

PROJET DE FIN D'ETUDES 2021-2022

Les effets du changement climatique et des activités humaines
sur la distribution des espèces

*Cas particulier des espèces **Gentiana pneumonanthe**, **Phengaris alcon** et **Myrmica**
en région Centre-Val de Loire*



***Gentiana
pneumonanthe***



Phengaris alcon



Myrmica

Sylvaine BOUDEAU et Alice PAOLORSI

Sous la direction de Francis ISSELIN

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.

Les auteurs de cette recherche ont 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

Nous tenons à remercier notre tuteur pédagogique, Francis ISSELIN, Maître de Conférences Ecologue à Polytech Tours, pour l'encadrement et l'aide précieuse qu'il nous a apporté durant toute la durée de ce projet de fin d'étude.

Nous souhaitons également remercier Igor BOYER, doctorant à Polytech Tours, pour son aide et son appui.

Enfin, nous remercions tous nos proches qui nous ont soutenu et conseillé dans ce travail.

SOMMAIRE

Table des matières

Introduction.....	2
Matériel et Méthodes	4
1. Cycle de vie particulier des espèces <i>Phengaris alcon</i> , <i>Gentiana pneumonanthe</i> et <i>Myrmica</i>	4
2. Préparation des données	5
a. Préparation des données d'occurrence	5
b. Préparation des données paysagères	5
3. Modélisation des habitats favorables aux espèces sous BIOMOD2	6
a. Préparation et modélisation des variables.....	6
b. Test de la colinéarité et de la corrélation entre les variables	6
4. Détermination des zones d'habitats favorables aux espèces	7
a. Création du jeu de données	7
b. Projection des habitats paysagers favorables à <i>Phengaris alcon</i> et <i>Gentiana pneumonanthe</i>	7
5. Analyse des modèles	8
a. Evaluation de la performance des modèles	8
b. Contribution des variables	8
c. Courbes de réponses	9
6. Modélisation des corridors écologiques à l'aide du logiciel Graphab.....	9
a. Préparation des données	9
b. Limite et alternative au logiciel Graphab	10
Résultats	11
1. BIOMOD2 et favorabilité paysagère pour le <i>Phengaris alcon</i> et la <i>Gentiana pneumonanthe</i> .	11
a. <i>Phengaris alcon</i>	11
b. <i>Gentiana pneumonanthe</i>	13
c. Zones de co-occurrence des espèces <i>Phengaris alcon</i> et <i>Gentiana pneumonanthe</i>	15
2. Cohérence entre l'occupation du sol et les habitats favorables aux espèces.....	17
Discussion	23
Annexes	29
Annexe 1 : occurrences des espèces <i>Phengaris alcon</i> , <i>Gentiana pneumonanthe</i> et <i>Myrmica</i> en France	29

Annexe 2 : code R permettant d'obtenir tous les résultats présentés dans cette étude	30
Annexe 3 : détermination des coûts des types de milieux pour <i>Phengaris alcon</i> et coûts attribués à <i>Gentiana pneumonanthe</i>	39

Table des figures

Figure 1 : Cycle de vie du Phengaris alcon (auteur : A. PAOLORSI) (Nash, 2010)	4
Figure 2 : Matrice de corrélation de Bravais-Pearson (Source : A. PAOLORSI)	11
Figure 3 : Valeurs de TSS et AUC (ROC) obtenues pour la modélisation de Phengaris alcon (Source : S. BOUDEAU)	12
Figure 4 : Projection moyenne du modèle ANN pour le Phengaris alcon (Source : S. BOUDEAU)	13
Figure 5 : Valeurs de TSS et AUC (ROC) obtenues pour la modélisation de la Gentiana pneumonanthe (Source : A. PAOLORSI)	14
Figure 6 : Habitats favorables générés par le modèle ensembliste pour Gentiana pneumonanthe (Source : A. PAOLORSI)	15
Figure 7 : Carte de la superposition des habitats favorables pour Phengaris alcon et Gentiana pneumonanthe (Source : S. BOUDEAU)	16
Figure 8 : Points de présence de Phengaris alcon dans la zone de dispersion autour des habitats de co-occurrence (Source : S. BOUDEAU)	16
Figure 9 : Points de présence de Phengaris alcon et de Gentiana pneumonanthe en fonction des différents habitats urbains et naturels en Indre-et-Loire. (Source : S. BOUDEAU)	17
Figure 10 : Points de présence de Gentiana pneumonanthe selon l'occupation du sol Corine Land Cover dans le Loiret (Sources : CLC, A. PAOLORSI)	18
Figure 11 : Points de présence actuelle de Phengaris alcon et de Gentiana pneumonanthe en fonction des routes fortement fréquentées en Centre-Val de Loire (Source : S. BOUDEAU)	19
Figure 12 : Points de présences actuelle de Phengaris alcon et de Gentiana pneumonanthe en fonction des cours d'eau présents en Centre-Val de Loire (Source : S. BOUDEAU)	20
Figure 13 : Points de présence du Phengaris alcon et de Gentiana pneumonanthe selon les Milieux Potentiellement Humides en CVL (Source : A. PAOLORSI)	20
Figure 14 : Favorabilité paysagère du Phengaris alcon et de Gentiana pneumonanthe sur la carte des MPH en CVL (Source : A. PAOLORSI)	21
Figure 15 : Parcs naturels régionaux présents en Centre-Val de Loire et points de présence de Phengaris alcon et Gentiana pneumonanthe (Source : S. BOUDEAU)	22

Table des tableaux

Tableau 1 : Données paysagères étudiées pour chacune des espèces	6
Tableau 2 : Coûts par type de milieux	9
Tableau 3 : Choix des métriques (Clauzel et al., 2020)	10
Tableau 4 : Contributions moyennes des variables paysagères pour la modélisation de Phengaris alcon (Source : S. BOUDEAU)	12
Tableau 5 : Contributions moyennes des variables paysagères pour la modélisation de la Gentiana pneumonanthe (Source : A. PAOLORSI)	14

Introduction

Dans un contexte d'urgence climatique, les études sur la survie des espèces et les méthodes développées pour les préserver sont nombreuses. En effet, les bouleversements climatiques accélérés et l'altération des écosystèmes par les Hommes viennent perturber les cycles de vie de ces espèces qui ne peuvent parfois pas s'adapter (*Définition de Changement climatique*, s. d.). Bien que les recherches scientifiques sur les effets des modifications des conditions des milieux se multiplient, nos connaissances encore limitées sur les cycles de vie des espèces et leur dispersion dans l'espace, sont parfois un frein pour adopter des mesures efficaces pour leur conservation.

Au cours de leur cycle de vie, de nombreuses espèces interagissent entre elles. Qu'il s'agisse d'une interaction obligatoire (symbiose) ou non, les individus concernés par cette relation particulière en tirent des bénéfices réciproques (*Mutualisme*, s. d.). Il s'agit alors d'une relation dite de mutualisme. Il existe de nombreux exemples de mutualisme de différentes natures comme la pollinisation des fleurs par les insectes butineurs ou encore les mycorhizes, bactéries s'associant aux tissus racinaires de certaines espèces végétales pour leur apporter des nutriments. Lorsque certaines espèces sont dans une relation de mutualisme obligatoire, elles dépendent alors de l'occurrence des individus avec qui elles sont en interaction. De plus, comme tous les êtres vivants, les individus en interaction sont dépendants des changements climatiques actuels et ainsi des modifications de leur habitat.

Le réchauffement généralisé du climat provoque l'augmentation des températures moyennes de l'air à la surface terrestre, des bouleversements des régimes de précipitations et des vents et l'amplification des phénomènes météorologiques extrêmes (Cerrato et al., 2016; *Définition de Changement climatique*, s. d.). Ces modifications sont des menaces pour la survie de tous les êtres vivants, en particulier ceux dont le cycle de vie dépend d'autres individus. En réponse à ces changements, certaines espèces vont adapter leur phénologie ainsi que leur physiologie alors que d'autres seront amenées à modifier leur aire de répartition suivant le déplacement de leur niche écologique¹ (Cerrato et al., 2016). Ainsi, des individus en interaction intra ou interspécifique ne répondront pas nécessairement de la même manière à leur environnement en évolution. Une espèce tributaire de la répartition d'une ou plusieurs autres espèces peut voir sa niche écologique se déplacer par rapport à celles des espèces avec qui elle est en relation (Schweiger et al., 2008). Des individus en interaction qui n'ont pas une correspondance exacte dans leur aire de répartition sont alors dépendants de conditions biotiques et abiotiques (climat notamment) différentes, ainsi leur réaction aux bouleversements climatiques sera individuelle (Schweiger et al., 2008).

Pour toutes ces raisons, il peut alors arriver que ces individus sortent de leur niche climatique et ne parviennent pas à s'adapter et entrent donc en déclin et s'éteignent (Cerrato et al., 2016). Le changement climatique est d'ailleurs l'un des moteurs qui affecte le plus la biodiversité (Schweiger et al., 2008). Les insectes sont parmi les premiers touchés car ils répondent rapidement à ces changements, notamment les papillons (Settele & Kühn, 2009).

C'est dans ce cadre que notre étude sur les effets des changements climatiques et des activités humaines sur la distribution des espèces du mutualisme *Phengaris* et *Gentiana* va être menée.

En effet, le développement des activités humaines au XX^{ème} siècle a entraîné l'accélération du phénomène de réchauffement climatique, et avec, le déclin considérable de l'espèce *Phengaris alcon*

¹ Niche écologique = ensemble des conditions dans lesquelles vit et se reproduit un individu, une espèce ou une population.

durant la seconde moitié du siècle (Thomas & Settele, 2004). Ce papillon, ayant un mode de vie particulier, fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques dans le but de le préserver et est reconnu comme espèce protégée à l'international. Cependant, pour le sauvegarder, il faut comprendre les ressources dont il dépend. Ce papillon nécessite deux relations de mutualisme au cours de sa vie avec une plante hôte, *Gentiana pneumonanthe*, et une fourmi rouge, *Myrmica*, rendant son cycle de développement exceptionnel mais aussi exigeant (Briere, 2006).

Le changement climatique actuel pourrait nuire à cet équilibre déjà si sensible. Selon certaines études et modèles climatiques, les zones géographiques propices à l'existence du *Phengaris alcon* pourraient diminuer d'environ 70%, notamment dans le sud de l'Europe, en raison de l'augmentation des températures (Cerrato et al., 2016). En effet, des températures plus élevées pourraient fortement impacter la phénologie de la gentiane et la période de vol du papillon qui pourraient alors ne plus se superposer dans le temps (Valdés & Ehrlén, 2018). D'autre part, d'autres chercheurs pensent que certaines espèces de *Phengaris*, notamment *Phengaris arion*, pourraient migrer vers le Nord (Settele & Kühn, 2009). Nous pouvons alors imaginer la même réponse pour *Phengaris alcon*. Néanmoins, la capacité de dispersion et la structure du paysage pourraient constituer un frein pour son adaptation au climat futur. En effet, la connectivité du paysage est un facteur important à prendre en compte pour le déplacement des espèces. D'après une étude publiée en 2018 (Årevall et al., 2018), les espèces aux faibles capacités de dispersions, comme *Phengaris alcon* qui a une distance de dispersion de 3 km (Briere, 2006), ne pourront pas migrer dans un paysage où les habitats favorables sont homogènes, c'est-à-dire uniformément répartis sur l'ensemble du milieu. A l'inverse, un paysage hétérogène présentant alors une mosaïque d'habitats et de corridors écologiques pourra convenir à leur déplacement (Briere, 2006; Cerrato et al., 2016; Filz & Schmitt, 2015; Schweiger et al., 2008). Cependant, cela se complique lorsque des espèces vivent en interaction. En effet, si elles ne se déplacent pas à la même vitesse ou sur la même distance par exemple, cela pourrait entraîner une réduction de leur zone de co-occurrence et ainsi perturber leur relation, voir impacter leur survie (Urban et al., 2012).

Face à ces différents constats sur les possibles réponses du *Phengaris alcon* face aux évolutions climatiques, comment prévoir au mieux l'évolution de la distribution de ces trois espèces interdépendantes selon la structure du paysage en Centre-Val de Loire dans un contexte de changement climatique ?

Deux hypothèses ont été formulées :

- La structure du paysage actuelle permet aux espèces de se déplacer facilement, avec la présence d'un bon réseau de corridors écologiques. Ainsi, la zone de co-occurrence ne sera que très peu affectée par les modifications climatiques si ces espèces ont la même capacité de dispersion (Schweiger et al., 2008; Settele & Kühn, 2009).
- La structure du paysage pourrait entraîner un décalage dans les réponses de migrations et/ou d'adaptation des trois espèces et ainsi mener à la réduction voire à la disparition des zones de co-occurrence. Cela pourrait condamner le cycle de vie du papillon en limitant une de ses ressources, le papillon serait alors en déclin.

Matériel et Méthodes

1. Cycle de vie particulier des espèces *Phengaris alcon*, *Gentiana pneumonanthe* et *Myrmica*

Le *Phengaris alcon* vit dans les milieux humides, prairies ou landes européennes où est présente sa plante hôte, *Gentiana pneumonanthe*. Il est reconnaissable par la couleur de ses ailes bleues et son cycle de vie singulier (Nowicki et al., 2019).

Après l'accouplement, la femelle *Phengaris alcon* pond sur la *Gentiana pneumonanthe*, de préférence sur les fleurs, qui sont alors pollinisées (Granereau, 2014; Kuuer & Fartmann, 2004). Durant trois semaines, les chenilles se développent au sein des inflorescences dont elles se nourrissent. Puis, un soir, elles sortent de la plante et se laissent tomber au sol. Parallèlement à ce moment, les fourmis *Myrmica* sortent de leur habitat pour aller s'approvisionner en nourriture. Les jeunes *Phengaris* étant des proies faciles, ils n'ont que quelques heures pour trouver un refuge. C'est au sein d'une fourmilière qu'ils vont trouver une protection optimale loin des parasites et des prédateurs. Possédant une substance hydrocarbonée sur leur peau ressemblant à celle présente sur les cuticules de ces fourmis, les chenilles les attirent et sont responsables de leur adoption. En effet, les fourmis *Myrmica*, induites en erreur, les ramène dans leur nid et les mettent au contact du couvain. Pendant plusieurs mois, voire plusieurs années, elles vont s'occuper de ces chenilles en leur apportant le nécessaire à leur bon développement. En contrepartie, les fourmis bénéficient d'une substance nourricière sécrétée par les chenilles. Lorsque sa métamorphose est finie, souvent en juillet, le papillon quitte le nid et part à la recherche d'un support pour déployer ses ailes (Rozier & Guérin, 2014; Thomas & Settele, 2004).

