

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Caractérisation de l'impact
environnemental des centrales
photovoltaïques au sol en région Auvergne-
Rhône-Alpes

Evan COULET

Option AEST – Agriculture Environnement Santé Territoire

2023



VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Caractérisation de l'impact
environnemental des centrales
photovoltaïques au sol en région Auvergne-
Rhône-Alpes

Evan COULET

Option AEST – Agriculture Environnement Santé Territoire

2023

Tuteur de stage : Hervé LELIEVRE, cogérant de Crexeco

Professeur référent : Adrien PINOT, VetAgro Sup



« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier grandement Hervé Lelièvre, mon maître de stage, pour son accueil au sein de Crexeco, pour son aide et ses conseils pertinents ainsi que pour tous les bons moments passés ensemble et la confiance qu'il a placée en moi.

Je remercie Maud Poisbleau pour ses relectures et commentaires essentiels à la finalisation de ce travail.

Je remercie chaleureusement Natasha Leclerc qui m'a emmené de si nombreuses fois sur le terrain et m'a appris tant de choses sur l'avifaune. Pour toutes ces heures passées au soleil et dans la bonne humeur, je remercie grandement Anthony Robert et Mélanie Sillon-Hugon que j'ai pu accompagner durant les inventaires PHOTODIV.

Merci à Laurent Demongin, Benjamin Leroy, Nicolas Conduché, Lina Quintero et Mélanie Blanc pour leur bienveillance et leur accueil. Je remercie donc tous les membres de Crexeco, qui m'ont fait découvrir le métier de naturaliste et dont je garderai des souvenirs inoubliables.

Merci à Adrien Pinot, mon professeur référent, qui m'aura accompagné et guidé, se rendant disponible tout au long du projet.

Je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien, et plus particulièrement Léa Roger pour ses relectures et avis sur mon travail.

Enfin, je remercie les sociétés porteuses de projets de centrales photovoltaïques qui m'ont fourni les études d'impact sur l'environnement.

RESUMÉ

Pour répondre aux enjeux actuels autour du dérèglement climatique, la France doit se tourner vers la production d'une énergie « verte », peu polluante. Afin d'accompagner la transition énergétique, l'installation de centrales photovoltaïques au sol (CPS) a connu un très grand essor ces dernières années. Cependant, la mise en place de ces parcs solaires modifie les conditions du milieu et peut avoir des incidences sur la biodiversité. Avant chaque projet, des études d'impact sur l'environnement (EIE) évaluent les enjeux présents dans la zone d'implantation potentielle. Notre analyse de la notion de caractérisation des impacts sur l'environnement à partir de 77 EIE en Auvergne-Rhône-Alpes met en avant deux aspects : la mesure même de l'incidence brute et la qualité des méthodes des inventaires définissant les impacts. Malgré une forte amélioration de la qualité des EIE depuis 2010, des déséquilibres se maintiennent, avec notamment moins de rigueur apportée à la prospection des espèces à faible enjeu. Pour mesurer les impacts bruts des CPS dans la région, des inventaires ont été réalisés sur les taxons à faible enjeu. Les rhopalocères sont les plus touchés avec une diminution forte du nombre d'insecte entre les panneaux. La composition des populations d'orthoptères est impactée par la présence des CPS. Enfin, selon la diversité du site avant travaux, une centrale semble pouvoir amener de l'hétérogénéité et de la diversité dans les communautés végétales.

Mots clés : Impact environnemental – Etudes d'Impact sur l'Environnement – Filière photovoltaïque – Programme de recherche (PHOTODIV) – Biodiversité et écosystèmes – Bureau d'étude

ABSTRACT

Responding to current issues like global warming, France must use more green energy, that are less polluting. In order to support energetic transition, there have been a large increase of installations of photovoltaic power-plant these past few years. However, the construction of solar parks can have effect on the environment conditions and biodiversity. Before all projects, environmental impact assessments (EIA) are conducted to seek environmental stakes in the area. Our analyses of the notion of environmental impact characterization, with 77 EIA in Auvergne-Rhône-Alpes, highlights two major aspects: the incidence measurement itself and the methods used to identify stakes. Despite a large improvement of EIA quality since 2010, some unbalances remain, with less rigor granted to common species, for example. To measure solar photovoltaic (solar PV) impacts in the region, inventories were run for these species with no stakes. Rhopalocera are the most affected with a great decrease of their species numbers under panels. Composition of orthoptera's populations is affected by solar PV. At last, depending on the diversity of the area before construction, solar PV can bring heterogeneity and diversity in vegetation communities.

Keywords: Environmental impact – Environmental Impact Assessment – photovoltaic industry – Research program (PHOTODIV) – Biodiversity and ecosystem – Design office

TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES	9
TABLE DES ABREVIATIONS	10
INTRODUCTION	11
CADRE THEORIQUE	12
I. L'intégration des CPS dans un milieu de l'échelle nationale à l'échelle locale	12
a. L'évolution de la filière photovoltaïque répond à des enjeux globaux.....	12
b. L'intégration des CPS dans un milieu dépend des conditions environnementales.....	13
II. L'installation des CPS entraîne une modification des conditions abiotiques du milieu et des communautés végétales	14
a. La construction de parcs solaires impacte la structure et les conditions abiotiques du sol	14
b. L'installation des CPS amène à la création de microclimats.....	16
i. <i>Caractérisation du microclimat au-dessus des panneaux</i>	16
ii. <i>Caractérisation du microclimat sous les panneaux</i>	16
III. Evaluation des impacts environnementaux des installations humaines	17
a. L'étude d'impact sur l'environnement permet de mesurer les conséquences d'un projet d'installation sur le vivant	17
b. La qualification des impacts sur l'environnement requiert une standardisation à grande échelle... ..	18
i. Comment juger la qualité méthodologique des études d'impact ?	18
ii. Le programme de recherche PHOTODIV : caractériser l'influence des CPS sur la biodiversité	19
PROBLEMATIQUE :	20
MATERIEL ET METHODES	21
I. Récupération des études d'impact sur l'environnement	21
II. Analyse de la qualité des diagnostics écologiques : adaptabilité des protocoles	22
III. Analyse de la qualité méthodologique et rédactionnelle : reproductibilité des protocoles	23
IV. Protocoles d'échantillonnages des espèces étudiées	26
a. Flore.....	26
b. Rhopalocères	27
c. Orthoptères	27
V. Analyses des résultats et traitements statistiques	27
RESULTATS	29
I. Evolution dans le temps et état actuel de la qualité des EIE	29
a. Evolution de la qualité rédactionnelle des EIE depuis 2010 : étude de la reproductibilité des protocoles	29
b. Etat des lieux de la qualité des inventaires : étude de l'adaptabilité des protocoles.....	31
II. La qualité des EIE et des diagnostics écologiques dépend de plusieurs facteurs	32
a. Etude des effets influençant la qualité des inventaires	32

b.	Etudes des effets influençant la reproductibilité des protocoles.....	34
III.	Caractérisation des impacts bruts des CPS sur la flore : étude de trois parcs solaires	36
a.	Evolution des indices de biodiversité selon la modalité et l'année	36
b.	Analyse de la composition des communautés végétales après installation	39
IV.	Impacts bruts des CPS sur les arthropodes : études de trois parcs solaires	40
a.	Mesure de l'impact des CPS sur le groupe des rhopalocères	40
i.	<i>Evolution des indices de biodiversité selon la modalité et l'année</i>	<i>40</i>
ii.	<i>Analyse de la composition des populations de rhopalocères après installation</i>	<i>42</i>
b.	Mesure de l'impact des CPS sur le groupe des orthoptères.....	43
	DISCUSSION.....	45
	CONCLUSION	49
	BIBLIOGRAPHIE :.....	50
	ANNEXES :.....	53
	Annexe 1 : Mise en forme d'une fiche de saisie PHOTODIV	54
	Annexe 2 : Présentations et formules de calculs des indices de biodiversité :.....	54
	Annexe 3 : Représentations graphiques des modèles linéaires des indices de qualité méthodologique au cours du temps.....	55
	56
	Annexe 4 : Représentation graphique des corrélations entre variables (31 EIE).....	57
	Annexe 5 : Représentation graphique des modèles linéaires des critères de qualité selon l'indice général	57
	Annexe 6 : Indices de qualité des EIE selon les organismes responsables.....	59
	Annexe 7 : Modèles linéaires et graphique des indices de qualité méthodologique selon l'ancienne occupation du sol	60
	Annexe 8 : Représentations graphiques de l'indice général par taxon.....	63
	Annexe 9 : Modèle linéaire de l'indice général en fonction des différents taxons	64
	Annexe 10 : Flore - Différents modèles linéaires montrant l'effet de la modalité et de l'année sur les indices de biodiversité	65
	Annexe 11 : Flore - Evolution de l'indice de Simpson selon la modalité et l'année pour chaque site étudié.....	67
	Annexe 12 : Flore – Dendrogramme des similarités de Jaccard pour Varennes-sur-Allier.....	67
	Annexe 13 : Flore – Dendrogramme des similarités d Jaccard pour Varennes-sur-Allier et Etang-Bertrand	68
	Annexe 14 : Photographies des zones d'implantations de Varennes-sur-Allier et Etang-Bertrand avant travaux	69
	Annexe 15 : Rhopalocères - Différents modèles linéaires montrant l'effet de la modalité et de l'année sur les indices de biodiversité	
	Annexe 16 : Rhopalocères - Evolution de l'indice de Simpson et de Piélu selon la modalité et l'année pour chaque site étudié.....	70
	Annexe 17 : Orthoptères -Modèles linéaires de l'effet de la modalité et de l'année sur les indices de biodiversité à Saint-Eloy-les-Mines.....	72

Annexe 18 : Classification des transects d'inventaires orthoptères selon les espèces contactés.....	73
Annexe 19 : Graphiques de raréfaction.....	74
Annexes 20 : Quelques graphiques de vérification des modèles de régressions.....	75

TABLE DES FIGURES

<u>Figure 1</u> : Impacts relatifs sur l'environnement des différentes productions d'énergie (BERALDI, 2021).....	12
<u>Figure 2</u> : Indice de qualité du sol selon l'occupation du terrain (LAMBERT, 2021).....	14
<u>Figure 3</u> : Variation de l'humidité du sol au cours du temps selon les différentes zones étudiées (HASSANPOUR, 2018).....	15
<u>Figure 4</u> : Première version de la grille d'analyse de la qualité des inventaires.....	22
<u>Figure 5</u> : Grille d'analyse de la qualité des inventaires.....	23
<u>Figure 6</u> : Critères de notation de nation de l'indice IBI.....	24
<u>Figure 7</u> : Critères de notation de l'indice Method_ENJ.....	25
<u>Figure 8</u> : Critères de notation de l'indice IndG pour un taxon.....	25
<u>Figure 9</u> : Schéma des modalités dans une CPS.....	26
<u>Figure 10</u> : Graphiques de l'évolution des trois indices de qualité des EIE.....	29
<u>Figure 11</u> : Evolution des sous-thèmes de l'indice IndG au cours du temps.....	30
<u>Figure 12</u> : Surface de la ZIP et enjeux de la zone selon l'ancienne occupation du sol des projets de CPS.....	31
<u>Figure 13</u> : Evolution des indices de qualité au cours du temps - adaptabilité des protocoles.....	32
<u>Figure 14</u> : Qualité de l'échantillonnage selon l'ancienne occupation du sol - adaptabilité des protocoles.....	33
<u>Figure 15</u> : Diagramme des coefficients de corrélation des différentes variables concernant la reproductibilité de la méthodologie.....	34
<u>Figure 16</u> : Indice général par taxon.....	35
<u>Figure 17</u> : Evolution des indices généraux par taxon au cours du temps.....	35
<u>Figure 18</u> : Flore - Evolution de la richesse spécifique selon les sites, la modalité et l'année.....	37
<u>Figure 19</u> : Flore - Evolution de l'indice de Shannon selon les sites, la modalité et l'année.....	37
<u>Figure 20</u> : Flore - Evolution de l'indice de Piélou selon les sites, la modalité et l'année.....	38
<u>Figure 21</u> : Flore - Dendrogramme des similarités de Jaccard à Etang-Bertrand.....	39
<u>Figure 22</u> : Flore - Dendrogramme des similarités de Jaccard pour les trois sites en 2023.....	40
<u>Figure 23</u> : Rhopalocères - Evolution de la richesse spécifique selon le site, la modalité et l'année...	44
<u>Figure 24</u> : Rhopalocères - Evolution de l'indice de Shannon selon le site, la modalité et l'année.....	42
<u>Figure 25</u> : Rhopalocères - Dendrogrammes des similarités de Jaccard à Saint-Eloy-les-Mines selon l'année.....	43
<u>Figure 26</u> : Orthoptères - Evolution de la richesse spécifique selon le site, la modalité et l'année.....	44

TABLE DES ABREVIATIONS

CPS : Centrale Photovoltaïque au Sol

OFB : Office Française de la Biodiversité

PIESO : Processus d'Intégration Ecologique de l'Energie Solaire

EIE : Etude d'Impact sur l'Environnement

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

MRAe : Missions Régionales de l'Autorité environnementale

DDT : Direction Départementale des Territoires

DREAL : Direction Régional de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

ZNIEFF : Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

ZIP : Zone d'Implantation Potentielle

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

BAI : Before-After Impact

BAIC : Before-After-Control Impact

STERF : Suivi Temporel des Rhopalocères de France

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

Abréviations utilisées dans l'analyse :

St-Eloy : Saint-Eloy-les-Mines

Varennnes : Varennnes-sur-Allier

EP : Entre Panneaux

PEP : Périphérie et Entre Panneaux

SP : Sous Panneaux

PERI (ou P) : Périphérie

TEM : zone Témoin

RS : Richesse Spécifique

INTRODUCTION

D'après le sixième rapport du GIEC datant du 20 mars 2023, les émissions de gaz à effet de serre sont toujours en augmentation et directement liées à l'activité humaine. La température globale sur Terre a augmenté de 1,1°C depuis la période pré-industrielle. Les impacts issus du dérèglement climatique se font ressentir sur la qualité de l'eau, les rendements agricoles, l'insécurité alimentaire et l'érosion de la biodiversité. Pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre, il est nécessaire, entre autres, de limiter l'utilisation d'énergies fossiles. Pour cela, la France s'illustre avec sa stratégie énergétique qui vise notamment à accélérer le développement des énergies renouvelables. La construction de centrales photovoltaïques répond donc à un enjeu planétaire (Ministère Ecologie Energie Territoires). Le principe du fonctionnement des panneaux photovoltaïques est le suivant : les photons du rayonnement solaire transmettent leur énergie à la cellule photovoltaïque par le biais des électrons contenus dans un semi-conducteur. Cet effet a été découvert en 1839 par E. Becquerel. Initialement utilisés comme ressource énergétique « domestique », les panneaux solaires se sont aujourd'hui démocratisés et alimentent parfois des circuits électriques à très grande échelle. L'effet photovoltaïque est insonore, n'a pas besoin de combustible, ne chauffe pas et ne pollue pas. C'est pour cela qu'il représente une option d'intérêt dans la transition énergétique (KAMELIA, 2012). Toutefois, l'installation des centrales entraîne certains impacts sur l'environnement. De nombreuses études sont réalisées en amont de ces projets, pour concilier transition énergétique et préservation de la biodiversité et des milieux naturels.

Le rendement énergétique du photovoltaïsme est moins compétitif que celui d'autres infrastructures productrices d'énergie. Il est donc nécessaire de recouvrir de grandes surfaces avec les Centrales Photovoltaïques au Sol (CPS), ce qui entraîne de fortes modifications du milieu et des conditions abiotiques de l'environnement. Un facteur abiotique est par définition « non-vivant », il caractérise les propriétés physico-chimiques d'un milieu. Il nous faudra décrire ces transformations abiotiques car elles impactent à leur tour les cortèges floristiques et les espèces présentes naturellement dans le milieu avant installation. L'étude des impacts des CPS sur la biodiversité est au cœur d'enjeux actuels, en témoigne le lancement de récents programmes sur le sujet comme ENVOLtaïque (OFB) ou PIESO (Processus d'Intégration Ecologique de l'Energie Solaire).

Pour évaluer les enjeux et limiter les impacts de ces constructions, des études d'impact sur l'environnement (EIE) sont menées avant chaque aménagement. Le programme de recherche PHOTODIV (2019) « Etude du potentiel d'accueil de la biodiversité au sein des centrales photovoltaïques au sol », cherche à synthétiser le plus de données autour EIE des CPS. Ce projet a été monté en 2019 par Crexeco, le bureau d'études en environnement dans lequel le stage de fin d'études s'est déroulé. L'organisme, créé en 2015, se présente comme l'interface entre la recherche et l'ingénierie écologique et propose des conseils et des expertises sur les milieux naturels. Au travers des analyses PHOTODIV, notre devoir se concentrera sur l'installation de CPS et les conséquences sur le vivant qui en découlent, dans la région Auvergne-Rhône-Alpes. Nous caractériserons ces impacts et étudierons leur méthode d'évaluation et de quantification. Pour cela, nous partirons de la définition donnée par l'ADEME : « *Le concept d'impact environnemental désigne l'ensemble des modifications qualitatives, quantitatives et fonctionnelles de l'environnement (négatives ou positives) engendrées par un projet, un processus, un procédé, un ou des organismes et un ou des produits, de sa conception à sa « fin de vie ».* » (Agence de la transition écologique - ADEME Expertises, 2021). Nous nous intéresserons au principe même de la caractérisation des impacts en développant deux approches. La première permettra d'étudier la méthodologie de définition des impacts au travers des EIE, et avec la seconde, nous mesurerons ces incidences sur quelques sites en exploitation.

CADRE THEORIQUE

I. L'intégration des CPS dans un milieu de l'échelle nationale à l'échelle locale

Dans cette première partie, nous allons nous intéresser à l'intégration des CPS dans le territoire. A grande échelle, nous étudierons pourquoi la filière photovoltaïque connaît un tel essor. A l'échelle locale, dans un site d'installation, nous verrons que le milieu d'accueil doit suivre des obligations concernant les enjeux environnementaux. La notion d'intégration comprend aussi l'influence du milieu sur la centrale elle-même. En effet, certaines conditions abiotiques peuvent améliorer les rendements des panneaux solaires ou au contraire, les détériorer.

a. L'évolution de la filière photovoltaïque répond à des enjeux globaux

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'augmentation du nombre d'installations de centrales photovoltaïques répond aux enjeux globaux de réchauffement climatique. Dans l'objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050, une solution envisagée s'articule autour de la transition énergétique : diminuer l'utilisation de ressources polluantes émettant des gaz à effet de serre, au profit d'une énergie « verte ». On note sur le site de l'Agence de la transition écologique que « la filière [photovoltaïque] tient une place centrale dans la plupart des scénarios prospectifs » devant atteindre une puissance produite de 92 à 144 GW en 2050 (Agence de la transition écologique - ADEME Expertises, 2021). En 2021 en France, la puissance du parc solaire monte à 14 GW et devrait s'élever jusqu'à 44 GW en 2028 pour répondre aux attentes de la transition énergétique. Le photovoltaïsme s'inscrit donc dans un mouvement national au travers de la construction de centrales de plusieurs hectares. Mais contrairement à l'éolien, les panneaux solaires peuvent aussi être installés dans le domaine privé sur les toits des maisons. C'est donc une solution qui permet à chacun de se rapprocher de la sobriété énergétique. Pourquoi le photovoltaïsme semble une réponse appropriée aux enjeux actuels du dérèglement climatique ? Pour comprendre cela, nous pouvons porter notre intérêt sur la base de données internationale ecoinvent, qui rassemble des informations sur les sources énergétiques de plus de 40 pays.

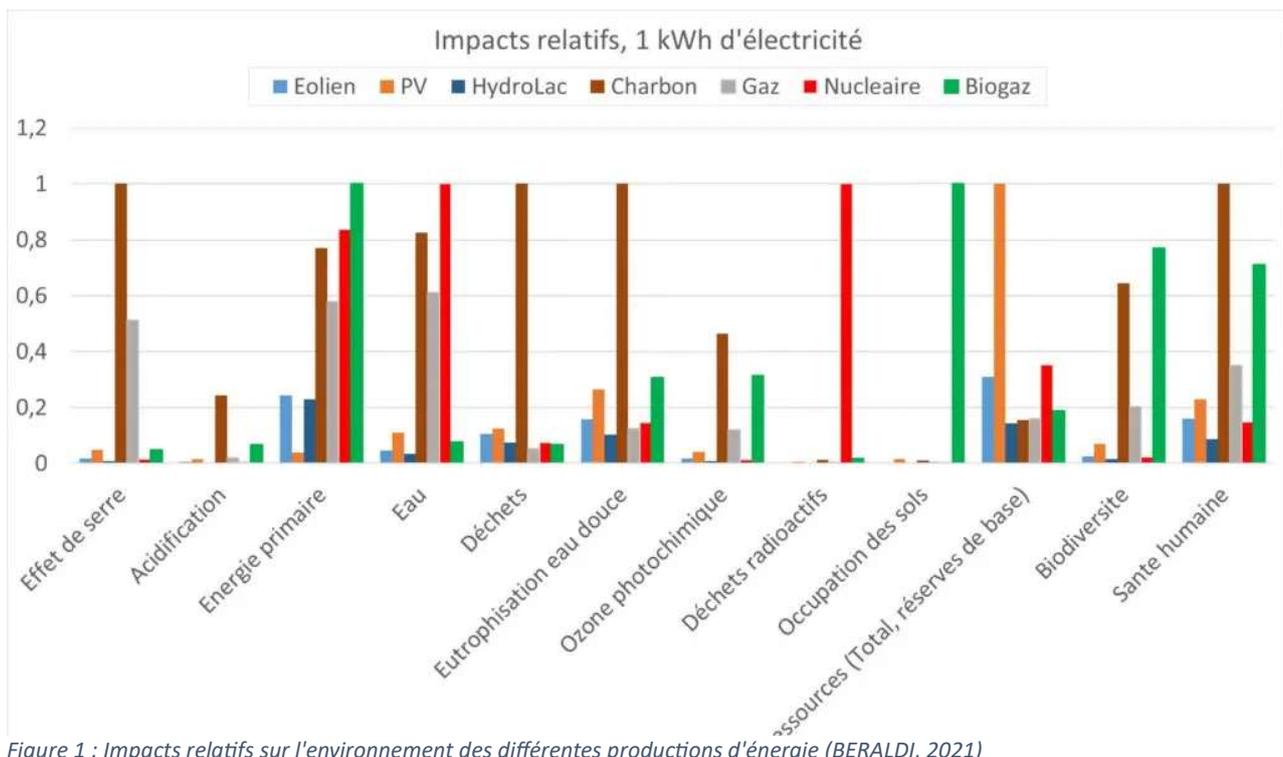


Figure 1 : Impacts relatifs sur l'environnement des différentes productions d'énergie (BERALDI, 2021)

La comparaison des impacts environnementaux entre sources de production d'énergies (Figure 1) montre que le photovoltaïsme émet très peu de gaz à effet de serre, utilise peu d'eau et ne rejette presque pas de déchets dans l'environnement par rapport au nucléaire, au charbon ou au gaz. La filière photovoltaïque semble ainsi une solution acceptable pour réduire les pollutions atmosphériques et l'effet de serre.

Nous pouvons nous attarder sur le volet « biodiversité » présenté sur ce graphique, à une échelle bien plus fine que l'environnement global. On voit que le photovoltaïsme a beaucoup moins d'impact sur la biodiversité que la filière charbon (presque 7 fois moins) et la filière gaz (2 fois moins). Cependant, les centrales photovoltaïques présentent un impact plus élevé que le nucléaire et l'éolien sur cet aspect. Donc même si, d'après les données ecoinvent 3.4, l'influence des panneaux solaires sur la biodiversité semble plutôt faible, on ne peut nier l'existence de cet impact. C'est pourquoi il est intéressant de se pencher sur la question, dans une optique de conservation de la biodiversité accompagnant la transition énergétique.

Enfin, les centrales solaires ont connu une augmentation massive de leur développement depuis ces quelques années. A l'échelle nationale, la filière photovoltaïque semble donc profiter d'une intégration remarquable. Cependant, à l'échelle du site, les panneaux solaires représentent une modification profonde de l'environnement, des conditions du milieu jusqu'à l'aspect paysager. De plus, l'environnement doit respecter un certain nombre de critères pour permettre le développement des centrales. Ainsi, deux aspects voient le jour : d'un côté, les centrales ont un impact sur la biodiversité à l'échelle locale en modifiant les conditions physiques et chimiques du milieu, mais de l'autre, les panneaux eux-mêmes dépendent de ces conditions initiales du milieu qu'elles influencent. C'est pourquoi nous allons tout d'abord présenter les paramètres nécessaires à la bonne intégration des CPS dans leur milieu. Ensuite nous présenterons l'influence que peuvent avoir ces installations sur les conditions de l'environnement. Enfin, nous étudierons si ces variations physico-chimiques sont à l'origine de détériorations ou d'améliorations de la biodiversité. Cela nous permettra d'introduire la notion de caractérisation des impacts : comment qualifier et définir un impact sur l'environnement ?

b. L'intégration des CPS dans un milieu dépend des conditions environnementales

Les conditions abiotiques ont un réel impact sur l'efficacité des CPS. Allant du simple aspect du parcellaire jusqu'aux conditions climatiques locales, toutes ces données physiques et chimiques sont à prendre en compte dans la conception des centrales. Pour avoir une bonne production d'électricité, les panneaux ont besoin d'un fort ensoleillement, d'une température moyenne assez élevée (25°C), d'une zone avec peu de particules de sable en suspension, et d'un sol stable sans pente (GUAITA-PRADAS, 2019, AZZEDINE). Cela permet de comprendre les interactions entre ces structures et les milieux. Pour arriver à un équilibre entre l'efficacité des panneaux, et donc la transition vers une énergie « verte », et la préservation de la biodiversité, il est nécessaire d'intégrer ces interactions. C'est pour cela que les CPS ne peuvent pas être implantées n'importe où, même si les bonnes conditions abiotiques sont réunies. Il faut éviter les milieux sensibles du point de vue environnemental comme les zones Natura 2000, ou les ZNIEFF. La circulaire du 18 décembre 2009 indique que « le développement [des installations photovoltaïques au sol] doit prendre en compte la protection des espaces agricoles et forestiers existants ainsi que la préservation des milieux naturels et des paysages » (Ministère Ecologie - Développement Durable - Transport, 2011). Il est possible de coupler l'installation des centrales à d'autres activités humaines, comme les pratiques agricoles (GUAITA-PRADAS, 2019). Ces activités annexes permettent d'entretenir les prairies dans le cas du pâturage sous panneaux, et d'assurer une production constante pour l'agriculteur. Lors de la conception d'une CPS, il est préférable de rechercher des sites déjà dégradés, et en priorité lorsqu'il n'y a pas d'activité secondaire prévue. Des friches industrielles aux anciennes décharges ou carrières, ces milieux délaissés par l'homme ont des conditions physico-chimiques déjà fortement modifiées (Ministère

Ecologie - Développement Durable - Transport, 2011). Une étude compare la qualité du sol de quatre terrains différents : une forêt de pins, une fruticée, un vignoble abandonné et une centrale photovoltaïque. L'indicateur utilisé se base sur la composante chimique du sol, comprenant par exemple la quantité de biomasse, la rétention d'eau ou la nature des minéraux (LAMBERT, 2021). Finalement, on observe un décalage entre les milieux anthropisés et les milieux naturels, mais il n'y a pas de différence entre le vignoble abandonné et la centrale, (Figure 2). Cela montre qu'il est préférable d'utiliser des sols déjà impactés par l'homme. Parfois la mise en place de panneaux peut avoir moins de conséquences sur la qualité physico-chimique du sol qu'une culture de blé à forts apports d'engrais et de pesticides (VERVLOESEM, 2022).

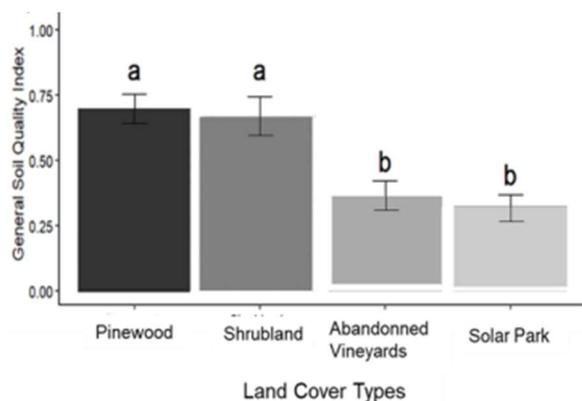


Figure 2 : Indice de qualité du sol selon l'occupation du terrain (LAMBERT, 2021)

II. L'installation des CPS entraîne une modification des conditions abiotiques du milieu et des communautés végétales

La mise en place, et l'exploitation d'une centrale photovoltaïque, sont donc dépendantes des conditions du milieu et des obligations environnementales en vigueur sur ces territoires. Nous allons voir que lors de la construction d'un parc solaire et durant son exploitation, ces mêmes conditions peuvent être profondément modifiées. Dans notre démarche de caractérisation des impacts sur le vivant, il semble important d'analyser d'abord les conséquences sur le monde « non vivant ». En effet, ce dernier correspond à l'ensemble des facteurs physico-chimiques dont dépendent la plupart des espèces d'un écosystème.

a. La construction de parcs solaires impacte la structure et les conditions abiotiques du sol

Le sol est le premier élément environnemental à subir les répercussions de l'installation d'un parc solaire. Il représente le pilier de l'écosystème et une modification de sa surface peut être à l'origine d'un bouleversement de la chaîne trophique. C'est pourquoi dans cette partie, nous allons nous intéresser spécifiquement à l'impact des CPS sur les conditions physiques et chimiques du sol, lors de la phase de construction puis lors de la phase d'exploitation des centrales.

Lors de la mise en place d'une centrale photovoltaïque, les pressions exercées sur le sol s'articulent autour du défrichage, du dessouchage, du terrassement, du compactage ainsi que des constructions annexes pour le drainage, les voies d'accès ou les postes électriques (MARX, 2022). Le passage répété d'engins de chantier peut provoquer le phénomène de compaction mais il est toutefois secondaire par rapport aux impacts engendrés par le défrichage. Cette phase de préparation de la

zone va provoquer la perte de la végétation qui participait au maintien de la structure du sol. En conséquence, le terrain sera plus érodable (plus sensible à l'érosion) puisque les végétaux permettent de limiter le processus d'érosion grâce à l'emprise racinaire (COSTA, 2021).

Les nombreuses études réalisées autour de l'installation de CPS et des conséquences environnementales s'accordent souvent sur l'idée de stratifier la parcelle selon trois milieux : la zone sous les panneaux, la zone entre les panneaux, la zone en périphérie des panneaux mais toujours dans la clôture de la surface d'implantation. Grâce à l'analyse des cortèges de plantes, on peut déterminer les changements de conditions globales du sol et les différences entre les 3 zones. Sous les panneaux, le sol est plus humide, avec une concentration de sel équivalente à la périphérie mais un pH plus faible. L'acidité du sol peut s'expliquer par la diminution de la biomasse entre la périphérie et les zones sous panneaux (VERVLOESEM, 2022). En effet, après les différentes pratiques de travaux et à cause de l'ombre apportée par les cellules, on retrouve sensiblement moins d'espèces végétales sous les structures. Une autre étude a permis de réaliser des contrôles d'humidité entre les panneaux et sous les panneaux de 10 cm de profondeur à 60 cm. On retrouve le fait que les sols sous les panneaux sont plus humides et retiennent mieux l'eau. En 4 mois, la quantité d'eau contenue dans le sol entre panneaux, à 60 cm de profondeur, a diminué d'un tiers alors que l'humidité du sol sous panneaux est restée la même (HASSANPOUR, 2018). Ces variations sont visibles sur la figure 3.

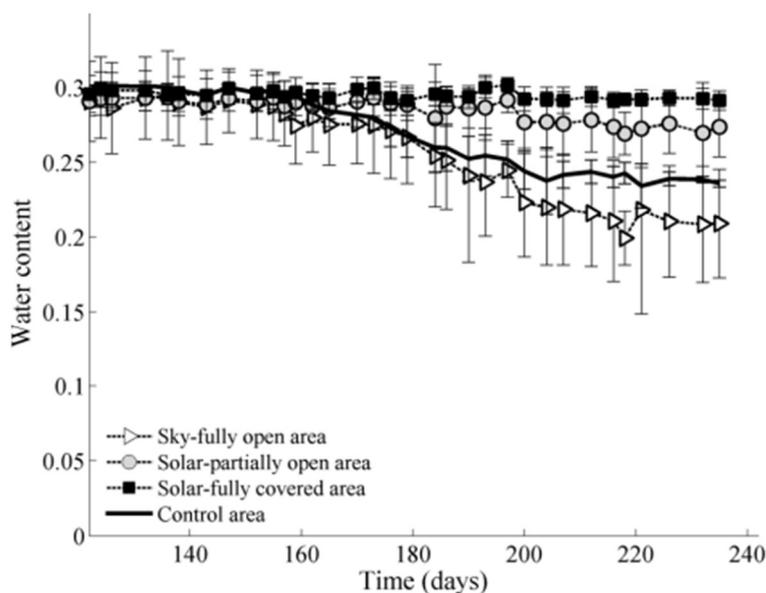


Figure 3 : Variation de l'humidité du sol au cours du temps selon les différentes zones étudiées (HASSANPOUR, 2018)

Cela crée une hétérogénéité à l'échelle de la parcelle. Dans le cas de l'agrivoltaïsme où la CPS est couplée à une grande culture, cette discontinuité peut nuire au maintien des espèces végétales puisque les plants n'auront pas le même besoin en fonction de leur répartition spatiale. Lorsque l'on se place dans certaines conditions extrêmes, on peut observer plus facilement les répercussions de certains changements. Dans une étude en plein désert, les effets sur deux espèces en particulier sont analysés : une rare *Eriophyllum mohavense*, et une plus commune *Eriophyllum wallacei* (TANNER, 2021). Lors de périodes pluvieuses, l'eau qui coule le long des panneaux est redirigée à un endroit précis, ce qui crée une différence de rétention d'eau par le sol. Juste en face de la structure, l'espèce *E. mohavense* est impactée négativement, alors que, inversement, l'accumulation d'eau est plus favorable à l'espèce commune *E. wallacei*. Ces résultats montrent bien que la présence des panneaux solaires peut fortement impacter les conditions du sol, notamment autour de la quantité d'eau

disponible. On voit aussi les répercussions positives ou négatives que peuvent avoir de telles modifications sur les communautés végétales.

