FRB
195, rue Saint-Jacques
75005 PARIS
secretariat@fondationbiodiversite.fr
01 80 05 89 10

FRB
FONDATION POUR LA RECHERCHE SUR LA BIODIVERSITÉ

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES
Liberté
Égalité
Fraternité

OFB
OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

SYNERGIE
RAPPORT FINAL

Veuillez vérifier les informations pré-remplies (et les rectifier le cas échéant), compléter en français (ou en anglais si demandé spécifiquement : [EN]), et renvoyer ce document au plus tard le 30 avril 2025 à l'adresse suivante : coline.leandre@fondationbiodiversite.fr

I. Informations générales

Titre du projet : Impact de la fragmentation forestière et des infrastructures routières sur la vitesse de migration des espèces végétales vers les sommets des montagnes françaises

[EN] Title of project: Impact of forest fragmentation and road infrastructure on the speed of migration of plant species towards the summits of French mountains

Acronyme : FRAGSHIFTS

Porteur.euse principal.e : Jonathan LENOIR (CNRS, UMR EDYSAN)

Nom de la personne qui rédige le rapport : (si différente du(de la) porteur.euse principal.e):
E-mail de la personne qui a rédigé le rapport : jonathan.lenoir@u-picardie.fr

Date de début du projet : 01/03/2024
Date d'achèvement du projet : 28/02/2025

Résumé du projet (maximum de 300 mots)
La FRB se réserve le droit de modifier le texte pour le publier sur ses plates-formes

La migration des espèces végétales forestières vers les sommets des montagnes le long du gradient d'altitude est un phénomène bien documenté dans la littérature scientifique. Cependant la vitesse de migration observée pour les espèces indigènes est bien inférieure à celle des isothermes tandis que les espèces exotiques semblent migrer beaucoup plus rapidement, notamment le long des bords de route en montagne. Par conséquent, l'impact de la fragmentation forestière par les activités humaines en montagne ne signifie pas nécessairement une entrave à la migration des espèces végétales mais semble plus complexe qu'il n'y paraît de prime abord. L'objectif de ce projet SYNERGIE est donc de faire la lumière sur l'influence des pressions humaines sur la vitesse et la direction des déplacements des espèces végétales forestières le long du gradient d'altitude au sein des montagnes françaises. Pour cela nous proposons de nous appuyer à la fois sur le consortium mais également sur la base de données issue d'un projet de recherche existant (BIOSHIFTS), tout en alimentant cette base en retour (cf. synergie) avec de nouvelles données plus récentes sur les vitesses de migration en altitude des espèces végétales. Nous proposons de nous appuyer sur les données de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) pour non seulement (i) produire de nouveaux indicateurs de vitesse de migration en altitude des espèces végétales forestières, qu'elles soient indigènes ou exotiques, mais aussi pour (ii) étudier les déterminants de cette redistribution en y intégrant des métriques de fragmentation et de connectivité de l'habitat forestier. Les résultats anticipés dans le cadre de ce projet SYNERGIE permettront de mieux réfléchir l'aménagement du territoire en zone de montagne (p.ex. la densification du réseau routier ou bien la restauration des continuités écologiques) afin d'optimiser la capacité de migration de la biodiversité forestière.

[EN] Scientific summary of project (maximum of 300 words)
FRB reserves the right to modify the text for publication on its platforms

Species range shifts towards higher elevations is now a widespread phenomenon that has been well described in the scientific literature. However, the rate of species redistribution is highly heterogeneous, with native species often lagging behind isotherm shifts, particularly across fragmented landscapes, whereas exotic species appear to move much more rapidly, especially along mountain roadsides. Therefore, the effects of human-induced forest fragmentation on mountain biodiversity redistribution seem more complex than it initially appears. Hence, the objective of this SYNERGIE project is to shed light on the influence of human pressures on the speed and direction of redistribution of forest plant species along mountain slopes within the French mountains. To achieve this, we propose to rely on both the consortium and the database derived from an existing research project (BIOSHIFTS), while also contributing novel, state-of-the-art data on the altitudinal range shift rates of plant species to this database and unravel their underlying mechanisms (cf. synergy). We intend to use data from the National Institute of Geographic and Forest Information (IGN) to (i) generate new indicators of altitudinal redistribution speed for forest plant species, both native and exotic as well as (ii) study the determinants of this redistribution by incorporating metrics of forest habitat fragmentation and connectivity. The anticipated results of this SYNERGIE project will facilitate better spatial planning in mountain areas (e.g., road network densification or ecological continuity restoration) in order to optimize the redistribution capacity of forest biodiversity.