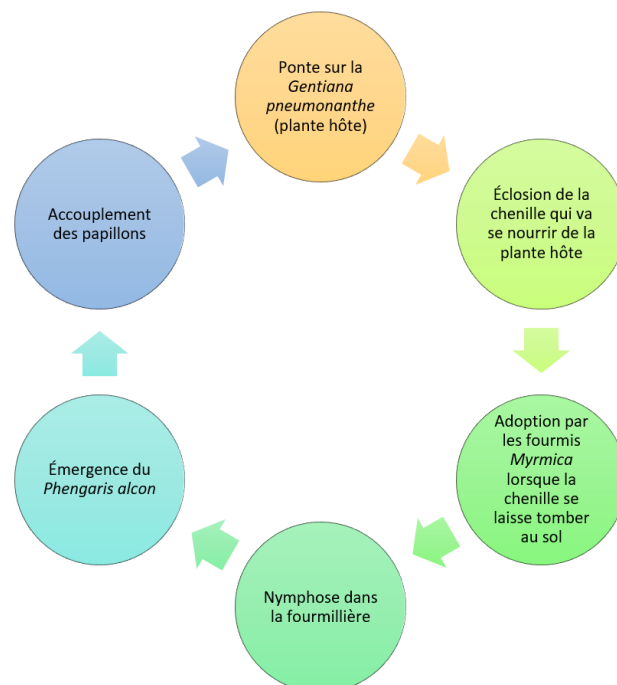


Figure 1 : Cycle de vie du *Phengaris alcon* (auteur : A. PAOLORSI) (Nash, 2010)

Ainsi, comme l'illustre la Figure 1, les *Phengaris alcon* ne pourraient pas accomplir entièrement leur cycle de vie sans la présence de ces deux espèces. Cependant, la disponibilité de la gentiane, espèce protégée également, est un facteur limitant pour le développement du papillon (Annexe 1). En effet, cette espèce végétale est très rare et localisée, et restreint le papillon dans des aires relativement isolées et petites (Nowicki, 2007; Nowicki et al., 2019). En revanche, les fourmis hôtes, *Myrmica ruginodis* et *scabrinodis*, ont été recensées sur l'ensemble du territoire français par l'association AntArea (Annexe 1). Ces dernières ne seront donc pas un frein à sa future adaptation. Celles-ci ne seront pas étudiées dans le présent rapport. Ce choix a été fait car celles-ci sont globalement présentes en France et ne sont donc pas considérées comme un facteur limitant.

2. Préparation des données

a. Préparation des données d'occurrence

La première étape a été de récupérer la base de données spécifique aux espèces *Phengaris alcon* et *Gentiana pneumonanthe*. Deux fichiers csv comprenant les deux espèces avec leurs points de présence en système de coordonnées WGS84 ont été fournis et proviennent d'un stage réalisé en 2021 par Clotilde Simonelli sur ce même sujet. Ces données ont été trouvées à l'aide de l'association Caudalis qui réalise des études naturalistes avec la DREAL Centre-Val de Loire. Afin d'éviter d'avoir des résultats biaisés dû à un éventuel changement climatique, seules les données entre 1970 et 2017 avaient été sauvegardées. Les doublons ont été retirés dans un premier temps. Puis, à l'aide de QGIS, seuls les points présents dans la région Centre-Val de Loire, notre zone d'étude, ont été conservés et convertis en système de coordonnées Lambert 93 puis en csv.

b. Préparation des données paysagères

Parallèlement, plusieurs rasters de distance d'occupation et d'utilisation des sols et des habitats ont été récupérés du stage de Clotilde Simonelli, comprenant des forêts de conifères, des forêts mixtes, des forêts de feuillus, des cultures, des plans d'eau, des peupleraies, des cours d'eau, des prairies temporaires et permanentes (Tableau 1). Ces variables paysagères sont potentiellement favorables aux espèces étudiées. De plus, des données du sol comprenant des rasters sur le pH du sol, la concentration en carbone organique (Corg), la capacité d'échange cationiques (CEC) et les milieux potentiellement humides (MPH) ont aussi été traitées (Tableau 1). Toutes les variables ont été converties en Lambert 93 et en tif à une résolution de 250 x 250 mètres pour que toutes les données se correspondent entre elles. Le choix de ne pas prendre la pente et l'altitude a semblé pertinent puisque le point culminant se trouve à Magnoux à 504 mètres d'altitude, et que les espèces étudiées peuvent être présentes à des hauteurs plus élevées pouvant aller jusqu'à 1500-1800 mètres (Roinel, 2014). Ce point culminant en Centre-Val de Loire n'aura donc certainement pas d'impact sur la dispersion des espèces.

Le pH du sol, la quantité en Corg ou en CEC du sol ont seulement été utilisés pour la gentiane puisqu'ils n'impactent pas directement la présence du papillon. Cependant, dans la suite de la méthode, seule la variable Corg a été conservée car ces trois variables étaient trop corrélées entre elles lors du test de Bravais-Pearson (voir 3.b).

Tableau 1 : Données paysagères étudiées pour chacune des espèces

<i>Phengaris alcon</i>	<i>Gentiana pneumonanthe</i>
Cours eau 1 (cat 1)	Cours eau 1 (cat 1)
Cours eau 2 (cat2)	Cours eau 2 (cat2)
Plans d'eau	Plans d'eau
Forêts conifères	Forêts conifères
Forêts feuillus	Forêts feuillus
Forêts mixtes	Forêts mixtes
Cultures	Cultures
Peuplerais	Peuplerais
Prairies permanentes	Prairies permanentes
Prairies temporaires	Prairies temporaires
MPH	MPH
	Corg sol

3. Modélisation des habitats favorables aux espèces sous BIOMOD2

a. Préparation et modélisation des variables

Les données d'occurrence des espèces *Phengaris alcon* et *Gentiana pneumonanthe* ont été introduites dans le logiciel RStudio ainsi que les données paysagères sous format tif pour être analysées. Pour simplifier le code, un stack a été créé. Cette fonction permet de créer un objet, ici Env, regroupant toutes les données paysagères.

b. Test de la colinéarité et de la corrélation entre les variables

La multicolinéarité des variables a, tout d'abord, été vérifiée avec la fonction "VIF" (variance inflation factor) à l'aide du package "usdm". Si les résultats obtenus sont inférieurs à 10, qui correspond

à la valeur seuil, alors les données présentent une absence de colinéarité et peuvent donc être conservées. Dans le cas contraire, les valeurs élevées devront être supprimées (James et al., 2013).

Ce test est ainsi complété par le test de Bravais-Pearson qui évalue la corrélation entre les différentes variables. Les résultats inférieurs ou égaux à 0,75 en valeurs absolues sont sauvegardés, ceux proches de 1 sont retirés car ils sont fortement corrélés et peuvent perturber les prochaines modélisations. Dans le cas du *Phengaris alcon*, toutes les variables paysagères semblent pertinentes pour l'étude écologique. Cependant, pour *Gentiana pneumonanthe*, nous avons retiré les variables CEC et pH.

A l'aide de ces deux tests, l'ensemble des données valides ont été sauvegardées pour la suite de la modélisation.

4. Détermination des zones d'habitats favorables aux espèces

a. Création du jeu de données

Le package BIOMOD2 du logiciel R Studio permet de modéliser la distribution des espèces et de leurs habitats à l'aide de variables environnementales (Thuiller et al., 2013). Il a donc été utilisé pour déterminer les habitats favorables aux espèces *Phengaris alcon* et *Gentiana pneumonanthe* sur la zone d'étude Centre-Val de Loire.

Pour faire cela, un jeu de donnée de présence/pseudo-absence a été généré pour les deux espèces sur l'ensemble de la région. Celui-ci permet de produire des points de potentielle absence des espèces à l'aide d'un algorithme qui compare les données environnementales des points de présence avec les aires d'absence. Pour le *Phengaris alcon*, 4 fois plus de points de pseudo-absence ont été générés par rapport au nombre de présences du jeu de données d'occurrence. En effet, le faible nombre de points de présence, seulement 30, ne nous permettait pas de couvrir pertinemment la zone d'étude si nous générions autant de présences que de pseudo-absences.

Concernant la gentiane, son jeu de pseudo-absences a été généré autant de fois que son jeu de présences, alors suffisamment nombreuses. L'ensemble de ces données pseudo-absences/présences ont été fusionnées pour constituer l'ensemble des données nécessaires pour les modélisations suivantes.

b. Projection des habitats paysagers favorables à *Phengaris alcon* et *Gentiana pneumonanthe*

Afin de modéliser les niches écologiques de nos deux espèces, nous avons mobilisé 3 modèles : Generalised Linear Models (GLM), Random Forests (RF) et Artificial Neural Networks (ANN).

Préalablement, chaque modèle a été paramétré précisément avec la fonction "BIOMOD_ModelingOptions", afin de choisir les options les plus optimales. Puis la modélisation a été lancée sur 5 runs et 4 approximations de pseudo-absences pour le papillon et, 5 runs et 3 approximations de pseudo-absences pour la plante, pour chacun des 3 modèles.

La projection a été réalisée afin de créer une première carte représentant la distribution de *Phengaris alcon* et *Gentiana pneumonanthe* en Centre-Val de Loire sur les conditions environnementales paysagères actuelles.

5. Analyse des modèles

a. Evaluation de la performance des modèles

En parallèle, la précision des différents modèles générés par BIOMOD2 a été évaluée grâce à l'AUC (ROC) et l'indice True Skill Statistics (TSS). L'indice TSS varie entre -1 et 1, la valeur 1 indiquant une précision parfaite et les valeurs inférieures à 0 se rapprochant des performances aléatoires, alors bien moins précises (Allouche et al., 2006). TSS est d'ailleurs l'indice le plus fiable pour évaluer la précision des modèles. Cependant, dans notre cas d'étude, les valeurs de TSS obtenues pour les 3 modèles et pour les runs des deux espèces sont toutes inférieures à 0,5. Nous nous sommes alors appuyées sur l'AUC pour évaluer la performance des modèles (Allouche et al., 2006). L'AUC, Area Under the ROC (Receiver Operating Characteristic) Curve varie de 0 à 1. Les valeurs d'AUC supérieures à 0,9 indiquent une grande précision des modèles, celles comprises entre 0,7 et 0,9 renseignent une bonne précision, enfin celles entre 0,5 et 0,7 indiquent une faible précision (Stohlgren et al., 2010). 0,5 est le seuil indiquant que la performance des modèles est aléatoire (Stohlgren et al., 2010).

Ainsi, deux graphiques ont été obtenus pour chaque espèce, le premier avec les scores TSS et AUC de chaque modèle et le deuxième avec les scores de chaque run afin de pouvoir les comparer et les évaluer. Si plusieurs des modèles (par espèce) évalués précédemment étaient de bonne qualité (TSS et/ou AUC > 0,7), un modèle ensembliste peut être réalisé. Il permet de conserver les meilleurs modèles et d'en faire une synthèse. Ainsi, ces modèles plus fiables et précis seront de nouveaux évalués (contributions des variables) et projetés.

Dans le cas où un seul modèle se démarque des autres par sa qualité, celui-ci sera conservé au détriment des autres et le modèle ensembliste n'aura pas besoin d'être réalisé. Ainsi, sa projection moyenne pourra être sauvegardée.

En finalité, pour chacune des espèces, un raster des projections des habitats favorables les plus fiables a été récupéré ainsi qu'un raster binaire avec des valeurs de 0 (habitats non favorables à l'espèce) et 1 (habitats favorables à l'espèce).

Puis, à l'aide de la fonction "BIOMOD_RangeSize", les rasters binaires des deux espèces ont été superposés afin d'identifier les zones de co-occurrences aux deux espèces.

b. Contribution des variables

L'outil BIOMOD2 permet également de déduire les variables paysagères qui influencent favorablement ou négativement la présence des espèces.

Ainsi, pour chaque run et chaque modèle, l'importance des variables a été calculée en utilisant la fonction "get_variables_importance". Ces données ont permis d'attribuer des coûts à chacun des habitats de la région Centre-Val de Loire. Si la valeur de contribution de la variable est élevée, cela signifie qu'elle contribue, de façon positive ou négative, à la distribution de l'espèce. Les courbes de réponses permettent de préciser la qualité de la contribution de la variable.

c. Courbes de réponses

Des courbes de réponses ont également été calculées pour chaque variable par modèle sauvegardé à l'aide de la fonction "response.plot2". Ces courbes, présentant en abscisse la surface cumulée de l'habitat et en ordonnée la probabilité de présence de l'espèce, permettent d'obtenir l'optimum des espèces étudiées et leur largeur de tolérance de leur niche écologique. Une espèce généraliste aura une courbe plus large, et aura donc une grande tolérance aux variations de celle-ci alors qu'une espèce spécialiste aura une courbe plus étroite donc sera moins tolérante aux variations du milieu. Ainsi, la perméabilité du milieu peut être déduite.

Tout le code utilisé pour générer les modèles de favorabilité paysagère de nos deux espèces est présent en annexe (Annexe 2).

6. Modélisation des corridors écologiques à l'aide du logiciel Graphab

a. Préparation des données

Les courbes de réponses et les contributions des variables des modèles obtenus avec le logiciel R aurait pu nous permettre de modéliser les réseaux écologiques des espèces dans la région avec le logiciel Graphab. Cependant, le manque de performance des ordinateurs à disposition n'a pas permis d'obtenir des résultats. Le choix a été fait, de laisser succinctement la démarche effectuée dans l'objectif d'obtenir ces corridors.

L'association de l'interprétation des courbes de réponses et de la contribution des variables permet d'attribuer une valeur de coûts écologiques à 10 habitats sélectionnés préalablement. Ces valeurs vont de 1 à 10 000, 1 étant un milieu structurant à l'espèce et 10 000 un milieu bloquant (Tableau 2). Un milieu structurant correspond à un milieu perméable, c'est-à-dire dans lequel l'espèce n'éprouve aucune difficulté à s'y déplacer, alors qu'un milieu bloquant restreint fortement sa capacité de déplacement. Le tableau ci-dessous reprend les valeurs des coûts écologiques définies selon 6 types de milieux relatifs à l'espèce.

