

Mesure de l'impact des pratiques agricoles sur les populations de carabiques (*Carabidae*) : Comparaison de différentes exploitations en agriculture biologique inspirées de la permaculture.

MACÉ Valentin

Stage effectué du 18/03/2019 au 30/08/2019 à
CETU INNOPHYT, Bâtiment 1 Avenue Monge 37200 TOURS
Entomologie Tourangelle et Ligérienne, Rue Auguste Renoir 37540 SAINT-CYR-SUR-LOIRE
Sous la direction scientifique de M. CORNILLON et M. LEMESLE



sepant



"Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'Entreprise ou du Laboratoire d'accueil"

Résumé

La permaculture est un concept de production agricole respectueuse de l'environnement. Il s'agit d'un domaine très documenté par ses pratiquants, mais il y a une lacune dans la littérature scientifique, particulièrement en Europe. Le projet « Permaculture et Biodiversité » a pour but d'étudier les effets des pratiques permacoles sur la diversité dans les milieux agricoles. Il s'appuie sur un inventaire en 3 ans dans 7 fermes biologiques inspirées de la permaculture en Indre-et-Loire. Cette étude se concentre sur les carabiques (*Carabidae*), car ce sont des auxiliaires de cultures et de bons bioindicateurs.

L'effet des pratiques permacoles sur les populations de carabiques n'a pas pu être démontré. Des différences de composition entre les fermes existent tout de même. Ces différences peuvent être expliquées par des facteurs abiotiques tels que l'humidité et biotiques telles que la compétition ou la prédation. Ces facteurs sont déjà connus comme influençant les populations de carabiques.

Les résultats sont difficiles à exploiter, car l'étude possède de nombreuses limites, notamment le nombre de fermes et la définition imprécise du concept de permaculture.

Mots clés : Carabiques, Permaculture, Biodiversité, Inventaire, Indice

Remerciements

Je remercie Maxime Cornillon, responsable parc et jardin à INNOPHYT, et Bernard Lemesle, trésorier de l'ETL, qui m'ont encadré durant ce stage, pour leur confiance, leur aide, leur pédagogie et leur grande générosité.

Merci à Jean-Claude Salvado et toute l'équipe pédagogique de la licence professionnelle BAEE de la côte basque pour la qualité de leurs enseignements.

Je tiens à remercier Augustin Soulard, stagiaire à INNOPHYT, avec qui j'ai travaillé pendant ce stage, qui m'a été d'une grande aide à bien des moments et pour son enthousiasme au quotidien. Merci également à tous les stagiaires de passage à INNOPHYT ainsi qu'aux stagiaires et doctorants de l'IRBI pour leur aide et leur bonne humeur tout au long de ce stage.

Je remercie Marion Bernard, Chargée de mission Agronomie Eau Environnement à la SEPANT et coordinatrice du projet Permaculture et Biodiversité ainsi que l'équipe d'INNOPHYT : Ingrid Arnault, Damien Munier, Elfie Perdereau, pour leur aide et leur sympathie.

Merci à Claire Bardoux, Martin Coulm et Eloise Coutouis pour leur travail de qualité sur le projet les années précédentes, ainsi qu'aux exploitants des fermes pour leur confiance et leur coopération.

Et enfin merci à toutes les personnes qui ont travaillé de près ou de loin sur ce projet, ainsi qu'à ceux que j'ai pu rencontrer lors de ce stage et que j'aurais oublié de mentionner.

Avant-propos

Ce stage s'inscrit dans le projet Permaculture et Biodiversité dont l'ambition est d'apporter des données chiffrées en réalisant une étude sur l'état de la biodiversité en permaculture. Ce type d'étude n'avait jamais été mené en France sur des exploitations permacoles auparavant. Le projet réunit quatre structures : la SEPANT, l'ETL, Biocentre et le CETU INNOPHYT, il est financé par LISEA dans le cadre d'un appel à projets visant à soutenir la conservation des milieux dans les régions touchées par la construction de la ligne Bordeaux-Tours, mais aussi par le conseil départemental d'Indre et Loire et le conseil régional Centre Val de Loire. Sur une durée de 3 ans, le projet comprend un inventaire de la biodiversité en arthropodes en première et troisième années sur les mêmes exploitations : le sujet de ce stage. Les exploitations font également l'objet d'un diagnostic initial faune/flore/habitat ainsi que de journées de formation pour les agriculteurs et le grand public.

Ce stage s'est réalisé en collaboration avec :

- La Société d'Étude, de Protection et d'Aménagement de la Nature en Touraine (SEPANT) est une association fédérant différentes associations départementales en lien avec la protection de la nature. Elle est également fédérée au réseau France Nature Environnement (FNE). La SEPANT a pour objectif de préserver en Touraine les milieux naturels et d'agir contre toutes les atteintes à l'environnement. Elle prend place dans le débat public en matière d'environnement, accompagne des projets d'aménagement de l'environnement (mise en place de sites Natura 2000, de mesures compensatoires) et sensibilise le grand public ainsi que les entreprises, sur leur impact environnemental. La SEPANT est coordonnatrice du projet.
- Innophyt : Centre d'Expertise et de Transfert Universitaire (CETU). Cette structure unique est associée à l'université de Tours dont elle dépend du Service Partenariat Valorisation Contrat. Elle était auparavant un Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie (CRITT). Son but est de valoriser la recherche dans le domaine de la lutte antiparasitaire, notamment en travaillant avec l'UMR de l'Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte (IRBI) de l'université de Tours. Son activité consiste à sensibiliser ses partenaires aux enjeux environnementaux et à étudier la gestion de la biodiversité pour lutter contre les nuisibles sans utiliser les produits phytosanitaires. Elle se déroule en zone agricole, mais aussi dans les parcs et les jardins. Innophyt s'occupe de la mise en place de la partie expérimentale du projet. C'est dans leurs locaux que la majorité du stage s'est effectué.
- L'Entomologie Tourangelle et Ligérienne est une association dont l'objectif est de faire connaître le monde de l'entomologie au grand public et d'approfondir les connaissances de l'entomofaune de la région centre. Elle apporte un soutien pour l'identification et la partie terrain du projet.

Table des matières

Résumé	
Remerciements	
Avant-propos	
Table des matières	
I) Introduction.....	1
II) Matériels et méthodes	3
Sites d'étude	3
Biologie des Carabidés	6
Protocole d'échantillonnage	7
Tri et identification	9
Traitement des données	10
III) Résultats.....	13
Description de la composition spécifique	13
Saisonnalité	16
Fonctions écologiques	17
Biais de l'enherbement.....	19
Effets des différentes pratiques permacoles	20
IV) Discussion	21
Piégeage.....	21
Compositions	21
Saisonnalité	22
Taux permacole et hétérogénéité du paysage	22
Facteurs abiotiques.....	23
Régime alimentaire	23
Interactions interspécifiques et prédation	24
Limites de l'étude et pistes d'amélioration.....	25
Bibliographie.....	26
Table des figures	
Table des tableaux	
Annexes.....	

I) Introduction

Il est aujourd'hui admis qu'en agriculture les pratiques dites « conventionnelles » ont un impact négatif sur la biodiversité. Celles-ci tendent à homogénéiser le paysage en favorisant les monocultures et en détruisant les milieux boisés pour maximiser l'espace de production. Cette homogénéisation du paysage est défavorable à la régulation naturelle des ravageurs de culture (Rusch et al., 2016). Cela amène à l'utilisation de pesticides de synthèse pour contrôler ces populations de ravageurs. Mais les pesticides touchent la totalité de la biodiversité, car ils ne permettent pas de cibler uniquement les espèces nuisibles (Desneux et al., 2007). Le travail intensif de la terre tel que le labour en agriculture conventionnelle a aussi un effet sur la biodiversité, car il détruit le milieu de vie des arthropodes du sol en le déstructurant.

Pourtant, cette biodiversité traduit une diversité fonctionnelle nécessaire au fonctionnement des systèmes agricoles. Les organismes jouent un rôle important dans la dégradation de la matière organique et permettent au sol de garder ses propriétés (Culliney, 2013). Ces mêmes organismes peuvent rendre des services écosystémiques en entrant en compétition ou en étant prédateur des ravageurs, ce sont les auxiliaires de culture. Ils peuvent également être responsables de la pollinisation. Tous ces bénéfices, dont l'agriculture peut tirer profit, vont donc être réduits par la perte de biodiversité. De ce fait, les fermes conventionnelles présentent une résilience plus faible, les rendant vulnérables aux événements annoncés en vue du dérèglement climatique. (Kremen and Miles, 2012)

La permaculture est une méthode de conception s'inspirant de l'écologie et du fonctionnement des écosystèmes, pouvant s'appliquer à l'agriculture, mais aussi à tout autre domaine. Le terme est utilisé pour la première fois en 1978 par les Australiens Bill Mollison et David Holmgren dans leur livre *Permaculture 1*. Leur travail répondait initialement à la problématique des méthodes destructrices de l'agriculture conventionnelle sur les sols et la biodiversité. La permaculture s'est peu à peu étendue à une vision durable de tous les aspects de la société. Elle repose désormais sur une éthique et des principes inspirés par l'observation de la nature, pouvant toujours évoluer, mais constituent une base au courant de pensée.

Un des objectifs principaux de la permaculture est de concevoir une agriculture durable et respectueuse de la biodiversité. Les bandes enherbées et fleuries sont donc favorisées ainsi que la diversité des espèces cultivées afin de diversifier les habitats. La superficie des champs est également réduite pour hétérogénéiser les milieux (Krebs and Bach, 2018). La permaculture propose également de laisser des zones non gérées. On s'attend donc à ce que la biodiversité soit effectivement favorisée par ces pratiques (Benton et al., 2003). Néanmoins, ce n'est pas une somme de pratiques agricoles bien définie mais plutôt une philosophie de vie s'appliquant à divers domaines, dont celui de l'agriculture. Trouver une définition exacte de la permaculture est très délicat, car ce concept varie en fonction de l'utilisation qu'il en est fait par

chacun. De ce fait, la permaculture est un domaine très peu présent dans la littérature scientifique comparé à l'agroécologie, la plupart des ouvrages étant écrits pour le grand public par des permaculteurs non-scientifiques. Ses effets sur la biodiversité ont été très peu démontrés. De plus, seul 22 % des articles concernent le territoire européen (Ferguson and Lovell, 2014). Cette lacune de connaissances sur le territoire européen et français mérite d'être comblée afin de mieux comprendre l'effet des méthodes permacoles.

Les interactions entre espèces dans un écosystème équilibré devraient être retrouvées dans un système de permaculture. Les auxiliaires de culture sont des organismes utiles à la production agricole notamment en se développant au détriment des ravageurs de culture. L'étude d'un taxon généralement reconnu comme auxiliaire de culture est donc intéressante d'un point de vue agricole. Il rendra également compte de l'état général de l'écosystème s'il s'agit d'un bio-indicateur. Cette étude appuie donc également les recherches sur la lutte biologique contre les ravageurs. Les carabiques sont de très bons prédateurs dans les milieux agricoles ce qui en fait de bons auxiliaires de culture. Ils sont assez sensibles aux facteurs environnementaux et donc facilement affectés par la perturbation du milieu. Ce sont des organismes très étudiés et simples à identifier à l'aide d'une loupe binoculaire et d'une clé d'identification, faisant d'eux de bons bio-indicateurs. C'est pourquoi la problématique de l'étude est la suivante :

Les pratiques permacoles en maraîchage biologique ont elles un impact sur les populations de carabidés ?

H1 : Les populations en *Carabidae* sont différentes et évoluent différemment entre les fermes selon leurs pratiques.

H2 : Les fermes aux pratiques plus permacoles ont une diversité en carabidés plus élevée.

II) Matériels et méthodes

Débutée en 2017, les premières données de l'étude avaient déjà été traitées. Les effets attendus n'avaient pas pu être démontrés, mais des points d'améliorations ont été proposés en vue d'obtenir des résultats plus représentatifs de la réalité.

Notamment, la classification des fermes en plusieurs catégories posait problème pour la pertinence du traitement statistique. Un des objectifs est donc de concevoir un nouveau système afin de positionner les pratiques des fermes par rapport à celles de la permaculture.

De plus, la littérature récente semble indiquer que le paysage a une importance non négligeable sur la diversité dans les exploitations (Gallé et al., 2019). Un indice d'hétérogénéité du paysage sera donc intégré à l'étude, pour mesurer son effet en parallèle de celui des pratiques permacoles.

