

Projet de Fin d'Études (PFE) 2023-2024

Renforcement des populations d'Azuré du Serpolet dans des centrales photovoltaïques

Cas de la région Pays de la Loire

*Les centrales photovoltaïques peuvent-elles jouer un rôle dans la conservation de
Phengaris arion ?*

Présenté par : Kilian Pelon

Numéro d'étudiant : 22109766

Soutenue le : 31 janvier 2024

Sous la direction de Louison Bienvenu, Doctorant – Ingénieur de recherche en écologie

Avertissement

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

L'auteur de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

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

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

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

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

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

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

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études. Leur soutien indéfectible, leurs conseils avisés et leurs remarques éclairantes ont grandement enrichi ce travail.

En premier lieu, je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon tuteur de PFE, Louison Bienvenu. Son engagement, sa disponibilité et ses compétences ont été des atouts majeurs tout au long de ce projet. Je tiens particulièrement à saluer ses relectures attentives et ses remarques constructives qui ont grandement amélioré la qualité de ce mémoire.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers les enseignants qui ont apporté leur aide dans cet exercice académique. Mes remerciements vont tout particulièrement à Francis Isselin, Kamal Serrhini et Séraphine Grellier, dont les cours ont été une source précieuse d'inspiration et d'apprentissage.

Un immense merci à mes collègues étudiants de Polytech, et plus spécialement ceux de la spécialité ADAGE. Leur soutien constant et leurs remarques pertinentes ont été d'une valeur inestimable. Cette collaboration a contribué à enrichir la diversité des perspectives abordées dans ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Mathieu Chailloux, dont l'expertise a été cruciale dans la compréhension et l'utilisation de BioDispersal et de QGIS. Ses notices de prise en mains et la chaîne YouTube de l'Agence française pour la biodiversité (AFB) ont rendu ces outils accessibles et ont facilité leur intégration dans ce travail.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble de ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire. Leur soutien a été précieux et a largement participé à la réussite de ce projet académique.

Sommaire

I.	Introduction	1
A.	Contexte.....	1
B.	<i>Phengaris arion</i> , un mode de vie sous contraintes	2
C.	Le déclin des prairies et les centrales photovoltaïques	9
II.	Matériel et méthode.....	15
A.	Une méthodologie utilisant la notion de perméabilité des milieux	15
B.	Définition des indices de perméabilité	19
III.	Résultats	23
A.	Méthode des aires potentielles de dispersion	23
B.	Méthode des chemins de moindre coût	27
IV.	Analyse.....	29
V.	Limites.....	33
VI.	Conclusion.....	33
VII.	Bibliographie.....	36
VIII.	Webographie	45
IX.	Annexe	47

Table des figures

Figure 1 : Morphologie et variation de <i>Masculinea arion</i> (Tolma, & Leington, 1999)	- 2 -
Figure 2 : Œuf (a) et chenille de <i>Phengaris arion</i> (b), SW-Germany, Baden-Württemberg (Heidenheim & Brenz, 2020)	- 3 -
Figure 3 : <i>Thymus serpyllum</i> L., 1753 (P. Gourdain dans INPN, s.d.)	- 4 -
Figure 4 : <i>Origanum vulgare</i> L., 1753 (P. Gourdain dans INPN, s.d.)	- 4 -
Figure 5 : <i>Myrmica sabuleti</i> (Lebas, s.d. sur INPN)	- 5 -
Figure 6 : Carte des observations de <i>Phengaris arion</i> (Houard & Jaulin, 2018)	- 6 -
Figure 7 : Structure spatiale d'une population en fonction de la répartition des macro- et micro-habitats favorables et de la structure des déplacements (Dupont, 2010)	- 7 -
Figure 8 : Part des prairies permanentes dans la SAU, par région agricole, en 2010 (SCES, 2018)	- 11 -
Figure 9 : Les prairies sensibles en France en 2011 (Ministère de l'Agriculture et de de la souveraineté alimentaire, 2015)	- 11 -
Figure 10 : Schéma illustrant le fonctionnement de BioDispersal	- 2 -
Figure 11 : Schéma illustrant le fonctionnement de Graphab	- 3 -
Figure 12 : Modélisation des dispersions de <i>Phengaris arion</i> pour le scénario 200 (Pelon, 2024)	- 4 -
Figure 13 : Modélisation des liens entre les taches d'observation de <i>Phengaris arion</i> (Pelon, 2024)	- 9 -
Figure 14 : Modélisation des liens entre les taches d'habitats favorables de <i>Phengaris arion</i> (Pelon, 2024)	- 10 -
Figure 15 : Modélisation de la dispersion de <i>Phengaris arion</i> sur la centrale photovoltaïque Ex ETAMAT Vass (Pelon, 2024)	- 11 -
Figure 16 : Modélisation du chemin de moindre coût entre deux sites d'observation de <i>Phengaris arion</i> faisant intervenir la centrale photovoltaïque Le Gravier (Pelon, 2024)	- 13 -

Table des tableaux

<u>Tableau 1 : Différentes modélisations réalisées</u>	- 4 -
<u>Tableau 2 : Indice de perméabilité des habitats Corine Land Cover pour les scénarios « AVANT » et « APRES »</u>	- 1 -
<u>Tableau 3 : Indice de perméabilité des centrales photovoltaïques</u>	- 2 -
<u>Tableau 4 : Hiérarchisation des ouvrages linéaires en fonction de leur potentiel de fragmentation (DREAL, 2015)</u>	- 3 -
<u>Tableau 5 : Indice de perméabilité des éléments fragmentant</u>	- 3 -
<u>Tableau 6 : Surface atteinte par la dispersion en 1 ans « N+1 » en fonction de chaque scénario (Pelon, 2024)</u>	- 5 -
<u>Tableau 7 : Surface atteinte par la dispersion en 5 ans « N+5 » en fonction de chaque scénario (Pelon, 2024)</u>	- 5 -
<u>Tableau 8 : Présence (vert) absence (rouge) des centrales photovoltaïques dans les différentes modélisations à N+1 (Pelon, 2024)</u>	- 6 -
<u>Tableau 9 : Présence (vert) absence (rouge) des centrales photovoltaïques dans les différentes modélisations à N+5 (Pelon, 2024)</u>	- 7 -
<u>Tableau 10 : Surface en hectare des différentes centrales photovoltaïques (Pelon, 2024)</u>	- 8 -
<u>Tableau 11 : Connectivité équivalente entre les taches de présence de <i>Phengaris arion</i>, avant et après l'implantation des centrales photovoltaïques (Pelon, 2024)</u>	- 9 -
<u>Tableau 12 : Connectivité équivalente entre habitats favorables de <i>Phengaris arion</i>, avant et après l'implantation des centrales photovoltaïques (Pelon, 2024)</u>	- 10 -

Table des annexes

<u>Annexe 1 : Couches shapefile utilisées dans l'étude et leur source (Pelon, 2024)</u>	- 44 -
<u>Annexe 2 : Représentation de la couche Corine Land Cover 2012 (Pelon, 2024)</u>	- 45 -
<u>Annexe 3 : Représentation de la couche des centrales photovoltaïques (Pelon, 2024)</u>	- 46 -
<u>Annexe 4 : Représentation de la couche des observations de Phengaris arion (Pelon, 2024)</u> -	47
-	
<u>Annexe 5 : Représentation de la couche des éléments fragmentant (Pelon, 2024)</u>	- 48 -
<u>Annexe 6 : Comparaison de l'occupation du sol avant et après l'implantation des centrales photovoltaïques et définition de l'indice de friction (Pelon, 2024)</u>	- 49 -
<u>Annexe 7 : Modélisation des dispersions de Phengaris arion sur 1 ans (Pelon, 2024)</u>	- 54 -
<u>Annexe 8 : Modélisation des dispersions de Phengaris arion sur 5 ans (Pelon, 2024)</u>	- 55 -
<u>Annexe 9 : Représentation des différentes tâches d'habitats favorables de Phengaris arion dans Graphab (Pelon, 2024)</u>	- 56 -

I. Introduction

A. Contexte

Les prairies en France font face à un fort déclin depuis les dernières décennies (Nature France, 2016), cette disparition est corrélée à un arrêt des méthodes de gestion. En effet, en l'absence de pâturages ou de fauches, la plupart des prairies se ferment, entraînant une évolution des cortèges d'espèces présents sur le site, et une diminution des espèces de milieu ouvert (Dumont, Farrugia & Garel, 2007). Cette évolution menace alors les espèces dépendantes de ces milieux particuliers, dont notamment les papillons. Une étude (Houard & Jaulin, 2018), démontre un effondrement des papillons des prairies de près de 40 % depuis 1990. En conséquence, la Liste rouge des papillons de jour de France métropolitaine considère que 14 % des espèces du territoire sont actuellement menacées ou « quasi-menacées » d'extinction (UICN France, MNHN, OPIE & SEF, 2014). Parmi les espèces de papillons menacées, l'Azuré du Serpolet, *Phengaris arion*, un petit papillon patrimonial à la teinte bleutée qui vit dans les prairies françaises. En première ligne face à ce déclin, c'est une espèce particulièrement intéressante à étudier.

En parallèle, l'Union européenne a fixé pour 2030 un objectif de production d'énergie à 40 % d'origine renouvelable, suivie par la France qui ambitionne de doubler sa production d'énergie renouvelable d'ici à 2028. (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020). Ainsi, afin d'atteindre ces ambitions les régions vont devoir agir à leur échelle. En Pays de la Loire, le Schéma régional climat air énergie (SRCAE) a retenu un objectif de 1 500 MW de centrales photovoltaïques installées d'ici à 2030 et 3 000 MW d'ici à 2050. Cet objectif de croissance s'accompagnerait en partie d'une augmentation des centrales photovoltaïques au sol (Région Pays de la Loire-SRCAE, 2013). Ces dernières étant potentiellement des lieux de vie de *Phengaris arion*, l'enjeu ici est alors de savoir si elles peuvent concrètement entrer en jeu dans la préservation de *Phengaris arion*. Pour cela il est proposé d'étudier la dispersion d'individus au sein de la région Pays de la Loire et les interactions qui peuvent se produire avec les centrales. Pour cela, deux logiciels de modélisation seront utilisés, Biodispersal et Graphab (Foltête et al, 2021).

B. *Phengaris arion*, un mode de vie sous contraintes

1. Le cycle de vie de l'azuré du Serpolet

Espèce emblématique des prairies, l'étude portera sur l'Azuré du serpolet ou *Phengaris arion* (L. 1758). Anciennement placé dans le genre *Masculinea*, il a rejoint *Phengaris* à la suite de travaux phylogénétiques (Dupont, 2010), ce papillon est un rhopalocère¹ appartenant à la famille des Lycaenidae. En comparaison aux autres espèces de sa famille, il est caractérisé par une grande taille avec une envergure de 25 à 30 millimètres, lui valant son nom anglais « Large Blue Butterfly ». A l'âge adulte, il est reconnaissable par sa teinte azur sur la surface supérieure de ses ailes antérieures (voir Figure 1), ornée de petites taches noires de forme allongées. Le revers de ses ailes est également ponctué de taches noires sur un fond gris. Il présente aussi une double rangée de taches noires située aux extrémités des ailes ainsi qu'une suffusion bleue à la base de ses ailes postérieures. Il existe un dimorphisme sexuel qui se traduit par une envergure plus importante chez les femelles avec des taches post-médianes plus marquées (Lestang, 2020).

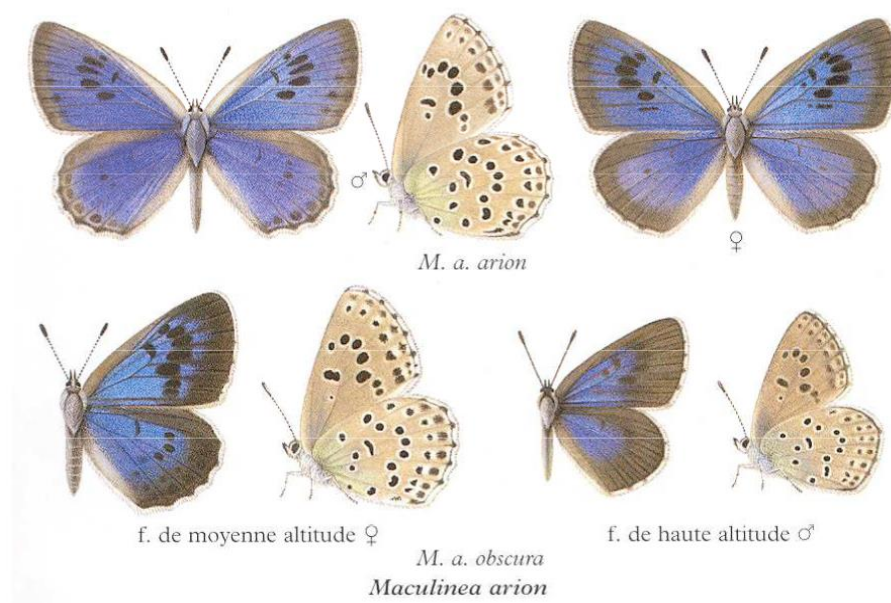


Figure 1 : Morphologie et variation de *Masculinea arion* (Tolma, & Leington, 1999)

¹ Papillon, généralement diurne, aux antennes renflées en massue à leur extrémité, et aux ailes relevées au repos. Le groupe comprend les Papilionidae, les Pieridae, les Nymphalidae, les Lycaenidae, les Hesperidae. (Larousse, 2023)

Le stade adulte est précédé de plusieurs autres stades, ceux-ci sont plus éphémères, essentiellement souterraines et sont ainsi difficilement identifiables. Toutefois, il a été observé que les œufs avaient un aspect alvéolé et une couleur blanchâtre à bleuté (voir Figure 2a). Les larves ou chenilles, quant à elles ont un aspect fusiforme (caractéristique des chenilles de Lycénidés), une tache noire sur la tête, avec un corps habituellement rosé proche de la couleur des fleurs de la plante hôte parsemée de rayures blanches et de poils courts transparents (Lestang, 2020).



Figure 2 : Œuf (a) et chenille de *Phengaris arion* (b), SW-Germany, Baden-Württemberg (Heidenheim & Brenz, 2020)

A l'âge adulte, la période de vol de *Phengaris arion* s'étale de mi-mai à août, celle-ci varie selon la latitude, l'altitude et la période de floraison de la plante hôte. Un individu adulte aura une espérance de vie estimée à 17 jours, cependant des auteurs observent plutôt une durée de vie moyenne entre 2,8 et 3,5 jours (Nowicki et al, 2005). Durant ces quelques jours les individus se reproduisent et la femelle pond en moyenne 60 œufs au sein de l'inflorescence d'une plante hôte (Griebeler & Seitz, 2002). Cette plante peut différer selon la région où demeure l'espèce. Selon Dupont (2010), la ponte aura lieu préférentiellement sur des thyms (*Thymus sp.*) au nord de sa zone de répartition et en altitude, dans des milieux secs, bien exposés et avec un sol peu profond. Plusieurs espèces sont recensées dans la littérature, on retiendra le thym serpolet, *Thymus serpyllum*, plante herbacée vivace appartenant à la famille des Lamiaceae. Il s'agit d'une plante de petite taille (voir figure 3), mesurant généralement de 5 à 15 cm de hauteur se caractérisant par ses petites feuilles ovales et ses fleurs roses ou blanches, sa floraison a lieu de mai à septembre (Tela botanica, 2011). Lorsque les sols sont davantage profonds, plus frais et avec une végétation plus haute et dense, *P. arion* se développe aussi sur *Origanum vulgare* (Rodrigues, 2010). Dans les faits, il arrive régulièrement dans la partie nord de sa répartition que l'unique plante hôte naturelle du papillon soit l'origan à cause de la faible présence de Thyms. En effet, le recouvrement du thym doit être supérieur à 5 % afin d'avoir

des conditions optimales de développement de *P. arion*. *Origanum vulgare* est une plante vivace de 30-80 cm (voir figure 4), poilue et souvent rougeâtre. Les feuilles peuvent être pétiolées, ovales ou elliptiques les fleurs sont roses et agglomérées au sommet des rameaux, qui fleurissent de juillet à septembre (Tela Botanica, 2011). Cette espèce, à l'inverse des espèces de thym, ne tolère pas une forte pression de pâturage, pour pousser elle requière un pâturage extensif (Dupont, 2010).

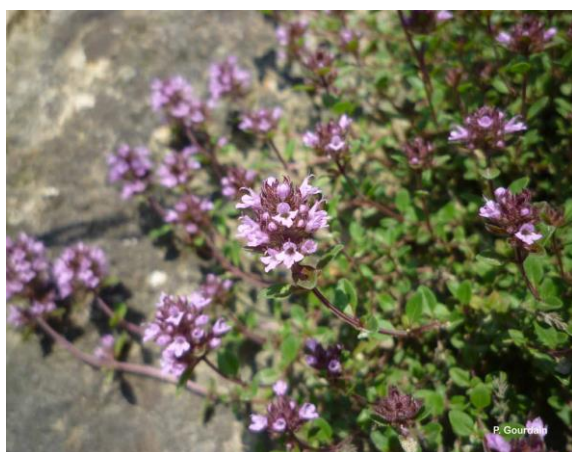


Figure 3 : *Thymus serpyllum* L., 1753 (P. Gourdain dans INPN, s.d.)



Figure 4 : *Origanum vulgare* L., 1753 (P. Gourdain dans INPN, s.d.)

Les trois premiers stades du développement larvaire vont ainsi se dérouler dans cette inflorescence, la larve passe environ 3 semaines à se nourrir de la plante. Lorsqu'elle atteint son quatrième stade, elle abandonne sa plante hôte et tombe au sol. Des fourmis du genre *Myrmica* la prennent alors en charge et la ramène à la fourmilière, leurrées par diverses techniques de la chenille visant à se faire passer pour le couvain des fourmis (Hayes, 2015). Une fois déposée avec le couvain, celle-ci se comporte en parasite, elle est nourrie par les fourmis et en parallèle dévore le couvain de la fourmilière. Elles se concentrent sur les plus grosses larves de fourmis (Thomas & Wardlaw, 1992), engendrant des dégâts importants pouvant conduire à la destruction de la fourmilière. Les chenilles passent ainsi l'automne, l'hiver et le printemps (Hayes, 2015), elles acquièrent 99% de leur biomasse à ce moment et réalisent leur chrysalide (Thomas & Wardlaw, 1992). L'émergence a lieu dans la fourmilière et l'imago à peine écloit, en sort de façon à sécher à l'air libre. Il est à noter qu'une partie de la génération, se nymphosera l'année suivante et ainsi sortira qu'au bout de deux ans passés dans la fourmilière (Dupont, 2010 ; Gressette, 2012).