Mots clefs (5): Fragmentation forestière, redistribution du vivant, infrastructures routières, espèces végétales, montagnes françaises

Contexte et objectifs (environ 1 500 caractères espaces inclus)
Ceci sera utilisé dans la fiche résultat du projet. FRB se réserve le droit de modifier le texte pour publication sur ses plateformes. Vous serez consulté avant la publication. Ces éléments étant destinés au grand public, merci de veillez à rédiger ce texte dans une optique de vulgarisation.

Les activités humaines modifient le fonctionnement des écosystèmes en interagissant directement (p.ex. la destruction et la fragmentation des habitats) ou indirectement (p.ex. les dérèglements climatiques et les dépôts atmosphériques azotés) avec l'environnement biotique (cf. la biodiversité) et abiotique (p.ex. le climat), donnant lieu à l'émergence des socio-écosystèmes. Par exemple, les infrastructures liées aux activités humaines, comme les routes forestières, peuvent directement entraver ou favoriser la migration de certaines espèces végétales en réponse au réchauffement climatique global qui est une conséquence indirecte de l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone liés aux activités humaines. Par conséquent, l'impact des activités humaines sur la redistribution des espèces semble plus complexe qu'il n'y paraît de prime abord. L'objectif principal de FRAGSHIFT est de faire la lumière sur l'influence des activités humaines sur la vitesse et la direction des déplacements d'aires de répartition des espèces végétales forestières au sein des montagnes françaises. Le premier objectif de ce projet est de mettre à jour, par rapport aux travaux passés, les vitesses de migration altitudinale des espèces végétales forestières au cours des deux dernières décennies. Ensuite, le second objectif est de relier la vitesse et la direction des déplacements à des variables liées à diverses pressions humaines comme la densité de routes et chemins, l'évolution du couvert forestier ou les dépôts atmosphériques azotés, et ce en interaction avec la vitesse à laquelle le climat change.

[EN] Context and objectives (around 1,500 characters including spaces)
This will be used in the 'fiche résultat' for the project. FRB reserves the right to modify the text for publication on its platforms. You will be consulted before publication. As these elements are intended for the general public, be sure to write this text in a way that is easy to understand.

Anthropogenic activities modifies ecosystem functioning either directly (e.g., habitat destruction and fragmentation) or indirectly (e.g., climate change and nitrogen deposition) through complex interplays with biotic (e.g., biodiversity) and abiotic (e.g., climate) conditions, leading to the emergence of socio-ecosytems. For instance, human infrastructures, such as roads in forest habitats, can directly hinder or foster the redistribution of plant species in response to global warming, which is an indirect consequence of increasing carbon dioxide emissions due to human activities. As a consequence, the impact of anthropogenic activities on species redistribution seems more complex than we throught. The chief objective of FRAGSHIFTS is to disentangle the relative effects of human activities on the velocity at which understory plant species redistribute their range along the elevational gradient that is available across mountain forests in France. By relying on past reports of species range shifts, we first aim at updating the velocity at which species have been shifting upslope since the last two decades. Then, we aim at linking both the magnitude and direction of these updated species elevational range shifts with several anthropogenic drivers of change such as road density, forest cover changes and nitrogen deposition, while accounting for potential synergistic or antagonistic effects with the exposure to climate change.

II. Equipe du projet

Liste des participants au projet

	Prénom NOM	Affiliation	Pays
1	Alex BAECHER	University of Florida	US
2	Romain BERTRAND	CNRS, Université Toulouse III	FR
3	I-Ching CHEN	National Cheng Kung University	TW
4	Lise COMTE	Illinois State University	US
5	Marine DALMASSO	IGN	FR
6	Sarah DIAMOND	Case Western Reserve University	US
7	Mariane DUPREZ	IGN	FR
8	Lesley LANCASTER	University of Aberdeen	GB
9	Jonathan LENOIR	CNRS, Université de Picardie	FR
10	Brunno OLIVEIRA	FRB	FR
11	Sarah ORTH	ENS Lyon, CNRS, Université Toulouse III	FR
12	Malin PINSKY	Rutgers University / University of California Santa Cruz	US

III. Rapport d'activité

Décrivez les principales étapes de l'avancement du projet, ses principaux résultats et leur importance pour ce domaine de recherche particulier. Veuillez inclure quelques illustrations et figures clés (300dpi, 10 x 10cm minimum avec légendes et références dans le texte). Environ 8 à 10 pages, avec des lignes directrices pour la taille des sous-sections. Vous pouvez ajouter des documents en annexe si nécessaire.