Sites d'étude

L'échantillonnage s'est déroulé dans 7 exploitations d'agriculture biologique (appelées A, B, C, D, E, F et G) situées dans le département de l'Indre et Loire ([Figure 1](#)).

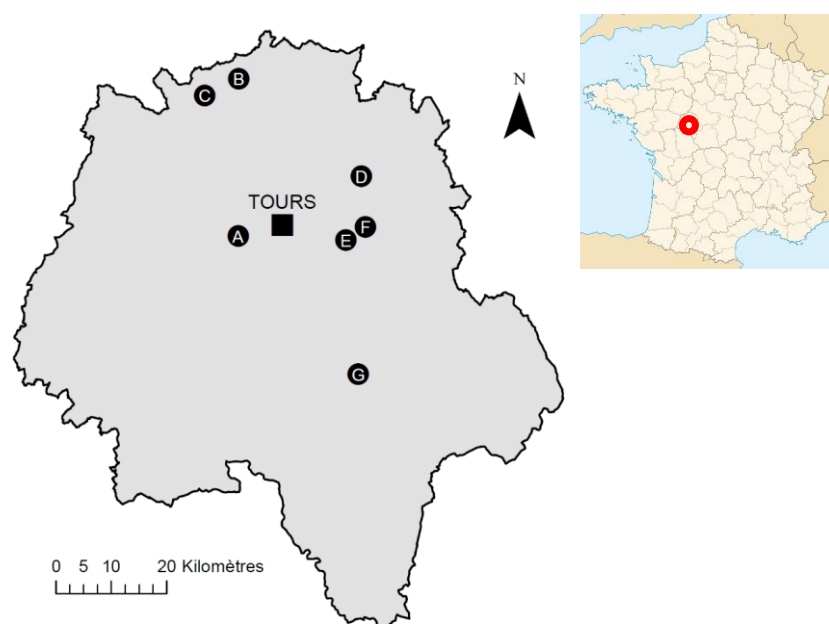


Figure 1: Position des fermes en Indre et Loire

Dans le premier rapport de 2017 (Bardou, 2017), les fermes ont été classées en fonction de leur pourcentage de similitude avec 3 catégories basées sur les

pratiques agricoles des différentes fermes. Ces catégories étaient tirées de la thèse de Kévin Morel (Morel, 2016) (*Tableau I* : Critère de classification des fermes dans le rapport de 2017).

Tableau I : Critère de classification des fermes dans le rapport de 2017 (Bardou, 2017)

Indicateurs	Mi	Bi	CI
Mécanisation	Manuel	Moyenne	Forte
Densité d'implantation	Forte	Forte	Faible
Association de culture	Oui	Non	Non
Pratiques bas intrants	Oui	Oui	Non
Engrais verts	Non	Oui	Non
Succession de culture/an	4 à 6	1 à 4	1 à 2
Paillage	Oui	Oui	Non

Cette méthode avait soulevé un problème lors du traitement statistique, car les différentes catégories ne comptaient pas le même nombre de fermes, et surtout, l'une d'elles n'en contenait qu'une. Ce manque de répétition dans les données rendait l'analyse statistique peu pertinente.

Dans ce présent rapport, le système de classification des fermes a été révisé. Chaque ferme s'est vu attribuer une note en fonction de leurs pratiques agricoles, ce qui les positionne sur un gradient allant de l'agriculture intensive biologique vers des pratiques plus « permacoles », en réutilisant les critères utilisés dans la classification précédente, mais aussi de nouveaux critères (*Tableau III*).

En permaculture, le travail du sol est réduit, notamment la mécanisation et la profondeur de labour, car ces pratiques perturbent les organismes du sol (Holland and Luff, 2000). Le désherbage à la main ou le non-désherbage permet de laisser des abris aux organismes et notamment aux auxiliaires de culture. Le paillage est une alternative aux méthodes de désherbage, mais permet aussi de protéger le sol et de conserver l'humidité (Keesstra et al., 2019). L'autonomie est aussi un objectif de la permaculture, les apports de matière organique extérieure sont donc réduits. Les engrais verts participent à cette autonomie et permettent également au sol d'être protégé. Une densité d'implantation importante et les associations de culture augmentent l'utilisation de la surface. L'utilisation de plantes pérennes et du zonage remplit l'objectif de réduire l'énergie dépensée (Mollison and Holgrem, 1986).

Les fermes sont donc classées comme suit :

Tableau II : Taux permacole par ferme

Ferme	A	B	C	D	E	F	G
Taux permacole (en %)	56	51	23	83	72	9	78

Tableau III : Critère de classification des fermes en 2019

Pratiques	Réponses	Points
Mécanisation	Forte (tracteur)	0
	Moyenne (petit tracteur)	0,33
	Faible (motoculteur)	0,66
	Absente	1
Travail du sol (profondeur)	>20cm	0
	10-20cm	0,5
	<10cm	1
Densité d'implantation	Faible	0
	Moyenne	0,5
	Forte	1
Association de culture	Non	0
	Oui	1
Apport de matière organique extérieure	Fort	0
	Faible	1
Engrais vert	Non	0
	Oui	1
Paillage	Non	0
	Oui	1
Biocide	Oui	0
	Non	1
Désherbage	Arrachage ou labour	0
	Bâchage, paillage ou arrachage partiel	0,5
	Absent	1
Plantes pérennes en culture	Non	0
	Peu	0,5
	Oui	1
Zonage	Non	0
	Partiel (2 ou 3 zones)	0,5
	Oui (4-5 zones) avec zone naturelle	1
Nombre d'espèces cultivées	<30	0
	30-40	0,5
	>40	1

Biologie des Carabidés



Figure 2 : *Carabus nemoralis* adulte

Les carabiques sont des Coléoptères du sous-ordre *Adephaga* et de la famille des *Carabidae* (Figure 3). Ils sont parfois appelés abusivement carabes, mais les véritables carabes sont en réalité seulement du genre *Carabus* (Figure 2). Il s'agit d'un taxon très étudié par les entomologistes et très documenté.

Les carabiques sont holométaboles, leur développement se fait généralement sur 1 an, mais peut aller jusqu'à 4 ans dans les milieux les plus difficiles. Selon les espèces deux cycles de développement existent : soit les imagos apparaissent en fin d'été et hivernent avant de se reproduire au printemps, soit les imagos apparaissent au printemps, se reproduisent en été et ce sont les larves qui entrent en diapause en hiver.

Les carabiques sont plutôt rampants, néanmoins certaines espèces possèdent des ailes leur permettant de se déplacer en volant. Leurs larves se développent dans le sol, elles sont donc très sensibles au travail du sol. Les carabiques peuvent avoir différents régimes alimentaires. Certaines espèces ont une dominante prédatrice, phytophage ou même granivore. Toutefois ils sont essentiellement omnivores. Les larves (Figure 4) sont en grande majorité prédatrices. Les carabidés sont présents dans la majorité des milieux terrestres et sont trouvés en abondance dans les milieux agricoles.



Figure 3 : *Poecilus cupreus* adulte



Figure 4 : Larve de *Carabus nemoralis*

Protocole d'échantillonnage

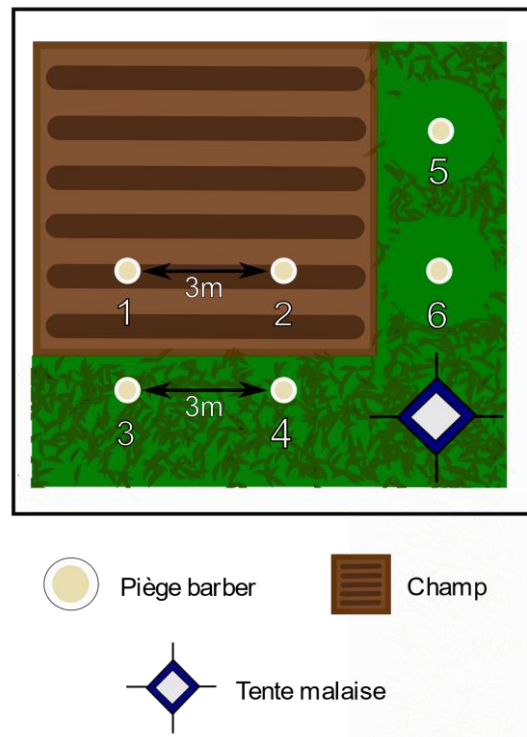


Figure 5 : Position des pièges

Pour chaque ferme, deux pièges Barber ont été posés dans le champ, à 3 m de distance l'un de l'autre (*Figure 5 : 1 et 2*) et deux pièges Barber ont été posés dans la bande enherbée adjacente au champ (*Figure 5 : 3 et 4*). Il s'agit de récipients de 7,3 cm de diamètre enterrés au ras du sol. Ils sont remplis de liquide de piégeage : de l'eau additionnée de du savon et du sel (*Figure 6*). Les insectes se déplaçant au sol vont tomber dans le piège, le savon va réduire la tension superficielle de l'eau et les faire couler au fond du récipient et le sel va aider à leur conservation. Une plaque protège le piège Barber de la pluie et de l'évaporation due à l'ensoleillement.



Figure 6: Piège Barber

Une tente Malaise a également été posée dans chaque ferme (Figure 7). Ce système va piéger les insectes volants. Son fonctionnement repose sur le fait que les insectes ont toujours tendance à aller vers le haut lorsqu'ils rencontrent un obstacle. Les insectes vont donc remonter jusqu'à l'extrémité supérieure de la tente où ils finiront par tomber dans un récipient rempli de liquide de piégeage.



Figure 7: Tente Malaise

La combinaison de ces deux types de piège permet d'avoir une vision assez large de la composition des populations de carabiques sur l'exploitation. La tente Malaise peut également piéger des insectes non-volants qui remontent le long de la toile. De même, les pots Barber peuvent piéger des insectes volants.

Les pièges ont été posés le 27/03/2019 et ont été récoltés toutes les deux semaines à partir de cette date (Figure 8).

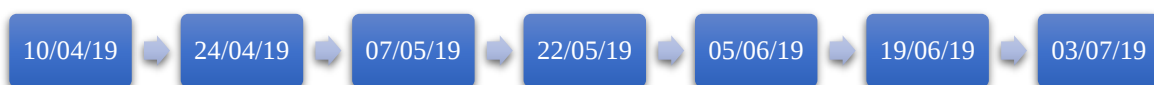


Figure 8 : Dates de relevés des pièges

Biais de l'enherbement

Lors de l'application du protocole, la question du biais de l'enherbement autour des pièges Barber s'est posée. En effet, les pièges Barber peuvent être plus efficaces sur un terrain dégagé que sur un terrain couvert (Melbourne, 1999). Les fermes les plus permacoles laissant plus aux plantes adventices, le piégeage pourrait être moins efficace même si la population en carabiques est plus importante. Deux pièges Barber supplémentaires ont donc été posés sur les trois derniers relevés en bande enherbée puis tondus sur un rayon de 30 cm environ (*Figure 5 : 5 et 6*). Ces pièges Barber pourront être comparés à ceux non dégagés pour étudier le biais éventuel dû à l'enherbement.

Perte de pièges

Lors du piégeage, certains pièges n'ont pas pu être relevés. En effet, les conditions météorologiques et le travail des maraîchers ont entraînés la destruction de ces pièges.

La moyenne des individus par piège pour chaque ferme a donc été utilisée afin de calculer les proportions afin de compenser le biais d'échantillonnage entre les différentes fermes.

Tri et identification

Les échantillons ont été triés afin de séparer les carabidés des autres groupes. Ils ont ensuite été mis en alcool pour conservation puis identifiés à l'aide d'une loupe binoculaire et de divers documents d'aide à l'identification :

- ➔ Clé de détermination des carabidés des paysages agricole du Nord-Ouest de la France (Jambon et al.).
- ➔ Faune de France – Coléoptères carabiques (Coulon et al., 2011)

Identification des Carabiques : Bernard Lemesle, Macé Valentin, Augustin Soulard, Sarah Cardonnet, Luca Guivarch et Pierre Angelopoulos.

Traitement des données

Chaque identification a été rentrée dans une base de données sous forme de tableau Excel. Ce tableau est composé de l'abondance de chaque espèce et des différentes variables relatives à l'échantillonnage (numéro du piège Barber, ID de la ferme). Ces variables ont pour répétitions les différents pièges pour chaque date (*Tableau IV*).