Il existe plusieurs espèces du genre *Myrmica* qui peuvent faire office de fourmis hôtes. Cependant, il semblerait que *P. arion* favorise majoritairement *Myrmica sabuleti* (Barnett & Warren, 1995) le taux de survie étant nettement plus faible avec les autres espèces (Sielezniew & Stankiewicz-Fiedurek, 2008). *M. sabuleti* se retrouve sur toute l'Europe si les conditions de vie sont présentes, l'espèce a besoin d'un microclimat chaud, pour cela elle nécessite des gazons exposés sud avec un pâturage court de maximum 2 à 3 cm en Angleterre (Thomas, 1994 ; Casacci & al. 2011). Ainsi, si l'herbe dépasse 7 cm (Thomas, Simcox, & Clarke, 2009) ou 5 cm (New, 1999) l'espèce disparaît totalement. Cependant, une autre étude dans les Alpes italiennes, milieu nettement plus chaud, montre que l'espèce peut se retrouver dans des herbes entre 5 et 10 cm et même jusqu'à 20-30 cm (Casacci & al. 2011). L'espèce est relativement bien étudiée pour ses relations avec *Phengaris arion* et son rôle d'espèce hôte. Il a été montré que pour que la fourmi prenne en charge la chenille de *Phengaris arion*, il est nécessaire que de *M. sabuleti* soit en forte densité et qu'il y ait des thym à moins de 2 mètres de l'entrée du nid (Barnett & Warren, 1995 ; Gressette, 2012 ; Gerbeau, 2014). La taille de la fourmilière elle-même est aussi importante, Thomas et Wardlaw (1992) estiment que pour un papillon le nid doit comporter minimum 230 larves et 354 fourmis. Ainsi dans leur étude, 85% des nids sont trop petits pour produire un papillon, et seulement 5 % peuvent en supporter deux ou plus. L'espèce de la famille de Formicidés est caractérisée par sa couleur orangée, sa pilosité blanche et son scape (premier segment de l'antenne) formant un angle vif à sa base (voir figure 5).



Figure 5 : *Myrmica sabuleti* (Lebas, s.d. sur INPN)

2. Répartition et dynamique de l'espèce

L'Azuré du Serpolet est une espèce eurasiatique, son aire de répartition s'étend de l'Europe occidentale au Japon (Wynhoff, 1998). En France, il est potentiellement présent dans tous les départements cependant il est absent dans le Nord-Ouest du pays, illustré sur la figure 6. En montagne, il est présent jusqu'à 2 400 mètres d'altitude (Merlet et Houard, 2012).

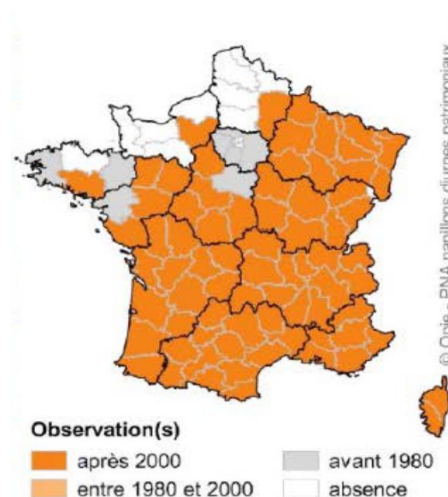


Figure 6 : Carte des observations de *Phengaris arion* (Houard & Jaulin, 2018)

Pour ce qui est de son écosystème, *P. arion* se développe majoritairement dans les prairies, mais il occupe aussi d'autres milieux comme les pelouses rases, les clairières forestières, les friches xérothermophiles ouvertes et les coteaux calcaires (Wynhoff, 1998 ; Merlet & Houard, 2012). La fermeture par les ligneux doit être inférieure à 30 % (idéalement inférieure à 10 %) Sachteleben et al. (2010) et il est toujours nécessaire d'avoir la présence de la plante hôte et de nids de fourmis *Myrmica* à proximité de celle-ci (Gressette, 2012). Une étude en Indre-et-Loire a d'ailleurs montré qu'il existait une corrélation positive entre les densités d'*Origan* et les densités d'adultes Azuré du serpolet (Beau, Thirion & Forti, 2005). Dans cette même étude, les auteurs remarquent que *Origanum vulgare* est une espèce qui se développe sur un stade intermédiaire entre pelouse sèche calcicole et pré-boisement, à ce stade les herbes plus hautes sont alors peu favorables à *Myrmica sabuleti*. Ils en déduisent donc que le milieu optimal pour *P. arion* est composé de zones d'enfrichement et des zones à végétation rase. Selon Dupont (2010) il est aussi probable que *Phengaris arion* soit présent dans des milieux négligés par les naturalistes car *Origanum vulgare*, a aussi tendance à se développer dans des milieux perturbés comme des friches industrielles, les bords de route ou des anciennes zones de remblai. Il convient donc d'être prudent vis-à-vis des observations de *P. arion*.

L'Azuré du serpolet se répartit en métapopulations, illustrée sur la figure 8 (Nowicki & al., 2005). Cet ensemble de populations est divisé en sous populations qui elles-mêmes sont divisées en populations locales dépendant de la distribution des tâches d'habitats favorables à l'échelle du paysage (Gressette, 2012).

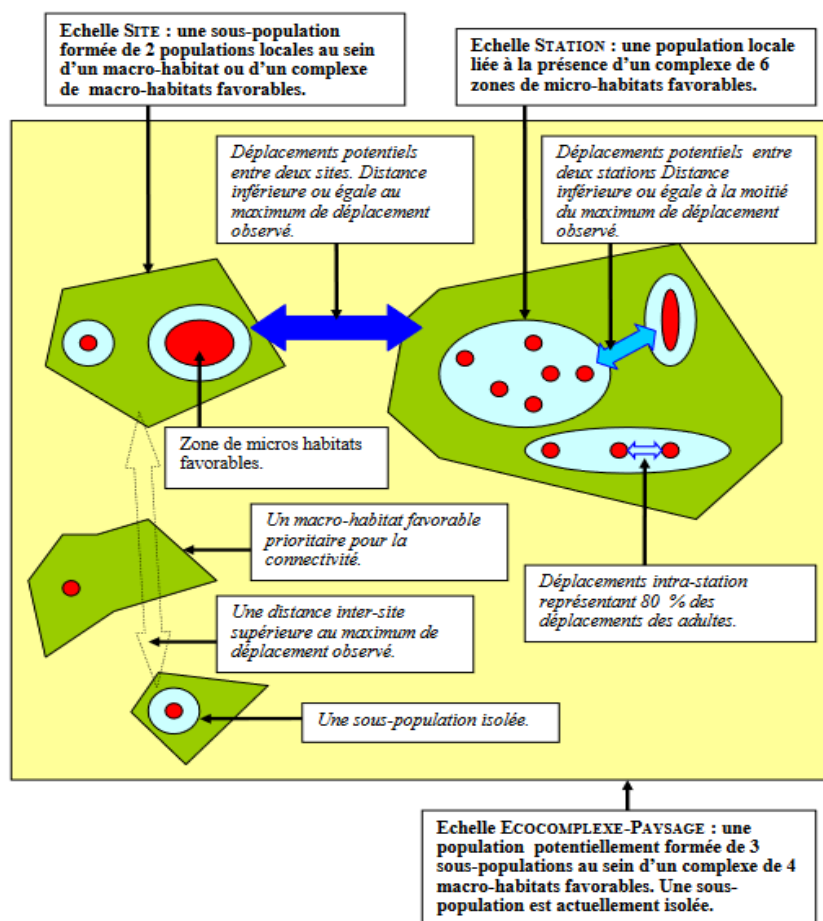


Figure 7 : Structure spatiale d'une population en fonction de la répartition des macro- et micro-habitats favorables et de la structure des déplacements (Dupont, 2010)

Une population est généralement composée d'une centaine d'individus (Nowicki & al., 2005) et il n'est pas rare que celle-ci subisse des extinctions périodiques (Dupont, 2010). Ces différentes populations doivent donc être espacées d'une distance inférieure au déplacement maximal qui est de 5,7 km. Cette capacité de dispersion est relativement faible, il est estimé que pour que les échanges soient conséquents la distance entre les sites doit être inférieure à 3 km (Dupont, 2010). Il faut rajouter à cela que ce type de déplacement longue distance est très rare, une grande majorité des dispersions sont limitées à 500 mètres et seulement 1 % des individus effectuent un mouvement inter-sites (Nowicki & al., 2005). Toutefois, des études génétiques récentes suggèrent que des individus dispersants peuvent parcourir des distances

bien plus importantes et conserver un fonctionnement efficace de la métapopulation jusqu'à 10 km (Ugelvig et al., 2012). En règle générale, les déplacements de *Phengaris arion* résultent principalement de l'émigration des adultes à la recherche d'un habitat propice, tels que le nectar ou la plante hôte (Nowicki et al., 2005). Ainsi l'espèce a besoin de corridors favorables, il est possible de citer les zones de vies de l'espèces, les bords de route abritant la plante-hôte (Sielezniew et al., 2005), les zones agricoles extensives avec des sources de nectars, les lisières herbacées et les zones abritées des vents dominants comme certains boisements et haies (Soissons et al., 2011). En revanche, les grandes surfaces d'eau et l'urbanisation agissent comme des obstacles. Dans le cas des forêts, Pauler-Fürste et al. (1996) ont montré qu'une forêt de 1 km pouvait être traversée, cependant l'azuré préférera longer les haies et des lisières boisées plutôt que de les traverser.

Tous ces paramètres font que la colonisation de nouveaux territoires est lente dans le temps. En effet, dans le cas d'une recolonisation en Angleterre, Thomas, Simcox, et Clarke (2009) relèvent qu'il a fallu 14 ans à l'espèce pour atteindre une parcelle située à 4,4 km du point d'introduction. Ainsi, les populations peuvent facilement se retrouver isolées, ces populations sont alors très susceptibles d'extinction fortuite sans recolonisation. Dans le cas où cette isolation physique des colonies n'entraîne pas leur extinction, la consanguinité provoquée peut aussi entraîner une réduction de la viabilité de la population (Muggeton et Benham, 1975).

3. *Phengaris arion*, une espèce préoccupante

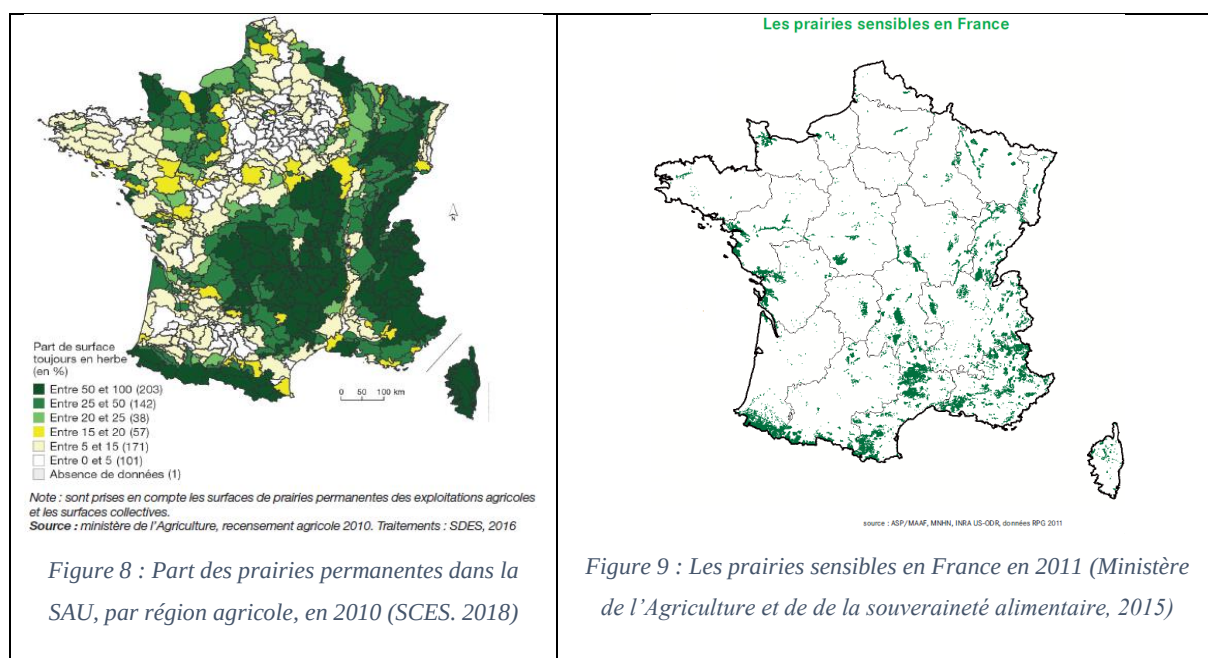
Phengaris arion est une espèce patrimoniale qui présente des intérêts biologiques. Elle est un bon indicateur de préservation du milieu et de la présence d'insectes rares, animaux et végétaux qui bénéficient des mêmes conditions d'habitat (New et al. 1995 ; Barnett & Warren, 1995). Cependant, des menaces comme la fragmentation et la destruction des habitats exercent une forte pression sur l'espèce (Merlet et Houard, 2012). En Europe la disparition de l'espèce a été documentée deux fois, en Angleterre en 1979 (Hayes, 2015 ; Barnett & Warren, 1995) et aux Pays-Bas vers 1964. A cela s'ajoutent un déclin des populations de 50 % entre 1990 et 2005 (Van Swaay, Nowicki, Settele & Van Strien, 2008) qui se poursuit entre 2010 et 2020 par une baisse significative estimée à 80 % (Van Swaay & al. 2022). Ceci lui vaut son classement en Europe et en France d'espèce en danger ainsi qu'en région Pays de la Loire d'espèce vulnérable. Ces observations entraînent la mise en place d'actions en faveur de sa protection.

L'espèce est ainsi inscrite en 1979 à la Convention de Berne et en 2006 dans les Annexes II et IV de la Directive Habitats-Faune-Flore, qui prévoit une évaluation de l'état de conservation de l'espèce en Europe. Le rapport rendu par l'agence Européenne de l'environnement en 2019 décrit un état mauvais, avec notamment une diminution de l'aire de répartition et des populations (EEA, 2019). Au niveau national, une protection s'instaure par son inscription dans l'article 2 de l'arrêté du 23 avril 2007 qui fixe la liste des espèces protégées sur l'ensemble du territoire. Un Plan National d'Actions (PNA) est mis en place de 2010 à 2016, il concerne l'ensemble des espèces françaises du genre *Phengaris*. Il a pour objectif la réalisation d'un état des lieux des connaissances du genre, la détermination des actions prioritaires de préservation à mettre en place ainsi que l'identification des stratégies de conservation envisageables (Dupont, 2010). Pour finir, en 2018, la Direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement (DREAL) Auvergne-Rhône-Alpes, s'est vue confier la rédaction d'un nouveau PNA, décliné sur dix ans, en faveur des papillons de jour (Houard et Jaulin, 2018).

C. Le déclin des prairies et les centrales photovoltaïques

Sous le terme prairie, ce sont de multiples milieux qui sont représentés. Ce sont « des écosystèmes terrestres dominés par une végétation herbacée et arbustive, maintenus par le feu, le pâturage, la sécheresse et/ou des températures glaciales » (Marx, 2022). Ces milieux sont présents dans de nombreuses régions du monde et abriteraient environ 40 % des espèces de plantes terrestres (Dixon & al., 2014). En Europe, la majorité des prairies sont issues d'une action anthropique (Dixon & al., 2014). Après une déforestation, elles ne persistent que parce que le pâturage empêche la fermeture du milieu. Ces prairies anthropiques sont de deux types, elles peuvent être temporaires et subir des actions de semis et labour périodiquement ou permanentes et être non retournées depuis plus de 6 ans. (Farrié, Launay, & Devun, 2012 ; Peyraud, Peeters, & De Vlieghe, 2012 ; Millet, 2018). Dans la suite de ce rapport, l'étude se concentrera sur ces prairies permanentes qui se rapprochent davantage du milieu de vie des papillons et du mode de gestion du sol entre les panneaux photovoltaïques. En France, selon le recensement agricole de 2010, les prairies permanentes représentent 25 % de la Surface Agricole Utile (Bonnet & al., 2013). Parmi ces prairies, plus de la moitié sont uniquement pâturées (57%), les prairies uniquement fauchées ou à double usage représentent 9 % et 34 % (Farrié, Launay & Devun, 2012). Mais celles-ci sont en déclin, des chiffres de Nature France

(2016), précisent que leur surface a diminuée de 7,9 % entre 2000 et 2010 dû à une déprise agricole, souvent remplacées par des lotissements ou des boisements (Nature France, 2016). Ces prairies ne sont pas regroupées équitablement sur le territoire, en effet les plus grandes densités de surface déclarées en prairies permanentes sont localisées dans les zones montagneuses, ainsi qu'en Basse-Normandie et en Lorraine (voir figure 8) (Bonnet & al., 2013). Ceci va affecter les écosystèmes, un rapport de l'Institut national de la recherche agronomique a établi que pour avoir une bonne fonctionnalité des prairies, il fallait qu'elles occupent au minimum 20 % de la SAU d'un territoire (SCES, 2018). L'enjeu actuel est donc la conservation de ces écosystèmes qui contiennent une grande diversité d'espèces, dont certaines inféodées aux habitats prairiaux comme *Phengaris arion*. Ainsi pour faire face à ce déclin, certaines prairies permanentes sont qualifiées de sensibles et imposent des contraintes à l'exploitant évitant la dénaturation du milieu (voir figure 9). Ces prairies sont sélectionnées selon deux critères : être une surface de prairie ou pâturage permanent en 2014, et être présente dans une zone Natura 2000 (Ministère de l'agriculture et de de la souveraineté alimentaire, 2015). Cependant, il semble aussi envisageable d'utiliser de nouveaux écosystèmes pour y préserver les espèces présentes, notamment les centrales photovoltaïques.



Une centrale photovoltaïque est un moyen de production d'électricité industriel qui permet de produire de l'électricité grâce à la lumière du soleil. (EDF, 2021). Dans une centrale photovoltaïque au sol les panneaux solaires couvrent généralement 30 à 50 % de l'emprise total (Institut NégaWatt, 2015 ; Marx, 2022) et l'espace inter panneaux est souvent complété par de la végétation. Cette dernière, pour des raisons de bonne exploitabilité du parc et de sécurité est nécessairement entretenue par pâturage ou par fauchage régulier (Marx, 2022). Ainsi, la création de ces nouveaux écosystèmes en région Pays de la Loire semble pouvoir être une opportunité pour la conservation de *Phengaris arion*. En effet, le milieu d'une centrale photovoltaïque, enherbée et gérée par l'homme, paraît concorder avec le milieu de vie de l'espèce. Cette hypothèse est soutenue par plusieurs rapports indiquant que les centrales photovoltaïques peuvent être favorables à une recolonisation par certains papillons spécialistes des milieux ouverts et ensoleillés (Peschel, R., Peschel, T., Marchand, & Hauke, 2019 ; Guiller et al., 2017). Cependant il convient de nuancer, le milieu anthropisé qu'est une centrale photovoltaïque n'est pas le lieu de vie idéal de l'espèce et son impact est parfois discutable. A travers différentes recherches bibliographiques, les caractéristiques comme le milieu d'implantation, le type de gestion des espaces enherbés et les microclimats engendrés par les panneaux solaires sont apparus comme les principaux leviers déterminants d'un impact positif ou négatif sur *Phengaris arion*.

