

Projet Recherche Innovation 2024-2025

L'impact d'un parc photovoltaïque en exploitation sur les invertébrés épigés



Directeurs de recherche :

Monsieur Louison Bienvenu

Monsieur Francis Isselin

Auteur :

Monsieur Chauvet Clément

2024-2025

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet recherche innovation en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet recherche innovation (PRI) situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciement

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné dans la réalisation de ce projet de fin d'études ainsi que tout le personnel et les professeurs de l'école Polytech Tours.

Je remercie tout particulièrement mes directeurs de recherche, Monsieur Louison Bienvenu, doctorant, et Monsieur Francis Isselin, professeur et maître de conférences écologue. Ils ont su répondre à mes interrogations tout au long de ce travail et m'apporter les connaissances nécessaires à sa réalisation.

Je tiens également à remercier Nathan Dubreuil pour son aide précieuse sur le terrain et le partage de son expérience. Enfin, je remercie chaleureusement Monsieur Jean-Luc Mercier, chercheur à l'IRBI, pour sa bienveillance et les connaissances qu'il m'a transmises.

Sommaire

1.	Introduction	6
1.1.	Les enjeux actuels (Chauvet, 2024).....	6
1.2.	Les invertébrés épigés comme bioindicateur	6
1.3.	Développement de l'énergie photovoltaïque.....	7
1.4.	Les impacts des parcs photovoltaïques sur la biodiversité.....	7
2.	Matériel et méthodes.....	9
2.1.	Site d'étude	9
2.2.	Méthode des pots Barber	9
2.3.	Déroulé de l'étude	10
2.4.	Méthode d'identification	11
2.5.	Tests statistiques.....	12
2.5.1.	Courbe d'accumulation des ordres taxonomiques.....	12
2.5.2.	PERMANOVA et NMDS	12
2.5.3.	Test de Wilcoxon	13
2.5.4.	GLM.....	14
3.	Résultats	15
3.1.	Comparaison des communautés entre les deux modalités.....	17
3.1.1.	PERMANOVA.....	17
3.1.2.	NMDS réalisée avec la PERMANOVA.....	18
3.2.	Comparaison des abondances entre les zones d'échantillonnage	18
3.2.1.	Test de Wilcoxon-Mann-Whitney.....	18
3.2.2.	Modèle linéaire généralisé (GLM)	19
4.	Discussion	21
4.1.	Interprétation des résultats.....	21
4.2.	Comparaison des services écosystémiques rendus par les deux zones d'échantillonnage	22
4.3.	Limites de cette étude et perspectives pour des recherches futures	23
5.	Conclusion	24
6.	Bibliographie.....	25
7.	Annexes	30
	Annexe 1 : Code Rstudio de la PERMANOVA et de la NMDS.....	30

Table des figures

Figure 1 : Schéma explicatif de la méthode des pots Barber	9
Figure 2 : Photo d'un pot Barber installé	10
Figure 3 : Carte de la répartition des pièges sur le champ de panneaux photovoltaïques de Bourges	11
Figure 4 : Photo du tri préalable à l'identification d'un pot Barber	12
Figure 5 : Courbe d'accumulation des ordres identifiés selon la zone d'échantillonnage.....	15
Figure 6 : Courbe d'accumulation des ordres identifiés sur le site d'étude.....	15
Figure 7 : Pourcentage de pièges positifs par ordre en fonction de la zone d'échantillonnage.....	16
Figure 8 : Abondance moyenne des ordres identifiés par zone d'échantillonnage.....	16
Figure 9 : Représentation NMDS issue de la PERMANOVA.....	18
Figure 10 : Estimation de l'effet de la zone d'échantillonnage sur les ordres d'invertébrés épigés	20

Table des Tableaux

Tableau 1 : PERMANOVA sur les 24 pots Barber identifiés.....	17
Tableau 2 : Tests de Wilcoxon : résultats significatifs entre les deux modalités pour chaque ordre identifié	19
Tableau 3 : GLM : ordres en fonction de la zone d'échantillonnage "sous panneau"	19

1. Introduction

1.1. Les enjeux actuels (Chauvet, 2024)

La biodiversité a déjà traversé cinq grandes crises d'extinctions (Ordovicien, Dévonien, Permien, Trias, Crétacé). Elle subit actuellement une sixième crise, marquée par des taux d'extinction nettement supérieurs à ceux des crises précédentes (Sepkoski, 1986). Cette crise contemporaine se distingue par un déclin prononcé des oiseaux, des mammifères (Barbault et Chevassus-au-Louis, s. d.), et des amphibiens (McCallum, 2007). Elle tire son origine de l'activité humaine, telle que la fragmentation des habitats, les invasions biologiques, la surexploitation et les extinctions en chaîne. Ces changements affectent l'ensemble de la biodiversité, et non seulement certaines espèces, habitats ou écosystèmes localisés (Godet, 2017). Parmi les groupes les plus menacés, on retrouve les mammifères (24% des espèces), les oiseaux (11%) et les plantes (11%) (Harrison & Pearce, 2000).

Certains scientifiques estiment qu'un réchauffement global de 0,8 °C à 2,2 °C en 2050 devrait provoquer l'extinction de 15 % à 37 % des espèces de papillons, vertébrés et plantes terrestres peuplant les diverses grandes régions considérées (Thomas & Settele, 2004) in (Teyssèdre, s. d.).

Les invertébrés sont aussi grandement touchés par ce déclin. Selon certains scientifiques, plus de 40% des espèces d'insectes seraient menacées (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019), d'autres parlent de déclin important de l'abondance et de la quantité de biomasse des insectes (Cardoso & Leather, 2019; Hallmann et al., 2017) ; et les Lépidoptères ainsi que les Hyménoptères seraient les taxons les plus concernés par cette crise (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019). Les invertébrés sont une partie majeure de la biodiversité (en termes de biomasse, d'histoire et de diversités), il est important de les conserver (Wilson, 1987). De plus, les invertébrés présentent des caractéristiques telles que l'opportunisme et une réponse rapide au changement (Morris, 2000). Cette riche faune, qui s'adapte rapidement au changement, ne représente pourtant qu'une faible proportion de ce qui existait avant des siècles d'exploitation par l'Homme (Morris, 2000).

Dans plusieurs pays ainsi qu'en France, des mesures de conservation ont été prises. Il y a notamment les Parcs Nationaux (PNR), les zones classées Natura 2000, les Parcs Naturels Régionaux (PNR), les Réserves Naturelles Nationales (RNN), les Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF), et les Trames Vertes et Bleues (TVB).

1.2. Les invertébrés épigés comme bioindicateur

Les invertébrés épigés, c'est-à-dire vivant directement sur le sol, étant sensibles aux changements climatiques et d'habitats, leur étude pourrait permettre de renseigner sur les caractéristiques d'un milieu, de connaître son état et d'aider les efforts de conservation et la gestion des réserves naturelles (di Castri et al., 1992; Kremen et al., 1993). Cette faune est sensible à toute perturbation, car elle dépend des ressources du sol pour sa survie (Lavelle et al., 2006). Ils feraient donc de bons bioindicateurs grâce à leur importante biomasse, la richesse des espèces et leur fonction écologique (rôle clé dans le réseau trophique) (Lawes et al., 2005; McGeoch, 2007). C'est aussi leur histoire, leur diversité comportementale et leur réactivité aux changements qui rendrait plus simple la détermination de perturbations.

Les coléoptères, notamment les *Carabidae*, *Staphylinidae* et *Curculionidae*, sont reconnus comme d'excellents bioindicateurs environnementaux (Chowdhury et al., 2023; Ghannem et al., 2018). Les carabes, en particulier, sont utilisés pour surveiller les polluants environnementaux (métaux lourds) et évaluer la gestion forestière (Butovsky, 2011). Les fourmis peuvent aussi faire de bons indicateurs puisqu'elles sont ubiquistes (Nummelin et al., 2007). En Australie, les *Formicidae* sont largement utilisées comme bioindicateurs dans la gestion des terres (Andersen et al., 2002) pour évaluer le succès des restaurations écologiques (industrie minière) (Majer & Nichols, 1998). Elles sont également utilisées pour surveiller les impacts sur d'autres milieux comme les forêts (Vanderwoude et al., 1997).

L'abondance de cette faune, très importante pour la biodiversité, peut être impactée par les perturbations anthropiques (Girard et al., 2011). C'est pourquoi la conservation des invertébrés épigés est une nécessité. Cependant, l'Homme cherchant à diversifier ses moyens de production d'énergie, installe depuis quelques dizaines d'années des panneaux photovoltaïques sur des milieux où vit cette faune.