III.1 Description des travaux menés et des résultats scientifiques obtenus à l'attention d'un public scientifique

III.1.1 Acquisition des données

Pour atteindre les objectifs du projet FRAGSHIFTS, nous nous sommes appuyés sur deux sources de données distinctes. La première source de données est issue de la base de données *BioShifts* qui compile des informations sur les vitesses de migration des aires de répartition des espèces en milieux marins, d'eau douce et terrestres depuis 1900 (Comte et al. 2020 ; Lenoir et al. 2020). Cette base de données est étudiée de manière plus approfondie par le groupe de synthèse BIOSHIFTS, également hébergé au CESAB et financé par la FRB. Pour rappel, les objectifs du groupe de synthèse BIOSHIFTS, en lien avec le projet FRAGSHIFTS, sont d'étudier la contribution (i) des traits intrinsèques des espèces, (ii) des processus macro-évolutifs, (iii) des caractéristiques de l'habitat et de l'exposition au climat, et (iv) de potentielles synergies entre facteurs climatiques et anthropiques sur la redistribution des espèces. Au sein de BIOSHIFTS, le projet FRAGSHIFTS cherche tout particulièrement à faire la lumière sur l'impact des activités anthropiques sur la redistribution altitudinale des espèces végétales forestières en se focalisant sur le cas français. Pour cela, dès le démarrage du projet, au 1er mars 2024, nous avons extrait de la base *BioShifts* les vitesses de migration altitudinale de 171 espèces végétales forestières, toutes issues de la même étude qui couvre les 5 massifs de montagne de la France hexagonale (Alpes, Jura, Massif Central, Pyrénées, Vosges) ainsi que la Corse (Lenoir et al. 2008).

La seconde source de données provient de la l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) qui met à disposition des données d'inventaires forestiers, incluants des relevés floristiques, réalisés de manière annuelle depuis 2005 à l'aide d'une grille à maille carrée de 1 km de côté qui couvre l'ensemble du territoire de la France hexagonale et de la Corse. Au sein de chaque maille de 1 km^2, une localité géographique est tirée aléatoirement et visitée. Un 1er levé de terrain est alors effectué uniquement si la localité tirée au hasard est forestière et dans ce cas un relevé floristique est également réalisé en plus de l'inventaire forestier. Au bout d'un cycle de 10 ans, toutes les mailles du territoire ont été visitées et un nouveau cycle de visite redémarre mais les relevés ne sont pas forcément fait au même endroit car choisis aléatoirement au sein de la maille de 1 km^2. Il faut également savoir que les relevés floristiques de l'IGN sont réalisés uniquement lors du 1er levé sur le terrain. Par conséquent, l'IGN de dispose pas de données appariées dans le temps pour le suivi de la flore forestière.

Pour répondre aux objectifs de FRAGSHIFTS, nous nous sommes rapprochés de Marine DALMASSO et de Mariane DUPREZ pour demander une extraction des données d'inventaires forestiers de l'IGN sur les zones de montagne. Nous avons effectué plusieurs réunions Zoom, entre mars et mai 2024, afin de mieux se familiariser avec les données disponibles et de délimiter le périmètre spatio-temporel de l'extraction. Pour cela, nous nous sommes calés sur la zone d'étude déjà délimitée par le shapefile de l'étude réalisée en 2008 (Lenoir et al. 2008) (Fig. 1), que nous avons repris pour extraire tous les inventaires disponibles depuis le démarrage de la nouvelle stratégie d'échantillonnage de l'IGN, c'est-à-dire entre 2005, pour l'année de démarrage du nouvel inventaire, et 2022, pour la dernière année compilée et disponible au printemps 2024. Il faut savoir que ces données sont en libre accès sur le site de l'IGN mais avec une incertitude de localisation de plus ou moins 700 m, liée à un brouillage imposé par l'IGN pour respecter le Règlement général de protection des données (RGPD). Pour compenser cette approximation géographique, nous avons demandé à l'IGN, qui dispose des