L'article L. 101-2 du code de l'urbanisme (CU) impose que toutes les nouvelles constructions de centrales photovoltaïques soient en zone « a urbanisé » ou « urbanisé » du PLU (MCTRCT & MTES, 2020), cependant dans les faits il arrive que la construction ait lieu sur des zones naturelles ou agricoles. L'impact lors de l'installation ne sera donc pas le même en fonction du milieu originel, sur un habitat d'origine riche elle aura inévitablement des impacts préjudiciables sur les espèces sédentaires. Inversement, Guiller *et al.* 2017 montre que dans le cas où le milieu d'origine est pauvre, par exemple une carrière d'argile l'installation d'une centrale photovoltaïque peut devenir un lieu intéressant pour certains papillons. Il faut aussi prendre en compte la connectivité de la centrale dans le paysage. Blaydes *et al.* (2021) ont compilés des études sur la question et ont réussi à montrer que plus le paysage tend vers une hétérogénéité d'utilisation des terres plus la richesse et l'abondance des papillons augmente dans la centrale.

La gestion par pâturage ou par fauchage des espaces enherbés joue aussi un rôle important dans le fonctionnement écologique de la centrale. En matière de conservation de biodiversité, la gestion par pâturage est plus intéressante. En effet, une étude de Farruggia *et al.* (2006) réalisée dans le Massif central montre que la richesse spécifique végétale est plus importante dans un système pâturé (68 espèces) que fauché (46 espèces). Ceci s'explique par les caractéristiques du pâturage. Les animaux pâturent de manière sélective les végétaux, ainsi certaines plantes sont broutées systématiquement et disparaissent (*Onobrychis*, *Anthyllis*, *Sanguisorba officinalis*). A l'inverse, d'autres espèces sont délaissées par le bétail, (*Thymus*, *Gentiana*, *Carduoideae*) (Rey, 2017). Il faut ajouter à cela la création d'ouvertures dans le couvert par le piétinement ensuite colonisé par de nouvelles espèces et leur rôle dans la dissémination des graines de certaines espèces (Fischer, Poschlod, & Beinlich, 1996). Tout cela crée alors un assemblage de faciès de différentes communautés végétales, engendrant une plus grande richesse spécifique que dans des systèmes fauchés (Dumont & al., 2007). Ainsi un milieu pâturé, plus hétérogène sera plus favorable aux insectes et à certains papillons (Blaydes & al, 2021 ; Vellot & al., 2020). Il est cependant important de prendre en compte que la pression et le mode de pâturage est variable pour chaque animal, certains sont plus sélectifs que d'autres comme le mouton qui a une forte sélectivité pour les plantes à fleurs (Öckinger, Eriksson, & Smith, 2006). Ainsi mal compris, le pâturage peut avoir des effets négatifs. Une surpâturage excessive peut entraîner une diminution de la diversité des espèces végétales et des insectes dépendant des plantes à fleurs. En fonction de l'espèce brouteuse, de son nombre et de la taille de la parcelle, il est possible de calculer le chargement d'une parcelle, exprimée en UGB/ha

(Delagarde, 2018). La charge impacte inévitablement la biodiversité, il y a aura une plus grande richesse spécifique végétale et un plus grand nombre d'insectes (sauterelles, criquets et papillons) avec des charges plus faibles de l'ordre de 0.7 UGB/ha (Farruggia et al., 2006 ; Wallis De Vries et al., 2007). Pour finir, la mise en pâturage peut se faire de plusieurs façons. Le pâturage libre, cette méthode induit que les animaux restent un temps long sur la même parcelle. Elle permet une économie de temps de gestion mais il peut y avoir un effet de surpâturage. Le pâturage tournant consiste à changer les animaux de parcelle plus ou moins rapidement (en pâturage tournant dynamique tous les jours). Le temps de présence doit être court afin d'éviter la pâture des repousses (Chambre d'agriculture Tarn, 2022). Enfin, Blaydes et al (2021), relèvent que des actions de gestion durant l'été ont des effets négatifs sur les papillons. Il convient donc de bien adapter la gestion afin de faciliter la présence de *Phengaris arion*. Dans ce cas, il semblerait qu'une gestion par pâturage tournant avec une faible charge soit la meilleure option.

Les panneaux, par leurs caractéristiques physiques, peuvent aussi avoir des impacts sur *P. arion*, notamment par la création de microclimats au-dessus et au-dessous de celui-ci. Au-dessus, Lovich et Ennen (2011) relatent des températures significativement plus élevées et des cas de mortalité d'insectes dont des papillons. Un effet îlot de chaleur à l'échelle de la centrale entière est aussi prévisible, selon Barron-Gafford et al. (2016), il est de l'ordre de 3 à 4 °C supplémentaire la nuit. Cette augmentation est comparable à celle mesurée sur un parking de taille similaire utilisé comme site témoin. Les panneaux ont aussi un impact sur la disponibilité en eau, Armstrong et al. (2016) ont ainsi mesuré une précipitation trois fois plus importante sous les panneaux par ruissellement de l'eau sur les cadres de supports. Madej (2020) a trouvé un sol plus humide plus longtemps sous les panneaux, comparé à l'inter rang plus exposé au soleil. Ces observations augmentent la croissance de la végétation et induisent une végétation plus verte sous les panneaux par rapport aux zones ensoleillées (Madej, 2020), créant ainsi plusieurs types de microclimats pouvant être exploités par les papillons et autres insectes comme refuge face à des changements climatiques (Blaydes & al., 2021). Cette plus forte précipitation au-dessous pourrait éventuellement avoir un impact sur la dynamique du papillon, dans leur rapport, Beau, Thirion et Forti (2005) ont remarqués que le taux de survie *P. arion* augmente avec la précipitation et il semble également que la pluie a un impact sur le déclenchement de la nymphose des chenilles au sein des fourmilières. Toutes ces contraintes entraînent une modification des communautés végétales. En effet, certains auteurs relatent une baisse de la diversité végétale sous les panneaux solaires par rapport à l'inter-rang ainsi que la

présence d'une majorité de graminées (Madej, 2020 ; Vellot & al., 2020 ; Armstrong, Ostle, & Whitaker, 2016). Cette modification peut alors impacter les lépidoptères dépendant de la diversité des plantes (Vellot et al., 2020).

L'analyse bibliographique a révélé que les centrales photovoltaïques peuvent potentiellement offrir un habitat favorable pour *Phengaris arion*, une espèce rare et menacée. Les caractéristiques de cet environnement artificiel, notamment la présence de pelouses et de milieux ouverts avec une végétation basse, peuvent offrir des conditions idéales pour la colonisation et la survie de cette espèce. Le milieu pouvant en effet être favorable à ces deux espèces hôtes *Thymus serpyllum* et *Myrmica sabuleti*. Cependant il convient de correctement gérer le milieu et de prendre en compte la connectivité écologique du site et le type de végétation. Un projet lancé par ENGIE et le laboratoire CITERES du CNRS en 2022 a justement pour objectif de transplanter les plantes hôtes de *Phengaris arion* en centrale photovoltaïque et d'étudier sa capacité à coloniser le site. Au jour de la rédaction de ce rapport aucun résultat n'a encore été produit. Mais l'objectif est encourageant, transformer un milieu anthropique en un nouveau lieu de vie favorable à une espèce protégée en introduisant des végétaux favorables. Ceci dans un contexte d'abandon progressif des prairies françaises et couplé à l'augmentation des surfaces allouées aux centrales photovoltaïques au sol. Mais une question persiste concernant l'accessibilité de ces centrales par *Phengaris arion*, qui comme il a été vu est une espèce relativement sédentaire avec des dispersions lentes et limitées. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude, l'objectif sera au travers de différentes méthodes de modélisation d'étudier les potentielles dispersions de *Phengaris arion* dans un contexte où les centrales photovoltaïques au sol sont des lieux d'accueil propices à l'implantation du papillon. Il sera alors possible d'évaluer si ces dernières sont potentiellement un enjeu dans la préservation de l'espèce. Cette étude se placera dans le contexte de la région Pays de la Loire et visera à répondre à la problématique suivante. ***Les centrales photovoltaïques peuvent-elles jouer un rôle dans la conservation de Phengaris arion ?***

II. Matériel et méthode

A. Une méthodologie utilisant la notion de perméabilité des milieux

En France, la Trame verte et bleue (TVB) traduit le concept de réseau écologique, les méthodes les plus récentes pour étudier ces réseaux se basent sur la notion de perméabilité des milieux, c'est-à-dire à quel point un milieu naturel est favorable au déplacement de l'espèce considérée. En se basant sur cette notion, plusieurs méthodes ont été développées comme les aires potentielles de dispersion (corridors surfaciques) et les chemins de moindre coût (corridors linéaires). Ces deux méthodes ont été retenues dans le cas de cette étude. Deux logiciels seront utilisés. Premièrement le plugin BioDispersal, dédié à QGIS, le plugin a été développé par l'UMR TETIS et L'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA) sous la supervision du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. Son utilité première est de contribuer dans la démarche de préservation de la biodiversité. Sa méthodologie permet d'évaluer les aires potentielles de dispersion des espèces en considérant la perméabilité des différents milieux. Puis dans un second temps le logiciel Graphab (Foltête et al, 2021) qui toujours en se basant sur la perméabilité des milieux, permet de construire des graphes paysagers et ainsi de calculer des métriques permettant de caractériser l'état d'un réseau écologique (UMR TETIS, s.d.).

L'utilisation de ces outils a été soigneusement planifiée en intégrant des paramètres spécifiques afin d'assurer la précision et la pertinence des résultats obtenus. La couche d'emprise a été définie comme la région Pays de la Loire, avec un tampon de 5 kilomètres pour englober les zones environnantes et capturer l'influence potentielle des régions avoisinantes. La résolution a été fixée à 50 mètres pour garantir une représentation détaillée du paysage tout en gardant des calculs réalisables par ordinateur. En ce qui concerne la projection, la norme EPSG :2154 – RGF93 / Lambert-93 a été sélectionnée pour maintenir la cohérence spatiale des données et faciliter la comparaison avec d'autres travaux de recherche ou bases de données géospatiales. Les données utilisées sont des vecteurs, l'occupation des sols est extraite de la couche Corine Land Cover de 2012 mise à disposition par le Ministère de la transition écologique ; les emprises des centrales photovoltaïques produites par la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) ; les localisations d'observation de *Phengaris arion* proviennent du programme OpenObs de l'inventaire national du patrimoine naturel ; enfin une couche regroupant les éléments fragmentant (routes et chemins de fer)

réalisés dans le cadre du Schéma Régionale de Cohérence Écologique (SRCE) par le DREAL. Un récapitulatif des données utilisées est présent en annexe 1 et des cartographies de ces données sont disponibles en annexes 2,3,4 et 5.

Comme évoqué précédemment le plugin BioDispersal se base sur la perméabilité des milieux. En fournissant en entrée les différentes occupations du sol associées à des indices de perméabilité, le plugin crée une couche dite de friction. Ces coefficients de perméabilité sont définis arbitrairement à partir de la bibliographie, ils doivent donc être calibrés, il peut être nécessaire aussi de produire plusieurs scénarios afin d'évaluer différentes perspectives et de limiter les erreurs. Une fois que la matrice de perméabilité est établie, l'objectif est de créer une cartographie des zones potentielles de dispersion. Cela implique d'identifier les espaces accessibles à partir des réservoirs de biodiversité, en utilisant la notion de coûts cumulés. Pour cela, une capacité maximale de dispersion pour l'espèce est définie en se basant sur les déplacements maximums observés dans la bibliographie. Cette capacité maximale de dispersion correspond à un quota de points dont dispose l'espèce, celle-ci perd plus ou moins de points en traversant les milieux plus ou moins perméables. Pour calculer celle-ci la relation suivante est utilisée :

$$\text{Capacité maximale de dispersion} = (\text{capacité en mètres} * \text{coefficient milieu}) / \text{résolution}$$

Dans cette équation, le coefficient de milieu équivaut à 1 en admettant que le papillon effectue généralement ses déplacements dans le milieu le plus favorable. La résolution définit ci-dessus est de 50 mètres et la capacité en mètres correspond aux différents scénarios. Le fonctionnement de BioDispersal est résumé et illustré dans la figure 10, ci-dessous.

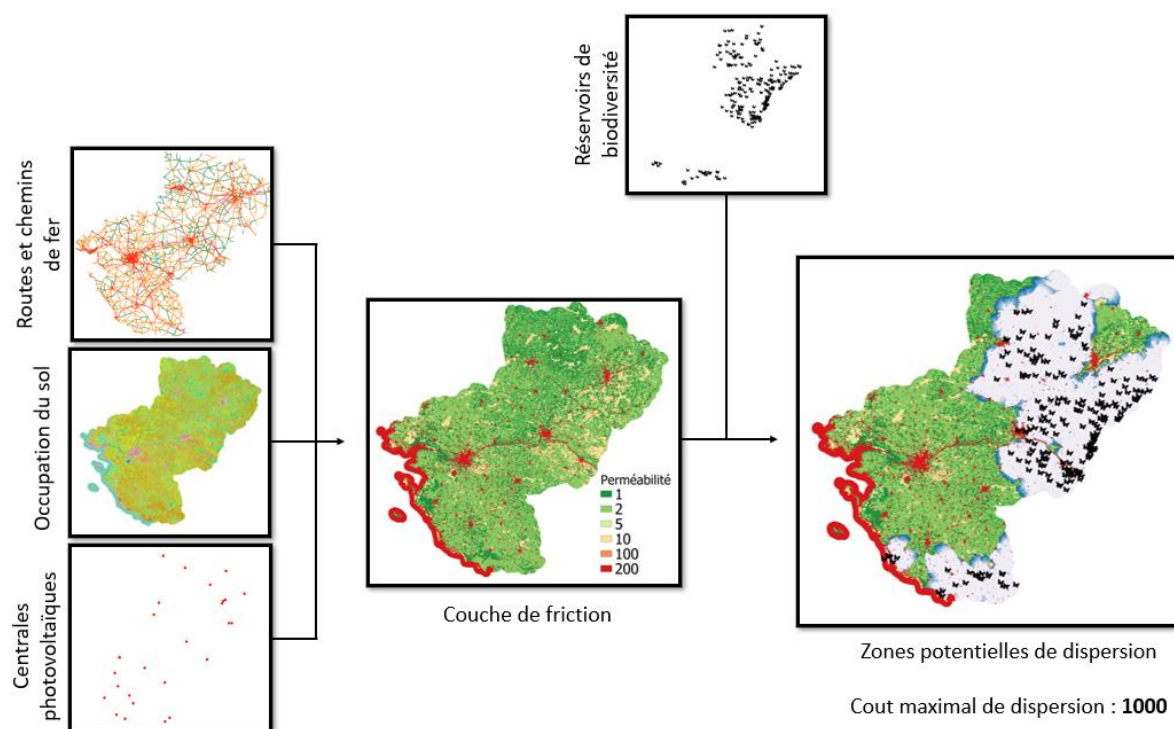


Figure 10 : Schéma illustrant le fonctionnement de BioDispersal

Concernant le fonctionnement de Graphab, à partir de la couche de friction créée avec BioDispersal et des réservoirs de biodiversité (observation de *Phengaris arion* ou habitats favorables, par exemple) le logiciel produit les chemins de moindre coût possible. Là encore il convient de définir un coût maximal de dispersion. A partir de ces chemins (liens) de moindre coût créés il est possible de calculer de nombreuses métriques qui permettent ensuite notamment d'évaluer les connectivités. Le fonctionnement de Graphab est résumé et illustré dans la figure 11, ci-dessous.

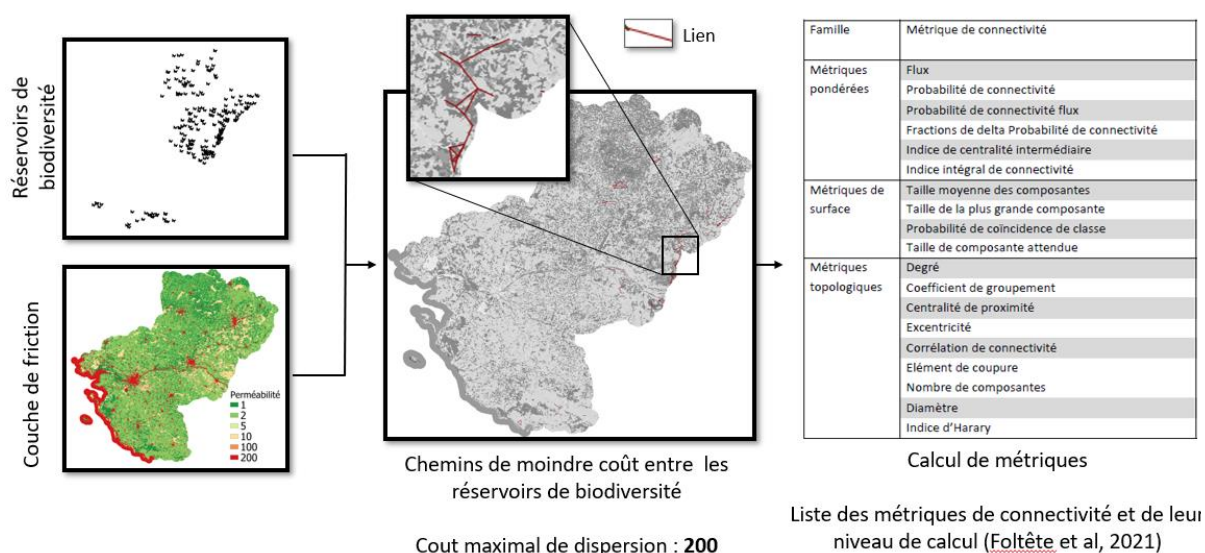


Figure 11 : Schéma illustrant le fonctionnement de Graphab

Il a été évoqué plus haut que l'utilisation de différents scénarios de modélisation permettait de limiter les erreurs des choix de la perméabilité. Il a donc proposé ici d'utiliser cette méthode en générant 16 scénarios, non pas appliqués à la perméabilité, mais à la capacité maximale de dispersion. La méthodologie consiste à créer deux couches : « AVANT » et « APRES ». Elles correspondent à l'occupation du sol respectivement avant l'installation des centrales photovoltaïques et après l'installation des centrales photovoltaïques. La perméabilité est donc similaire sur ces deux couches exceptées aux emplacements des centrales photovoltaïques. Dans chacune de ces couches, les modélisations sont réalisées sur 1 an « N+1 » et sur 5 ans « N+5 », cela permet d'étendre l'étude dans le temps et de potentiellement mieux évaluer l'enjeu des centrales photovoltaïques dans la dispersion de *Phengaris arion*. Ensuite, la modélisation est réalisée selon différents scénarios faisant varier la capacité maximale de dispersion. Pour cela, il est nécessaire de se baser sur la bibliographie. Il a été vu qu'une grande majorité des dispersions sont limitées à 500 mètres (Nowicki & al., 2005), que pour que les échanges soient conséquents la distance entre les sites doit être inférieure à 3 km (Dupont, 2010), que le déplacement maximal observé est de 5,7 km (Dupont, 2010) et enfin que des études génétiques récentes suggèrent une dispersion possible jusqu'à 10 km (Ugelvig et al., 2012). Ainsi pour les modélisations, il a été défini quatre scénarios allant de l'optimiste au réaliste, ayant pour valeur 10000 mètres, 5700 mètres, 3000 mètres et 500 mètres, soit des capacités maximales de dispersion de « 200 », « 114 », « 60 » et « 10 ». Le tableau 1 ci-dessous récapitule les 16 scénarios.