Tableau 2 : Coûts par type de milieux

Fonction	Valeur du coût
Milieu structurant	1
Milieu favorable	50
Milieu neutre	100
Milieu défavorable	400

Milieu répulsif	800
Milieu bloquant	10 000

Les coûts déterminés après analyse des courbes et des contributions ont été croisés avec des recherches bibliographiques et corrigés si nécessaire. L'exemple de calcul de coût réalisé pour le *Phengaris alcon* est présent en annexe, ainsi que les coûts attribués à *Gentiana pneumonanthe* (Annexe 3). Une fois les données rentrées, une analyse des corridors écologiques sur la zone d'étude peut être réalisée grâce à des calculs métriques (Tableau 3) puis une carte des corridors écologiques par espèce peut être produite.

Préalablement, le choix des calculs métriques les plus pertinents à la présente étude a été fait.

Tableau 3 : Choix des métriques (Clauzel et al., 2020)

Métrique	Explication
PC (probabilité de connectivité)	Probabilité que deux individus entrent en contact dans la zone étudiée (contact car ils sont situés dans la même tâche d'habits ou bien parce qu'ils sont dans deux tâches connectées entre elles). Valeur minimale : 0 (pas de rencontre/aucun habitat dans la zone étudiée) Valeur maximale : 1 (les individus sont connectés/zone d'étude entièrement composée d'habitats)
EC (connectivité équivalente)	Renseigne sur la quantité d'habitats atteignables par les individus. Valeur minimale : 0 (aucun habitat dans la zone étudiée) Valeur maximale : capacité totale des patchs (zone d'étude entièrement composée d'habitats)

La performance du matériel et le manque de temps à disposition n'a pas permis d'établir les corridors à l'échelle de la région.

b. Limite et alternative au logiciel Graphab

Dans l'incapacité de déterminer l'ensemble des réseaux écologiques sur tout le territoire avec Graphab, l'analyse des présences a été comparée avec les occupations du sol réelles à l'échelle de la région. Ainsi, des données issues de différents sites telles que la BdTOPO, Corine Land Cover, etc. ont été utilisées et analysées à l'aide de Qgis.

Résultats

1. BIOMOD2 et favorabilité paysagère pour le *Phengaris alcon* et la *Gentiana pneumonanthe*

La corrélation des variables paysagères sont représentées sur cette matrice :

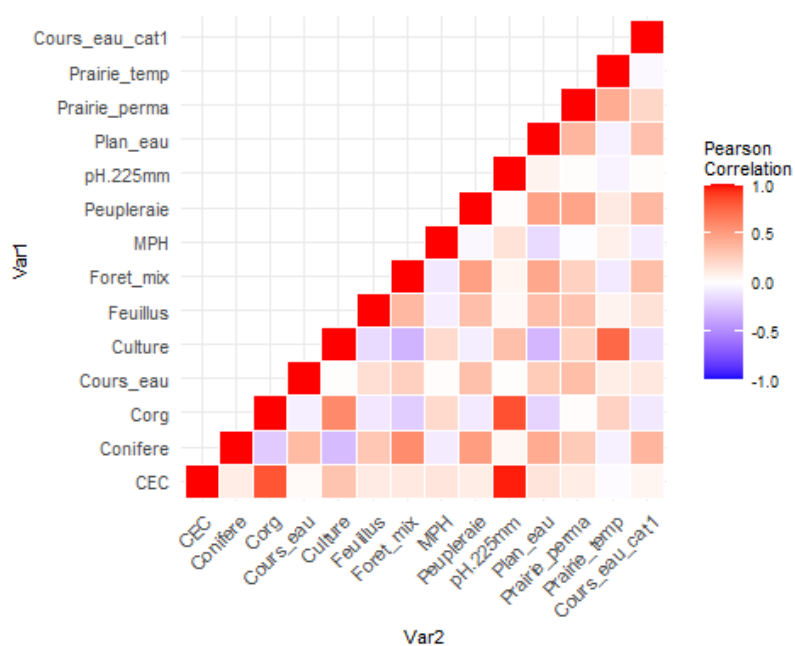


Figure 2 : Matrice de corrélation de Bravais-Pearson (Source : A. PAOLORSI)

a. *Phengaris alcon*

Pour *Phengaris alcon*, le modèle ANN semble le plus fiable avec la valeur la plus haute d'AUC (ROC), proche de 0,7 (Figure 2).

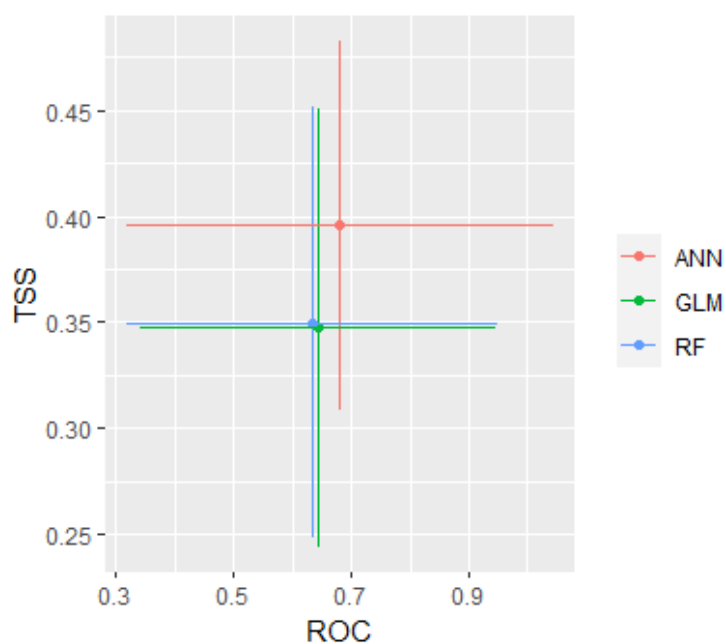


Figure 3 : Valeurs de TSS et AUC (ROC) obtenues pour la modélisation de *Phengaris alcon* (Source : S. BOUDEAU)

La contribution de chaque variable paysagère est donnée ci-dessous (Tableau 4) :

Tableau 4 : Contributions moyennes des variables paysagères pour la modélisation de *Phengaris alcon* (Source : S. BOUDEAU)

	GLM	ANN	RF	Moyenne tous modèles	
Cours,eau_1	0,038	0,24535	0,039157895	0,1075	10,75%
Conifere	0,1185	0,08435	0,02625	0,0764	7,64%
Cours,eau_2	0,1756	0,2743	0,01545	0,1551	15,51%
Culture	0,12345	0,0088	0,06645	0,0662	6,62%
Feuillus	0,1216	0	0,0526	0,0581	5,81%
foret,mix	0,14435	0,00465	0,0713	0,0734	7,34%
MPH	0,08225	0,13115	0,036	0,0831	8,31%
Peupleraie	0,18615	0,0876	0,0451	0,1063	10,63%
plan,eau	0,06685	0,0156	0,0478	0,0434	4,34%
prairie,perm	0,1596	0,00685	0,0539	0,0735	7,35%
Prairie,temp	0,0955	0,00065	0,01005	0,0354	3,54%

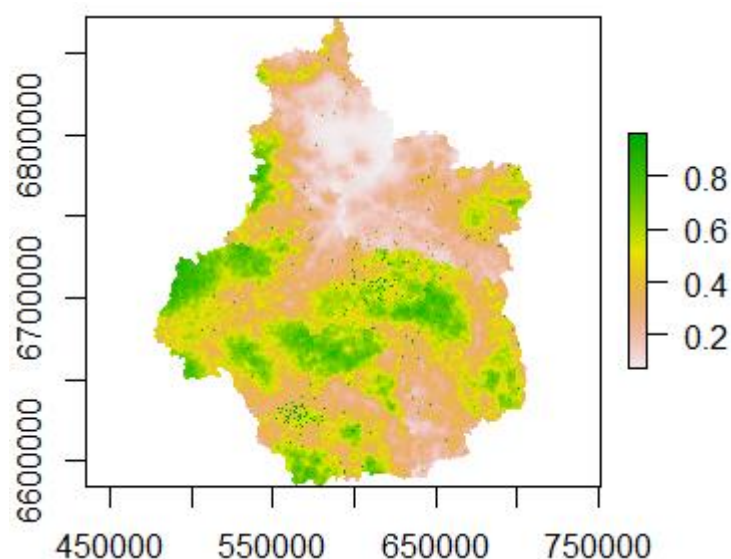


Figure 4 : Projection moyenne du modèle ANN pour le *Phengaris alcon* (Source : S. BOUDEAU)

La projection moyenne du modèle ANN (Figure 3) est la plus contrastée avec le plus de zones favorables, statistiquement ce modèle semble le plus pertinent. Grâce à la modélisation, une carte de favorabilité de l'espèce au sein de la région Centre-Val de Loire a été obtenue.

Globalement, les habitats favorables à l'Azuré des mouillères forment des grands patchs situés principalement au centre et à l'ouest de la région. Le nord de la région semble quant à lui peu favorable à sa présence. Cependant, peu de corridors semblent présents entre ces gros patchs d'habitats, sachant que la distance de dispersion maximale de ce papillon est de 3 km. L'aire totale de ces habitats représentent 7223 km² (18,3% du Centre-Val de Loire).

b. Gentiana pneumonanthe

Les 3 modèles de la plante hôte du *Phengaris alcon* semblent statistiquement fiables puisque les valeurs d'AUC (ROC) sont, pour les 3 modèles, tout juste supérieures à 0,75, ainsi que pour les runs (Figure 4). Les valeurs de TSS ne permettent pas d'identifier de modèle(s) plus performant(s) que les autres, même si le modèle RF est celui qui se rapproche le plus du seuil 0,5.

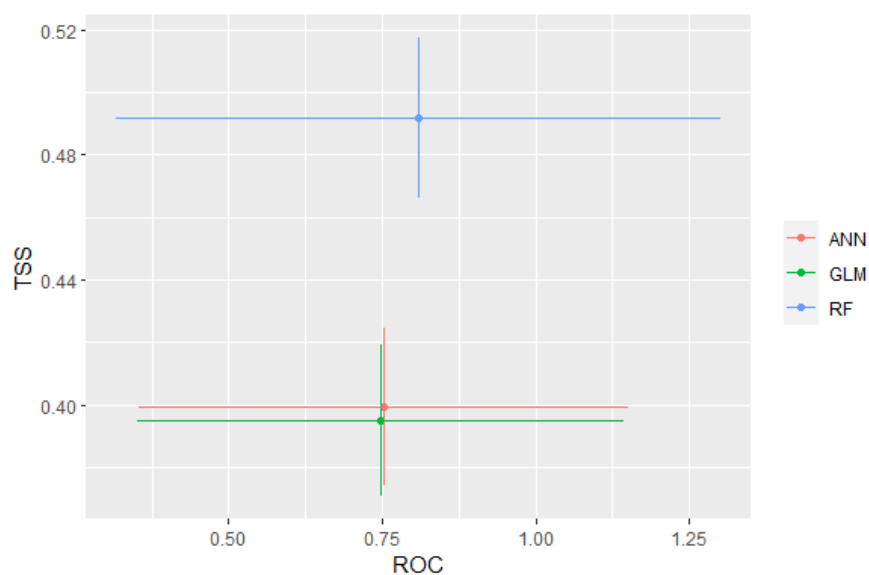


Figure 5 : Valeurs de TSS et AUC (ROC) obtenues pour la modélisation de la *Gentiana pneumonanthe* (Source : A. PAOLORSI)

Un modèle ensembliste a donc été réalisé pour cette espèce.

Les variables ayant le plus contribué pour les 3 modèles sont les plans d'eau et la variable "Conifère" est ayant le plus contribué pour le modèle GLM (Tableau 5).

Tableau 5 : Contributions moyennes des variables paysagères pour la modélisation de la *Gentiana pneumonanthe* (Source : A. PAOLORSI)

	GLM	ANN	RF	Moyennes tous modèles	
Conifere	0,1939	0,0974	0,0615	0,1176	11,76%
Corg	0,0290	0,1185	0,0657	0,0711	7,11%
Cours_eau_2	0,1087	0,0911	0,0275	0,0758	7,58%
Culture	0,0296	0,0043	0,0527	0,0288	2,88%
Feuillus	0,0021	0,0000	0,0162	0,0061	0,61%
Foret_mix	0,0431	0,0121	0,0407	0,0319	3,19%
MPH	0,0586	0,1015	0,0527	0,0709	7,09%
Peupleraie	0,0122	0,0090	0,0163	0,0125	1,25%
Plan_eau	0,1661	0,1527	0,1335	0,1508	15,08%
Prairie_perma	0,0033	0,0013	0,0111	0,0052	0,52%
Prairie_temp	0,0302	0,0033	0,0157	0,0164	1,64%
Cours_eau_1	0,0074	0,0140	0,0273	0,0162	1,62%

Puis la projection des habitats favorables (Figure 6) à la gentiane a été réalisée en Centre-Val de Loire. Les milieux favorables sont principalement situés dans le centre et le sud-ouest de la région avec un patch plutôt conséquent dans le Loiret (45). Les habitats propices à l'espèce restent néanmoins présents sur tous les départements, avec un gros patch à cheval sur le département du Loir-et-Cher (41) et du Cher (18). Des patches secondaires sont identifiables sur les ¾ sud de la région. Enfin, il existe une multitude de petits patches, notamment à l'ouest du territoire. Tout comme pour *Phengaris alcon*, le nord de la région semble moins favorable à sa présence.

Au total, ce sont 10 292,6 km² de territoires favorables pour la gentiane, soit environ 26% du territoire régional.