Pour certains traitements, les données sont agrégées par ferme ou par date.

Tableau IV : Extrait du tableau de donnée

Code	Relevé	Date	Piège	Position	Ferme	Taux Perma	Paysage	Taxa S	Individuals	Simpson 1-D	Shannon H	Evenness e ^H /S	Abax_parelelepedus	Acupalpus
B1.2A_R1_17	R1	26/04/2017	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	5	23	0.4877	1.003	0.5454	0	
B1.2A_R1_19	R1	10/04/2019	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	9	27	0.7545	1.715	0.6176	0	
B1.2A_R2_17	R2	10/05/2017	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	6	17	0.7474	1.534	0.7725	0	
B1.2A_R2_19	R2	24/04/2019	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	10	22	0.814	1.956	0.7073	0	
B1.2A_R3_17	R3	24/05/2017	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	10	36	0.7438	1.699	0.5468	0	
B1.2A_R3_19	R3	08/05/2019	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	11	39	0.8508	2.116	0.7541	0	
B1.2A_R4_17	R4	07/06/2017	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	7	64	0.4624	0.9397	0.3656	0	
B1.2A_R4_19	R4	22/05/2019	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	11	17	0.8789	2.262	0.8733	1	
B1.2A_R5_17	R5	21/06/2017	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	4	38	0.5139	0.8998	0.6148	0	
B1.2A_R5_19	R5	05/06/2019	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	8	32	0.8281	1.897	0.8336	0	
B1.2A_R6_17	R6	05/07/2017	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	1	1	0	0	1	0	
B1.2A_R6_19	R6	19/06/2019	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	4	5	0.72	1.332	0.9473	0	
B1.2A_R7_17	R7	19/07/2017	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	3	8	0.4063	0.7356	0.6956	0	
B1.2A_R7_19	R7	02/07/2019	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	5	30	0.5156	1.026	0.5579	0	
B1.2A_R8_17	R8	02/08/2017	Ba	Champ	A	55.5	1.6481	1	2	0	0	1	0	
B3.4A_R1_17	R1	26/04/2017	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	5	15	0.4444	0.9496	0.5169	0	
B3.4A_R1_19	R1	10/04/2019	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	5	12	0.7222	1.424	0.8308	0	
B3.4A_R2_17	R2	10/05/2017	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	3	5	0.64	1.055	0.9572	0	
B3.4A_R2_19	R2	24/04/2019	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	6	10	0.8	1.696	0.9084	0	
B3.4A_R3_17	R3	24/05/2017	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	13	26	0.8698	2.282	0.7532	0	
B3.4A_R3_19	R3	08/05/2019	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	3	3	0.6667	1.099	1	0	
B3.4A_R4_17	R4	07/06/2017	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	8	21	0.5941	1.391	0.5022	0	
B3.4A_R4_19	R4	22/05/2019	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	6	8	0.8125	1.733	0.9428	0	
B3.4A_R5_17	R5	21/06/2017	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	5	12	0.5278	1.099	0.6	0	
B3.4A_R5_19	R5	05/06/2019	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	2	2	0.5	0.6931	1	0	
B3.4A_R6_17	R6	05/07/2017	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	3	3	0.6667	1.099	1	0	
B3.4A_R6_19	R6	19/06/2019	Ba	Herbe	A	55.5	1.6481	2	2	0.4444	0.8285	0.8444	0	

Indices de diversité

Les indices de biodiversité sont calculés à l'aide du logiciel Past 3 (Hammer et al., n.d.)

Shannon-Weaver : $H = -\sum_i \frac{(n_i/n)}{\ln(n_i/n)}$. Il prend en compte la diversité en espèces et l'abondance des individus. Il varie de 0 lorsqu'un seul taxon compose la communauté à l'infini. Il donne du poids aux espèces rares.

Simpson : $S = \frac{\sum n(n-1)}{N(N-1)}$. Similaire à l'indice de Shannon, mais donne plus de poids aux espèces abondances.

Dominance : $D = \sum_i \left(\frac{n_i}{n}\right)^2$. Compris entre 0 (égalité parfaite du nombre d'individus dans les taxons) et 1 (un taxon domine totalement les autres).

Equitabilité : $E = \frac{H}{H_{max}}$. Représente l'uniformité de répartition des individus dans les taxons. Il va de 0 lorsqu'une espèce domine largement à 1 lorsque les individus sont répartis équitablement dans les taxons.

Description du cortège d'espèce et comparaison entre 2017 et 2019

Les proportions de chaque espèce dans une année sont obtenues en divisant le nombre d'individus de chaque espèce par l'effectif total. Ces proportions sont calculées pour 2017 et 2019 afin de les comparer, puis les différentes fermes sont comparées pour l'ensemble des deux années.

Les données sont agrégées par période de 15 jours (durée entre chaque relevé) afin de former des classes permettant d'observer des variations de la population en carabiques dans le temps.

Ecologie du cortège d'espèces

Les carabiques peuvent être des prédateurs ou des phytophages (les granivores ont été regroupés avec les phytophages), mais sont souvent omnivores. Les régimes alimentaires des différentes espèces ont été trouvés dans *The Agroecology of Carabid Beetles* (Holland, 2002). Les proportions de chaque régime ont été calculées pour 2017 et 2019 puis pour chaque ferme sur l'ensemble des deux années.

Chaque espèce de carabique a une préférence pour certains milieux, les pratiques permacoles peuvent offrir des habitats différents de l'agriculture classique aux carabiques et avoir un impact sur la population présente. Les cultures et prairies ont été regroupées dans une classe « milieux ouverts » et les habitats ripicoles et marécageux ont été regroupés dans une classe « milieux humides ». Les préférences d'habitats ont été trouvées dans « *Les Coléoptères Carabidés et Ténébrionidés* » (Dajoz, 2002) et sur le site « *British Carabid habitat association* » ("*British carabid habitat association.*", n.d.). Les proportions ont également été calculées pour 2017 et 2019 puis pour chaque ferme sur l'ensemble des deux années.

Hétérogénéité du paysage

Une couche raster des différents milieux (Source : OSO Cesbio, <http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/~oso/>) a été utilisée. Des zones tampon de 500 m autour des pièges ont été faites grâce au logiciel Quantum Gis (Équipe de développement de QGIS, 2019) (*Figure 9*), ce diamètre a été inspiré d'études similaires avec des carabiques (Alignier and Aviron, 2017; Bertrand et al., 2016). L'indice de diversité de Shannon a été utilisé sur les différentes zones tampon avec le logiciel Fragstat (McGarigal et al., 2012) afin d'obtenir une diversité paysagère pour chaque ferme (*Tableau V*).

Tableau V : Hétérogénéité des différentes fermes

Ferme	A	B	C	D	E	F	G
Hétérogénéité	1.65	0.81	1.30	1.11	1.22	1.46	0.61

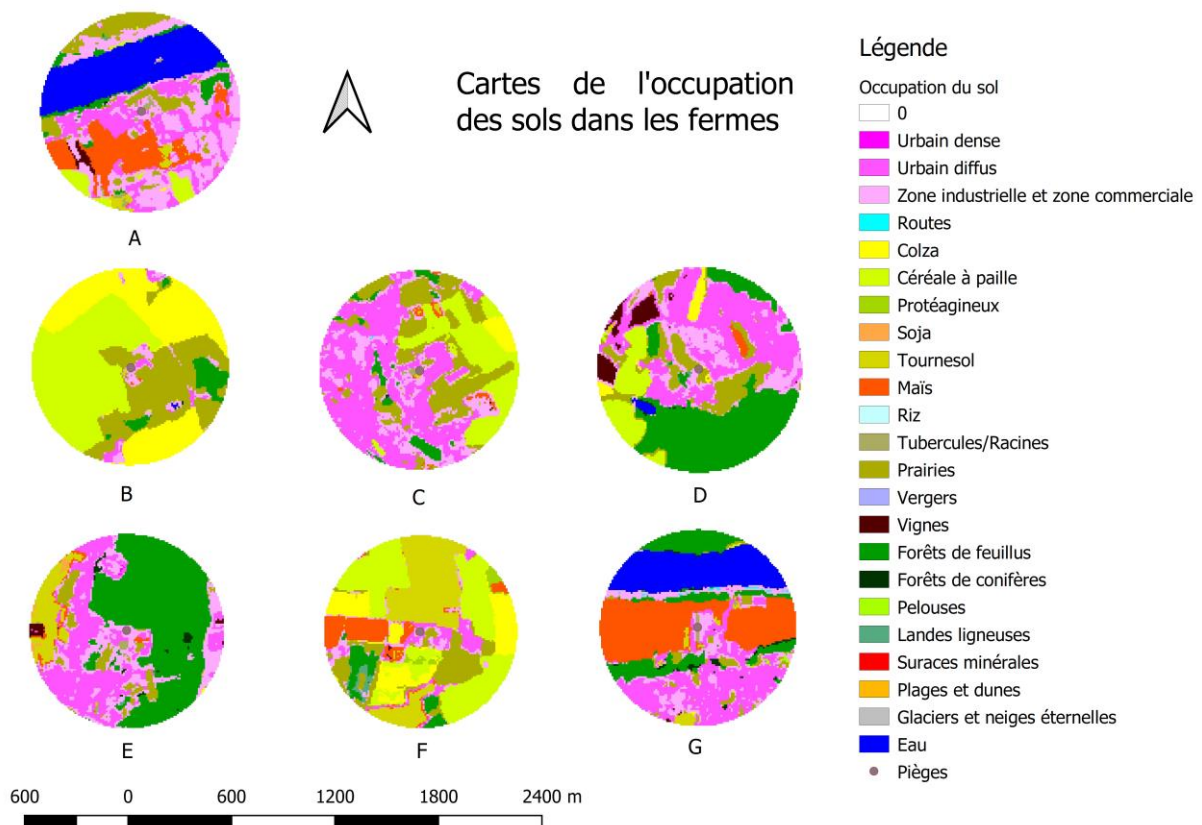


Figure 9 : Raster de l'occupation du sol utilisés pour le calcul de l'hétérogénéité du paysage

Analyses statistiques

Une fois les données mises en forme, elles sont importées dans R pour le traitement statistique. Le package Rcmdr est utilisé, il propose une interface permettant de faire les analyses univariées et multivariées.

Pour synthétiser les relations entre les différentes variables, une Analyse en Composantes Principales (ACP) est effectuée.

Pour comparer des modalités, des tests univariés sont effectués. Avant chaque test, la normalité est vérifiée sur les variables avec un test de Shapiro-Wilk. Pour comparer deux modalités, un t-test est utilisé pour les données normales et un test de Wilcoxon pour les données non-normales. Pour comparer plus de deux modalités, une ANOVA est effectuée lorsque les données suivent la normalité. Sinon un test de Kruskal Wallis est utilisé.

Les corrélations entre deux variables sont faites avec un test de Pearson pour les données normales ou avec un test de Spearman pour les données ne suivant pas la normalité.

III) Résultats

Description de la composition spécifique

À l'issu des inventaires de 2017 et 2019, 4946 individus ont été identifiés parmi 115 espèces.

Le cortège d'espèces identifiées est différent entre 2017 et 2019 : seulement 47 % des espèces ont été trouvées les deux années. Par exemple, une disparition des relevés de *Phyla obtusa* en 2019 est observée alors qu'elle représentait plus de 8 % des individus en 2017 (*Figure 10*).