Les modifications des conditions du sol vont principalement influencer les espèces végétales. Ces dernières représentent une source primaire de la chaîne trophique, c'est-à-dire les premiers éléments à être consommés par d'autres individus. On comprend bien qu'une diminution de la richesse spécifique floristique peut avoir un impact plus large sur les animaux qui en dépendent.

b. L'installation des CPS amène à la création de microclimats

L'apparition de microclimats est l'impact sur les conditions environnementales le plus étudié et le plus référencé. Selon la définition du Larousse, un microclimat est « [l'ensemble] des conditions climatiques d'un espace homogène très restreint et isolé de son environnement général ». Autrement dit, l'installation d'un panneau solaire va créer un espace dissocié du milieu global, aux conditions climatiques particulières telles que la luminosité, le vent, la température... Dans cette partie, nous allons présenter les caractéristiques des climats sous les panneaux puis au-dessus des panneaux, et montrer les impacts secondaires de ces variations sur le cycle du carbone et les communautés végétales.

i. *Caractérisation du microclimat au-dessus des panneaux*

Dans un premier temps, si l'on considère un seul panneau solaire, on peut aisément séparer l'espace en deux parties : au-dessus et en-dessous de la cellule photovoltaïque. Toutes les études s'accordent à différencier ces deux « micro-espaces » aux conditions climatiques bien différentes (MARX, 2022). Pour l'air ambiant au-dessus des panneaux, nous sommes témoins d'un réchauffement avec l'apparition d'un phénomène appelé « îlot de chaleur » ou « heat island effect ». (BARRON-GAFFORD, 2016). Dans un milieu naturel, la végétation joue un grand rôle dans la dissipation de la chaleur avec le stockage de cette énergie dans le sol et l'évapotranspiration. Dans un parc solaire, il n'y a pas cette libération latente d'énergie accompagnant l'évaporation. Les panneaux accumulent la chaleur, et c'est ainsi que l'on peut observer un effet d'îlot de chaleur. La surface au-dessus des panneaux va se réchauffer ainsi que la température de l'air. L'étude compare les températures à 2,5m au-dessus du sol pour trois zones : un désert naturel, un parking et une CPS, pendant toute une année. La température a toujours été supérieure ou égale tout au long de l'année dans la zone avec les panneaux solaires. Cette différence est plus notable sur les périodes estivales, et va jusqu'à +3,5°C. Cet effet présent sur les CPS est comparable à l'îlot de chaleur urbain. D'après le journal du CNRS, ces phénomènes se produisent car les éléments industriels comme le béton captent très facilement la chaleur en journée, contrairement à un sol végétalisé (CNRS Le journal). Toute l'énergie accumulée va se libérer la nuit et réduire le refroidissement naturel de l'air qui prend place lorsque le soleil se couche. C'est le même principe qui s'applique à un parc solaire où les cellules, noires et vitreuses absorbent la chaleur en journée et la libèrent la nuit tombée. Ainsi, on observe une augmentation de température à la surface des panneaux.

ii. *Caractérisation du microclimat sous les panneaux*

Nous avons vu précédemment un certain nombre de modifications des conditions du sol. Ces variations sont liées à l'apparition d'un microclimat sous les panneaux. Premièrement, l'installation des panneaux crée de l'ombre à leur pied mais les zones entre les rangs restent exposées au soleil. On peut donc facilement comparer les conditions physiques et chimiques des deux espaces. Par exemple, l'humidité plus forte du sol sous les cellules s'explique en majorité par la présence d'ombre ce qui limite l'évaporation causée par les rayons du soleil (direct et incident avec les autres panneaux) (HASSANPOUR, 2018). La circulation du vent sous les panneaux, couplée à la perte de lumière va diminuer la température de l'air. Cette différence de température avec les zones en périphérie peut

atteindre jusqu'à 11°C (VERVLOESEM, 2022). Toutes les études s'accordent sur le fait que le microclimat sous les panneaux est caractérisé par une diminution de lumière et de température, et une augmentation de l'humidité ambiante (ARMONSTRONG, 2016, LAMBERT, 2021, VERVLOESEM, 2022, HASSANPOUR, 2018).

En conséquence, dans ces zones on retrouve sensiblement plus d'espèces végétales adaptées à ces conditions fraîches et humides, ou qui peuvent s'en accommoder (VERVLOESEM, 2022). Cette pression de sélection va favoriser la présence de certaines espèces sous les panneaux, mais pas dans les inter-rangs. C'est ainsi que peut se créer une hétérogénéité sur la globalité de la parcelle. Par exemple, une étude démontre que les graminées et dicotylédones sont plutôt pérennes entre les panneaux, mais plutôt annuelles sous les panneaux (ULDRIAN, 2022). Un végétal soumis à des conditions météorologiques trop différentes de son habitat optimal aura plus de difficulté à être vivace. En effet, une plante pérenne doit adopter certaines « stratégies » de développement pour conserver les bourgeons durant les périodes froides. On imagine facilement que si le changement était trop abrupt, comme c'est le cas dans le microclimat sous les panneaux, les communautés végétales vivaces ne parviendraient pas à survivre et le cortège annuel prendrait le dessus.

Ainsi, nous avons montré que les centrales photovoltaïques apportaient des modifications parfois fortes des conditions abiotiques de leur milieu. Ces variations peuvent être à l'origine de différenciations de communautés végétales, notamment avec l'effet modalité sous-panneaux / entre-panneaux. Ce travail de synthèse nous a permis de montrer l'interconnexion entre la centrale et son milieu, ainsi que les conséquences de l'installation des panneaux sur le milieu abiotique et les végétaux. Nous pouvons en conclure qu'il existe bien un impact sur l'environnement, cependant il nous est impossible de caractériser cet impact avec ces informations. Y a-t-il des répercussions sur les espèces animales qui dépendent du milieu ? Quelles méthodes mettre en place pour mesurer un impact et le comparer ?

III. Evaluation des impacts environnementaux des installations humaines

Grâce à cette synthèse bibliographique, nous savons désormais que les CPS ont un impact sur les conditions physico-chimiques du sol et de l'air autour des panneaux. Nous pouvons même stratifier l'environnement selon deux dimensions. D'abord, au sol des différences apparaissent entre les zones sous les panneaux, entre les rangées, et en périphérie. Ensuite, on note une apparition de microclimats sous les panneaux, et au-dessus. Maintenant que nous sommes conscients de l'influence notable des panneaux sur les conditions abiotiques, nous pouvons revenir aux conséquences sur les êtres vivants et à l'objectif de ce devoir : étudier le principe de caractérisation de l'impact environnemental. Pour cela, nous allons nous attarder sur les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux en France, et sur leur reproductibilité.

a. L'étude d'impact sur l'environnement permet de mesurer les conséquences d'un projet d'installation sur le vivant

Les CPS ne peuvent donc pas être installées sur n'importe quel milieu, car elles modifient les conditions de ce dernier et l'anthropisation d'un territoire est souvent synonyme de dégradation de la qualité du sol. Pour prendre en compte l'influence de ces installations sur les écosystèmes, des études d'impact sur l'environnement (EIE) sont menées pour chaque projet.

Le 10 juillet 1976 est écrite la première loi imposant de réaliser des études d'impact avant travaux. Les lois du 12 juillet 2010 et du 3 août 2016 visent à consolider l'existence de ces études avec

l'apparition de l'examen au cas par cas, puis avec la participation du public aux décisions ayant un impact sur l'environnement (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition énergétique, 2023). Une fois l'EIE mise à l'écrit, le projet est examiné par les différentes instances responsables comme la DREAL et la DDT (Autorité environnementale), et peut-être accepté ou non selon les conclusions de l'étude (permis de construire délivré par le Préfet).

Pour lancer l'installation de CPS, les sociétés porteuses de projets proposent un plan de réalisation, comprenant une projection de la centrale solaire sur le site envisagé. Ensuite, les différents organismes contactés vont mener des études de terrains pour déterminer le niveau d'enjeu de la Zone d'Implantation Potentielle (ZIP). On retrouve des parties sur l'environnement humain et social, géologique, économique, paysager et enfin l'état des lieux écologique. Ainsi, une EIE ne comporte pas que des informations sur la biodiversité, mais doit bien prendre en compte un système complexe proposant de multiples interactions entre les domaines qui le composent. Toutefois, ces parties possèdent des approches bien distinctes, et dans notre étude nous nous intéressons uniquement au volet faune et flore. Pour résumer, les naturalistes des bureaux d'étude en environnement vont procéder à plusieurs passages, étalés sur deux à quatre saisons, pour mener des inventaires et déterminer quelles espèces sont présentes. Plusieurs taxons sont étudiés, on retrouve notamment l'avifaune, les chiroptères, l'herpétofaune, les habitats et les communautés végétales, ainsi que diverses classes d'arthropodes. Une fois les individus répertoriés, le bureau d'étude fournira une synthèse avec les enjeux présents sur la ZIP, à l'aide de la liste rouge de l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) et d'autres critères patrimoniaux ou dépendants des sites. Suivant la démarche « Eviter, Réduire, Compenser », les EIE s'accompagnent des mesures à prendre en compte pour minimiser les impacts des CPS sur l'environnement.

b. La qualification des impacts sur l'environnement requiert une standardisation à grande échelle

i. *Comment juger la qualité méthodologique des études d'impact ?*

L'évaluation des impacts environnementaux a toujours fait l'objet de nombreuses études pour déterminer quelle méthodologie permettait de se rapprocher le plus des conséquences réelles de l'installation humaine sur la biodiversité. Nous allons nous intéresser à certaines de ces études qui ont permis la création d'une des grilles d'analyse que nous détaillerons par la suite. En décembre 2000 sort l'article scientifique « Treatment of biodiversity impacts in a sample of US environmental impact statements » (ATKINSON, 2000). Premièrement, même si nous nous concentrons sur la région Auvergne-Rhône-Alpes dans cette étude, nous pouvons déjà observer que l'analyse de la qualité des études d'impact relève d'une interrogation internationale. Dans cet article, l'auteur cherche à voir si la biodiversité est correctement prise en compte dans les EIE, suite à la création de lois du « Council on Environmental Quality guidelines on biodiversity » quelques années auparavant. Pour réaliser l'étude, 35 documents ont été analysés grâce à un indice de biodiversité composé de 19 critères. Finalement, il en ressort que l'inclusion générale de la biodiversité est assez pauvre, mais on note toutefois une nette amélioration après l'apparition des directives du conseil de la qualité environnementale. En France, nous avons vu précédemment que les lois autour de la prise en compte de l'environnement dans les projets d'installations ont été consolidées par les directives de 2010, 2014 et 2016. Il sera donc possible d'observer un résultat similaire avec les lois françaises, où la qualité des EIE s'améliore après ces dates particulières. En 2017, deux articles nous intéressent particulièrement « The inclusion of biodiversity in environmental impact assessment: Policy-related progress limited by gaps and semantic confusion » (BIGARD, 2017) et « Études chiroptérologiques dans les dossiers réglementaires éoliens : disponibilité de l'information et

conformité avec les recommandations nationales et européennes ». (COLY, 2017) Dans le premier document, une analyse de 42 EIE françaises montre que l'intégration de la biodiversité s'est améliorée de 2006 à 2016, mais certains défauts persistent autour de la description des mesures et des enjeux sur des espèces plus communes. Pour la seconde étude sur les chauves-souris, les conclusions sont plutôt opposées puisqu'elle montre qu'il n'y a pas eu de réelle amélioration de la qualité des EIE. Encore une fois, il sera intéressant de prendre du recul sur ces résultats et de comparer nos analyses à celles exposées dans ces articles. La lecture des documents présentés nous permet de comprendre que la caractérisation des impacts est un sujet international, dont les conclusions convergent sur un point : il est primordial d'avoir une approche standardisée et homogène pour parvenir à réellement quantifier les conséquences de projets de construction sur le vivant.

ii. Le programme de recherche PHOTODIV : caractériser l'influence des CPS sur la biodiversité

Le programme de recherche PHOTODIV « Etude du potentiel d'accueil de la biodiversité au sein des centrales photovoltaïques au sol » a été créé en 2019 par le bureau d'études en environnement Crexeco. Ce programme vise à améliorer les connaissances sur ce sujet. Dans un premier temps, le projet a pour objectif de rassembler un maximum de données concernant les EIE d'Auvergne-Rhône-Alpes des installations de CPS, dans le but de tirer des conclusions sur la rigueur méthodologique de rédaction de ces documents. Ces données sont destinées aux différents acteurs intervenant dans les projets d'installation de CPS, des bureaux d'études aux porteurs de projets. Dans un second temps, le programme PHOTODIV cherche à développer des indicateurs et des protocoles permettant de caractériser l'impact environnemental des CPS sur des groupes particuliers : la flore, les rhopalocères et les orthoptères. Ces taxons représentent les piliers de la chaîne alimentaire, et les premiers à être au contact des panneaux solaires. De plus, ces espèces sont généralement peu considérées, au profit de taxons à plus forts enjeux comme les oiseaux ou les chiroptères. Le travail de M. Paul BRUNOD et M. Hervé LELIEVRE a permis de définir des protocoles standardisés qui ont été utilisés de 2019 à 2023 pour mesurer l'impact des CPS sur les trois groupes. L'objectif est donc d'évaluer le potentiel d'accueil des centrales dans le temps, pour la flore et les deux groupes d'arthropodes.

PROBLEMATIQUE :

Comme exprimé précédemment, d'après l'ADEME, l'impact environnemental représente l'ensemble des modifications de l'environnement apporté par un projet humain. Ces installations entraînent des variations du fonctionnement et de la composition d'un écosystème. Avec l'approche théorique, nous avons vu que l'installation de CPS amenait des conséquences notables sur les conditions abiotiques des milieux. Il était nécessaire de réaliser cette synthèse car le programme de recherche PHOTODIV se concentre sur les interactions biotiques, et non sur les conditions physico-chimiques. On s'attend à observer des impacts positifs ou négatifs sur les êtres vivants, en réponse à ces transformations abiotiques, ou directement liés aux panneaux. Pour mesurer l'impact, nous pouvons quantifier par exemple, le nombre d'individus d'une espèce avant et après installation, selon la méthode BAI/BACI (Before-After-[Control]-Impact) qui permet d'avoir un résultat numérique. Mais alors, peut-on réellement comparer deux impacts, chiffrés, avec la méthode BACI ? Si deux sites différents sont témoins de la même installation, et qu'une étude d'impact est réalisée, nous obtenons deux résultats numériques caractérisant les conséquences du projet sur le vivant. Cependant, si les méthodes de qualification des impacts sont différentes, alors la comparaison devient impossible. Ainsi, la question, d'apparence simple, « Comment caractériser les impacts sur l'environnement ? » relève en réalité de deux aspects : la quantification brute de l'impact, et la méthodologie permettant de le mesurer. En effet, si cette qualification n'est pas standardisée, alors la comparaison entre deux installations n'est plus possible et la caractérisation même de l'impact n'a plus de sens. D'après la synthèse réalisée sur l'importance des protocoles dans le monde de la recherche, il est essentiel d'avoir une méthode standardisée pour permettre de reproduire les expériences et valider les conclusions (BOSSALI, 2015). En nous inspirant de cet aspect fondamental de la recherche, nous allons étudier la qualité de la méthodologie des EIE d'Auvergne-Rhône-Alpes, pour en déduire l'état actuel de la caractérisation des impacts, dans une optique de standardisation des approches. Pour étudier le deuxième aspect de cette grande question, nous mesurerons aussi les conséquences brutes des projets photovoltaïques sur certains taxons plutôt communs, aux espèces à faibles enjeux.

Après l'analyse théorique et la mise en perspective de la notion d'impact, nous pouvons nous poser la question suivante : Comment sont caractérisés les impacts environnementaux des CPS en région Auvergne-Rhône-Alpes ? Cette problématique apporte à son tour plusieurs interrogations car, comme nous l'avons vu précédemment, la caractérisation d'un impact s'illustre par la reproductibilité et l'adaptabilité de la méthodologie de l'étude. Ainsi, au travers de ces deux aspects, quel est l'état actuel de la qualité des études d'impact en région Auvergne-Rhône-Alpes ? Quels outils mobiliser et comment mesurer les conséquences brutes d'un projet sur le vivant ?

On s'attend à voir une amélioration de la qualité rédactionnelle de la méthodologie des EIE depuis 2010, date marquant l'application des premières lois concernant l'impact environnemental. Il est aussi probable d'observer des différences de qualité selon plusieurs facteurs, comme les organismes responsables, ou encore la taille des zones d'implantations. On s'attend à ce que les zones à plus forts enjeux incitent à la rédaction d'EIE plus rigoureuses. Enfin, on peut penser que la qualité méthodologique sera dépendante du taxon étudié. Il n'y aurait pas d'impact sur les espèces dont la qualité méthodologique est faible. Moins d'efforts seraient fournis pour mesurer les conséquences du projet sur les taxons à faibles enjeux. Enfin, les différences de milieux imposées par les panneaux solaires devraient faire varier le nombre et la présence d'espèces.

Pour répondre à ces interrogations, nous allons tout d'abord dresser l'état actuel de la qualité des EIE selon deux critères principaux : la reproductibilité et l'adaptabilité des protocoles. Dans un second temps, nous étudierons les facteurs influençant la qualité des EIE. Ensuite, nous analyserons l'impact brut des CPS sur la flore, puis sur deux groupes d'arthropodes : les rhopalocères et les orthoptères.

MATERIEL ET METHODES

I. Récupération des études d'impact sur l'environnement

46 EIE de projets d'installation de parcs solaires datant de 2010 à 2018 ont été récoltées par Paul BRUNOD en 2019. Ainsi, dans un premier temps, nous avons recensé tous les projets d'installation de CPS en région Auvergne-Rhône-Alpes depuis 2018. Pour trouver ces informations, nous avons utilisé le moteur de recherche classique Google. En accédant au site des Missions Régionales d'Autorité environnementale (MRAe), nous avons étudié les différents avis rendus sur projets, ainsi que les rapports d'activités pour trouver tous les projets relatifs aux CPS dans la région. Finalement, plus de 85 avis ont été déposés depuis 2018 concernant ces installations, regroupant plus de 30 porteurs de projets. Après avoir dressé la liste des constructions de fermes solaires, nous avons cherché à récupérer les études d'impact associées. Tout d'abord, nous avons téléchargé les documents disponibles publiquement sur les sites des gouvernances territoriales (DDT, DREAL). Cependant, une grande partie des EIE ne sont pas accessibles directement via un moteur de recherche. Nous avons donc contacté un maximum de sociétés ayant travaillé dans l'installation des CPS en question. Finalement, seulement 31 études d'impact étaient disponibles. Il a été décidé de ne pas poursuivre les recherches par soucis de temps, et ce nombre de documents restait suffisant pour réaliser les analyses statistiques.

L'objectif de la récolte d'EIE était de compléter le travail initié en 2019 dans le cadre du programme de recherche PHOTODIV. Ainsi, nous avons formé une base de données rassemblant 77 études d'impact. Les 31 nouvelles EIE ont été étudiées, et à l'aide de deux grilles d'analyse, nous en avons tiré différentes notes pour caractériser la qualité de ces documents. La base de données globale comprenait donc les résultats des deux outils d'analyse ainsi que des données de contexte comme l'année, la surface, la société porteuse de projet, et les bureaux impliqués dans la réalisation de l'étude. Toujours dans une optique de standardisation des méthodes d'échantillonnage, les résultats d'analyse qui seront traités par la suite s'articulent autour de deux grandes parties : l'adaptabilité des inventaires et la reproductibilité de la méthode de prospection.

Avant d'entrer dans les détails, la figure 4 présente le résumé des différents indices de qualité utilisés dans l'analyse des EIE.

Objectif d'analyse	Indice	Description	Notation
ADAPTABILITE DES PROTOCOLES	<i>Qstrat</i>	Mise en place de différentes stratégies de prospection	Rapporté sur 100
	<i>Qechant</i>	Qualité et cohérence des inventaires	Rapporté sur 100
	<i>Qcontexte</i>	Réalisation d'études autour des inventaires (contexte, bibliographie...)	Rapporté sur 100
	<i>Qtotal</i>	Qualité de l'adaptabilité des protocoles (principalement représenté par Qechant)	Rapporté sur 100
REPETABILITE DES PROTOCOLES	<i>IndG</i>	Indice général de la présentation de la méthodologie d'inventaire (tous taxons confondus sauf si précisé)	Noté de 1 à 10
	<i>IBI</i>	Index of Biodiversity Inclusion. Mesure l'importance accordé à la biodiversité dans l'EIE	Noté de 0 à 1
	<i>Method_ENJ</i>	Qualité de la définition de la méthodologie d'évaluation des enjeux	Noté de 1 à 5
	<i>Contexte, Méthodologie, Effort d'échantillonnage</i> (indices CME)	Sous-partie de l'indice général IndG. Qualité rédactionnelle apportée au contexte, à la méthodologie d'inventaire et à l'échantillonnage en lui-même	Rapporté sur 100
AUTRE	<i>Enjeux</i>	Niveau d'enjeu répertorié dans la zone. Part des enjeux moyens et forts sur les enjeux totaux	Noté de 0 à 1

Figure 4 : Présentation des indices utilisés dans l'analyse de la qualité des EIE

II. Analyse de la qualité des diagnostics écologiques : adaptabilité des protocoles

Dans cette partie, nous allons décrire les outils utilisés pour caractériser les inventaires réalisés dans le cadre d'EIE. Pour juger de la qualité des diagnostics, nous avons créé une grille d'analyse permettant de noter les inventaires selon plusieurs critères. D'autres méthodes auraient permis de caractériser la qualité des études, comme faire le résumé avec les points positifs et négatifs de chaque document. La forme d'un tableau d'analyse permet de renseigner un maximum d'informations précises tout en limitant le temps passé par étude. Toutefois, la grille d'analyse limite l'interprétation aux critères choisis.

Dans un premier temps, nous avons procédé à une rapide recherche bibliographique, en utilisant principalement les ressources du Museum National d'Histoire Naturelle (ICHTER, MNHN, 2014) Les protocoles de la Société Herpétologique de France ainsi que d'autres guides ont été consultés, l'objectif étant de fournir une liste complète d'aspects à ne pas négliger lors d'un échantillonnage faune - flore. Nous avons dressé une première série de critères classés selon les taxons étudiés dans les EIE. L'objectif n'étant pas une approche exhaustive et trop détaillée, pour optimiser le temps passé par étude d'impact, seulement 19 critères ont été conservés, tous taxons confondus. Trois sous-parties ressortent de ce nouveau tableau : les différentes stratégies mises en œuvre, la rigueur de l'échantillonnage, et l'étude du contexte avec la pression d'inventaire. Ces trois aspects de la qualité du diagnostic sont alors renommés respectivement Qstrat, Qechant et Qcontexte (Figure 5).

Stratégies d'échantillonnage					Contexte d'inventaire				
Capture	Comptage /détermination à vue	Comptage /détermination à l'écoute	Indices de présences	Qstrat	Etude bibliographique préalable	Calendrier des inventaires en accord avec périodes favorables (heure, météo, saison)	Nombre de passages adapté	Justification du nombre d'espèces trouvé par rapport à la bibliographie milieu	Qcontexte

Cohérence et qualité d'échantillonnage											
Utilisation du matériel - observation /écoute	Utilisation du matériel - capture (+attraction) passive	Utilisation du matériel - capture active	Points d'écoute amphibien - 10 à 15 min par point d'eau	Utilisation méthode EFP/IKA/PA et justification	Points d'écoute ornitho - 10 ou 20 min + cohérence IPA/IKA par rapport au site	Plaques reptiles sur plusieurs mois, relevées plusieurs fois	Pièges photos sur plusieurs jours (10 à 20)	Enregistreurs chiros sur plusieurs jours (2 - 3)	Représentation cartographique des habitats et de la flore	Relevés phytosociologiques	Qechant

Figure 5 : Grille d'analyse de la qualité des inventaires

Pour chaque critère, l'EIE reçoit une note entre 0 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 et 1. Nous avons donné la note de 0 lorsque la condition n'était pas du tout respectée, et la note de 1 si l'étude avait correctement réalisé l'inventaire sur cet aspect. Pour chaque sous-partie, la somme de ces résultats est calculée puis rapportée sur 100 avec Qtotal qui reprend les 19 critères. Ces variables sont ensuite directement ajoutées à la base de données recensant l'intégralité des études et de leur contexte.

Nous avons utilisé cette grille d'analyse sur 31 études d'impact datant de 2018 à 2022. En effet, cet outil venant d'être créé, il ne pouvait être utilisé qu'avec les études récoltées lors du stage de 2023, contrairement au second tableau initialement développé en 2019 par Paul BRUNOD dans le cadre de son stage de fin d'étude. Il aurait été trop long de récupérer toutes les études d'impact depuis 2010 et de les juger à nouveau avec la grille d'analyse de la qualité des diagnostics. Nous avons donc décidé de nous en tenir à la trentaine de documents disponibles, ce qui représente toutefois une ressource suffisante pour en tirer des conclusions statistiques.

III. Analyse de la qualité méthodologique et rédactionnelle : reproductibilité des protocoles

Dans le cadre du programme de recherche PHOTODIV, nous étudions la reproductibilité des protocoles dans une optique de standardisation des méthodes d'inventaires et de rédaction des études. La première grille présentée analysait la qualité des échantillonnages, ce second outil se concentre sur la manière dont sont amenés ces inventaires dans le document. Il est important d'avoir une approche standardisée pour pouvoir répéter les mêmes protocoles, et donc caractériser avec rigueur les impacts des centrales sur la biodiversité. C'est dans cette optique que nous avons dressé un état des lieux de la qualité rédactionnelle des EIE, pour ainsi montrer les points à améliorer. Cette seconde grille d'analyse a été créée en 2019, à l'aide de trois sources bibliographiques montrant des études similaires. (ATKINSON, 2000 ; BIGARD, 2017 ; COLY, 2017). L'outil correspond à une suite de conditions à remplir par 1 ; 0.5 ou 0 selon la présence ou l'absence de critères dans l'étude d'impact. Le tableau rassemble plus de 200 colonnes, réparties selon plusieurs classes. On retrouve donc le critère IBI, Index of Biodiversity Inclusion (figure 6), qui mesure l'importance accordée à la

biodiversité dans le document, au travers du contexte de l'étude, des impacts, et des mesures et de leur suivi. L'IBI est une note sur 1, ou un pourcentage, qui correspond à une moyenne de plus de 30 conditions. Le critère de méthodologie des enjeux - Method_ENJ – note l'explication de la définition des enjeux relevés sur la zone d'étude (figure 7). Vient ensuite l'indice général – IndG – qui évalue la qualité de description de la méthodologie d'inventaire (figure 8). Cet indice général est composé de trois parties distinctes : les sous-thèmes Contexte, Méthodologie, Effort d'échantillonnage – CME -. L'indice général IndG, noté sur 10 correspond à une moyenne de chaque taxon. Il existe donc un indice général global, et dix autres pour les dix taxons (Habitat et Flore, Oiseaux, Chiroptères, Amphibiens, Reptiles, Mammifères autre que chiroptères, Lépidoptères, Orthoptères, Odonates, et Coléoptères). En plus des critères de notations, la grille d'analyse est complétée par certaines informations de contexte, commune avec l'outil de l'adaptabilité. On retrouve donc l'année, le département, les organismes responsables de l'EIE et du projet, ainsi que la surface du parc et l'ancienne occupation du sol.

Définition d'une zone d'étude	Définition d'une zone d'étude élargie (éloignée > rapprochée > immédiate > ZIP)	habitats	flore	Oiseaux	Chiro	Amphibien	Reptile	Mammifère	Lépidoptère	Orthoptère
Odonate	Coléoptère	Liste d'inventaire de la flore	Liste d'inventaire de la faune	Description des habitats naturels	Synthèse des inventaires faune/flore sur une même carte	Connectivité locales étudiées	Connectivités régionale étudiées	Étude des différents niveaux de la biodiversité (population, espèce, écosystème)	Étude des dynamiques écologiques (successions écologiques, phytosocio)	Étude des interaction écologiques
Prise en compte de la biodiversité commune ("banale")	Visite de terrain	Inventaires sur plusieurs saisons	Référence des bases de données utilisées	Consultation de la littérature scientifique (bibliographique)	Évaluation de la significativité des impacts	Identification des impacts directs/indirects	Identification des impacts temporaire/permanents	Description des effets cumulés	Explication de la méthode d'évaluation des impacts	Étude des solutions alternatives de moindre impact
Étude de l'alternative sans projet (évolution sur le long terme)	Description détaillée des mesures ERC	Distinction claire entre les mesures	Méthode de dimensionnement - pertes et les gains écologiques	Prise en compte du temps de latence entre les pertes et les gains	Prise en compte de la probabilité de succès des mesures	Définition d'un programme d'évaluation des mesures (avec mesures de suivi)	Définition d'indicateurs de suivi utilisé dans l'évaluation des mesures	Information sur la pérennité des mesures		

Figure 6 : Critères de notation de notation de l'indice IBI

La méthode de définition des enjeux est-elle expliquée	L'aspect réglementaire est-il pris en compte	L'aspect patrimoniale (Enjeux de conservation national, régional, départemental ne relevant pas de la protection stricte)	L'aspect local (échelle fine n'allant pas plus loin que la localité du site)	Les enjeux sont-ils clairement identifiés par une synthèse dans un tableau et/ou une carte	Y'a-t-il des enjeux habitats fort (contenant à minima le terme fort)	Y'a-t-il des enjeux habitats moyen (ne contenant ni le terme fort, ni le terme faible)
Y'a-t-il des enjeux habitats faible (contenant à minima le terme faible à nul)	Y'a-t-il des enjeux flore fort (contenant à minima le terme fort)	Y'a-t-il des enjeux flore moyen (ne contenant ni le terme fort, ni le terme faible)	Y'a-t-il des enjeux flore faible (contenant à minima le terme faible à nul)	Y'a-t-il des enjeux faune fort (contenant à minima le terme fort)	Y'a-t-il des enjeux faune moyen (ne contenant ni le terme fort, ni le terme faible)	Y'a-t-il des enjeux faune faible (contenant à minima le terme faible à nul)

Figure 7 : Critères de notation de l'indice Method_ENJ et du niveau d'enjeu ENJ

Argumente le fait de ne pas avoir inventorié	La ou les dates de prospections sont-elles indiquées	Les heures d'interventions sont-elles indiquées	Les conditions climatiques lors des inventaires sont-elles mentionnées	L'auteur de l'inventaire est-il indiqué	Méthodologie est-elle décrite	Description du matériel utilisé
Temps/distance/surface d'une unité d'échantillonnage décrite	Plan d'échantillonnage	Coordonnées GPS des unités d'échantillonnages sont-elles renseignées	Nombre de passage indiqué	Représentation cartographique du plan d'échantillonnage	Restitution de l'inventaire complète ?	Restitution de l'inventaire complète en annexe si elle n'est pas complète dans le corps du texte

Figure 8 : Critères de notation de l'indice IndG pour un taxon

Description de la base de données

La base de données est composée de 77 études d'impact, allant de 2010 à 2022. Cette importante taille d'échantillon permet des traitements statistiques fiables, notamment au niveau de l'évolution dans le temps. Nous pouvons nous attarder sur la répartition des études par rapport aux données de contexte. Pour les années pré-2018, 15 études sur 77 datent de 2010 à 2014 et 18 études datent de 2015 à 2017. En tout, 19 études ont été analysées sur l'année 2018. Ce grand nombre s'explique par l'intensification du nombre de projets accompagnant la transition énergétique globale. De plus, cette année rassemble les dernières EIE récupérées en 2019 et les premières récupérées dans le cadre de ce mémoire. Pour finir, 25 études des années 2019 à 2022 ont été récupérées. La répartition temporelle est donc légèrement déséquilibrée, et il faudra garder en mémoire que certaines années entre 2010 et

2015 ne comportaient qu'une seule étude. Quant à la répartition géographique, 46 études viennent de l'ancienne région Auvergne, et 31 de l'ancienne région Rhône-Alpes. Au niveau départemental, presque 50 % des documents proviennent de l'Allier, territoire qui connaît une très grande augmentation du nombre de projets photovoltaïques et dont les EIE sont plus facilement récupérables. Pour terminer sur les sociétés responsables des travaux et les bureaux d'études, les études sont assez bien réparties avec toutefois deux ou trois structures qui prédominent. Cependant, nous ne partagerons pas d'information concernant l'identité de ces structures. Le programme de recherche PHOTODIV n'a pas pour objectif de mettre en avant les résultats de chaque organisme par rapport à notre grille d'analyse. Ainsi, les conclusions de ce mémoire de fin d'études seront anonymisées mais cela n'empêchera pas d'étudier les effets structures induits par groupes responsables des rédactions d'EIE.

