-L., Oksanen, J., 1995. The ground beetle fauna (Coleoptera : Carabidae) in relation to soil properties and foliar fluoride content in spring cereals. *Pedobiologia* 39, 193–206. [https://www.researchgate.net/publication/277202200\\_Ground\\_beetle\\_Coleoptera\\_Carabidae\\_diversity\\_in\\_Finnish\\_arable\\_land](https://www.researchgate.net/publication/277202200_Ground_beetle_Coleoptera_Carabidae_diversity_in_Finnish_arable_land)
- Jarošik, A.H.V., 2000. The role of crop density, seed and aphid presence in diversification of field communities of Carabidae (Coleoptera). *Eur. J. Entomol* 97, 517–525. <https://www.eje.cz/pdfs/eje/2000/04/13.pdf>
- Joern, A., Laws, A.N., 2013. Ecological Mechanisms Underlying Arthropod Species Diversity in Grasslands. *Annual Review of Entomology* 58, 19–36. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153540>
- Juen, A., Traugott, M., 2007. Revealing species-specific trophic links in soil food webs: molecular identification of scarab predators: identifying below-ground predators of scarabs. *Molecular Ecology* 16, 1545–1557. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03238.x>
- Kamenova, S., Leroux, C., Polin, S.E., Plantegenest, M., 2018. Community-wide stable isotope analysis reveals two distinct trophic groups in a service-providing carabid community. *Bulletin of Entomological Research* 108, 130–139. <https://doi.org/10.1017/S0007485317000542>
- King, R.A., Vaughan, I.P., Bell, J.R., Bohan, D.A., Symondson, W.O.C., 2010. Prey choice by carabid beetles feeding on an earthworm community analysed using species- and lineage-specific PCR primers. *Molecular Ecology* 19, 1721–1732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04602.x>
- Koivula, M., 2011. Useful model organisms, indicators, or both? Ground beetles (Coleoptera, Carabidae) reflecting environmental conditions. *ZooKeys* 100, 287–317. <https://doi.org/10.3897/zookeys.100.1533>
- Kotze, D.J., Brandmayr, P., Casale, A., Dauffy-Richard, E., Dekoninck, W., Koivula, M., Lövei, G., Mossakowski, D., Noordijk, J., Paarmann, W., Pizzoloto, R., Saska, P., Schwerk, A., Serrano, J., Szyszko, J., Taboada Palomares, A., Turin, H., Venn, S., Vermeulen, R., Zetto Brandmayr, T., 2011. Forty years of carabid beetle research in Europe – from taxonomy, biology, ecology and population studies to bioindication, habitat assessment and conservation. *ZooKeys* 100, 55–148. <https://doi.org/10.3897/zookeys.100.1523>
- Kromp, B., 1989. Carabid beetle communities (Carabidae, Coleoptera) in biologically and conventionally farmed agroecosystems, in *Agricultural Ecology and Environment*. Elsevier, pp. 241–251.



- Kulkarni, S.S., Dodsall, L.M., Spence, J.R., Willenborg, C.J., 2017. Field density and distribution of weeds are associated with spatial dynamics of omnivorous ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 236, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.018>
- Labruyere, S., 2016. Déterminants multi-échelles de la dynamique spatio-temporelle des coléoptères carabiques prédateurs de graines d'adventices (PhD Thesis). Université de Bourgogne. 233p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01424305v2/document>
- Landis, D.A., Wratten, S.D., Gurr, G.M., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual review of entomology* 45, 175–201. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.45.1.175>
- Lang, A., 2003. Intraguild interference and biocontrol effects of generalist predators in a winter wheat field. *Oecologia* 134, 144–153. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1091-5>
- Lange, M., Gossner, M.M., Weisser, W.W., 2011. Effect of pitfall trap type and diameter on vertebrate by-catches and ground beetle (Coleoptera: Carabidae) and spider (Araneae) sampling: Reducing by-catches in pitfall traps. *Methods in Ecology and Evolution* 2, 185–190. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00062.x>
- Larochelle, A., 1990. The food of carabid beetles (Coleoptera: Carabidae, including Cidelinae). 132p. <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbm9sYXJvY2h1bGxlbGFyaXZpZXJlGd4OjEyMjVjYzFhMmWQlNWY3NjY>
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.-P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology* 42, S3–S15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Lin, S., Wu, R., Yang, F., Wang, J., Wu, W., 2018. Spatial trade-offs and synergies among ecosystem services within a global biodiversity hotspot. *Ecological Indicators* 84, 371–381. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.007>
- Lott, D.A., Anderson, R., 2011. The Staphylinidae (rove beetles) of Britain and Ireland. Royal Entomological Society. Vol. 12, Part 5 (100p) & Part 7 (340p).
- Lövei, G.L., Sunderland, K.D., 1996. Ecology and behavior of ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *Annual review of entomology* 41, 231–256. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.41.010196.001311>
- Lövei, G.L., Toft, S., Axelsen, J.A., 2005. Composition and diversity of spring-active carabid beetle assemblages in relation to soil management in organic wheat fields in Denmark, in: *European Carabidology 2003. Proceedings of the 11th European Carabidologists' Meeting, Aarhus, July 2003. DIAS Reports. Danish Institute of Agricultural Sciences*, pp. 173–182. <http://orgprints.org/10374/1/10374.pdf>
- Luff, M.L., Eyre, M.D., Rushton, S.P., 1992. Classification and prediction of grassland habitats using ground beetles (Coleoptera, Carabidae). *Journal of Environmental Management* 35, 301-315. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(11\)80012-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(11)80012-5)
- Marie, A., 2012. Paysage et traits d'histoire de vie chez les coléoptères carabiques. *Sciences agricoles*. 34p. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00743133/document>
- Martin, A., Balesdent, J., Mariotti, A., 1992. Earthworms diet related to soil organic matter dynamics through <sup>13</sup>C measurements. *Oecologia* 91, 23-29. <https://doi.org/10.1007/BF00317236>
- Menalled, F.D., Lee, J.C., Landis, D.A., 2018. Herbaceous filter strips in agroecosystems: implications for ground beetle (Coleoptera: Carabidae) conservation and invertebrate weed seed predation. *The Great Lakes Entomologist* 34, 11. <https://scholar.valpo.edu/tgle/vol34/iss1/11>
- Milius, M., Merivee, E., Williams, I., Luik, A., Mänd, M., Must, A., 2006. A new method for electrophysiological identification of antennal pH receptor cells in ground beetles: the example of *Pterostichus aethiops* (Panzer, 1796)(Coleoptera, Carabidae). *Journal of insect physiology* 52, 960–967. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2006.06.003>
- Millennium Ecosystem Assessment (Program) (Ed.), 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington, DC. 155p. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Mulder, C., Sechi, V., Woodward, G., Bohan, D.A., 2017. 14 Ecological Networks in Managed Ecosystems : Connecting Structure to Services. *Adaptive food webs : stability and transitions of real and model ecosystems, Part II*, 214-227. <https://doi.org/10.1017/9781316871867.016>
- Navntoft, S., Esbjerg, P., Riedel, W., 2006. Effects of reduced pesticide dosages on carabids (Coleoptera: Carabidae) in winter wheat. *Agricultural and Forest Entomology* 8, 57–62. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9555.2006.00282.x>
- Nyffeler, M., Moor, H., Foelix, R.F., 2001. Spiders feeding on earthworms. *Journal of Arachnology* 29, 119–124. [https://doi.org/10.1636/0161-8202\(2001\)029\[0119:SFOE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1636/0161-8202(2001)029[0119:SFOE]2.0.CO;2)
- Oberholzer, F., Frank, T., 2003. Predation by the Carabid Beetles *Pterostichus melanarius* and *Poecilus cupreus* on Slugs and Slug Eggs. *Biocontrol Science and Technology* 13, 99–110. <https://doi.org/10.1080/0958315021000054421>
- Poggi, S., Le Cointe, R., Riou, J.-B., Larroudé, P., Thibord, J.-B., Plantegenest, M., 2018. Relative influence of climate and agroenvironmental factors on wireworm damage risk in maize crops. *Journal of Pest Science* 91, 585–599. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0951-7>