1.3. Développement de l'énergie photovoltaïque

Depuis plusieurs décennies, l'énergie photovoltaïque gagne progressivement en importance à l'échelle mondiale. Chaque année, de nombreux pays augmentent leur capacité d'installation de panneaux solaires (*photovoltaïque.info - Tendances mondiales en 2023*, 2024). La Chine domine ce secteur depuis près de 10 ans, étant le principal installateur de panneaux photovoltaïques (Masson et al., 2024).

Dans certains pays, cette source d'énergie couvre près de 20 % de la demande en électricité (Espagne, Vietnam...) (Masson et al., 2023).

En France, bien que le photovoltaïque ne représente que 5 % de la demande en électricité en 2022, sa part devrait augmenter grâce aux objectifs fixés pour 2028. En effet, ces objectifs visent une production installée de 35,1 à 44,0 GW, contre 13,3 GW en 2021 (SDES, 2022). La France est donc en retard par rapport à la moyenne mondiale en matière de photovoltaïque, ce qui peut s'expliquer par une politique énergétique axée principalement sur le nucléaire.

Ces installations prennent une place conséquente sur les territoires et sur les milieux naturels, agricoles et forestiers. En Nouvelle-Aquitaine, 39 km² de parc photovoltaïques ont été installés sur ces milieux en douze ans (Wilczynski & Guicheney, s. d.). C'est pourquoi il est nécessaire de prendre en compte leur impact.

1.4. Les impacts des parcs photovoltaïques sur la biodiversité

Malgré la croissance récente de la surface de parcs photovoltaïque à travers le monde, les impacts des panneaux photovoltaïques restent très peu étudiés. Toutefois, certaines études montrent qu'ils peuvent avoir des effets notables : par exemple, l'ombre générée par ces panneaux photovoltaïques retarde la floraison et augmente l'abondance florale en fin de saison, ce qui peut bénéficier aux pollinisateurs en milieu aride (Graham et al., 2021). Ils ont aussi un effet sur la composition végétale,

on retrouve par exemple plus de mousse en inter-rang et plus de sol nu sous les panneaux (Madej et al., 2022) ; ce qui peut être expliqué par la création d'un microclimat favorisant certaines espèces végétales et animales (Gibson et al., 2017; Madej et al., 2022). Ce microclimat se caractérise surtout par une augmentation de l'humidité et des températures plus fraîches (Makaronidou, 2020).

Les tendances actuelles du changement climatique nous amènent à réfléchir à l'impact d'infrastructures telles que les champs de panneaux photovoltaïques. Les invertébrés épigés, qui sont de bons indicateurs de l'état de la biodiversité restent peu étudiés dans le contexte des impacts des panneaux photovoltaïques (Audrey, 2023). Bien que des effets potentiels aient été estimés, les connaissances sur ce sujet demeurent limitées (Audrey, 2023), une question se pose donc :

Les panneaux photovoltaïques ont-ils un impact sur les invertébrés épigés ?

Pour répondre à cette question, nous détaillerons notre étude, ainsi que la méthode et le matériel utilisés, avant de présenter les résultats et de les discuter.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site d'étude

Notre étude a été réalisée sur quatre jours en juillet 2024 sur le champ de panneaux photovoltaïques de l'aéroport de Bourges.

Au sud du Bassin parisien, à environ 200 kilomètres de Paris, Bourges se situe au cœur de la Champagne berrichonne, une région marquée par un vaste plateau légèrement incliné vers le nord-ouest. Ce territoire, façonné par une ancienne érosion et traversé par les vallées de l'Yèvre et du Cher, offre des paysages variés. Les sols argileux et humides favorisent le développement de la forêt, tandis que les plaines inondables sont utilisées pour l'élevage, le maraîchage et la culture du maïs. Les limons sableux des hauteurs, bien drainés, sont propices aux vergers et à la vigne, tandis que les terrains calcaires accueillent les cultures céréalières ou, ponctuellement, le maïs grâce à des ressources en eau locales.

Le parc solaire de l'aéroport de Bourges, implanté sur des sols calcaires, couvre 12,3 hectares et abrite 23 880 panneaux photovoltaïques et génèrent une puissance totale de 10,3 MW. Sa production annuelle de 12 320 MWh alimente l'équivalent de 5 500 habitants en électricité. Construit sur une ancienne friche, il a été mis en service en février 2021 pour une durée de 20 ans.

2.2. Méthode des pots Barber

Nous utilisons la méthode des pots Barber (Barber, 1931) qui permet de capturer les invertébrés épigés et des diptères. Ces pièges sont simples, peu coûteux et permettent une collecte continue, y compris la nuit, limitant les biais liés aux rythmes circadiens des espèces. Ils ont permis d'importantes avancées dans la compréhension des dynamiques et des assemblages d'invertébrés épigés (Koivula et al., 2003).

Cette méthode consiste à enterrer un pot en plastique au ras de la surface du sol (Koivula et al., 2003). Chaque pot est rempli d'un mélange d'eau et de liquide vaisselle (Figure 1).

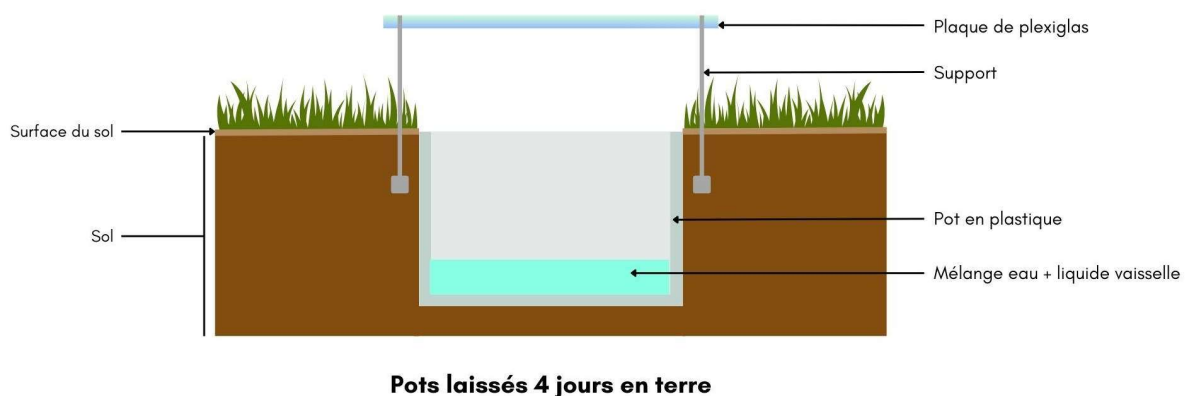


Figure 1 : Schéma explicatif de la méthode des pots Barber

Des plaques en verre sont placées au-dessus des pots (Figure 2) afin d'empêcher l'eau de s'infiltrer dans les pots Barber, y compris sous les panneaux photovoltaïques afin que la présence de cette plaque n'influence pas nos résultats.



Figure 2 : Photo d'un pot Barber installé

2.3. Déroulé de l'étude

Nous avons posé 24 pièges le 13 juin et nous les avons récupérés quatre jours plus tard, le 17 juin. Nous étions équipés de casques de chantier, de chaussures de sécurité et d'un gilet jaune obligatoires pour entrer dans un parc photovoltaïque. Nous avons placé à trois reprises 4 pièges sous les panneaux photovoltaïques et 4 en bordure du champ. Cette démarche a pour but de comparer la faune d'un milieu impacté par les panneaux photovoltaïques avec celle d'un milieu moins anthropisé. Les pièges ont été placés tous les 25 mètres le long des transects (Figure 3) afin de rendre les résultats indépendants et de capturer une plus grande richesse d'espèces (Ward et al., 2001). Lors de la pose, nous avons relevé les rangées où les pièges étaient posés pour gagner du temps lors de la récupération.



Figure 3 : Carte de la répartition des pièges sur le champ de panneaux photovoltaïques de Bourges

Enfin, il fallut attendre quatre jours pour récupérer le contenu des pots afin d'avoir un maximum d'individus. Pour la récupération du contenu des pots Barber, nous versions le contenu du pot dans une passoire. Le contenu de la passoire était ensuite transféré dans un tube rempli d'alcool à 95 degrés pour la conservation.

2.4. Méthode d'identification

Pour la détermination et l'identification, nous ne poussons pas l'analyse plus loin que l'ordre pour la plupart des individus. Cela est principalement dû à un manque de temps et de matériel. Pour identifier une faune diversifiée, et des individus aussi petits, il faudrait contacter plusieurs spécialistes (pour chaque ordre, voire chaque genre). L'accès à des loupes binoculaires avec un grossissement plus important est également indispensable. Néanmoins, certains genres de coléoptères et d'hyménoptères ont pu être identifiés.

Une fois le contenu des pots passé à travers un filtre, afin d'en extraire les individus, la première étape consiste à isoler les ordres facilement identifiables, tels que les *Opiliones* ou les *Araneae* du reste des individus qui sont ensuite placés dans des boîtes de pétri (Figure 4).