Type d'occupation de sol	Durée de la modélisation	Coût maximal de dispersion
AVANT	N+1	10
		60
		114
		200
	N+5	10
		60
		114
		200
APRES	N+1	10
		60
		114
		200
	N+5	10
		60
		114
		200

Tableau 1 : Différentes modélisations réalisées

B. Définition des indices de perméabilité

Les couches « AVANT » et « APRES » se différencient par un changement de la couche dite de friction. Ce changement influence la dispersion des papillons, ainsi afin de quantifier ces changements, des indices de perméabilité sont attribués pour les différents milieux. Il convient dans cette partie d'attribuer à chaque élément de l'occupation du sol une valeur de perméabilité.

Après étude de la bibliographie, il est proposé les indices suivants. Le tableau 2 ci-dessous reprend les choix finaux pour les indices de perméabilité de la couche occupation du sol.

	Typologie Corine Land Cover	Perméabilité
Milieux imperméables à l'espèce	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	200
	Chantiers	
	Tissu urbain continu	

	Marais maritimes	
	Aéroports	
	Extraction de matériaux	
	Zones portuaires	
	Estuaires	
	Tissu urbain discontinu	
	Mers et océans	
	Plages, dunes et sable	
	Equipements sportifs et de loisirs	
	Plans d'eau	
	Zones intertidales	
	Espaces verts urbains	
	Décharges	
	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	
	Cours et voies d'eau	
Milieu perméable mais non favorable	Cultures annuelles associées a des cultures permanentes	2
	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	
	Terres arables hors périmètres d'irrigation	
	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	
	Vergers et petits fruits	10
	Vignobles	
	Foret et végétation arbustive en mutation	
	Forêts de feuillus	
	Forêts mélangées	
	Forêts de conifères	
	Marais salants	5
	Marais intérieurs	
	Tourbières	
Milieux favorables à l'espèce	Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	1
	Pelouses et pâturages naturels	
	Landes et broussailles	

Tableau 2 : Indice de perméabilité des habitats Corine Land Cover pour les scénarios « AVANT » et « APRES »

Concernant la perméabilité des centrales photovoltaïques dans le scénario « APRES », il est fait l'hypothèse que toutes les centrales ont des caractéristiques favorables à *Phengaris arion* (gestion, hauteur de l'herbe, présence des espèces hôtes) ainsi la perméabilité est toujours de 1. Ceci reste en lien avec le projet lancé par ENGIE et le laboratoire CITERES du CNRS qui a pour objectif de transplanter les plantes hôtes de *Phengaris arion* en centrale photovoltaïque. En revanche dans le scénario « AVANT », il est nécessaire d'analyser le site avant l'implantation. Pour cela deux informations sont prises en compte, l'état du site avant la construction (disponible dans les données fournies par la DREAL) et des photographies aériennes avant et après l'implantation obtenue sur Géoportail (voir annexe 6). Les friches industrielles, limitrophes aux villes semblent être des milieux imperméables tout comme les sites

miniers et les sites pollués. Les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) semblent être un lieu plutôt favorable au papillon. En effet lors de la fermeture d'une ISDND un enherbement est souvent réalisé, le milieu est alors relativement perméable à *Phengaris arion*. Ceci est confirmé par l'analyse de photographie, toutes les ISDND sont enherbées avant l'implantation. Pour ce qui est du terrain militaire et des zones d'activité il semblerait qu'elles étaient aussi recouvertes par de la végétation basse. Le tableau 3 ci-dessous reprend les choix finaux pour les indices de perméabilité de la couche centrale photovoltaïque.

Type de site	Perméabilité AVANT	Perméabilité APRES
Friche industrielle	200	1
Site pollué	200	1
Site minier	200	1
Gravière	100	1
Terrain militaire	5	1
Zone d'activité	5	1
ISDND	5	1

Tableau 3 : Indice de perméabilité des centrales photovoltaïques

Concernant l'indice de perméabilité des routes et des lignes de chemin de fer, il se base sur le SRCE. Elles sont classées en fonction de leur potentiel fragmentant (forte : 1, moyenne : 2 et faible : 3) disponible ci-dessous (tableau 4).

ELEMENTS	DESCRIPTION	NIVEAU DE FRAGMENTATION
Autoroutes	Autoroute	1
LGV	Ligne à Grande Vitesse des Réseaux Ferrés de France (RFF). Dans la région, il s'agit des lignes Paris – Le Mans – Rennes et Le Mans – Sablé-sur-Sarthe	1
Voies ferroviaires clôturées	Toutes les lignes disposant d'une clôture (RFF)	1
Trafic de + >10 000 v/j	Trafic routier de la DREAL Pays de la Loire (en nombre de véhicule par jour) assurant des liaisons à très fort trafic.	1
Trafic compris entre 2 500v/j et 10 000 v/j	Trafic routier de la DREAL Pays de la Loire (en nombre de véhicule par jour) assurant des liaisons à fort trafic.	2
Voies ferrées non strictement LGV mais utilisées par TGV et très fréquentées	- Voies ferrées à fort trafic (RFF) (Le Mans, Angers, Nantes Le Mans Rennes et Angers, Saumur, Tours)	2
Trafic compris entre 1 000 v/j et 2 500 v/j	Trafic routier de la DREAL Pays de la Loire (en nombre de véhicule par jour) assurant des liaisons à trafic modéré.	3

Tableau 4 : Hiérarchisation des ouvrages linéaires en fonction de leur potentiel de fragmentation (DREAL, 2015)

Il est difficile de trouver des études faisant état de proportions d'insectes tués en fonction de la taille de la route. En prenant tous les animaux en compte, une étude de Van Der Gelder (1973), définit qu'en dessous de 2500 véhicules par jour, 50 % des animaux réussissent leur traversée de la route et qu'au-dessus de 2500 le nombre d'animaux tués ou repoussés dépasse les 50 %. En se concentrant sur les insectes, Rao et Girish (2007), remarquent dans leur étude qu'à partir de 60 km/h les insectes subissent de graves chocs lorsqu'ils sont heurtés les faisant tomber sur la route et leur laissant peu de chances de survie. Ainsi, en se basant sur les informations dans le SRCE et des informations recueillies dans la bibliographie il est possible de définir les indices de perméabilité de la couche des éléments fragmentant. Regroupés dans le tableau 5 ci-dessous.

	Eléments fragmentant	Perméabilité
Eléments fragmentant	Eléments de fragmentation niveau 1	200
	Eléments de fragmentation niveau 2	200
	Eléments de fragmentation niveau 3	100

Tableau 5 : Indice de perméabilité des éléments fragmentant

III. Résultats

A. Méthode des aires potentielles de dispersion

Dans un premier temps, les modélisations des dispersions pour les seize scénarios sélectionnés ont été réalisées avec le plugin Biodispersal de Qgis. Les cartographies n'apportant rien à l'analyse sont uniquement mis à disposition en annexes 7 et 8, seul les scénarios 200 sont représentés (figure 12) dans un objectif d'illustration.

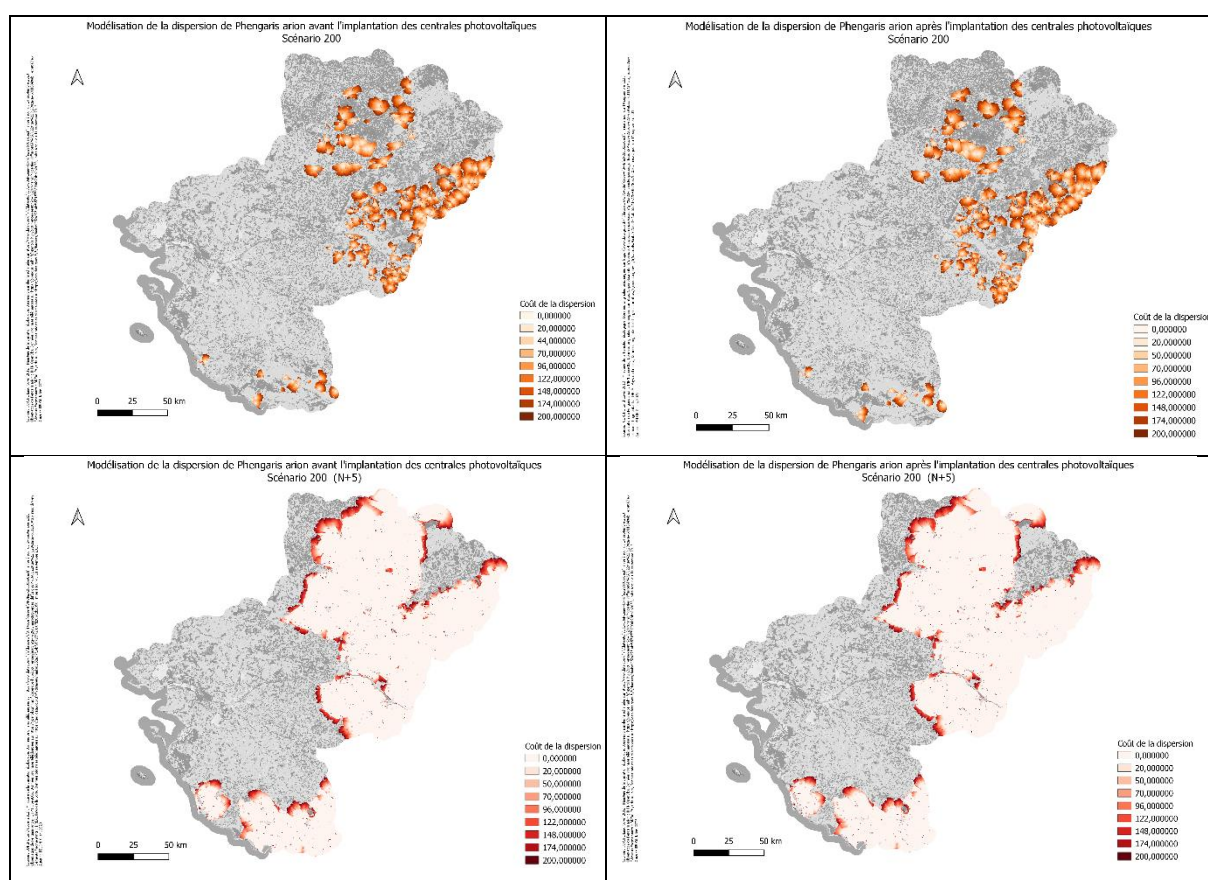


Figure 12 : Modélisation des dispersions de *Phengaris arion* pour le scénario 200 (Pelon, 2024)

Le scénario 200, modélise la dispersion la plus optimiste, ainsi les modélisations ci-dessus sont celles qui permettent le plus les interactions entre les centrales photovoltaïques et *Phengaris arion*. Cependant d'un point de vue cartographique l'impact AVANT/APRES l'installation des centrales photovoltaïques, est difficilement discernable. Pour chiffrer une potentielle différence, il est possible de calculer les aires obtenues à la fin de la modélisation des scénarios. Dans le cas du scénario 200 l'aire de dispersion atteint 4539,385 km² soit 11,96 % du territoire avant l'implantation des centrales photovoltaïques et 4541,275 km² soit 11,97 % après l'installation

des centrales. Une différence donc de moins de 2 km² entre les deux scénarios. De faibles différences sont aussi observables dans les autres scénarios (voir tableau 6). Les scénarios à N+5 ont des différences de recouvrement de la dispersion encore plus faibles (voir tableau 7).

1 ans		Scénario 200	Scénario 114	Scénario 60	Scénario 10
AVANT Installation centrales	Surface atteinte par la dispersion (km ²)	4539,385	2384,74	952,605	47,4025
	Recouvrement de la zone d'étude (%)	11,96%	6,28%	2,51%	0,12%
APRES Installation centrales	Surface atteinte par la dispersion (km ²)	4541,275	2386,6175	953,8675	47,4025
	Recouvrement de la zone d'étude (%)	11,97%	6,29%	2,51%	0,12%
Différence (km ²)		1,89	1,88	1,26	0,00

Tableau 6 : Surface atteinte par la dispersion en 1 ans « N+1 » en fonction de chaque scénario (Pelon, 2024)

5 ans		Scénario 200	Scénario 114	Scénario 60	Scénario 10
AVANT Installation centrales	Surface atteinte par la dispersion (km ²)	17139,58	11484,115	6080,8225	672,43
	Recouvrement de la zone d'étude (%)	45,17%	30,26%	16,03%	1,77%
APRES Installation centrales	Surface atteinte par la dispersion (km ²)	17139,73	11485	6081,51	673,3675
	Recouvrement de la zone d'étude (%)	45,17%	30,27%	16,03%	1,77%
Différence (km ²)		0,15	0,89	0,69	0,94

Tableau 7 : Surface atteinte par la dispersion en 5 ans « N+5 » en fonction de chaque scénario (Pelon, 2024)

La relation directe entre les modélisations et les centrales peut ensuite être observée, ceci permet de se rendre compte des centrales entrant en jeu ou non dans la dispersion et de comparer l'impact du changement d'occupation du sol entre « AVANT » et « APRES ». Ceci est illustré par les tableaux 8 et 9 de présence/absence.

	Scénario 10		Scénario 60		Scénario 114		Scénario 200	
	AVANT	APRES	AVANT	APRES	AVANT	APRES	AVANT	APRES
Ferme solaire le Gravier								
Ex ETAMAT Vaas								
Centrale photovoltaïque de Distre								
Centrale photovoltaïque Saint Fraimbault de Prieres								

Centrale photovoltaïque de Foussais-Payre								
Centrale photovoltaïque de Fontenay-le-Comte								
CENTRALE SOLAIRE Mine de Rouez								
TAL-GUENES								
Centrale solaire Bel Orient								
Ferme solaire Les Caves								
Centrale photovoltaïque Livre-la-Touche								
Gare de triage du Mans								
Centrale photovoltaïque d'Allone								
Centrale solaire Fille Energie								
Centrale photovoltaïque d'Avrille								
Soleil de Tougas Indre								
Ferme solaire les 6 pièces								
Centrale photovoltaïque Le Mans								
Centrale photovoltaïque de la Petite Vicomte								
GIV SOLLEV								
Ker Poire sur Vie								
LYR BASBAR								
Parc solaire ev11								
Soleil de Tougas St Herblain								
Parc photovoltaïque de la Commanderie								
Parc photovoltaïque de la Commanderie								
Centrale photovoltaïque de l'Ecarpiere								
Centrale photovoltaïque de Fougerolles-du-Plessis								
Centrale solaire de Midi Sigma								

Tableau 8 : Présence (vert) absence (rouge) des centrales photovoltaïques dans les différentes modélisations à N+1 (Pelon, 2024)

	Scenario 10		Scenario 60		Scenario 114		Scenario 200	
	AVANT	APRES	AVANT	APRES	AVANT	APRES	AVANT	APRES
Ferme solaire le Gravier								
Ex ETAMAT Vaas								
Centrale photovoltaïque de Distre								
Centrale photovoltaïque Saint Fraimbault de Prieres								
Centrale photovoltaïque de Foussais-Payre								
Centrale photovoltaïque de Fontenay-le-Comte								
CENTRALE SOLAIRE Mine de Rouez								
TAL-GUENES								
Centrale solaire Bel Orient								
Ferme solaire Les Caves								
Centrale photovoltaïque Livre-la-Touche								
Gare de triage du Mans								
Centrale photovoltaïque d'Allone								
Centrale solaire Fille Energie								
Centrale photovoltaïque d'Avrille								
Soleil de Tougas Indre								
Ferme solaire les 6 pièces								

Centrale photovoltaïque Le Mans								
Centrale photovoltaïque de la Petite Vicomte								
GIV SOLLEV								
Ker Poire sur Vie								
LYR BASBAR								
Parc solaire ev11								
Soleil de Tougas St Herblain								
Parc photovoltaïque de la Commanderie								
Parc photovoltaïque de la Commanderie								
Centrale photovoltaïque de l'Ecarpiere								
Centrale photovoltaïque de Fougerolles-du-Plessis								
Centrale solaire de Midi Sigma								

Tableau 9 : Présence (vert) absence (rouge) des centrales photovoltaïques dans les différentes modélisations à N+5 (Pelon, 2024)

Que ce soit dans le scénario « AVANT » ou « APRES », le coût maximal de dispersion fixé à 500 mètres n'atteint aucune centrale photovoltaïque sur 1 an. Toujours pour le scénario sur 1 an, seulement 2 centrales entrent en jeu au maximum, il s'agit du Gravier et Etamat Vaas. Sur 5 ans ce sont au maximum 10 centrales qui sont touchées par le scénario 200, ceci montre tout l'intérêt d'étendre la modélisation dans le temps. Dans tous les scénarios possibles, la modélisation dans l'occupation du sol « APRES » ne fait jamais intervenir moins de centrales photovoltaïques que la modélisation « AVANT ».

Une dernière information pouvant aider à comprendre les mécaniques en place lors de la dispersion est la surface de la centrale, elle est donc illustrée dans le tableau 10 ci-dessous.