- Rabourdin, N., Dor, C., Maillet-Mezeray, J., 2011. Impact des pratiques et des aménagements sur l'abondance et la diversité des carabidés. Méthodologie de suivi des entomophages. Colloque de restitution du programme CASDAR – 17 novembre 2011. 19-26. [http://www.rmt-biodiversite-agriculture.fr/moodle/pluginfile.php/337/mod\\_resource/content/2/actes.pdf](http://www.rmt-biodiversite-agriculture.fr/moodle/pluginfile.php/337/mod_resource/content/2/actes.pdf)
- Raitif, J., 2015. Influence des prairies sur le service de régulation des ravageurs en cultures de blé adjacentes. (PhD Thesis). [https://www.researchgate.net/profile/Julien\\_Raitif/publication/284720510\\_Grasslands\\_effect\\_on\\_biological\\_control\\_service\\_in\\_adjacent\\_wheat\\_fields/links/5657261f08ae1ef9297b9bbf/Grasslands-effect-on-biological-control-service-in-adjacent-wheat-fields.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Julien_Raitif/publication/284720510_Grasslands_effect_on_biological_control_service_in_adjacent_wheat_fields/links/5657261f08ae1ef9297b9bbf/Grasslands-effect-on-biological-control-service-in-adjacent-wheat-fields.pdf)
- Roger, J.-L., Jambon, O., Bouger, G., 2013. Clé de détermination des carabidés, paysages agricoles du nord-ouest de la France. 256p. [https://osur.univ-rennes1.fr/za-armorique/e107\\_files/public/cl\\_carabidae\\_nord\\_ouest\\_v4.pdf](https://osur.univ-rennes1.fr/za-armorique/e107_files/public/cl_carabidae_nord_ouest_v4.pdf)
- Salmon, S., Geoffroy, J.-J., Ponge, J.-F., 2010. Earthworms and collembola relationships : effects of predatory centipedes and humus forms. *Soil Biology and Biochemistry*, Elsevir 37, 487-495. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00496576/document>
- Schellhorn, N.A., Bianchi, F.J.J.A., Hsu, C.L., 2014. Movement of Entomophagous Arthropods in Agricultural Landscapes: Links to Pest Suppression. *Annual Review of Entomology* 59, 559–581. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011613-161952>
- Schellhorn, N.A., Parry, H.R., Macfadyen, S., Wang, Y., Zalucki, M.P., 2015. Connecting scales: Achieving in-field pest control from areawide and landscape ecology studies: Connecting scales. *Insect Science* 22, 35–51. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12161>
- Scheu, S., Theenhaus, A., Jones, T.H., 1999. Links between the detritivore and the herbivore system : effects of earthworms and Collembola on plant growth and aphid development. *Oecologia* 119, 541–551. <https://doi.org/10.1007/s004420050817>
- Schirmel, J., Blindow, I., Buchholz, S., 2012. Life-history trait and functional diversity patterns of ground beetles and spiders along a coastal heathland successional gradient. *Basic and Applied Ecology* 13, 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2012.08.015>
- Schirmel, J., Lenze, S., Katzmann, D., Buchholz, S., 2010. Capture efficiency of pitfall traps is highly affected by sampling interval: Pitfall trap catch and sampling interval. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 136, 206–210. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2010.01020.x>
- Schneider, G., Krauss, J., Steffan-Dewenter, I., 2013. Predation rates on semi-natural grasslands depend on adjacent habitat type. *Basic and Applied Ecology* 14, 614–621. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2013.08.008>
- Shipitalo, M.J., Protz, R., Tomlin, D., 1988. Effect of diet on the feeding and casting activity of *Lumbricus Terrestris* and *L. Rubellus* in laboratory culture. *Soil Biology Biochemistry* 20, 233-237. [https://ac.els-cdn.com/0038071788900429/1-s2.0-0038071788900429-main.pdf?\\_tid=4cb4afee-13b2-4c8a-a5da-fece701f0b06&acdnat=1534498740\\_c16c08e78d8aaf4d15bf27e7f7fd738d](https://ac.els-cdn.com/0038071788900429/1-s2.0-0038071788900429-main.pdf?_tid=4cb4afee-13b2-4c8a-a5da-fece701f0b06&acdnat=1534498740_c16c08e78d8aaf4d15bf27e7f7fd738d)
- Spence, J.R., Niemelä, J.K., 1994. Sampling carabid assemblages with pitfall traps : the madness and the method. *The Canadian Entomologist* 126, 881–894. <https://doi.org/10.4039/Ent126881-3>
- Symondson, W.O.C., 1994. The potential of *Abax parallelepipedus* (Col. : Carabidae) for mass breeding as a biological control agent against slugs. *Entomophaga* 39, 323–333. <https://doi.org/10.1007/BF02373037>
- Symondson, W.O.C., Glen, D.M., Erickson, M.L., Liddell, J.E., Langdon, C.J., 2000. Do earthworms help to sustain the slug predator *Pterostichus melanarius* (Coleoptera: Carabidae) within crops? Investigations using monoclonal antibodies. *Molecular Ecology* 9, 1279–1292. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1365-294x.2000.01006.x>
- The Quintessence Consortium, 2016. Networking Our Way to Better Ecosystem Service Provision. *Trends in Ecology & Evolution* 31, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.12.003>
- Thiele, H.U., 2012. Carabid beetles in their environments : a study on habitat selection by adaptations in physiology and behaviour. Springer Science & Business Media. 370p.
- Thies, C., Haenke, S., Scherber, C., Bengtsson, J., Bommarco, R., Clement, L.W., Ceryngier, P., Dennis, C., Emmerson, M., Gagic, V., 2011. The relationship between agricultural intensification and biological control : experimental tests across Europe. *Ecological Applications* 21, 2187–2196. <https://doi.org/10.1890/10-0929.1>
- Toft, S., 1995. Value of the Aphid *Rhopalosiphum padi* as Food for Cereal Spiders. *The Journal of Applied Ecology* 32, 552-560. <https://doi.org/10.2307/2404652>
- Walter, C., Bispo, A., Chenu, C., Langlais-Hesse, A., Schwartz, C., 2015. Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. *Agriculture et Foncier-Concurrences entre Usages des sols et entre Usagers des sols Agricoles : La Question Foncière Renouvelée*, ed C. Demeter (Paris : Cahier Demeter) 51–68. <https://prodinra.inra.fr/?id={EDC5BFDD-96F8-4E6D-92EB-00AABA63B3D6}&original=true>
- Winder, L., Alexander, C.J., Holland, J.M., Symondson, W.O.C., Perry, J.N., Woolley, C., 2005. Predatory activity and spatial pattern : the response of generalist carabids to their aphid prey. *Journal of Animal Ecology* 74, 443–454. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2005.00939.x>



Yamazaki, K., Sugiura, S., Kawamura, K., 2003. Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) and other insect predators overwintering in arable and fallow fields in central Japan. Applied entomology and zoology 38, 449–459. <https://doi.org/10.1303/aez.2003.449>

Zou, K., Thébault, E., Lacroix, G., Barot, S., 2016. Interactions between the green and brown food web determine ecosystem functioning. Functional Ecology 30, 1454–1465. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12626>

## Annexes

### Annexe I – Tableau des espèces de carabes capturés.

**Classes de taille :** T1(<5mm) ; T2(5 à 10 mm) ; T3(10 à 15mm) ; T4(>15mm) // **Habitats (préférentiels) :** Mb=Milieux boisés ; Hh=Habitats humides ; Cu=Cultures céréalières ; Mr=Milieux rivulaires ; Hs=Habitats secs ; P=Prairie ; G=Généraliste // **Reproduction :** Période de reproduction (p=printemps ; au=automne) // **Locomotion :** Morphologie des ailes (Dimorphique=Ailé et non-aîlés existants ; Aptère=Espèce sans ailes ; CV=Capacité de vol avérée ; Ailé=Ailes présentes).