Seulement 6 espèces sont considérées dominantes sur au moins une des deux années (plus de 5 % des individus). *Poecilus cupreus* est largement dominant en représentant plus de 25 % des données alors que toutes les autres espèces représentent moins de 10 %. (*Figure 10*)

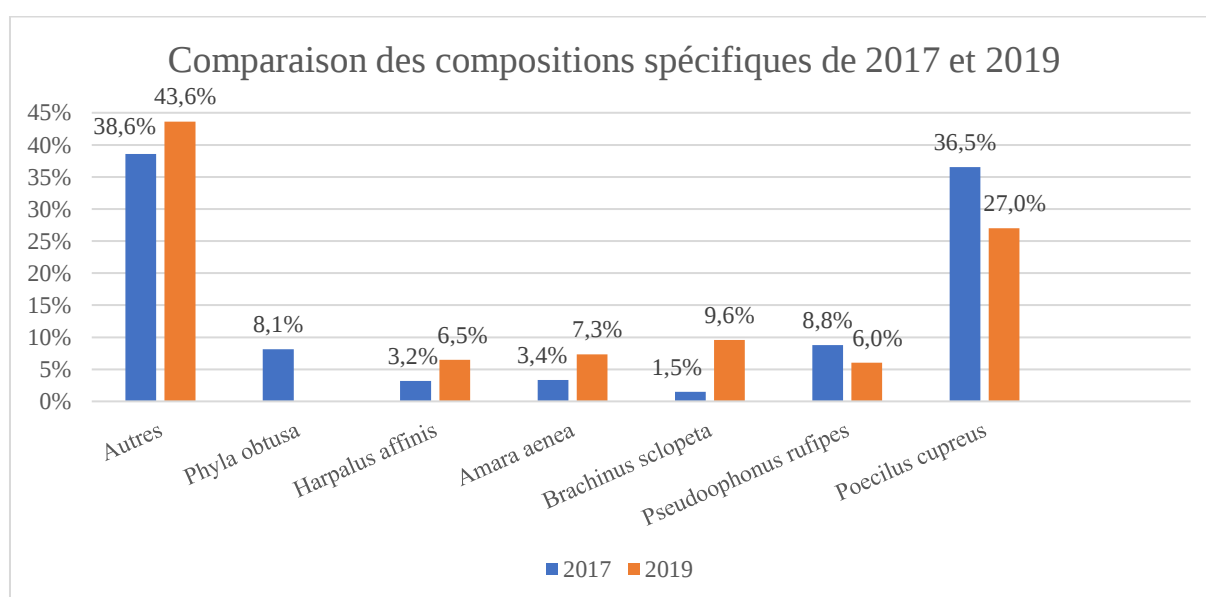


Figure 10 : Diagramme des proportions d'espèces de carabiques >5% en 2017 et/ou en 2019

Les abondances varient de 285 à 1781 individus par ferme et la richesse spécifique de 33 espèces à 71. L'abondance est fortement corrélée à la richesse spécifique (*Test de Spearman* : $S = 269877$, $p\text{-value} < 2.2e-16$, $\rho = 0.9158762$). Ces variations entre les fermes ne peuvent être liées au taux permacole (*Test de Spearman* : $S = 90$, $p\text{-value} = 0.1667$, $\rho = -0.6071429$) ni à l'hétérogénéité du paysage (*Test de Spearman*, $S = 44$, $p\text{-value} = 0.6615$, $\rho = 0.2142857$). (*Tableau VI*)

Tableau VI : Abondance et richesse spécifique par ferme

Ferme	A	B	C	D	E	F	G
Abondance totale	600	291	602	278	285	1781	1110
Richesse spécifique	53	51	42	33	39	71	64

Les compositions semblent également varier fortement entre les fermes. *Poecilus cupreus* n'est, par exemple, pas dominant sur les fermes D et E (Figure 11).

Un test de Kruskal-Wallis sur la diversité (Indice de Shannon) entre les fermes est effectué ($\chi^2 = 24.134$, $df = 6$, $p\text{-value} = 0.0004935$). Le test étant positif, une comparaison multiple de Dunn est faite afin de savoir quelles fermes sont significativement différentes entre elles, avec un ajustement de Bonferroni. La ferme F est différente de A, D et E (respectivement $p\text{-value} = 0.0029$, 0.0001 , 0.0042), toutes les autres fermes ne sont pas différentes entre elles.

Une ACP ne semble pas montrer de lien entre les différents indices de biodiversité des fermes et le taux permacole ou l'hétérogénéité du paysage leur étant associé (Figure 12).

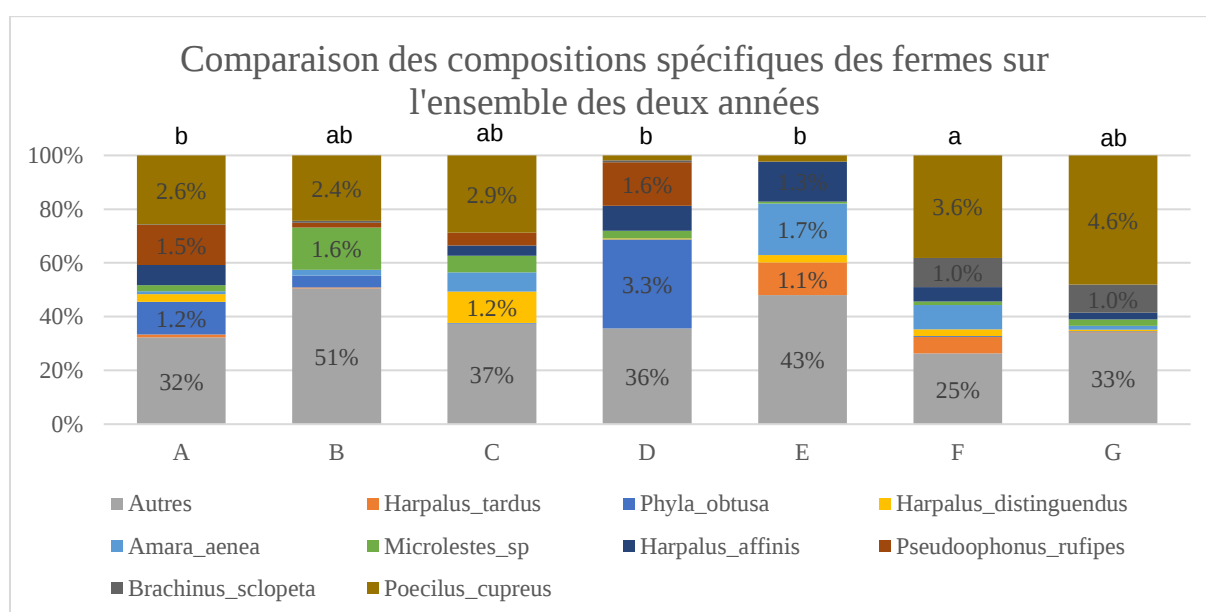


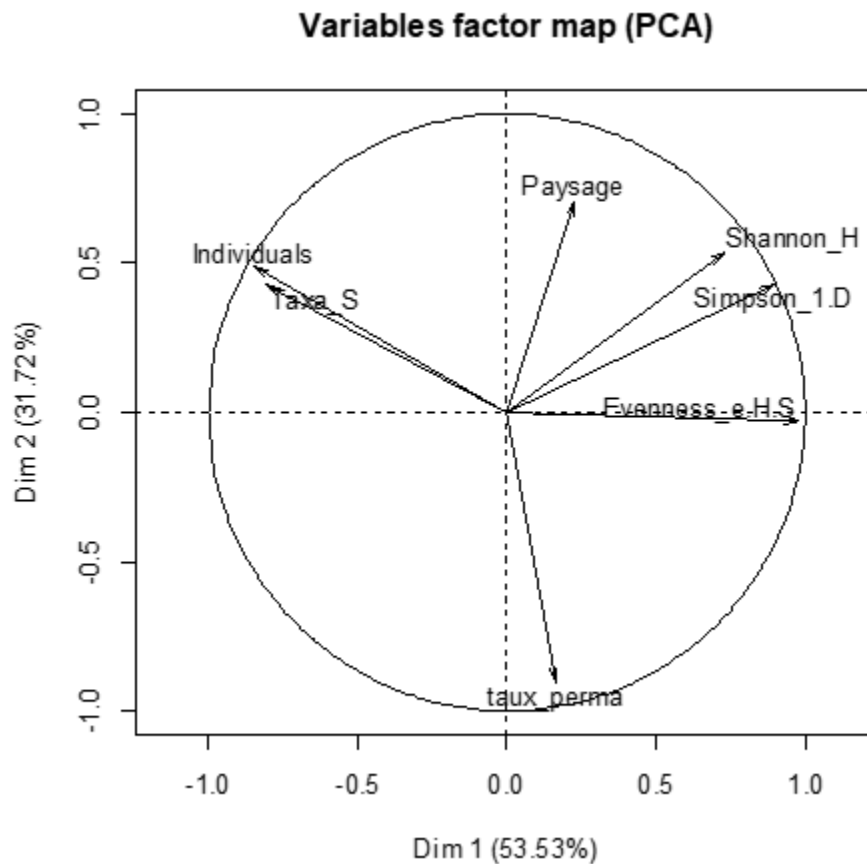
Figure 11 : Diagramme des proportions d'espèces de carabiques >5% dans au moins une des fermes

Individuals = abondance

Taxa_S = Richesse spécifique

Paysage = Hétérogénéité du paysage

Figure 12 : ACP des différents indices avec les données agrégées par ferme



L'abondance d'*Harpalus affinis* par ferme est corrélée positivement à l'indice de diversité du paysage. Il s'agit de la seule espèce pour laquelle cette corrélation est significative. L'abondance d'*Harpalus affinis* semble donc être favorisée par l'hétérogénéité du paysage (*Test de Spearman* : $S = 6$, $p\text{-value} = 0.0123$, $\rho = 0.8928571$).

Saisonnalité

Pour comparer les abondances aux différentes dates de relevés, un test de Kruskal-Wallis est effectué ($\chi^2 = 16.5287$, $df = 5$, $p\text{-value} = 0.01$). La $p\text{-value}$ étant inférieure à 0.05, une comparaison multiple de Dunn avec ajustement de Bonferroni est faite afin de vérifier entre quelles dates les abondances sont significativement différentes. Les abondances de fin avril/début mai sont différentes de celles d'avril ($p\text{-value} = 0.0071$) et de fin mai/début juin ($p\text{-value} = 0.0036$). Autrement dit, les dates aux abondances moyennes les plus faibles sont significativement différentes des dates aux abondances moyennes les plus fortes uniquement. De plus, les valeurs extrêmes marquent bien un pic vers fin mai/début juin, c'est donc sur cette période que les relevés aux plus fortes abondances ont été faits (Figure 13).

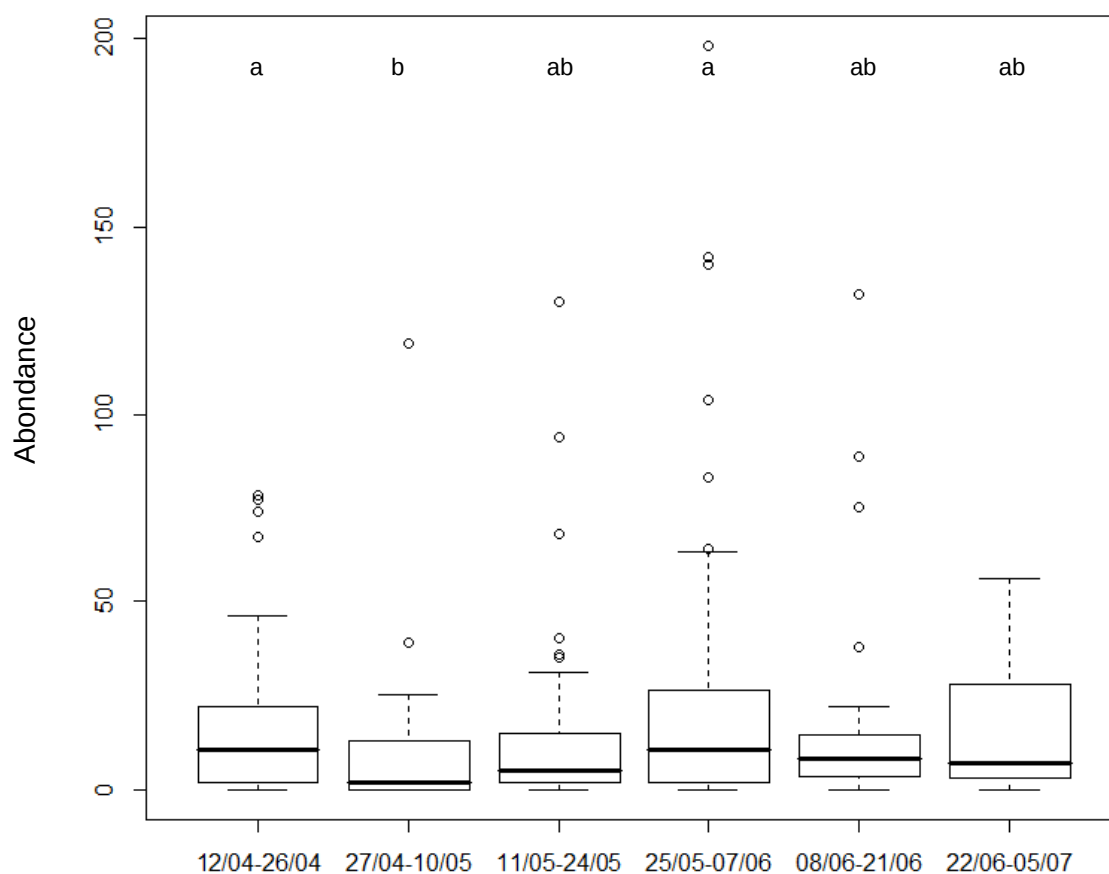


Figure 13 : Abondance en fonction de la date de relevé

Fonctions écologiques

Plus de 50 % des individus ont un régime à dominante omnivore. Les individus à dominante phytophage représentent moins de 15 % de l'abondance totale (Figure 14). Il n'y a pas de différence majeure entre 2017 et 2019.