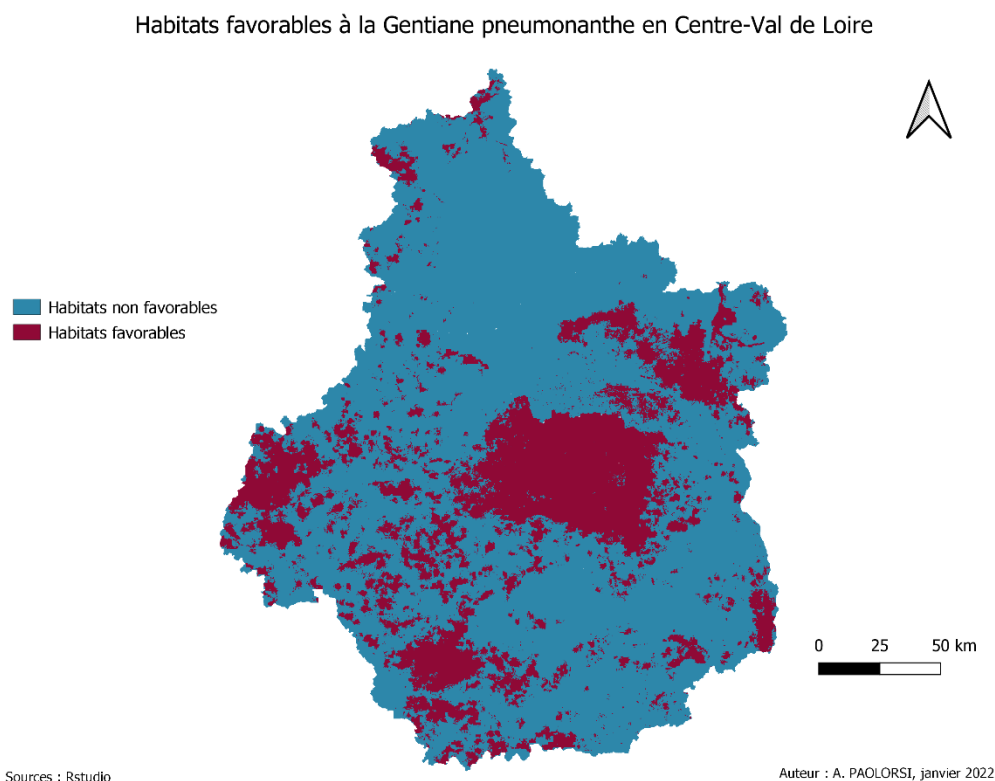


Figure 6 : Habitats favorables générés par le modèle ensembliste pour *Gentiana pneumonanthe* (Source : A. PAOLORSI)

c. Zones de co-occurrence des espèces *Phengaris alcon* et *Gentiana pneumonanthe*

Puis, les cartes obtenues préalablement ont été superposées dans le but de savoir si des zones coïncidaient. Ainsi, 3183 km² d'habitats semblent propices à leur co-présence (8% de zones favorables à ces deux espèces dans la région) (Figure 7). La gentiane, capable de vivre sans la présence de l'Azuré des mouillères, peut se développer sur des plus grandes surfaces. Il n'est donc pas étonnant de voir sur la carte une forte zone de gentiane seule. Cependant, la présence seule du papillon sur des aires peut être remise en question puisqu'elle dépend des plants de gentiane. La majorité de leurs points de présence relevés avant l'étude se situent dans les espaces de couleur verte, mais un certain nombre se trouve en dehors de ces zones. Un buffer de 3 km a été réalisé autour de ces milieux (Figure 8), car il correspond à la distance de dispersion maximale du papillon. De plus, un buffer de 7 km (Habel et al., 2007; WallisDeVries, 2004) a été ajouté (Figure 8), puisque d'après certains articles, l'espèce peut parvenir à se déplacer plus loin lorsque les conditions de son milieu ne sont pas optimales, même si cela reste assez rare. Ainsi, tous les points inventoriés lors des observations se trouvent dans les 7 km autour des zones d'habitats favorables. Les aires en jaune sur la carte correspondent peut-être à des potentiels corridors écologiques entre les aires fragmentées des habitats favorables, d'où la seule présence des *Phengaris alcon*. Une analyse avec Graphab serait pertinente pour vérifier cette hypothèse.

Carte de la présence conjointe des espèces Phengaris alcon et Gentiana pneumonanthe en CVL

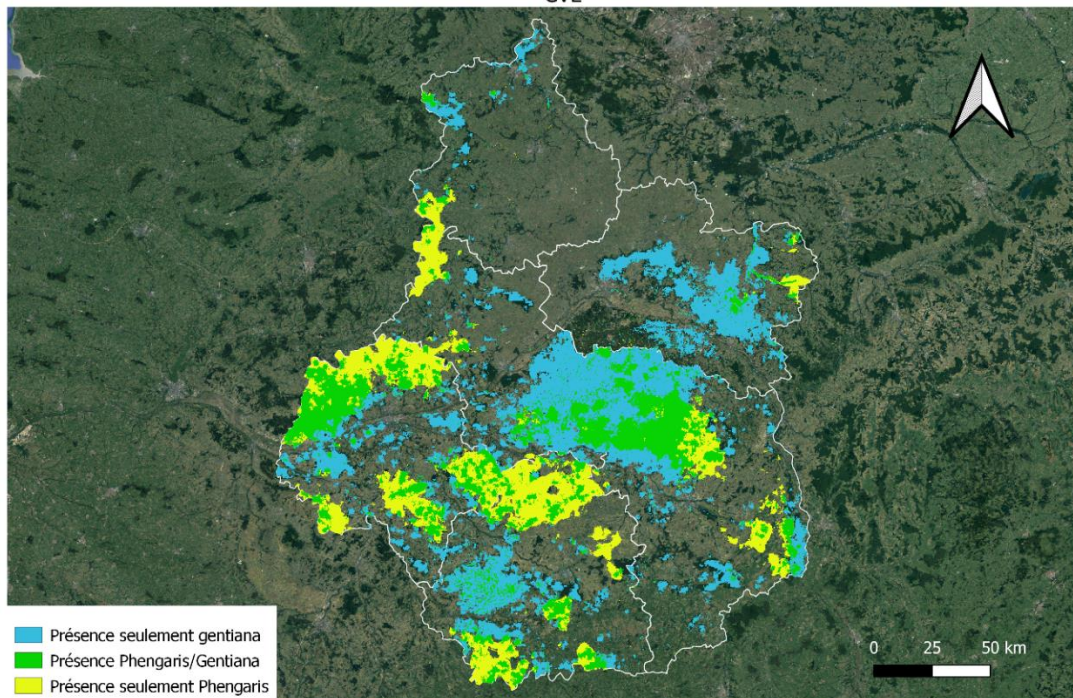


Figure 7 : Carte de la superposition des habitats favorables pour Phengaris alcon et Gentiana pneumonanthe (Source : S. BOUDEAU)

Points de présences de Phengaris alcon sur les différentes zones de favorabilité

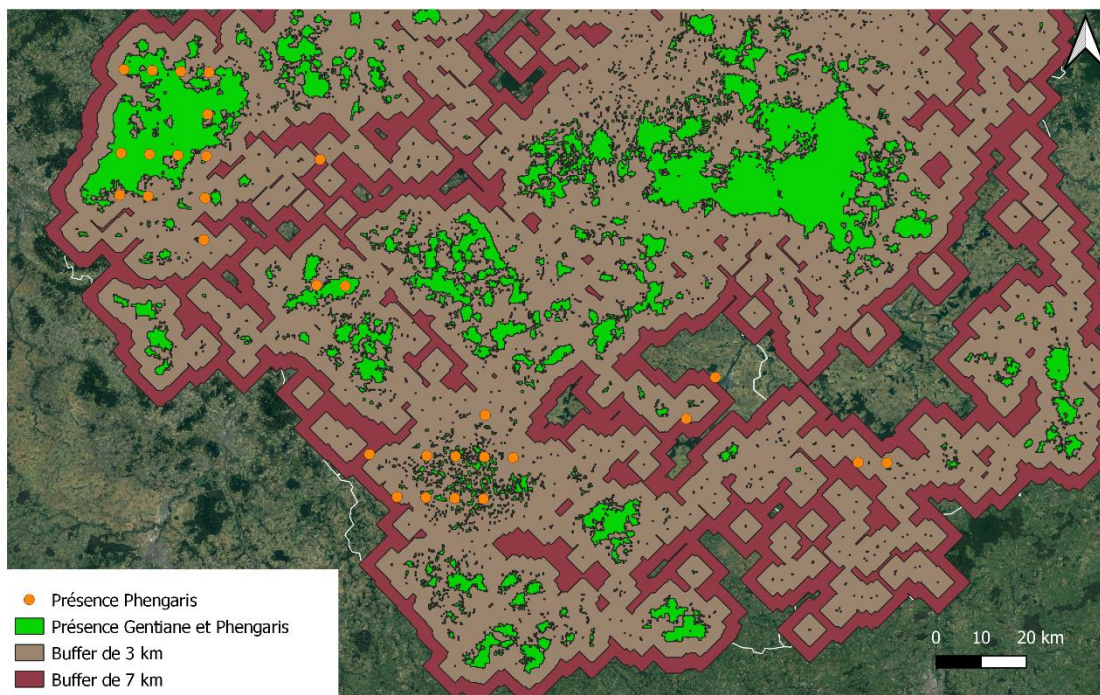


Figure 8 : Points de présence de Phengaris alcon dans la zone de dispersion autour des habitats de co-occurrence (Source : S. BOUDEAU)

2. Cohérence entre l'occupation du sol et les habitats favorables aux espèces

En comparant les données d'occupation du sol de la BD TOPO de la région Centre-Val de Loire avec les données d'habitats propices à la présence de chacune des deux espèces, nous pouvons vérifier la cohérence des zones favorables au papillon et à la gentiane générées par les différents modèles avec l'occupation actuelle des sols (Figure 9).

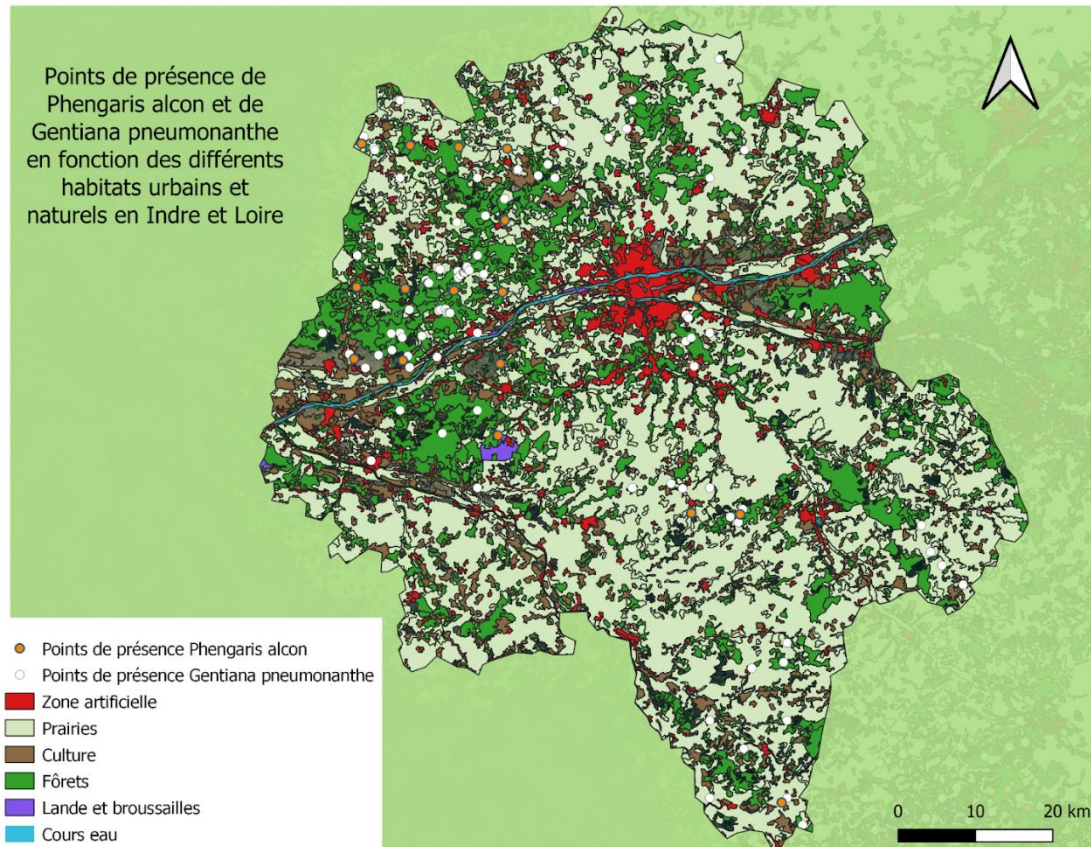


Figure 9 : Points de présence de *Phengaris alcon* et de *Gentiana pneumonanthe* en fonction des différents habitats urbains et naturels en Indre-et-Loire. (Source : S. BOUDEAU)

Les cartes d'habitats créées à partir de Corine Land Cover, montrent ici que la *Gentiana pneumonanthe* et le *Phengaris alcon* vivent principalement dans les prairies ou en lisière de forêts. En effet, il n'est pas rare de trouver le papillon en bordure de forêt puisque celle-ci lui procure une protection contre le vent et donc des conditions favorables pour sa survie (Merlet & Dupont, 2012). Ces observations de présence de la gentiane pneumonanthe dans des forêts de feuillus, et même de conifères, peuvent en revanche sembler surprenante car ses habitats sont principalement des prairies et des milieux humides tels que des landes humides, des prés et gazons humides, également des milieux oligotrophes et acidiphiles, les milieux marécageux, etc. (*Gentiane des marais*, s. d.; MNHN & OFB [Ed], 2003). En effet, la gentiane pneumonanthe est une plante mésohydrophile héliophile, elle pousse donc dans des milieux humides et a besoin de milieux ouverts (Billard, s. d.; Boudier et al., 1991). Ainsi, les forêts, de feuillus ou de conifères, n'apparaissent pas parmi les milieux propices aux gentianes pneumonanthes. Néanmoins, en regardant plus en détail l'occupation du sol dans ces patches forestiers identifiés précédemment, les gentianes ne sont pas toutes localisées dans les forêts de conifères ou du feuillus mais bien dans des prairies temporaires, des mosaïques de parcelles complexes cultivées ou en prairies temporaires de faible superficie (Figure 10). La présence des gentianes dans les forêts de feuillus, ou encore dans les forêts de conifères, dont les sols sont acides, peut être justifiée par la présence de

milieux ouverts au sein de ces forêts, telles que des clairières non visibles sur la nomenclature Corine Land Cover. Il est à noter que les mesures de géolocalisation des espèces ont une marge d'erreur de plusieurs mètres parfois qui peut expliquer des points de présence qui semblent surprenants. Cette limite de l'étude s'applique également pour les données d'occurrence du papillon.