IV. Protocoles d'échantillonnages des espèces étudiées

Les protocoles d'échantillonnages du programme PHOTODIV ont été créés en 2019 et concernent trois taxons aux espèces plus « banales », mais centrales dans la chaîne trophique. L'objectif est d'étudier les impacts des installations de centrales sur des populations plutôt communes faisant l'objet de peu d'études. Les trois groupes sont les Orthoptères, les Rhopalocères et la Flore et possèdent des protocoles adaptés. En tout, 6 sites ont été prospectés par Crexeco en 2023 et nous avons complété cette base avec l'apport de données de deux autres sites grâce aux inventaires réalisés par les bureaux d'études *Geo+ Environnement* et *Altifaune*. Sur certains parcs, nous avons réalisé les traitements statistiques des années 2021 et 2022 en plus. Dans ce mémoire, nous procéderons aux analyses d'impact sur trois sites en exploitation :

Saint-Eloy-les-Mines (63) (Abrégé St-Eloy) : 2019-2020 - anciennement prairie, friche - 8 ha

Varennnes-sur-Allier (03) (abrégé Varennnes) : 2022 - anciennement grande culture (maïs) - 11,5 ha

Etang-Bertrand (19) : 2022 - anciennement prairie, friche, bois, culture - 26 ha

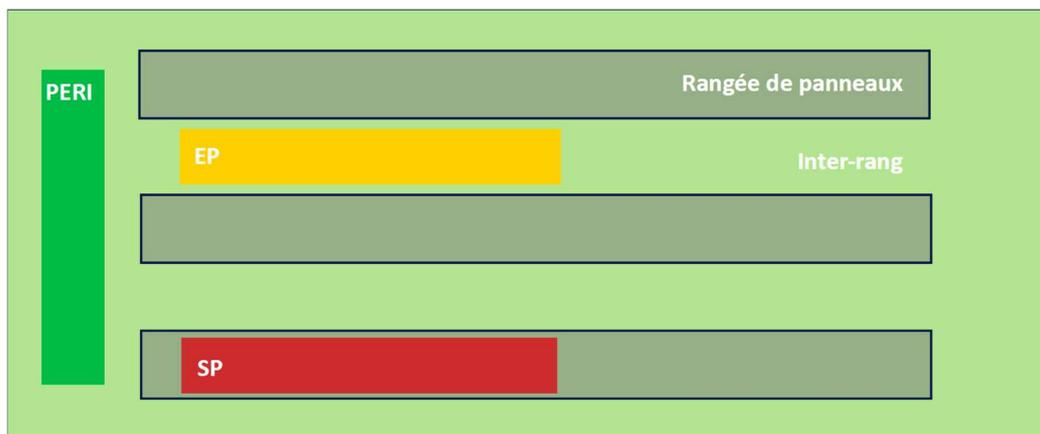


Figure 9 : Schéma des modalités dans une CPS

a. Flore

La flore représente l'ensemble des espèces végétales des différentes strates. Pour l'échantillonnage des cortèges végétaux, il faut réaliser 20 quadrats, ou placettes, de 20 m² chacun. Ces quadrats sont en réalité des lignes droites de 20 mètres de long sur 1 mètre de large. Le nombre de quadrats est indépendant de la taille de la centrale. La moitié des placettes doit se situer sous les panneaux, et l'autre entre les panneaux et en périphérie. Ces distinctions géographiques à l'échelle des panneaux solaires sont les modalités (Figure 9). On retrouve la modalité Sous-Panneaux SP, la modalité Entre-

Panneaux EP, et la modalité Périphérie PERI (ou P). Cette dernière représente les zones qui sont sur les côtés des rangées de panneaux, mais bien à l'intérieur du parc. Certains sites présentent une quatrième modalité TEM dans les parcelles Témoins, à l'extérieur des clôtures de la centrale. Dans le cas de la flore, les modalités EP et PERI sont combinés et nous utiliserons donc l'acronyme PEP (Périphérie + Entre Panneaux). Un seul passage doit être effectué pour la flore entre mi-mai et mi-juin.

Sur le terrain, nous avons suivi une trace GPS représentant l'emplacement des quadrats. Une fois les 20 mètres identifiés, nous avons pris une photo de la placette, puis nous avons procédé à l'échantillonnage. Pour ce faire, le naturaliste doit parcourir le quadrat en notant toutes les espèces identifiées sur la surface en question, avec leur abondance relative et la strate dominante. Ensuite il/elle note le temps de parcours qui doit durer entre 10 et 15 minutes par quadrat. Nous avons effectué les inventaires en alternant les modalités pour éviter tout biais lié à la fatigue ou à la météo.

b. Rhopalocères

Les Rhopalocères font partie des Lépidoptères, et ils regroupent ce qu'on appelle communément les papillons « de jour ». Adapté du protocole STERF, la méthode d'échantillonnage du programme PHOTODIV consiste en la réalisation de 6 transects de 300 mètres de long. Pour les insectes, il est impossible de réaliser les inventaires sous panneaux, alors la moitié des transects sont Entre les Panneaux EP et l'autre moitié en Périphérie PERI. Les 6 réplicats concernent une superficie de 10 hectares (ha), et il faut ajouter 2 transects supplémentaires par tranche de 10 ha. Pour un parc solaire de 30 ha, cela revient à effectuer 10 échantillonnages. Il faut procéder à 2 passages pour les Rhopalocères, le premier entre mi-mai et mi-juin et le second début juillet pour couvrir un maximum d'espèces aux éclosions différées.

Pour dresser ces inventaires, nous avons utilisé un filet à papillons (40 – 50 cm) pour capturer certains individus le long du transect de 300 mètres. La majorité des identifications peut toutefois se faire à vue.

c. Orthoptères

Les Orthoptères sont représentés principalement par les criquets, les sauterelles et les grillons. La méthode d'échantillonnage consiste ici à réaliser 20 transects de 20 mètres de long et 1 mètre de large, à l'image du protocole pour la flore. Encore une fois, la moitié des réplicats doit être en modalité EP et l'autre PERI. Un seul passage réalisé début août.

La méthode consiste à avancer le long du transect en donnant des coups sans interruption avec un filet-fauchoir. Le filet est assez profond et empêche les orthoptères de sortir le temps de parcourir le transect. S'il y a beaucoup d'individus, il est possible de faire des pauses au bout de quelques mètres pour identifier les insectes avant de les relâcher. L'écoute des stridulations et le repérage à vue des individus dans les 20 m² peut servir pour donner une indication des espèces présentes. Cependant, uniquement les individus capturés sont comptabilisés, pour garantir la reproductibilité du protocole et éviter les imprécisions liées à la position des individus.

V. Analyses des résultats et traitements statistiques

Nous avons tout d'abord présenté les outils utilisés avec les grilles d'analyses permettant de caractériser l'évolution de la qualité des EIE, et les protocoles d'échantillonnages pour étudier directement l'impact des centrales photovoltaïques sur certaines espèces animales et végétales. Ces outils ont été mis en œuvre pour récolter des données numériques que nous avons étudiées selon

différentes variables composant le système. Ainsi, les tableaux d'analyses de qualité nous ont permis d'obtenir des résultats sous forme de notes et les échantillonnages ont fourni des abondances d'individus et d'espèces. Pour la qualité des EIE, nous avons étudié les variations des notes selon les années, les bureaux d'étude, ou encore les porteurs de projets. Pour l'impact direct des panneaux solaires, nous avons comparé les différents indices de biodiversité obtenus pour chaque modalité : la Richesse Spécifique RS, l'indice de Shannon H', l'indice de Simpson D et l'indice de Piélu J. Pour réaliser ces analyses, nous avons utilisé Excel et le langage de programmation *R x64 4.2.2* (R Core Team, 2022) avec l'environnement *R studio* qui rend le logiciel plus accessible. Nous nous sommes servis de différentes extensions de R pour réaliser les traitements statistiques. Le package *vegan* (OKSANEN, 2022) nous a notamment été utile au calcul des indices de biodiversité relatif aux inventaires faune-flore, et le package *ggplot2* (WICKHAM, 2016) a permis la création d'une grande partie des graphiques. Pour la partie étude des EIE, le principe général a été d'importer les données depuis le fichier Excel puis de créer différentes bases de données selon les variables et les nombres d'études (77 au total, mais 31 pour la partie qualité). Ensuite, nous avons affiché différents graphiques et réalisé des calculs de corrélations pour avoir un aperçu des liens entre les variables. Nous avons confirmé ou non ces résultats à l'aide de modèles linéaires, pour enfin conclure sur l'état actuel de la qualité des EIE. Une relation de dépendance est significative lorsque la p-value (valeur teste de l'hypothèse nulle) du modèle de régression est inférieure à 0,05 et que le R² est assez élevé. Nous reviendrons sur la notion de significativité de la p-value en fin de document. Le R² correspond à la part du système expliqué par la relation illustrée dans le modèle. Quant à la partie quantification de l'impact des panneaux solaires, nous avons d'abord calculé les indices de biodiversité après avoir importé les saisies faune-flore depuis les fichiers Excel. La présence d'individus a été saisie dans un tableau suivant un format standardisé permettant une manipulation automatisée du logiciel lors du traitement statistique (annexe 1). Ensuite, nous avons créé les graphiques de raréfactions, et les dendrogrammes de similarités. Les indices de biodiversité ont été rassemblés dans une autre base de données comportant tous les résultats de chaque site. Nous avons finalement utilisé ce tableau pour dresser les graphiques finaux montrant l'effet année et l'effet modalité des sites sur les différents indices de biodiversité. Après analyses des données, les experts en faune-flore ayant réalisé les inventaires ont été consultés pour discuter des hypothèses et des interprétations. (Calcul des indices en annexe 2)

La richesse spécifique correspond simplement au nombre d'espèces détectées.

L'indice de Shannon H' caractérise l'hétérogénéité d'un peuplement. Cet indice augmente avec la diversité, et si H' est nul, alors le pool d'individus est homogène, il n'y a qu'une seule espèce. Généralement, les valeurs de H' s'étalent entre 0 et 5.

L'indice de Simpson représente la probabilité que deux individus d'une population pris au hasard soient de la même espèce. On note généralement l'indice « D », mais avec le package *vegan* du langage de programmation R, on obtient une version « 1-D ». Nous avons choisi de garder cette transformation pour que les variations soient plus claires et facilement comparables aux autres indices. En effet quand l'indice 1-D est nul, D est égal à 1 donc il y a 100% de chance que les deux individus pris au hasard soient de la même espèce. Ainsi, plus l'indice 1-D augmente, mieux les individus sont répartis. L'indice de Simpson et l'indice de Shannon permettent tous les deux de caractériser la répartition des individus au sein des espèces, mais Simpson donne plus de poids aux espèces communes et une seule espèce ne va pas fortement influencer sa valeur. A l'inverse, l'indice de Shannon est plus sensible à ces espèces peu représentées.

L'indice de Piélu (J) correspond au rapport de H'/H' max, avec H' max = log₂(RS). Ce nouvel indice est complémentaire à l'indice de Shannon et on utilise souvent les deux pour caractériser l'évolution d'un écosystème. Si J et H' diminuent conjointement, cela traduit un milieu déséquilibré par l'arrivée d'individus envahissants.

RESULTATS

I. Evolution dans le temps et état actuel de la qualité des EIE

Dans un premier temps, nous allons dresser l'état de la qualité des EIE, depuis 2010. Les deux aspects de la qualité méthodologique, la reproductibilité et l'adaptabilité, seront analysés pour nous permettre de tirer des conclusions sur l'évolution de la caractérisation des impacts en Auvergne-Rhône-Alpes.

a. Evolution de la qualité rédactionnelle des EIE depuis 2010 : étude de la reproductibilité des protocoles

Cette partie s'attarde sur la reproductibilité des diagnostics écologiques. En effet, pour standardiser les études d'impact, il est nécessaire que la méthodologie de mise en forme des résultats soit claire, complète et rigoureuse. Pour rappel, nous avons utilisé une grille d'analyse permettant de noter les EIE sur différents aspects. On retrouve donc le critère *IBI*, *Index of Biodiversity Inclusion*, l'indice général *IndG* et le critère de méthodologie des enjeux *Method_ENJ*. L'indice général *IndG*, noté sur 10, correspond à une moyenne de chaque taxon. Il existe donc un indice général global, et onze autres par taxon.

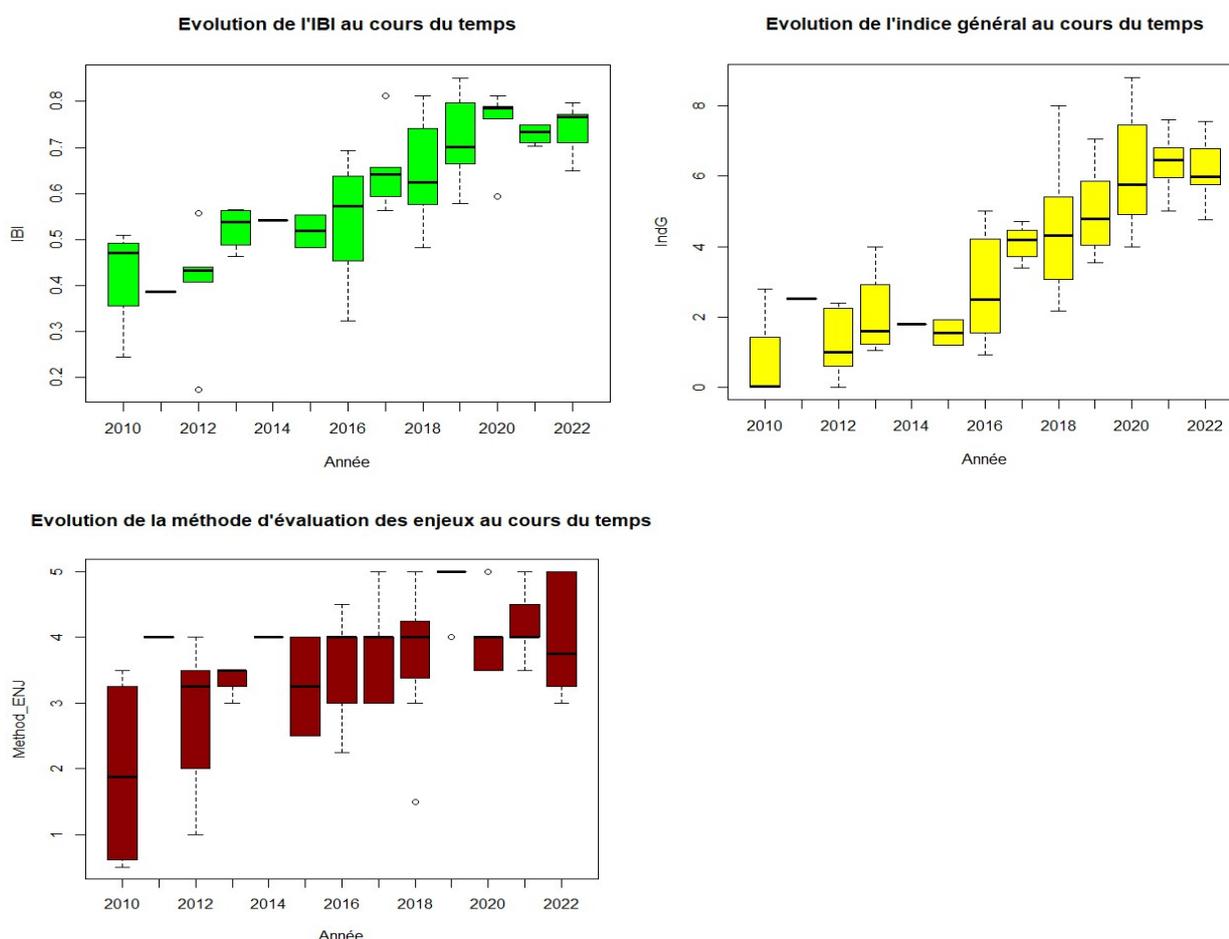


Figure 10 : Graphiques de l'évolution de trois indices de qualité des EIE

IBI (vert), IndG (jaune) et Method_ENJ (rouge) augmentent au cours du temps (Figure 10). Les régressions linéaires le confirment (annexe 3). Toutefois, la progression de Method_ENJ est moins proportionnelle au temps et atteint plus rapidement les notes maximales que IBI ou IndG. La stagnation observée après 2020 pour ces deux variables n'est pas significative. Une rupture de courbe est observable pour IndG entre 2015 et 2016. Comme attendu, la qualité des EIE s'améliore donc au

cours du temps, particulièrement en réponse aux obligations légales d'avant 2016, mais pourrait stagner depuis 2020. Les EIE se sont clarifiées et les méthodologies sont plus complètes et rigoureuses.

On détaille l'indice général IndG en prenant en compte les trois sous-thèmes CME (Contexte, Méthodologie, Effort d'échantillonnage) rapportés sur 100 (Figure 11). Les valeurs dans « contexte » atteignent leur maximum autour de 2018-2019. Pour « Méthodologie » et « Effort d'échantillonnage », les notes augmentent au cours du temps mais atteignent à peine 75/100 autour de 2020. Les EIE présentent aujourd'hui beaucoup de détails autour du contexte d'inventaire (heure, date, météo, auteurs...) mais des éléments manquent encore dans la rédaction de la méthodologie (matériel utilisé, explication de la méthode...) et l'effort d'échantillonnage (nombre de passages, plan d'échantillonnage, GPS et cartographie...). La forte évolution de l'IndG observée précédemment est principalement due à la valeur de contexte. Cela met en lumière les points importants à traiter pour améliorer la rédaction des documents et standardiser l'approche de l'étude d'impact.

Les modèles linéaires montrent bien une évolution positive des sous-thèmes au cours du temps (annexe 3), ainsi qu'une différence entre ces sous-thèmes. La régression linéaire trace une droite de la forme $y = a.x + b$ qui prend en compte tous les individus. La droite de régression du contexte a une pente plus forte (0.194) que les droites de régression des deux autres sous-thèmes (0.171 et 0.144), témoignant d'une plus forte évolution au cours du temps de la qualité rédactionnelle du contexte d'inventaire.

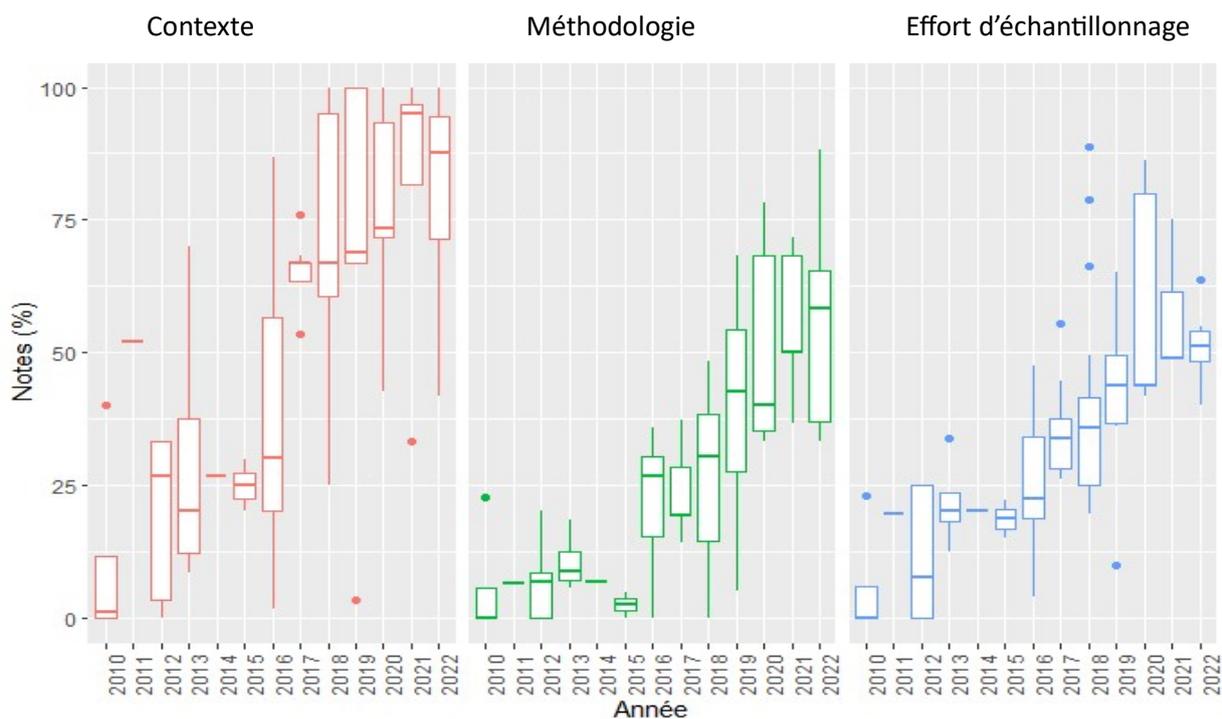


Figure 11 : Evolution des sous-thèmes (CME) de l'indice IndG au cours du temps

La variable ENJ, noté sur 1, correspond à la part des enjeux moyens et forts sur les enjeux totaux relevés dans l'EIE. Les ZIP (Zones d'Implantations Potentielles) les plus grandes sont dans des zones agricoles, comme les prairies et les cultures (Figure 12). De plus, elles possèdent un niveau d'enjeu plutôt bas par rapport aux autres occupations du sol avec une moyenne de 0,45. Cela explique le grand nombre de projets d'installations de CPS sur les parcelles agricoles. Le au ministère de la transition écologique encourage d'ailleurs les démarches d'agrivoltaïsme, avec des CPS couplées à des activités annexes agricoles. Sur le graphique, les surfaces anciennement anthropisées (carrière, friche...)

possèdent les plus hauts niveaux d'enjeu (presque 0,6). En effet, ces milieux ont été façonnés par l'homme et détiennent des caractéristiques très particulières qui les différencient fortement des prairies. C'est cette unicité qui va favoriser la présence d'espèces assez rares et souvent à enjeux. On s'attend donc à plus de rigueur dans la caractérisation de l'impact des CPS sur ce type de milieu.

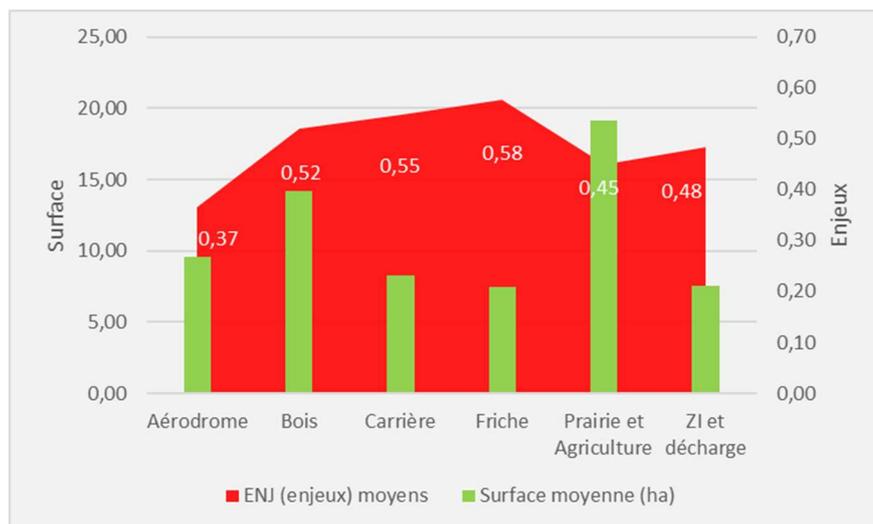


Figure 12 : Surface de la ZIP et enjeux de la zone selon l'ancienne occupation du sol des projets de CPS

b. Etat des lieux de la qualité des inventaires : étude de l'adaptabilité des protocoles

Cette partie concerne la qualité et la cohérence des inventaires en eux-mêmes. Nous avons utilisé la seconde grille, comprenant 19 critères regroupés en trois sous-parties : Qstrat, Qechant, Qcontexte. Ces trois nouvelles variables permettent de s'interroger sur les inventaires et les protocoles mis en place. Sont-ils adaptés aux taxons étudiés, aux enjeux présents ? Encore une fois, nous ne pouvons pas définir un impact sur l'environnement si la méthodologie de prospection ne permet pas d'avoir une juste estimation de l'enjeu de la ZIP. Cette grille d'analyse est utilisée avec une base de données de 31 EIE, de 2018 à 2022. L'effet année est donc naturellement atténué, mais ce nombre d'études est suffisant pour tirer certaines conclusions autour de l'adaptabilité des inventaires.

Qstrat et Qcontexte ne semblent pas évoluer avec le temps car les notes sont déjà presque maximales (Figure 13), alors que Qechant s'améliore de 2018 à 2022. Cela témoigne d'une augmentation significative de la cohérence et de l'adaptabilité de l'échantillonnage. Aujourd'hui, les 3 sous-parties de la qualité de prospection obtiennent des notes entre 75/100 et 100/100, ce qui relève d'un très bon investissement dans la rigueur d'échantillonnage. Cependant, cette évolution est très récente pour la qualité d'échantillonnage, avec des notes autour de 50/100 en 2018 45/100 en 2019, il est donc important de maintenir les efforts fournis depuis quelques années.

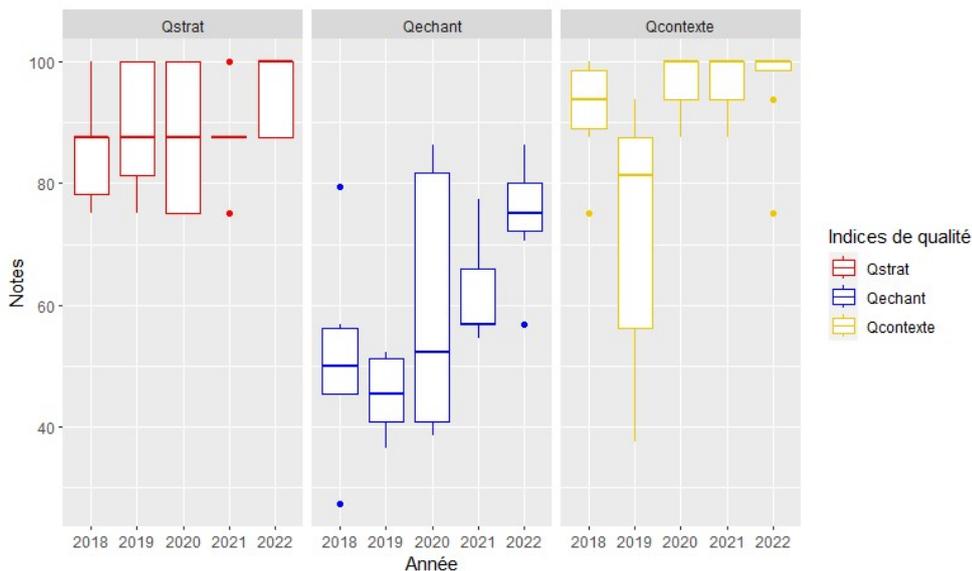


Figure 13 : Evolution des indices de qualité au cours du temps - adaptabilité des protocoles

Pour conclure, au travers de nos analyses de la qualité des EIE, nous avons exposé les points d'importance à améliorer dans l'objectif de définir avec exactitude l'influence des CPS sur la biodiversité. Malgré une forte amélioration de la reproductibilité des études d'impact depuis 2016, il y a encore des efforts à fournir pour décrire la méthodologie d'échantillonnage. Quant à l'aspect adaptabilité des protocoles, nous sommes aussi témoins d'une amélioration de la rigueur dans la prospection et les inventaires. Toutefois, cette évolution reste très récente. Avec cette première partie, nous avons caractérisé l'évolution de la qualité des EIE au cours du temps. Nous en avons tiré des conclusions concernant les points à améliorer dans une optique de standardisation des méthodologies pour caractériser les impacts des CPS sur le vivant. Nous allons désormais nous intéresser aux facteurs qui pourraient influencer la qualité des études d'impact.

II. La qualité des EIE et des diagnostics écologiques dépend de plusieurs facteurs

Les grilles d'analyses présentent de nombreuses variables non numériques que nous avons utilisées pour identifier les variations de résultats en dehors du facteur année. On s'attend par exemple à voir des déséquilibres de notes selon la zone, ou encore le taxon étudié.

a. Etude des effets influençant la qualité des inventaires

Tout d'abord nous pouvons identifier un lien entre la reproductibilité de la méthodologie (caractérisée par IndG) et l'adaptabilité des protocoles. Les critères de qualités des inventaires sont tous les 3 fortement liés à IndG (annexe 4). Lorsqu'un bureau d'étude fournit un bon travail dans son diagnostic écologique, il est souvent complété par une bonne explication de la méthodologie. C'est une conclusion que l'on retrouve avec les modèles linéaires de l'annexe 5. Par exemple, le R^2 supérieur à 0,45 pour la régression linéaire de l'indice Qechant en fonction de IndG indique un lien fort entre ces deux variables et donc une forme d'interdépendance des deux qualités étudiées dans les EIE. Pour caractériser avec précision les conséquences des constructions des CPS sur le vivant, il est nécessaire de mesurer l'enjeu d'une zone avec des inventaires cohérents et adaptés. Et pour définir l'impact général, il faut que ces mesures soient répétables et standardisées. Pour étudier la présence d'un effet lié aux organismes responsables de l'EIE, nous avons produit les graphiques des différents indices de qualité en fonction des structures. Dans le cas où il n'y aurait aucun effet, nous devrions observer une ligne horizontale où les étendues des boîtes à moustaches se recouperaient toutes. Cependant, en

annexe 6, on voit que la qualité des diagnostics varie en fonction des organismes, notamment en fonction des bureaux d'étude, comme on pouvait s'y attendre. Même si la qualité est fortement liée à la note de l'indice général, on s'aperçoit ici qu'il y a des bureaux d'étude avec de très bons résultats autour de la qualité du diagnostic, mais un indice général médiocre. Cela montre que certains groupes sont capables de réaliser des inventaires rigoureux et cohérents, mais qu'il peut y avoir de l'amélioration dans la rédaction de la méthodologie (précision, mise en forme, reproductibilité). C'est un point très important à soulever puisque, dans une optique de standardisation des protocoles, il est nécessaire d'avoir ce double aspect de qualité (adaptabilité et reproductibilité des diagnostics), comme nous l'avons indiqué précédemment. Pour analyser la présence d'un effet enjeu de la ZIP, nous avons produit ce graphique en regroupant les anciennes occupations du sol en trois milieux (Figure 14).

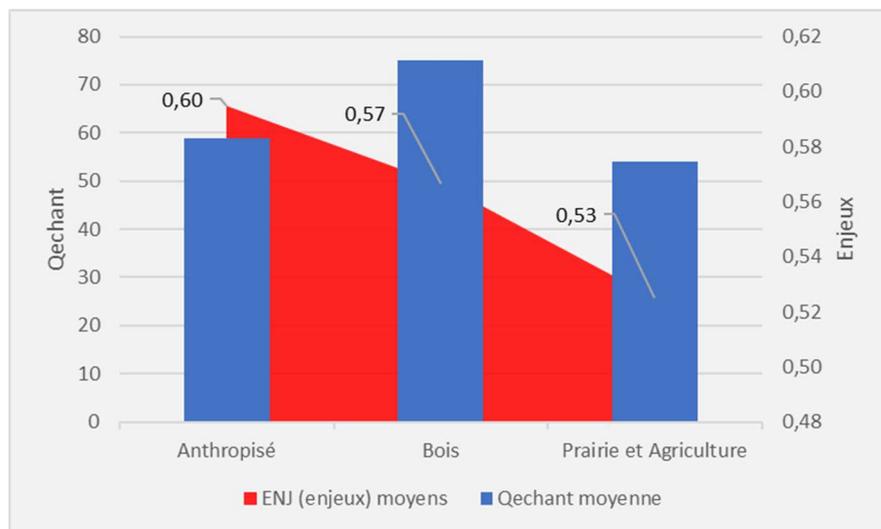


Figure 14 : Qualité de l'échantillonnage selon l'ancienne occupation du sol - adaptabilité des protocoles

Les anciennes occupations anthropisées (friche, carrière, décharge...) possèdent un niveau d'enjeu sensiblement plus élevé que les milieux agricoles. Ce graphique met en lien ces enjeux et la qualité de l'échantillonnage. On s'attendait à ce que les zones à forts enjeux mobilisent le plus de moyens et correspondent donc aux notes les plus élevées. Dans le cas des anciennes zones agricoles, le niveau d'enjeu (fort+modéré/total) moyen est de 0,53 ; et la qualité d'échantillonnage correspondant est autour 50/100. Pour les zones anthropisées, on a un niveau d'enjeu de 0,6, similaire aux anciens boisements. Cependant, la note de qualité pour ce dernier milieu dépasse les 70/100 alors que la qualité d'échantillonnage des zones anthropisées n'atteint pas 60/100. Cela montre qu'il est nécessaire de travailler sur la qualité des échantillonnages dans ces zones modifiées par l'homme. L'effort d'échantillonnage devrait être semblable à celui mobilisé pour les anciennes forêts, pour répondre au niveau d'enjeu plus élevé.

Nous pensons que le niveau d'enjeu exercerait une influence sur la qualité d'inventaires, cependant ces deux variables n'ont pas de lien, si on se réfère au graphique des corrélations (annexe 4). Il y a donc un travail à fournir pour réaliser des inventaires plus rigoureux dans ces zones qui paraissent délaissées mais qui peuvent accueillir une biodiversité unique. Pour revenir à notre question principale, si la qualité d'inventaire n'est pas adaptée au niveau d'enjeu et varie en fonction des sites, alors la mesure des impacts perd du sens et il n'est plus possible de caractériser avec justesse les conséquences des installations sur le vivant.

b. Etudes des effets influençant la reproductibilité des protocoles

Ce graphique (Figure 15) montre les corrélations entre nos différentes variables. La taille du point est proportionnelle à la corrélation entre deux variables. L'intensité de la couleur bleue illustre des liens positifs, et l'intensité de la couleur rouge représente les liens négatifs. Par exemple, la qualité des études est indépendante de la surface pour presque tous les indices. A l'inverse, l'indice général IndG est positivement corrélé aux variables IBI et Method_ENJ. Autrement dit, plus l'indice général est bon, plus on a de chance de trouver un IBI et une définition des enjeux de bonne qualité, et inversement. On note tout de même une plus forte corrélation entre IndG et IBI. Le graphique permet aussi d'appuyer nos précédentes conclusions concernant l'évolution positive des trois critères avec le temps. Le niveau d'enjeu est aussi faiblement corrélé à la qualité rédactionnelle des EIE.