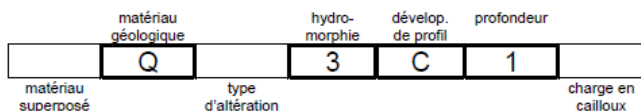
**Sources :** Laroche, 1990 ; Schirmel, 2012 ; Deraison, 2010 ; Marie, 2012 ; Garcin et al., 2011 ; Labryère, 2016.

Espèce	Abréviation	Mars	Mai	Juin	Régime alimentaire (Laroche, 1990)	Classe de taille (Schirmel, 2012)	Habitats (Deraison, 2010)	Reproduction	Locomotion (Marie, 2012)
Acupalpus luteatus	Ac_lu	0	1	0	Spécialiste collemboles	T1	NA	p	Dimorphique
Abax parallelepipedus	Ab_pa	0	0	0	Omnivore	T4	Mb	au	Aptère
Agonum muelleri	Ag_mu	4	4	2	Carnivore généraliste	T2	Mb	p	CV
Agonum nigrum	Ag_ni	0	1	0	Carnivore généraliste	T2	Hh	p	CV
Amara lunicollis	Am_lu	0	2	3	Phytophage	T2	Cu/Mb	p	CV
Amara montivaga	Am_mo	0	0	2	Phytophage	T2	Cu	p	Ailé
Amara communis	Am_co	0	0	5	Phytophage	T2	P	p	Ailé
Amara aenea	Am_ae	0	1	2	Phytophage	T2	Cu	p	CV
Amara similata	Am_si	0	0	0	Phytophage	T2	Cu	p	CV
Anchomenus dorsalis	An_do	0	10	6	Omnivore	T2	Cu	p	Ailé
Anisodactylus binotatus	An_bi	0	0	5	Carnivore généraliste	T3	Mr	p	CV
Asaphidion gr. flavipes	As_fl	10	17	6	Spécialiste collemboles	T1	Hh	p	Ailé
Bradycellus harpalinus	Br_ha	0	0	1	Omnivore	T1	Hh	au	Ailé
Calathus erratus	Ca_er	0	0	5	Carnivore généraliste	T3	Hs	au	Dimorphique
Calathus fuscipes	Ca_fu	0	0	4	Omnivore	T3	Mb	au	Dimorphique
Calathus gr. melanocephalus	Ca_me	0	0	9	Omnivore	T2	Cu	au	Dimorphique
Clivina gr. fossor	Cl_fo	0	0	1	Omnivore	T2	Cu/Mr	p	Dimorphique
Demetrias aticupillarlis	De_at	0	33	5	Spécialiste collemboles	T1	Hh	p	CV
Drypta dentata	Dr_de	0	1	0	Carnivore généraliste	T2	Hh	NA	Ailé
Harpalus affinis	Ha_af	0	7	18	Omnivore	T3	Cu/Mb	p	CV
Harpalus atratus	Ha_at	0	3	0	Phytophage	T3	Mb	p	Ailé
Harpalus distinguendus	Ha_di	1	0	0	Omnivore	T3	Cu	p	CV
Harpalus rubripes	Ha_ru	0	0	1	Omnivore	T2	G	au	NA
Leistus fulvibarbis	Le_fu	0	1	1	Spécialiste collemboles	T2	Mb	au	Dimorphique
Loricera pilicornis	Lo_pi	3	9	68	Spécialiste collemboles	T2	Cu/Mr	p	CV
Metallina lampros	Me_la	9	11	64	Omnivore	T1	G/Cu	p	Dimorphique
Metallina properans	Me_pr	2	3	35	Omnivore	T1	G/Cu	p	Dimorphique
Microlestes maurus	Mi_ma	0	0	12	Omnivore	T1	Hh	p	NA
Nebria brevicollis	Ne_br	0	51	9	Carnivore généraliste	T3	Mb	au	Ailé
Nebria salina	Ne_sa	2	45	2	Omnivore	T3	Mb	au	Ailé
Notiophilus biguttatus	No_bi	5	0	0	Spécialiste collemboles	T1	Cu/Mb	p	Dimorphique
Notiophilus quadripunctatus	No_qu	10	4	1	Spécialiste collemboles	T1	Hh	p	Dimorphique
Ocydromus tetracolum	Oc_te	4	0	1	Carnivore généraliste	T1	Mr	p	Dimorphique
Oxypselaphus obscurus	Ox_ob	0	0	2	Carnivore généraliste	T2	Hh	p	Ailé
Paranichus albipes	Pa_al	0	0	2	Carnivore généraliste	T2	Hh	p	Ailé
Parophonus maculicornis	Pa_ma	0	1	1	Omnivore	T2	Hs	p	CV
Phyla obtusa	Ph_ob	36	20	8	Omnivore	T1	NA	au	Dimorphique
Poecilus cupreus	Po_cu	20	166	272	Omnivore	T3	Cu	p	Dimorphique
Pseudoophonus rufipes	Ps_ru	0	5	60	Omnivore	T3	Cu	au	CV
Pterostichus anthracinus	Pt_an	2	0	0	Omnivore	T3	NA	NA	NA
Pterostichus diligens	Pt_di	0	0	0	Omnivore	T2	NA	p	Dimorphique
Pterostichus melanarius	Pt_me	3	2	109	Omnivore	T4	Cu	au	Dimorphique
Pterostichus niger	Pt_n	0	0	0	Omnivore	T4	Mb	au	Dimorphique
Pterostichus nigrita	Pt_ni	0	0	1	Carnivore généraliste	T2	Mb	p	Dimorphique
Pterostichus vernalis	Pt_ve	0	1	1	Omnivore	T2	G	p	Dimorphique
Pterostichus strenuus	Pt_st	0	0	0	Omnivore	T2	P	p	Dimorphique
Syntomus foveatus	Sy_fo	0	0	3	Carnivore généraliste	T1	Hs	NA	Aptère
Syntomus obscuroguttatus	Sy_ob	0	0	10	Carnivore généraliste	T1	NA	NA	CV
Synuchus vivalis	Sy_vi	0	0	12	Spécialiste collemboles	T2	NA	au	Dimorphique
Trechus gr. quadristriatus	Tr_qu	59	3	140	Spécialiste collemboles	T1	Cu/Mb	au	CV
<b>Totaux</b>		<b>170</b>	<b>402</b>	<b>889</b>					



## Annexe 2 – Précisions sur la méthode 4 critères utilisée à l'UMR SAS de l'INRA.

### CODIFICATION 4 CRITERES DU MASSIF ARMORICAIN : LE CODE TARIERE



#### Matériau géologique

Deux matériaux superposés peuvent être indiqués (LN pour limon sur schiste par ex.).