Présences de la *Gentiana pneumonanthe* dans le Loiret (45)

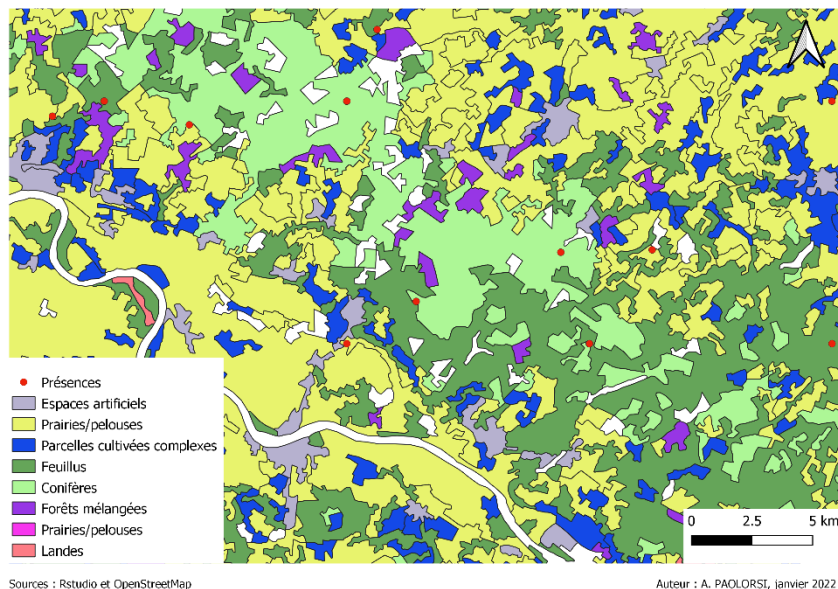


Figure 10 : Points de présence de *Gentiana pneumonanthe* selon l'occupation du sol Corine Land Cover dans le Loiret (Sources : CLC, A. PAOLORSI)

De plus, en examinant de plus près l'ensemble des cartes des autres départements, la partie nord de la forêt près de Vierzon dans le département du Cher présente moins de prairies ou de milieux ouverts que sur la carte ci-dessus. C'est peut-être la raison de l'absence d'occurrence du *Phengaris alcon*.

Pour finir, les individus ont été observés loin de la ville de Tours ou dans sa périphérie. Ce constat est le même pour toutes les grandes villes de la région, ainsi ces espèces ne sont donc probablement pas réceptives favorablement aux milieux urbains.

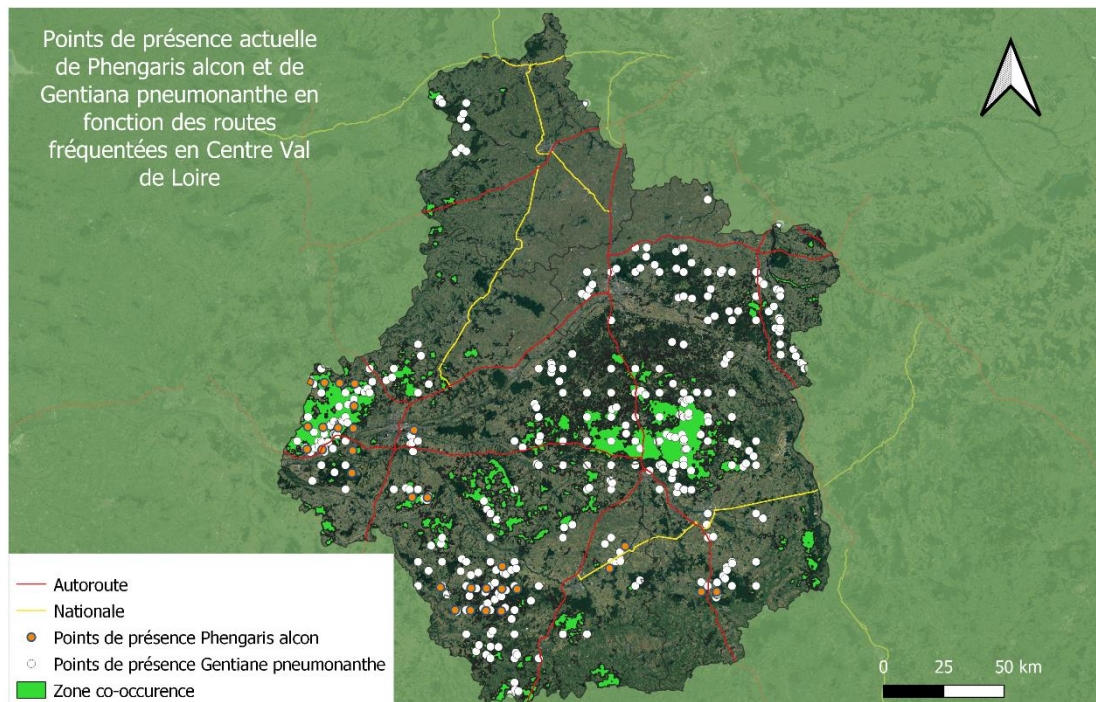


Figure 11 : Points de présence actuelle de *Phengaris alcon* et de *Gentiana pneumonanthe* en fonction des routes fortement fréquentées en Centre-Val de Loire (Source : S. BOUDEAU)

Les routes fortement fréquentées telles que les autoroutes et les nationales ont été analysées pour voir leur impact sur le déplacement des espèces (Figure 11). Concernant, la Gentiane, les routes ne semblent pas poser de problème à sa dispersion. En effet, elles sont présentes globalement sur l'ensemble du territoire. Cela est notamment dû à la présence des cours d'eau qui participent à son déplacement ainsi qu'aux animaux qui marchent dans la boue et transportent ses graines. En revanche, pour l'Azuré des Mouillères, sa dispersion à travers les routes semble plus complexe. En effet, deux gros patches sont présents, un à l'ouest et un au sud-ouest et peu d'individus semblent traverser les routes à proximité de ceux-ci. Il est possible que ces barrières physiques limitent la dispersion du papillon vers l'est et le nord de la région.

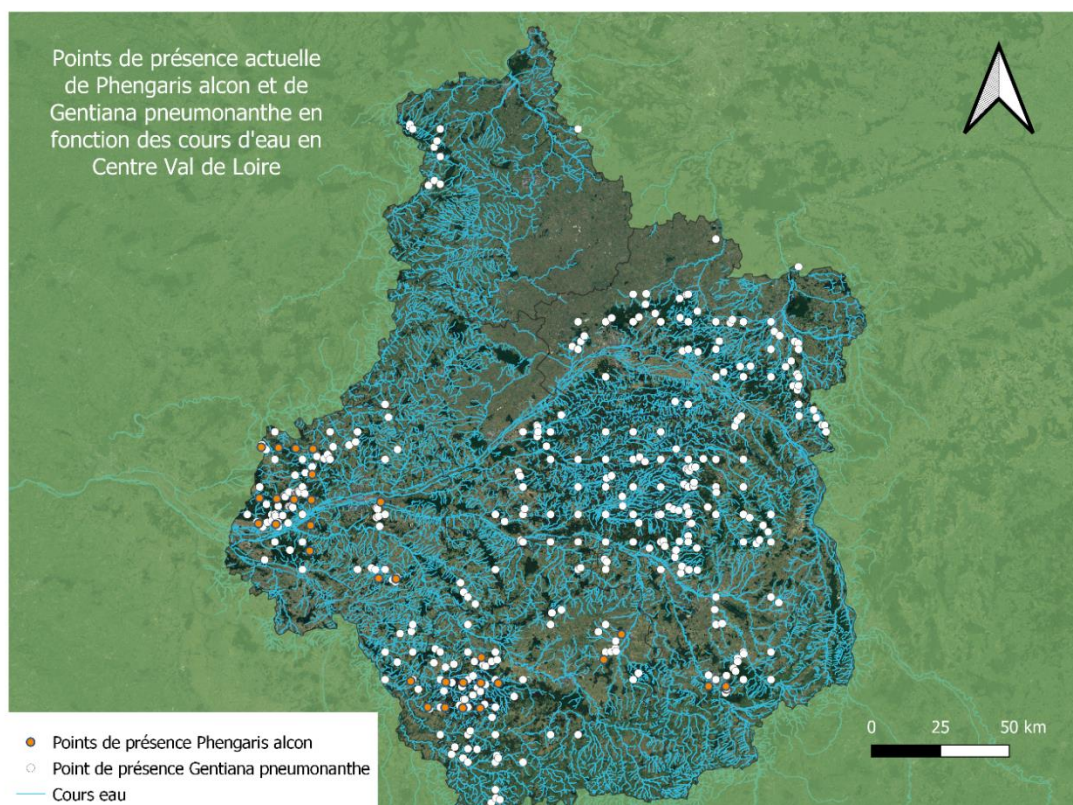


Figure 12 : Points de présences actuelle de Phengaris alcon et de Gentiana pneumonanthe en fonction des cours d'eau présents en Centre-Val de Loire (Source : S. BOUDEAU)

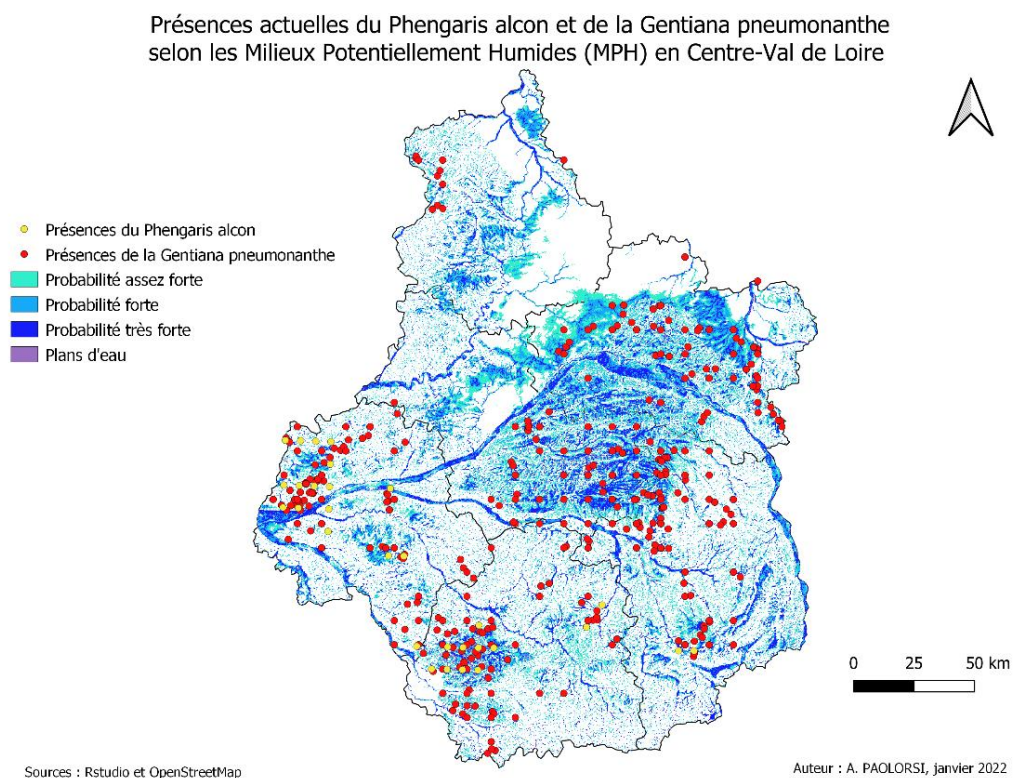


Figure 13 : Points de présence du Phengaris alcon et de Gentiana pneumonanthe selon les Milieux Potentiellement Humides en CVL (Source : A. PAOLORSI)

Les milieux humides sont des espaces favorables à la *Gentiane pneumonanthe* et à l'Azuré des mouillères. Leurs points de présence correspondent alors bien à la présence des milieux potentiellement humides (MPH) sur la région (Figure 13), ainsi qu'avec la présence des cours d'eau (Figure 12).

Néanmoins, la Figure 14 montre que les habitats favorables aux deux espèces ne correspondent pas aux MPH les plus importants. Cependant, la faible présence des habitats favorables aux deux espèces dans le nord correspond bien à la présence moindre des MPH et cours d'eau dans cette partie de la région, ce qui conforte la fiabilité de nos modèles.

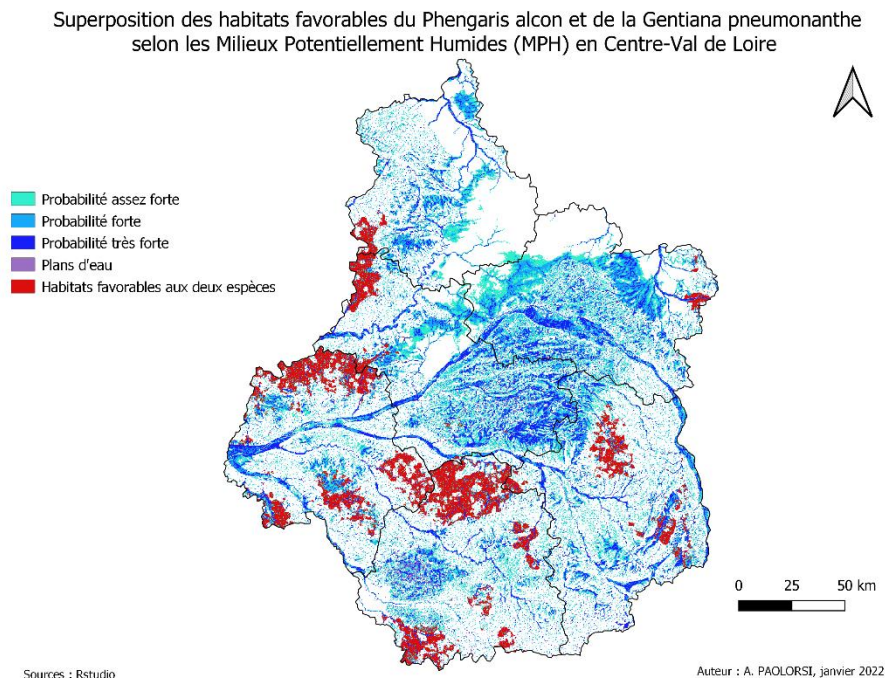


Figure 14 : Favorabilité paysagère du *Phengaris alcon* et de *Gentiana pneumonanthe* sur la carte des MPH en CVL (Source : A. PAOLORSI)

Dans les zones où la gentiane n'est pas présente, le carbone organique des sols est inférieur à 20% et il est compris entre 30 et 50% pour les zones où la gentiane est présente. Or les milieux humides sont des vrais puits de carbone importants (*Zones humides*, 2019) ainsi, il est normal de trouver des Gentianes ainsi que leurs habitats favorables dans les Milieux Potentiellement Humides, où il y a du carbone organique et même près des forêts.