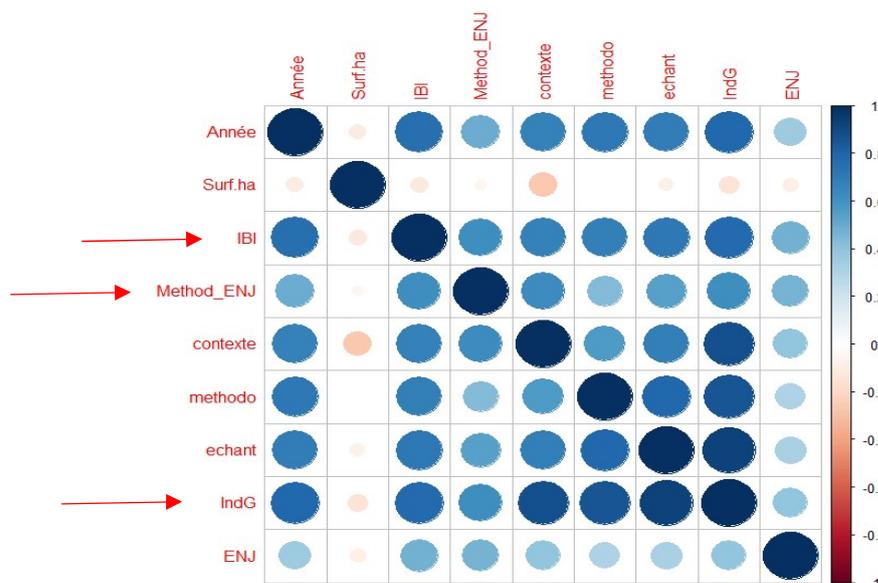


Figure 15 : Diagramme des coefficients de corrélation des différentes variables concernant la reproductibilité de la méthodologie

Nous avons déjà étudié le lien entre la qualité des inventaires et l'ancienne occupation du sol, en mettant nos conclusions en parallèle avec le niveau d'enjeu des ZIP. Un effet similaire se retrouve-t-il avec l'approche reproductibilité des méthodes ? Tout d'abord, concernant les indices principaux, d'après les modèles linéaires (annexe 7), il n'y a pas d'effet de l'occupation du sol sur l'indice général global, la méthodologie de rédaction des enjeux, et l'IBI. C'est pourquoi nous avons créé le graphique en prenant les sous-thèmes de l'indice général dans la même annexe. La plupart des boîtes à moustaches se recoupent, avec toutefois des variations des médianes selon les milieux. Avec le modèle linéaire, on s'aperçoit qu'il y a une légère influence de l'ancienne occupation du sol sur l'effort d'échantillonnage et la méthodologie (liens positifs avec l'occupation Bois). Il est difficile d'interpréter ces résultats, mais il est probable que la rédaction des EIE soit plus compliquée dans le cas de zones assez particulières, comme les aéroports ou les zones industrielles.

Au total, 11 taxons sont évalués dans la grille, mais pour simplifier les analyses seulement 5 groupes aux résultats bien différents sont représentés ci-dessous (Figure 16). Le graphique avec tous les taxons est consultable à la fin de ce document (annexe 8). Les groupes retenus sont les suivants :

Habitat et Flore (rose), Oiseaux (gris), Chiroptère (marron), Lépidoptère/Rhopalocère (jaune foncé) et Orthoptère (vert foncé). En plus de présenter des résultats significativement différents, ces taxons sont sensiblement les plus impactés par l'installation d'une CPS.

Sans prendre en compte la variable année, les groupes des chiroptères et des oiseaux montrent de bien meilleurs résultats. Cette conclusion est confirmée par l'analyse du modèle de régression figurant en annexe 9 où l'on remarque que les trois autres groupes ont des notes significativement inférieures.

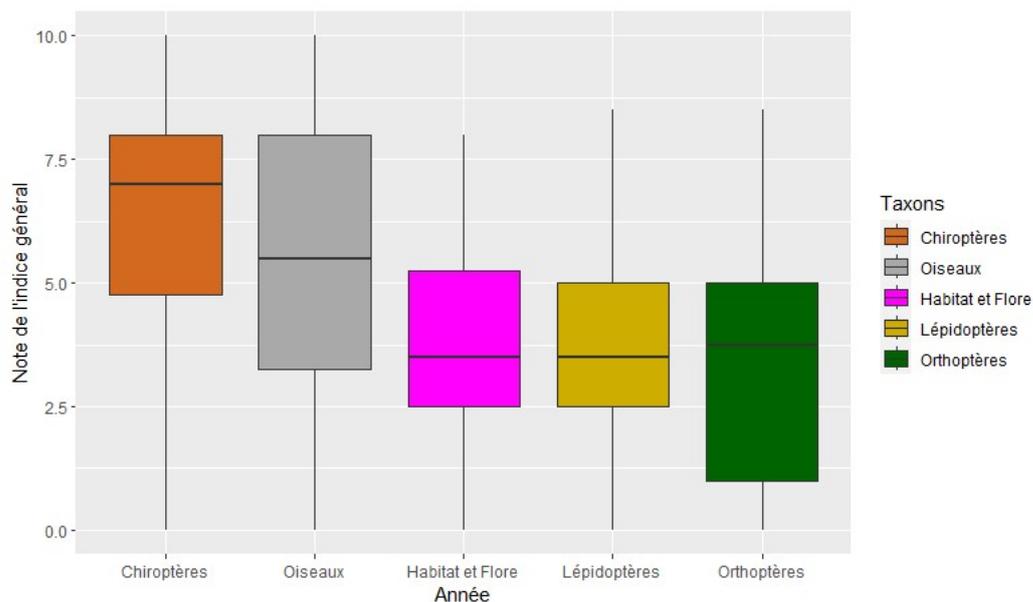


Figure 16 : Indice général par taxon

Les indices généraux pour les chiroptères et l'avifaune sont plus élevés (autour de 8/10 en moyenne en 2022) que les notes pour les arthropodes (un peu plus de 5/10 en 2022) (Figure 17). Cette différence de plusieurs points se retrouve chaque année. Beaucoup plus de moyens sont fournis dans l'étude d'impacts sur les oiseaux et les chauves-souris. Les méthodologies appliquées pour les insectes sont bien moins détaillées. Ainsi, le taxon étudié exerce une influence sur la qualité de l'EIE. Il serait donc important d'accorder plus de rigueur dans la réalisation des études autour de ces espèces plus communes. Cela rejoint le principe du programme de recherche PHOTODIV qui vise à standardiser les méthodes de diagnostics autour de ces taxons. Avec un déséquilibre de rigueur apportée aux différents taxons, il devient très difficile de caractériser un impact global des CPS sur la biodiversité.

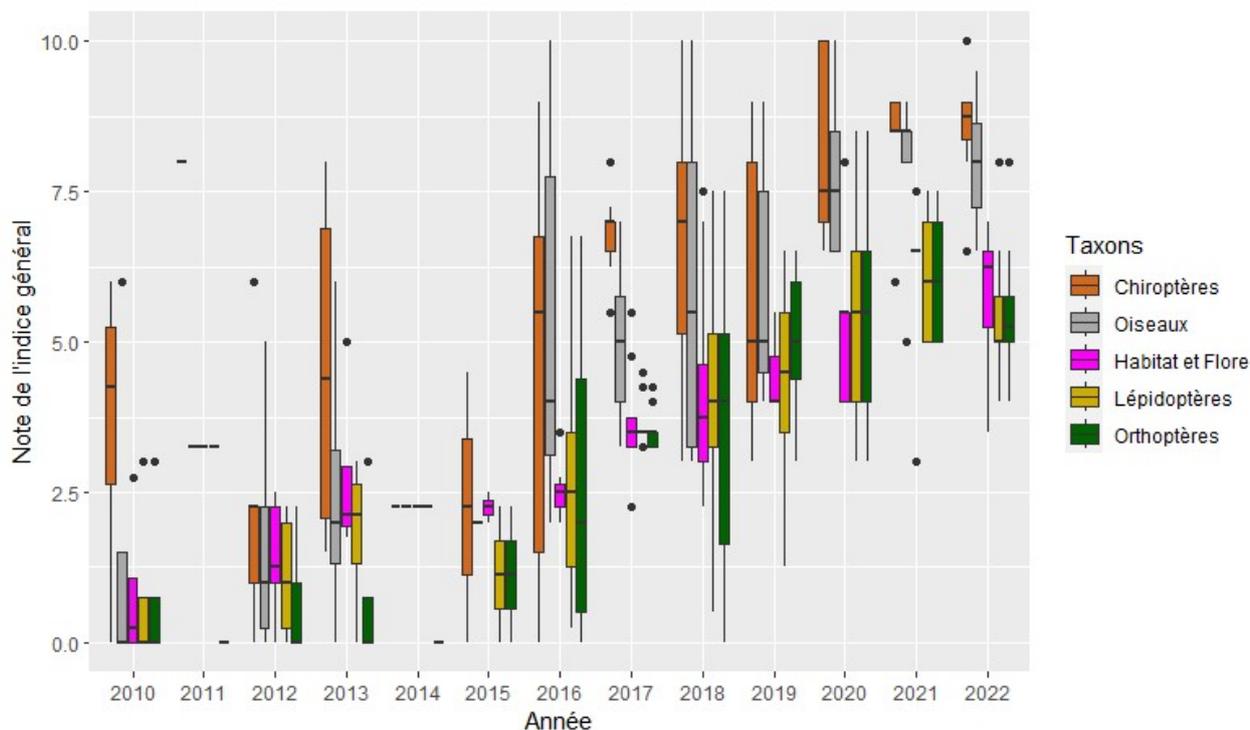


Figure 17 : Evolution des indices généraux par taxon au cours du temps

Grâce aux traitements statistiques des résultats de nos deux grilles d'analyse, nous avons dressé l'état actuel de la qualité des EIE, de la réalisation des inventaires jusqu'aux méthodes rédactionnelles du document. Finalement, malgré une forte amélioration des études d'impact depuis 2010, nous avons remarqué que cette qualité n'était pas homogène au sein des différentes parties qui composent les documents. Dans les zones anthropisées, la qualité des études de terrain n'est pas adaptée aux enjeux. Il existe aussi des déséquilibres dans le traitement de l'étude selon les taxons. En effet, pour certaines espèces, les EIE d'aujourd'hui permettent de caractériser avec finesse les impacts des CPS sur la biodiversité. Beaucoup de moyens sont mis en œuvre dans l'étude des taxons comme les chiroptères ou l'avifaune. À l'inverse, nos résultats ont mis en lumière le manque d'importance accordée aux arthropodes dans la réalisation des études. Les impacts sur ces espèces sont moins bien caractérisés. On observe un résultat similaire pour la flore.

III. Caractérisation des impacts bruts des CPS sur la flore : étude de trois parcs solaires

La flore, les rhopalocères et les orthoptères représentent les piliers de la chaîne trophique. C'est pourquoi le programme de recherche PHOTODIV vise à étudier l'impact réel des CPS sur ces taxons qui représentent la source alimentaire principale d'espèces d'oiseaux et de chauve-souris aux enjeux réglementaires élevés. Ainsi, nous allons analyser l'influence de l'installation des CPS sur ces trois groupes, à l'aide des inventaires réalisés sur les sites St-Eloy, de Varennes et d'Etang-Bertrand. En mettant en relation ces résultats avec les conclusions tirées des grilles d'analyse, nous pourrions mettre en perspective le choix de donner moins d'importance à ces espèces lors des études d'impact. Pour mesurer l'impact des projets sur l'écosystème, nous avons décidé d'utiliser les indices de biodiversité suivants : la richesse spécifique (RS), et les indices de Shannon, de Simpson et de Pielou. Dans un premier temps nous développerons les résultats pour la flore.

a. Evolution des indices de biodiversité selon la modalité et l'année

À Etang-Bertrand, il y a en moyenne deux fois moins d'espèces végétales sous les panneaux qu'entre les panneaux (Figure 18). À l'inverse, à Varennes, la médiane de la RS passe environ de 7 entre les panneaux à 10 sous panneaux. À St-Eloy, on observe une équivalence du nombre d'espèces entre les zones SP et les zones PEP, mais il est difficile d'interpréter l'évolution des indices de biodiversité pour la zone témoin. En effet, les parcelles en question ont été fauchées en 2023, ce qui explique la perte forte de biodiversité car la majorité des espèces n'était pas identifiable. De plus, à St-Eloy la RS semble diminuer légèrement de 2021 à 2023 peu importe les modalités. Les modèles linéaires confirment ces évolutions, permettant aussi de comparer les 3 sites, notamment avec Etang-Bertrand et Varennes (annexe 10). Le coefficient de régression est presque trois fois plus faible pour Varennes, ce qui montre que la différence entre les modalités est plus importante sur le site d'Etang-Bertrand.

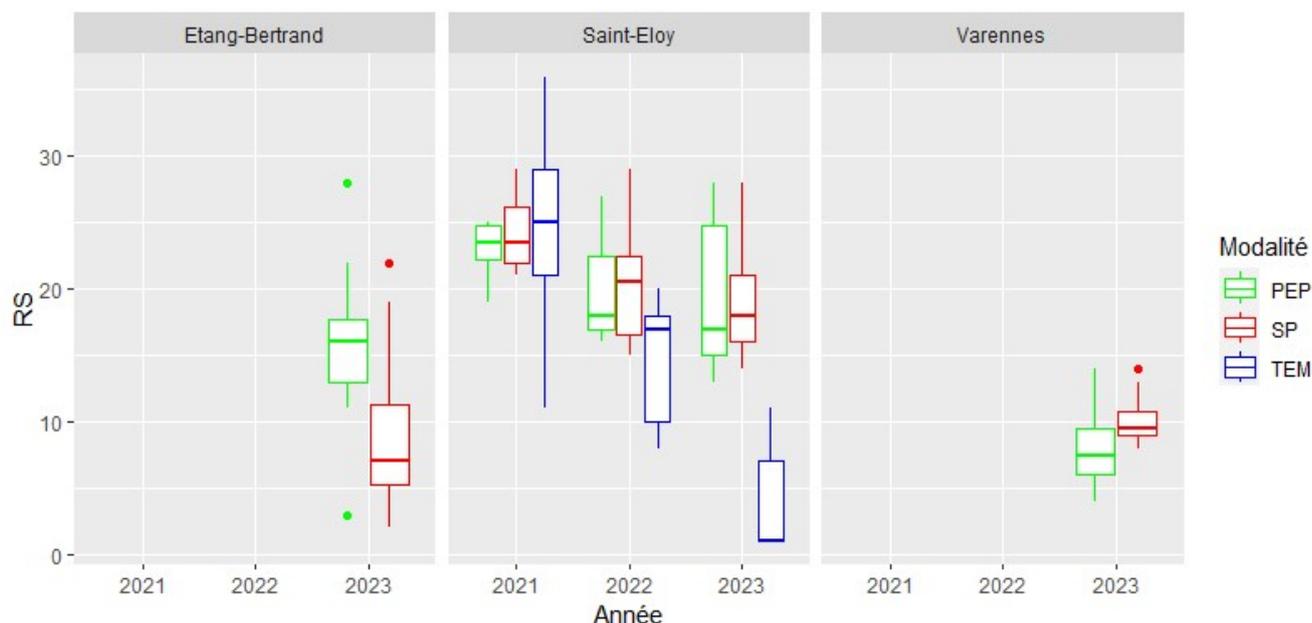


Figure 18 : Flore - Evolution de la richesse spécifique selon les sites, la modalité et l'année

Pour conclure, nous avons trois profils différents : à Etang-Bertrand, la présence de panneaux a un effet négatif sur le nombre d'espèces, à Varennes elle a un effet positif, et à St-Eloy il n'y a pas d'effet modalité mais la richesse spécifique globale décroît avec le temps. Nous allons désormais étudier les autres indices de biodiversité et comparer nos différentes conclusions.

L'homogénéisation des peuplements accompagne la perte d'espèces sous les panneaux à Etang-Bertrand (Figure 19). Au contraire, à Varennes, les individus sont mieux répartis au sein des espèces qui augmentent en nombre avec la modalité sous-panneaux. Quant à St-Eloy, selon les modalités, il y a une différence d'évolution de l'indice de Shannon au cours du temps. En effet, H' est stable entre les panneaux mais il augmente pour les peuplements sous les panneaux (d'environ 1,6 à presque 2,5). Le peuplement est sensiblement plus hétérogène sous-panneaux qu'entre les panneaux en 2023, alors que c'était l'inverse en 2021. Autrement dit, pour ce site, le nombre d'espèces a diminué sous les panneaux, mais les individus sont mieux répartis au sein de ces espèces. Les cortèges se seraient stabilisés suite à la perturbation, avec une disparition des espèces végétales peu représentées qui n'étaient peut-être pas adaptées aux nouvelles conditions liées à la présence de panneaux (augmentation de l'humidité, diminution de la température et de la luminosité).

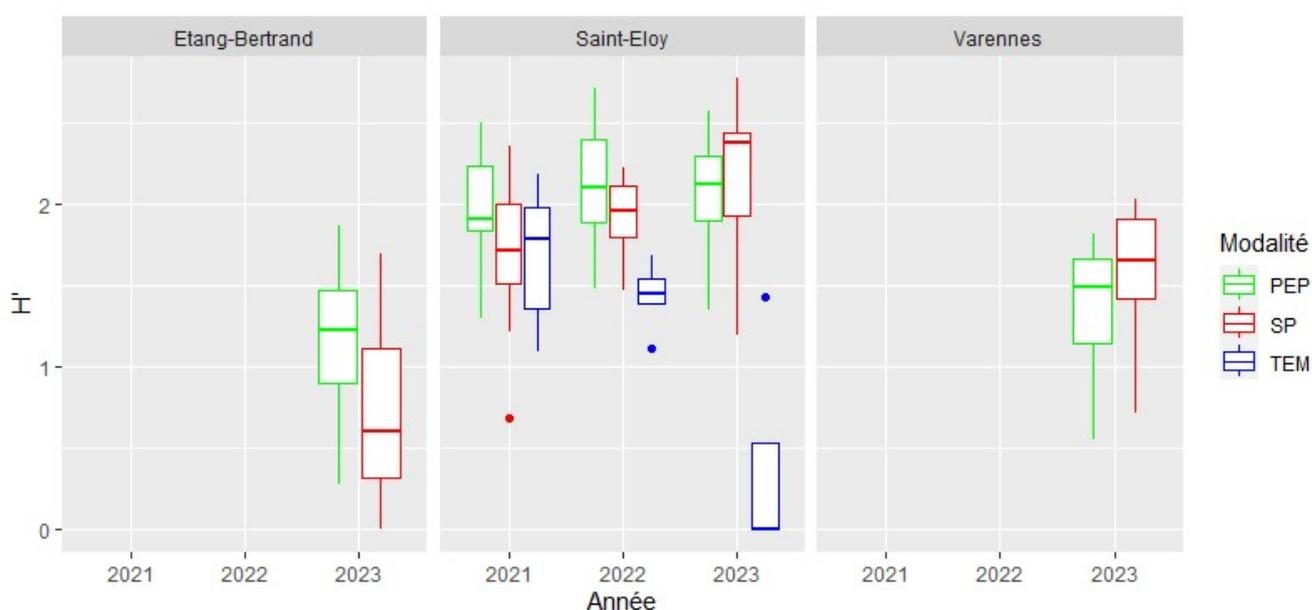


Figure 19 : Flore - Evolution de l'indice de Shannon selon les sites, la modalité et l'année

Les modèles linéaires confirment bien l'évolution de H' au cours du temps pour la modalité SP. Il existe aussi une diminution significative, mais assez faible, de l'indice de Shannon de PEP à SP pour Etang-Bertrand. Cependant, les modèles ne valident pas notre observation pour Varennes. On peut donc en conclure que l'indice de Shannon est moins sensible à la perturbation que la richesse spécifique pour ces deux sites. L'indice de Simpson suit les mêmes variations que Shannon et nous en tirons donc les mêmes conclusions. Le graphique et les modèles linéaires appuyant nos propos sont présentés en annexes 10 et 11.

Pour les sites de Varennes et d'Etang-Bertrand, d'après les modèles linéaires, l'indice de Pielou n'est pas significativement différent selon les modalités. Cependant, à St-Eloy, l'indice de Pielou augmente pour la modalité sous-panneaux (Figure 20), ce qui était déjà le cas avec l'indice de Shannon. Ces augmentations simultanées des deux indices sont souvent la preuve d'une transition entre deux écosystèmes, qu'on nomme « écotone ». Un écotone représente l'interface entre deux biomes aux niches écologiques différentes. Il est donc possible que les différences de conditions abiotiques induites par les deux modalités soient à l'origine de la création de cet interface biologique. Cependant, ces conclusions restent des hypothèses puisque nous avons parallèlement à cela une diminution de la richesse spécifique.

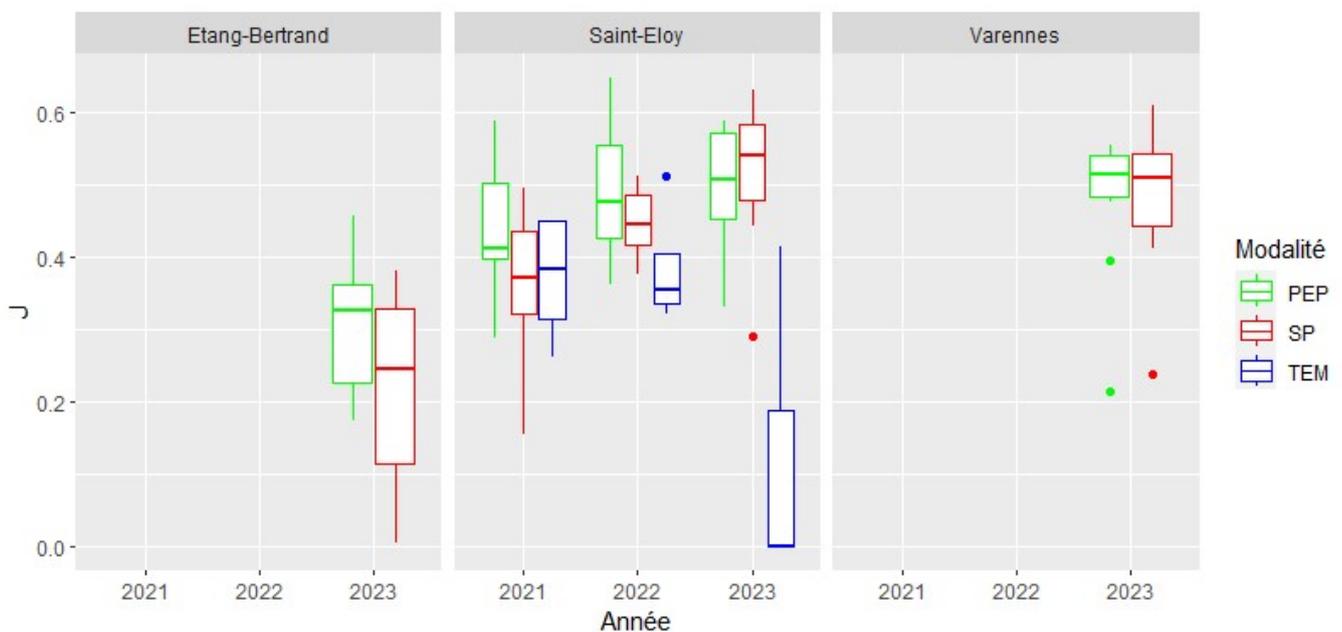


Figure 20 : Flore - Evolution de l'indice de Pielou selon les sites, la modalité et l'année

Si la théorie de l'écotone est envisageable, alors le nombre d'espèces sera amené à augmenter avec le temps. Dans tous les cas, nous observons une forme de stabilisation des communautés végétales, témoignant de la possible apparition d'un nouveau milieu « Sous-Panneaux » distinct des zones entre les panneaux et en périphérie.

b. Analyse de la composition des communautés végétales après installation

L'indice de similarité de Jaccard permet de comparer différentes populations selon les espèces présentes. Sur R, nous pouvons en tirer un dendrogramme, un arbre de classification, qui va trier les quadrats ou transects en fonction de leur similarité en termes d'espèces. Entre deux points, plus la distance à parcourir sur les branches du dendrogramme est grande, plus ces groupes sont différents. Nous avons utilisé ce principe pour voir si des grandes tendances apparaissaient concernant les espèces présentes selon les modalités. À Varennes il n'y a pas de regroupement par modalité, donc il n'y a pas de distinction entre les espèces sous les panneaux et entre les rangées (annexe 12).

À Etang-Bertrand, une grande partie du site était occupée par de la prairie en pâturage (points vert foncé), et une autre parcelle était cultivée (points orange) (Figure 21). On voit ici clairement une séparation des deux zones d'après les similarités de Jaccard. Ainsi, l'ancienne occupation du sol a été déterminante dans la structure des communautés végétales après installation de la CPS. En élargissant cette conclusion, cela expliquerait les différences de « réaction » qu'on retrouve après construction selon les sites. Si l'ancienne occupation du sol a une réelle incidence sur les communautés végétales après installation, alors cela expliquerait pourquoi on retrouve des espèces qui se développent plus ou moins bien sous les panneaux quand on passe d'un site à l'autre. La composition du milieu pré-implantation pourrait être à l'origine de la différence de variations des indices de biodiversité qu'on retrouve entre Varennes et Etang-Bertrand. Quand on construit l'arbre de classification de Jaccard des données de Varennes et d'Etang-Bertrand, on voit bien une nette différence d'espèces entre les transects des deux sites (annexe 13).

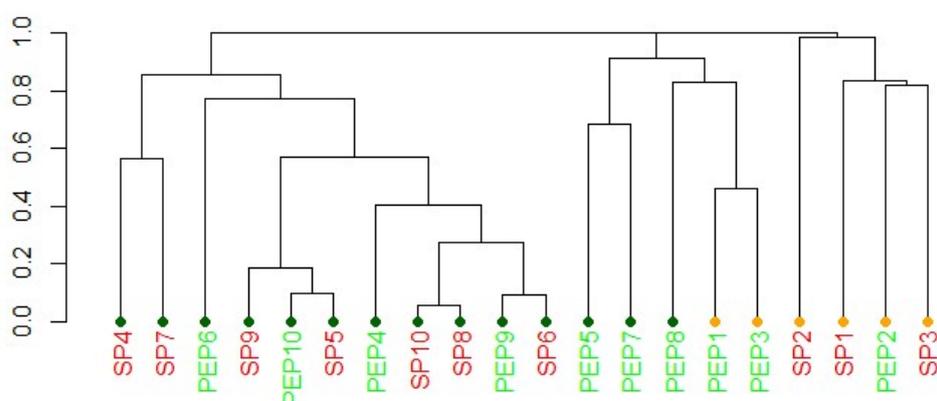


Figure 21 : Flore - Dendrogramme des similarités de Jaccard à Etang-Bertrand

Il y a globalement une différence de présence d'espèces entre les trois sites, ce qui pourrait expliquer la différence de « réaction » de la richesse spécifique entre Etang-Bertrand, St-Eloy et Varennes (Figure 22). En effet, le site d'Etang-Bertrand était composé d'une prairie, de friches, d'un petit bois et d'une zone de culture. La ZIP était donc très hétérogène et on s'attend à avoir un assez grand nombre d'espèces différentes. Inversement, Varennes était un site de monoculture, avec une forte homogénéité et peu d'espèces. À Etang-Bertrand, la richesse spécifique et l'indice de Shannon des individus diminuent entre les panneaux, et c'est l'inverse à Varennes. Autrement dit, dans ce dernier site, la présence de panneaux a été bénéfique pour l'hétérogénéité des communautés végétales. Alors qu'à Etang-Bertrand, l'installation des panneaux aurait diminué le nombre d'espèces et l'hétérogénéité de la population car le site était plus riche avant travaux. Des photographies avant

travaux sont présentées en annexe 14 pour appuyer nos propos. De plus, du *Lolium*, une graminée, a été semée à Varennes, participant à l'amélioration de la richesse spécifique globale.

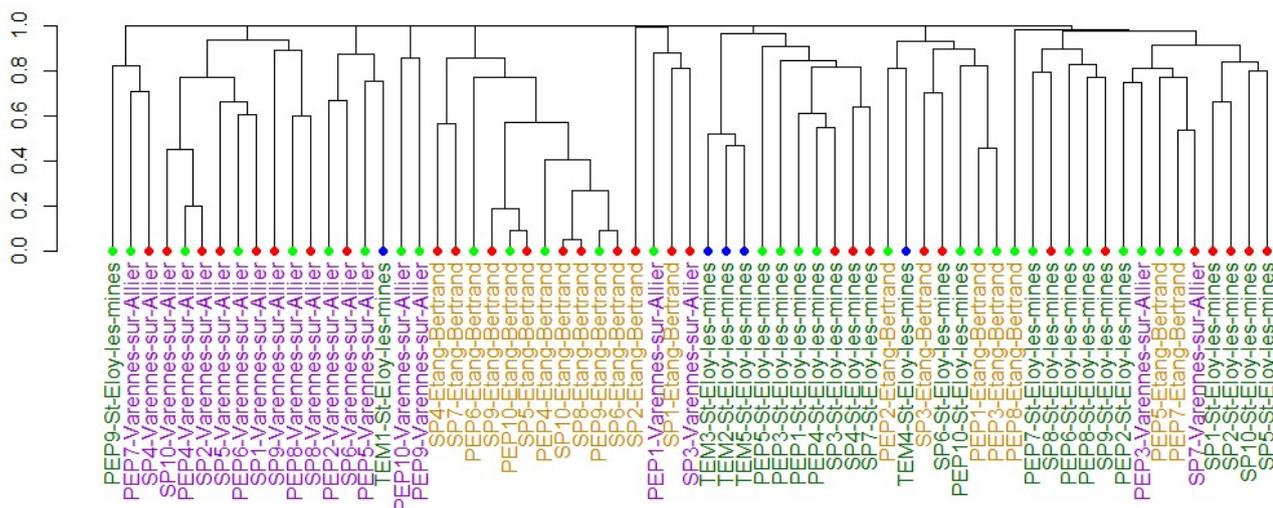


Figure 22 : Flore - Dendrogramme des similarités de Jaccard pour les trois sites en 2023

Ces résultats confirment qu'il est préférable, pour la qualité de la strate herbacée et donc du sol, d'installer des CPS sur des zones déjà anthropisées, comme les grandes cultures. Cependant, il est possible que cet effet bénéfique pour Varennes ne soit que temporaire, et que les richesses spécifiques entre-panneaux et sous-panneaux s'égalisent avec le temps, une fois la réaction de perturbation passée. Les différents indices de biodiversité semblent être de bons outils d'analyses pour caractériser l'impact des CPS sur le vivant. De plus, nous pouvons déjà affirmer que l'installation des parcs entraîne des conséquences notables sur la flore. Comme exprimé précédemment, les communautés végétales représentent la base de la chaîne alimentaire. C'est pourquoi, dans les EIE, il semble important d'accorder plus de moyens dans l'étude de ce taxon pour améliorer la reproductibilité des protocoles. Cela permettrait de réellement estimer l'impact qu'aurait les CPS sur la flore.

IV. Impacts bruts des CPS sur les arthropodes : études de trois parcs solaires

Nous allons désormais analyser les variations d'indices de biodiversité concernant les deux groupes d'insectes étudiés : les rhopalocères et les orthoptères. À l'aide de ces indices, nous chercherons à mesurer l'impact direct de la présence des panneaux sur les arthropodes. Nous nous intéresserons aussi au possible lien entre les variations de communautés végétales des parcs solaires et la composition des groupes d'insectes.

a. Mesure de l'impact des CPS sur le groupe des rhopalocères

i. *Evolution des indices de biodiversité selon la modalité et l'année*

La richesse spécifique entre les panneaux est plus faible qu'en périphérie et en zone témoin pour tous les sites (Figure 23). Par exemple, en 2022 à St-Eloy, on retrouve moins de 5 espèces en moyenne dans les transects entre les panneaux, 8 en périphérie et plus de 10 dans les parcelles en dehors du parc. Il y a donc un effet modalité très fort, confirmé par les modèles de régression (annexe 15). Pour Etang-Bertrand, cet effet modalité explique presque 82% de l'évolution de la richesse spécifique, et environ 50% à Varennes. Toutefois, les transects en périphérie d'Etang-Bertrand ne sont pas beaucoup

plus riches qu'entre les panneaux, contrairement à Varennes. Cette différence peut être liée à la présence d'habitats plus ou moins favorables autour du parc solaire. Les milieux en périphérie sont plus favorables à Etang-Bertrand qu'à Varennes (contexte agricole intensif). A St-Eloy, l'effet modalité et l'effet année sont tous les deux significatifs : la RS augmente quelles que soient les modalités. Cela peut être dû au retour des individus après la perturbation, ou à l'intégration progressive de la CPS dans le milieu. Toutefois, le nombre d'espèces diminue nettement en 2023 dans les zones témoins, ce qui peut s'expliquer par la fauche des parcelles témoins (Cf III.a). Là où la variation de RS des communautés végétales selon les modalités dépendait du site, la présence des rhopalocères est systématiquement plus faible dans les zones de panneaux, quel que soit le site.