coordonnées géographiques précises, d'extraire pour nous les données d'altitude à l'aide du modèle numérique de terrain de l'IGN précis à 1 m (cf. le RGE ALTI®), ce qui est primordial pour le projet étant donné notre objectif de calculer des vitesses de migration en altitude. En plus des coordonnées spatiales bruitées par l'IGN (cf. latitude et longitude), de l'altitude issue du RGE ALTI® et de la date de passage d'inventaire, chaque relevé de l'IGN est associé à un identifiant unique de placette. Ainsi, notre extraction, réali par l'IGN le 17 mai 2024, comporte 44317 placettes à identifiant unique, dont 44260 placettes associées à un relevé d'inventaire dit de 1ère visite et 57 autres placettes associées à un relevé d'inventaire dit de 2ème visite. Ces 57 placettes correspondent à un cas particulier de mailles déjà visitées par l'IGN mais qui n'étaient pas forestières lors de la 1ère visite et qui le sont devenues à la 2ème visite, au cours de laquelle un 1er levé a donc été réalisé sur le terrain. En plus de la composition floristique de ces 44317 placettes, nous avons obtenues de l'IGN des covariables décrivant la nature du couvert forestier (liste des espèces ligneuses par strate et taux de couvert par espèce), ainsi que des variables écologiques disponibles sur une partie des relevés, comme le type d'humus, le type de sol, le pH du sol, la réserve utile du sol et des indices topographiques et hydrographiques. Sur la base de cet envoi, nous avons été en mesure de sélectionner un total de 19982 placettes pour lesquels nous disposions de suffisamment d'informations pour répondre aux objectifs du projet (Fig. 1).

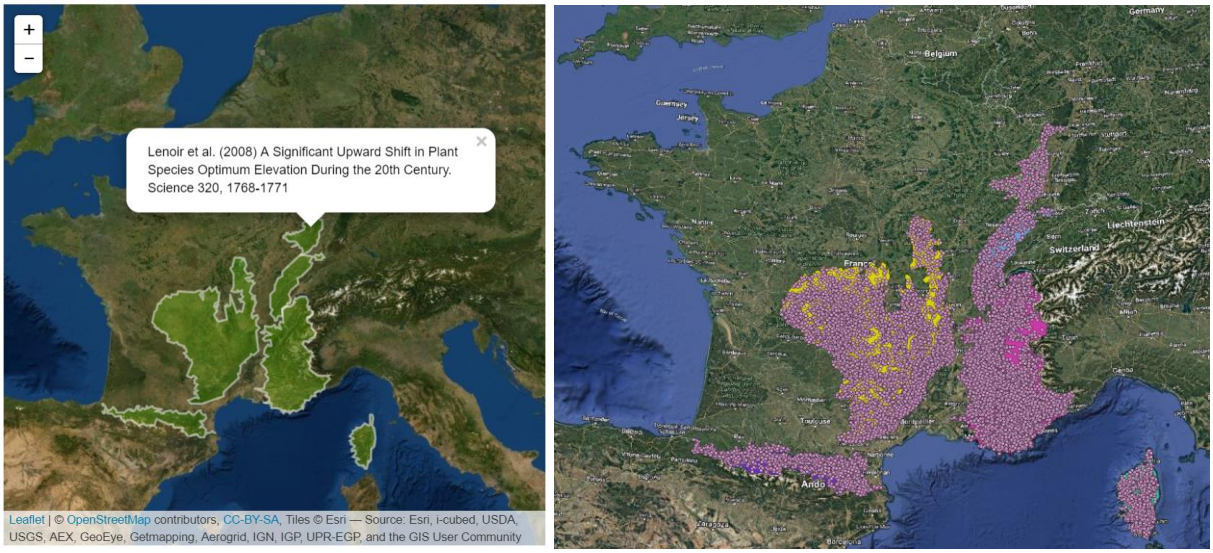

Figure 1 : Zone d'étude couverte par le projet FRAGSHIFTS, basée sur la publication de 2008 (Lenoir et al. 2008) et issue du shapefile « A41_P1.shp » (carte de gauche) extrait de la base BioShifts (Comte et al. 2020), et semis de point (carte de droite) montrant la répartition des 19982 placettes de l'IGN.