A. Argile, altérites épaisses	M. Marais (type marais du Mt-St-Michel)	W. Alluvions argileux
B. Cuirasse ferrugineuse	N. Schiste tendre (type Briovérien)	X. Quartz et poudingues
C. Calcaire	O. Schiste moyen (type Angers)	Y. Roches volcaniques
D. Dune sableuse d'origine marine	P. Schiste dur (type Pont-Réan)	Z. Matériau remanié par l'homme
E. Eboulis de pente	Q. Grès dur (type Armoricain)	
F. micaschiste	R. Schiste gréseux	
G. Granite	S. Sable	Si altération notable : de type arène : a de type altérite : t
H. Tourbe	T. Terrasse caillouteuse	
I. Gneiss	U. Matériau d'apport colluvial	
L. Limon	V. Matériau d'apport alluvial	

#### Type de solum (succession d'horizons)

- SOLS SANS DIFFERENCIATION TEXTURALE
  - N. LITHOSOLS (sols minéraux bruts, très superficiels)
  - R. RANKOSOLS (sols bruns organiques, superficiels, sous lande)
  - B. BRUNISOLS (sols bruns)
- DIFFERENCIATION RESULTANT DE PROCESSUS D'ILLUVIATION DE L'ARGILE
  - C. NEOLUVISOLS : BT en profondeur, avec  $1,3 < \text{IDT}^* < 1,8$  (sols bruns lessivés)
  - L. LUVISOLS TYPIQUES : BT en profondeur, avec  $\text{IDT}^* > 1,8$  (sols lessivés)
  - D. LUVISOLS DEGRADES :  $\text{IDT}^* > 1,8$  et E fortement décoloré et pénétrant en langues dans le BT (sols lessivés glossiques)
  - E. LUVISOLS-REDOXISOLS :  $\text{IDT}^* > 1,8$  et apparition d'un horizon - g à moins de  $50 \pm 10$  cm de profondeur (sols lessivés fortement dégradés)
- SOLS D'ACCUMULATION PROGRESSIVE DE MATERIAUX
  - U. COLLUVIOSOLS (sols d'apport colluvial)
  - V. FLUVIOSOLS-COLLUVIOSOLS (sols d'apport alluvial et colluvial)
  - W. FLUVIOSOLS-COLLUVIOSOLS argileux (sols d'apport alluvial et colluvial à texture très argileuse)
- P : Podzol, T : Tourbe

\*IDT (Indice de Différenciation Texturale) = teneur en argile horizon BT / teneur en argile horizon E)

Source : Méthode tarière, J.-M. RIVIERE et al, 1992

#### Profondeur du sol

La profondeur du sol se détermine par la profondeur d'apparition de l'horizon d'altération C ou de la roche mère R

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• SOLS PROFONDS</li> <li>Classe 1 : profondeur de plus d'1 m</li> <li>Classe 2 : de 80 cm à 1 m</li> <li>• SOLS MOYENNEMENT PROFONDS</li> <li>Classe 3 : de 60 à 80 cm</li> <li>Classe 4 : de 40 à 60 cm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• SOLS PEU PROFONDS</li> <li>Classe 5 : de 20 à 40 cm</li> <li>Classe 6 : moins de 20 cm</li> </ul> <p>Dans le cas de profondeur du sol se situant en limite de deux classes, c'est la classe la plus pénalisante qui est choisie.</p> |
|--|---|

#### Hydromorphie ou asphyxie par l'eau

##### SOLS PROFONDS

- SOLS SAINS
- Classe . ou 0 : absence, couleur homogène sans taches
- Classe 1 : taches d'oxydo-réduction à une profondeur supérieure à 80 cm de faible intensité
- Classe 2 : taches d'oxydo-réduction à une profondeur supérieure à 80 cm de forte intensité
- SOLS PEU HYDROMORPHES
- Classe 3 : taches d'oxydo-réduction à une profondeur comprise entre 40 et 80 cm de faible intensité
- SOLS MOYENNEMENT HYDROMORPHES
- Classe 4 : taches d'oxydo-réduction à une profondeur comprise entre 40 et 80 cm de forte intensité
- SOLS HYDROMORPHES
- Classe 5 : taches d'oxydo-réduction dès la surface de faible intensité
- Classe 6 : taches d'oxydo-réduction dès la surface de forte intensité
- Classe 7 : horizon(s) redoxique(s) (pseudogley) sur toute l'épaisseur du sol
- Classe 8 : horizon(s) réductique(s) (gley) ou histique(s) (tourbe) en profondeur
- Classe 9 : horizon(s) réductique(s) (gley) ou histique(s) (tourbe) à faible profondeur

##### SOLS PEU PROFONDS

- SOLS SAINS
  - Classe . ou 0 : absence, couleur homogène sans taches
  - SOLS PEU HYDROMORPHES
  - Classe 3 : taches d'oxydo-réduction au contact sol - matériau géologique
  - SOLS HYDROMORPHES
  - Classe 5 : taches d'oxydo-réduction dès la surface de faible intensité
  - Classe 6 : taches d'oxydo-réduction dès la surface de forte intensité
  - Classe 7 : horizon(s) redoxique(s) (pseudogley) sur toute l'épaisseur du sol
  - Classe 8 : présence d'horizon(s) réductique(s) (gley) ou histique(s) (tourbe)
  - Classe 9 : horizon(s) réductique(s) (gley) ou histique(s) (tourbe) sur toute l'épaisseur du sol
- Une hydromorphie existant en surface puis disparaissant peut être indiquée en indice (ex. : 1<sub>s</sub> ou 1<sub>f</sub> selon l'intensité)

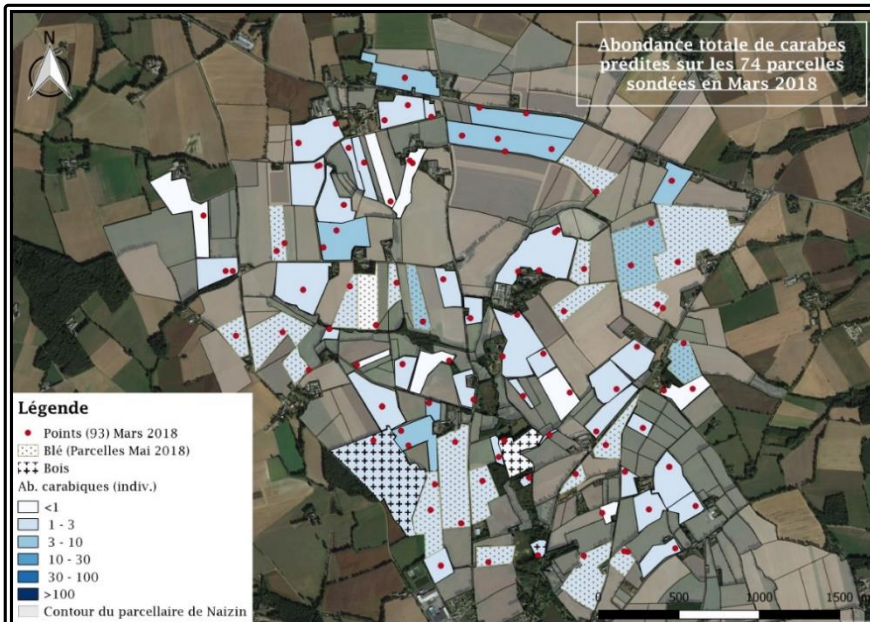
#### Charge en cailloux

L'indiquer si > 15%, utiliser pour sa nature le code matériau géologique.