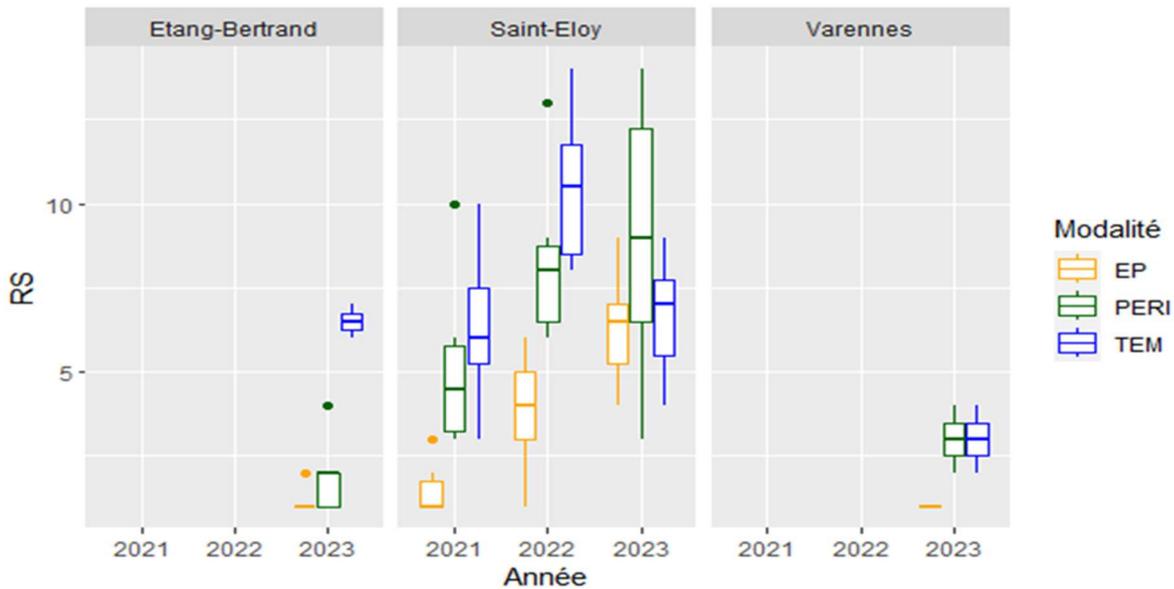


Figure 23 : Rhopalocères - Evolution de la richesse spécifique selon le site, la modalité et l'année

Nous nous attendions à voir une variation similaire entre les indices de biodiversité de la flore et ceux des rhopalocères, car ces derniers dépendent du cortège végétal pour la reproduction et l'alimentation. Cependant, il semble que la présence des panneaux a une influence négative plus forte que la variation du nombre d'espèces végétales. Ainsi, avec ces données, il n'est pas possible de trouver un véritable lien entre les papillons et la flore.

Nous pouvons donc en conclure que la présence de panneaux exerce un impact négatif sur le nombre d'espèces de rhopalocères présentes sur les sites étudiés.

À Etang-Bertrand et à Varennes, l'indice de Shannon suit les mêmes variations que la richesse spécifique (Figure 24). L'influence des panneaux se caractérise par une diminution du nombre d'espèces et de l'hétérogénéité du peuplement. Très peu d'espèces sont présentes (pas plus de 5), dont une ou deux prédominante. À St-Eloy, l'indice de Shannon évolue différemment. Les modalités PERI et TEM, très similaires, voient leur hétérogénéité augmenter très légèrement en 2022 puis « stagner » en 2023. Cette augmentation de H' est presque négligeable si on compare les résultats des régressions avec la modalité EP. En effet, on a $R^2=0,063$ pour la modalité PERI, et $R^2=0,390$ pour EP avec une pente presque deux fois plus forte, témoignant de la plus grande augmentation de H' entre les panneaux au cours du temps (annexe 15). L'écart entre ces modalités s'amenuise jusqu'à ce que toutes soient équivalentes en 2023. Les indices de Simpson et de Piélou, dont les graphiques sont présentés en fin de document, ont des évolutions similaires à l'indice de Shannon (annexe 16).

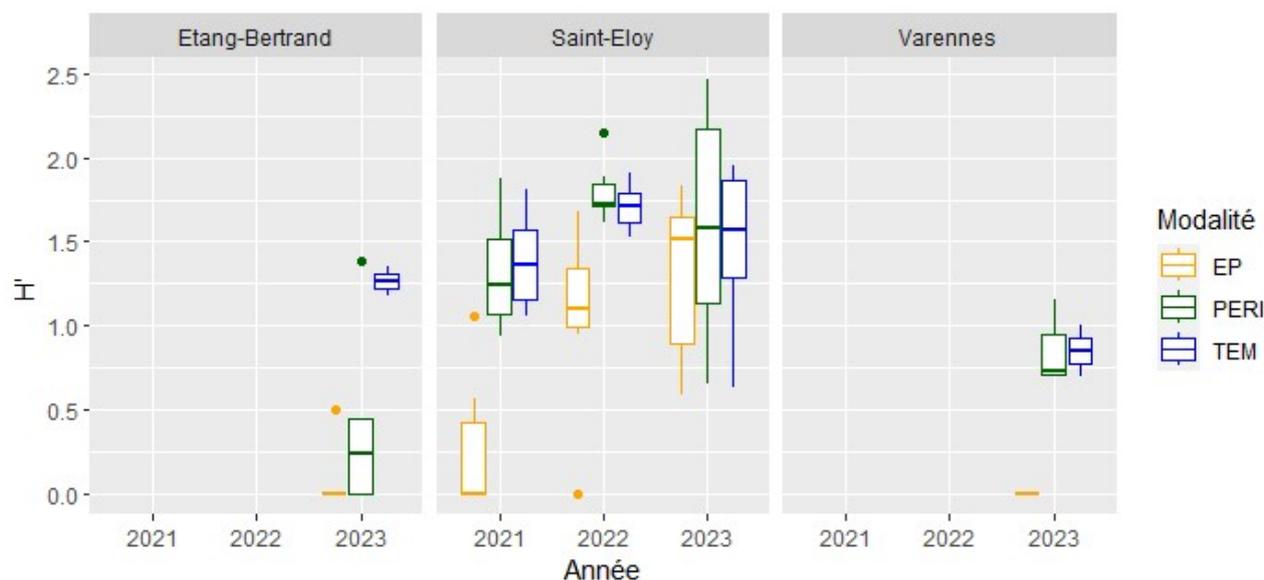


Figure 24 : Rhopalocères - Evolution de l'indice de Shannon selon le site, la modalité et l'année

Ainsi, après l'installation de la centrale à St-Eloy, le nombre d'espèces a lentement commencé à augmenter, avec une différence forte selon la modalité. Cependant, l'hétérogénéité des peuplements entre les rangées de panneaux s'est plus rapidement améliorée pour parvenir au même niveau que les zones en extérieur. Les individus non adaptés aux panneaux ont cessé de fréquenter les inter-rangées, et le nouveau peuplement s'est stabilisé avec le temps, à l'image de ce que nous avons conclu pour la flore sur ce même site.

Avec ces conclusions, on s'attend à observer des différences significatives entre les espèces présentes entre les panneaux et celles en périphérie et à l'extérieur.

ii. Analyse de la composition des populations de rhopalocères après installation

Les dendrogrammes des similarités de Jaccard de St-Eloy présentent des aspects similaires pour 2021 et 2022 avec la présence de groupes selon les différentes modalités (Figure 25). Autrement dit, ces modalités présentent des différences en termes d'espèces (composition des populations). Cela confirme une partie de nos conclusions autour des indices de biodiversité. Les peuplements de rhopalocères ont évolué différemment au cours du temps car des espèces plus ou moins adaptées ont continué de fréquenter les zones avec panneaux après la perturbation. Ces groupes ont « éclaté » en 2023, il est difficile d'interpréter ce résultat. Cela pourrait être la conséquence de plusieurs biais (météorologie, horaire, observation, hasard...), ou alors après plusieurs années, les rhopalocères seraient répartis plus équitablement au sein de la centrale. L'installation de la CPS a représenté une perturbation forte pour la biodiversité du milieu. Certaines espèces se sont rapidement accommodées à la présence de panneaux, mais avec le temps la répartition au sein de la centrale s'est équilibrée, à mesure que le parc s'intégrait dans le milieu. Au moment de la construction du parc et quelques temps après, il était impossible d'observer des éclosions et des métamorphoses à cause des travaux. Ainsi, l'augmentation du nombre d'espèces et l'homogénéisation des populations dans la centrale seraient liées à une reprise de la reproduction et de l'alimentation des rhopalocères entre les panneaux. Encore une fois, il faut prendre ces conclusions comme des hypothèses permettant de qualifier la réaction de la biodiversité après à la construction d'une centrale solaire.

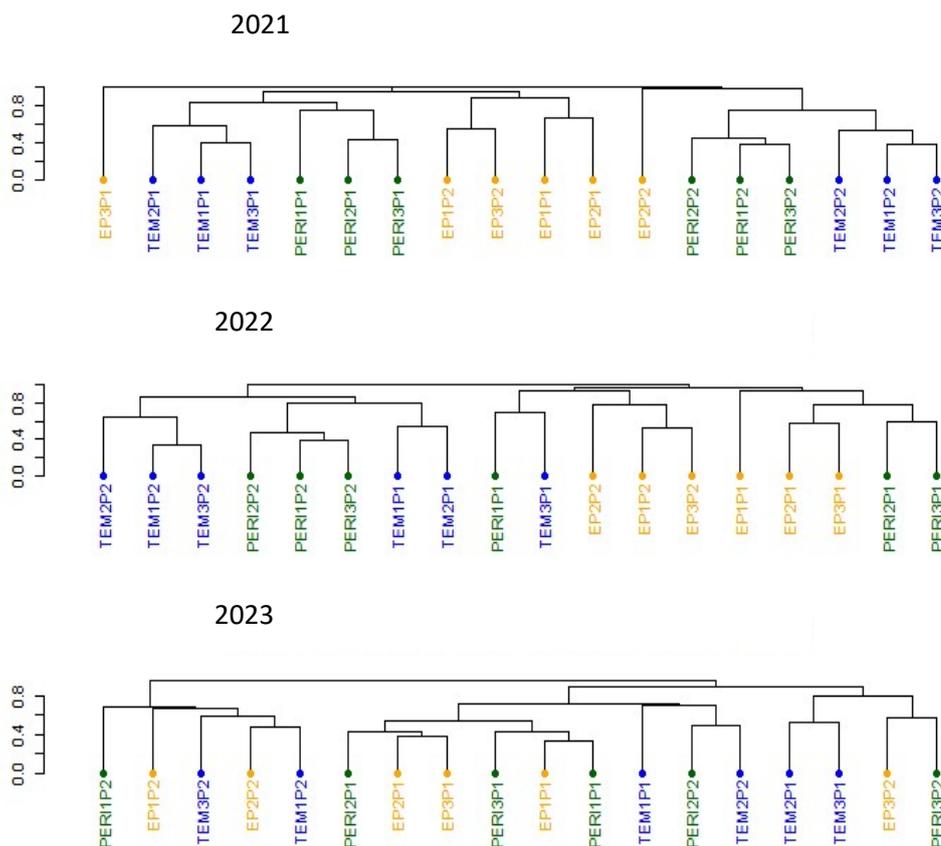


Figure 25 : Rhopalocères - Dendrogrammes des similarités de Jaccard à Saint-Eloy-les-Mines selon l'année

Finalement, on observe de nettes variations des indices de biodiversité concernant le groupe des rhopalocères, tout comme pour la flore. Cela montre bien qu'un impact significatif existe, et que l'utilisation de ces indices aide à caractériser, à quantifier, les conséquences de l'installation de CPS sur le vivant. Une nouvelle fois, nous pouvons prendre du recul sur les méthodologies employées dans les EIE pour ces taxons qui manquent de précision et de clarté.

b. Mesure de l'impact des CPS sur le groupe des orthoptères

À Etang-Bertrand et à Varennes, il n'y a pas de différence significative entre les transects en périphérie et entre panneaux (Figure 26). On note cependant une forte distinction entre ces deux sites : la richesse spécifique globale est beaucoup plus faible à Varennes (5 espèces de moins en moyenne). Cela peut s'expliquer par la pauvreté du site avant exploitation et le peu d'espèces végétales présentes. La centrale n'est pas attrayante pour des groupes plutôt sédentaires comme les orthoptères. À St-Eloy, la richesse spécifique augmente légèrement au cours du temps, et il y a un peu moins d'espèces entre les panneaux. Malgré une relation significative selon les modèles linéaires (annexe 17), les résultats sont difficilement interprétables au vu des R^2 ne dépassant pas 0,10.

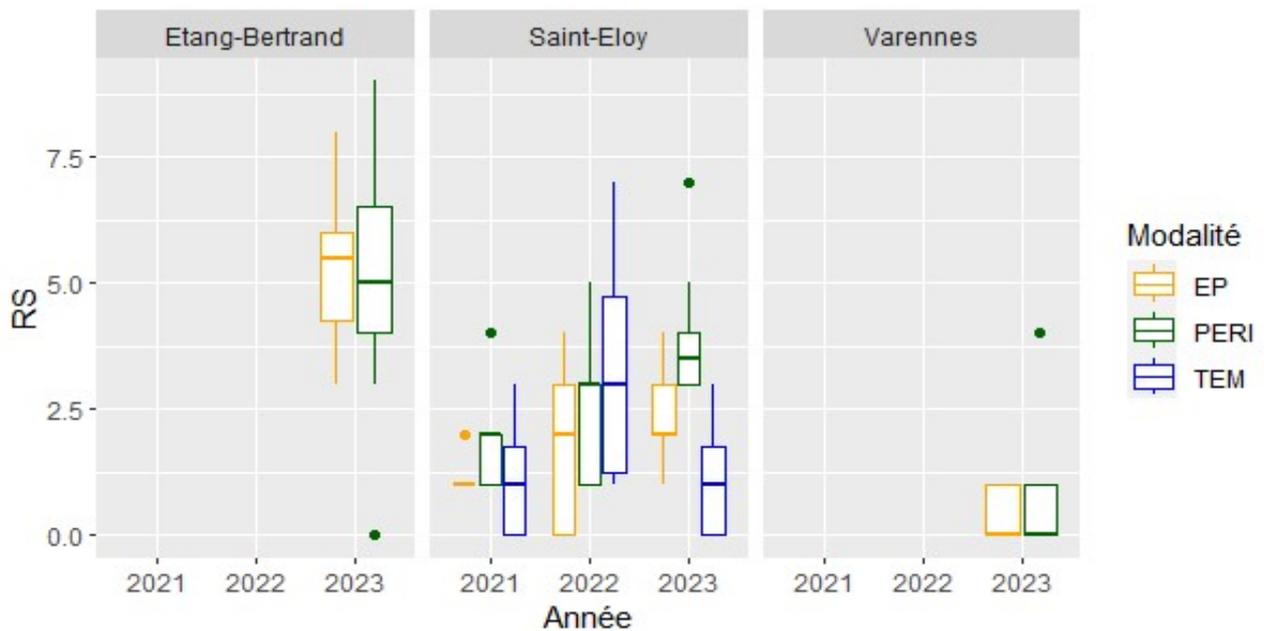


Figure 26 : Orthoptères - Evolution de la richesse spécifique selon le site, la modalité et l'année

Finalement, l'impact des CPS sur les orthoptères ne transparait pas bien avec nos analyses. Toutefois, l'évolution de la richesse spécifique de ce groupe est semblable à l'augmentation du nombre d'espèces de rhopalocères. De la même manière, les orthoptères auraient petit à petit « recolonisé le milieu ». Malheureusement, la forte présence de transects avec un seul ou pas d'individus rend ininterprétable l'évolution des autres indices de biodiversité.

Quant à la composition des populations, à St-Eloy en 2023, il y a une séparation assez franche des groupes d'espèces selon la modalité (annexe 18). Ce n'était pas le cas en 2022, alors on peut penser qu'avec le temps les espèces adaptées aux zones avec panneaux se sont préférentiellement installées entre les rangées. On arrive aux mêmes conclusions avec le dendrogramme des similarités pour le site d'Etang-Bertrand. Nous pensions observer une perte de biodiversité sous panneaux, à l'image du groupe des rhopalocères, mais ce n'est pas le cas. L'effet des centrales sur les orthoptères semble donc lié à la composition même des populations. Pour aller plus loin, il aurait été intéressant de mener d'autres expertises écologiques basées sur la dynamique et la composition des écosystèmes.

DISCUSSION

Il est important de prendre du recul sur notre travail, pour en expliquer les limites, développer les décisions prises et confronter les résultats à d'autres expérimentations. Dans un premier temps, nous allons revenir sur la problématisation et le déroulé global du sujet. Nous aborderons ensuite les différentes parties du mémoire plus en détail.

Tout au long de notre réflexion, nous avons exploré la notion de caractérisation des impacts des CPS en utilisant les données de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Nous sommes partis du principe que les méthodologies devaient être standardisées pour pouvoir réellement mesurer les conséquences sur le vivant. Pour juger de cela, nous avons utilisé les EIE, documents rédigés dans le cadre de projets d'aménagement. Cette stratégie peut être remise en question car elle restreint l'étude à ces documents, avec des grilles d'analyses centrées sur les EIE et leur comparaison. Autrement dit, les outils mobilisés ne peuvent pas être utilisés en d'autres circonstances. Toutefois, l'objectif était de tirer des conclusions sur l'état actuel de la caractérisation des impacts, pour comprendre comment mesurer et comparer ces impacts avec justesse. Pour cela, nous étions dans l'obligation d'utiliser les EIE, seuls documents systématiquement rédigés dans le cadre d'installations industrielles. À première vue, les deux parties, l'analyse des EIE et le traitement des données de terrain, peuvent sembler difficiles à relier. Mais elles sont en réalité indissociables, car elles décrivent les deux aspects de la caractérisation de l'impact environnemental : la standardisation de la méthodologie des protocoles et la quantification brute de l'incidence des CPS. De plus, l'analyse des indices de biodiversité répondait directement à une interrogation concernant le déséquilibre de la qualité des EIE selon les taxons. Cela nous a permis de prendre du recul sur la rédaction des documents. Cependant, il est difficile de critiquer ce déséquilibre des moyens fournis dans la rigueur méthodologique selon les taxons. En effet, l'objectif de l'EIE est d'identifier la présence d'espèces à enjeux, et l'avifaune et les chiroptères présentent effectivement plus d'espèces sensibles que le groupe des arthropodes. Cela fait donc apparaître une limite dans notre exploitation des EIE, car elles répondent à différentes attentes, et le temps disponible ne permet pas de caractériser parfaitement les conséquences probables des CPS sur la biodiversité. Ainsi, notre étude a permis de mettre en avant les différentes lectures possibles de la notion de caractérisation des impacts. Les résultats exposés nous ont montré que la qualité des EIE n'est pas constante, et que les incidences sur les taxons à faibles enjeux ne peuvent pas être exhaustivement étudiées. Toutefois, nos conclusions pourraient être différentes dans le cas d'autres projets d'urbanisme, car les zones d'implantation, les moyens fournis et les espèces présentes diffèreraient largement.

Nous pouvons désormais revenir sur l'utilisation des grilles d'analyse. La première, destinée à l'étude de la reproductibilité des protocoles, a été créée en 2019 à l'aide de différentes ressources bibliographiques. L'objectif était de rassembler plusieurs critères de notation provenant de plusieurs études pour former un outil le plus exhaustif possible. C'est ainsi que les grandes variables comme l'IBI ou l'indice général IndG ont été créées (ATKINSON, 2000 ; BIGARD, 2017 ; COLY, 2017). L'utilisation de ces ressources bibliographiques a été d'une importance capitale dans la formation de la première grille d'analyse. Mais le rassemblement de tant de critères de notation a aussi été une difficulté lors de la lecture des EIE. En effet, avec un grand nombre de colonnes à remplir, le temps passé par document pouvait s'étendre d'une heure à une demi-journée. De plus, l'outil en question peut laisser place à des biais d'observateur, puisque la décision de mettre 0 ; 0,5 ou 1 revient à l'examineur selon son a priori. C'est pourquoi nous nous attendions à observer un décalage entre les notes des EIE avant et après 2018. Finalement, nous avons vu que la qualité a commencé à augmenter autour de 2015, et a suivi une croissance plutôt cohérente jusqu'en 2022. Pour s'assurer qu'il n'y ait pas de biais d'observation trop élevés, nous avons récupéré trois EIE de 2010, 2013 et 2015. Les résultats obtenus par Paul BRUNOD en 2019 correspondaient à notre lecture des études de ces années pré-2015. La qualité très faible de ces EIE nous a conforté dans l'idée d'une réelle prise de conscience qu'on retrouve grâce à l'analyse statistique. Après avoir complété une partie de la première grille

d'analyse, nous nous sommes questionnés sur le fait que l'outil ne permettait pas de juger la qualité des inventaires. Jusqu'alors, nous avons seulement des données concernant la méthodologie rédactionnelle des EIE. Il a donc été décidé de former une seconde grille dans l'idée d'avoir un outil efficace et rapidement utilisable pour caractériser la qualité des prospections. Ayant déjà utilisé ce format d'analyse pour la reproductibilité des protocoles, nous étions tenus de créer un outil similaire pour faciliter la démarche et permettre une interprétation croisée des deux aspects. Par exemple, si nous avons décidé de noter l'adaptabilité des protocoles selon des résultats qualitatifs, nous n'aurions pas pu utiliser la première grille avec ces nouvelles données. L'avantage de composer avec deux approches similaires reposait donc sur la possibilité de croiser les données (avec par exemple une augmentation conjointe de IndG et Qechant). La principale limite de la deuxième grille repose dans sa simplicité avec « seulement » 19 critères. C'est pour cela que les notes prenaient des valeurs entre 0 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ou 1. De cette manière, nous avons pu apporter plus de nuances dans les résultats, à défaut d'avoir des critères de notation trop précis. L'approche quantitative (notes chiffrées) a grandement facilité la réalisation des traitements statistiques sur R Studio. La création de divers graphiques nous a semblé être la solution la plus efficace pour montrer l'évolution de la qualité des EIE et les facteurs influençant cette dernière. Les grilles ont fourni suffisamment de données pour réaliser des régressions linéaires cohérentes et pertinentes. Malgré tout, il aurait été préférable d'avoir autant de valeurs pour les deux outils, car les comparaisons entre la reproductibilité et l'adaptabilité n'ont pu être menées que sur la période 2018-2022. Quant aux résultats obtenus, nous pouvons les comparer aux analyses des ressources bibliographiques citées précédemment. Dans l'étude de BIGARD, intégrant 42 EIE du sud de la France, on observe une augmentation forte de l'IBI autour des années 2011~2012 (BIGARD, 2017). Le document conclut qu'il existe toutefois des déséquilibres au sein des EIE, on retrouve en particulier un manque de rigueur fourni pour l'étude des espèces communes. Il est très intéressant de voir que nos résultats s'accordent sur ces points. Cela montre bien que l'évolution des EIE est à observer à l'échelle nationale, car elle répond en partie à des exigences ministérielles pour la sauvegarde de la biodiversité. Une autre étude conclut que la qualité de restitutions des résultats des études d'impacts est trop faible et qu'il serait essentiel d'améliorer ce point dans une optique d'homogénéisation des méthodologies (COLY, 2017).

La deuxième partie de ce travail avait pour objectif de quantifier l'impact des CPS et de décrire les outils mis en œuvre. Nous avons choisi d'utiliser les indices de biodiversité pour mesurer les conséquences des installations. Cette méthodologie s'est avérée efficace et facilement mobilisable en prenant en compte les traitements statistiques sur R et les protocoles de prospections. Cependant, la plupart des conclusions assez poussées doivent se limiter à la formulation d'hypothèses avec cette méthode. De plus, les indices ne font pas clairement apparaître la notion d'abondance de spécimens. Mais comme ce n'est pas un critère déterminant de la qualité d'un écosystème (exemple des espèces invasives), nous avons décidé de ne pas travailler en nombre d'individus. Les oiseaux et les chauves-souris se nourrissant principalement d'insectes, étudier l'abondance des individus aurait permis d'établir la qualité de la ressource alimentaire des milieux selon les modalités. En ce qui concerne l'aspect protocole de prospection, nous avons suivi les méthodologies utilisées depuis 2019, par soucis de standardisation. De manière générale, les techniques d'inventaires étaient bien adaptées. Toutefois, l'utilisation de quadrats ou de transects apporte certaines limites. En effet, les transects ou les quadrats sont presque inutilisables dans le cas d'un milieu dégradé (comme avec les parcelles témoins de Saint-Eloy-les-Mines). De plus, les espèces en dehors des aires d'inventaires ne pouvaient pas être intégrées aux résultats, ce qui peut poser problème pour les insectes, pour lesquels on retrouve des transects vides alors que des individus pouvaient se trouver à moins d'un mètre sur le côté. La récolte d'arthropodes repose aussi sur les capacités de capture et d'identification de l'observateur. Par exemple, si des orthoptères s'échappent du filet avant identification, ils ne peuvent pas être comptés dans l'analyse. Enfin, les centrales photovoltaïques sont utilisées pour le pâturage ovin, ce qui peut induire une diminution « parasite » de la biodiversité. Ces quelques biais sont inévitables et l'intérêt de reproduire les mêmes protocoles permet justement de limiter leur importance. Le nombre de

placettes était suffisant pour avoir un aperçu cohérent des milieux prospectés. Dans ce mémoire, nous n'avons présenté que 3 sites, mais dans le cadre de la mission de stage les résultats pour 8 sites ont été analysés. Nous avons décidé de nous concentrer sur des sites dont les centrales étaient installées. Les autres parcs seront construits dans les années à venir, notre analyse servira donc à étudier l'évolution des indices de biodiversité selon le principe BAI/BACI. Sur la totalité des sites intégrés dans le programme cette année, 6 ont été prospectés par Crexeco. Les inventaires des deux autres ont été réalisés par les bureaux Geo+ Environnement et Altifaune, comme décrit en début de document. Cela illustre très bien la notion de standardisation des protocoles. Le programme PHOTODIV doit être facilement accessible avec des méthodes reproductibles par n'importe quel expert. Dans le temps, l'objectif sera d'apporter cette notion et ces protocoles à grande échelle pour avoir une approche globale de l'incidence des centrales sur la biodiversité. Le nombre de centrales présenté ici ne permet pas de tirer des conclusions exactes sur l'impact des CPS à l'échelle nationale. C'est pourquoi nos bilans se concentraient sur l'échelle du parc, l'objectif étant de prouver ou non la présence d'impacts et leur diversité. Pour comparer nos résultats aux études existantes, nous pouvons reprendre dans un premier temps les ressources mobilisées dans l'approche théorique. Pour la flore, les modifications des conditions abiotiques ont tendance à diminuer la biomasse et la composition des communautés végétales (VERVLOESEM, 2022 ; TANNER, 2021). Nos résultats n'ont pas démontré de fortes modifications de la composition des populations. Nous avons prouvé que la variation du nombre d'espèces dans la nouvelle CPS dépendait principalement des conditions du milieu avant installation. Il y a donc bien un lien avec la composition des communautés végétales avant travaux. Pour les arthropodes, une étude exprime le fait que les rhopalocères sont dépendants de la diversité des plantes (VELLOT, 2020) ce qui n'est pas apparu dans notre analyse. Selon nos conclusions, la rupture d'habitat avec la présence de panneaux représente le facteur déterminant la diminution du nombre d'espèces et de l'hétérogénéité. On retrouve cet aspect dans plusieurs sources bibliographiques, confortant nos analyses. Nos résultats quantitatifs pour les orthoptères sont peu concluants, mais représentent une base de travail solide pour évaluer l'évolution des populations dans les années futures. Cependant nous avons identifié la présence d'une pression de sélection exercée par les panneaux sur la composition des populations d'orthoptères. Une analyse qualitative plus poussée permettrait de prouver la présence de cette pression de sélection.

Pour étudier la cohérence de nos données, nous avons réalisé plusieurs tests et représentations graphiques. Par exemple, après avoir rassemblé les résultats des prospections dans les sites d'Étang-Bertrand, de Varennes et de St-Eloy, nous avons produit des graphiques de raréfactions présentés en annexe 19. Ces graphiques peuvent servir à connaître le nombre de quadrats nécessaires pour définir la richesse spécifique d'un milieu. Lorsque la courbe d'accumulation des espèces atteint une asymptote horizontale, on peut alors estimer le nombre d'espèces dans un milieu. Sur nos graphiques, on remarque qu'il n'y a pas encore de stagnation des courbes d'accumulation. Autrement dit, le nombre de transects ou de quadrats effectués dans les inventaires n'est pas suffisant pour estimer la richesse spécifique globale du milieu. Cependant, l'objectif n'est pas de définir le milieu avec exactitude, mais d'étudier son évolution. Les courbes de raréfaction rapportées en pourcentages sont assez semblables, donc les prospections sont bien comparables. En conservant ces méthodologies d'inventaires, il sera donc possible de poursuivre l'analyse de l'évolution des indices de biodiversité d'Étang-Bertrand et de Varennes dans les années à suivre. En annexe 20 figurent quelques graphiques de vérification des modèles de régression. Tout au long de ce travail, plus de 75 modèles linéaires ou généralisés ont été réalisés. Cependant, nous n'avons utilisé que les régressions qui respectaient les règles de distribution des résidus : la normalité, l'homogénéité, la moyenne nulle. Sur le diagramme quantile-quantile (QQ plot) les points doivent suivre une droite pour prouver que la distribution suit une loi normale. Sur les trois autres graphiques, les courbes en rouge doivent être le plus horizontales.

Certains modèles étaient difficilement interprétables à cause d'un faible nombre d'individus, ou d'un trop grand nombre de variables. C'est pourquoi la plupart des régressions exposées dans cette étude illustrent des relations peu complexes de la forme « $y = a \cdot x + b$ » avec a le coefficient directeur et b l'ordonnée à l'origine. Nous devons aborder un dernier point autour des modèles de régression : le principe de « fausse découverte ». Pour marquer la significativité d'une relation, nous avons utilisé la p-value. Si cette valeur était inférieure à 5%, alors nous en avons conclu qu'une variable avait bien un effet sur l'autre. Cependant, le traitement de la p-value est bien plus complexe et le seuil de 0,05, fréquemment utilisé dans le monde de la recherche, reste arbitraire. L'étude de David Colquhoun sur le sujet met en avant cette problématique (COLQUHOUN, 2014). En réalisant un grand nombre de tests statistiques, nous augmentons la probabilité de trouver une p-value inférieure à 5%, ce qui se traduit par la présence de fausses découvertes. Il aurait été préférable de se référer à un seuil bien plus bas au vu du nombre de modèles réalisés. Toutefois, la grande majorité des régressions présentées dans ce devoir propose une p-value largement inférieure à 0,05 (dans l'ordre de $1e-10$). C'est pourquoi nos conclusions générales restent inchangées.

CONCLUSION

Dans un premier temps, nous avons abordé le sujet de l'impact environnemental avec une approche théorique. Après avoir exposé le contexte global dans lequel la mission de stage s'illustre, nous avons fait la synthèse des connaissances des impacts des CPS sur les conditions abiotiques. Comme l'entièreté de notre travail portait sur le monde du vivant, il semblait pertinent d'aborder les modifications physico-chimiques, intimement liées aux facteurs biotiques.

Nous avons utilisé deux outils d'analyse pour noter la qualité des EIE de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Ces grilles nous ont permis d'étudier deux aspects méthodologiques, la reproductibilité et l'adaptabilité, essentiels à la caractérisation d'un impact. La qualité rédactionnelle des EIE a connu une augmentation forte depuis les années 2015 ~ 2016, ce qui témoigne d'une forme de prise de conscience de l'importance de ces études pré-installations. On note toutefois des déséquilibres de traitements de certains taxons dans les études. Certains groupes, à faible enjeu, ne bénéficient pas de la même rigueur d'étude que l'on retrouve avec les chiroptères ou l'avifaune. Dans ce cas, la reproductibilité de la méthodologie concernant les groupes des arthropodes et de la flore, n'est pas assurée puisqu'il manque beaucoup d'informations dans l'EIE. Ainsi, l'impact environnemental n'est pas caractérisé avec justesse. C'est pourquoi, nous avons ensuite mesuré par nos propres moyens les conséquences des projets de CPS sur ces taxons. Pour cela, nous avons utilisé de nouveaux outils, les indices de biodiversité, qui nous ont permis de tirer diverses conclusions. L'installation des panneaux solaires a un impact négatif sur les rhopalocères avec moins d'espèces entre les rangées de panneaux. Pour les orthoptères, il semble que le parc exerce une influence sur la composition des populations, mais pas sur les indices de biodiversité. Selon les sites, le nombre d'espèces végétales peut augmenter avec l'installation d'une CPS, notamment si l'occupation du sol pré-travaux était monospécifique (grande culture). Qu'il soit positif ou négatif, il existe bien un impact significatif des CPS sur ces taxons. Ce retour questionne donc le manque de rigueur fourni pour ces taxons dans les EIE. Cependant, comme exprimé précédemment, la rédaction des études d'impacts est soumise à plusieurs facteurs limitant la réalisation des inventaires dans le temps. La qualité de ces études est donc forcément impactée par ces restrictions et les espèces aux enjeux les plus forts deviennent la priorité de l'étude, au risque de paraître moins rigoureuse pour certaines espèces plus communes.

Ainsi, grâce à la lecture des EIE, nous avons répondu à une partie de notre interrogation principale, concernant l'état global de la caractérisation des impacts des CPS en Auvergne-Rhône-Alpes. Et avec l'étude de l'évolution des indices de biodiversités, nous avons répondu à la deuxième partie de notre grande question en montrant que les CPS ont des effets sur la biodiversité. Ces deux aspects complémentaires nous ont permis d'explorer avec détail la notion de caractérisation des impacts et son traitement en Auvergne-Rhône-Alpes. Nous en avons tiré différentes conclusions, différents points forts et pistes d'amélioration, ainsi que des outils et approches mobilisables pour mesurer les incidences des CPS sur la biodiversité.