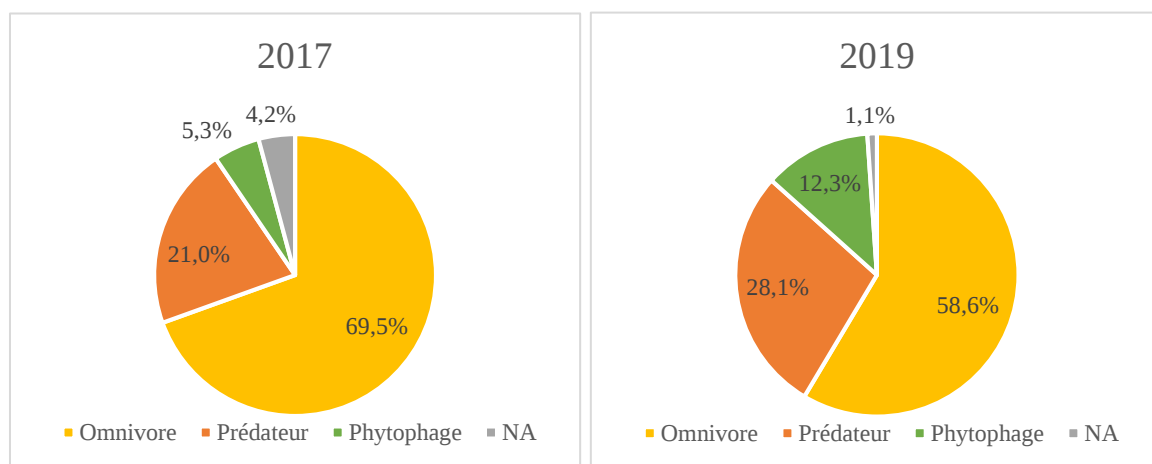


Figure 14 : Comparaison des proportions de régimes alimentaires en 2017 et 2019

Les proportions de régimes alimentaires sont globalement les mêmes dans toutes les fermes. De faibles variations sont tout de même visibles. Il y a plus de phytophages que de prédateurs en ferme E et presque autant de prédateurs que d'omnivores en ferme B. Les individus omnivores restent majoritaires (Figure 15).

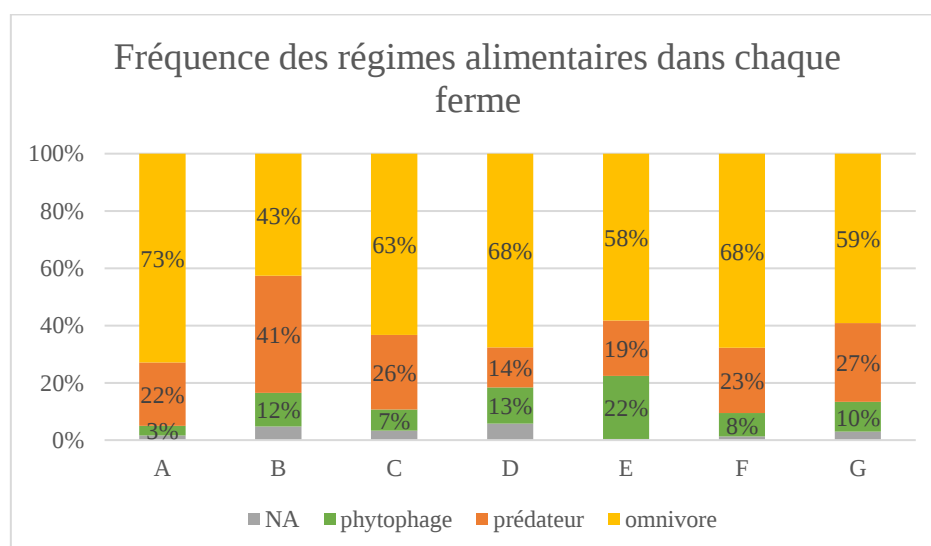


Figure 15 : Comparaison des proportions de régimes alimentaires par ferme

Les carabiques sont majoritairement de milieu ouvert. Cette proportion diminue entre 2017 et 2019, mais reste majoritaire. Les carabiques préfèrent sinon les milieux humides ou n'ont pas de préférences (eurytopes). Les carabiques de milieu forestier sont très minoritaires. (Figure 16)

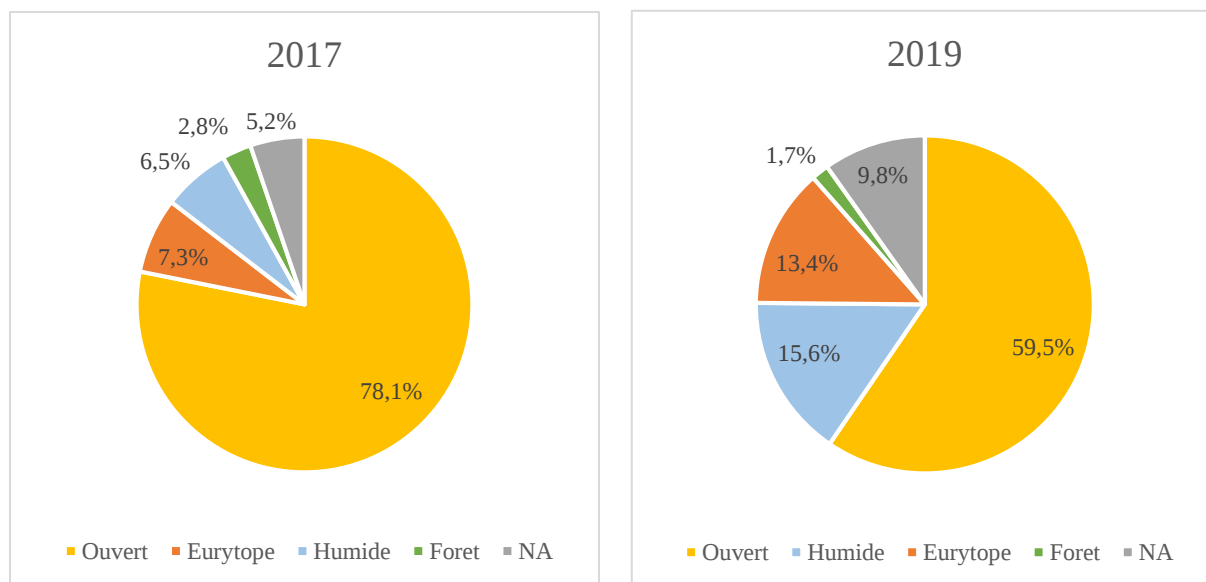


Figure 16 : Comparaison des proportions de préférences de milieu entre 2017 et 2019

Les proportions restent les mêmes dans toutes les fermes. Les carabiques de milieu ouvert sont majoritaires, les carabiques de milieu forestier très minoritaires. Il y a cependant plus d'individus préférant les milieux humides dans la ferme E que dans les autres fermes. (Figure 17)

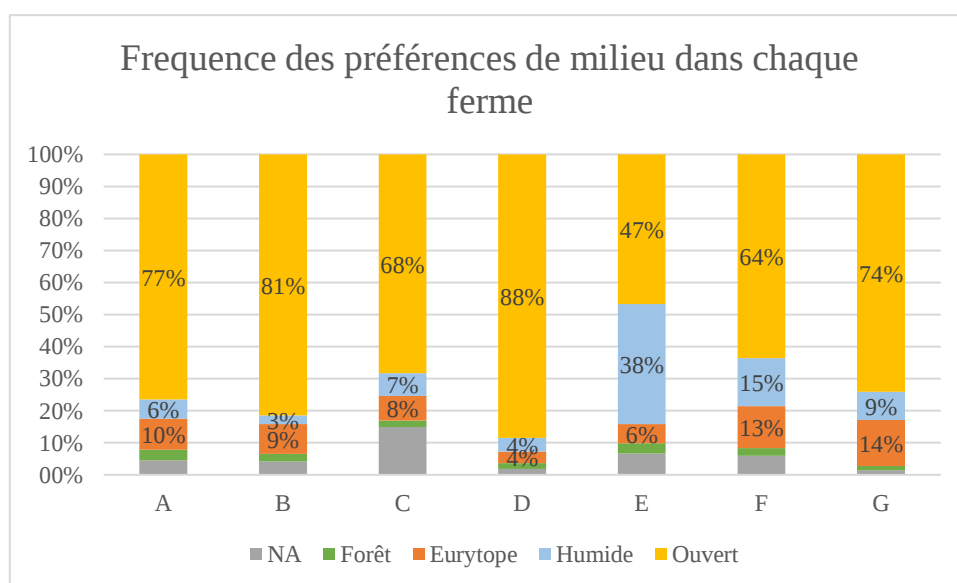


Figure 17 : Comparaison des proportions de préférence de milieu par ferme

Biais de l'enherbement

Le biais de l'enherbement a été vérifié en effectuant un test de Wilcoxon entre les modalités enherbées et désherbées sur l'abondance, la richesse spécifique et l'indice de Shannon pour la biodiversité. (Figure 18)

Aucune différence significative n'est observée (*Shannon* : $W = 615.5$, $p\text{-value} = 0.3594$; *Abondance* : $W = 586.5$, $p\text{-value} = 0.589$; *Richesse spécifique* : $W = 598.5$, $p\text{-value} = 0.4841$). Le biais de l'enherbement autour des pots n'impacte pas significativement les données.