# Annexe 3a – Cartographies des carabes selon les périodes – Abondance totales

Abondances totales en carabes aux trois périodes sondées (Mars, Mai et Juin) – Avec modèles correspondants (à droite)



**Modèle retenu pour l'abondance de carabes en Mars :**

$glm(formula = Ab\_Mars \sim Hyd\_2018 + LIM\_F + Occ\_2018 + Prof\_2018 + Temp, family = poisson())$

Deviance Residuals:  
Min IQ Median 3Q Max  
-2.3649 -1.1996 -0.3301 0.7006 3.1273

Coefficients:  
Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)

(Intercept) -6.204e+00 1.998e+00 -3.106 0.001898 \*\*  
Hyd\_20181 -8.548e-01 4.993e-01 -1.712 0.086911 .  
Hyd\_20182 -1.308e-01 4.396e-01 -0.298 0.766026  
Hyd\_20183 7.586e-01 2.032e-01 3.734 0.000189 \*\*\*  
Hyd\_20184 6.500e-01 3.216e-01 2.021 0.043295 \*  
Hyd\_20185 -3.908e-01 3.531e-01 -1.107 0.268369  
Hyd\_20186 -2.131e+00 7.426e-01 -2.870 0.004106 \*\*  
Hyd\_20187 -1.232e+00 6.188e-01 -1.992 0.046424 \*  
LIM\_F 1.393e-02 4.631e-03 3.007 0.002636 \*\*  
Occ\_2018C 2.596e-01 3.979e-01 0.652 0.514244  
Occ\_2018E -2.794e-01 4.287e-01 -0.652 0.514548  
Occ\_2018I 9.633e-01 3.854e-01 2.500 0.012429 \*  
Occ\_2018W -1.541e+01 1.186e+03 -0.013 0.989637  
Prof\_20182 -9.216e-01 2.715e-01 -3.395 0.000687 \*\*\*  
Prof\_20183 -4.551e-01 2.572e-01 -1.769 0.076830 .  
Prof\_20184 -8.612e-01 3.206e-01 -2.686 0.007235 \*\*  
Temp 3.125e-01 1.288e-01 2.426 0.015257 \*  
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1



**Modèle retenu pour l'abondance de carabes en Mai :**

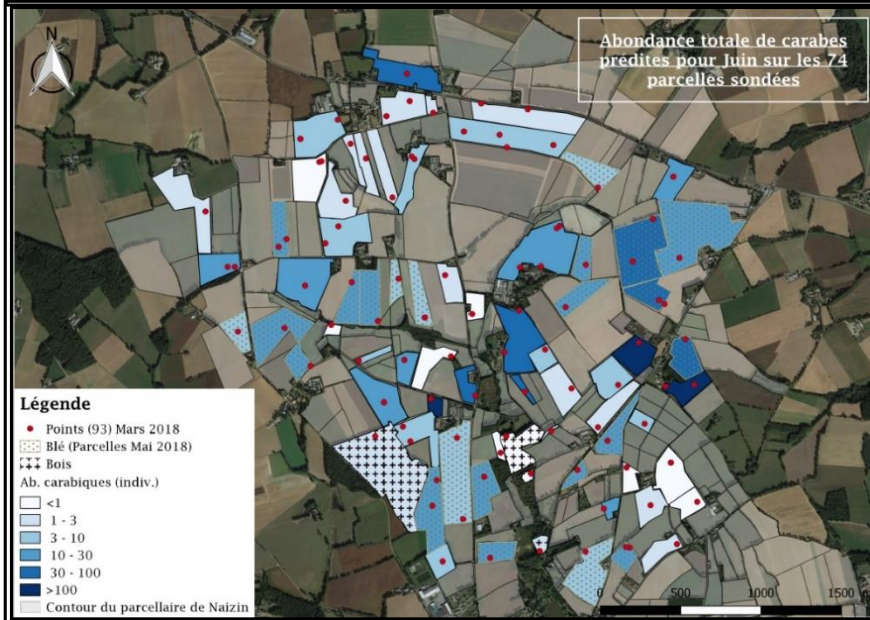
$glm(formula = `Abond (Mai)` \sim D\_TILL + BM + Temp + Prof\_2018 + HIST, family = poisson(), data = Car\_Env\_Mai)$

Deviance Residuals:  
Min IQ Median 3Q Max  
-2.6995 -1.3376 -0.1869 0.9108 3.6838

Coefficients:  
Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)

(Intercept) 5.999322 0.714057 8.402 <2e-16 \*\*\*  
D\_TILL -0.329267 0.103478 -3.182 0.00146 \*\*  
BM -0.003739 0.001456 -2.567 0.01026 \*  
Temp -0.237431 0.046323 -5.126 2.97e-07 \*\*\*  
Prof\_20182 -0.092865 0.371480 -0.250 0.80260  
Prof\_20183 0.936577 0.342515 2.734 0.00625 \*\*  
Prof\_20184 0.939732 0.319847 2.938 0.00330 \*\*  
HISTM 0.001642 0.193226 0.008 0.99322  
HISTMar 0.701875 0.163706 4.287 1.81e-05 \*\*\*  
HISTP 0.109840 0.265155 0.414 0.67869  
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1



**Modèle retenu pour l'abondance de carabes en Juin :**

$glm(formula = `Abond (Juin)` \sim D\_TILL + `ARG` + DA + `LIM\_G` + `LIM\_F` + SAB_F + HIST + BM + Hydrom_2018 + PH, family = poisson())$

Deviance Residuals:  
Min IQ Median 3Q Max  
-3.0724 -0.4877 0.0000 0.3543 2.0732

Coefficients:  
Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)

(Intercept) 16.469410 2.884659 5.709 1.13e-08 \*\*\*  
D\_TILL 1.005148 0.105867 9.494 <2e-16 \*\*\*  
`ARG` 0.022167 0.005615 3.948 7.88e-05 \*\*\*  
DA -4.791119 1.009368 -4.747 2.07e-06 \*\*\*  
`LIM\_G` -0.007231 0.002487 -2.908 0.003643 \*\*  
`LIM\_F` -0.025650 0.003776 -6.793 1.10e-11 \*\*\*  
SAB\_F -0.025587 0.005723 -4.471 7.80e-06 \*\*\*  
HISTM 0.885352 0.237806 3.723 0.000197 \*\*\*  
HISTMar 0.880339 0.160909 5.471 4.47e-08 \*\*\*  
HISTP 1.812909 0.217992 8.316 <2e-16 \*\*\*  
BM -0.013599 0.001840 -7.390 1.46e-13 \*\*\*  
Hydrom\_20181 1.236197 0.426469 2.899 0.003747 \*\*  
Hydrom\_20182 0.862900 0.191715 4.501 6.77e-06 \*\*\*  
Hydrom\_20183 0.195628 0.176082 1.111 0.266567  
Hydrom\_20184 0.213970 0.323710 0.661 0.508616  
Hydrom\_20185 1.042359 0.182644 5.707 1.15e-08 \*\*\*  
Hydrom\_20186 -0.120496 0.365884 -0.329 0.741907  
PH 0.424892 0.172679 2.461 0.013871 \*  
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1



## Annexe 3b – Cartographies des carabes selon les périodes – Richesses spécifiques

Richesses spécifiques en carabes aux trois périodes sondées (Mars, Mai et Juin) – Avec modèles correspondants (à droite)