Nom	Surface (Ha)
Distré	8
Gare de triage du Mans	33
LE MANS ENERGY 2	12,42
Centrale solaire Fillé Energie	22,4972
Centrale photovoltaïque de Foussais-Payré	7,716
Ferme solaire Les Caves	6,82
AVR-CHEQUI	5,688
Centrale photovoltaïque Livré-la-Touche	10,5
Soleil de Tougas Indre	13,4904
Ferme solaire les 6 pièces	17,7552
Ferme solaire le Gravier	17,9
Centrale photovoltaïque Le Mans Métropole Energy 1	21,7258
GIV-SOLLEV	18,3
Ker Poiré sur Vie	30,7885
TAL-GUENES	21,8528
LYR-BASBAR	22
Centrale solaire Bel Orient	47,16

Centrale photovoltaïque Saint-Fraimbault-de-Prières	38,8
PARC SOLAIRE EV11	58,969
Soleil de Tougas St Herblain	70,8776
Parc photovoltaïque de la Commanderie	8
Parc photovoltaïque de la Commanderie	10
Centrale photovoltaïque de l'Ecarpière	22,8
CENTRALE SOLAIRE Mine de Rouez	29,87
Ex ETAMAT Vaas	24,6
Centrale photovoltaïque de Fontenay-le-Comte	29,117
Centrale photovoltaïque de Fougerolles-du-Plessis	11,6182
Centrale solaire de Midi Sigma	12

Tableau 10 : Surface en hectare des différentes centrales photovoltaïques (Pelon, 2024)

B. Méthode des chemins de moindre coût

Le logiciel Graphab permet ensuite d’approfondir l’analyse. Il se base sur la théorie des graphes qui fait rentrer en jeu deux entités, les nœuds (ici les observations de *Phengaris arion*) et les liens (les corridors écologiques entre ces nœuds). Dans cette étude, le lien symbolise la capacité de *Phengaris arion* à effectuer le déplacement entre deux nœuds/taches dans le scénario 200. C’est-à-dire qu’aucuns liens ne seront créés si la distance déplace le coût de dispersion de 200 et ce lien sera le chemin de moindre coût. Ceci permet ensuite de calculer des métriques avancées qui permettent de qualifier et quantifier le réseau écologique et ainsi l’impact des centrales photovoltaïques. La connectivité équivalente (EC), indique la quantité d’habitat atteignable. Elle tient compte de la surface d’habitat total et des connexions entre les tâches d’habitat. L’unité correspond à l’unité des capacités des taches. Il s’agit d’une valeur un peu abstraite dans sa compréhension, mais son utilisation est relativement aisée. En comparant la variation de la valeur entre avant et après l’aménagement, il est possible d’affecter un pourcentage de gain de connectivité.

Dans un premier temps, l’étude se concentre sur la connectivité entre les lieux d’observation de *Phengaris arion*. Si cette connectivité est impactée, cela signifie que le changement d’occupation du sol des centrales photovoltaïques en est la cause, car c’est l’unique différence entre les scénarios « AVANT » et « APRES ». Cela permet donc à la fois de noter de la présence des centrales dans la dispersion, mais aussi d’un quelconque gain de connectivité. Les résultats sont illustrés ci-dessous par la figure 13 et le tableau 11.

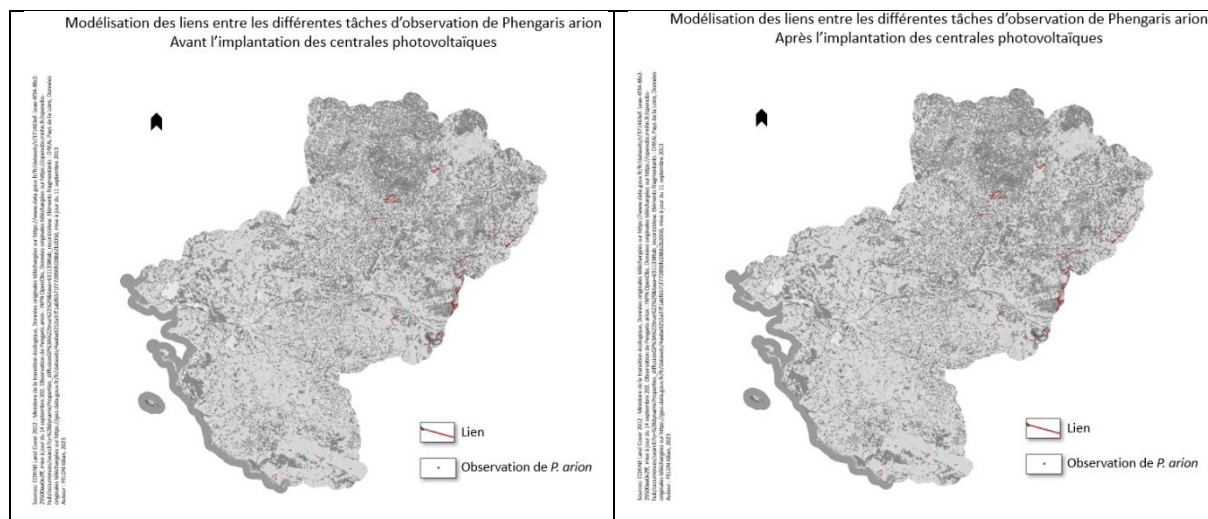


Figure 13 : Modélisation des liens entre les taches d'observation de *Phengaris arion* (Pelon, 2024)

	AVANT	APRES	Gain de connectivité (%)
10	125706,542249798	125706,542249798	0,000000000
60	133186,027523977	133186,027715312	0,000000001
114	139883,256968995	139883,274130437	0,000000123
200	148731,006167387	148731,115860483	0,000000738

Tableau 11 : Connectivité équivalente entre les taches de présence de *Phengaris arion*, avant et après l'implantation des centrales photovoltaïques (Pelon, 2024)

Dans un second temps, il est possible de remplacer le lieu d'observation de *Phengaris arion* par les habitats favorables de l'espèce, comprenant les prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole, les pelouses et pâturages naturels et les landes et broussailles (voir annexe 9). Cette modélisation permet plus concrètement d'étudier la place des centrales photovoltaïques dans des corridors écologiques potentiels et d'étudier à l'échelle de la région entière en s'affranchissant des observations de *Phengaris arion*. Les résultats sont illustrés ci-dessous par la figure 14 et le tableau 12.

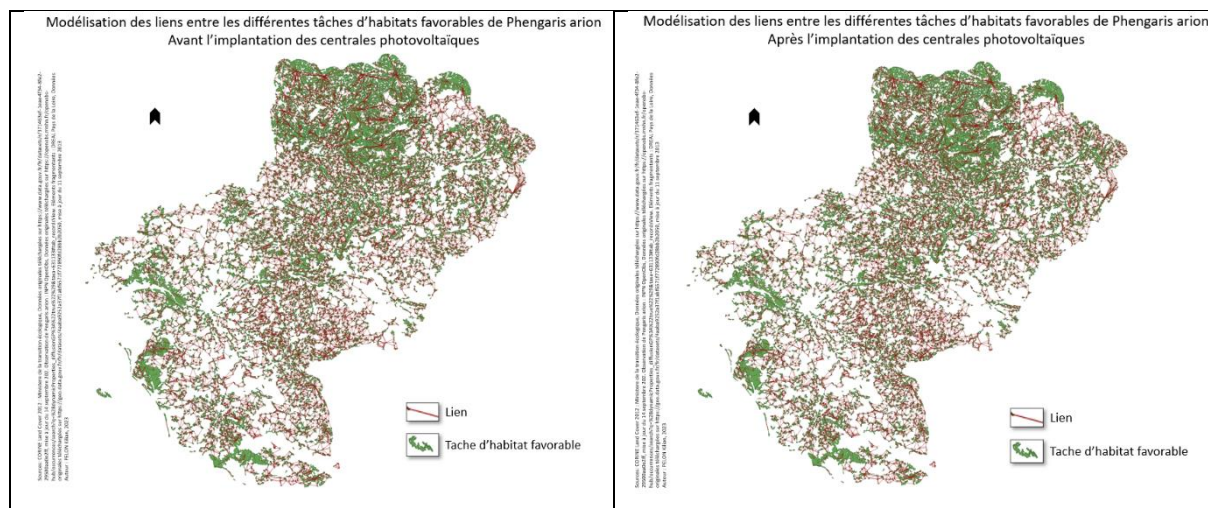


Figure 14 : Modélisation des liens entre les taches d'habitats favorables de *Phengaris arion* (Pelon, 2024)

	AVANT	APRES	Gain de connectivité (%)
10	436595140,22436200	436595578,04967400	0,00000100
60	530177267,79094600	530178883,65406600	0,00000305
114	558102709,76921700	558104524,35431000	0,00000325
200	588755660,83602700	588757651,98688800	0,00000338

Tableau 12 : Connectivité équivalente entre habitats favorables de *Phengaris arion*, avant et après l'implantation des centrales photovoltaïques (Pelon, 2024)

Les cartographies (figures 13 et 14) permettent de représenter visuellement cependant il est difficile de discerner des variations entre avant et après l'installation des centrales. Les tableaux 11 et 12, qui représentent la connectivité équivalente, permettent en revanche d'illustrer une évolution. Dans tous les scénarios, l'implantation de centrales photovoltaïques provoque un gain de connectivité que ce soit entre les individus observés ou entre les milieux favorables. Seul le scénario 10 créant des liens entre les observations de *P. arion* ne provoque aucun gain de connectivité, cela est dû au fait qu'une centrale ne peut pas être entre deux individus espacés de moins de 500 mètres. Les pourcentages associés aux gains de connectivité semblent particulièrement faibles et les plus gros gains de connectivité sont dans le cas avec les habitats favorables.

IV. Analyse

L'analyse des résultats révèle que la surface recouverte par la dispersion de *Phengaris arion* est relativement similaire, que ce soit avant ou après l'implantation des centrales photovoltaïques. Cependant, cette similitude apparentée dissimule des nuances, il est possible

d'observer cela par le changement de surface recouvert « AVANT » / « APRES ». Celle-ci augmente plus le coût maximal de dispersion augmente. Dans le scénario 3000 mètres de dispersion, la différence de surface avant/après est de 126 hectares, dans le scénario 5700 mètres elle est de 188 hectares et pour finir dans le scénario 10000 mètres elle est de 189 hectares. En revanche, dans le scénario où l'animal peut se disperser de 500 mètres la différence est de 0 hectare, les deux surfaces sont équivalentes. Cette observation est cohérente car aucune centrale photovoltaïque n'entre en jeu. En parallèle, lorsqu'une différence est marquée, les centrales photovoltaïques qui entrent en jeu dans la modélisation sont les mêmes quelques soit la capacité de dispersion du papillon. Le scénario « AVANT » ne comprend que la ferme solaire le Gravier, alors que le scénario « APRES » ajoute la centrale Ex ETAMAT Vaas. Cette centrale de 24,6 hectares semble alors jouer un rôle clé, favorisant la dispersion de *Phengaris arion*, car il s'agit de l'unique facteur justifiant les gains de surface de dispersion. Ceci s'explique par les coefficients de friction qui lui ont été attribués, anciennement il s'agissait d'un site pollué non favorable au papillon, le coefficient de friction qui lui était attribué était donc de 200. Comme il est observable sur la figure 15 ci-dessous, représentant le scénario 200, les 189 hectares supplémentaire se répartissent sur la surface de la centrale et sur des terres au nord-est de la centrale.

Ainsi seulement deux centrales entrent en jeu dans les modélisations de dispersion proposées dans ce rapport. Pour contrer ce manque de données, il a été choisi d'étendre sur plusieurs années la dispersion. Nous remarquons que le passage à un horizon de cinq ans révèle une dispersion maximale pour le scénario dispersion de 5700 mètres et non pour celui à 10000 mètres, les différences entre les situations « AVANT » et « APRES » sont aussi moins marquées avec un plafond à 89 hectares et enfin les centrales du scénario « AVANT » sont parfois colonisées malgré leur imperméabilité présumée. Ces trois observations sont une des limites de cette étude et les signes d'une erreur dans la modélisation. Les milieux souhaités être imperméable ont un indice de perméabilité de 200 correspondants à la capacité de dispersion maximale dans le scénario le plus optimiste. Cependant, lorsque la modélisation est relancée à partir des lieux colonisés par la génération précédente, le papillon arrive à coloniser une partie des zones censées être imperméables. Dans le cas où l'étude serait reconduite, il faudrait pour tous les milieux strictement imperméables définir un coefficient de friction élevé voire exagéré pour s'assurer qu'il soit infranchissable. Dans le cas de cette étude, les observations faites sur 5 ans sont difficilement interprétables, car les résultats du scénario « AVANT » sont erronés. Il est cependant possible de remarquer que dans le scénario « APRES », les centrales qui entrent en jeu sont plus nombreuses. Il est possible d'en dénombrer 10 pour le scénario 200. En se concentrant sur la distribution géographique il est possible de se rendre compte qu'elle est

hétérogène, la distribution se concentre principalement à l'est et au sud. Même la dispersion la plus optimiste à 10000 mètres, n'atteint pas la Loire Atlantique et le nord de la Vendée. Ceci est dû à la localisation des observations préexistantes de *Phengaris arion* et des habitats favorables majoritairement dans le sud-est.

En incorporant la théorie des graphes, l'évaluation de la connectivité révèle un impact marginal des centrales photovoltaïques. Les gains de connectivité entre « AVANT » et « APRES » l'aménagement se révèlent minimes, avec des pourcentages de l'ordre de $10^{(-6)}$ % pour les habitats et $10^{(-7)}$ % pour les liens entre individus observés. Cette observation s'explique par la facilité relative à contourner les centrales et à la différence de perméabilité de centrales parfois peu différentes entre avant et après. Un exemple est observable sur la centrale photovoltaïque le Gravier (voir figure 16), avant l'implantation de la centrale l'indice de perméabilité du site était de 5 ainsi le chemin de moindre coût la contournait. Après l'installation, le chemin de moindre coût passe au travers de la centrale, mais le lien n'est pas vraiment modifié car la centrale a une trop petite surface pour créer réellement un obstacle pour le lien. Ainsi dans ce cas, il y a bien un gain dans la connectivité, mais celui-ci est relativement faible.

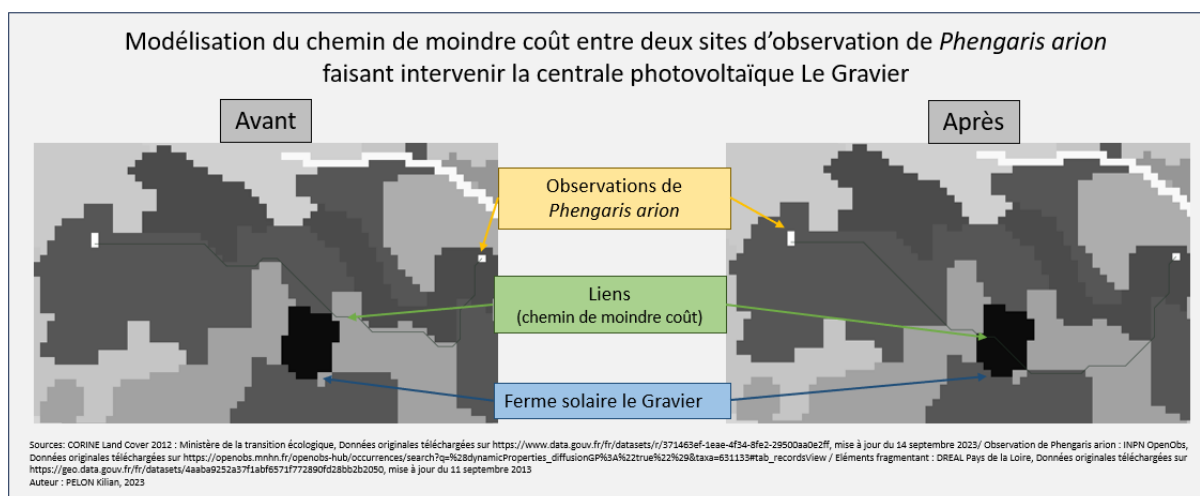


Figure 16 : Modélisation du chemin de moindre coût entre deux sites d'observation de *Phengaris arion* faisant intervenir la centrale photovoltaïque Le Gravier (Pelon, 2024)

V. Limites

Plusieurs limites émergent à la conclusion de cette étude. Tout d'abord, des limites sont inhérentes aux couches sources utilisées. La représentation des occupations des sols à travers la couche Corine Land Cover, bien que généralement précise, néglige certains milieux inférieurs à 25 hectares, et les cours d'eau de moins de 50 mètres de largeur ne sont pas pris en compte. Aussi, cette typologie simplifiée des milieux facilite son utilisation mais engendre également une perte d'information sur le type précis de milieux. Ainsi il a parfois été difficile de rattacher ces milieux aux habitats favorables de *Phengaris arion*. De plus, la couche dédiée aux éléments fragmentant le paysage, tels que les routes et les chemins de fer, se concentre principalement sur la faune en général, avec peu d'études spécifiques sur les insectes. Les petites routes sont également omises des modélisations, ce qui complique la recherche d'études pertinentes sur le sujet. Les passages à animaux installés afin de permettre à la faune de se déplacer au-dessus d'importants éléments fragmentant ne sont pas non plus pris en compte, transformant certaines routes en véritables barrières dans la modélisation. Les cours d'eau n'ont pas été pris en compte dans cette étude car les moyens techniques ne permettaient pas de distinguer les largeurs des cours d'eau et la bibliographie manquait à ce sujet. Il aurait été peu réaliste que tous les cours d'eau aient le même impact sur la dispersion du papillon quelle que soit la largeur de celui-ci.

Deuxièmement, des limites sont observées dans la modélisation elle-même, notamment la contrainte temporelle sur cinq ans. De plus, l'attribution des indices de perméabilité, bien que basée sur un examen approfondi de la littérature, demeure relativement subjective. Enfin, la décision de baser la modélisation sur l'observation de *Phengaris arion* pourrait être améliorée en privilégiant une approche à partir des surfaces de vie plutôt que par les observations ponctuelles.

VI. Conclusion

En somme à la vue des résultats, il est possible de suggérer que, que les centrales photovoltaïques de Pays de la Loire puissent influencer la dispersion de *Phengaris arion*. En effet, les résultats démontrent d'une influence sur les surfaces potentiellement colonisables et jouent un rôle dans les corridors écologiques, mais celui-ci n'est pas indispensable. Cependant,

leur impact demeure subtil et dépendant de divers facteurs, y compris le milieu initial et la durée considérée. Il ne s'agit cependant que de modélisation, l'utilisation de nombreux scénarios permet de se faire une meilleure appréhension du sujet, mais ne permettra jamais de connaître réellement les dispersions réelles de *Phengaris arion*. A cela vient s'ajouter les limites retenues dans la partie précédente qui peuvent fausser d'autant plus les résultats. De plus, il convient de rappeler que l'étude se part de la condition initiale que les centrales sont un lieu parfaitement favorable réunissant les conditions biotiques et abiotiques ainsi que la connectivité avec les milieux extérieurs, cela en lien avec le projet du CNRS.

Cette étude permet cependant d'obtenir assez facilement un aperçu des relations de dispersion entre *P. arion* et les centrales photovoltaïques. Elle permet aussi à grande échelle de cibler les départements ou les communes qui présentent les plus grands enjeux ou encore d'identifier certains obstacles récurrents ou importants qu'il serait intéressant d'étudier. Pour plus de précisions, il serait pertinent d'appliquer cette analyse à des échelles plus fines, comme celle de la commune de Vaas par exemple. À une échelle plus locale, l'impact des centrales serait d'autant plus significatif. En effet, la superficie des centrales semble insignifiante par rapport à celle de l'étude pour être véritablement prise en considération. De plus, les petits éléments tels que les ruisseaux, haies et routes, qui fragmentent le paysage pour *Phengaris arion*, ne sont pas inclus dans l'analyse.