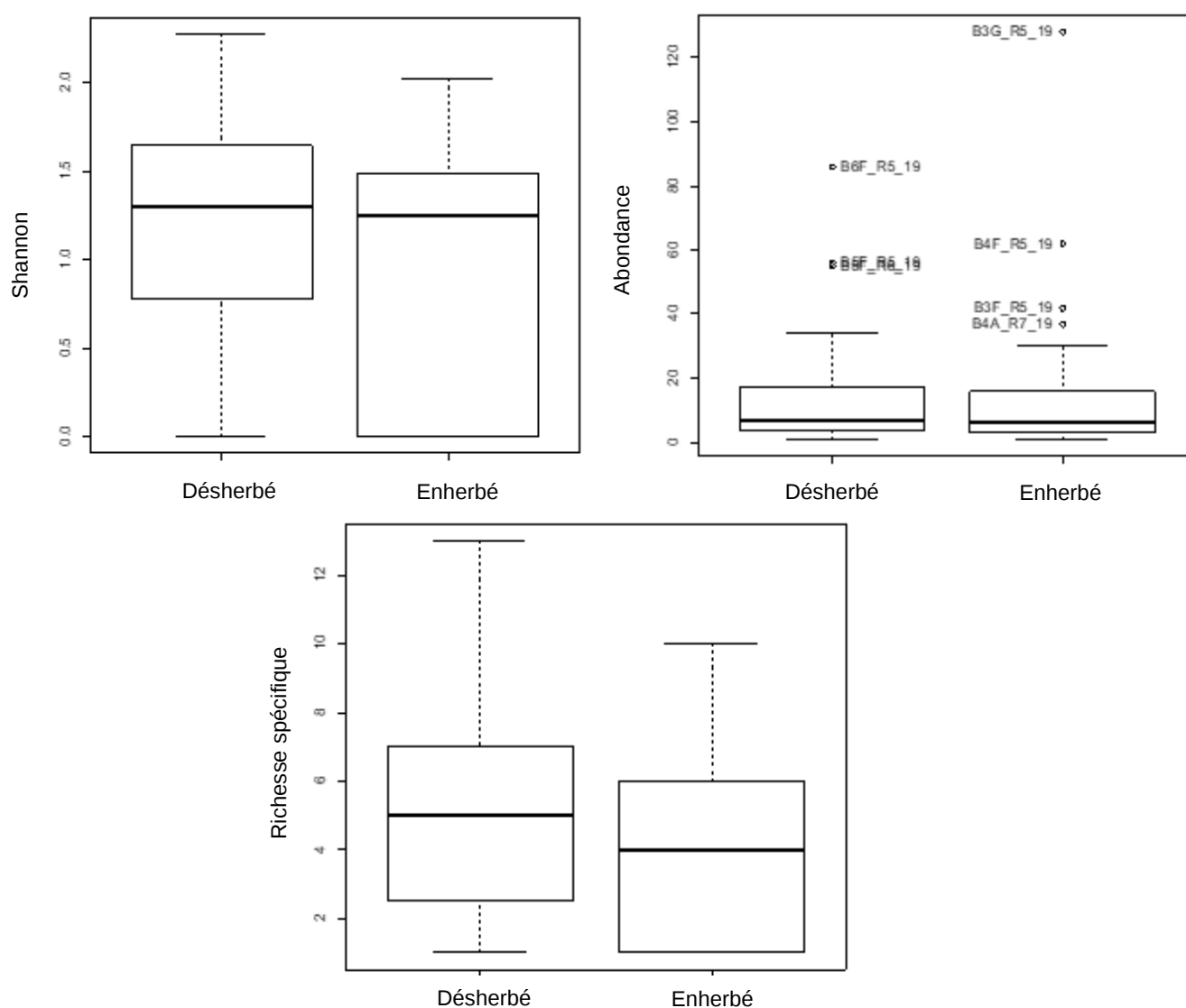


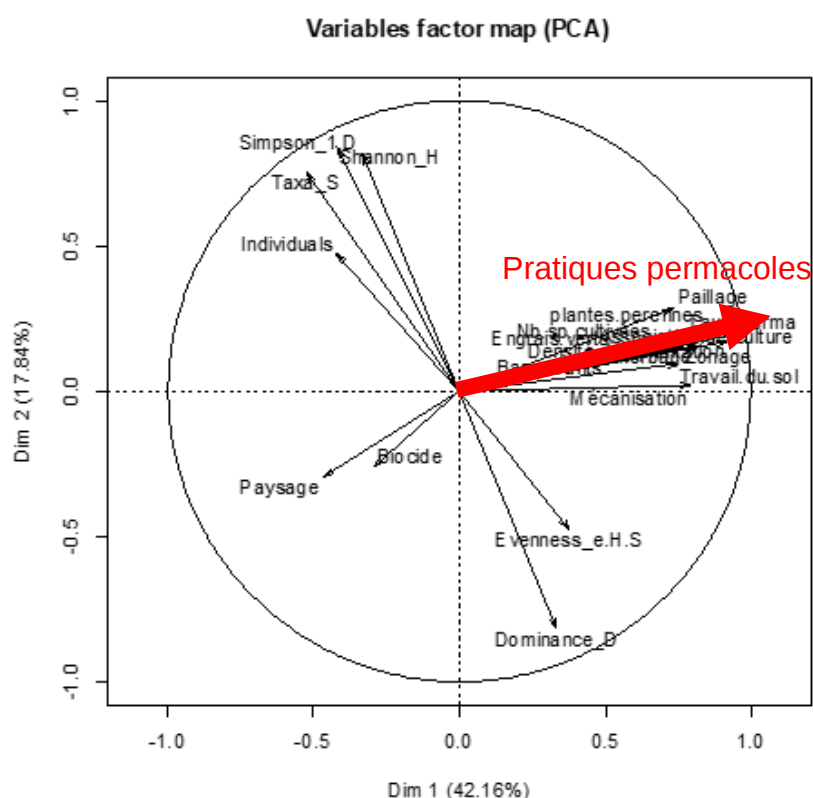
Figure 18 : Boxplots de l'abondance, de la richesse spécifique et de la biodiversité en fonction de l'enherbement

Effets des différentes pratiques permacoles

Une ACP a été utilisée afin de visualiser les relations entre les différentes pratiques utilisées pour calculer le taux permacole et les indices de mesure de la biodiversité (Figure 19). Aucune corrélation n'est observée entre les pratiques permacoles et les indices de diversité.

En revanche, le taux permacole est anti-corrélé à l'hétérogénéité du paysage (Test de Spearman : $S = 7176986$, $p\text{-value} < 2.2e-16$, $\rho = -0.5327711$) et l'utilisation de biocide semble anti-corrélée aux autres pratiques. Cela se vérifie avec les bas intrants ($S = 6666533$, $p\text{-value} = 1.118e-14$, $\rho = -0.4237549$), les engrais verts ($S = 7162944$, $p\text{-value} < 2.2e-16$, $\rho = -0.5297721$), le nombre d'espèces cultivées ($S = 7752714$, $p\text{-value} < 2.2e-16$, $\rho = -0.6557278$), le paillage ($S = 5672127$, $p\text{-value} = 0.0002053$, $\rho = -0.2113821$), le travail du sol ($S = 6530316$, $p\text{-value} = 9.002e-13$, $\rho = -0.3946634$) et le zonage ($S = 5446529$, $p\text{-value} = 0.004332$, $\rho = -0.1632017$).

L'utilisation de biocide est également anti-corrélée au taux permacole (Test de Spearman : $S = 5444225$, $p\text{-value} = 0.004452$, $\rho = -0.1627097$) et corrélée à l'hétérogénéité du paysage ($S = 965333$, $p\text{-value} < 2.2e-16$, $\rho = 0.7938363$).



Individuals = Abondance

Taxa_S = Richesse spécifique

Paysage = Hétérogénéité du paysage

Figure 19 : ACP des pratiques permacoles et indices de biodiversité

IV) Discussion

Piégeage

De nombreuses différences entre 2017 et 2019 ont été trouvées dans les relevés. L'apparition et la disparition d'espèces dans les relevés et les variations de leurs fréquences peuvent être liées au caractère aléatoire du piégeage. En effet, l'efficacité du piège Barber dépend également de l'activité des carabiques : on parle d'Activité/Densité (Thomas et al., 1998), rendant difficile l'interprétation des résultats. Des espèces en faible abondance et peu active peuvent ne pas avoir été piégées alors même qu'elles étaient présentes. La présence de certaines espèces pourrait être étudiée à l'aide d'un protocole d'occupation de sites.

Les petites espèces se déplacent moins, car elles consomment des petites proies abondantes (Dajoz, 2002; Loreau, 1986), ce qui augmente artificiellement le nombre de carabes de grande taille dans les pièges. Cependant, le manque de grandes espèces telles que les *Carabus* (seulement *Carabus violaceus* et *Carabus nemoralis* en très faible abondance) par rapport à celle attendue en système agricole porte à croire que cet effet n'a pas eu lieu ou alors uniquement pour les espèces moyennes. Des précautions ont tout de même été prises pour augmenter la fiabilité des pièges. Ces derniers ont été posés de façon régulière et peu espacée par rapport à la portée du piège, afin d'éviter que les carabiques parcourant de fortes distances soient sur-représentés. Les produits pouvant attirer les carabiques ont également été évités.

Compositions

Poecilus cupreus est largement dominant en abondance totale. Ce carabique très commun est habituellement abondant dans les milieux agricoles. Sa présence en grande quantité était donc attendue. Le fait qu'il ne soit pas dominant dans les fermes D et E est surprenant, cela peut s'expliquer par des biais d'échantillonnages ou l'influence de facteurs biotique et abiotiques développés plus loin.

Parmi les 5 autres espèces dominantes, *Pseudophonus rufipes*, *Harpalus affinis*, *Phylla obtusa* et *Amara aenea* sont également reconnus pour être abondants dans les agrosystèmes. *Brachinus sclopeta* a tendance à être grégaire, ce qui peut expliquer sa forte présence dans les pièges. Il s'agit d'un amateur de puceron qui colonise rapidement les milieux. Les pesticides de synthèse n'étant pas utilisés dans les fermes, les pucerons s'y développent plus facilement qu'en système conventionnel, pouvant attirer cette espèce. *Brachinus sclopeta* peut ainsi réguler les populations de puceron, remplissant son rôle d'auxiliaire de culture. Des études complémentaires pourraient être faites afin de vérifier que cet équilibre entre pucerons et consommateurs de pucerons se fait bien dans l'écosystème.

La quasi-absence de grands carabes comme *Carabus auratus* peut être soulignée. Cette espèce normalement présente en milieu agricole peut être un prédateur efficace pour des proies de grande taille (Loreau, 1986; Wheeler, 1988). Aujourd'hui en déclin dans les grandes cultures, cette espèce est favorisée par les cultures biologiques (Döring and Kromp, 2003), il aurait donc été attendu de le trouver dans les fermes de cette étude. *Carabus nemoralis* et *Carabus violaceus* ont été trouvés, il s'agit de carabes plutôt forestiers. Ces espèces ont pu profiter des haies et bandes enherbées afin de venir se nourrir dans le champ. La présence de grands carabes forestiers dans les fermes pourrait être étudiée en vue de mieux la comprendre.

Saisonnalité

L'abondance en fonction de la saisonnalité présente un creux en fin avril, un pic en avril et en juin. Ces deux pics peuvent correspondre à l'émergence des carabiques au printemps et en été selon leur cycle. Ces variations peuvent également être expliquées par les conditions météorologiques. En effet, certains relevés ont été particulièrement marqués par des périodes de pluies et de fortes canicules. L'émergence des carabiques de fin d'été a d'ailleurs sûrement été précoce du fait des fortes chaleurs.

Taux permacole et hétérogénéité du paysage

Les abondances et les compositions spécifiques sont très différentes entre les fermes, cependant, aucun lien n'a pu être établi avec le taux permacole ni l'hétérogénéité du paysage. Les pratiques choisies pour calculer le taux permacole pourraient être redéfinies ou ajustées selon d'autres critères. Ces pratiques prises séparément ne semblent pas non plus avoir d'effet sur les populations de carabique. Certaines pratiques permacoles ne semblaient pas a priori avoir de lien avec les arthropodes du sol. Pour d'autres comme le travail du sol ou la mécanisation, les résultats sont surprenants, car ils vont à l'encontre d'études ayant déjà démontré leurs effets (Holland and Luff, 2000).

L'utilisation de biocides étant néfaste pour la biodiversité, moins une ferme en utilise, plus sa note augmente. Dans cette étude, les biocides sont moins utilisés par les fermes les moins permacoles. Le paysage est également plus hétérogène autour des fermes utilisant plus de biocides. Cependant, les fermes sont toutes biologiques, les biocides sont donc naturels et utilisés en très faibles quantités, contrairement aux fermes conventionnelles.

Lors des comparaisons des diversités entre les fermes, il apparaît que la ferme F est significativement différente de A D et E. Une opposition entre des fermes aux pratiques plus permacoles et des fermes aux pratiques moins permacoles est observée. En effet, la ferme F (9) est la moins permacole dans le système de notation

contrairement aux fermes D (83) et E (72), respectivement 1^{re} et 2^e. Cependant, une corrélation exacte n'existe pas à cause de la ferme G (78) qui n'est pas significativement différente de la ferme F alors que son taux permacole est élevé et de la ferme A (56), significativement différente de la ferme F alors que son taux permacole est plutôt moyen.

Dans cette étude, les fermes présentant un taux permacole élevé sont également celles qui présentent un paysage plus homogène. La permaculture devrait avoir tendance à diversifier les milieux, l'effet inverse serait donc attendu. Mais les zones tampon de 500 m dépassaient parfois largement les limites de la ferme, aucune relation entre le taux de permaculture et l'hétérogénéité du paysage n'était donc attendue.

L'abondance d'*Harpalus affinis* uniquement est affecté significativement et positivement par l'hétérogénéité du paysage. Ce carabique n'est pourtant pas le plus exigeant des espèces contactées et s'accommode bien de milieux perturbés.

Facteurs abiotiques

Certaines fermes se trouvent en milieu plus urbain (proche de Tours), tandis que d'autres se trouvent dans des milieux plus ruraux. Deux fermes se trouvent en bord de Loire alors que d'autres se trouvent sur des plateaux, la topographie est donc fortement variable entre les fermes. De plus, la forte distance séparant les fermes suggère que de nombreux autres facteurs abiotiques y sont bien différents.