III.1.2 Mise à jour des vitesses de migration altitudinale des espèces végétales forestières

L'étude de 2008 (Lenoir et al. 2008), qui sert ici de référence, a montré qu'entre la période 1905-1985, antérieure au réchauffement climatique contemporain, et la période 1986-2005, considérée comme plus chaude, l'optimum de la distribution altitudinale des espèces végétales forestières des montagnes françaises était remontée de 66 m, en moyenne (n = 171 espèces), soit une vitesse moyenne de 2,9 m/an. Le premier objectif étant de mettre à jour les vitesses de migration altitudinale des espèces végétales forestières, nous avons décidé de découper le jeu de données contemporain de l'IGN (2005-2022) en deux périodes, 2005-2012 vs. 2013-2022, ceci afin de pouvoir calculer des changements dans la distribution altitudinale des espèces végétales forestières suffisament fréquentes depuis 2005. Cependant, les placettes IGN de ces deux périodes sont totalement différentes et ne sont pas appariées entre la période 2005-2012 (n = 12359) et la période 2013-2022 (n = 6923). En effet, les inventaires de l'IGN ne sont pas réalisés sur des placettes permanentes, ce qui implique que la revisite de la grille tous les 10 ans ne se fait pas nécessairement au même endroit. De plus, à mesure que l'on avance dans le temps, et sachant que des relevés floristiques ne sont réalisés par les équipes de l'IGN que lors du 1er levé sur le terrain, essentiellement réalisés lors du

premier cycle de 10 ans, on dispose de moins en moins de relevés floristiques au fil des ans qui suivent le premier cycle de 10 ans. Pour pallier le non-appariement des placettes, nous avons donc opté pour une stratégie de ré-échantillonage du lot de 19982 placettes en créant des paires de placettes dites « pseudo-appariés » *a posteriori* et contenant une placette par période au sein d'une même paire. Pour cela, les placettes d'une même paire doivent être distante de moins de 1 km et appartenir à la même bande altitudinale, c'est-à-dire présentant une différence d'altitude inférieure à 100 m. Après ré-échantillonnage, nous avons réussi à pseudo-apparier 5086 placettes, soit 2543 paires de placettes (Fig. 2), pour lesquelles 448 espèces végétales apparaissent au minimum 20 fois par période.

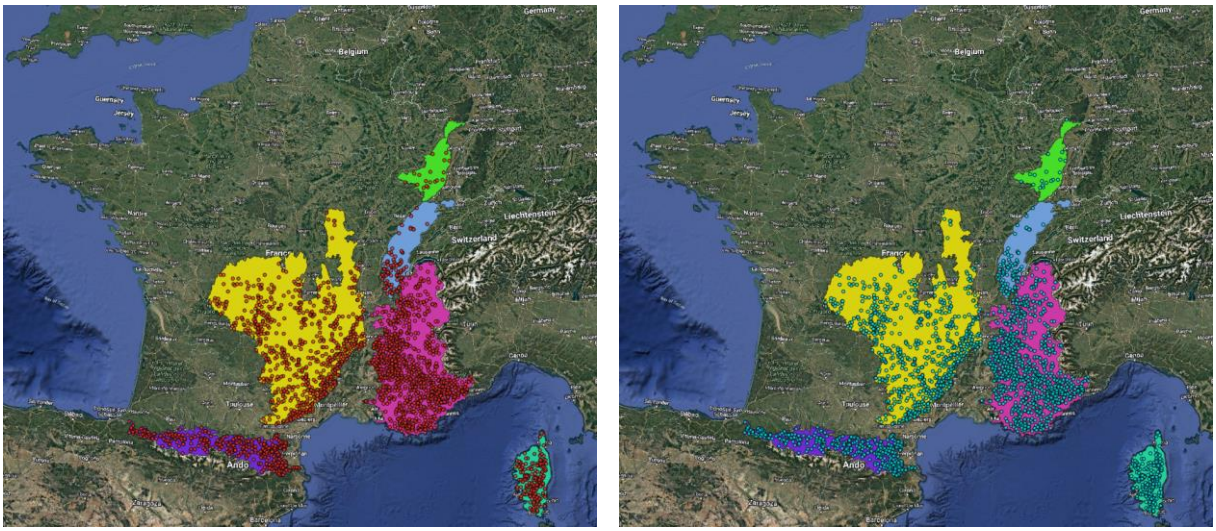

Figure 2 : Résultat de l'appariement a posteriori des placettes de l'IGN entre les périodes 2005-2012 (n = 2543) à gauche et 2013-2022 (n = 2543) à droites. Les limites des 5 massifs montagneux de la France hexagonale (Alpes en rose, Jura en bleu, Massif Central en jaune, Pyrénées en violet, Vosges en vert) et de la Corse, en cyan, sont identiques à celles de l'étude de 2008 (Lenoir et al. 2008) (Fig. 1).