Figure 4 : Photo du tri préalable à l'identification d'un pot Barber

Nous avons utilisé des clés de détermination des insectes de Pro Natura (Pro Natura, 2021), le guide photo des araignées Delachaux (Bellmann, 2014), ou la clé de détermination pour les arthropodes (FAURE SVT, s. d.) ainsi que des ressources en ligne comme QUBS (*QUBS - Faune des sols*, s. d.) ou Collemboles.fr (*Les Collemboles*, s. d.). Une fois l'identification finie, nous avons replacé les individus dans les tubes d'alcool. Ce processus a été répété pour chacun des 24 pots.

2.5. Tests statistiques

Toutes nos analyses sont réalisées avec le logiciel R (Grolemund, s. d.).

2.5.1. Courbe d'accumulation des ordres taxonomiques

Nous réalisons une courbe d'accumulation des ordres pour vérifier que tous les ordres présents sur le site ont été détectés. Nous utilisons la fonction "specaccum" de la librairie "vegan" (Oksanen et al., 2001) ainsi que la fonction "ggplot" de la librairie "ggplot2" (ggplot2, s. d.) afin de réaliser un graphique.

2.5.2. PERMANOVA et NMDS

Nous réalisons une PERMANOVA afin de vérifier si les communautés d'invertébrés épigés dans les deux zones d'échantillonnage diffèrent de façon significative. La PERMANOVA utilise la distance de Bray-Curtis. Cette distance mesure la dissemblance (c'est-à-dire à quel point les échantillons sont différents) en fonction de la composition des communautés, incluant à la fois :

- Les présences ou les absences des ordres d'invertébrés épigés.
- L'abondance relative de chaque ordre d'invertébrés épigés dans les deux zones.

Afin de réaliser la PERMANOVA, il faut que les dispersions multivariées entre les groupes (ici, les zones d'échantillonnage) soient égales. Nous vérifions cela en réalisant un test d'homogénéité des dispersions avec la fonction "betadisper" de la librairie "vegan" (Oksanen et al., 2001).

La PERMANOVA est réalisée avec la fonction "adonis2" de la librairie "vegan" (Oksanen et al., 2001).

- H_0 : Les dispersions multivariées entre les zones d'échantillonnage ne sont pas statistiquement différentes
- H_a : Les dispersions multivariées entre les zones d'échantillonnage sont statistiquement différentes

Afin de représenter les résultats obtenus avec la PERMANOVA, nous réalisons une ordination NMDS (Non-Metric Multidimensional Scaling), basée sur la matrice des distances (ici Bray-Curtis). Nous utilisons la fonction "metaMDS" de la librairie vegan pour calculer les scores NMDS et nous utilisons "ggplot" de la librairie "ggplot2" (ggplot2, s. d.). Les codes Rstudio de la PERMANOVA et de la NMDS sont en annexe (Annexe 1).

2.5.3. Test de Wilcoxon

Nous cherchons à déterminer s'il existe une différence significative dans la présence et l'abondance de chaque ordre entre les deux zones d'échantillonnage (Bordure et Sous panneau). Avant d'effectuer un test pour savoir si les ordres sont significativement différents entre les deux modalités, il est nécessaire de vérifier si les données pour chaque modalité suivent une distribution normale en utilisant le test de Shapiro-Wilk. Nous utilisons la fonction "shapiro.test" intégrée à Rstudio. Selon le résultat du test de Shapiro-Wilk, un test différent est appliqué :

Si les deux modalités (Bordure et Sous panneau) suivent une distribution normale, on applique le test t (paramétrique) :

- Vérifie si les moyennes des deux modalités sont significativement différentes.
- Hypothèse nulle (H_0) : Les moyennes des deux groupes sont égales.

Si au moins une des modalités ne suit pas une distribution normale alors on applique le Test de Wilcoxon (non paramétrique). Nous utilisons la fonction "wilcox.test" intégrée à Rstudio :

- Hypothèse nulle (H_0) : Les distributions des deux groupes sont identiques.

Les deux tests servent à comparer deux groupes indépendants (ici les deux zones d'échantillonnage). De plus, les tests statistiques (t-test ou Wilcoxon) requièrent de la variabilité dans les données pour évaluer une différence. Lorsque toutes les données sont identiques, aucune comparaison n'est possible. Cette condition est également respectée avec notre jeu de données.

2.5.4. GLM

Nous cherchons à déterminer s'il existe une différence significative entre les abondances des deux zones d'échantillonnage en fonction des ordres. La glm (modèle linéaire généralisé) nous sert à renforcer le résultat des tests de Wilcoxon, à fournir une estimation quantitative de la différence moyenne entre les zones d'échantillonnage et une indication de la direction de cette différence. Elle prend également en compte la distribution statistique des données, ici la distribution de Poisson.

Nous utilisons la fonction "GLM" intégrée à Rstudio. Nous cherchons aussi à le représenter graphiquement et nous utilisons la fonction "ggplot" de la librairie "ggplot2" (ggplot2, s. d.).

3. Résultats

Nous avons réalisé une courbe d'accumulation des ordres à partir des données des 24 pots Barber afin de déterminer si la majorité des ordres présents sur le site d'étude a été identifiée (Figure 6 et Figure 5).

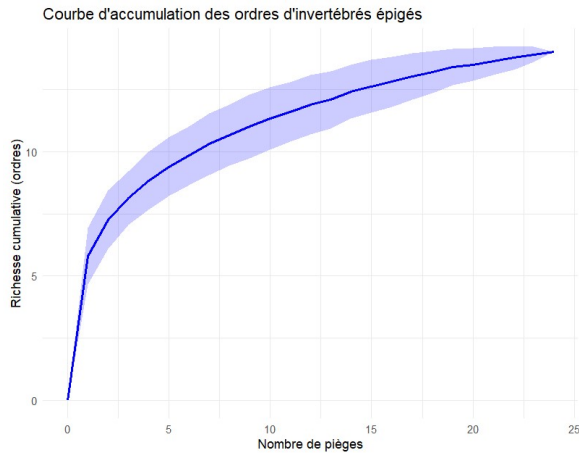


Figure 6 : Courbe d'accumulation des ordres identifiés sur le site d'étude

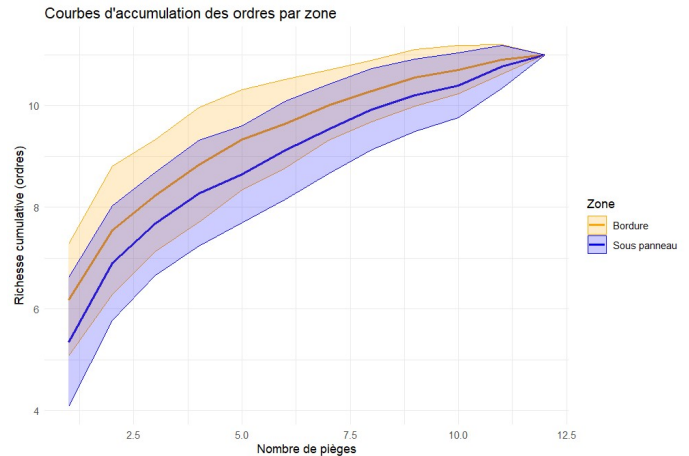


Figure 5 : Courbe d'accumulation des ordres identifiés selon la zone d'échantillonnage

La courbe de la figure 5 atteint presque un plateau. Cependant, les courbes d'accumulation par zone d'échantillonnage (Figure 5) ne l'atteignent pas totalement. Nous pouvons dire que la majorité des ordres présents sur le site d'étude a été identifiée.

Au total, 14 ordres différents ont été identifiés (11 en bordure et 11 sous les panneaux). Les *Hymenoptera* et *Araneae* affichent les taux de pièges positifs les plus élevés (~100 %) dans les deux zones d'échantillonnage (Figure 7). Ils sont suivis par les *Entomobryomorpha* et *Hemiptera*, avec des pourcentages compris entre 75 % et 90 %. En revanche, les autres ordres présentent des fréquences de pièges positifs plus faibles (<50 %). Nous observons des différences de capture entre les deux zones d'échantillonnage, notamment une abondance totale presque deux fois plus élevée en bordure.