L'humidité du sol est un facteur important pour expliquer la répartition des carabiques (Eyre et al., 1990). L'humidité du sol a pu jouer fortement sur la composition des populations de carabiques dans les fermes (et notamment la ferme E où une forte proportion de carabiques de milieu humide ont été trouvés), et apporter un biais à l'expérimentation.

La présence de végétation plus abondante dans les fermes permacoles (bandes enherbées, plantes adventices) a tendance à retenir l'humidité, ce qui pourrait changer la composition, mais la présence de carabiques de milieux humides ne semble pas liée au taux permacole. La mesure de l'humidité du sol dans les fermes serait une amélioration intéressante du protocole, afin de vérifier ses effets sur la composition en carabiques.

Régime alimentaire

Les régimes alimentaires des carabiques ont été très étudiés. Même si les carabiques ont été classés selon leur régime alimentaire, celui-ci évolue selon la saison et le stade (Cornic, 1973). Il s'agit bien de dominantes, les carabiques restent donc assez opportunistes. Cela explique le fait que la majorité des carabiques sont classés omnivores.

Dans la ferme E, l'absence d'espèces dont le régime alimentaire n'est pas connu semble profiter aux phytophages. Les phytophages se retrouvent très légèrement plus nombreux que les prédateurs. Le fait que le régime de certaines espèces est inconnu et qu'il s'agit simplement de dominantes alimentaires rend ce résultat négligeable.

Dans la ferme B, il a été trouvé plus de prédateurs que dans les autres fermes. Ces résultats peuvent s'expliquer par une composition en proies différente. Par exemple, une forte proportion de *Microlestes* y est trouvée. Ce sont de grands prédateurs de collemboles. En tant que décomposeurs de matière organique, les populations de collemboles varient fortement en fonction de l'apport des fermiers en matière organique dans leurs champs. La présence d'un grand nombre de collemboles a pu influencer les fréquences des différents régimes alimentaires dans cette ferme. Les populations de proies pourraient être étudiées afin d'expliquer les variations au niveau des différents régimes alimentaires.

De plus, les larves de carabiques sont très majoritairement prédatrices, quel que soit leur régime alimentaire à l'état adulte (Dajoz, 2002). Le rôle de prédateur auxiliaire est donc joué par la grande majorité des individus contactés.

Interactions interspécifiques et prédation

La compétition entre les espèces de carabiques peut avoir un effet sur les populations. En effet, la dépendance à la ressource trophique est un facteur limitant chez les carabiques et on observe généralement une répartition des espèces sur des niches trophiques bien différentes selon leur taille et leur régime alimentaire (Lenski, 1982; Loreau, 1986). Si les différences de pratique entre les fermes n'ont pas d'effet sur l'abondance et la diversité des proies, la diversité en carabiques restera limitée.

De plus, la permaculture attire aussi une diversité de prédateurs autre que les carabiques comme les araignées ou les fourmis. La compétition avec ces taxons pourrait contrebalancer les effets favorables aux carabiques.

Le but de la permaculture est aussi d'attirer de la diversité en vertébrés (amphibiens, oiseaux, chouettes, rongeurs), prédateurs de carabiques. Cette pression de prédation peut avoir un effet négatif sur les populations de carabiques (Parmenter and MacMahon, 1988).

Brachinus sclopeta est également un parasite des larves d'*Amara* (Saska and Honek, 2004). La forte présence d'*Amara aenea* dans les fermes peut également expliquer son abondance. Bien que l'abondance des *Brachinus* et des *Amara* soient corrélées (*Test de Spearman* : $S = 3145137$, $p\text{-value} = 0.000000004522$, $\rho = 0.3283009$), cela pourrait s'expliquer par une troisième variable influençant les abondances générales et touchant les deux espèces.

Limites de l'étude et pistes d'amélioration

De nombreux résultats sont contre-intuitifs et, ou viennent s'opposer à des faits déjà vérifiés dans la littérature. La permaculture étant peu étudiée, il est difficile de conclure sur la fiabilité de ces résultats, cela montre les limites de l'étude. Néanmoins, le protocole peut être amélioré afin de s'en assurer. Le plus gros problème réside dans le nombre de fermes étudiées, trop faible. Il ne permet pas de conclure, quels que soient les résultats, sur des généralités en permaculture. Cependant un nombre de fermes plus important signifie plus de moyens à mettre en œuvre et un coût plus élevé. De plus, ces fermes ne sont pas précisément permacoles mais s'en inspirent seulement. Ce concept étant difficile à définir, la comparaison des fermes n'est pas toujours pertinente. L'indice permacole pourrait être amélioré en modifiant les pratiques permacoles choisies et en les pondérant en fonction de leur importance. Cet indice pourrait être testé sur des populations connues pour comprendre sa fiabilité et son fonctionnement avant de l'utiliser comme outil de mesure.

La mise en place d'une ferme en permaculture se fait sur une très longue durée (Mollison and Holgrem, 1986). Les fermes n'ont pas toutes un mode de production proche de la permaculture depuis la même date. Un suivi sur 3 ans est un peu court, un suivi sur le long terme serait intéressant pour constater les effets des pratiques permacoles (Irmier, 2018).

Aucune ferme pratiquant une production conventionnelle n'a souhaité participer au projet, mais l'apport de telles données serait un plus non-négligeable afin d'établir une comparaison avec la permaculture.

L'expérimentation directe sur les exploitations apporte des contraintes ne permettant pas d'avoir un protocole extrêmement rigoureux. Les dates de travail de la parcelle sont différentes selon les exploitants. Ce travail, ainsi que les conditions météorologiques, provoquent parfois des dégradations sur les pièges. Les différentes localisations des fermes peuvent également apporter des biais. Ces facteurs rendent l'exploitation des résultats compliquée.

Une des difficultés à expliquer les résultats est le manque d'études similaires comme point de comparaison. Une étude contrôle, où toutes les variables sont maîtrisées, permettrait d'avoir une référence. Cette étude pourrait se dérouler dans une ferme où tous les facteurs externes à l'étude sont connus et homogènes, sur des parcelles dans lesquelles les différentes pratiques seraient testées. Cette expérimentation permettrait de mieux comprendre les effets des pratiques. Les résultats, plus fiables et précis, pourraient alors être vérifiés sur diverses exploitations telles que les fermes de la présente étude.

Bibliographie

- Alignier, A., Aviron, S., 2017. Time-lagged response of carabid species richness and composition to past management practices and landscape context of semi-natural field margins. *J. Environ. Manage.* 204, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.054>
- Bardou, C., 2017. Etude comparative des populations de carabidés dans les exploitations maraîchères biologiques et inspirées de la permaculture.
- Benton, T.G., Vickery, J.A., Wilson, J.D., 2003. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends Ecol. Evol.* 18, 182–188. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00011-9)
- Bertrand, C., Burel, F., Baudry, J., 2016. Spatial and temporal heterogeneity of the crop mosaic influences carabid beetles in agricultural landscapes. *Landsc. Ecol.* 31, 451–466. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0259-4>
- British carabid habitat association. [WWW Document], n.d. URL <https://shiny-apps.ceh.ac.uk/CarabidData/> (accessed 8.24.19).
- Cornic, J.F., 1973. Etude du régime alimentaire de trois espèces de carabiques et de ses variations en verger de pommiers. *Ann. Société Entomol. Fr.* 69–87.
- Coulon, J., Pupier, R., Quéinnec, É., Ollivier, É., Richoux, P., 2011a. Coléoptères Carabiques, Faune de France. Fédération Française des Sociétés de Sciences Naturelles.
- Culliney, T.W., 2013. Role of Arthropods in Maintaining Soil Fertility. *Agriculture* 3, 629–659. <https://doi.org/10.3390/agriculture3040629>
- Dajoz, R., 2002. Les Coléoptères Carabidés et Ténébrionidés : écologie et biologie, Tec et Doc. ed.
- Desneux, N., Decourtye, A., Delpuech, J.-M., 2007. The Sublethal Effects of Pesticides on Beneficial Arthropods. *Annu. Rev. Entomol.* 52, 81–106. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.52.110405.091440>
- Döring, T.F., Kromp, B., 2003. Which carabid species benefit from organic agriculture?—a review of comparative studies in winter cereals from Germany and Switzerland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 98, 153–161. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00077-X)
- Équipe de développement de QGIS, 2019. Système d'information géographique QGIS. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Eyre, M.D., Luff, M.L., Rushton, S.P., 1990. The ground beetle (Coleoptera, Carabidae) fauna of intensively managed agricultural grassland in northern England and southern Scotland. *Pedobiologia* 34, 11–18.
- Ferguson, R.S., Lovell, S.T., 2014. Permaculture for agroecology: design, movement, practice, and worldview. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 251–274. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0181-6>
- Gallé, R., Happe, A., Baillod, A.B., Tscharrntke, T., Batáry, P., 2019. Landscape configuration, organic management, and within-field position drive functional diversity of spiders and carabids. *J. Appl. Ecol.* 56, 63–72. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13257>
- Hammer, Ø., Harper, D., Paul, D.R., n.d. PAST: PALEONTOLOGICAL STATISTICS SOFTWARE PACKAGE FOR EDUCATION AND DATA ANALYSIS.
- Holland, J.M., 2002. The Agroecology of Carabids Beetles, Intercept. ed.
- Holland, J.M., Luff, M.L., 2000. The Effects of Agricultural Practices on Carabidae in Temperate Agroecosystems 21.

- Irmiler, U., 2018. Which carabid species (Coleoptera: Carabidae) profit from organic farming after a succession of 15 years? *Agric. Ecosyst. Environ.* 263, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.019>
- Jambon, O., Roger, J.-L., Bouger, G., n.d. Clé de détermination des carabidés : Paysages agricoles du Nord ouest de la France.
- Keesstra, S.D., Rodrigo-Comino, J., Novara, A., Giménez-Morera, A., Pulido, M., Di Prima, S., Cerdà, A., 2019. Straw mulch as a sustainable solution to decrease runoff and erosion in glyphosate-treated clementine plantations in Eastern Spain. An assessment using rainfall simulation experiments. *CATENA* 174, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.007>
- Krebs, J., Bach, S., 2018. Permaculture—Scientific Evidence of Principles for the Agroecological Design of Farming Systems. *Sustainability* 10, 3218. <https://doi.org/10.3390/su10093218>
- Kremen, C., Miles, A., 2012. Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *Ecol. Soc.* 17. <https://doi.org/10.5751/ES-05035-170440>
- Lenski, R.E., 1982. Effects of forest cutting on two *Carabus* species: evidence for competition for food. *Ecology* 1211–1217.
- Loreau, M., 1986. Les niches écologiques des Carabidés en milieu forestier. II. Composantes trophiques et organisation générale des niches. *Bull. Cl. Sci. Acad. R. Belg.* 480–525.
- McGarigal, K., SA Cushman, E Ene., 2012. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. University of Massachusetts, Amherst.
- Melbourne, B.A., 1999. Bias in the effect of habitat structure on pitfall traps: An experimental evaluation. *Austral Ecol.* 24, 228–239. <https://doi.org/10.1046/j.1442-9993.1999.00967.x>
- Mollison, B., Holgrem, D., 1986. Permaculture 1, Debard. ed. Editions Debard.
- Morel, K., 2016. Viabilité des microfermes maraîchères biologiques. Une étude inductive combinant méthodes qualitatives et modélisation. AgroParisTech.
- Parmenter, R.R., MacMahon, J.A., 1988. Factors influencing species composition, and population size in a ground beetle community (Carabidae): predation by rodents. *oikos* 350–356.
- Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M.M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., Thies, C., Tscharntke, T., Weisser, W.W., Winqvist, C., Woltz, M., Bommarco, R., 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 221, 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.039>
- Saska, P., Honek, A., 2004. Development of the beetle parasitoids, *Brachinus expulso* and *B. crepitans* (Coleoptera: Carabidae). *J. Zool.* 262, 29–36. <https://doi.org/10.1017/S0952836903004412>
- Thomas, C.F.G., Parkinson, L., Marshall, E.J.P., 1998. Isolating the components of activity-density for the carabid beetle *Pterostichus melanarius* in farmland. *Oecologia* 116, 103–112. <https://doi.org/10.1007/s004420050568>
- Wheater, C.P., 1988. Predator-prey size relationships in some *Pterostichini* (Coleoptera: Carabidae). *Entomol. Mon. Mag.* 237–240.