Enfin, le travail fourni mériterait d'être étendu à la France entière, car la standardisation des protocoles ne doit pas se limiter à une région si nous voulons correctement estimer les impacts environnementaux des CPS. Cependant, cela apporterait d'autres questionnements, puisque les milieux et les enjeux seraient très différents suivant la position géographique. Pour finir, toutes ces conclusions et analyses devraient être répétées pour d'autres aménagements qui participent à la transition énergétique, comme la filière éolienne qui soulève encore d'autres problématiques. Enfin, il aurait été intéressant d'intégrer les volets sociaux, territoriaux, paysagers et géologiques de l'étude d'impact pour avoir un aperçu global de la caractérisation des impacts.

BIBLIOGRAPHIE :

Agence de la transition écologique. « Le solaire photovoltaïque – Ademe ». Consulté le 4 août 2023. <https://expertises.ademe.fr/energies/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-lelectricite/solaire-photovoltaïque>.

Armstrong, Alona, Nicholas J Ostle, et Jeanette Whitaker. « Solar Park Microclimate and Vegetation Management Effects on Grassland Carbon Cycling ». *Environmental Research Letters* 11, n° 7 (1 juillet 2016): 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>.

Atkinson, Samuel, Sarika Bhatia, F. Schoolmaster, et William Waller. « Treatment of biodiversity impacts in a sample of US environmental impact statements ». *Impact Assessment and Project Appraisal - Impact Assess Proj Apprais* 18 (1 décembre 2000): 271-82. <https://doi.org/10.3152/147154600781767349>.

Azzedine, NAHOUI, HADDAD Zakaria, TAHROUR Farouk, Université de M'sila, Université de M'sila, et Université de M'sila. « Etude expérimentale de l'effet de la poussière et de fientes des oiseaux sur le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques pour le site de M'sila », s. d.

Barron-Gafford, Greg A., Rebecca L. Minor, Nathan A. Allen, Alex D. Cronin, Adria E. Brooks, et Mitchell A. Pavao-Zuckerman. « The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger Solar Power Plants Increase Local Temperatures ». *Scientific Reports* 6, n° 1 (13 octobre 2016): 35070. <https://doi.org/10.1038/srep35070>.

Bossali, Firmin, Gilbert Ndziessi, Noël Paraiso Moussilao, Edgard Marius Ouendo, François Napo Koura, Dismand Houinato, Justine Kapo-Chichi, et al. « Le protocole de recherche : étape indispensable du processus de recherche garantissant la validité des résultats ». *Hegel* 1, n° 1 (2015): 23-28. <https://doi.org/10.3917/heg.051.0023>.

Beraldi, Maria. « Note sur l'analyse du cycle de vie et les énergies renouvelables ». lab recherche environnement, 19 juillet 2021. <https://www.lab-recherche-environnement.org/fr/article/note-sur-lanalyse-du-cycle-de-vie-et-les-energies-renouvelables/>.

Charlotte, Bigard, Sylvain Pioch, et John Thompson. « The inclusion of biodiversity in environmental impact assessment: Policy-related progress limited by gaps and semantic confusion ». *Journal of Environmental Management* 200 (1 septembre 2017): 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.057>.

CNRS Le journal. « Comprendre les îlots de chaleur urbains ». Consulté le 22 mai 2023. <https://lejournel.cnr.fr/articles/comprendre-les-ilots-de-chaleur-urbains>.

Colquhoun, David. « An investigation of the false discovery rate and the misinterpretation of p-values ». *Royal Society Open Science* 1, n° 3 (novembre 2014): 140216. <https://doi.org/10.1098/rsos.140216>.

- Coly, Roger, Kévin Barré, Philippe Gourdain, Christian Kerbirou, Julie Marmet, et Julien Touroult. « Études chiroptérologiques dans les dossiers réglementaires éoliens : disponibilité de l'information et conformité avec les recommandations nationales et européennes. » *Naturae* 3 (15 février 2017): 1-10.
- Costa, Cecília Ribeiro Tourino, Marcela Laert Moreira, et Aloysio Portugal Maia Saliba. « Soil Stabilization with Lime for Erosion Control in Solar Plants ». *REM - International Engineering Journal* 74, n° 3 (septembre 2021): 329-35. <https://doi.org/10.1590/0370-44672020740127>.
- Guaita-Pradas, Inmaculada, Inmaculada Marques-Perez, Aurea Gallego, et Baldomero Segura. « Analyzing Territory for the Sustainable Development of Solar Photovoltaic Power Using GIS Databases ». *Environmental Monitoring and Assessment* 191, n° 12 (décembre 2019): 764. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7871-8>.
- Hassanpour Adeh, Elnaz, John S. Selker, et Chad W. Higgins. « Remarkable Agrivoltaic Influence on Soil Moisture, Micrometeorology and Water-Use Efficiency ». Édité par Mauro Villarini. *PLOS ONE* 13, n° 11 (1 novembre 2018): e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>.
- Ichter, Poncet, et Touroult « Catalogues des méthodes et des protocoles - Phase 1 : Etude de définition et proposition d'une démarche » *Muséum national d'Histoire naturelle, Inventaire National du Patrimoine Naturel* (décembre 2014).
- KAMELIA H. « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative » Thèse (soutenue le 25/06/2012).
- Lambert, Quentin, Armin Bischoff, Sixtine Cueff, Alexandre Cluchier, et Raphael Gros. « Effects of Solar Park Construction and Solar Panels on Soil Quality, Microclimate, CO₂ Effluxes, and Vegetation under a Mediterranean Climate ». *Land Degradation & Development* 32, n° 18 (décembre 2021): 5190-5202. <https://doi.org/10.1002/ldr.4101>.
- Marx G. « Centrales photovoltaïques et biodiversité : synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer » LPO – BirdLife France (octobre 2022).
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. « Installations photovoltaïques au sol : Guide de l'étude d'impact » (avril 2011).
- Ministères Écologie Énergie Territoires. « Publication du 6e rapport de synthèse du GIEC ». Consulté le 18 mai 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec>.
- Ministères Écologie Énergie Territoires. « L'évaluation environnementale ». Consulté le 4 août 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/evaluation-environnementale>.
- Oksanen J, Simpson G, Blanchet F, Kindt R, Legendre P, Minchin P, O'Hara R, Solymos P, Stevens M, Szoecs E, Wagner H, Barbour M, Bedward M, Bolker B, Borcard, D, Carvalho G, Chirico M, De Caceres M, Durand S, Evangelista H, FitzJohn R, Friendly M, Furneaux B, Hannigan G, Hill M, Lahti L, McGlenn D, Ouellette M, Ribeiro Cunha E, Smith T, Stier A, Ter Braak C, Weedon J. *_vegan: Community Ecology Package_*. R package version 2.6-4, (2022) <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (2022) <https://www.R-project.org/>.

Tanner, Karen E., Kara A. Moore-O’Leary, Ingrid M. Parker, Bruce M. Pavlik, Sophia Haji, et Rebecca R. Hernandez. « Microhabitats Associated with Solar Energy Development Alter Demography of Two Desert Annuals ». *Ecological Applications* 31, n° 6 (septembre 2021).
<https://doi.org/10.1002/eap.2349>.

Uldrijan, Dan, Martin Černý, et Jan Winkler. « Solar Park – Opportunity or Threat for Vegetation and Ecosystem ». *Journal of Ecological Engineering* 23, n° 11 (1 novembre 2022): 1-10.
<https://doi.org/10.12911/22998993/153456>.

Vellot, Cluchier et Illac. « Guide PIESO – Guide technique d’éco-conception des centrales photovoltaïques – un outil d’aide à l’intégration écologique ». *Processus d’Intégration Ecologique de l’Energie Solaire* (septembre 2020).
https://ecomед.fr/wp-content/uploads/2020/11/pieso_guidetechnique.pdf

Vervloesem, Jeffrey, Ernesto Marcheggiani, Md Abdul Mueed Choudhury, et Bart Muys. « Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity ». *Sustainability* 14, n° 12 (20 juin 2022): 7493. <https://doi.org/10.3390/su14127493>.

Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016.

ANNEXES :

Annexe 1 : Mise en forme d'une fiche de saisie PHOTODIV

Annexe 2 : Présentations et formules de calculs des indices de biodiversité

Annexe 3 : Représentations graphiques des modèles linéaires des indices de qualité méthodologique au cours du temps

Annexe 4 : Représentation graphique des corrélations entre variables (31 EIE)

Annexe 5 : Représentation graphique des modèles linéaires des critères de qualité selon l'indice général

Annexe 6 : Indices de qualité des EIE selon les organismes responsables

Annexe 7 : Modèles linéaires et graphique des indices de qualité méthodologique selon l'ancienne occupation du sol

Annexe 8 : Représentations graphiques de l'indice général par taxon

Annexe 9 : Modèle linéaire de l'indice général en fonction des différents taxons

Annexe 10 : Flore - Différents modèles linéaires montrant l'effet de la modalité et de l'année sur les indices de biodiversité

Annexe 11 : Flore - Evolution de l'indice de Simpson selon la modalité et l'année pour chaque site étudié

Annexe 12 : Flore – Dendrogramme des similarités de Jaccard pour Varennes-sur-Allier

Annexe 13 : Flore – Dendrogramme des similarités de Jaccard pour Varennes-sur-Allier et Etang-Bertrand

Annexe 14 : Photographies des zones d'implantations de Varennes-sur-Allier et Etang-Bertrand avant travaux

Annexe 15 : Rhopalocères - Différents modèles linéaires montrant l'effet de la modalité et de l'année sur les indices de biodiversité

Annexe 16 : Rhopalocères - Evolution de l'indice de Simpson et de Pielou selon la modalité et l'année pour chaque site étudié

Annexe 17 : Orthoptères -Modèles linéaires de l'effet de la modalité et de l'année sur les indices de biodiversité à Saint-Eloy-les-Mines

Annexe 18 : Classification des transects d'inventaires orthoptères selon les espèces contactés

Annexe 19 : Graphiques de raréfaction

Annexes 20 : Quelques graphiques de vérification des modèles de régressions

Annexe 1 : Mise en forme d'une fiche de saisie PHOTODIV

Species	Strate	Abondance	Sample	Site	Year	Modal
Espece1	h	i	EP1	St-Eloy-les-mines	2023	EP
Espece2	h		1 EP1	St-Eloy-les-mines	2023	EP
Espece3	h		3 EP1	St-Eloy-les-mines	2023	EP
Espece4	h	r	SP1	St-Eloy-les-mines	2023	SP
Espece5	h	+	SP1	St-Eloy-les-mines	2023	SP
...
<i>Sample = numéro du transect</i>						
<i>Modal = type de transect (EP Entre Panneaux ; SP Sous Panneaux ; TEM zone Témoin)</i>						
<i>Strate si renseignée (pas indispensable)</i>						

Annexe 2 : Présentations et formules de calculs des indices de biodiversité :

Avec :

$$P_i = n_i/N$$

n_i = nombre d'individus

N = nombre total d'individus

S = richesse spécifique

Indice de Shannon : $H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2(p_i)$

Peuplement homogène pour $H'=0$; peuplement parfaitement hétérogène pour $H'=H_{max}=\log_2(S)$

Indice de Simpson :

$$1 - D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^S n_i \cdot (n_i - 1)}{N \cdot (N - 1)}$$

Une seule espèce présente pour $1-D=0$; nombre d'espèces quasi infini quand $1-D$ tend vers 1

Indice de Pielou :

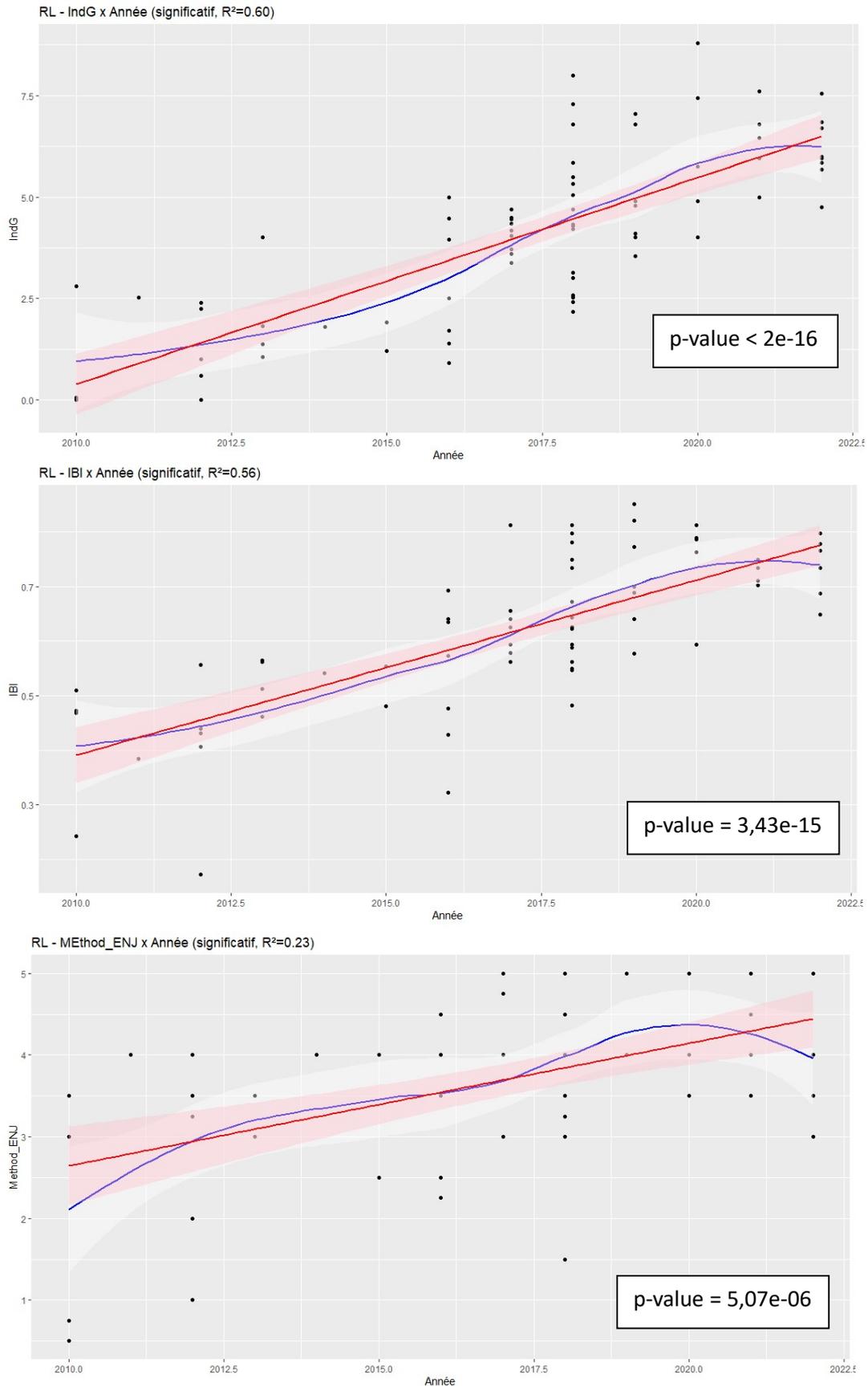
$$J = H'/H_{max}$$

Une seule espèce présente pour $J=0$; Abondances identiques entre les espèces quand J tend vers 1

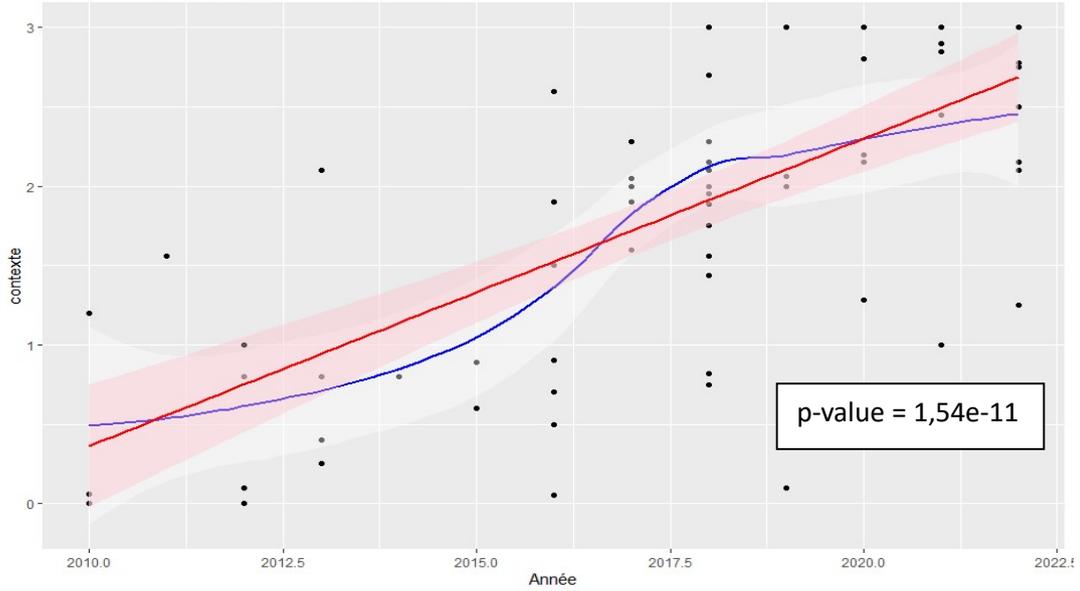
Annexe 3 : Représentations graphiques des modèles linéaires des indices de qualité méthodologique au cours du temps

En rouge : régression linéaire

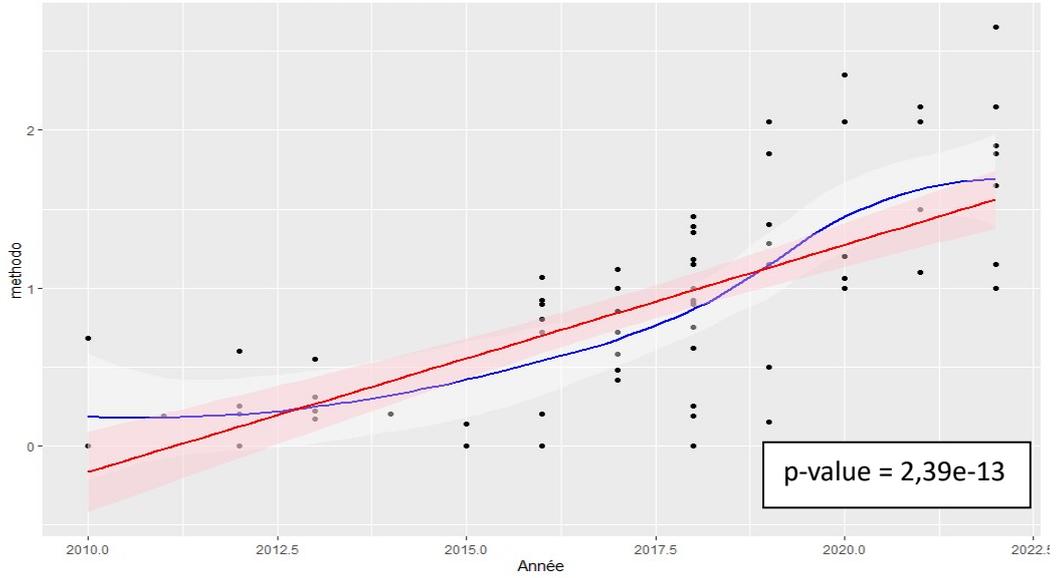
En bleu : la régression locale (LOESS) correspond à une succession de régressions du second degré à chaque point en considérant les points proches. Plus la courbe bleue se rapproche de la courbe rouge, plus le modèle est adapté à une régression linéaire.



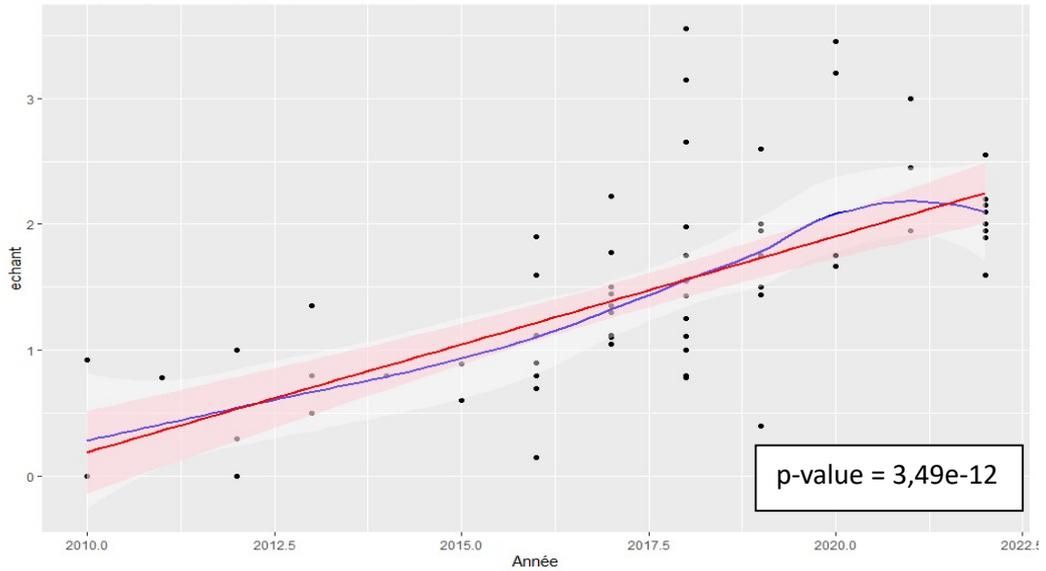
RL - contexte x Année (significatif, $R^2=0.45$)



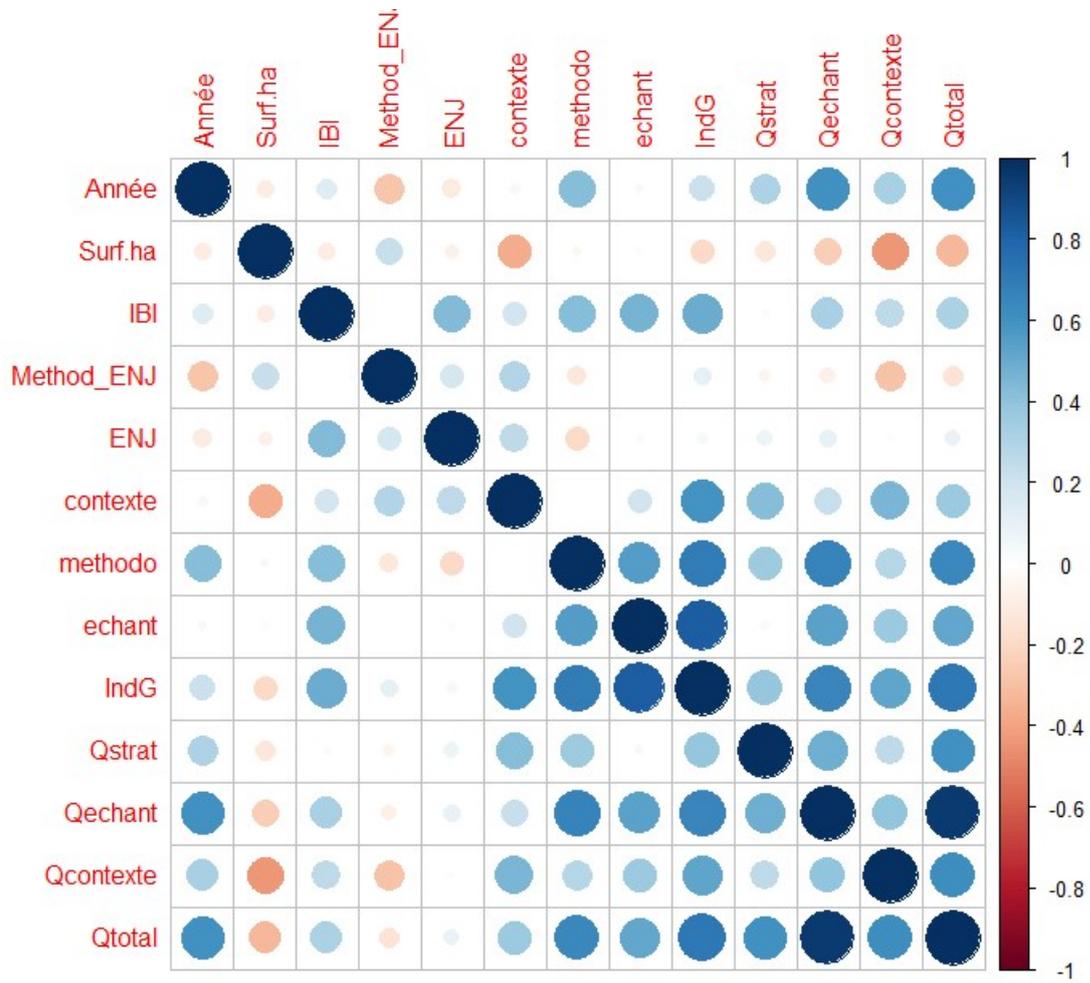
RL - methodo x Année (significatif, $R^2=0.507$)



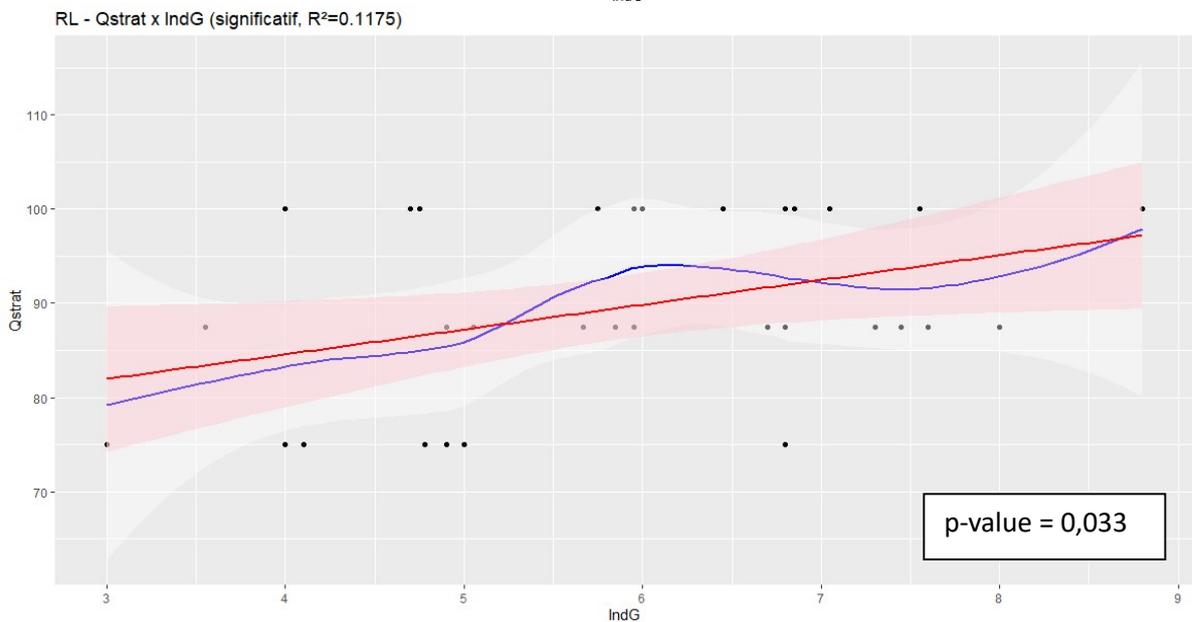
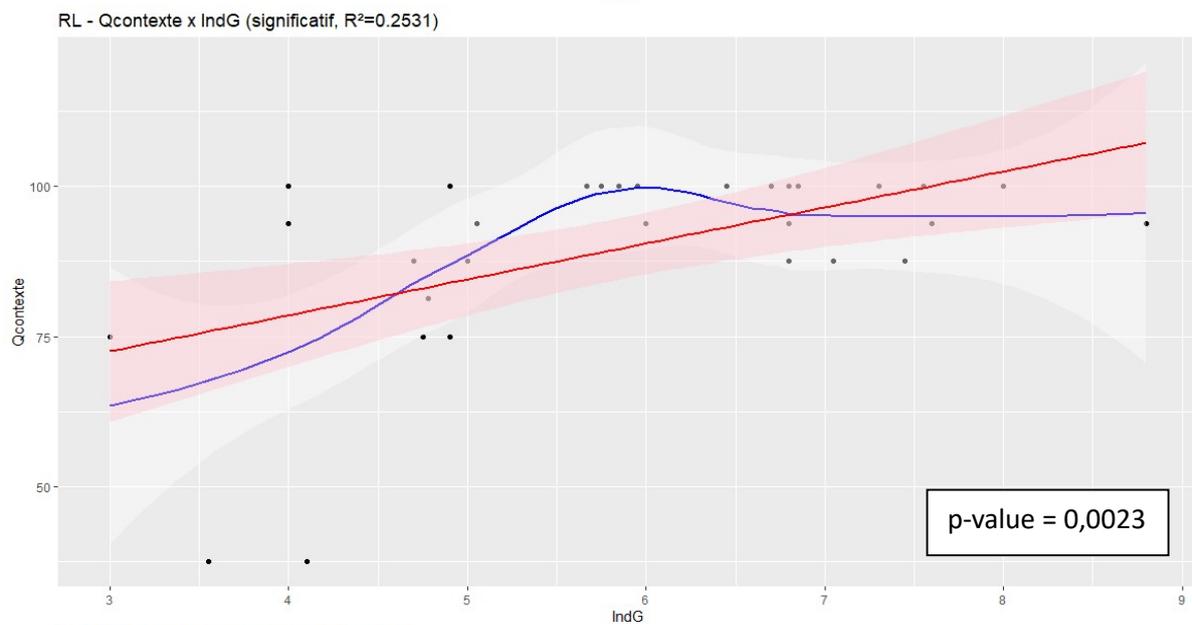
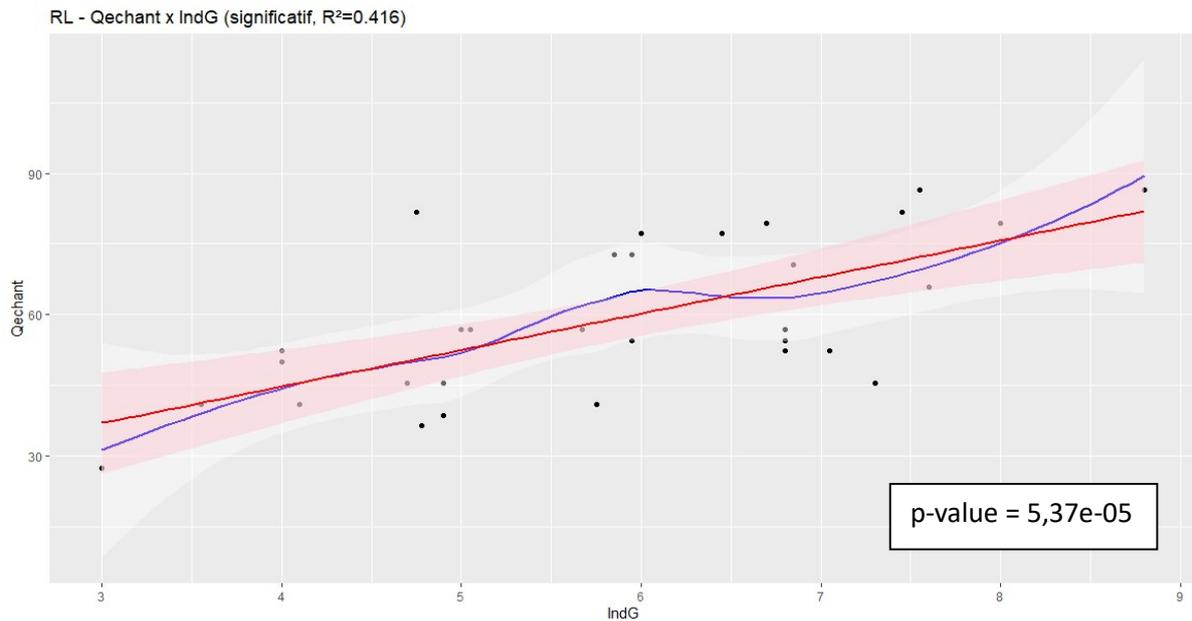
RL - echant x Année (significatif, $R^2=0.47$)



Annexe 4 : Représentation graphique des corrélations entre variables (31 EIE)