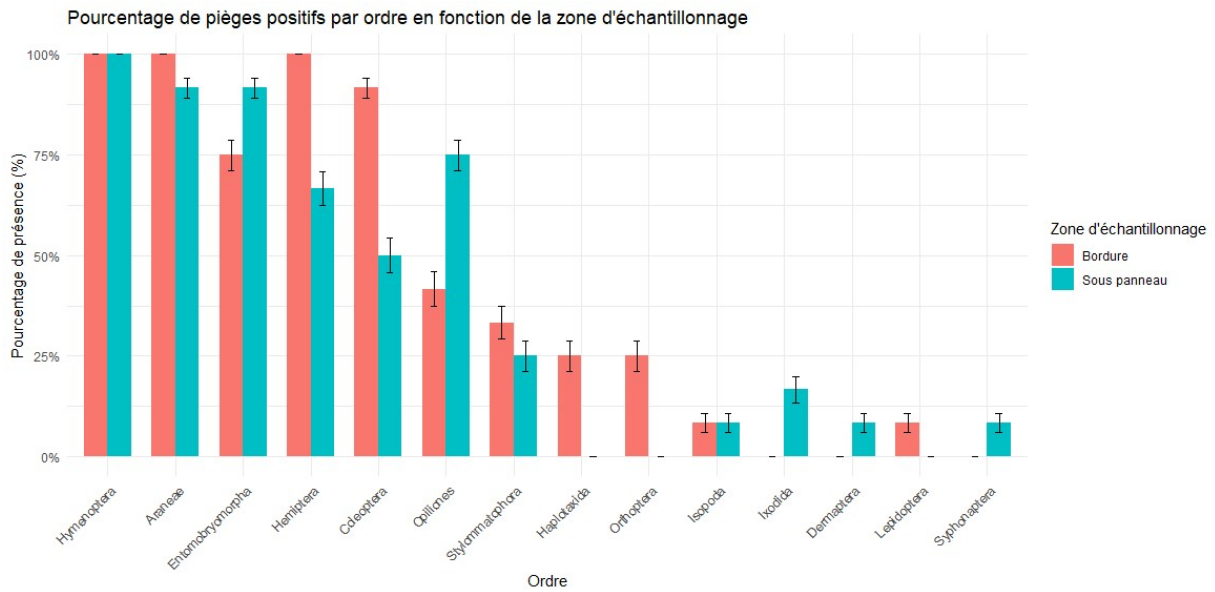


Figure 7 : Pourcentage de pièges positifs par ordre en fonction de la zone d'échantillonnage

Nous observons en bordure du champ de panneaux photovoltaïques une dominance marquée des *Hymenoptera*, qui représentent l'ordre le plus abondant, suivi des *Araneae*. Les autres ordres présentent des abondances moyennes plus faibles. Sous les panneaux, la distribution des abondances est plus équilibrée entre les différents ordres, bien que les *Hymenoptera* et les *Araneae* restent majoritaires (Figure 8).

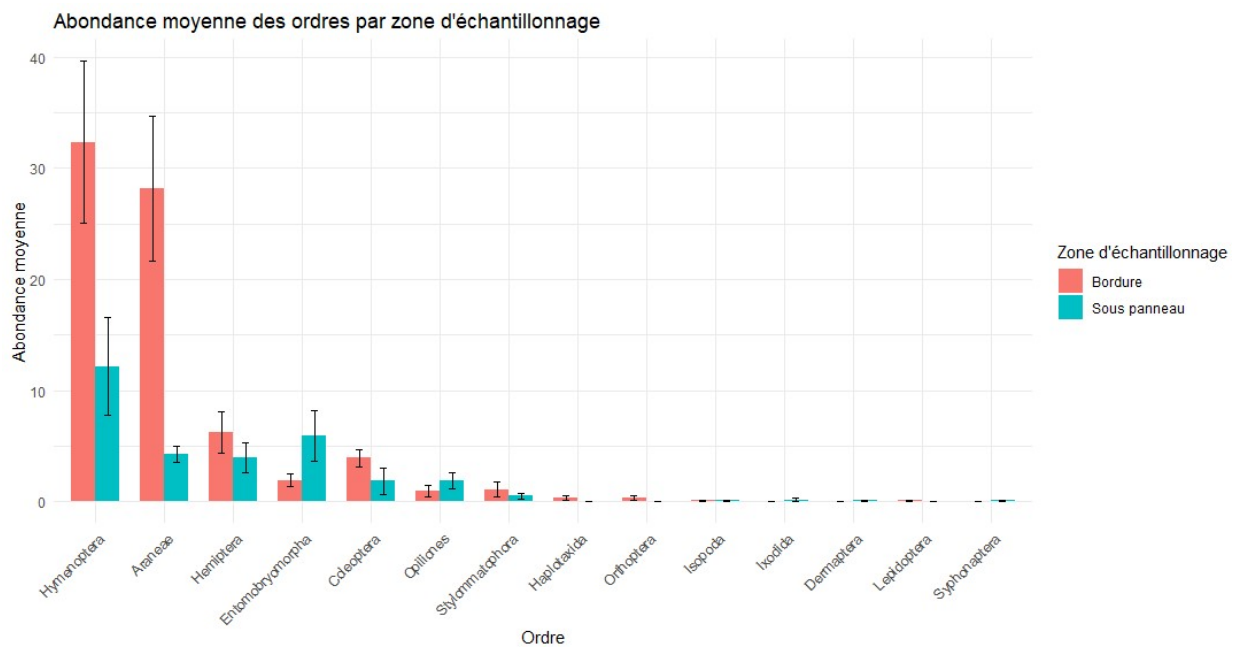


Figure 8 : Abondance moyenne des ordres identifiés par zone d'échantillonnage

Nous avons également identifié certains genres d'*Hymenoptera*, de *Coleoptera* et d'*Hemiptera*. Nous avons identifié les genres de *Hymenoptera* suivants : *Tetramorium*, *Myrmica*, *Formica*, *Lasius*, *Themnothorax* et *Tapinoma*. Enfin, des *Carabidae*, *Cicadellidae* et *Pyrrhocoridae* ont aussi été retrouvés sur le site d'étude.

3.1. Comparaison des communautés entre les deux modalités

3.1.1. PERMANOVA

Afin de réaliser la PERMANOVA, il est nécessaire que les dispersions multivariées entre les groupes (ici, les zones d'échantillonnage) soient égales. Nous réalisons un test d'homogénéité des dispersions. Nous obtenons une p-value de 0.167, ce qui indique que les zones d'échantillonnage ont des dispersions similaires dans l'espace multivarié, il est donc possible de procéder à la PERMANOVA (Tableau 1), et celle-ci sera valide car la condition d'homogénéité des dispersions est respectée.

Tableau 1 : PERMANOVA sur les 24 pots Barber identifiés

	R²	F	p-value
Model	0,292	9,100	0,001
Residual	0,707		

La valeur F (9,100) quantifie le rapport entre la variance expliquée par les zones d'échantillonnage et la variance résiduelle. La p-Value (0,001) associée à F est très faible, cela indique que la composition des ordres diffère significativement entre les deux zones d'échantillonnage. Cependant, il n'y a que 29,2 % ($R^2 = 0,292$) de la variance observée dans la composition des ordres qui peut être attribuée à la différence entre les zones d'échantillonnage (hautement significative). Le reste de la variance ($R^2 = 0,707$) est dû à d'autres facteurs non pris en compte dans notre modèle ou à la variation intra-zone.

Ainsi, la différence significative entre les compositions des ordres est expliquée à 29,2 % par la différence entre les zones d'échantillonnage et à 70,7 % par d'autres facteurs.

3.1.2. NMDS réalisée avec la PERMANOVA

La NMDS permet de visualiser ces différences entre les deux zones. Bien que les ellipses se chevauchent, elles montrent une séparation relative entre les habitats (Figure 9), confirmant les résultats obtenus par la PERMANOVA (Tableau 1).

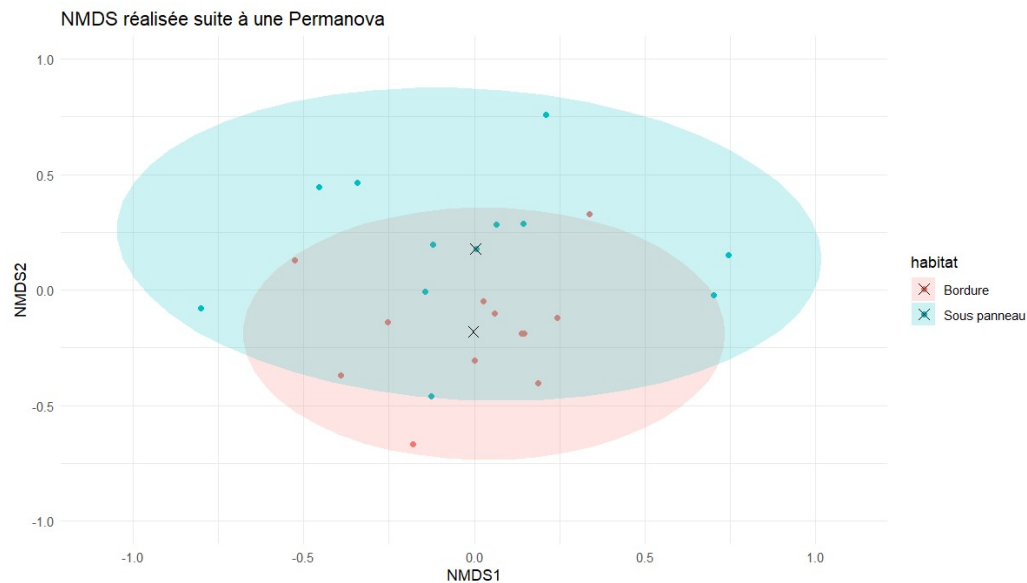


Figure 9 : Représentation NMDS issue de la PERMANOVA

L'ellipse bleue (représentant la zone sous les panneaux) présente une distribution légèrement plus large, suggérant une hétérogénéité plus importante des ordres dans cet habitat. Le recouvrement des ellipses reflète la valeur R^2 modérée (0,293) de la PERMANOVA, indiquant que les zones d'échantillonnage expliquent une partie, mais pas toute la variance.