**Modèle retenu pour la richesse spécifique en Mars :**

$glm(formula = RS\_Mars \sim Prof\_2018 + HIST + PH + DA + Ten\_eau)$

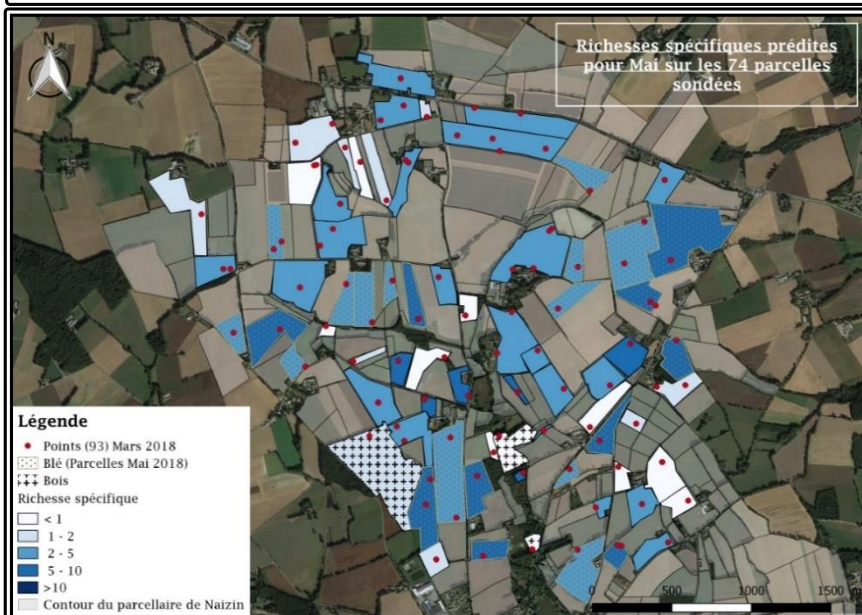
Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.64730	-0.63429	-0.02048	0.57535	3.10800

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	5.0925	2.9391	1.733	0.08716 .
Prof_20182	-0.7213	0.4149	-1.738	0.08613 .
Prof_20183	-0.5285	0.4127	-1.281	0.20415
Prof_20184	-1.4515	0.4577	-3.171	0.00218 **
HISTC	1.9633	1.1826	1.660	0.10096
HISTCul_Div	1.3229	1.2270	1.078	0.28435
HISTM	0.9917	1.2250	0.810	0.42067
HISTPP	0.7042	1.1764	0.599	0.55123
HISTPT	0.3494	1.1803	0.296	0.76801
PH	0.6286	0.3565	1.763	0.08179 .
DA	-5.2633	2.1385	-2.461	0.01609 *
Ten_eau	-4.4243	2.1531	-2.055	0.04329 *

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1



**Modèle retenu pour la richesse spécifique en Mars :**

$glm(formula = `RS (Mai)` \sim BM + Elem\_gr + DA, data = Car\_Env\_Mai, na.action = "na.fail")$

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-4.1566	-1.2198	0.3810	0.9553	3.6186

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	18.290298	7.870738	2.324	0.02856 *
BM	-0.022265	0.007361	-3.025	0.00569 **
Elem_gr	0.240943	0.081553	2.954	0.00673 **
DA	-8.083459	5.485323	-1.474	0.15306

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1



**Modèle retenu pour la richesse spécifique en Mars :**

$glm(formula = `RS (Juin)` \sim BM + DA + HIST + PH, data = Car\_Env\_Juin, na.action = "na.fail")$

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-5.1789	-1.5131	-0.1633	1.2077	4.4808

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	49.72638	12.48295	3.984	0.000628 ***
BM	-0.04448	0.01107	-4.016	0.000580 ***
DA	-16.39855	8.56933	-1.914	0.068767 .
HISTM	2.39046	1.30865	1.827	0.081351 .
HISTMar	2.15656	1.39038	1.551	0.131517
HISTP	5.45230	2.03825	2.675	0.013832 *
PH	-2.20684	1.27282	-1.734	0.096944 .

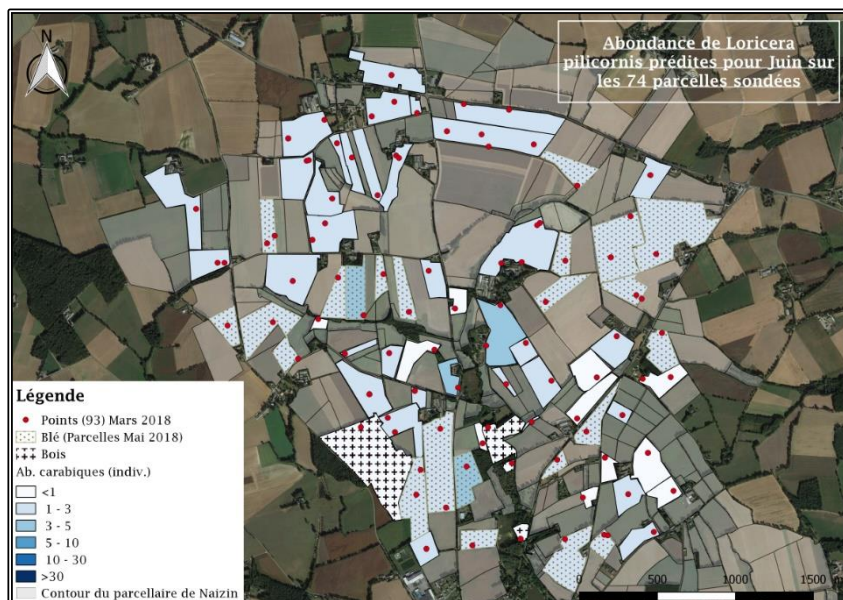
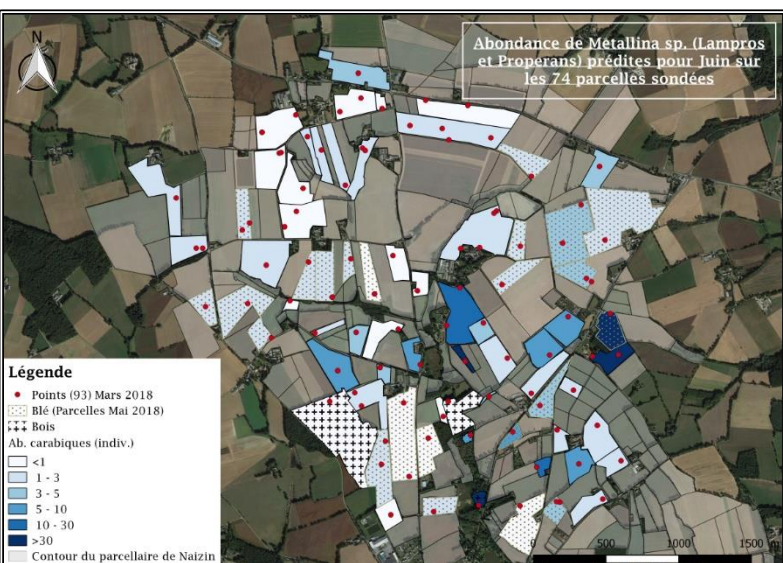
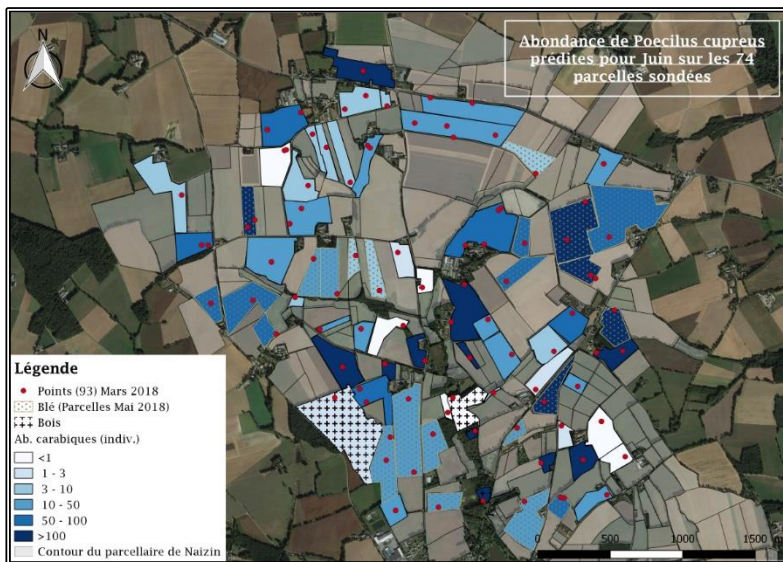
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1