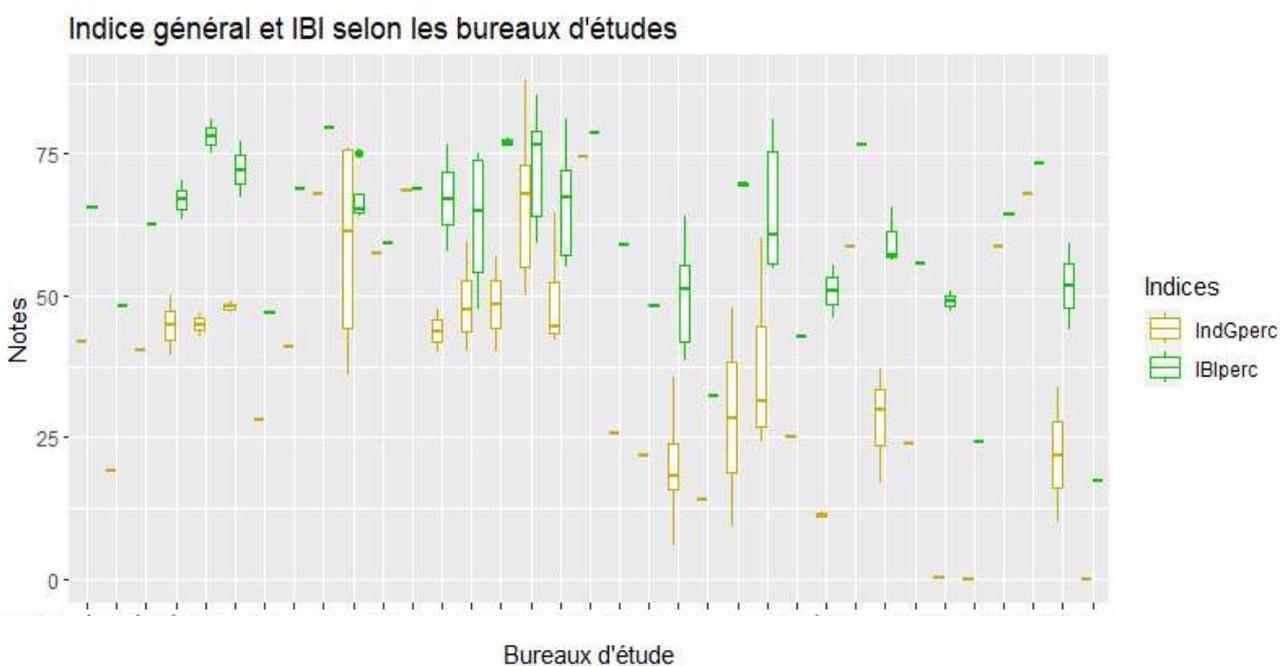
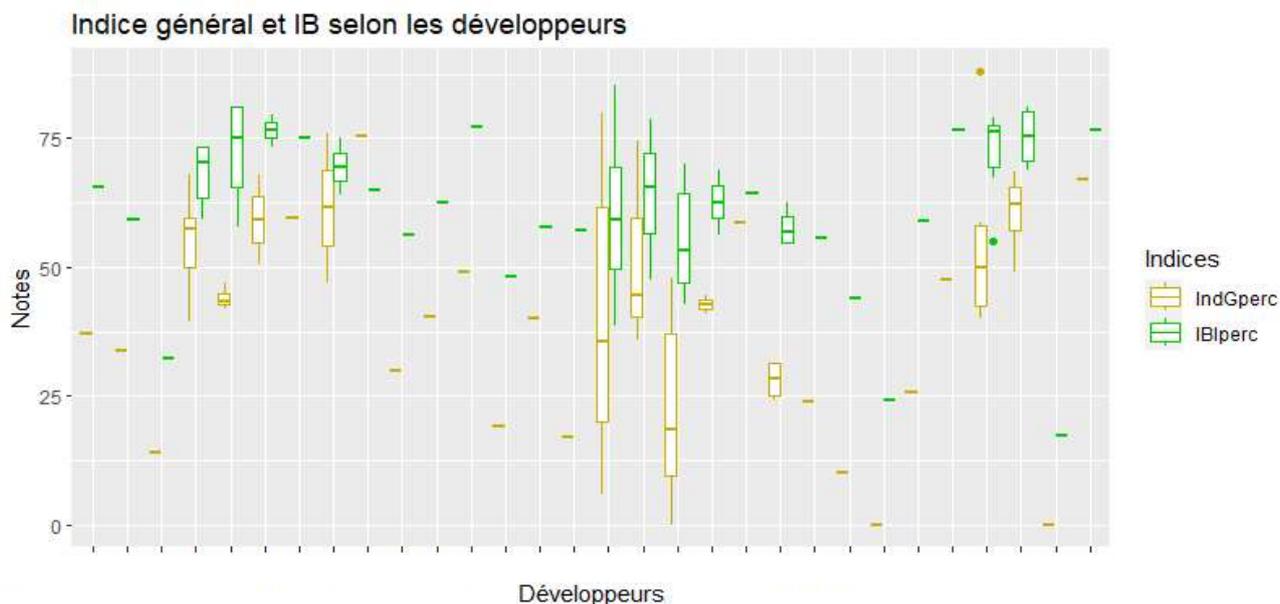


Annexe 5 : Représentation graphique des modèles linéaires des critères de qualité selon l'indice général

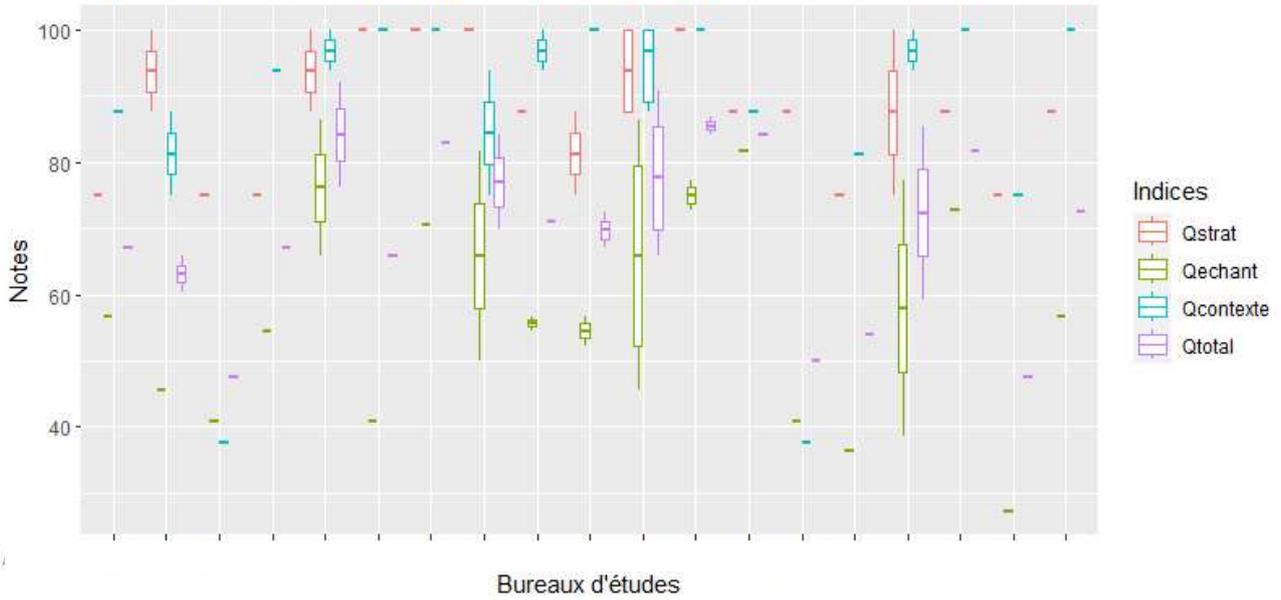


Annexe 6 : Indices de qualité des EIE selon les organismes responsables

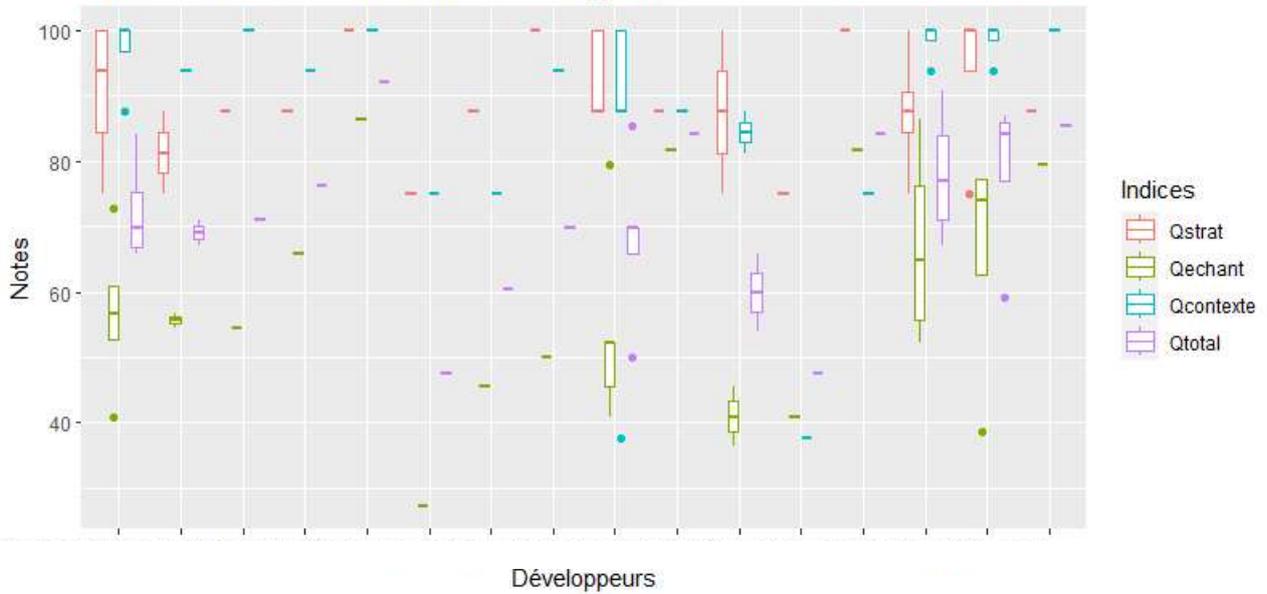
Sur ces graphiques, les deux indices ont été rapporté sur 100 pour permettre de suivre leur évolution conjointement



Qualité des inventaires selon les bureaux d'études



Qualité des inventaires selon les développeurs

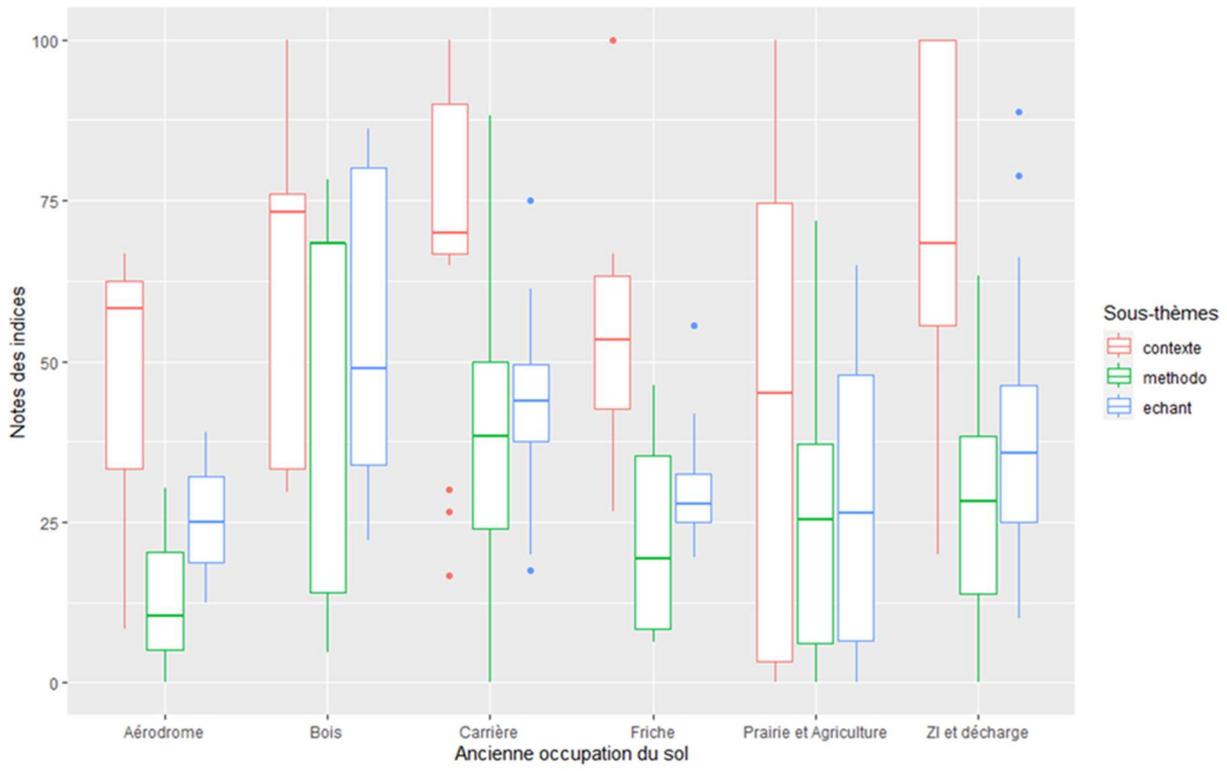


Annexe 7 : Modèles linéaires et graphique des indices de qualité méthodologique selon l'ancienne occupation du sol

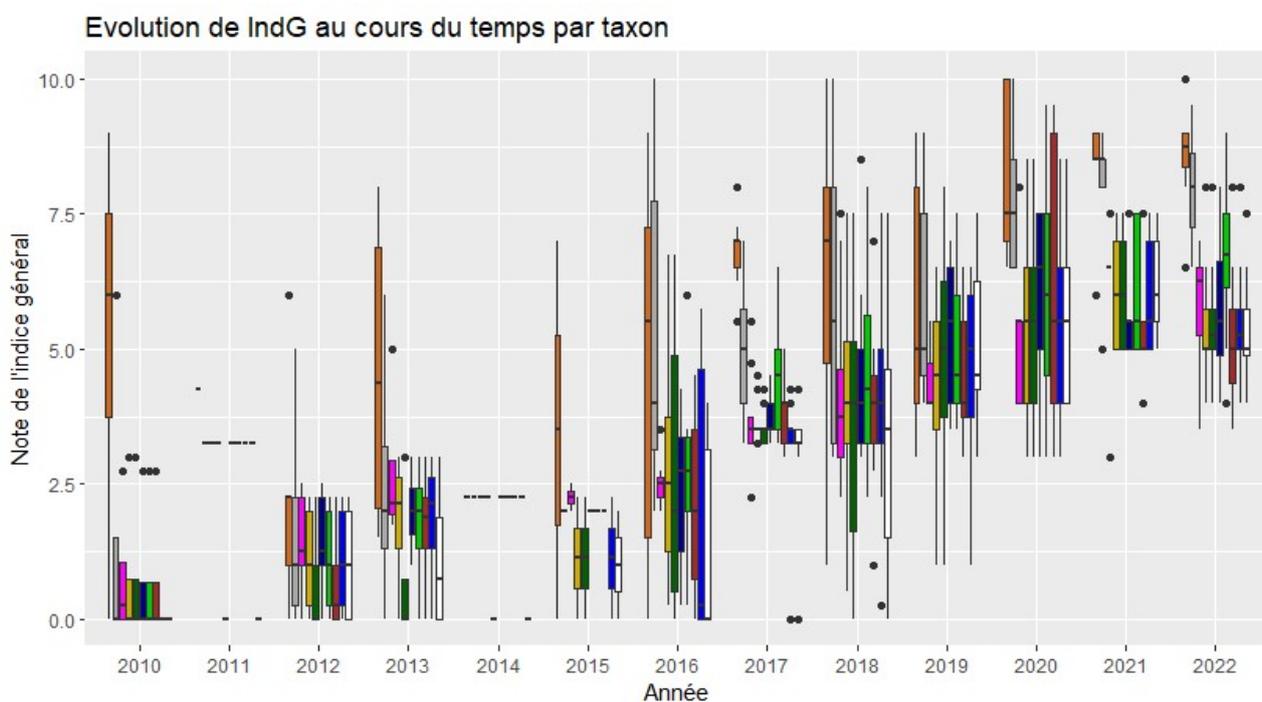
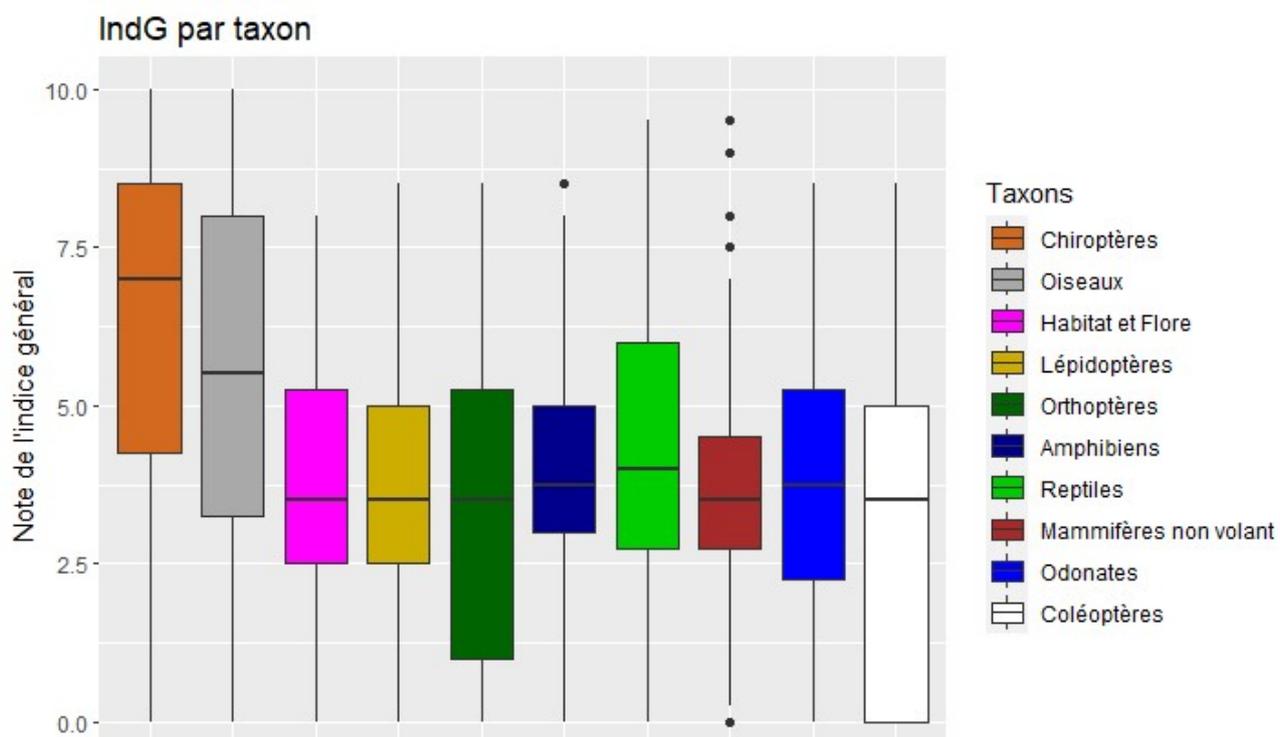
	<i>Dependent variable:</i>		
	IndG (1)	IBI (2)	Method_ENJ (3)
Anc_occupation_ResumBois	2.684* (1.499)	0.152 (0.098)	0.300 (0.731)
Anc_occupation_ResumCarrière	2.131 (1.285)	0.154* (0.084)	0.485 (0.627)
Anc_occupation_ResumFriche	0.791 (1.368)	0.072 (0.089)	0.389 (0.668)
Anc_occupation_ResumPrairie et Agriculture	0.513 (1.257)	0.043 (0.082)	-0.052 (0.613)
Anc_occupation_ResumZI et décharge	1.701 (1.275)	0.135 (0.083)	0.303 (0.622)
Constant	2.760** (1.185)	0.524*** (0.077)	3.500*** (0.578)
Observations	77	77	77
R ²	0.135	0.137	0.047
Adjusted R ²	0.074	0.076	-0.020
Residual Std. Error (df = 71)	2.052	0.134	1.001
F Statistic (df = 5; 71)	2.215*	2.255*	0.704
<i>Note:</i>	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01		

	<i>Dependent variable:</i>		
	contexte (1)	methodo (2)	echant (3)
Anc_occupation_ResumBois	0.541 (0.663)	0.995** (0.466)	1.148** (0.566)
Anc_occupation_ResumCarrière	0.730 (0.568)	0.712* (0.400)	0.689 (0.485)
Anc_occupation_ResumFriche	0.338 (0.605)	0.246 (0.426)	0.208 (0.517)
Anc_occupation_ResumPrairie et Agriculture	0.028 (0.556)	0.376 (0.391)	0.107 (0.475)
Anc_occupation_ResumZI et décharge	0.765 (0.564)	0.418 (0.397)	0.519 (0.482)
Constant	1.333** (0.524)	0.407 (0.369)	1.020** (0.448)
Observations	77	77	77
R ²	0.123	0.115	0.147
Adjusted R ²	0.062	0.052	0.087
Residual Std. Error (df = 71)	0.908	0.639	0.775
F Statistic (df = 5; 71)	1.997*	1.842	2.443**
<i>Note:</i>	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01		

Graphique des notes des sous-thèmes CME selon l'ancienne occupation du sol :



Annexe 8 : Représentations graphiques de l'indice général par taxon



Annexe 9 : Modèle linéaire de l'indice général en fonction des différents taxes

	<i>Dependent variable:</i>
	value
variableOInd_Gen	-0.776* (0.397)
variableHFInd_Gen	-2.312*** (0.397)
variableLInd_Gen	-2.318*** (0.397)
variableORInd_Gen	-2.604*** (0.397)
Constant	6.110*** (0.281)
Observations	385
R ²	0.150
Adjusted R ²	0.141
Residual Std. Error	2.462 (df = 380)
F Statistic	16.737*** (df = 4; 380)
<i>Note:</i>	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01

Annexe 10 : Flore - Différents modèles linéaires montrant l'effet de la modalité et de l'année sur les indices de biodiversité

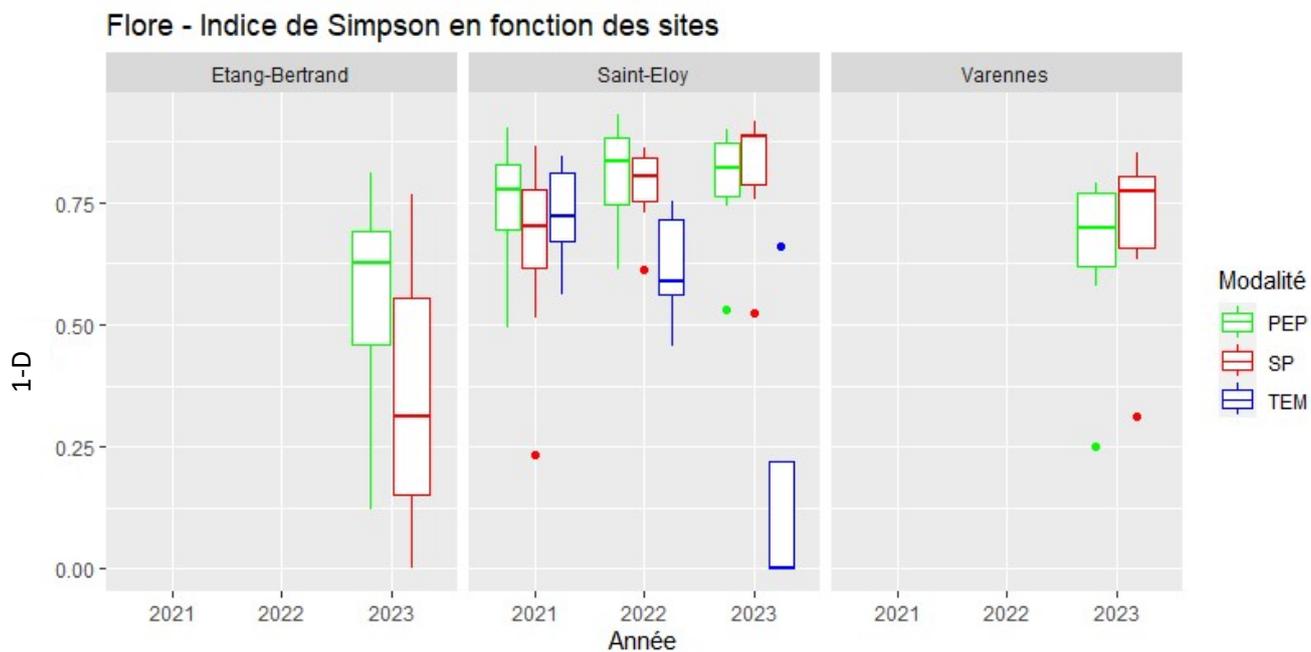
	<i>Dependent variable:</i>			
	RS		RS	RS
	St Eloy (1)	St Eloy (2)	Varennes (3)	Etang-Bertrand (4)
ModalitéSP	0.533 (1.582)			
ModalitéTEM	-6.333*** (1.938)			
Année2022		-4.680*** (1.674)		
Année2023		-7.440*** (1.674)		
ModalitéSP			2.200* (1.154)	
ModalitéSP				-6.400** (2.952)
Constant	20.733*** (1.119)	23.720*** (1.184)	7.900*** (0.816)	15.700*** (2.087)
Observations	75	75	20	20
R ²	0.163	0.219	0.168	0.207
Adjusted R ²	0.140	0.197	0.122	0.163
Residual Std. Error	6.128 (df = 72)	5.920 (df = 72)	2.580 (df = 18)	6.601 (df = 18)
F Statistic	7.018*** (df = 2; 72)	10.092*** (df = 2; 72)	3.636* (df = 1; 18)	4.701** (df = 1; 18)
Note:	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01			

	<i>Dependent variable:</i>			
	H	H	H	H
	St Eloy SP (1)	St Eloy PEP (2)	Varennes (3)	Etang-Bertrand (4)
Année2022	0.246 (0.182)			
Année2023	0.515*** (0.182)			
Année2022		0.155 (0.174)		
Année2023		0.137 (0.174)		
ModalitéSP			0.215 (0.182)	
ModalitéSP				-0.480* (0.231)
Constant	1.679*** (0.129)	1.950*** (0.123)	1.388*** (0.129)	1.190*** (0.163)
Observations	30	30	20	20
R ²	0.229	0.034	0.072	0.194
Adjusted R ²	0.172	-0.038	0.020	0.149
Residual Std. Error	0.407 (df = 27)	0.390 (df = 27)	0.408 (df = 18)	0.516 (df = 18)
F Statistic	4.017** (df = 2; 27)	0.473 (df = 2; 27)	1.389 (df = 1; 18)	4.325* (df = 1; 18)
Note:	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01			

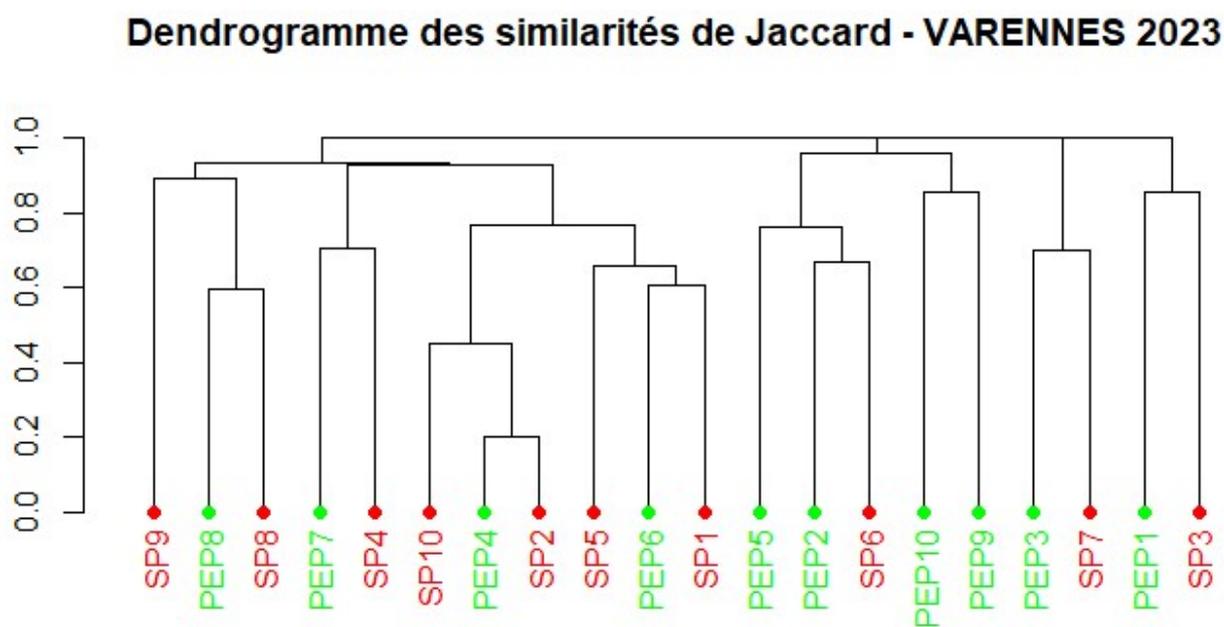
	<i>Dependent variable:</i>			
	1-D St Eloy SP (1)	1-D St Eloy PEP (2)	1-D Varenes (3)	1-D Etang-Bertrand (4)
Année2022	0.124** (0.060)			
Année2023	0.162** (0.060)			
Année2022		0.074 (0.052)		
Année2023		0.059 (0.052)		
ModalitéSP			0.052 (0.072)	
ModalitéSP				-0.225** (0.105)
Constant	0.662*** (0.042)	0.738*** (0.037)	0.658*** (0.051)	0.572*** (0.074)
Observations	30	30	20	20
R ²	0.229	0.077	0.028	0.203
Adjusted R ²	0.171	0.009	-0.026	0.159
Residual Std. Error	0.134 (df = 27)	0.117 (df = 27)	0.161 (df = 18)	0.234 (df = 18)
F Statistic	3.999** (df = 2; 27)	1.133 (df = 2; 27)	0.527 (df = 1; 18)	4.594** (df = 1; 18)
Note:	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01			

	<i>Dependent variable:</i>			
	J St Eloy SP (1)	J St Eloy PEP (2)	J Varenes (3)	J Etang-Bertrand (4)
Année2022	0.081** (0.038)			
Année2023	0.152*** (0.038)			
Année2022		0.056 (0.040)		
Année2023		0.064 (0.040)		
ModalitéSP			0.002 (0.047)	
ModalitéSP				-0.084 (0.050)
Constant	0.365*** (0.027)	0.433*** (0.029)	0.479*** (0.033)	0.304*** (0.036)
Observations	30	30	20	20
R ²	0.369	0.099	0.0001	0.134
Adjusted R ²	0.323	0.032	-0.055	0.086
Residual Std. Error	0.085 (df = 27)	0.090 (df = 27)	0.104 (df = 18)	0.113 (df = 18)
F Statistic	7.904*** (df = 2; 27)	1.480 (df = 2; 27)	0.002 (df = 1; 18)	2.778 (df = 1; 18)
Note:	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01			

Annexe 11 : Flore - Evolution de l'indice de Simpson selon la modalité et l'année pour chaque site étudié

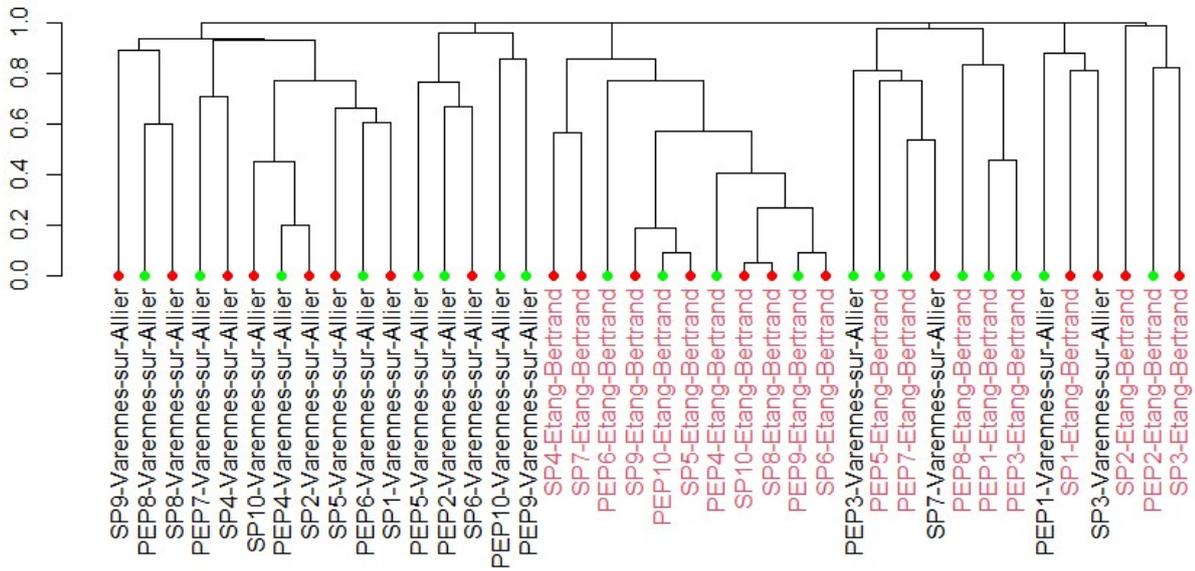


Annexe 12 : Flore – Dendrogramme des similarités de Jaccard pour Varennes-sur-Allier



Annexe 13 : Flore – Dendrogramme des similarités d Jaccard pour Varennes-sur-Allier et Etang-Bertrand

Dendrogramme des similarités de Jaccard - VARENNES et ETANG-BERTRAND 2023



Annexe 14 : Photographies des zones d'implantations de Varennes-sur-Allier et Etang-Bertrand avant travaux