En conclusion à la problématique, les centrales photovoltaïques peuvent-elles jouer un rôle dans la conservation de *Phengaris arion* ? La réponse est nuancée et nécessite d'être approfondie, les centrales photovoltaïques peuvent être une opportunité de développement de l'espèce en tant que milieu de vie. Cela a bien été vu dans l'analyse de la bibliographie qui a révélé que les centrales photovoltaïques peuvent constituer un habitat propice pour *Phengaris arion*, car les caractéristiques spécifiques de cet environnement artificiel offrent des conditions idéales favorisant la colonisation et la survie de cette espèce. Ceci, même s'il semble essentiel de prendre en considération certains facteurs. En particulier, la gestion du milieu joue un rôle crucial, montrant une efficacité optimale lorsqu'elle est basée sur le pâturage plutôt que sur le fauchage, et ce, avec une charge de pâturage modérée. La connectivité écologique du site ainsi que le type de végétation doivent également être pris en compte, ce dernier étant crucial pour espérer une colonisation réussie. Enfin, il a été vu qu'il semble que *Thymus serpyllum* soit à privilégier par rapport à *Origanum vulgare*, qui présente une résistance moindre à une charge de pâturage élevée, telle que celle rencontrée dans les centrales photovoltaïques. Concernant les résultats obtenus dans l'étude, il est possible d'affirmer que les centrales jouent aussi un rôle

indéniable dans la dispersion de l'espèce. Cependant l'impact ne semble pas suffisamment significatif pour voir les centrales photovoltaïques comme une solution à la perte d'habitat du papillon, tout du moins dans le cas de la région Pays de la Loire. De plus, en région Pays de la Loire, peu de centrales semblent pouvoir être atteinte dans les scénarios les plus réaliste. Cela ne signifie pas qu'elles sont inatteignables mais indique une tendance, les centrales situées au nord-ouest semblent peu enclines à accueillir naturellement le papillon. À la vue de cette étude, les centrales photovoltaïques semblent s'insérer comme un outil parmi d'autres dans la préservation de l'espèce.

VII. Bibliographie

- ADEME. (2017). Contribution de l'énergie photovoltaïque à la biodiversité : synthèse bibliographique. Récupéré sur : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/contribution-energie-photovoltaïque-biodiversité-synthèse-bibliographique.pdf>
- Agreste. (2021). Mémento 2021 Centre-Val-de-Loire 36 p.
- Agreste. (2022). Recensement agricole 2020. (Premiers résultats) Centre-Val-de-Loire, 74 p.
- Armstrong, A., Ostle, N. J., & Whitaker, J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074016.
- Barnett, L.K. & Warren, M.S. (1995). Species action plan: LARGE BLUE, *Maculinea arion*. Butterfly Conservation, Wareham
- Barron-Gafford, Greg A, Rebecca L Minor, Nathan A Allen, Alex D Cronin, Adria E Brooks, et Mitchell A Pavao-Zuckerman. 2016. « The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger Solar Power Plants Increase Local Temperatures ». *Scientific Reports* 6 (1). <https://doi.org/10.1038/srep35070>
- Beau, F., Thirion, J. M. & Forti, M. (2005). Traits de vie d'une population d'Azuré du Serpolet de la RNR de Château-Gaillard - Nature Environnement, N°17, 10p.
- Bienvenu, L., Langlois, M., Kabaili, E., Bischoff, A., Isselin-Nondedeu, F. (2023). Contexte paysager et opportunités de génie écologique au sein des parcs photovoltaïques de France. *Ecoveg* 16, 1 p.

- Blaydes, H., Potts, S. G., Whyatt, J. D., & Armstrong, A. (2021). Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111065.
- Bonnet, X., Faïq, C., Fuzeau, V., Cahuzac, E., Allaire, G. & Therond, O. (2013). Martin Bortzmeyer, Les prairies permanentes : Evolution des surfaces en France - Analyse à travers le Registre Parcellaire Graphique, études et documents du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable(SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD),18 p.
- Casacci, L. P., Witek, M., Barbero, F., Patricelli, D., Solazzo, G., Balletto, E., Bonelli, S. (2011). Habitat Preferences of *Maculinea Arion* and Its *Myrmica* Host Ants: Implications for Habitat Management in Italian Alps. *J Insect Conserv*, 15 (1–2), 103–110. <https://doi.org/10.1007/s10841-010-9327-x>.
- Delagarde, R. (2018). Le chargement, c'est quoi ? *Fiche 68, Prairies demain*, 2 p.
- Dixon, A. P., Faber-Langendoen, D., Josse, C., Morrison, J., Loucks, C. J. (2014). Distribution Mapping of World Grassland Types. *J. Biogeogr*, 41 (11), 2003–2019. <https://doi.org/10.1111/jbi.12381>.
- Dover, J. & Settele, J. (2008). The influences of landscape structure on butterfly distribution and movement: a review. *Journal of Insect Conservation*. Numéro 13. Pages 3-27.
- DREAL. (2015). Schéma Régional de Cohérence Écologique des Pays de la Loire. DREAL Pays de la Loire Conseil Régional des Pays de la Loire. 234 p.
- Dumont, B., Farrugia, A., Garel, J.P. (2007) Pâturage et biodiversité des prairies permanentes. *Renc. Rech. Ruminants*, 14, 17-24

- Dupont, P. (2010). Plan national d'actions en faveur des Maculinea. *Office pour les insectes et leur environnement-Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement*, 138 pp.
- Farrié, J., Launay, F., & Devun, J. (2012). Place et utilisation des prairies permanentes dans les élevages en France. *Journées AFPP-Les atouts des prairies permanentes pour demain*, 29-38.
- Farruggia, A., Dumont, B., Jouven, M., Baumont, R., & Loiseau, P. (2006). La diversité végétale à l'échelle de l'exploitation en fonction du chargement dans un système bovin allaitant du Massif central. *Fourrages*, 188, 477-493.
- Gerbeau, S. (2014). Dynamique de Population et Conservation de l'Azuré du serpolet, Maculinea arion, sur les Pelouses du Drouais. *Conservatoire d'espaces naturels de la région Centre*, 67 p.
- Fischer, S. F., Poschlod, P., & Beinlich, B. (1996). Experimental studies on the dispersal of plants and animals on sheep in calcareous grasslands. *Journal of Applied Ecology*, 1206-1222.
- Foltête J.-C., Vuidel G., Savary P., Clauzel C., Sahraoui Y., Girardet X. & Bourgeois M. (2021). *Graphab: an application for modeling and managing ecological habitat networks Software Impacts*, 8: 100065.
- Gerbeau, S., (2014). Dynamique de Population et Conservation de l'Azuré du serpolet, Maculinea arion, sur les Pelouses du Drouais. *Rapport de Stage, Conservatoire d'espaces naturels de la région Centre – Antenne de Chartres*, 67 p.
- Gressette, S., (2012). – Plan Régional d'Actions 2012-2016 en faveur des Maculinea. - *Conservatoire d'espaces naturels de la région Centre, Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Centre*, décembre 2012, 41p + annexes

- Guiller, C., Affre, L., Deschamps-Cottin, M., Geslin, B., Kaldonski, N., & Tatoni, T. (2017). Impacts of solar energy on butterfly communities in mediterranean agro-ecosystems. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(6), 1817-1823.
- Hayes, M.P. (2015). The Biology and Ecology of the Large Blue Butterfly *Phengaris* (Maculinea) Arion: A Review. *J Insect Conserv*, 19 (6), 1037–1051. <https://doi.org/10.1007/s10841-015-9820-3>.
- Houard, X. & Jaulin, S. (2018). Plan national d’actions en faveur des « Papillons de jour » - Agir pour la préservation de nos lépidoptères diurnes patrimoniaux 2018-2028. *Office pour les insectes et leur environnement – DREAL Auvergne-Rhône-Alpes - Ministère de la Transition écologique et solidaire*, 64 p.
- Hoverstadt T. (2005). A review of the role of dispersal for population persistence in Maculinea. In : SETTELE J., KÜHN E. & THOMAS J.A., coord. (2005). *Studies on Ecology and Conservation of Butterflies in Europe. Vol. 2: Species Ecology along a European Gradient: Maculinea Butterflies as a Model*. Pensoft Publishers, Sofia-Moscow. Page 120.
- Institut NégaWatt. (2015). Vers un système énergétique « 100% renouvelable », Scénario pour réussir la transition énergétique en région Centre-Val de Loire. *Rapport méthodologique du scénario négaWatt régionalisé*, 112 p.
- Jeangros, B., & Bertola, C. (2002). Long-term evolution of an intensively managed meadow after cessation of fertilisation and reduction of cutting frequency. In *Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes. Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation, La Rochelle, France, 27-30 May 2002* (pp. 794-795). Organizing Committee of the European Grassland Federation.

- Korosi, A., Peregovits, L., Örvossy, N., Vozar, A. & Kassai, F. (2005). Studying the population structure of *Maculinea arion ligurica*. In : SETTELE J., KÜHN E. & THOMAS J.A., coord. (2005). *Studies on Ecology and Conservation of Butterflies in Europe*. Vol. 2: *Species Ecology along a European Gradient: Maculinea Butterflies as a Model*. Pensoft Publishers, Sofia-Moscow. Page 133.
- Lestang, L. (2020). Plan d'action espèce pour la protection de la nature au Grand-Duché de Luxembourg : l'azuré du serpolet, *Phengaris arion* (Linnaeus 1758). Version du 08/07/2020. *Administration de la nature et des forêts, Luxembourg*. 36 p.
- Madej, L. (2020). Dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques sur 2 sites prairiaux pâturés. *Milieux et Changements globaux*. hal-03121955
- Marx, G. (2022). Centrales photovoltaïques et biodiversité : synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer. *Pôle protection de la Nature*, 73 p.
- Merlet, F. & Houard, X. (2012). Synthèse bibliographique sur les traits de vie de l'Azuré du Serpolet (*Maculinea arion* (Linnaeus, 1758)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques - *Office pour les insectes et leur environnement & Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle*, 7 p.
- Message, E. (2011). Recensement et caractérisation de l'habitat des fourmis hôtes (*Myrmica*) de l'azuré du serpolet *Phengaris arion* sur les pelouses et prairies calcaires. *Mémoire Master 1^o Année Ecologie et Biologie des Populations, Université de Poitiers*, 29 p.
- Millet, C.P. (2018). Construction d'indicateurs de services écosystémiques délivrés par les prairies basées sur des critères végétaux, *Mémoire de stage de Master 2 mention BEE parcours BioGET*

Ministère de l'agriculture et de de la souveraineté alimentaire. (2015). Les prairies permanentes.

Cap sur la Pac 2015-2020, 4 p.

Ministère de la transition écologique et solidaire. (2020). La France accélère sa transition énergétique, programmation pluriannuelle de l'énergie, 4 p.

MCTRCT. Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales. & MTES. Ministère de la transition écologique et solidaire. (2020). Guide 2020, l'instruction des demandes d'autorisations d'urbanisme pour les centrales solaires au sol. 61 p.

Muggeton J. & Benham B. R. (1975). Isolation and the decline of the large blue butterfly (*Maculinea arion*) in Great Britain - *Biological Conservation*, N°7, volume 2. p 119 - 128

New, T. R. (1999) – Butterfly conservation. *Oxford University Press, Oxford*. 248 p.

Nowicki, P., Settele, J., Thomas, J.A. & Woyciechowski, M. (2005). A review of population structure of *Maculinea* butterflies. In : Settele J., Kuhn E. & Thomas J.A., coord. *Studies on Ecology and Conservation of Butterflies in Europe*. Vol. 2: Species Ecology along a European Gradient: *Maculinea* Butterflies as a Model. Pensoft Publishers, Sofia-Moscow. Pages 144-149.

Öckinger, E., Eriksson, A. K., & Smith, H. G. (2006). Effects of grassland abandonment, restoration and management on butterflies and vascular plants. *Biological conservation*, 133(3), 291-300.

Office de l'Environnement de la Corse. (2013). Etude des *Myrmica*, fourmis-hôtes des papillons du genre *Phengaris*, en Corse, N° Contrat : 2013208

- Pauler-furste, R., Kaule, G. & Settele, J. (1996). Aspects of the population vulnerability of the large blue butterfly (*Glaucopsyche (Maculinea) arion*) in south-west Germany. In : SETTELE J., POSCHLOD P. & HENLE K., coord. (1996). Species survival in fragmented landscapes. Dordrech, Kluwer Academic. Pages 275-281.
- Peschel, R., Peschel, T., Marchand, M., & Hauke, J. (2019). Solar parks-profits for biodiversity. *Association of Energy Market Innovators*.
- Peyraud, J. L., Peeters, A., & De Vlieghe, A. (2012). Place et atouts des prairies permanentes en France et en Europe. *Fourrages*, (211), 195-204.
- Région Pays de la Loire-SRCAE (2013). SRCAE Schéma régional climat aire énergie Pays de la Loire
- Rodrigues, A. (2010). Suivi des populations d'azuré du serpolet au niveau de l'espace naturel sensible du Val de Choix - campagne 2010. *Conseil Général d'Indre-et-Loire*, 28 p.
- SDES. (2018). Environnement & agriculture Les chiffres clés. *DataLab*, 124p.
- Sielezniew, M., Buszko, J. & Stankiewicz, A.M. (2005). *Maculinea arion* in Poland: distribution, ecology and conservation prospects. In : SETTELE J., KÜHN E. & THOMAS J.A., coord. (2005). Studies on Ecology and Conservation of Butterflies in Europe. Vol. 2: Species Ecology along a European Gradient: Maculinea Butterflies as a Model. Pensoft Publishers, Sofia-Moscow. Pages 231-233.
- Sielezniew, M., Stankiewicz-Fiedurek, A.M. (2008). *Myrmica sabuleti* (Hymenoptera: Formicidae) not necessary for the survival of the population of *Phengaris (Maculinea) arion* (Lepidoptera: Lycaenidae) in eastern Poland: lower host-ant specificity or evidence for geographical variation of an endangered social parasite? *Eur J Entomol* 105:637–641

- SRADDET. (2022). Synthèse de l'état des lieux, stratégie et objectif. Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires. 142p.
- TEO. (2021). Production d'énergie renouvelable. Transition Ecologique Observatoire. <https://teo-paysdelaloire.fr/tableau-de-bord/production-denergie-renouvelable/>
- Thomas, J. A. (1991). Rare species conservation : case studies of European butterflies. Symp. Br. Ecol. Soc. 31: 149-197.
- Thomas, J. A. & J. C. Wardlaw (1992). The capacity of a *Myrmica* ant nest to support a predacious species of *Maculinea* butterfly. *Oecologia* 91 (1): 101-109.
- Thomas, J. A. (1994). The ecology and conservation of *Maculinea arion* and other European species of large blue butterfly. *Ecology and conservation of Butterflies*. Pullin, A. S. (ed.), Chapman & Hall, London: 180-197.
- Thomas, J. A., Simcox, D. J., & Clarke, R. T. (2009). Successful conservation of a threatened *Maculinea* butterfly. *Science (New York, N.Y.)*, 325(5936), 80–83. <https://doi.org/10.1126/science.1175726>
- Ugelvic, L.V., Andersen, A., Boomsma, J.J. & Nash D.R. (2012). Dispersal and gene flow in the rare, parasitic Large Blue butterfly *Maculinea arion*. *Molecular Ecology*. Volume 21. Pages 3224-3236.
- UICN France, MNHN, OPIE & SEF. (2014). La Liste rouge des espèces menacées en France - Chapitre Papillons de jour de France métropolitaine. Paris, France. ISBN : 978-2-918105-37-4.
- Van Swaay, C.A.M., Dennis, E.B., Schmucki, R., Sevilleja, C.G., Åström, S., Balalaikins, M., Barea-Azcón, J.M. , Bonelli, S., Botham, M., Cancela, J.P., Collins, S., De Flores, M., Dapporto, L., Dopagne, C., Dziekanska, I., Escobés, R., Faltynek Fric, Z., Fernández-

- García, J.M., Fontaine, B., Glogovčan, P., Gracianteparaluceta, A., Harpke, A., Harrower, C., Heliölä, J., Houard, X., Judge, M., Kolev, Z., Komac, B., Kühn, E., Kuussaari, M., Lang, A., Lysaght, L., Maes, D., McGowan, D., Mestdag, X., Middlebrook, I., Monasterio, Y., Monteiro, E., Munguira, M.L., Musche, M., Olivares, F.J., Ōunap, E., Ozden, O., Pavlíčko, A., Pendl, M., Pettersson, L.B., Rákossy, L., Roth, T., Rüdiger, J., Šašić, M., Scalercio, S., Settele, J., Sielezniew, M., Sobczyk-Moran, G., Stefanescu, C., Švitra, G., Szabadfalvi, A., Tiitsaar, A., Titeux, N., Tzirkalli, E., Ubach, A., Verovnik, R., Vray, S., Warren, M.S., Wynhoff, I., & Roy, D.B. (2022). European Grassland Butterfly Indicator 1990-2020 Technical report. *Butterfly Conservation Europe & SPRING/eBMS* (www.butterfly-monitoring.net) & Vlinderstichting report VS2022.039.
- Van Swaay, C. A., Nowicki, P., Settele, J., & Van Strien, A. J. (2008). Butterfly monitoring in Europe: methods, applications and perspectives. *Biodiversity and Conservation*, 17, 3455-3469. DOI 10.1007/s10531-008-9491-4
- Vellot, O., Kaldonski, N., Thorel, M., Cluchier, E., Illac, P. & Pillods, M. (2020). PIESO BOOST, Boîte à Outils pour l'Optimisation des Suivis écologiques et des Techniques d'intégration de l'énergie solaire.
- Wallis De Vries, M. F., Parkinson, A. E., Dulphy, J. P., Sayer, M., & Diana, E. (2007). Effects of livestock breed and grazing intensity on biodiversity and production in grazing systems. 4. Effects on animal diversity. *Grass and Forage Science*, 62(2), 185-197.
- White, R. P., Murray, S., Rohweder, M., Prince, S. D., & Thompson, K. M. (2000). Grassland ecosystems. *Washington, DC, USA: World Resources Institute*, 81 p.
- Shyama R. & Girish M. K. (2007). Road kills: Assessing insect casualties using flagship taxon, *CURRENT SCIENCE*, 830 VOL. 92, NO. 6, 25