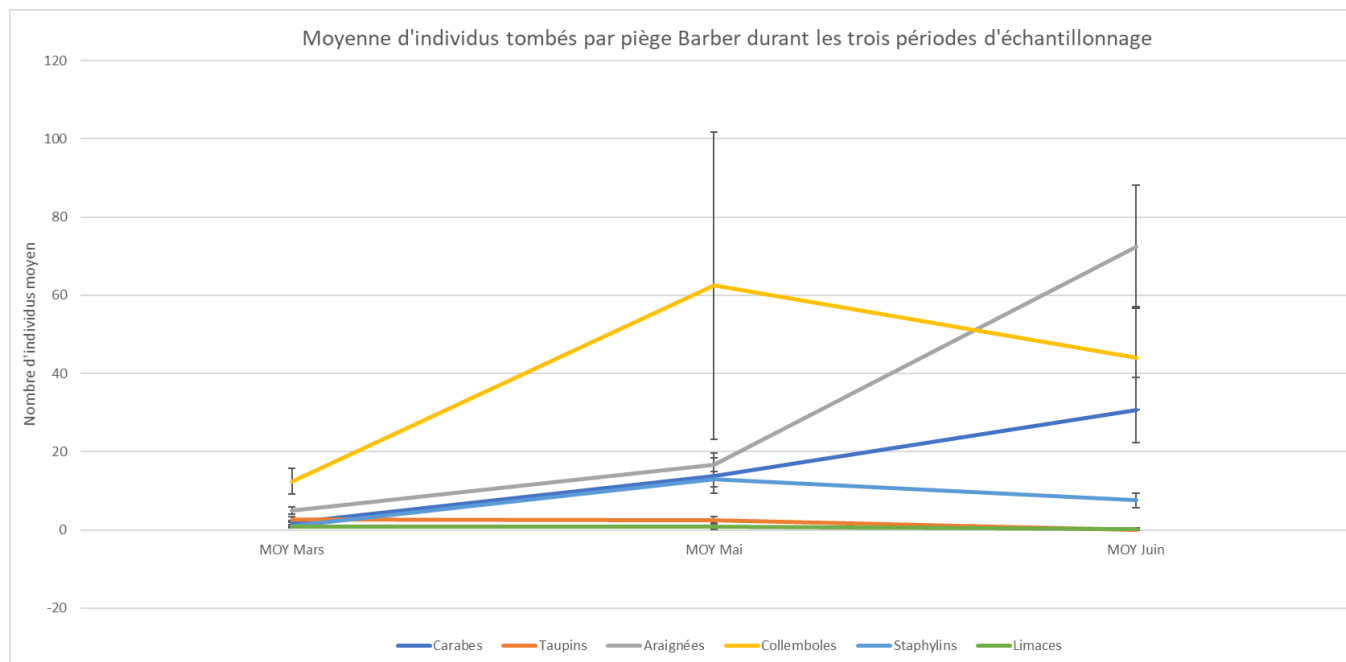
## Annexe 3c – Cartographies des carabes selon les périodes – Abondances spécifiques

Autres cartographies diverses selon l'espèce



## Annexe 4a – Précisions sur les résultats – Autre invertébrés piégés

Le graphique suivant présente la moyenne par pot de ces individus tombés en une semaine sur les trois périodes d'échantillonnage :



## Annexe 4a – Précisions sur les résultats – Impacts environnementaux sur

### *Poecilus cupreus*

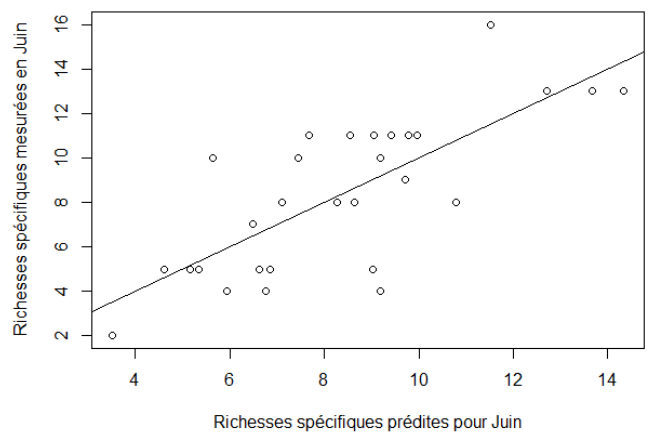
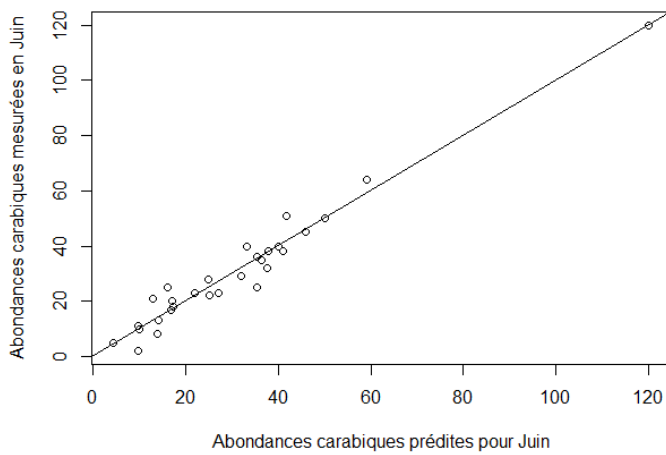
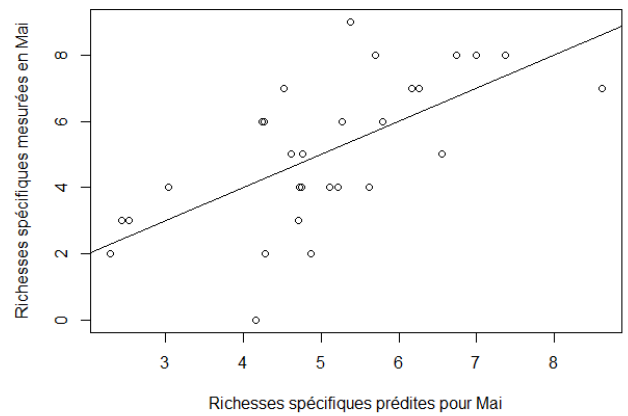
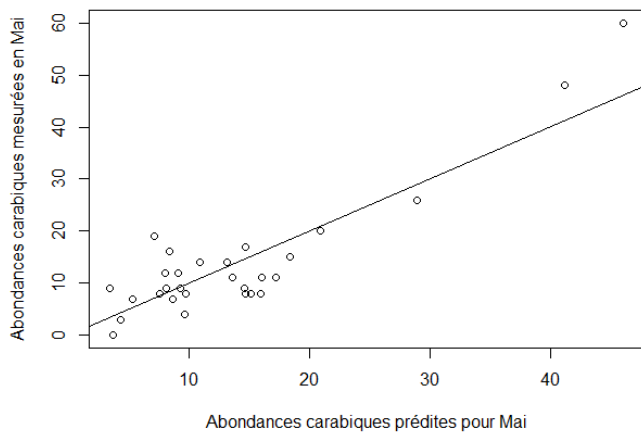
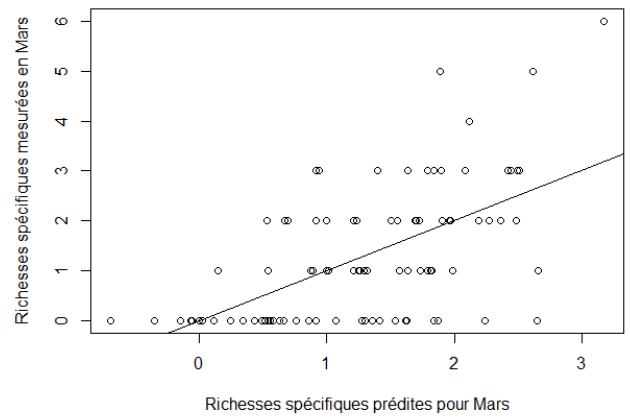
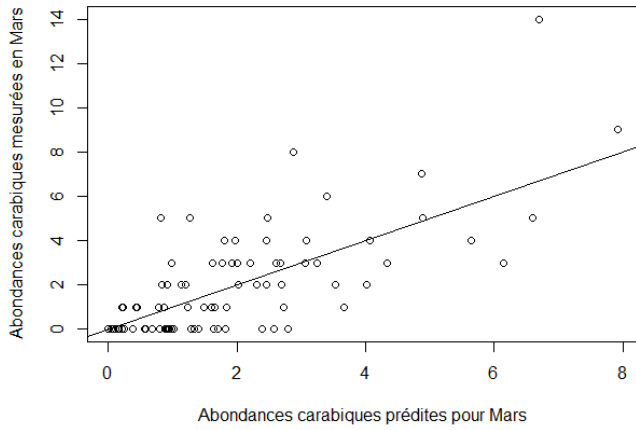
Cette espèce de carabe est l'une des plus répandues dans le milieu considéré (culture de blé d'hiver) et est la plus présente dans nos échantillons (environ 30 % des carabes échantillonnés en Mai et en Juin). Il est donc intéressant de connaître son impact sur les autres taxons qui y vivent et les déterminants de sa présence dans les parcelles.