Une fois l'appariement obtenu, nous avons utilisé exactement la même technique de modélisation que dans l'étude de 2008 (Lenoir et al. 2008) pour calculer la direction et l'amplitude du déplacement de l'optimum altitudinal de chaque espèce, à savoir un modèle de régression logistique (cf. modèle linéaire généralisé dont la famille de distribution est binomiale) calibré par espèce et par période sur l'ensemble des 6 massifs étudiés. L'équation de ce modèle logistique est contrainte à une seule variable explicative, l'altitude (m), qui suit un polynôme d'ordre 2 à ajuster à la variable binaire à modéliser qui n'est autre que la présence-absence (0/1) de l'espèce cible. L'avantage de la régression logistique est qu'elle se base sur un formalisme mathématique permettant d'obtenir, sur la base des coefficients ajustés de l'équation polynomiale d'ordre 2 et dans le cas d'une réponse gaussienne le long du gradient étudié, la position de l'optimum de distribution le long de ce gradient (terBraak & Looman 1986). Parmi les 448 espèces du jeu de données de l'IGN (Fig. 2), un total de 197 espèces présentent une réponse gaussienne significative (cf. courbe de réponse en cloche ayant un optimum) le long du gradient d'altitude, et ce pour les deux périodes contemporaines : 2005-2012 et 2013-2022. Parmi ces 197 espèces, 100 sont communes à l'étude de 2008 (Lenoir et al. 2008). En plus du calcul de l'optimum altitudinal des 197 espèces aux deux périodes contemporaines (2005-2012 et 2013-2022), nous avons aussi calculé l'amplitude de distribution et donc les limites hautes et basses de distribution altitudinale à chaque période.

Les résultats montrent que la vitesse moyenne (n = 100) de migration altitudinale des espèces végétales forestières des montagnes françaises est de 3,82 m/an (modèle linéaire à effet mixte ; p < 005) sur la période 2005-2022 contre 1,13 m/an (modèle linéaire à effet mixte ; p < 0.05) sur la période 1905-2005, soit une accélération de 2,69 m/an (p < 0.05) sur les dernières décennies (Fig. 3). Bien que nous soyons confiant quant aux analyses menées, des analyses plus approfondies sont actuellement en cours au CRBE (CNRS, Toulouse) et menées par Sarah Orth (stagiaire ENS en césure co-encadrée par Romain Bertrand et Jonathan Lenoir). En effet, la méthode de ré-échantillonnage spatio-temporel entre 2005-2022 (réalisée dans le cadre du projet FRAGSHIFTS) et 1905-2005 (réalisée par Lenoir et al. 2008) diffère, et pourrait potentiellement impacter l'évolution des déplacements au cours du temps. Nous avons donc décidé de repartir des données de la thèse de Romain Bertrand (2012), avec plus de 100 000 relevés floristiques forestiers disponibles depuis 1900, et y incorporer les nouvelles données de l'IGN afin d'appliquer la même méthode de ré-échantillonnage spatio-temporel des relevés forestières depuis 1900. S'il est confirmé par les analyses en cour, ce résultat novateur est un indicateur clé de la dynamique de réponse des espèces végétales aux changements survenus plus récemment, au cours des dernières décennies (cf. partie III.1.3 sur les déterminants).