VIII. Webographie

- Centre de ressources Trame verte et bleue (s.d.). <https://www.trameverteetbleue.fr/qui-sommes-nous/centre-ressources-trame-verte-bleue>
- Chambre d’agriculture Tarn. (2022, 16 septembre). Le paturage. Chambre d’agriculture Tarn. <https://tarn.chambre-agriculture.fr/productions-techniques/elevage/prairies-et-fourrages/le-paturage/>
- EDF. (2021, 28 mai). Le fonctionnement d’une centrale photovoltaïque. EDF Fr <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-photovoltaique>
- EEA. (2019, 22 avril). Maculinea arion *European Environment Agency (EEA)*, <https://eunis.eea.europa.eu/species/235>
- IRSTEA. (s.d.). *Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture*. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjvMjy9-aCAxXcV6QEHbs1Ak8QFnoECBUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.agrisource.org%2Ffr%2F7_108%2F5c332ed707c805cd14cf49b4%2FIRSTEA%2520-%2520Institut%2520national%2520de%2520recherche%2520en%2520sciences%2520et%2520technologies%2520pour%2520l%2527environnement%2520et%2520l%2527agriculture%2520.html&usg=AOvVaw0thaMtsYwkq6Jk_ioJHcKy&opi=89978449
- Nature France. (2016). Évolution des surfaces de grands espaces toujours en herbe, La surface des grands espaces de prairies permanentes a diminué de 7,9 % en métropole entre 2000 et 2010. naturefrance.fr Consulté le 12 mars 2023, à l’adresse <https://naturefrance.fr/indicateurs/evolution-des-surfaces-de-grands-espaces-toujours-en-herbe>
- Meyer, C. (2023). Dictionnaire des Sciences Animales. [On line]. Montpellier, France, Cirad. [20/03/2023]. URL : <https://dico-sciences-animales.cirad.fr/>

Rey, A. (2017, août). *Papillons diurnes*. Biodivers.
https://www.biodivers.ch/fr/index.php/Papillons_diurnes#Conservation_et_promotion

Tela Botanica. (2011). Projet de numérisation de la flore de L'Abbé Coste par le réseau Tela botanica, <https://www.tela-botanica.org/wikini/florecoste/>

UMR TETIS. (s.d.). <https://www.umr-tetis.fr/index.php/fr/>

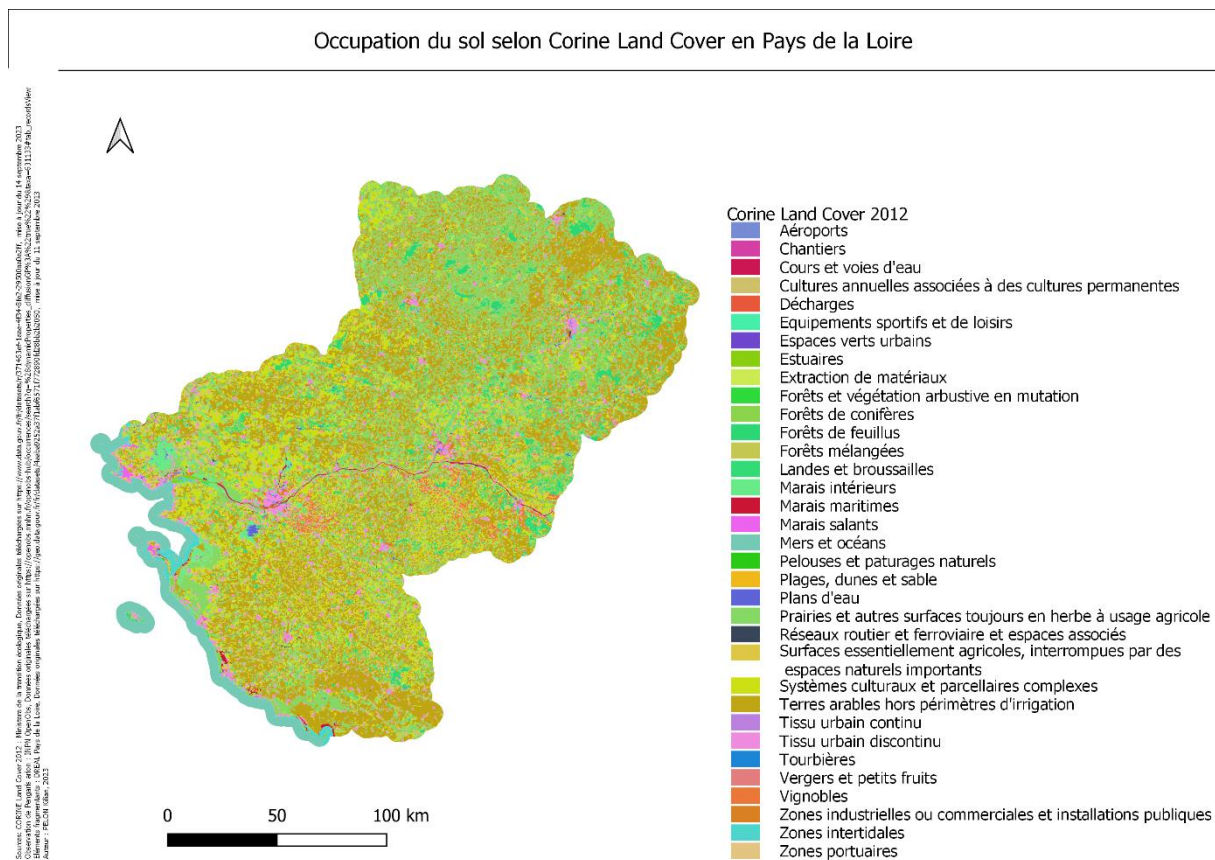
Wynhoff, I. (1998). The recent distribution of the European Maculinea species – Journal of Insect Conservation, N°2, p 15-27.

IX. Annexe

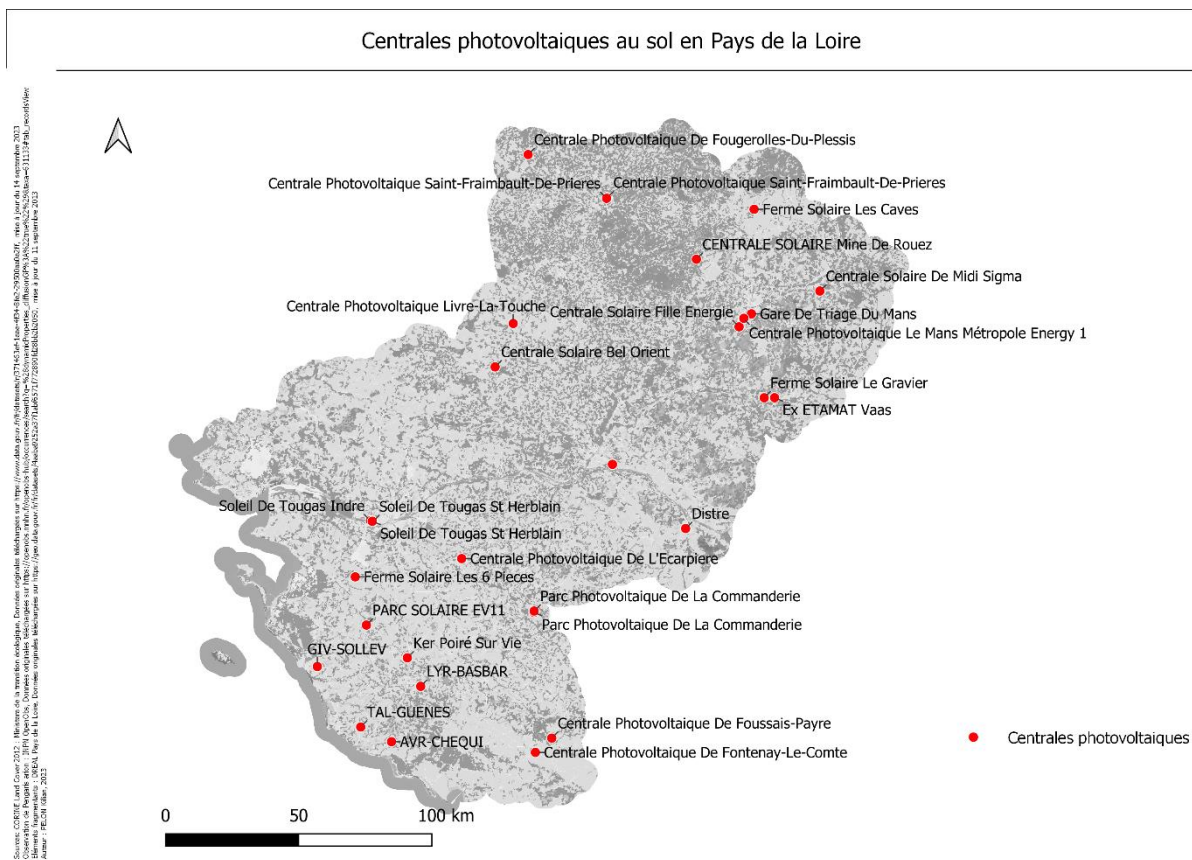
Annexe 1 : Couches shapefile utilisées dans l'étude et leur source (Pelon, 2024)

Indicatif	Forme	Créateur	Description	Source
Eléments fragmentant de niveau 1	Shapefile/ Ligne	Schema Régionale de Cohérence Écologique (SRCE)	Autoroutes, LGV (Ligne à Grande Vitesse des Réseaux Ferrés de France), Voies ferroviaires clôturées (toutes les lignes disposant d'une clôture), Trafic routier de la DREAL Pays de la Loire (en nombre de véhicule par jour) assurant des liaisons à très fort trafic.	DREAL Pays de la Loire, Données originales téléchargées sur https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/4aaba9252a37f1abf6571f772890fd28bb2b2050 , mise à jour du 11 septembre 2013
Eléments fragmentant de niveau 2	Shapefile/ Ligne	Schéma Régionale de Cohérence Écologique (SRCE)	Trafic routier de la DREAL Pays de la Loire (en nombre de véhicule par jour) assurant des liaisons à fort trafic, Voies ferrées à fort trafic (RFF).	DREAL Pays de la Loire, Données originales téléchargées sur https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/4aaba9252a37f1abf6571f772890fd28bb2b2050 , mise à jour du 11 septembre 2014
Eléments fragmentant de niveau 3	Shapefile/ Ligne	Schéma Régionale de Cohérence Écologique (SRCE)		DREAL Pays de la Loire, Données originales téléchargées sur https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/4aaba9252a37f1abf6571f772890fd28bb2b2050 , mise à jour du 11 septembre 2015
Centrales photovoltaïques	Shapefile/ Polygone	DREAL Pays de la Loire	30 centrales photovoltaïques en Pays de la Loire	DREAL Pays de la Loire, Données originales téléchargées sur https://data.paysdelaloire.fr/explore/dataset/234400034_installations-solaires-photovoltaïques-au-sol-en-pays-de-la-loire/information/ , mise à jour du 1 novembre 2023
CORINE Land Cover 2012 - Occupation des sols en France	Shapefile/ Polygone	Ministère de la transition écologique		Ministère de la transition écologique, Données originales téléchargées sur https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/r/371463ef-1eae-4f34-8fe2-29500aa0e2ff , mise à jour du 14 septembre 2023
Observation de <i>Phengaris arion</i>	Shapefile/ Points	INPN OpenObs		INPN OpenObs, Données originales téléchargées sur https://openobs.mnhn.fr/openobs-hub/occurrences/search?q=%28dynamicProperties_diffusionGP%3A%22true%22%29&taxa=631133#tab_recordsView

Annexe 2 : Représentation de la couche Corine Land Cover 2012 (Pelon, 2024)

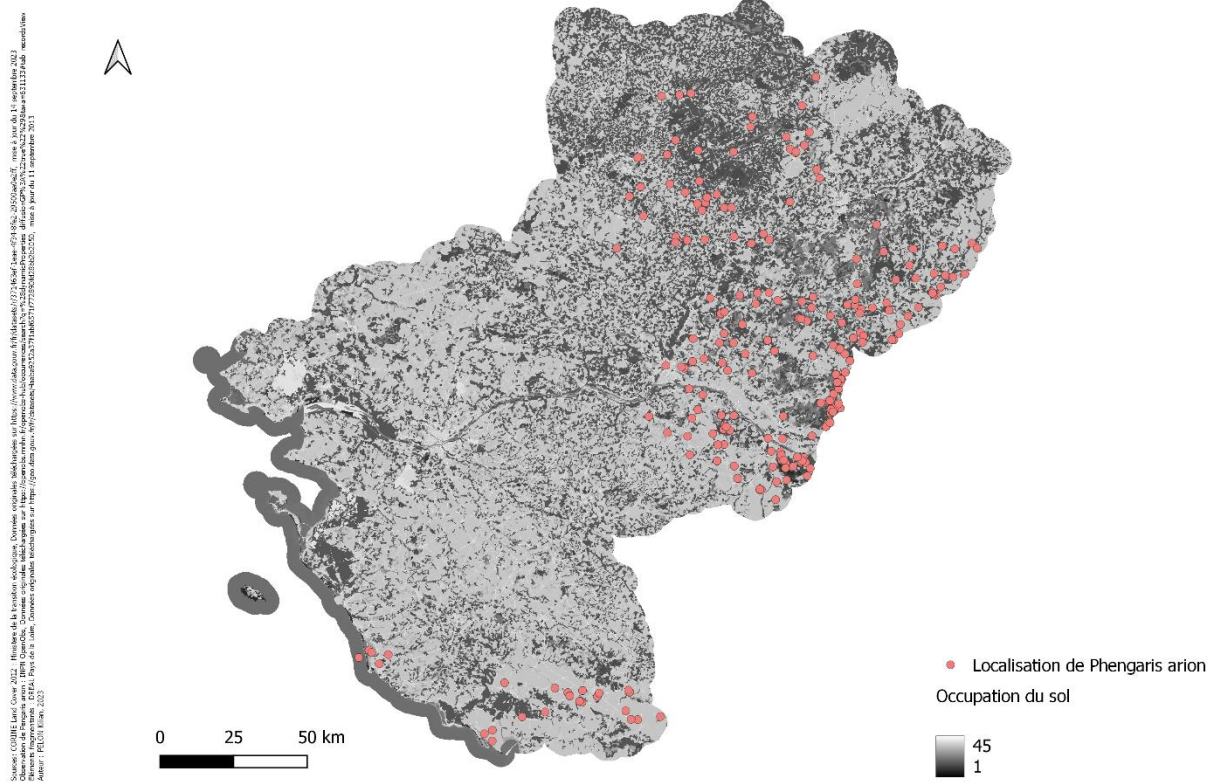


Annexe 3 : Représentation de la couche des centrales photovoltaïques (Pelon, 2024)

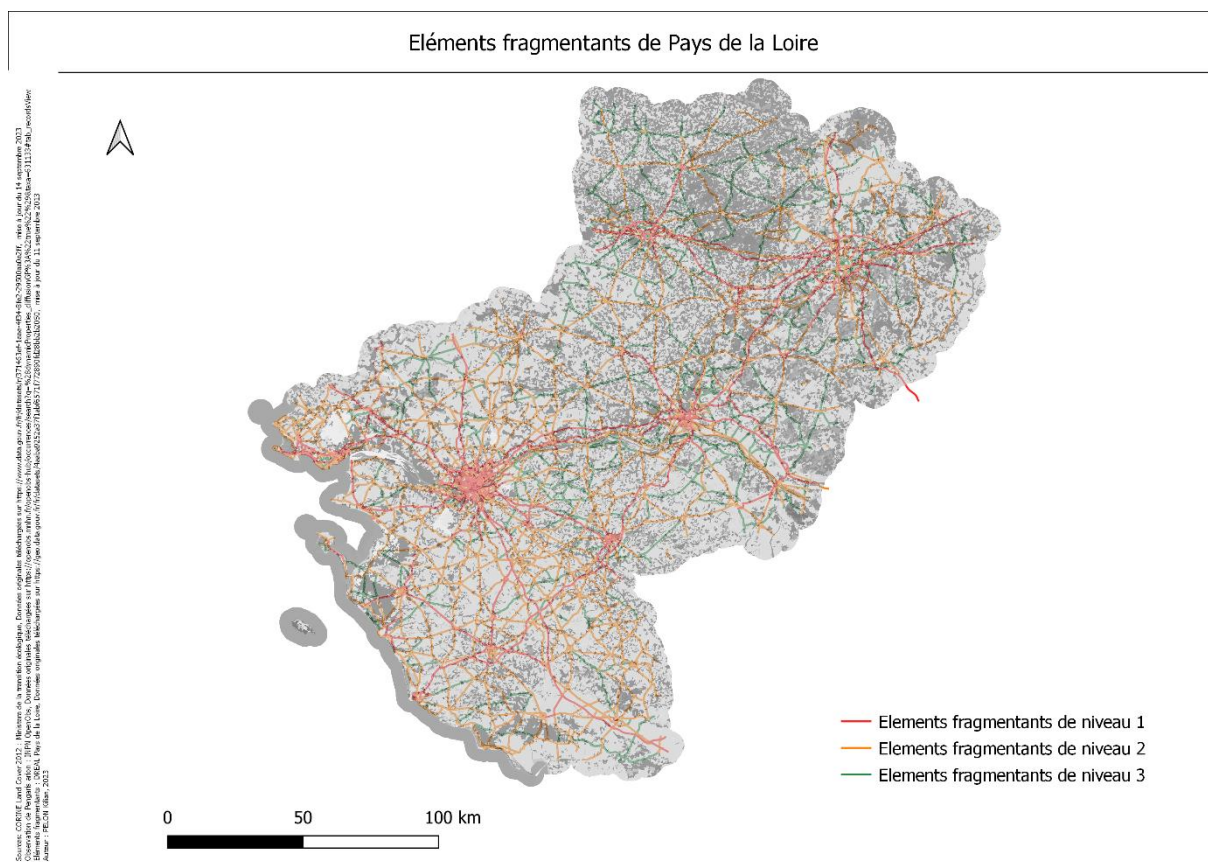


Annexe 4 : Représentation de la couche des observations de *Phengaris arion* (Pelon, 2024)

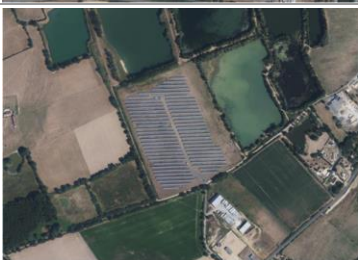
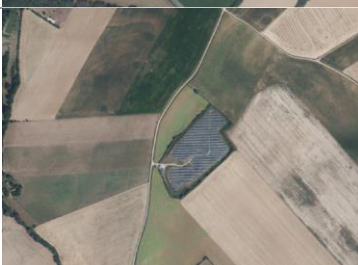
Localisation des observations de *Phengaris arion* dans la région Pays de la Loire