3.2. Comparaison des abondances entre les zones d'échantillonnage

3.2.1. Test de Wilcoxon-Mann-Whitney

Nous cherchons à comparer les abondances entre les deux zones d'échantillonnage. Le test de Shapiro-Wilk nous indique qu'au moins une des deux modalités ne suit pas une distribution normale. Nous appliquons donc le test de Wilcoxon (Tableau 2).

Nous observons qu'il existe une différence significative entre les deux zones d'échantillonnage pour les ordres suivants : *Araneae*, *Hymenoptera*, *Coleoptera* et *Entomobryomorpha*.

Tableau 2 : Tests de Wilcoxon : résultats significatifs entre les deux modalités pour chaque ordre identifié

Ordre	p-value
<i>Araneae</i>	5,135e-05
<i>Hymenoptera</i>	1,785e-03
<i>Coleoptera</i>	1,213e-02
<i>Entomobryomorpha</i>	3,573e-02

Aucune différence significative n'a été observée pour les ordres suivants : *Opiliones*, *Hemiptera*, *Stylommatophora* et *Isopoda*. Et le test n'était pas applicable pour les autres ordres identifiés car le nombre d'individus identifiés était trop faible.

3.2.2. Modèle linéaire généralisé (GLM)

Nous observons que l'abondance des *Entomobryomorpha* et des *Opiliones* est significativement plus élevée sous les panneaux qu'en bordure. L'abondance de *Hemiptera*, *Coleoptera*, *Araneae* et *Hymenoptera* est significativement plus importante en bordure (Figure 10). Cette différence est notamment très forte pour les *Araneae* et les *Hymenoptera*. De plus contrairement aux tests de Wilcoxon, nous observons qu'il y a une différence significative entre les abondances de *Hemiptera* et des *Opiliones* (Tableau 3).

Tableau 3 : GLM : ordres en fonction de la zone d'échantillonnage "sous panneau"

Ordre	Estimation	p-value	Direction
<i>Hymenoptera</i>	-0,977	7,738e-24	Diminution
<i>Coleoptera</i>	-0,759	3,297e-03	Diminution
<i>Hemiptera</i>	-0,467	1,200e-02	Diminution
<i>Opiliones</i>	0,738	4,421e-02	Augmentation
<i>Araneae</i>	-1,891	2,410e-36	Diminution
<i>Entomobryomorpha</i>	1,127	2,625e-06	Augmentation

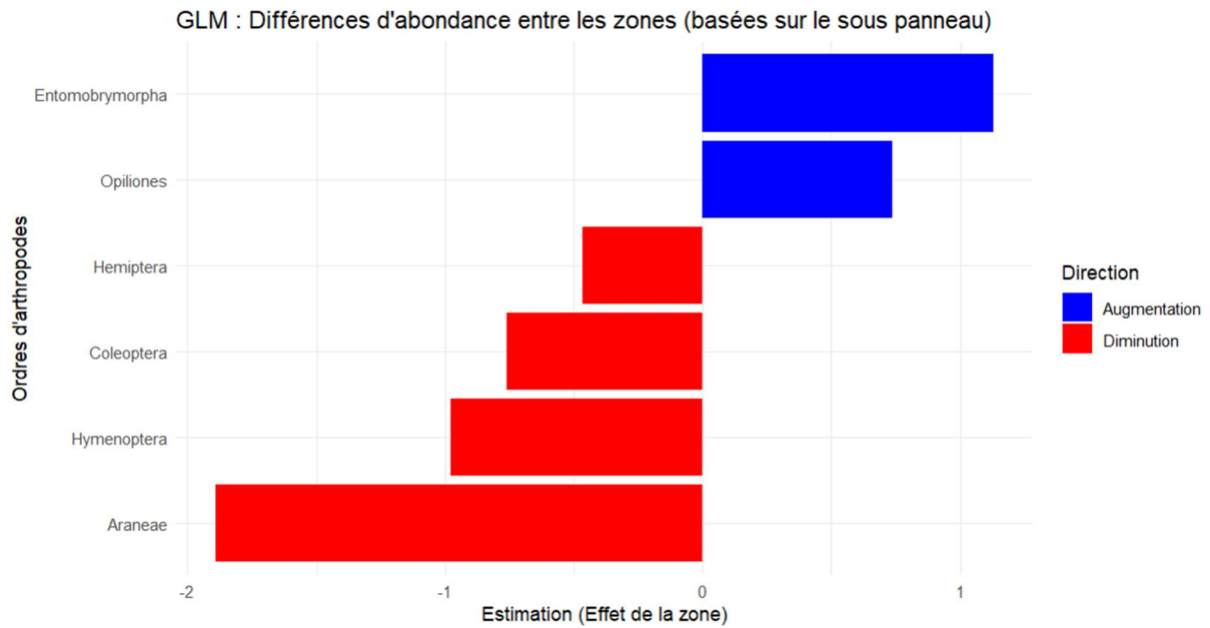


Figure 10 : Estimation de l'effet de la zone d'échantillonnage sur les ordres d'invertébrés épigés

Le test de Wilcoxon révèle que 4 ordres, à savoir les *Hymenoptera*, les *Entomobryomorpha*, les *Coleoptera* et les *Araneae*, présentent des différences significatives entre les deux zones d'échantillonnage. En revanche, la GLM indique que 6 ordres, dont les 4 précédents ainsi que les *Opiliones* et les *Hemiptera*, présentent des différences significatives. Cela renforce l'idée que, pour les 4 ordres communs, il existe bien une différence significative entre les zones. Cependant, pour les *Opiliones* et les *Hemiptera*, les médianes des deux groupes étant très proches, le test de Wilcoxon, moins sensible, ne détecte pas ces différences, tandis que la GLM, grâce à sa sensibilité aux interactions globales et sa capacité à détecter des effets faibles mais significatifs, confirme leur distinction. Nous pouvons donc conclure qu'il existe une différence significative entre les deux zones pour les 6 ordres d'invertébrés épigés étudiés.

4. Discussion

4.1. Interprétation des résultats

Nos résultats montrent que les panneaux photovoltaïques ont un impact sur les communautés d'invertébrés épigés avec des différences notables entre les deux zones d'échantillonnage. Nous avons observé une abondance générale plus élevée en bordure, notamment pour les ordres *Hymenoptera*, *Coleoptera* et *Araneae* (et de façon moindre les *Hemiptera*), tandis que les *Opiliones* et *Entomobryomorpha* étaient plus abondants sous les panneaux. Il est probable que ces différences soient liées à des facteurs microclimatiques et écologiques distincts.

En bordure, l'abondance des *Coleoptera* et des *Hymenoptera* est plus élevée (Figure 8), ce qui est cohérent avec d'autres études indiquant que ces ordres préfèrent des environnements plus ouverts, comme les bords de champs ou les zones de transition entre la forêt et les cultures (Martins et al., 2013). Certaines espèces de *Coleoptera*, telles que les *Carabidae*, trouvent refuge dans ces milieux (Dennis & Fry, 1992). Toutefois, une étude antérieure menée sur les *Formicidae* (*Hymenoptera*), dans le cadre du projet Azuré sur le même site n'avait pas révélé de différences significatives concernant l'abondance de cette famille entre les deux zones. Cette divergence entre nos résultats pourrait être attribuée à la différence de hauteur de végétation en bordure. En effet, certaines espèces de *Myrmica*, qui sont xérothermophile ne sont pas présentes dans les prairies à hautes herbes (Galkowski & Lebas, 2015). Dans le mois qui séparait les deux études, une tonte rase a été effectuée sur tout le site. Ce qui explique pourquoi nous n'avons retrouvé que peu de *Myrmica* en bordure lors de l'étude du projet azuré, alors qu'elles étaient abondantes dans cette étude. Nous pouvons donc nous demander si un environnement (en bordure) avec une plus forte pression de pâturage ou de fauche ne permettrait pas de favoriser la présence d'*Hymenoptera* par rapport au sous panneau.