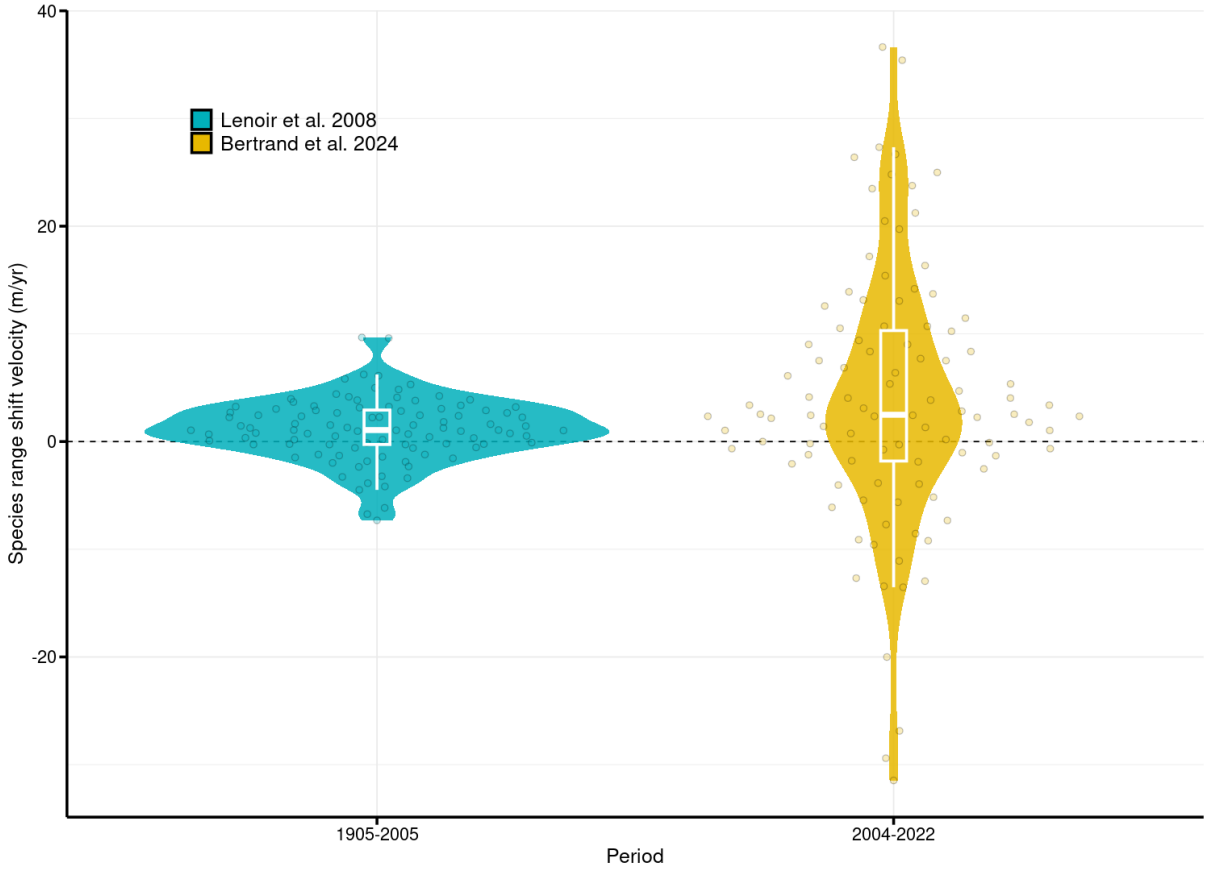

Figure 3 : Changements dans la vitesse de migration (m/an) de l'optimum altitudinal de 100 espèces végétales de la sous-trame boisée des montagnes françaises entre la période 1905-2005 (à gauche) (Lenoir et al. 2008) et la période 2005-2022 (à droite) (Bertrand et al. 2024). On notera une augmentation de la vitesse moyenne de migration ainsi qu'une augmentation de la variation (cf. boîte à moustache) entre les deux périodes.

En ce qui concerne les déplacements des limites de la distribution altitudinale, nos résultats montrent que la limite altitudinale inférieure (correspondant à la marge chaude de l'aire de distribution des espèces, soit une limite où le réchauffement devrait renforcer les contraintes thermiques et hydriques) est remontée de 40,8 m (modèle linéaire à effet mixte ; p < 0.05) entre 2005-2012 et 2013-2022. La limite altitudinale supérieure (correspondant à la marge froide de l'aire de distribution des espèces, soit une limite où le réchauffement devrait relâcher les contraintes thermiques et hydriques)