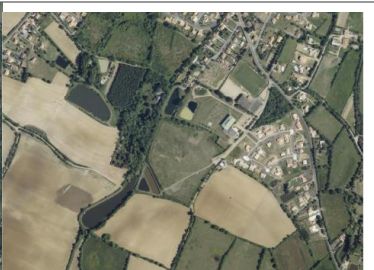


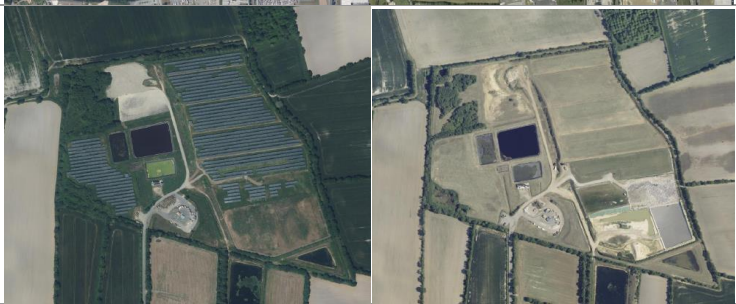
Annexe 5 : Représentation de la couche des éléments fragmentant (Pelon, 2024)



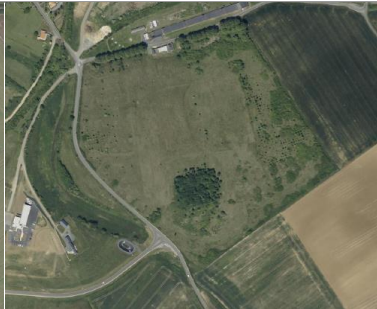
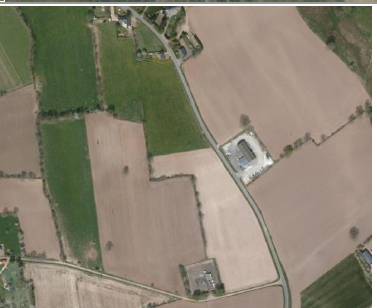
Annexe 6 : Comparaison de l'occupation du sol avant et après l'implantation des centrales photovoltaïques et définition de l'indice de friction (Pelon, 2024)

	Photo actuelle	Photo 2006-2010	Friction
Centrale photovoltaïque de Distre, Maine-et-Loire, Distré / Structure : Fixe / Site : Friche industrielle			200
Gare de triage du Mans, Sarthe, Le Mans / Structure : Fixe / Site : Friche industrielle			200
Double Centrale photovoltaïque d'Allone, Sarthe, Allonnes / Structure : Mobile / Site : Gravière			100
Centrale solaire Fille Energie, Sarthe, Fillé / Structure : Fixe / Site : Gravière			100
Centrale photovoltaïque de Foussais-Payre, Vendée, Foussais-Payré / Structure : Fixe / Site : ISDND			5
Ferme solaire Les Caves, Sarthe, Grandchamp / Structure : Fixe / Site : ISDND			5

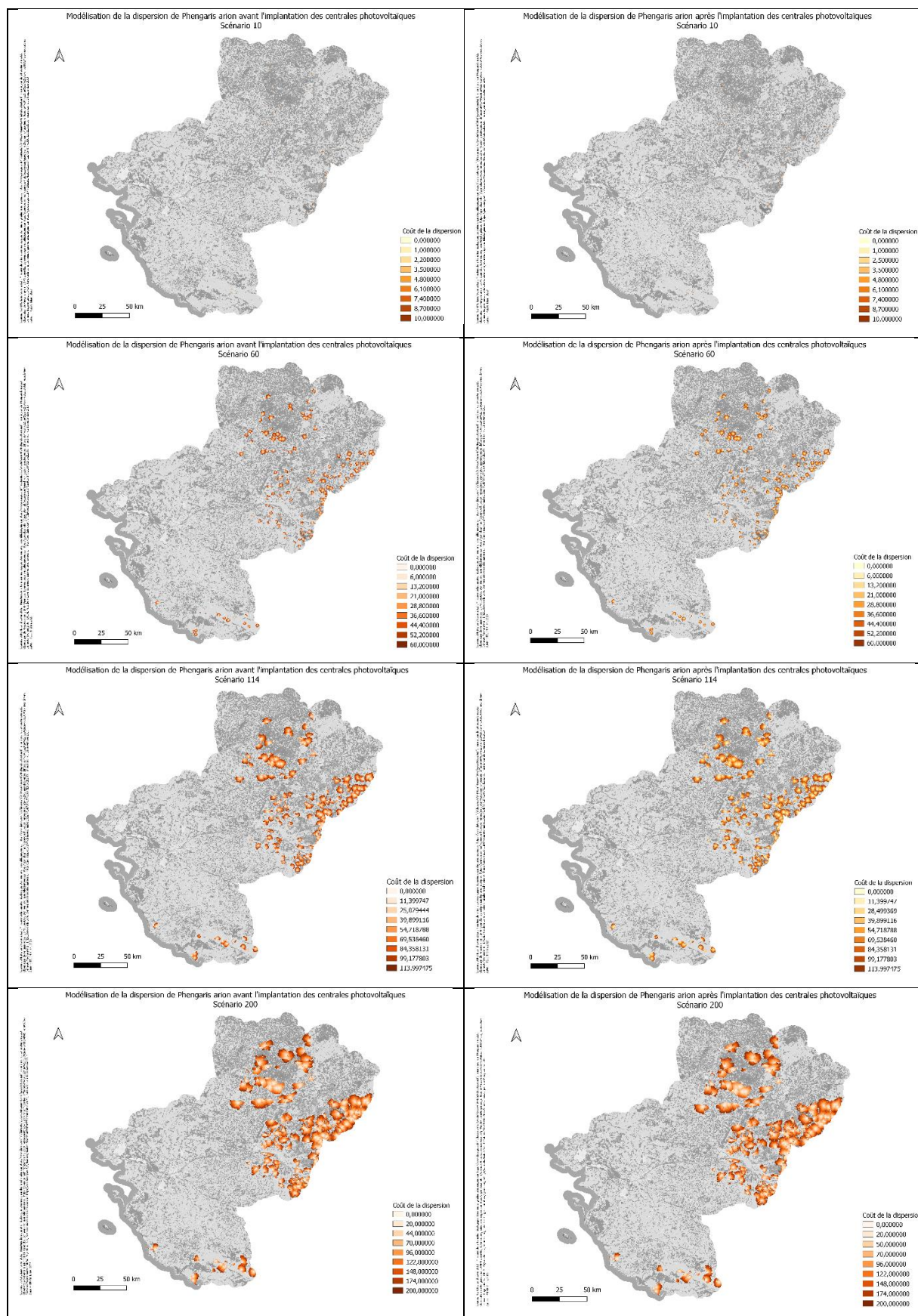
Centrale photovoltaïque d'Avrillé, Vendée, Avrillé / Structure : Fixe / Site : ISDND			5
Centrale photovoltaïque Livre-la-Touche, Mayenne, Livre-la-Touche / Structure : Mobile / Site : ISDND			5
Soleil de Tougas Indre, Loire-Atlantique, Indre / Structure : Fixe / Site : ISDND			5
Ferme solaire les 6 pieces, Loire-Atlantique, Machecoul-Saint-Même / Structure : Fixe / Site : ISDND			5
Ferme solaire le Gravier, Sarthe, Aubigné-Racan / Structure : Mobile / Site : ISDND			5
Centrale photovoltaïque de la Petite Vicomte, Maine-et- Loire, Les Ponts-de-Cé / Structure : Fixe / Site : ISDND			5

GIV SOLLEV, Vendée, Givrand / Structure : Fixe / Site : ISDND		5
Ker Poire sur Vie, Vendée, Le Poiré-sur-Vie / Structure : Mobile / Site : ISDND		5
TAL-GUENES, Vendée, Talmont-Saint-Hilaire / Structure : Fixe / Site : ISDND		5
LYR BASBAR, Vendée, La Roche-sur-Yon / Structure : Fixe / Site : ISDND		5
Centrale solaire Bel Orient, Maine-et-Loire, Ombree d'Anjou / Structure : Fixe / Site : ISDND		5
Centrale photovoltaïque Saint Fraimbault de Prieres, Mayenne, Saint-Fraimbault- de-Prières / Structure : Fixe / Site : ISDND		5

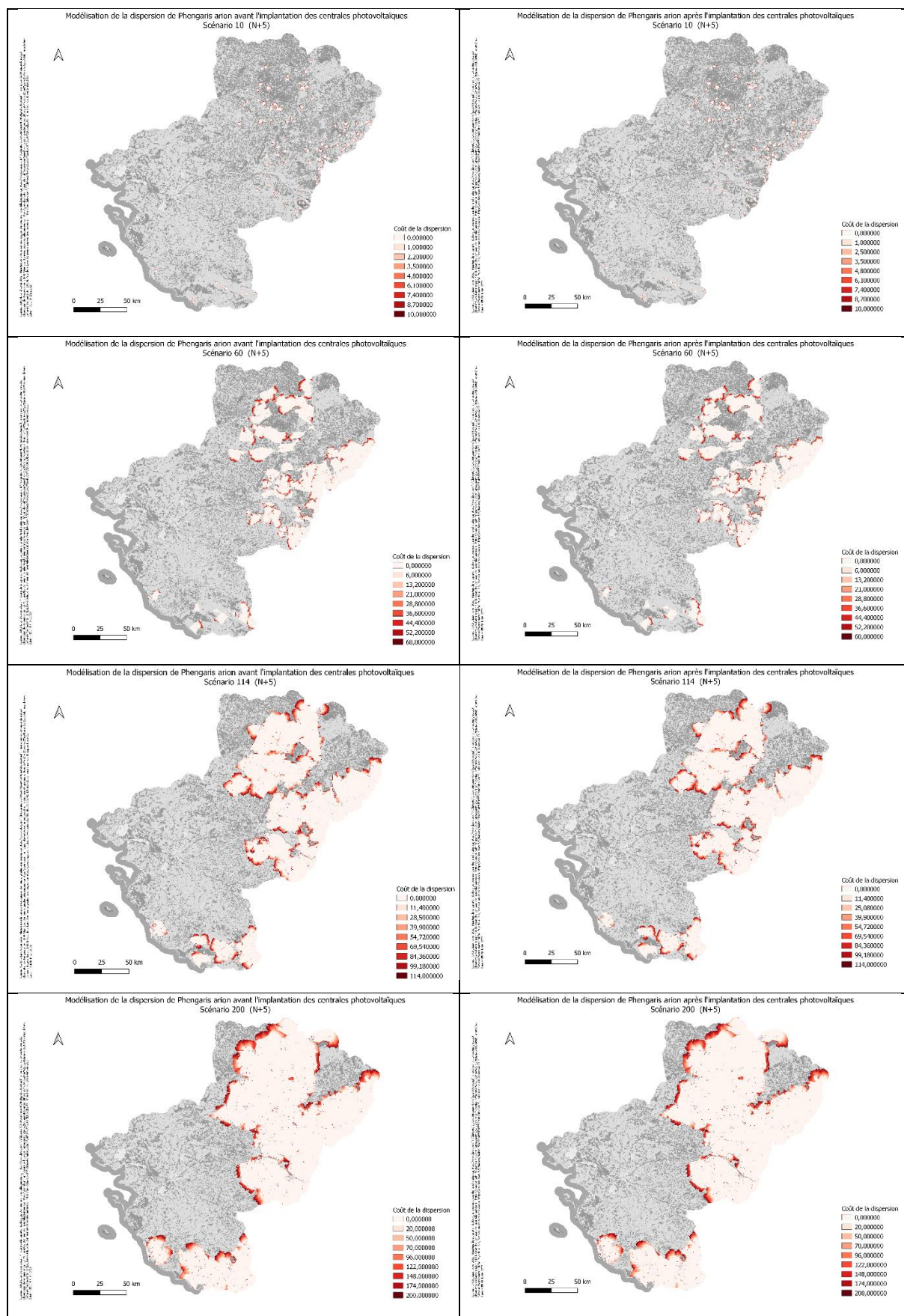
Parc solaire ev11, Vendée, Grand'Landes / Structure : Fixe / Site : ISDND	 	5
Soleil de Tougas St Herblain, Loire-Atlantique, Saint- Herblain / Structure : Fixe et mobile / Site : ISDND	 	5
(Double) Parc photovoltaïque de la Commanderie, Deux- Sèvres, Mauléon / Structure : Fixe / Site : Site minier	 	200
Centrale photovoltaïque de l'Ecarpière, Loire-Atlantique, Gétigné / Structure : Fixe / Site : Site minier	 	100
CENTRALE SOLAIRE Mine de Rouez, Sarthe, Rouez / Structure : Mobile / Site : Site minier	 	200
Ex ETAMAT Vaas, Sarthe, Vaas / Structure : Mobile / Site : Site pollué	 	200

Centrale photovoltaïque de Fontenay-le-Comte, Vendée, Fontenay-le-Comte / Structure : Fixe / Site : Terrain militaire	 	5
Centrale photovoltaïque de Fougerolles-du-Plessis, Mayenne, Fougerolles-du-Plessis / Structure : Fixe / Site : Zone d'activité	 	5
Centrale solaire de Midi Sigma, Sarthe, Thorigné-sur-Dué / Structure : Fixe / Site : Zone d'activité	 	5

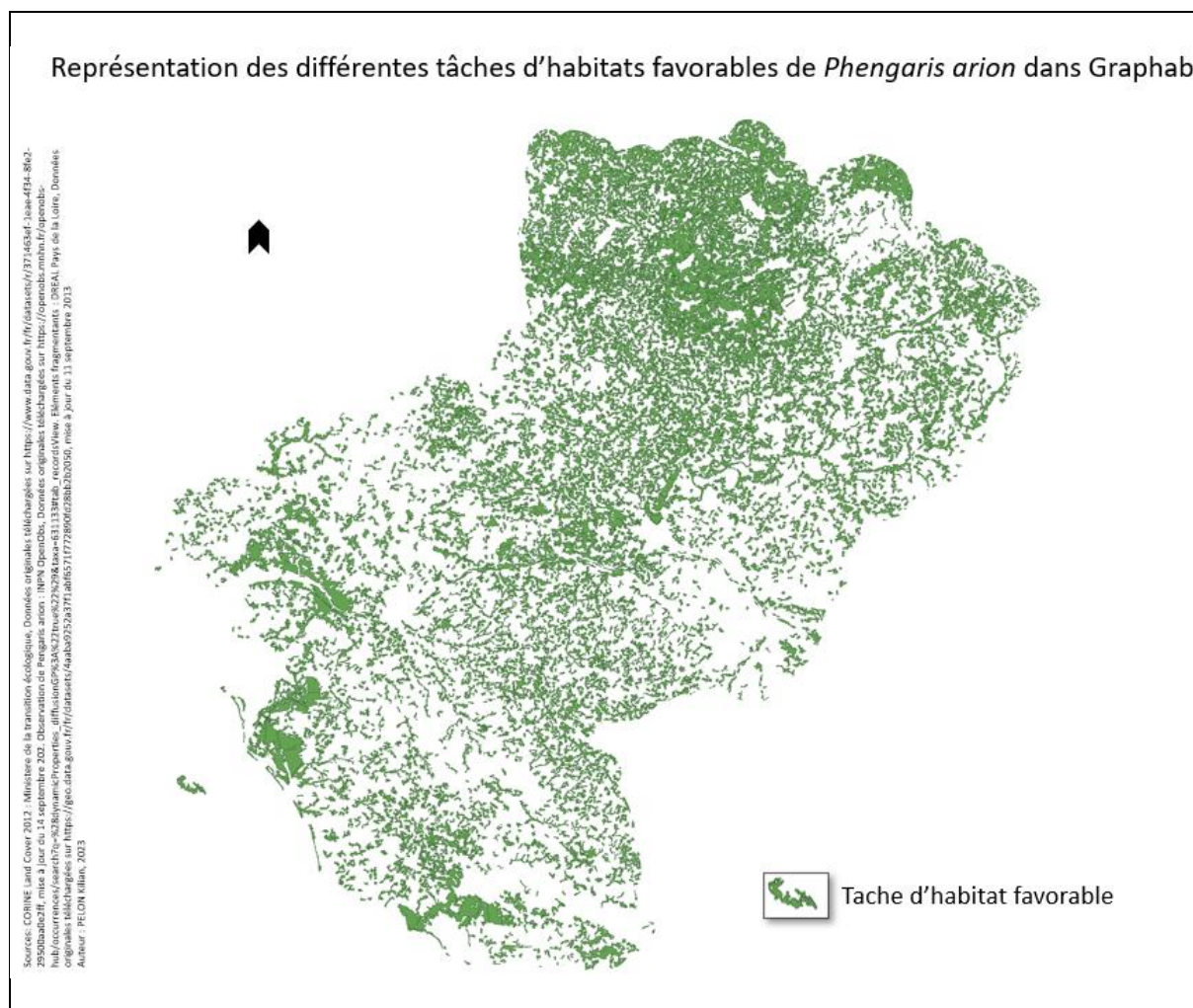
Annexe 7 : Modélisation des dispersions de *Phengaris arion* sur 1 ans (Pelon, 2024)



Annexe 8 : Modélisation des dispersions de *Phengaris arion* sur 5 ans (Pelon, 2024)



Annexe 9 : Représentation des différentes tâches d'habitats favorables de Phengaris arion dans Graphab (Pelon, 2024)





Directeur de recherche : Bienvenu Louison

Etudiant : Pelon Kilian

PFE/DAE5 ADAGE 2023-2024

Renforcement des populations d'Azuré du Serpolet dans des centrales photovoltaïques, cas de la région Pays de la Loire

Résumé : Ces dernières décennies le changement des pratiques agricoles a entraîné une perte conséquente des surfaces prairiales impactant de nombreuses espèces inféodées à celles-ci. Parmi elles, l'Azuré du Serpolet, *Phengaris arion*, un petit papillon patrimonial à la teinte bleutée. Ainsi, dans une optique de protection de l'espèce une solution envisagée par un projet lancé par ENGIE et CITERES est d'utiliser les centrales photovoltaïques au sol comme substitution des prairies. Cependant, une question persiste concernant l'accessibilité de ces centrales par *Phengaris arion*. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude, l'objectif sera au travers de différentes méthodes de modélisation d'étudier les potentielles dispersions de *Phengaris arion* dans un contexte où les centrales photovoltaïques au sol sont des lieux d'accueil et propices à l'implantation du papillon. Il sera alors possible d'évaluer subjectivement si ces dernières sont potentiellement un enjeu dans la préservation de l'espèce. Cette étude se placera dans le contexte de la région Pays de la Loire et visera à répondre à la problématique suivante. *Les centrales photovoltaïques peuvent-elles jouer un rôle dans la conservation de Phengaris arion ?* Pour cela, l'étude sera réalisée en utilisant deux outils, BioDispersal un plugin de Qgis et Graphab. Les résultats montreront, malgré certaines limites, que ces centrales peuvent éventuellement jouer un rôle dans les dispersions et la colonisation de nouveaux milieux, mais que celui-ci est relativement faible et nuancé.

Mots Clés : *Phengaris arion*, Azuré du serpolet, Prairies, Centrales photovoltaïques, Qgis, BioDispersal, Graphab