L'abondance des *Araneae* était aussi plus importante en bordure du champ de panneau photovoltaïque. Certaines espèces préfèrent les milieux avec de la végétation herbacée, comme en bordure de champ (Richman et al., 1995; Weeks & Holtzer, 2000). Les *Araneae* sont un ordre présent dans beaucoup de milieux, il est donc difficile d'expliquer cette présence importante en bordure. Il serait nécessaire d'identifier les *Araneae* à l'espèce afin de déterminer leurs habitats préférentiels respectifs. Quant aux *Hemiptera*, ils sont légèrement plus présents en bordure. Nous avons par ailleurs trouvé beaucoup d'hémiptères de l'ordre des *Cicadellidae* qui sont très communs dans les prairies (R. Wilson & Turner, 2010), cela pourrait expliquer cette différence entre nos deux zones d'échantillonnage.

Sous les panneaux, les ordres d'invertébrés épigés présentent une plus grande hétérogénéité dans l'habitat, ce qui peut être lié à des abondances moyennes plus équilibrées entre les différents ordres (Figure 8). Par ailleurs, deux ordres spécifiques, les *Opiliones* et les *Entomobryomorpha*, montrent des abondances plus élevées sous les panneaux. Les *Opiliones*, en particulier, sont favorisés par les conditions nocturnes (Todd, 1949) fraîches et humides que le microclimat des panneaux génère (Delfosse, 2021). La végétation est d'ailleurs moins dense et développée sous les panneaux, ce qui est un environnement apprécié par les *Opiliones* (comme les litières) (Adams, 1984). Les panneaux peuvent aussi leur servir d'abris contre les prédateurs. De même, les *Entomobryomorpha* bénéficient de conditions plus stable sous les panneaux avec moins de variations de température et d'humidité,

ce qui correspond à leur besoins (Heiniger et al., 2015; P. J.-M. B. et G. Vannier, 1977). Les *Entomobryomorpha* sont aussi connus pour être sensible aux sécheresses (G. Vannier, 1987). Afin d'en savoir plus sur cette abondance plus importante, il serait nécessaire de calculer le Ph et l'humidité du sol sous les panneaux, facteurs nécessaires à la survie des *Collembola* (Hopkin, 1997).

Toutes ces observations soulignent l'importance de conserver une diversité d'habitats, incluant des zones ombragées, qui sont souvent perturbées ou détruites par les activités humaines.

4.2. Comparaison des services écosystémiques rendus par les deux zones d'échantillonnage

Les zones en bordure et sous les panneaux photovoltaïques offrent des services écosystémiques distincts, en fonction des ordres d'invertébrés épiques dominants dans chaque zone. En bordure, la forte présence des *Hymenoptera*, notamment des *Formicidae*, joue un rôle fondamental dans le maintien des écosystèmes. Elles peuvent jouer un rôle dans la pollinisation (par exemple le genre *Tetramorium* retrouvé sur le site d'étude) (Xiong et al., 2020), essentielle pour la reproduction des plantes, la production alimentaire, et pour un environnement de prairie. De plus, certaines espèces de fourmis participent au contrôle biologique en régulant les populations de ravageurs par la prédation dans certains pays (Vayssières, 2008). Par ailleurs, les *Formicidae* favoriseraient la décomposition de la matière organique, contribuant ainsi au cycle des nutriments (Godet, 2017).

Les *Coleoptera* peuvent aussi participer (de manière moindre) à la pollinisation de certaines fleurs comme les *Carabidae* présent sur notre site d'étude (Xiong et al., 2020). Ils jouent aussi un rôle dans la décomposition de la matière organique (Raitif, 2019) et certaines espèces aident à contrôler les ravageurs (Jean-François et al., s. d.).

Enfin, les *Araneae*, largement présentes en bordure, se distinguent par leur rôle de prédateurs d'insectes. Elles participent à la régulation des populations de ravageurs et servent également d'indicateurs de biodiversité, leur présence reflétant souvent la santé et la qualité d'un écosystème (Jean-François et al., s. d.).

Sous les panneaux photovoltaïques, la situation diffère avec une plus forte abondance d'*Opiliones* et d'*Entomobryomorpha*. Les *Opiliones* contribuent à la décomposition de la matière (Jean-François et al., s. d.), tout en jouant un rôle modéré dans la régulation des populations de petits invertébrés (Raitif, 2019). De leur côté, les *Entomobryomorpha* sont des acteurs clés du cycle des nutriments. Leur rôle dans la dégradation de la matière organique favorise la santé et la fertilité des sols. Et l'abondance des *Collembola* est souvent utilisée comme indicatrice de la qualité du sol (Fountain & Hopkin, 2004).

La bordure favorise des services écosystémiques liés à la pollinisation et au contrôle biologique, tandis que la zone sous panneaux possède des services relatifs à la décomposition de la matière organique. Il est donc important de considérer les différences microclimatiques et leur influence sur les communautés d'invertébrés lors de l'aménagement des parcs photovoltaïques.

Il est cependant difficile de statuer précisément sur les services écosystémiques rendus par les deux zones d'échantillonnage puisque les espèces n'ont pas été identifiées.

4.3. Limites de cette étude et perspectives pour des recherches futures

L'effort d'échantillonnage fourni pour cette étude, portant sur les deux zones combinées est suffisant. L'analyse d'une dizaine de pièges supplémentaires aurait permis de confirmer l'identification de tous les ordres présents dans chaque zone. Nous pouvons affirmer que la majorité des ordres présents sur le site d'étude a été identifiée (Figure 6).

Les limites de cette étude résident dans l'identification des individus à l'ordre et non à l'espèce. Le manque de temps et de connaissances poussées sur les invertébrés épigés limite les résultats que nous pouvons produire. Par exemple, il n'est pas pertinent de calculer des indices de diversité. Les indices de diversité (Shannon, Simpson, Pielou) sont conçus pour mesurer la diversité au sein des groupes, généralement au niveau des espèces (Shannon, 1948).

En utilisant les ordres comme unité d'analyse, les indices reflètent des différences entre les abondances d'ordres et non les espèces au sein de chaque ordre. Une abondance élevée d'un ordre peut alors signifier :

- Soit un grand nombre d'espèces, chacune contribuant de manière équilibrée.
- Soit la dominance d'une ou deux espèces, ce qui biaise les indices.

Les résultats des indices de diversité sont donc difficiles à interpréter.

De plus, bien que la PERMANOVA montre une différence entre les invertébrés épigés sous les panneaux et en bordure, l'effet de zone n'explique qu'une faible proportion de cette variance (29,3 %) (Tableau 1). Cela peut indiquer que d'autres facteurs non mesurés influencent également la composition des communautés d'invertébrés épigés.

Des études complémentaires pourraient permettre d'identifier les mêmes individus au niveau de l'espèce et identifier les individus de la deuxième campagne d'échantillonnage, afin de renforcer la rigueur des résultats. Il serait pertinent de réaliser des quadrats pour évaluer la végétation au moment du piégeage car la présence de végétation est un facteur déterminant pour les invertébrés épigés. Les panneaux solaires, créant de l'ombre, ne permettent pas à la même végétation de s'installer. La réalisation d'études supplémentaires, telles que des mesures de température, d'humidité et de pH sous les panneaux en comparaison avec la prairie, permettrait de mieux comprendre les dynamiques de ce nouveau milieu.

5. Conclusion

Cette étude met en lumière les impacts des parcs photovoltaïques sur les communautés d'invertébrés épigés, des organismes essentiels pour le fonctionnement des écosystèmes. En comparant deux zones d'échantillonnage, la bordure du champ de panneau photovoltaïque (prairie) et la zone située sous les panneaux, nous avons observé des différences significatives dans la composition et l'abondance des ordres d'invertébrés. Les *Hymenoptera*, *Araneae*, *Coleoptera* et *Hemiptera* étaient plus abondants en bordure, alors que les *Opiliones* et *Entomobryomorpha* dominaient sous les panneaux.

Ces résultats montrent que les panneaux photovoltaïques, par la création d'un microclimat particulier (plus frais et humide), favorisent certains groupes comme les *Entomobryomorpha*, tout en réduisant l'abondance d'autres ordres, qui sont cruciaux pour les services écosystémiques tels que la pollinisation ou le contrôle des ravageurs. La bordure, en revanche, conserve une diversité fonctionnelle liée à des milieux ouverts, riches en ressources et favorables à de nombreux ordres.

Bien que ces observations apportent des informations précieuses, elles restent limitées par le niveau d'identification taxonomique (ordre). Identifier les invertébrés à l'espèce permettrait d'affiner l'analyse et de mieux comprendre les interactions spécifiques et leurs contributions aux services écosystémiques.