Table des figures

Figure 1: Position des fermes en Indre et Loire	3
Figure 2 : Carabus nemoralis adulte.....	6
Figure 3 : Poecilus cupreus adulte	6
Figure 4 : Larve de Carabus nemoralis.....	6
Figure 5 : Position des pièges	7
Figure 6: Piège Barber.....	7
Figure 7: Tente Malaise	8
Figure 8 : Dates de relevés des pièges	8
Figure 9 : Raster de l'occupation du sol utilisés pour le calcul de l'hétérogénéité du paysage	12
Figure 10 : Diagramme des proportions d'espèces de carabiques >5% en 2017 et/ou en 2019.....	13
Figure 11 : Diagramme des proportions d'espèces de carabiques >5% dans au moins une des fermes	14
Figure 12 : ACP des différents indices avec les données agrégées par ferme.....	14
Figure 13 : Abondance en fonction de la date de relevé	16
Figure 14 : Comparaison des proportions de régimes alimentaires en 2017 et 2019.....	17
Figure 15 : Comparaison des proportions de régimes alimentaires par ferme	17
Figure 16 : Comparaison des proportions de préférences de milieu entre 2017 et 2019	18
Figure 17 : Comparaison des proportions de préférence de milieu par ferme	18
Figure 18 : Boxplots de l'abondance, de la richesse spécifique et de la biodiversité en fonction de l'enherbement	19
Figure 19 : ACP des pratiques permacoles et indices de biodiversité	20

Crédit photos :

Figure 2 : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/39/Carabus_nemoralis_01.jpg/800px-Carabus_nemoralis_01.jpg

Figure 3 : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/48/Carabus_nemoralis-l.jpg

Figure 4 : <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/01/Poecilus.cupreus.jpg>

Figure 6 : INNOPHYT

Figure 7 : INNOPHYT

Table des tableaux

Tableau I : Critère de classification des fermes en 2017	4
Tableau II : Taux permacole par ferme.....	4
Tableau III : Critère de classification des fermes en 2019	5
Tableau IV : Extrait du tableau de donnée.....	10
Tableau V : Hétérogénéité des différentes fermes	11
Tableau VI : Abondance et richesse spécifique par ferme.....	14

Annexes

Annexe 1 :

Tableau VII : Calendrier du stage

	Semaine 1 18-mars	Semaine 2 25-mars	Semaine 3 01-avr	Semaine 4 08-avr	Semaine 5 15-avr	Semaine 6 22-avr
Bibliographie						
Terrain						
Détermination						
Statistiques						
Rédaction						
Préparation de l'oral						
	Semaine 7 29-avr	Semaine 8 06-mai	Semaine 9 13-mai	Semaine 10 20-mai	Semaine 11 27-mai	Semaine 12 03-juin
Bibliographie						
Terrain						
Détermination						
Statistiques						
Rédaction						
Préparation de l'oral						
	Semaine 13 10-juin	Semaine 14 17-juin	Semaine 15 24-juin	Semaine 16 01-juil	Semaine 17 08-juil	Semaine 18 15-juil
Bibliographie						
Terrain						
Détermination						
Statistiques						
Rédaction						
Préparation de l'oral						
	Semaine 19 22-juil	Semaine 20 29-juil	Semaine 21 05-août	Semaine 22 12-août	Semaine 23 19-août	Semaine 24 26-août
Bibliographie						
Terrain						
Détermination						
Statistiques						
Rédaction						
Préparation de l'oral						

Emploi du temps concernant le projet Permaculture et Biodiversité. Des demi-journées de terrain s'ajoutant parfois pour aider sur d'autres projets.

Annexe 2 :

Tableau VIII : Tableau des tâches

Intervenant	Bibliographie	Mise en place du protocole	Collecte des données	Détermination	Analyse statistique	Rédaction
Principal	VM, AS	MC, BL	VM, AS	VM, AS	VM	VM
Secondaires	BL	VM, AS	BL	BL, SC, LG, PA	AS	

VM : Valentin Macé, Stagiaire

MC : Maxime Cornillon, Maître de stage

BL : Bernard Lemesle, Maître de stage

AS : Augustin Soulard, Stagiaire

SC : Sarah Cardonnet, Stagiaire

LG : Luca Guivarch, Stagiaire

PA : Pierre Angelopoulos, Stagiaire

Annexe 3 :

Tableau IX : Listes des espèces et proportion

Abax_paralelepipedus	1	0.02%	0.02%
Acupalpus_maculatus	1	0.02%	0.04%
Acupalpus_suturalis	1	0.02%	0.06%
Amara_convexior	1	0.02%	0.08%
Amara_montivaga	1	0.02%	0.10%
Anthracus_consputus	1	0.02%	0.12%
Badister_solidalis	1	0.02%	0.14%
Badister_unipustulatus	1	0.02%	0.16%
Bembidion_tetragrammum	1	0.02%	0.18%
Chlaeniellus_tristis	1	0.02%	0.20%
Chlaenius_olivieri	1	0.02%	0.22%
Diachromus_germanicus	1	0.02%	0.24%
Dixus_clypeatus	1	0.02%	0.26%
Dromius_quadrimaculatus	1	0.02%	0.28%
Harpalus_luteicornis	1	0.02%	0.30%
Harpalus_rufipalpis	1	0.02%	0.32%
Leistus_fulvibarbis	1	0.02%	0.34%
Loricera_pilicornis	1	0.02%	0.36%
Melanius_anthracinus	1	0.02%	0.38%
Notiophilus_substriatus	1	0.02%	0.40%
Ophonus_rufibarbis	1	0.02%	0.42%
Ophonus_xaxarsi	1	0.02%	0.44%
Poecilus_kugelanni	1	0.02%	0.47%
Pterostichus_strenuus	1	0.02%	0.49%
Semioophonus_signaticornis	1	0.02%	0.51%
Stenolophus_discophorus	1	0.02%	0.53%
Trechus_rubens	1	0.02%	0.55%
Acupalpus_dubius	2	0.04%	0.59%
Amara_kulti	2	0.04%	0.63%
Bembidion_femoratum	2	0.04%	0.67%
Bradycellus_harpalinus	2	0.04%	0.71%
Calathus_melanocephalus	2	0.04%	0.75%
Harpalus_honestus	2	0.04%	0.79%
Leistus_ferrugineus	2	0.04%	0.83%
Leistus_rufomarginatus	2	0.04%	0.87%
Leistus_spiniobarbis	2	0.04%	0.91%
Paradromius_linearis	2	0.04%	0.95%
Philochthus_guttula	2	0.04%	0.99%
Acupalpus_brunnipes	3	0.06%	1.05%
Acupalpus_elegans	3	0.06%	1.11%
Amara_ovata	3	0.06%	1.17%
Amblystomus_niger	3	0.06%	1.23%
Asaphidion_flavipes	3	0.06%	1.29%
Badister_peltatus	3	0.06%	1.35%
Carabus_nemoralis	3	0.06%	1.42%
Drypta_dentata	3	0.06%	1.48%
Harpalus_cupreus	3	0.06%	1.54%
Philochthus_biguttatus	3	0.06%	1.60%
Philochthus_mannerheimii	3	0.06%	1.66%
Amara_bifrons	4	0.08%	1.74%
Cicindela_campestris	4	0.08%	1.82%
Harpalus_anxius	4	0.08%	1.90%
Ocys_harpaloides	4	0.08%	1.98%
Ophonus_subquadratus	4	0.08%	2.06%
Stenolophus_skrimshirans	4	0.08%	2.14%
Acupalpus_parvulus	5	0.10%	2.24%
Amara_anthobia	5	0.10%	2.35%

Eotachys_bistriatus	5	0.10%	2.45%
Harpalus_picipennis	5	0.10%	2.55%
Harpalus_smaragdinus	5	0.10%	2.65%
Notiophilus_biguttatus	5	0.10%	2.75%
Brachinus_elegans	6	0.12%	2.87%
Stomis_pumicatus	7	0.14%	3.01%
Syntomus_obscuroguttatus	7	0.14%	3.15%
Tachyta_nana	7	0.14%	3.30%
Philochthus_lunulatus	8	0.16%	3.46%
Amara_eurynota	8	0.16%	3.62%
Badister_bullatus	8	0.16%	3.78%
Carabus_violaceus_purpurascens	8	0.16%	3.94%
Brachinus_creptans	9	0.18%	4.12%
Notiophilus_rufipes	9	0.18%	4.31%
Stenolophus_teutonius	9	0.18%	4.49%
Agonum_muelleri	10	0.20%	4.69%
Emphanes_normanuus	10	0.20%	4.89%
Harpalus_latus	11	0.22%	5.12%
Harpalus_pumilus	11	0.22%	5.34%
Clivina_gr_fossor	12	0.24%	5.58%
Harpalus_froehlichii	12	0.24%	5.82%
Harpalus_serripes	13	0.26%	6.09%
Anisodactylus_signatus	14	0.28%	6.37%
Notiophilus_quadripunctatus	14	0.28%	6.65%
Pterostichus_venalis	19	0.38%	7.04%
Bradycellus_verbasci	21	0.42%	7.46%
Demetrias_atricapillus	21	0.42%	7.89%
Calathus_fuscipes	22	0.44%	8.33%
Ophonus_gr_puncticeps	22	0.44%	8.77%
Amara_similata	23	0.47%	9.24%
Amara_communis	24	0.49%	9.73%
Nebria_brevicollis	25	0.51%	10.23%
Amara_nitida	26	0.53%	10.76%
Harpalus_atratus	26	0.53%	11.28%
Harpalus_rubripes	26	0.53%	11.81%
Ophonus_azureus	26	0.53%	12.33%
Anisodactylus_binotatus	31	0.63%	12.96%
Acupalpus_meridianus	35	0.71%	13.67%
Metallina_lampros	47	0.95%	14.62%
Pterostichus_melanarius	48	0.97%	15.59%
Nebria_salina	50	1.01%	16.60%
Bembidion_quadrimaculatum	53	1.07%	17.67%
Parophonus_maculicornis	53	1.07%	18.74%
Brachinus_explodens	65	1.31%	20.06%
Trechus_gr_quadristriatus	91	1.84%	21.90%
Amara_familiaris	92	1.86%	23.76%
Metallina_properans	117	2.37%	26.12%
Harpalus_dimidiatus	121	2.45%	28.57%
Harpalus_distiguendus	142	2.87%	31.44%
Harpalus_tardus	142	2.87%	34.31%
Microlestes_sp	153	3.09%	37.40%
Anchomenus_dorsalis	174	3.52%	40.92%
Phyla_obtusa	190	3.84%	44.76%
Harpalus_affinis	246	4.97%	49.74%
Amara_aenea	272	5.50%	55.24%
Brachinus_sclopetata	297	6.00%	61.24%
Pseudoophonus_rufipes	361	7.30%	68.54%
Poecilus_cupreus	1556	31.46%	100.00%

Annexe 4 :

Tableau X : Calcul de l'indice permacole

Pratiques	Réponses	Points	A	B	C	D	E	F	G
Mécanisation	forte (tracteur)	0			0			0	
	moyenne (petit tracteur)	0,33							0,33
	faible (motoculteur)	0,66	0,66	0,66			0,66		
	absente	1				1			
Travail du sol (profondeur)	+20cm	0			0			0	
	10-20cm	0,5	0,5				0,5		0,5
	-10cm	1		1		1			
Densité d'implantation	faible	0			0		0	0	
	moyenne	0,5		0,5					
	forte	1	1			1			1
Association de culture	non	0		0	0			0	
	oui	1	1			1	1		1
pratique bas intrants	non	0	0					0	
	oui	1		1	1	1	1		1
Engrais vert	non	0			0	0		0	
	oui	1	1	1			1		1
Paillage	non	0	0	0	0			0	
	partiel	0,5					0,5		
	oui	1				1			1
Biocide	oui	0							
	peu	0,5		0,5					0,5
	non	1	1		1	1	1	1	
Désherbage	arrachage ou labour	0		0	0			0	
	bâchage, paillage ou arrachage partiel	0,5	0,5			0,5	0,5		0,5
	absent	1							
Plantes pérennes en culture	non	0		0				0	
	peu	0,5	0,5		0,5				
	oui	1				1	1		1
Zonage	Non	0	0		0			0	
	Partiel (2 ou 3 zones)	0,5		0,5					0,5
	Oui (4-5 zones) avec zone naturelle	1				1	1		
Nombre d'espèces cultivé	<30	0			0			0	
	30-40	0,5				0,5	0,5		
	>40	1	1	1					1