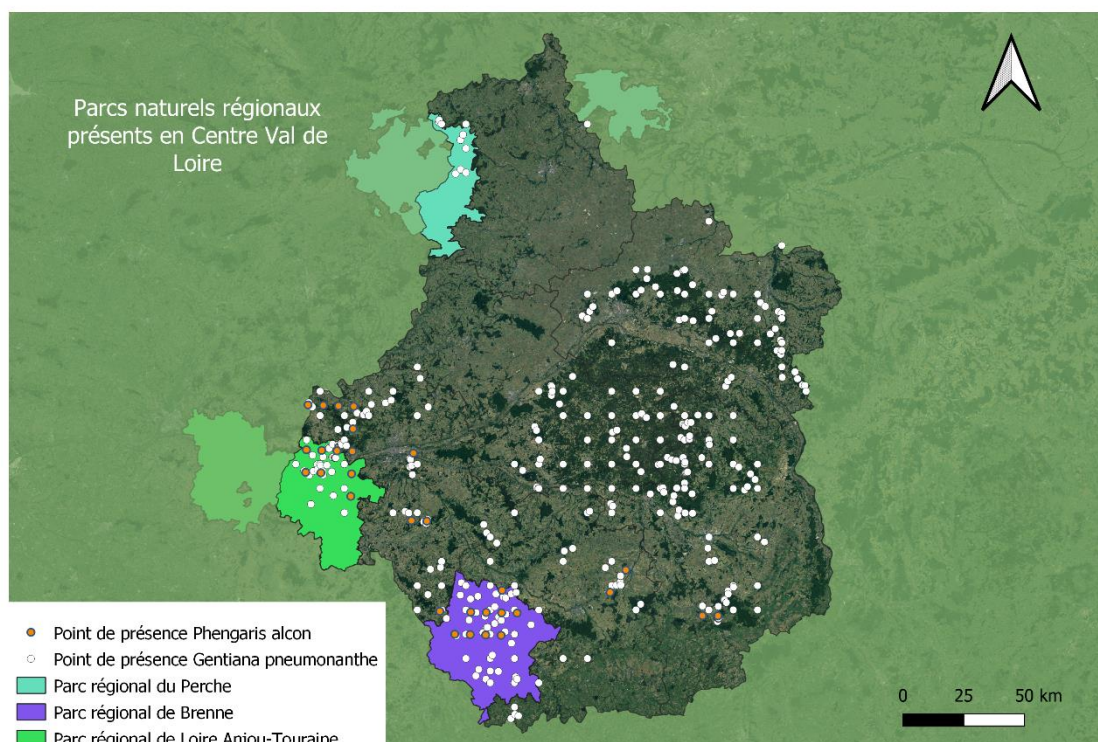


Figure 15 : Parcs naturels régionaux présents en Centre-Val de Loire et points de présence de *Phengaris alcon* et *Gentiana pneumonanthe* (Source : S. BOUDEAU)

Enfin, par souci de compréhension de la dispersion de ces deux espèces sur le territoire régionale, leurs points de présence observés ont été comparés avec la localisation des Parcs Naturels Régionaux du Centre-Val de Loire (Figure 15). Les points d'occurrence de l'Azuré des mouillères se situent pratiquement tous sur le PNR de la Brenne et de Loire-Anjou-Touraine. Il est normal de les observer en majorité sur ces espaces qui bénéficient de protection supplémentaire que sur le reste du territoire mais également de plans de gestion qui permettent le suivi et le maintien des populations observés dans ces espaces. Par ailleurs, il est aussi probable que les points de présence relevés du *Phengaris alcon* soient en nombre supérieur dans les PNR en raison des inventaires réalisés sur ces espaces, tandis que le reste du territoire est largement moins couvert par des suivis de populations. De plus, le parc Naturel régional du Brenne est considéré comme zone humide d'importance à l'échelle internationale (*Les Parcs naturels régionaux de France*, s. d.; *Questions - réponses sur les Parcs naturels régionaux*, s. d.). En effet, il contient environ 3 000 étangs sur son territoire dû à son sol de type argileux et est donc peu propice aux cultures. Comme vu précédemment, ces espèces prospèrent dans les milieux humides, il n'est donc pas étonnant de les y retrouver en grand nombre sur cet espace.

Bien que la Gentiane pneumonanthe soit protégée (préoccupation mineure, risque de disparition faible) (MNHN & OFB [Ed], 2003), ses occurrences observées se concentrent également dans les 3 PNR de la région.

Discussion

La correspondance des aires de répartition des habitats favorables entre *Phengaris alcon* et *Gentiana pneumonanthe* se retrouvent en majorité dans le centre et l'ouest de la région d'après la modélisation avec BIOMOD2. Les patchs situés à l'ouest et au sud-ouest semblent fiables puisque ces deux espèces ont déjà été inventoriées à ces endroits. En effet, le papillon dépend fortement de la présence de sa plante hôte, qui est abondante dans ces zones, et est toujours retrouvé à proximité d'elle. Le buffer réalisé autour de ces deux zones de co-occurrence simulant la distance de dispersion maximale de *Phengaris alcon*, entre 3 et 7 km suivant les sources, vient confirmer ce propos. Cependant, aucun *Phengaris alcon* n'a été relevé au niveau du plus gros patch d'habitat favorable à sa plante hôte situé au niveau de la ville de Vierzon. Ce résultat peut venir du manque de données récoltées sur le terrain. Ainsi l'espèce est peut être présente mais le manque d'observations sur cette partie du territoire ne nous permet pas d'obtenir un résultat exhaustif. Les points de présence relevés se trouvent globalement au sud de la région, il se peut que les papillons n'aient pas encore émigré vers les parties plus au nord de la région et viendront coloniser ces patchs dans le futur. Il se peut aussi que les corridors écologiques entre ce patch et ceux de l'ouest ne soient pas assez perméables à l'Azuré des Mouillères, l'empêchant ainsi de se déplacer au sein de celui-ci ou alors, que ce patch ne soit tout simplement pas propice à sa survie.

De plus, le modèle ne semble pas présenter de zone de co-occurrence dans le Nord de la région où très peu de points y ont été relevés. Comme précédemment, le manque de données disponibles est à prendre en compte dans la lecture des résultats. Il est également possible que les variables paysagères ne soient pas propices à leurs existences, dans ce cas, cela pourrait constituer une barrière dans leur potentiel déplacement vers le Nord dans le futur. Une analyse plus complète avec les éléments paysagers structurant la région a été réalisée avec Rstudio et complétée par des observations cartographiques afin de vérifier la fiabilité des données de présence au niveau des zones de co-occurrence mais également de déterminer les éventuels corridors écologiques et les potentiels futurs déplacements des espèces à travers ces éléments.

L'Azuré des mouillères vit de manière générale dans les prairies, les landes humides et les tourbières de plaines ou basses montagnes contenant sa plante hôte et sa fourmis hôte. La végétation présente ne doit pas être trop dense ou trop élevée pour que le plant de gentianes soit accessible aux femelles. Ainsi les adultes se déplacent généralement en volant dans leur habitats favorables. Les habitats plus denses comme les forêts et les haies constituent des barrières et structurent leur déplacement. Les adultes peuvent les longer mais ne les traversent pas. Des études ont montré que lorsqu'ils rencontraient une zone boisée, les individus retournaient sur leur lieu de prédilection. De même, les endroits anthropisés (routes, villes, etc.) bloquent le déplacement des individus et constituent une menace à leur survie (Merlet & Dupont, 2012). Les résultats obtenus à partir du modèle Ann de Rstudio et des cartes viennent appuyer ces propos. En effet, les variables qui contribuent le plus favorablement à l'espèce sont les prairies et les zones humides (landes et tourbières). En revanche, les éléments naturels comme les forêts et les haies constituent des barrières à leur déplacement. Cependant lors d'une première observation globale des différents types de milieux en Centre-Val de Loire, leur présence était fortement proche des zones boisées, ce qui n'était pas cohérent avec les recherches bibliographiques faites préalablement . Une observation plus précise de ces endroits a donc permis de découvrir une diversité de milieux ouverts de petites superficies (prairie, lande, agriculture,...) au sein de celles-ci, suffisamment grandes pour la survie d'une population

nécessitant un minimum de 0,5 hectar. De plus, la présence de ligneux à proximité les protège du vent et donc facilite leur déplacement.

Ainsi, une mosaïque de ces éléments dans le paysage semble favorable à notre espèce. Par ailleurs, les éléments anthropiques comme les habitations ou les routes sont répulsifs aux individus. En effet, les données de présence se retrouvent toujours en périphérie des villes et sont regroupées dans des aires entre les voies rapides (autoroutes, départementales). Ainsi, le patch au niveau de la ville de Vierzon est entouré de grandes voies qui freinent potentiellement leur arrivée. Cependant, des éco-ponts devraient être installés à partir de l'année prochaine au niveau de ces voies rapides qui auront peut être un impact positif pour leur dispersion (Merlet & Dupont, 2012).

De même pour la Gentiane, ses habitats de prédilections sont les zones humides comme les prairies humides, les tourbières, les marais et les landes et les sols basiques à faible acidité. Celle-ci a besoin également d'une exposition au soleil suffisante pour survivre, les boisements ne lui constituent donc pas un habitat favorable. Ainsi sa forte présence au sein des zones de co-occurrences, présentant une forte diversité de ses habitats favorables, semble pertinente. En effet, elle est souvent retrouvée au sein de prairies humides ou à la lisière des forêts. De plus, sa présence conséquente sur ces territoires provient de la dispersion efficace de ses graines par le vent et les points d'eau fortement présents dans ces zones mais aussi des animaux sûrement en grand nombre dû à la diversité d'habitats (Merlet & Dupont, 2012).

Ainsi, la diversité d'éléments paysagers présents au sein des patches de co-occurrences contenant les données de présence des espèces semblent être favorables pour leur vie quotidienne et leur dispersion.

Cependant, il faut veiller à conserver ces espaces ouverts pour ne pas impacter drastiquement leur survie. En effet, si ces milieux venaient à se fermer, cela nuirait à leur présence. Ainsi, une gestion optimisée de ces espaces, comme la fauche, en prenant en compte la période de floraison de la gentiane et la période de vol et de reproduction de *Phengaris* pourrait être pertinente ici (Merlet & Dupont, 2012). De plus, cela pourrait garantir la pérennité de ces corridors écologiques à termes, et donc permettre d'anticiper l'éventuel déplacement des espèces vers le nord dans le futur.

En effet, le changement climatique entraîne une hausse globale des températures et impacte l'ensemble des êtres vivants, notamment les insectes qui sont très sensibles aux variations. Ainsi, le *Phengaris alcon* présente des attributs qui ne semblent pas appropriés aux conditions climatiques futures. En effet, sa population isolée et de petite taille, ainsi que sa faible diversité génétique peuvent freiner son évolution. De plus, sa survie dépend de la co-présence de la fourmi *myrmica* et de la plante hôte *gentiana pneumonanthe*. D'autre part, sa courte période de vol et sa longue espérance de vie pourraient l'aider à s'adapter localement aux modifications climatiques ou bien, il sera amené à migrer vers le nord pour survivre.

- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models : Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Årevall, J., Early, R., Estrada, A., Wennergren, U., & Eklöf, A. C. (2018). Conditions for successful range shifts under climate change : The role of species dispersal and landscape configuration. *Diversity and Distributions*, 24(11), 1598-1611. <https://doi.org/10.1111/ddi.12793>
- Billard, P. (s. d.). *Suivi 2004 des populations de l'Azuré des Mouillères (Maculineaalconalcon D. & S.) aux caps d'Erquy et de Fréhel*.
- Boudier, P., Delahaye, P., & Rebiffé, J. (1991). *Gentianales et ligustrales d'Eure-et-Loire*.
- Briere, S. (2006). *Étude de la faisabilité d'un renforcement de populations de Maculineaalcon et Gentiana pneumonanthe*. <http://maculinea.pnaopie.fr/wp-content/uploads/2014/02/BRIERE-2006-Etude-faisabilit%C3%A9-renforcement-pop-Maculinea-alcon-et-G-pneumonanthe-Brenne.pdf>
- Cerrato, C., Lai, V., Balletto, E., & Bonelli, S. (2016). Direct and indirect effects of weather variability in a specialist butterfly : Maculineaalcon at its southern boundary. *Ecological Entomology*, 41, 263-275. <https://doi.org/10.1111/een.12296>
- Clauzel, C., Gaber, C., & Godet, C. (2020). *Aide à l'utilisation de Graphab, FICHE 3—MÉTRIQUES DE CONNECTIVITÉ*.
- Définition de Changement climatique*. (s. d.). Actu-Environnement; Actu-environnement. Consulté 12 février 2021, à l'adresse https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/changement_climatique.php4
- Filz, K. J., & Schmitt, T. (2015). Niche overlap and host specificity in parasitic Maculinea butterfly as a measure for potential extinction risks under climate change. *Organisms Diversity & Evolution*, 15, 555-565. <https://doi.org/10.1007/s13127-015-0210-1>

Gentiane des marais. (s. d.). Tela Botanica. Consulté 20 janvier 2022, à l'adresse <https://www.tela-botanica.org/eflore/>

Granereau, G. (2014). Sur la présence de l'Azuré des mouillères Phengaris alcon (Denis & Schiffermüller, 1775) (Lepidoptera, Lycaenidae) dans le camp militaire du Poteau (département des Landes). *Bulletin de la Société Linnéenne de Bordeaux*, 149(42), 35-39.

Habel, J. C., Schmitt, T., Härdtle, W., Lütkepohl, M., & Assmann, T. (2007). Dynamics in a butterfly–plant–ant system : Influence of habitat characteristics on turnover rates of the endangered lycaenid *Maculinea alcon*. *Ecological Entomology*, 32(5), 536-543. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.2007.00903.x>

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). An introduction to statistical learning with applications in R. *Statistical Theory and Related Fields*, 1-1. <https://doi.org/10.1080/24754269.2021.1980261>

Kuuer, A., & Fartmann, T. (2004). Prominent Shoots are Preferred : Microhabitat Preferences of *Maculinea Alcon* ([Denis & Schiffermuller], 1775) in Northern Germany (Lycaenidae). *Nota lepidopterologica*, 27, 309-319.