En conclusion, cette étude souligne l'importance de prendre en compte les impacts des infrastructures photovoltaïques sur la biodiversité. Un aménagement réfléchi, incluant la conservation des habitats tels que les prairies en bordure, pourrait atténuer ces impacts tout en maximisant les bénéfices écologiques associés à ces installations. Cela ouvre également la voie à des études complémentaires visant à approfondir la compréhension des effets des infrastructures photovoltaïques sur la faune épigée.

6. Bibliographie

- Adams, J. (1984). The Habitat and Feeding Ecology of Woodland Harvestmen (Opiliones) in England. *Oikos*, 42(3), 361-370. <https://doi.org/10.2307/3544406>
- Andersen, A. N., Hoffmann, B. D., Müller, W. J., & Griffiths, A. D. (2002). Using ants as bioindicators in land management : Simplifying assessment of ant community responses. *Journal of Applied Ecology*, 39(1), 8-17. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00704.x>
- Audrey, T. (2023). *Etude Photovoltaïque et biodiversité*. https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2023/11/SER-Enerplan_Etude-PV-et-biodiversite_I-CareBiotope_sept2023_web.pdf
- Barber, H. S. (1931). Traps for Cave-Inhabiting Insects. *Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society*, 46(2), 259-266.
- Bellmann, H. (2014). *Guide photo des araignées et arachnides d'Europe*. <https://www.delachauxetniestle.com/livre/guide-photo-des-araignees-et-arachnides-deurope-1/9782603019542>
- Butovsky, R. O. (2011). Heavy metals in carabids (Coleoptera, Carabidae). *ZooKeys*, 100, 215-222. <https://doi.org/10.3897/zookeys.100.1529>
- Cardoso, P., & Leather, S. R. (2019). Predicting a global insect apocalypse. *Insect Conservation and Diversity*, 12(4), 263-267. <https://doi.org/10.1111/icad.12367>
- Chauvet, C. (2024). *Rapport de stage individuel*. http://memoires.scd.univ-tours.fr/EPU_DA/LOCAL/2024stg_DAE4_Chauvet_Clement_rapport.pdf
- Chowdhury, S., Dubey, V. K., Choudhury, S., Das, A., Jeengar, D., Sujatha, B., Kumar, A., Kumar, N., Semwal, A., & Kumar, V. (2023). Insects as bioindicator : A hidden gem for environmental monitoring. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1146052>
- Delfosse, E. (2021). *Rapport sur les opilions (Arachnida : Opiliones)*.
- Dennis, P., & Fry, G. L. A. (1992). Field margins : Can they enhance natural enemy population densities and general arthropod diversity on farmland? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 40(1), 95-115. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90086-Q](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90086-Q)
- di Castri, F., Vernhes, J. R., & Younès, T. (1992). Inventorying and Monitoring Biodiversity : A Proposal for an International Network. *Vegetatio*, 103(2), 1-28.
- FAURE SVT. (s. d.). *Clé de détermination des Arthropodes*. <http://faureben.free.fr/svt/arthropodes/topic/cl-de-d-termination-des-arthropodes.pdf>
- Fountain, M. T., & Hopkin, S. P. (2004). Biodiversity of Collembola in Urban Soils and the Use of *Folsomia candida* to Assess Soil 'Quality'. *Ecotoxicology*, 13(6), 555-572. <https://doi.org/10.1023/B:ECTX.0000037192.70167.00>
- Galkowski, C., & Lebas, C. (2015). *Guide d'identification des fourmis du genre Myrmica*. Studio Pixart SRL Unipersonale.

ggplot2. (s. d.). *Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics*. Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse <https://ggplot2.tidyverse.org/>

Ghannem, S., Touaylia, S., & Boumaiza, M. (2018). Beetles (Insecta : Coleoptera) as bioindicators of the assessment of environmental pollution. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(2), 456-464. <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1385387>

Gibson, L., Wilman, E. N., & Laurance, W. F. (2017). How Green is 'Green' Energy? *Trends in Ecology & Evolution*, 32(12), 922-935. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.09.007>

Girard, M.-C., Walter, C., Rémy, J.-C., Berthelin, J., & Morel, J.-L. (2011). *Sols et environnement - 2e édition - Cours, exercices et études de cas - Livre+compléments en ligne : Cours, exercices corrigés et études de cas*. Dunod.

Godet, L. (2017, mai). *Notion en débat : Biodiversité* (ISSN : 2492-7775) [Document]. Géoconfluences; École normale supérieure de Lyon. <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/notion-a-la-une/notion-biodiversite>

Graham, M., Ates, S., Melathopoulos, A. P., Moldenke, A. R., DeBano, S. J., Best, L. R., & Higgins, C. W. (2021). Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Scientific Reports*, 11(1), 7452. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4>

Grolemund, G. (s. d.). *Hands-On Programming with R*. Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse <https://rstudio-education.github.io/hopr/>

Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörren, T., Goulson, D., & Kroon, H. de. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE*, 12(10), e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

Harrison, P., & Pearce, F. (2000). *AAAS Atlas of Population & Environment*. University of California Press.

Heiniger, C., Barot, S., Ponge, J.-F., Salmon, S., Meriguet, J., Carmignac, D., Suillerot, M., & Dubs, F. (2015). Collembolan preferences for soil and microclimate in forest and pasture communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 86, 181-192. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.04.003>

Hopkin, S. P. (1997). *Biology of the Springtails : (Insecta: Collembola)*. OUP Oxford.

Jean-François, D., Emmanuel, V., & Carole, D. (s. d.). *Identifications des arthropodes*.

Koivula, M., Kotze, J., Hiisivuori, L., & Rita, H. (2003). Pitfall trap efficiency : Do trap size, collecting fluid and vegetation structure matter? *Entomologica Fennica*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.33338/ef.84167>

Kremen, C., Colwell, R. K., Erwin, T. L., Murphy, D. D., Noss, R. F., & Sanjayan, M. A. (1993). Terrestrial Arthropod Assemblages : Their Use in Conservation Planning. *Conservation Biology*, 7(4), 796-808.

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>

Lawes, M. J., Kotze, D. J., Bourquin, S. L., & Morris, C. (2005). Epigaeic Invertebrates as Potential Ecological Indicators of Afromontane Forest Condition in South Africa. *Biotropica*, 37(1), 109-118.

Les Collemboles. (s. d.). <https://collemboles.fr>

Madej, L., Michaud, L., L'Ecluse, C. B. de, Cogny, C., Roncoroni, M., Colosse, D., Falcimagne, R., Jacquot, S., & Picon-Cochard, C. (2022). *Synthèse de la dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques et du pâturage sur deux sites prairiaux pâturés. Etude des effets sur une période annuelle*. [Report, INRAE]. <https://hal.inrae.fr/hal-03592786>

Majer, J. d., & Nichols, O. g. (1998). Long-term recolonization patterns of ants in Western Australian rehabilitated bauxite mines with reference to their use as indicators of restoration success. *Journal of Applied Ecology*, 35(1), 161-182. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.1998.00286.x>

Makaronidou, M. (2020). *Assessment on the local climate effects of solar photovoltaic parks* [University of Lancaster]. <https://doi.org/10.12681/eadd/52620>

Martins, I. C. F., Cividanes, F. J., Ide, S., & Haddad, G. Q. (2013). Diversity and habitat preferences of Carabidae and Staphylinidae (Coleoptera) in two agroecosystems. *Bragantia*, 71(4), 471-480. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052013005000009>

Masson, G., de l'Epine, M., & Kaizuka, I. (2023). *Trends in PV Applications 2023—IEA-PVPS*. https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-in-pv-applications-2024/

Masson, G., de l'Epine, M., & Kaizuka, I. (2024). *Trends in PV Applications 2024—IEA-PVPS*. https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-in-pv-applications-2024/

McCallum, M. L. (2007). Amphibian Decline or Extinction? Current Declines Dwarf Background Extinction Rate. *Journal of Herpetology*, 41(3), 483-491. [https://doi.org/10.1670/0022-1511\(2007\)41\[483:ADOECD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1670/0022-1511(2007)41[483:ADOECD]2.0.CO;2)

McGeoch, M. (2007). *Insect Conservation Biology : Proceedings of the Royal Entomological Society's 23rd Symposium*. CABI.