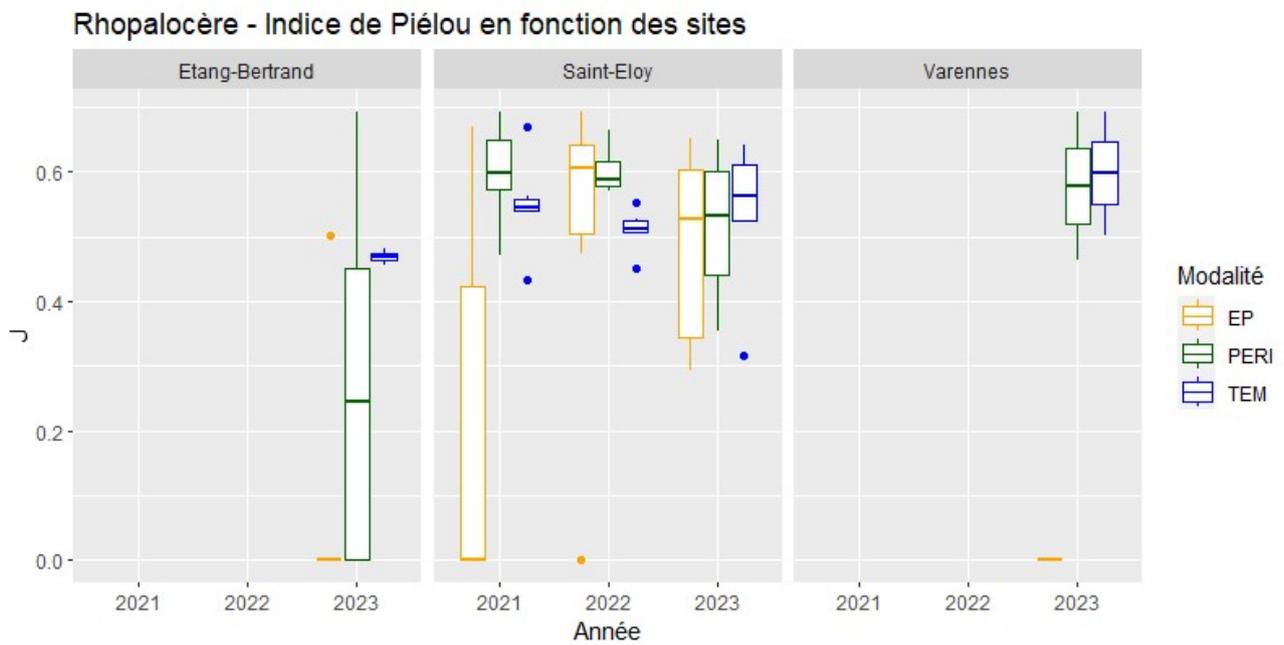
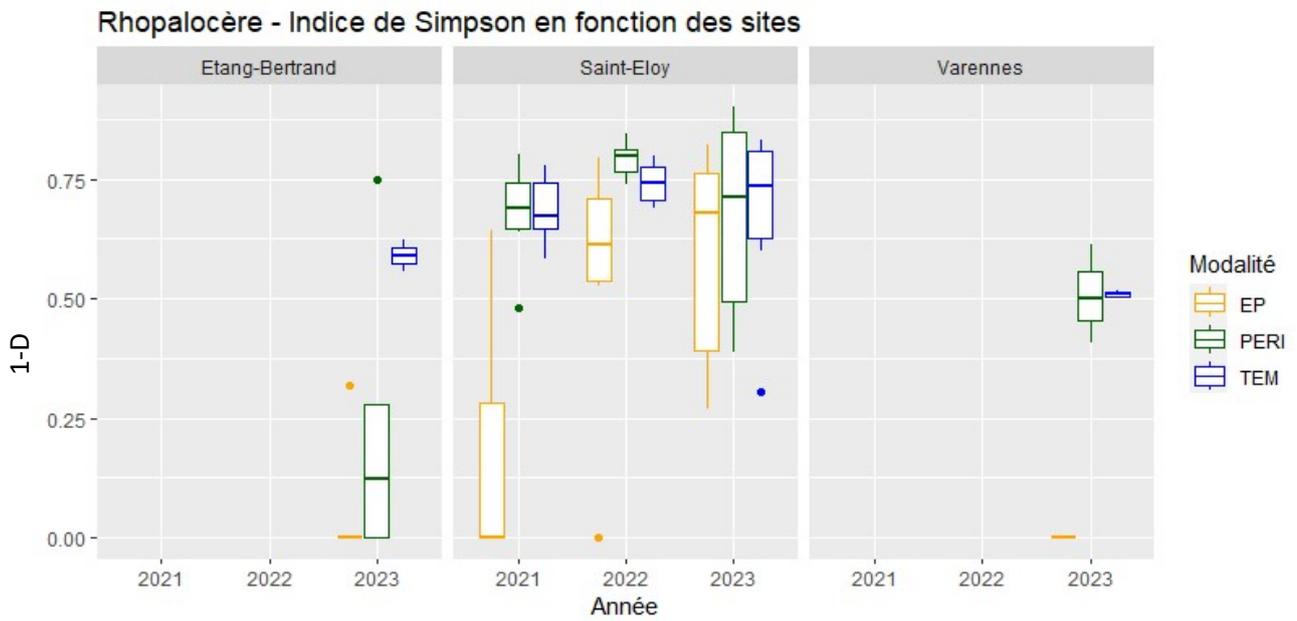


Annexe 15 : Rhopalocères - Différents modèles linéaires montrant l'effet de la modalité et de l'année sur les indices de biodiversité

	<i>Dependent variable:</i>			
	RS		RS	RS
	St Eloy (1)	St Eloy (2)	Varennes (3)	Etang-Bertrand (4)
ModalitéPERI	3.611*** (0.991)			
ModalitéTEM	3.944*** (0.991)			
Année2022		3.222*** (1.050)		
Année2023		3.000*** (1.050)		
ModalitéPERI			2.000** (0.730)	
ModalitéTEM			2.000* (0.816)	
ModalitéPERI				0.800 (0.570)
ModalitéTEM				5.300*** (0.754)
Constant	3.889*** (0.701)	4.333*** (0.743)	1.000 (0.516)	1.200** (0.403)
Observations	54	54	8	12
R ²	0.276	0.187	0.652	0.851
Adjusted R ²	0.248	0.155	0.513	0.818
Residual Std. Error	2.973 (df = 51)	3.151 (df = 51)	0.894 (df = 5)	0.901 (df = 9)
F Statistic	9.745*** (df = 2; 51)	5.871*** (df = 2; 51)	4.688* (df = 2; 5)	25.654*** (df = 2; 9)
Note:	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01			

	<i>Dependent variable:</i>			
	H		H	H
	St Eloy EP (1)	St Eloy PERI (2)	Varennes (3)	Etang-Bertrand (4)
Année2022	0.772** (0.299)	0.480* (0.273)		
Année2023	1.032*** (0.299)	0.287 (0.273)		
ModalitéPERI			0.861*** (0.154)	
ModalitéTEM			0.848*** (0.172)	
ModalitéPERI				0.316 (0.261)
ModalitéTEM				1.164*** (0.345)
Constant	0.271 (0.212)	1.319*** (0.193)	-0.000 (0.109)	0.100 (0.185)
Observations	18	18	8	12
R ²	0.462	0.173	0.886	0.558
Adjusted R ²	0.390	0.063	0.840	0.460
Residual Std. Error	0.518 (df = 15)	0.472 (df = 15)	0.188 (df = 5)	0.413 (df = 9)
F Statistic	6.433*** (df = 2; 15)	1.574 (df = 2; 15)	19.338*** (df = 2; 5)	5.686** (df = 2; 9)
Note:	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01			

Annexe 16 : Rhopalocères - Evolution de l'indice de Simpson et de Piélou selon la modalité et l'année pour chaque site étudié



Annexe 17 : Orthoptères -Modèles linéaires de l'effet de la modalité et de l'année sur les indices de biodiversité à Saint-Eloy-les-Mines

Effet Année :

P-value en rouge ; R² en bleu

```
Call:
lm(formula = RS ~ Année, data = Data_Eloy)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.5333 -1.1583 -0.3667  0.6333  4.5667

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   1.3667     0.2781   4.915 4.14e-06 ***
Année2022     1.1667     0.3932   2.967 0.00388 **
Année2023     1.0667     0.3932   2.713 0.00805 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.523 on 87 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1106,    Adjusted R-squared: 0.09013
F-statistic: 5.408 on 2 and 87 DF,  p-value: 0.006112
```

Effet Modalité :

```
Call:
lm(formula = RS ~ Modalité, data = Data_Eloy)

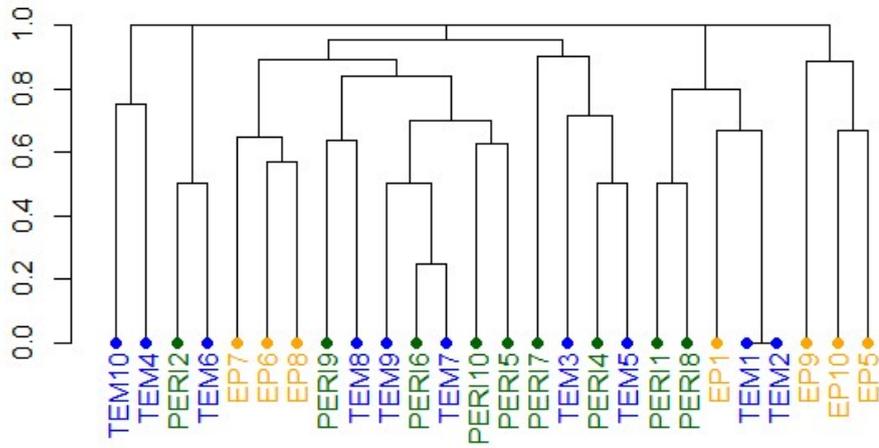
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.8276 -0.8276  0.1724  1.1724  5.2333

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.774194   0.275649   6.436 6.45e-09 ***
ModalitéPERI 1.053393   0.396490   2.657 0.00938 **
ModalitéTEM  -0.007527   0.393061  -0.019 0.98477
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

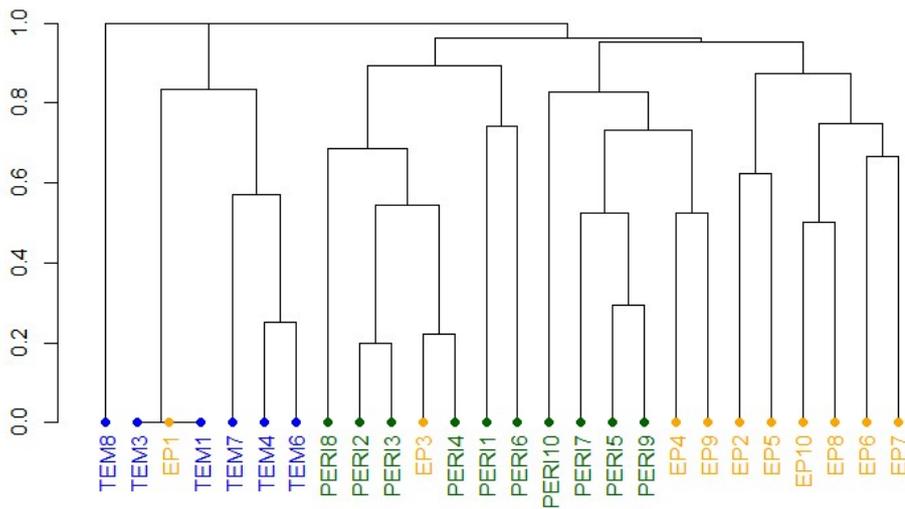
Residual standard error: 1.535 on 87 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.09681,    Adjusted R-squared: 0.07605
F-statistic: 4.663 on 2 and 87 DF,  p-value: 0.01192
```

Annexe 18 : Classification des transects d'inventaires orthoptères selon les espèces contactées

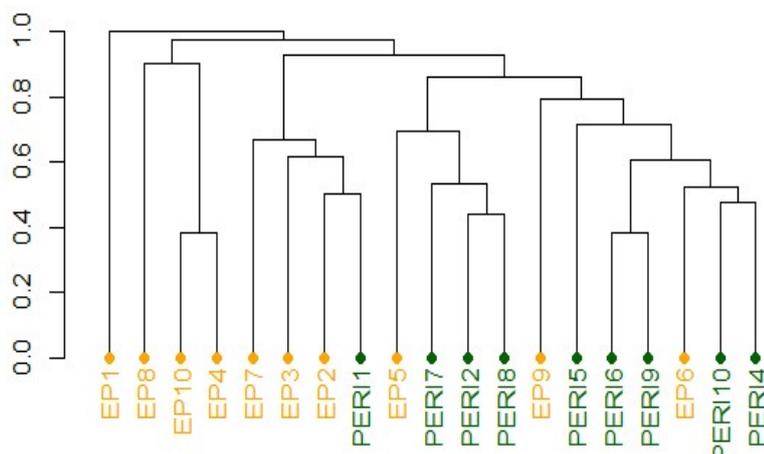
Ortho - Dendrogramme des similarités de Jaccard - ELOY 2022



Ortho - Dendrogramme des similarités de Jaccard - ELOY 2023

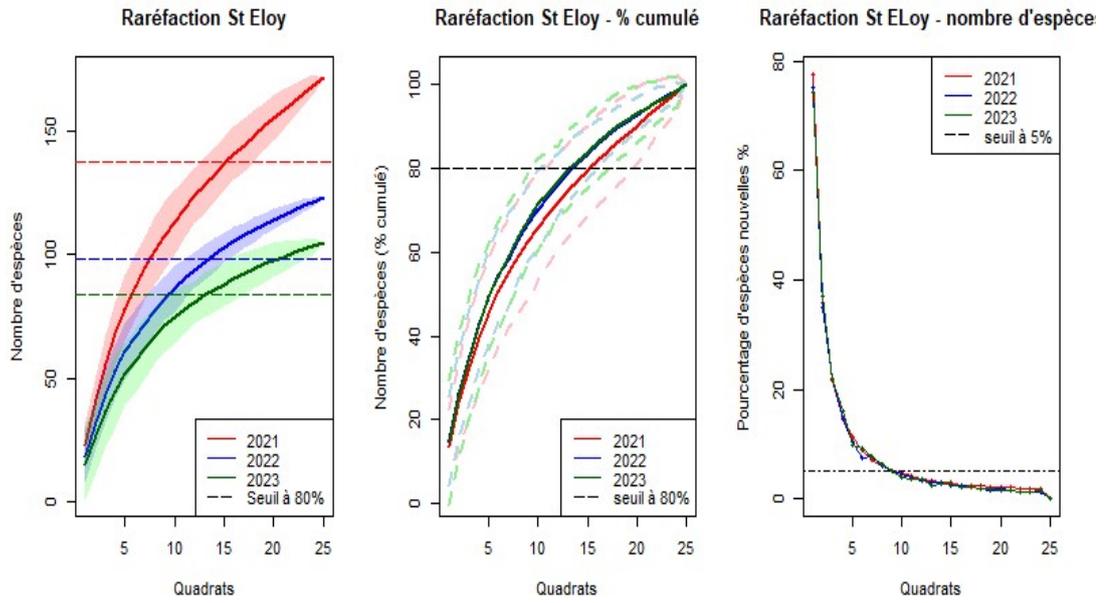


Dendrogramme des similarités de Jaccard - ETANG BERTRAND

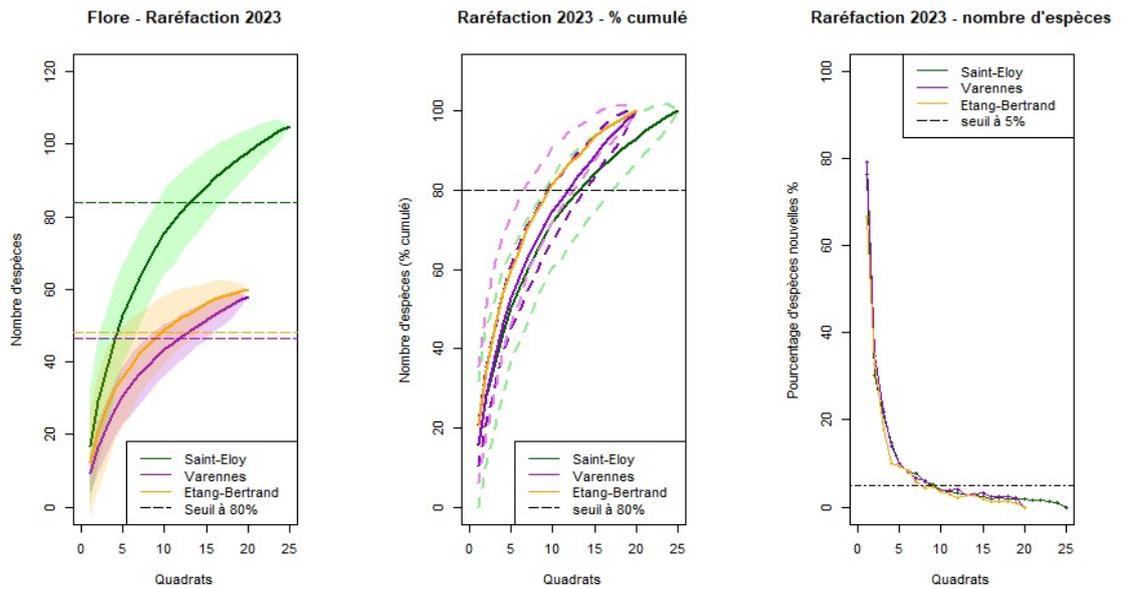


Annexe 19 : Graphiques de raréfaction

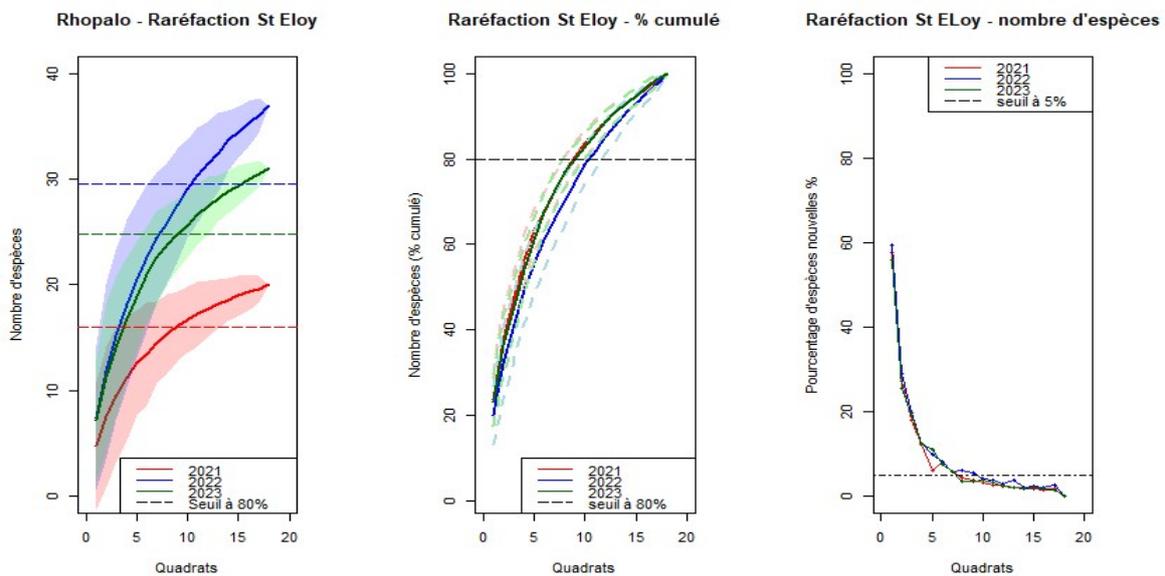
Flore – Raréfaction Saint-Eloy-les-Mines



Flore – Raréfaction sites confondus

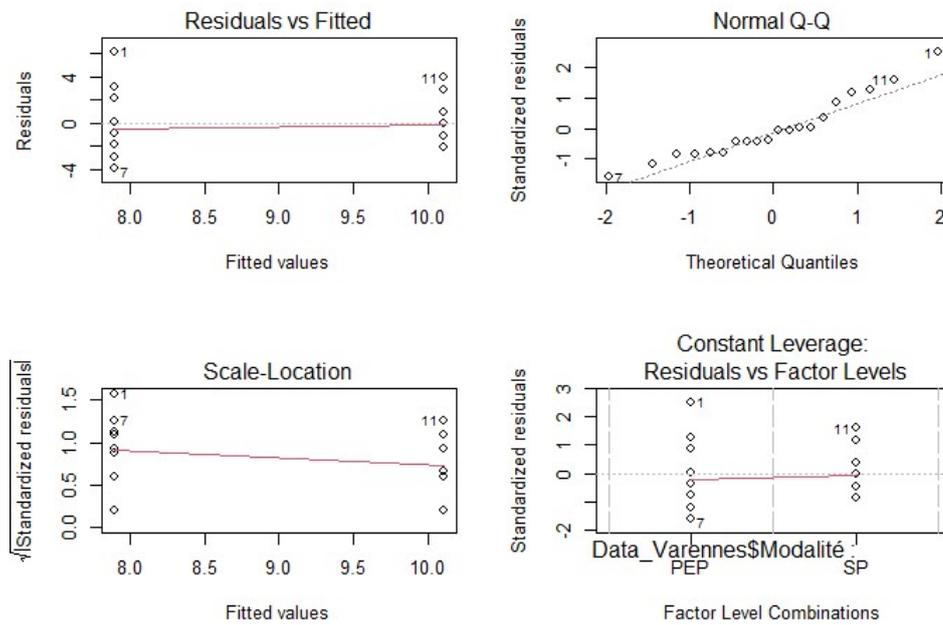


Rhopalocères – Raréfaction Saint-Eloy-les-Mines

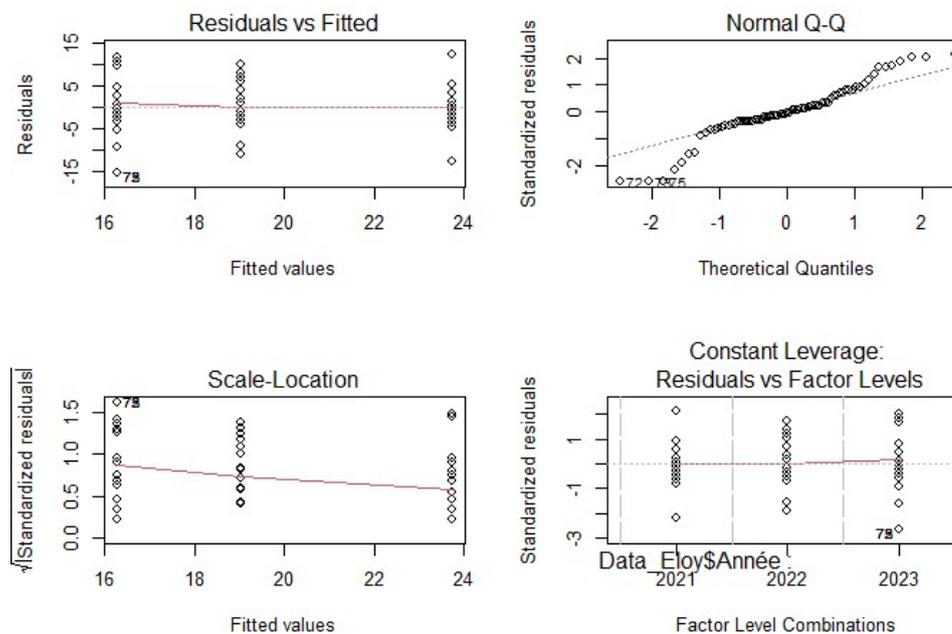


Annexes 20 : Quelques graphiques de vérification des modèles de régressions

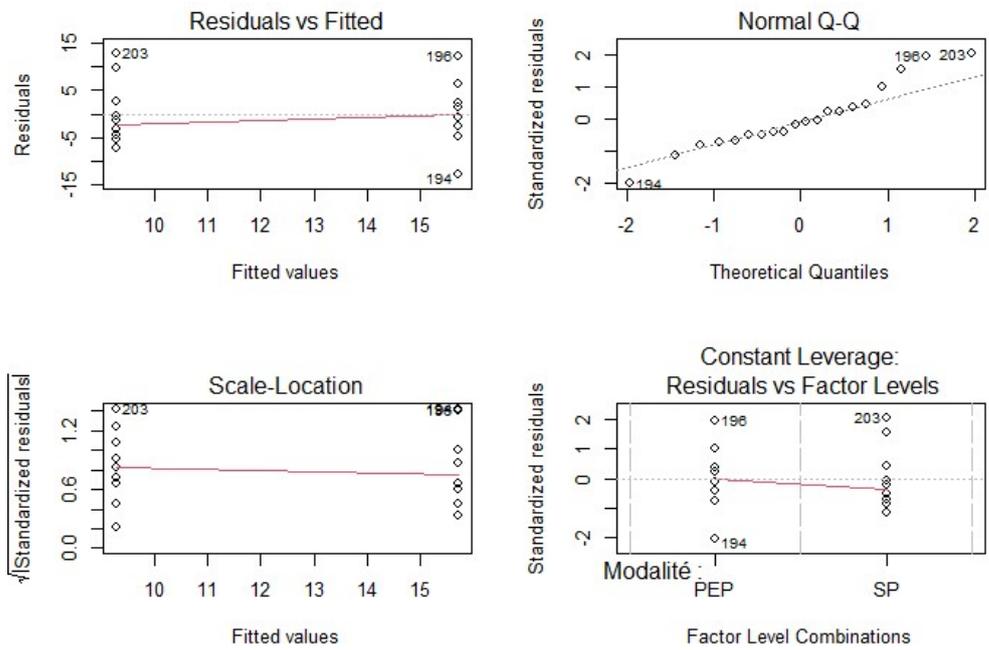
Flore – Varennes-sur-Allier (RS selon la modalité)



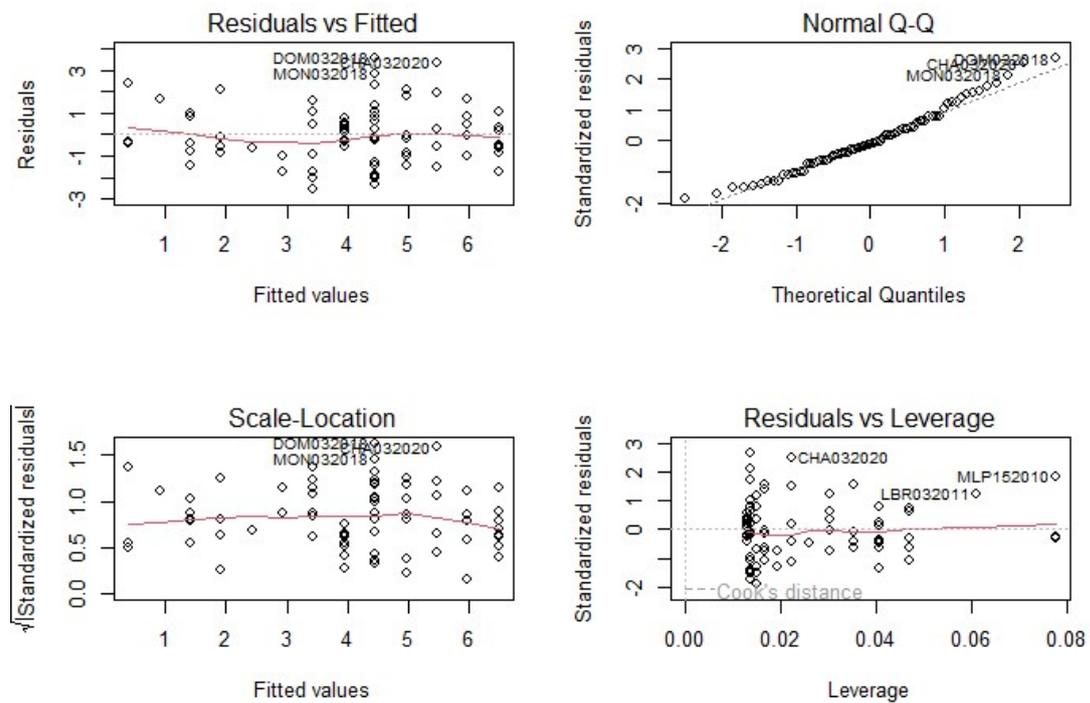
Flore – Saint-Eloy-les-Mines (RS selon l'année)



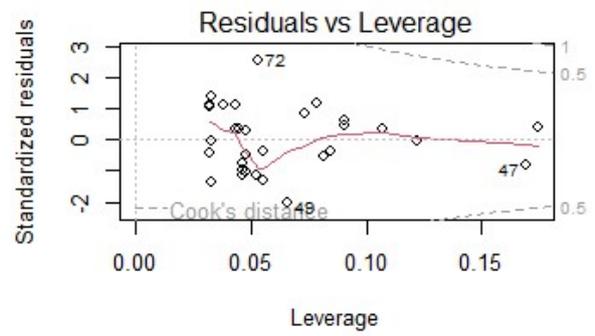
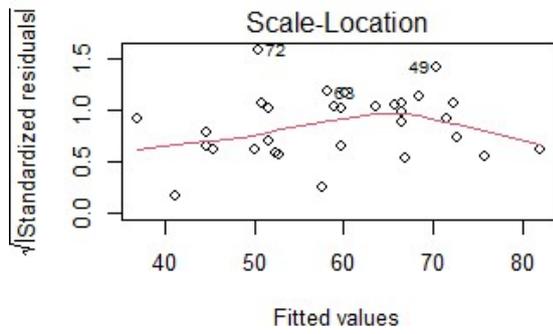
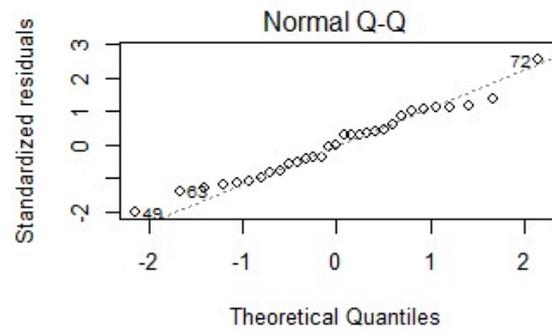
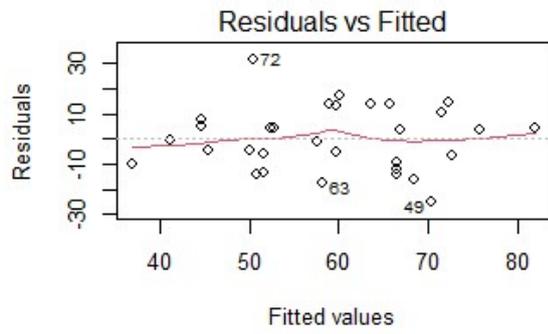
Flore – Etang-Bertrand (RS selon la modalité)



Indice général IndG en fonction du temps



Indice de qualité d'inventaire Qechant en
fonction de l'indice général IndG





VetAgro Sup

COULET Evan – 2023

Mémoire de fin d'études « *Caractérisation de l'impact environnemental des centrales photovoltaïques au sol en région Auvergne-Rhône-Alpes* » 39 pages, soutenu à VetAgro Sup le 25 septembre 2023

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES :

- ◆ Crexeco, Bureau d'étude en environnement (63)

ENCADRANTS :

- ◆ Maître de stage : LELIEVRE Hervé (Cogérant de Crexeco)
- ◆ Tuteur pédagogique : PINOT Adrien (VetAgro Sup)

OPTION : AEST - Agriculture Environnement Santé Territoire

RESUMÉ

Pour répondre aux enjeux actuels autour du dérèglement climatique, la France doit se tourner vers la production d'une énergie « verte », peu polluante. Afin d'accompagner la transition énergétique, l'installation de centrales photovoltaïques au sol (CPS) a connu un très grand essor ces dernières années. Cependant, la mise en place de ces parcs solaires modifie les conditions du milieu et peut avoir des incidences sur la biodiversité. Avant chaque projet, des études d'impact sur l'environnement (EIE) évaluent les enjeux présents dans la zone d'implantation potentielle. Notre analyse de la notion de caractérisation des impacts sur l'environnement à partir de 77 EIE en Auvergne-Rhône-Alpes met en avant deux aspects : la mesure même de l'incidence brute et la qualité des méthodes des inventaires définissant les impacts. Malgré une forte amélioration de la qualité des EIE depuis 2010, des déséquilibres se maintiennent, avec notamment moins de rigueur apportée à la prospection des espèces à faible enjeux. Pour mesurer les impacts bruts des CPS dans la région, des inventaires ont été réalisés sur les taxons à faible enjeu. Les rhopalocères sont les plus touchés avec une diminution forte du nombre d'insecte entre les panneaux. La composition des populations d'orthoptères est impactée par la présence des CPS. Enfin, selon la diversité du site avant travaux, une centrale semble pouvoir amener de l'hétérogénéité et de la diversité dans les communautés végétales.

Mots clés : *Impact environnemental – Etudes d'Impact sur l'Environnement – Filière photovoltaïque – Programme de recherche (PHOTODIV) – Biodiversité et écosystèmes – Bureau d'étude*

ABSTRACT

Responding to current issues like global warming, France must use more green energy, that are less polluting. In order to support energetic transition, there have been a large increase of installations of photovoltaic power-plant these past few years. However, the construction of solar parks can have effect on the environment conditions and biodiversity. Before all projects, environmental impact assessments (EIA) are conducted to seek environmental stakes in the area. Our analyses of the notion of environmental impact characterization, with 77 EIA in Auvergne-Rhône-Alpes, highlights two major aspects: the incidence measurement itself and the methods used to identify stakes. Despite a large improvement of EIA quality since 2010, some unbalances remain, with less rigor granted to common species, for example. To measure solar photovoltaic (solar PV) impacts in the region, inventories were run for these species with no stakes. Rhopalocera are the most affected with a great decrease of their species numbers under panels. Composition of orthoptera's populations is affected by solar PV. At last, depending on the diversity of the area before construction, solar PV can bring heterogeneity and diversity in vegetation communities.

Keywords: *Environmental impact – Environmental impact assessment – photovoltaic industry – Research program – Biodiversity and ecosystem – Design office*

Cote documentation VetAgro Sup :