Les Parcs naturels régionaux de France. (s. d.). <https://www.parcs-naturels-regionaux.fr>

Maculinea alcon alcon | Plan National d'Actions Maculinea, OPIE. (s. d.). Consulté 20 janvier 2022, à l'adresse <https://maculinea.pnaopie.fr/especes/maculinea-alcon-alcon/>

Merlet, F., & Dupont, P. (2012). *L'Azuré des mouillères Maculinea alcon*. Opie.

MNHN & OFB [Ed]. (2003, 2022). *Fiche de Gentiana pneumonanthe L., 1753*. Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN). https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/99922

Mutualisme. (s. d.). Futura. Consulté 8 avril 2021, à l'adresse <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/zoologie-mutualisme-11462/>

Nash. (2010). *Cycle de vie des Maculinea -exemple de l'Azuré des mouillères* [OPIE]. <https://maculinea.pnaopie.fr/conservation/>

- Nowicki, P. (2007). From metapopulation theory to conservation recommendations : Lessons from spatial occurrence and abundance patterns of *Maculinea* butterflies. *Biological Conservation*, 140(1-2), 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.08.001>
- Nowicki, P., Deoniziak, K., Dziekanska, I., Kostro-Ambroziak, A., Plazio, E., Rutkowski, R., & Sielezniew, M. (2019). What keeps 'living dead' alive : Demography of a small and isolated population of *Maculinea* (= *Phengaris*) *alcon*. *Journal of Insect Conservation*, 23, 201-210.
- Questions—Réponses sur les Parcs naturels régionaux. (s. d.). <https://www.parcs-naturels-regionaux.fr>
- Roinel, É. (2014). *Azuré des Mouillères (Maculinea alcon alcon) et `` Landes de Lessay '' : Milieux favorables et possibilités de déplacement hors-site Natura 2000*. 70.
- Rozier, Y., & Guérin, C. (2014). Les papillons du genre *Maculinea* : 20 ans d'études menées en biologie de la conservation dans la Réserve naturelle nationale du Marais de Lavours. *Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon*, 3. https://www.persee.fr/issue/linly_0366-1326_2014_hos_3_1?sectionId=linly_0366-1326_2014_hos_3_1_13877
- Schweiger, O., Settele, J., Kudrna, O., Klotz, S., & Kuhn, I. (2008). Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. *Ecology*, 89(12), 3472-3479. <https://doi.org/10.1890/07-1748.1>
- Settele, J., & Kühn, E. (2009). Insect Conservation. *Science*, 325(5936), 41-42. <https://doi.org/10.1126/science.1176892>
- Stohlgren, T. J., Ma, P., Kumar, S., Rocca, M., Morissette, J. T., Jarnevich, C. S., & Benson, N. (2010). Ensemble Habitat Mapping of Invasive Plant Species. *Risk Analysis*, 30(2), 224-235. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01343.x>
- Thomas, J. A., & Settele, J. (2004). Butterfly mimics of ants. *Nature*, 432, 283-284. <https://doi.org/10.1038/432283a>
- Thuiller, W., Georges, D., Engler, R., & Breiner, F. (2013). *Package 'biomod2'*.
- Urban, M. C., Tewksbury, J. J., & Sheldon, K. S. (2012). On a collision course : Competition and dispersal differences create no-analogue communities and cause extinctions during climate change.

Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 279(1735), 2072-2080.

<https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2367>

Valdés, A., & Ehrlén, J. (2018). Direct and plant trait-mediated effects of the local environmental context on butterfly oviposition patterns. *Oikos*, 127(6), 825-833. <https://doi.org/10.1111/oik.04909>

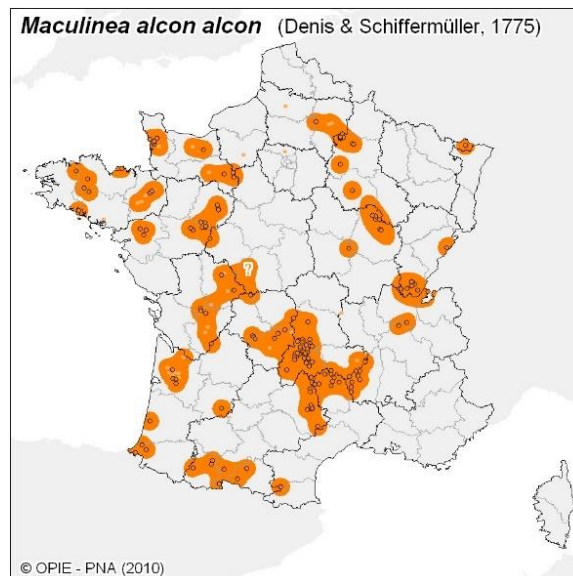
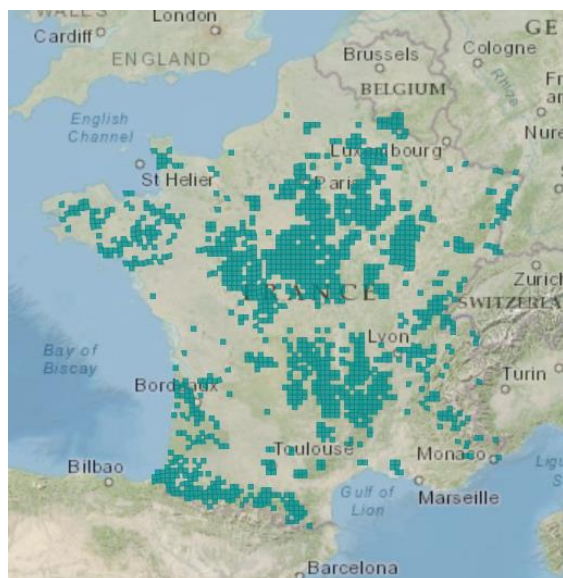
van Dorp, D., Schippers, P., & van Groenendael, J. M. (1997). Migration rates of grassland plants along corridors in fragmented landscapes assessed with a cellular automation model. *Landscape Ecology*, 12(1), 39-50. <https://doi.org/10.1007/BF02698206>

WallisDeVries, M. F. (2004). A Quantitative Conservation Approach for the Endangered Butterfly *Maculinea alcon*. *Conservation Biology*, 18(2), 489-499. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00336.x>

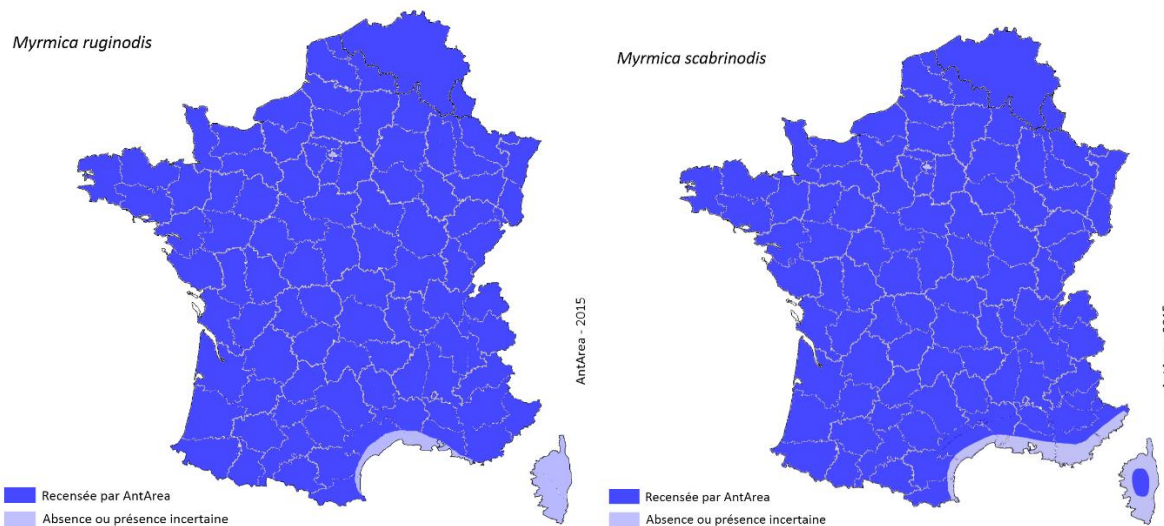
Zones humides. (2019). Les services de l'État dans la Somme. <https://www.somme.gouv.fr/Politiques-publiques/Observatoire-des-territoires/Environnement/Les-etudes/Zones-humides>

Annexes

Annexe 1 : occurrences des espèces *Phengaris alcon*, *Gentiana pneumonanthe* et *Myrmica* en France



Occurrence *Gentiana pneumonanthe* en France métropolitaine (à gauche) (MNHN & OFB [Ed], 2003) et occurrence *Phengaris alcon* en France métropolitaine (à droite) (*Maculinea alcon alcon* | Plan National d'Actions *Maculinea*, OPIE, s. d.)



Occurrences des *Myrmica ruginodis* et *Myrmica scabrinodis* en France métropolitaine (*Maculinea alcon alcon* | Plan National d'Actions *Maculinea*, OPIE, s. d.)

Annexe 2 : code R permettant d'obtenir tous les résultats présentés dans cette étude

```
setwd("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee  
R")
```

```
#install.packages("rgdal")  
library(rgdal)  
#install.packages("randomForest")  
library(randomForest)  
#install.packages("biomod2")  
library(biomod2)  
#install.packages('raster')  
library(raster)  
#install.packages("sf")  
library(sf)  
#install.packages("usdm")  
library(usdm)  
#install.packages("sp")  
library(sp)  
#install.packages("dismo")  
library(dismo)  
#install.packages("maxent")  
library(maxent)
```

```
#charger les données d'occurrence  
resp.name="Phengaris"
```

```
#IMPORTER FICHER
```

```
DataSpecies<-read.csv("Donnee_Phengaris.csv",sep=";",dec=".", header=TRUE )  
head(DataSpecies)  
DataSp= as.data.frame(DataSpecies)  
head(DataSp)  
DataSp<-DataSp[,2:3]  
resp.var<-DataSp  
head(resp.var)
```

```
##add coordinates to species data  
library(raster)  
coordinates(resp.var) <-c("x","y")  
class(resp.var)
```

```
## Declaration du syst de projection ou conversion! (ici lambert 93)  
proj4string(resp.var) <- CRS("+init=epsg:2154")  
summary(resp.var)  
class(resp.var)
```

```
#Set coordinate
resp.xy<-DataSpecies[,c("x","y")]
plot(resp.xy)
```

```
##2. importer les variables environnementales
```

```
# Couche Centre Val de Loire
library(sp)
library(rgdal)
distrib=readOGR("CVL.shp")
summary(distrib)
extent(distrib)
plot (distrib)
```

```
#Raster des différentes variables étudiées
r1<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/Cours-eau_1.tif")
r2<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/Conifere.tif")
r4<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/Cours-eau_2.tif")
r5<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/Culture.tif")
r6<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/Feuillus.tif")
r7<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/foret-mix.tif")
r8<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/MPH.tif")
r9<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/Peupleraie.tif")
r11<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/plan-eau.tif")
r12<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/prairie-perm.tif")
r13<-raster("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/prairie-temp.tif")
rt <- raster(distrib)

res(rt) <- c(250, 250)
# Ajustement de la résolution de chaque variable en 250*250m à l'aide de la couche CVL
Cours.eau_1 <- resample(r1, rt)
Conifere<-resample(r2,rt)
Cours.eau_2<-resample(r4,rt)
Culture<-resample(r5,rt)
Feuillus<-resample(r6,rt)
foret.mix<-resample(r7,rt)
MPH<-resample(r8,rt)
```

```
Peupleraie<-resample(r9,rt)
planeau<-resample(r11,rt)
prairie.perm<-resample(r12,rt)
prairie.temp<-resample(r13,rt)
```

```
# Création d'un objet contenant toutes les variables
```

```
Env<- stack( Cours.eau_1,
            Conifere,
            Cours.eau_2,
            Culture,
            Feuillus,
            foret.mix,
            MPH,
            Peupleraie,
            planeau,
            prairie.perm,
            prairie.temp)
```

```
class(Env)
points(resp.var)
points(resp.xy)#verifier superposition des points
plot(Env)
```

```
#Les NA en grand nombre dans la couche culture ont été remplacés par des 0
```

```
Env$Culture[is.na(Env$Culture)] <- 0
head(as.data.frame(Env$Culture))
```

```
#3.Modelisation
```

```
##3.1 test de colinearite (si variable varient dans meme sens= entorse statistique)
```

```
#3.1.1 VIF
```

```
#install.packages("car")
#install.packages("usdm")
library(car)
library(usdm)
vif<-vif(Env)
vif(Env)
write.csv(vif,"vif_calibr.csv")
```

```
#The above identifies variables with correlation coefficients < 10; can also be assigned to an object
```

```
Expl.var.NoCor <- vifstep(Env, th = 10)
```

```
Expl.var.NoCor
```

```
#Creates 'VIF' object listing variables that, together, have VIFs < 10
```

```
expl.var.Reduced <- exclude(Env, Expl.var.NoCor)
```

```
plot(expl.var.Reduced)
```

```
#3.1.2 Correlations
```

```
install.packages("sdmpredictors")
```

```
library(sdmppredictors)
d<-pearson_correlation_matrix(Env)
d
```

```
library(reshape2)
# Obtenir le triangle sup
get_lower_tri<-function(d){
  d[lower.tri(d)] <- NA
  return(d)
}
```

```
lower_tri <- get_lower_tri(d)
lower_tri
meltd <- melt(lower_tri, na.rm =TRUE)
meltd
write.csv(meltd,"meltdt.csv")
```

```
library(ggplot2)
ggplot(data = meltd, aes(Var2, Var1, fill = value))+
  geom_tile(color = "white")+
  scale_fill_gradient2(low = "blue", high = "red", mid = "white",
    midpoint = 0, limit = c(-1,1), space = "Lab",
    name="Pearson\nCorrelation") +
  theme_minimal()+
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, vjust = 1,
    size = 12, hjust = 1))+
  coord_fixed())
```

```
# 3.2. Jeux de PA (pseudo absence)#
expl.var<-Env
class(expl.var)
library(biomod2)
myBiomodData<-BIOMOD_FormatingData (resp.var,
  stack(expl.var), resp.xy,
  resp.name, PA.nb.rep=4,
  PA.nb.absences=4*nrow(resp.xy),
  PA.strategy = 'random',
  na.rm=TRUE)
```

```
myBiomodData
write.csv(myBiomodData@PA, "PA.csv")
write.csv(myBiomodData@coord,"Coord.csv")
plot(myBiomodData)
```