Morris, M. G. (2000). The effects of structure and its dynamics on the ecology and conservation of arthropods in British grasslands. *Biological Conservation*, 95(2), 129-142. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(00\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(00)00028-8)

Nummelin, M., Lodenius, M., Tulisalo, E., Hirvonen, H., & Alanko, T. (2007). Predatory insects as bioindicators of heavy metal pollution. *Environmental Pollution*, 145(1), 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.002>

Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Carvalho, G., Chirico, M., De Caceres, M., Durand, S., ... Weedon, J. (2001). *vegan : Community Ecology Package* (p. 2.6-8) [Jeu de données]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.vegan>

photovoltaïque.info—Tendances mondiales en 2023. (2024). <https://www.photovoltaïque.info/fr/info-ou-intox/le-marche-du-photovoltaïque/tendances-mondiales-du-photovoltaïque/tendances-mondiales-en-2023/>

- Pro Natura. (2021). *Insectes, clé de détermination*. https://www.pronatura.ch/sites/pronatura.ch/files/CdD_Insectes.pdf
- QUBS - Faune des sols. (s. d.). Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse [https://qubs.openkeys.science/QUBS/?state=\[\]&tab=keys](https://qubs.openkeys.science/QUBS/?state=[]&tab=keys)
- R. Wilson, M., & Turner, J. (2010). *Order Hemiptera Key to families of Auchenorrhyncha from Arabian Peninsula*.
- Raitif, J. (2019). *Contribution des insectes aquatiques émergeant des rivières à la fourniture de services écosystémiques pour l'agriculture*.
- Richman, D. B., Meister, J. S., Whitcomb, W. H., & Murray, L. (1995). A Comparison of Populations of Wolf Spiders (Araneae, Lycosidae) on Two Different Substrates in Southern Florida. *The Journal of Arachnology*, 23(3), 151-156.
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. G. (2019). Worldwide decline of the entomofauna : A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>
- SDES. (2022). *Objectifs dans le cadre de la PPE*. Chiffres clés des énergies renouvelables. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2022/4-objectifs-dans-le-cadre-de-la-ppe.php>
- Sepkoski, J. J. (1986). Phanerozoic Overview of Mass Extinction. In D. M. Raup & D. Jablonski (Éds.), *Patterns and Processes in the History of Life* (p. 277-295). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-70831-2_15
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. The Bell System Technical Journal. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Teyssède, A. (s. d.). *Vers une sixième grande crise d'extinctions ?*
- Thomas, J. A., & Settele, J. (2004). Butterfly mimics of ants. *Nature*, 432(7015), 283-284. <https://doi.org/10.1038/432283a>
- Todd, V. (1949). The Habits and Ecology of the British Harvestmen (Arachnida, Opiliones), with Special Reference to Those of the Oxford District. *Journal of Animal Ecology*, 18(2), 209-229. <https://doi.org/10.2307/1600>
- Vanderwoude, C., Andersen, A. N., & House, A. P. N. (1997). Ant communities as bio-indicators in relation to fire management of spotted gum (*Eucalyptus maculata* Hook.) forests in southeast Queensland. *Memoirs of the Museum of Victoria*, 56(2), 671-675. <https://doi.org/10.24199/j.mmv.1997.56.69>
- Vannier, G. (1987). The porosphere as an ecological medium emphasized in Professor Ghilarov's work on soil animal adaptations. *Biology and Fertility of Soils*, 3(1), 39-44. <https://doi.org/10.1007/BF00260577>
- Vannier, P. J.-M. B. et G. (1977). Caractérisation des deux phases juvéniles d'*Allacma fusca* (Collembola, Symphypleona) par leur morphologie et leur écophysologie. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 15(2), 124-141. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0469.1977.tb00534.x>

- Vayssières, J. F. (2008). *Projet Régional de Lutte Contre les Mouches des Fruits*. https://agritrop.cirad.fr/548768/13/VF_Fiche%20tech_n5_%20W.A._05.05.08.pdf
- Ward, D. F., New, T. R., & Yen, A. L. (2001). Effects of Pitfall Trap Spacing on the Abundance, Richness and Composition of Invertebrate Catches. *Journal of Insect Conservation*, 5(1), 47-53. <https://doi.org/10.1023/A:1011317423622>
- Weeks, R. D., Jr, & Holtzer, T. O. (2000). Habitat and Season in Structuring Ground-Dwelling Spider (Araneae) Communities in a Shortgrass Steppe Ecosystem. *Environmental Entomology*, 29(6), 1164-1172. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-29.6.1164>
- Wilczynski, A., & Guicheney, H. (s.d.). *Photovoltaïque au sol en Nouvelle-Aquitaine*. https://www.nouvelle-aquitaine.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/focus_sur_54_photovoltaïque_au_sol.pdf
- Wilson, E. O. (1987). The Little Things That Run the World (The Importance and Conservation of Invertebrates). *Conservation Biology*, 1(4), 344-346.
- Xiong, W., Ollerton, J., Liede-Schumann, S., Zhao, W., Jiang, Q., Sun, H., Liao, W., & You, W. (2020). Specialized cockroach pollination in the rare and endangered plant *Vincetoxicum hainanense* in China. *American Journal of Botany*, 107(10), 1355-1365. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1545>

7. Annexes

Annexe 1 : Code Rstudio de la PERMANOVA et de la NMDS

```
# PERMANOVA (test de significativité)
result_permanova <- adonis2(numeric_data ~ zone_echantillonnage, data = donnees, method = "bray")
print(result_permanova)
summary(result_permanova)
View(result_permanova)
# NMDS (ordination multidimensionnelle non métrique)
ordination <- metaMDS(numeric_data, distance = "bray", k = 2, trymax = 50)

# Extraction des scores NMDS
scoresNMDS <- as.data.frame(ordination$points)
colnames(scoresNMDS) <- c("NMDS1", "NMDS2")
scoresNMDS$habitat <- donnees$zone_echantillonnage

# Calcul des centroïdes pour chaque zone d'échantillonnage
centroids <- scoresNMDS %>%
  group_by(habitat) %>%
  summarise(NMDS1_centroid = mean(NMDS1),
            NMDS2_centroid = mean(NMDS2))

# Vérification du nombre de points par catégorie
counts_per_group <- scoresNMDS %>%
  group_by(habitat) %>%
  summarise(count = n())

print("Nombre de points par groupe :")
print(counts_per_group)

# Vérification : filtrer les catégories ayant moins de 3 points
valid_categories <- counts_per_group %>%
  filter(count >= 3) %>%
  pull(habitat)

# Création du graphique NMDS avec ggplot2
ggplot(scoresNMDS, aes(x = NMDS1, y = NMDS2, color = habitat, fill = habitat)) +
  geom_point(position = position_jitter(width = 0.1, height = 0.1)) +
  stat_ellipse(data = scoresNMDS %>% filter(habitat %in% valid_categories),
              aes(group = habitat, fill = habitat), geom = "polygon", alpha = 0.2, color = NA) +
  geom_point(data = centroids, aes(x = NMDS1_centroid, y = NMDS2_centroid),
             size = 3, color = "black", shape = 4) +
  labs(x = "NMDS1", y = "NMDS2", title = "NMDS réalisée suite à une Permanova") +
  theme_minimal() +
  xlim(-1.1, 1.1) + ylim(-1, 1)
```

Directeur de recherche :

Monsieur Louison Bienvenu

Monsieur Francis Isselin

Chauvet Clément

PRI/DAE5

**Option Aménagement durable
et génie écologique**

2024-2025

L'impact d'un parc photovoltaïque en exploitation sur les invertébrés épigés

Résumé :

La création de parc photovoltaïques s'accélère à travers le monde pour répondre aux enjeux liés à l'énergie. Ces installations, bien qu'il s'agisse d'une solution d'énergie renouvelable, participent à l'anthropisation des sols et perturbent les écosystèmes. Cette étude se porte sur l'impact des panneaux photovoltaïques sur les invertébrés épigés, une faune d'importance capitale au niveau écologique. Les effets des panneaux photovoltaïques sur ces communautés ne sont que peu étudiés malgré une estimation de l'effet potentiel reconnu. Ces invertébrés peuvent représenter de bons bioindicateurs, leur étude permet de définir la qualité d'un milieu.

Pour déterminer les impacts des panneaux, la méthode des pots Barber a été utilisée sur deux zones d'échantillonnage : sous les panneaux, et en bordure de champs (prairie). Les individus ont ensuite été identifiés au niveau de l'ordre et dénombrés. Divers tests statistiques ont été réalisés : PERMANOVA, NMDS, Tests de Wilcoxon, GLM et courbes d'accumulation. Il en ressort que la composition des communautés sont différentes entre les deux zones d'échantillonnage. Les panneaux photovoltaïques réduisent l'abondance des invertébrés épigés sauf pour les opilions et les collemboles, ils ont donc un impact majoritairement négatif sur l'abondance. Les limites de cette étude concernent l'identification, le temps disponible n'a pas permis d'identifier les espèces des milliers d'invertébrés capturés. Il n'a donc pas été pertinent de calculer les indices de diversité.

Mots Clés : Invertébrés épigés, services écosystémiques