Il apparaît que le **labour** (+2 c/p ; p-value=8,8.10<sup>-14</sup>), la quantité d'**éléments grossiers** (+2 c/p ; p-value=3,6.10<sup>-12</sup>), la **teneur en eau massique** (+3 c/p ; p-value=0.008) et l'**historique** de la parcelle, notamment la présence de prairies (+2,2 c/p ; p-value<2.10<sup>-16</sup>), ou d'anciennes cultures maraîchères (+1,8 c/p ; p-value=2.10<sup>-8</sup>), sont corrélées positivement à l'activité-densité de *Poecilus cupreus*. A contrario, la **biomasse microbienne** (-3 c/p ; p-value=1.9.10<sup>-5</sup>) ainsi qu'une moindre **profondeur de sol** sont corrélées négativement à leur présence dans les échantillons. Par exemple, par rapport à un point dont la profondeur de sol est à plus d'un mètre, un point avec un sol de classe 3, dont la profondeur se situe entre 60 et 80 cm, aura, d'après le modèle sélectionné, environ -3 c/p (p-value=1,3.10<sup>-9</sup>).

	D_Till	Elem_gr	Ten_eau	HIST_P	HIST_Mar	BM	Prof_3
Effet	+	+	-	+	+	-	-
Significativité	***	***	**	***	***	***	***



## Annexe 5 – Graphiques des modèles linéaires de l'activité-densité et de la richesse spécifique



	<p>Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p>Spécialité : Génie de l'environnement</p> <p>Spécialisation / option : Préservation et Aménagement des Milieux – Ecologie Quantitative</p> <p>Enseignant référent : Didier Le Cœur</p>
<p>Auteur(s) : Théo Gayrard</p> <p>Date de naissance* : 08/06/1995</p>	<p>Organisme d'accueil : Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) – Institut Génétique, Environnement et Protection des Plantes</p>
<p>Nb pages : 30                      Annexe(s) : 8</p> <p>Année de soutenance : 2017-2018</p>	<p>Adresse : 65 Rue de Saint-Brieuc, 35000 Rennes</p> <p>Maître de stage : Manuel Plantegenest</p>
<p>Titre français : Influence de la pédologie et des pratiques agricoles sur les communautés de coléoptères carabidés et le biocontrôle de ravageurs et d'auxiliaires.</p> <p>Titre anglais : Influence of pedology and agriculture practices over carabid communities and biological control of crop pests and auxiliaries.</p>	
<p>Résumé :</p> <p>Les sols sont en grande partie responsables du bon fonctionnement des écosystèmes. Ils participent à un bon nombre de services écosystémiques et sont, en conséquence, acteurs de beaucoup de problématiques du XXI<sup>ème</sup> siècle. Afin de sonder les drivers de services écosystémiques dans les sols et en surface, le projet SoilServ s'est intéressé à caractériser les sols autour de la commune de Naizin, en Bretagne, France, ainsi que diverses populations de la macrofaune du sol (vers de terre et carabes notamment). L'objectif de cette étude était également de considérer les interactions entre services écosystémiques, plus particulièrement entre les services auxquels les vers de terre sont associés et le biocontrôle dont sont responsables les carabes. La capture de carabes s'est effectuée à l'aide de pièges Barber, principalement dans des parcelles de blé d'hiver. Les résultats permettent d'apprécier certains paramètres responsables de la composition des communautés de carabes dans ces parcelles. La biomasse microbienne, le pH, la température du sol, la densité apparente, la teneur en eau massique et l'hydromorphie semblent avoir un effet sur ces communautés. La fréquence de labour ainsi que la diversité des cultures dans la rotation ont également un effet d'après nos résultats. Peu de résultats satisfaisants sont ressortis de l'étude sur la prédation de ravageurs et d'auxiliaires. Aussi, nous ne pouvons ni confirmer, ni infirmer l'effet d'une éventuelle interaction entre carabes et vers de terre sur les services écosystémiques fournis par ces-derniers.</p>	
<p>Abstract :</p> <p>Soils are, to a large extent, responsible for the proper functioning of ecosystems. They participate to many ecosystem services and are, consequently, acting over many problematics of the 21<sup>st</sup> century. To search the drivers of ecosystem services in, and on soils, the SoilServ project describes soils around the municipality of Naizin, in Brittany, France, and various populations of the soil macrofauna (notably earthworms and carabids). One goal of this study was also to consider the interactions between ecosystem services, more particularly between the ones with which earthworms are related and biological control from carabid beetles. The catch of carabid beetles was made with Barber traps, principally in winter wheat. The results allow us to see which parameters are responsible for composition of carabid communities. Microbial biomass, pH, soil temperature, bulk density, soil humidity and hydromorphy seem to affect those communities. Ploughing frequency and crop diversity during the whole rotation also have an effect, according to our results. Few satisfying results emerged from the study of crop pests' and auxiliaries' predation. Hence, we can neither confirm nor deny the effect an interaction between carabid beetles and earthworms over ecosystem services provided by the latter.</p>	
<p>Mots-clés : coléoptères carabiques, macrofaune du sol, paramètres pédologiques, gestion agricole, contrôle biologique, interactions entre services écosystémiques</p> <p>Key Words: carabid coleoptera, soil macrofauna, pedologic parameters, agricultural management, biological control, interactions between ecosystem services</p>	