#3.3 Paramétrisation - modèle Tuning

```
myBiomod_options<-BIOMOD_ModelingOptions(GLM = list( type = 'quadratic',
  interaction.level = 0,
```

```

myFormula = NULL,
test = 'AIC',
family = binomial(link = 'logit'),
mustart = 0.5,
control = glm.control(epsilon = 1e-08, maxit = 50, trace = FALSE) ),

```

```

ANN = list( NbCV = 5,
            size = 17,
            decay = 2.2379309692,
            rang = 0.1,
            maxit = 200),

```

```

RF = list( do.classif = TRUE,
           ntree = 500,
           mtry = 4,
           nodesize = 5,
           maxnodes = NULL))

```

#3.4 Modelisation

3.4.1. Run

```

myBiomodModelOut<- BIOMOD_Modeling(myBiomodData, models = c('GLM','ANN','RF'),
                                models.options = myBiomod_options, NbRunEval=5, DataSplit=75,
Prevalence=0.5, VarImport=10,
                                models.eval.meth = c('TSS','ROC'), SaveObj = TRUE,rescal.all.models = FALSE,
                                do.full.models = FALSE, modeling.id = "FirstModeling_import")
myBiomodModelOut

```

#3.4.2 Projections

```

library(biomod2)
myBiomodProj <- BIOMOD_Projection(modeling.output = myBiomodModelOut,new.env
=stack(expl.var), proj.name = 'current',selected.models = 'all',binary.meth = 'TSS', compress =
'TRUE',clamping.mask = T,output.format = '.grd',omit.na=T,keep.in.memory='FALSE')

```

```

myBiomodProj
plot(myBiomodProj)

```

3.4.3 Contribution des variables

```

varimportance<-get_variables_importance(myBiomodModelOut)
write.csv(varimportance,"varimportance.csv")

```

```

id<-1:10
var<-as.data.frame(varimportance)
name<-rownames(var)
for( i in id){
  print(i)
}

```

```

glm_imp<-mean(as.numeric(var[i,seq(from=1,to=ncol(var),by=3)]))
rf_imp<-mean(as.numeric(var[i,seq(from=2,to=ncol(var),by=3)]))
ann_imp<-mean(as.numeric(var[i,seq(from=3,to=ncol(var),by=3)]))
X<-c("GLM","RF","ANN")
Y<-c(glm_imp,rf_imp,ann_imp)
varXY<-as.data.frame(cbind(X,Y))
print(ggplot(data=varXY,aes(x=X, y=Y)) +
      geom_bar(stat="identity")+
      xlab("Models")+
      ylab("Mean importance")+
      ggtitle(as.character(name[i])))
}
write.csv(varXY, "var.csv")

```

3.4.4. Evaluations

```

library(biomod2)
MyBiomodModelEval_import <- get_evaluations(myBiomodModelOut)
dimnames(MyBiomodModelEval_import)
MyBiomodModelEval_import
write.csv(MyBiomodModelEval_import, "MyBiomodModelEval_import.csv")

```

plot evaluation models score graph

by models

```

gg1 <- models_scores_graph( myBiomodModelOut,
                           by = 'models',
                           metrics = c('ROC','TSS') )

```

by cross validation run

```

gg2 <- models_scores_graph( myBiomodModelOut,
                           by = 'cv_run',
                           metrics = c('ROC','TSS') )

```

3.4.5. Courbes de reponses

#Exemple pour RF FAIRE LA MEME AVEC GLM RF et ANN

```
myGLM <- BIOMOD_LoadModels(myBiomodModelOut, models='GLM')
```

```

myRespPlotGLM2D <- response.plot2(models = myGLM,
                                   Data = get_formal_data(myBiomodModelOut,'expl.var'),
                                   show.variables= get_formal_data(myBiomodModelOut,'expl.var.names'),
                                   do.bivariate = FALSE,
                                   fixed.var.metric = 'median',
                                   legend = TRUE,
                                   data_species = get_formal_data(myBiomodModelOut,'resp.var'))

```

#3.4.6 Explorer les projections

#Projection Moyenne des modeles

#En fonction des resultats, soit moyenne de tous, soit moyenne d'un seul type de modele (ici seulement Ann pour phengaris e tous pour Gentiana)

```
projections.mean <- mean(projections)/100  
plot(projections.mean)
```

#exemple pour RF=

```
projections.RF <- subset(projections, grep("RF", names(projections)))
```

#Verify that is coorrect

```
names(projections.RF)
```

```
projections.RF.mean <- mean(projections.RF)
```

```
projections.RF.mean <- projections.RF.mean/1000
```

```
plot(projections.RF.mean)
```

```
max(projections.RF.mean)
```

#exemple pour GLM

```
projections.GLM <- subset(projections, grep("GLM", names(projections)))
```

#Verify that is coorrect

```
names(projections.GLM)
```

```
projections.GLM.mean <- mean(projections.GLM)
```

```
projections.GLM.mean <- projections.GLM.mean/1000
```

```
plot(projections.GLM.mean)
```

```
max(projections.GLM.mean)
```

#exemple pour ANN

```
projections.ANN <- subset(projections, grep("ANN", names(projections)))
```

#Verify that is coorrect

```
names(projections.ANN)
```

```
projections.ANN.mean <- mean(projections.ANN)
```

```
projections.ANN.mean <- projections.ANN.mean/1000
```

```
plot(projections.ANN.mean)
```

```
max(projections.ANN.mean)
```

#Recuperation d'un raster

```
ZoneCalibration_all<-raster("Phengaris/proj_current/proj_current_Phengaris.grd", encoding = 'UTF-8')
```

```
ZoneCalibration_all <- ZoneCalibration_all/1000
```

```
plot(ZoneCalibration_all0a1)
```

```
names(ZoneCalibration_all)
writeRaster(ZoneCalibration_all0a1, "ZoneCalibration_all0a1V", format="GTiff")
writeRaster(ZoneCalibration_all0a1, "ZoneCalibration_all0a1V", format="RST")
```

3.4.6. Modele ensembliste (réalisé que pour Gentiana)

```
setwd("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-001/DATA/Donnee
R")
```

#Ici on fait le modele ensemblistes avec les ROC > 0,7 comme nos TSS sont faibles

```
myBiomodEM_all<-BIOMOD_EnsembleModeling(modeling.output= myBiomodModelOut,
      em.by = 'all',
      eval.metric = 'ROC',
      eval.metric.quality.threshold =0.7,
      models.eval.meth = c('TSS','ROC'),
      prob.mean = FALSE,
      prob.cv = FALSE,
      prob.median = FALSE,
      committee.averaging = TRUE,
      prob.mean.weight = TRUE)
```

```
class(myBiomodEM_all)
```

```
#### Do Evaluations: réévaluer la contribution des variables avec les meilleurs modèles
#####
```

```
get_evaluations(myBiomodEM_all)
get_variables_importance(myBiomodEM_all)
write.table(get_variables_importance(myBiomodEM_all),"variable_importance_EnsembleModel_all.
csv")
write.table(get_evaluations(myBiomodEM_all),"eval_EnsembleModel_all.csv")
```

```
#####
#### Do Ensemble Projections ###
#####
```

```
myBiomodEM_proj <- BIOMOD_EnsembleForecasting(EM.output = myBiomodEM_all,
      projection.output = myBiomodProj,binary.meth = 'ROC')
myBiomodEM_proj
plot(myBiomodEM_proj)
ZoneCalibrationEM      <-raster("Phengaris/proj_current/proj_current_Phengaris_ensemble.grd",
encoding = 'UTF-8')
plot(ZoneCalibrationEM)
ZoneCalibrationEM1 <-ZoneCalibrationEM/1000
plot(ZoneCalibrationEM1)
writeRaster(ZoneCalibrationEM1, "ZoneCalibrationEM1V",format="GTiff")
```

```
#Presence Absence Seuillée- carte projection Phengaris avec le meilleur modèle = ann
```

```
ZoneCalibration_pres_abs_ann <-BinaryTransformation(projections.ANN.mean, 0.6)#seuillage peut  
être #changé  
plot(ZoneCalibration_pres_abs_ann)  
writeRaster(ZoneCalibration_pres_abs_ann, "ZoneCalibration_pres_abs_ann",format="GTiff")
```

```
##Le même code a été réalisé pour la Gentiana pneumonanthe
```

```
##Superposition des rasters binaires obtenus pour les deux espèces
```

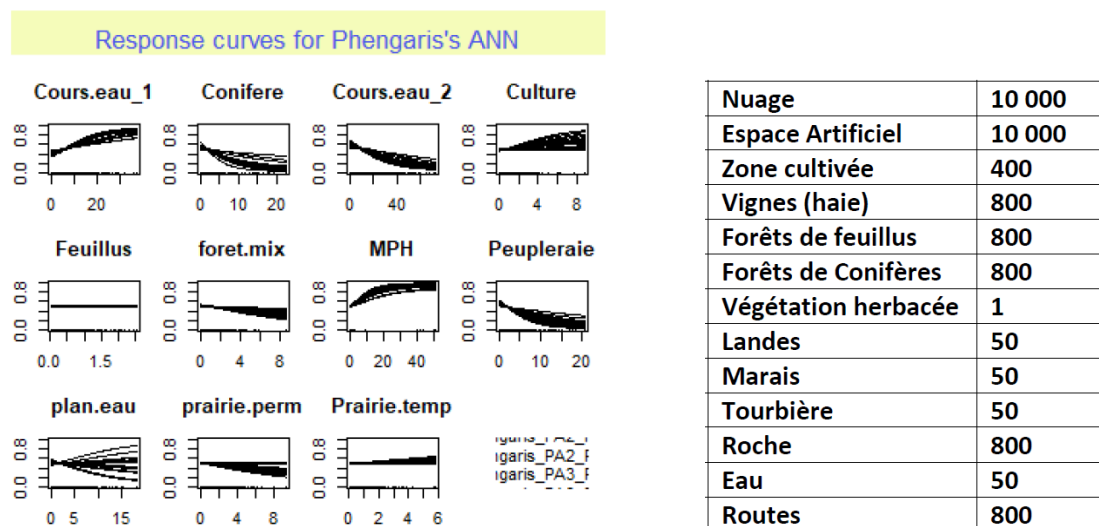
```
currentPred <- raster::stack("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-  
20211112T153530Z-001/DATA/Donnee R/ZoneCalibration_pres_abs_all_Gp.tif")  
futurePred <- raster::stack("C:/Users/boude/Documents/Polytech/5A/Pfe/DATA-20211112T153530Z-  
001/DATA/Donnee R/ZoneCalibration_pres_abs_annSy.tif")
```

```
# call the Range size function  
myBiomodRangeSize <- BIOMOD_RangeSize(  
  CurrentPred=currentPred,  
  FutureProj=futurePred)
```

```
# see the results  
myBiomodRangeSize$Compt.By.Models  
plot(myBiomodRangeSize$Diff.By.Pixel)  
writeRaster(myBiomodRangeSize$Diff.By.Pixel, "Résultats HF",format="GTiff")  
##FIN
```

Annexe 3 : détermination des coûts des types de milieux pour *Phengaris alcon* et coûts attribués à *Gentiana pneumonanthe*

Grâce au tableau des contributions moyennes des variables paysagères pour la modélisation de *Phengaris alcon* (Tableau 4), aux courbes de réponse présentées ci-dessous, générées par le modèle ANN et au Tableau 2 des coûts écologiques par type de milieux, les coûts suivants ont été attribués aux différents milieux pour le traitement sur Graphab du *Phengaris alcon*.



Courbes de réponses pour le modèle ANN du *Phengaris alcon*

Coûts pour chaque type de milieux pour le *Phengaris alcon*

Nuage	10000
Espace Artificiel	10000
Zone cultivée	400
Vignes (haie)	800
Forêts de feuillus	100
Forêts de Conifères	800
Végétation herbacée	1
Landes	1
Marais	50
Tourbière	50
Roche	800
Eau	50

Coûts pour chaque type de milieux pour *Gentiana pneumonanthe*

Directeur de recherche
Francis Isselin

Etudiantes
Sylvaine BOUDEAU et Alice PAOLORSI
PFE -DAE5- ADAGE
2021-2022

Les effets du changement climatique et des activités humaines sur la distribution des espèces

*Cas particulier des espèces *Gentiana pneumonanthe*, *Phengaris alcon* et *Myrmica*
en région Centre-Val de Loire*

Résumé

La présente étude s'intéresse à la présence d'un papillon particulier, l'Azuré des Mouillères (*Phengaris alcon*) en Centre-Val de Loire. Celui-ci nécessite deux relations de mutualismes au cours de sa vie, la première avec sa plante hôte, la Gentiane pneumonanthe (*Gentiana pneumonanthe*), et la deuxième avec les fourmis du genre *Myrmica* qui contribuent au bon développement des larves. Sa survie dépend donc de l'occurrence de ces deux espèces. Mais ces dernières années, sa population sensible aux variations, a subi un fort déclin dû notamment aux perturbations climatiques. L'ensemble de ces facteurs a contribué à placer cette espèce sous protection à l'échelle de la France. Des recherches scientifiques sont actuellement en cours pour mieux comprendre son cycle de vie, peu connu, et mettre en place des actions de conservation.

Dans ce rapport, la distribution actuelle de *Phengaris alcon* et de *Gentiana pneumonanthe* en Centre-Val de Loire est étudiée en fonction de la structure du paysage. Grâce à l'outil de modélisation BIOMOD2 développé sur RStudio, des projections des habitats favorables ont pu être générées pour ces deux espèces, puis superposées afin de déterminer des zones de co-occurrence. En complément, l'outil Graphab a été utilisé pour modéliser et étudier les corridors écologiques favorables à leur dispersion, au sein du département d'Indre-et-Loire. Cette étude met en avant la cohérence des points de présence de ces deux espèces, relevés par l'association Caudalis, selon les données paysagères étudiées. Ainsi, les capacités de dispersion du papillon et de sa plante hôte pourront potentiellement être anticipées au vu des bouleversements climatiques à venir et faire l'objet d'actions de protection.

Mots Clés : Changement climatique – dispersion – mutualisme – corridors écologiques – habitats