est, quant à elle, remontée de 26,1 m (modèle linéaire à effet mixte ; $p < 0.05$) entre 2005-2012 et 2013-2022 (Fig. 4). On constate donc une légère tendance à la contraction par le bas sur la période contemporaine 2005-2022. Cela traduit une extirpation des espèces plus fortes à basse altitude (sans doute sous l'effet du réchauffement récent) que leur colonisation à haute altitude. Nous avons également observé que le déplacement des espèces diminue le long du gradient altitudinale, ce qui pourrait révéler une expansion de l'aire des espèces à haute altitude, en lien avec le réchauffement climatique, qui se ralentit du fait d'une expansion lente des forêts à haute altitude (pastoralisme, inertie liée à l'installation et croissance des arbres, etc.). Cependant, ces changements aux limites de la distribution altitudinale ne sont pas disponibles dans l'étude de 2008 (Lenoir et al. 2008) et ne peuvent donc pas être comparés avec la période 1905-2005 pour estimer une éventuelle accélération aux marges de la distribution. Là encore, les analyses plus approfondies qui sont actuellement en cours au CRBE (CNRS, Toulouse), et menées par Sarah Orth, pourront pallier le problème et permettre de recalculer des vitesses de migration aux marges pour la période passée 1905-2005.

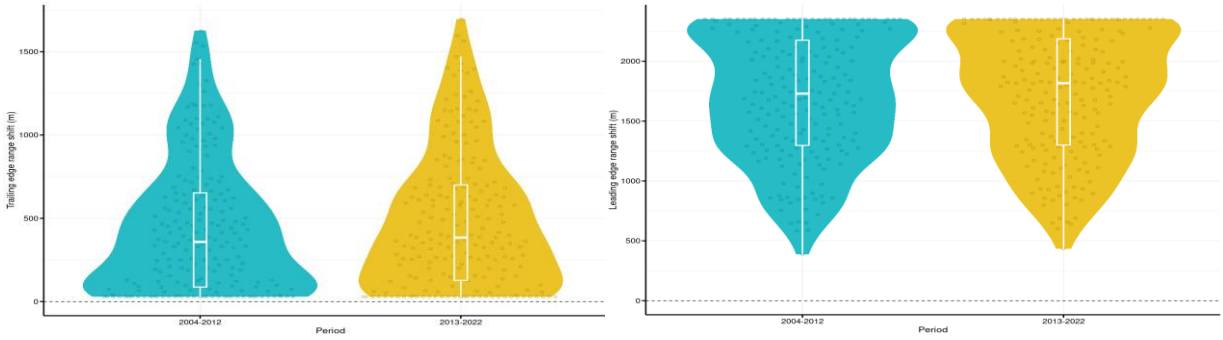

Figure 4 : Changements des limites altitudinales inférieures (à gauceh) et supérieures (à droite), entre les péeriodes 2005-2012 et 2013-2022, des 197 espèces végétales pour lesquelles la courbe de réponse le long du gradient altitudinal sur les 6 massifs montagneux étudiés est gaussienne aux deux periodes étudiées.

Sur les 197 espèces du jeu de données issu de la nouvelle méthode d'inventaire de l'IGN, nous avons également estimé les déplacements de la distribution altitudinale (cf. optimum et limites hautes et basses) pour chacun des massifs montagneux pour lesquels des espèces sont présentes un nombre suffisant de fois (n = 20) par massif et par période. Cependant, ces changements dans la distribution altitudinale ne sont pas disponibles par massif dans l'étude de 2008 (Lenoir et al. 2008) et ne peuvent donc pas être comparés avec la période 1905-2005 pour estimer une éventuelle accélération de la migration par massif. A noter que les analyses plus approfondies qui sont actuellement en cours au CRBE (CNRS, Toulouse), et menées par Sarah Orth, permettront également de pallier le problème en s'assurant de recalculer des vitesses de migration altitudinale des espèces végétales forestières par massif pour la période antérieure (1905-2005).

Enfin, nous n'avons pas été en mesure de calculer les changements dans la distribution altitudinale des espèces végétales pour deux des cinq massifs montagneux de la France hexagonale, à savoir le Jura et les Vosges (cf. nombre d'espèces ou d'occurrence trop faible) (Fig. 5). Pour ce qui est des déplacements de l'optimum altitudinal des espèces végétales forestières par massif (Fig. 5), nous n'avons pas trouvé de différence significative entre les 4 massifs (Alpes, Corse, Massif Central, Pyrénées) (modèle linéaire à effet mixte ; $p > 0.05$). La différence de position de l'optimum altitudinal reste en moyenne positive entre 2005-2012 et 2013-2022, même si la différences moyenne semble sensiblement plus importante dans les Alpes (+44,9 m) qu'en Corse (+34,8 m), dans le Massif Central (+28,6 m) ou les Pyrénées (+2,5 m).

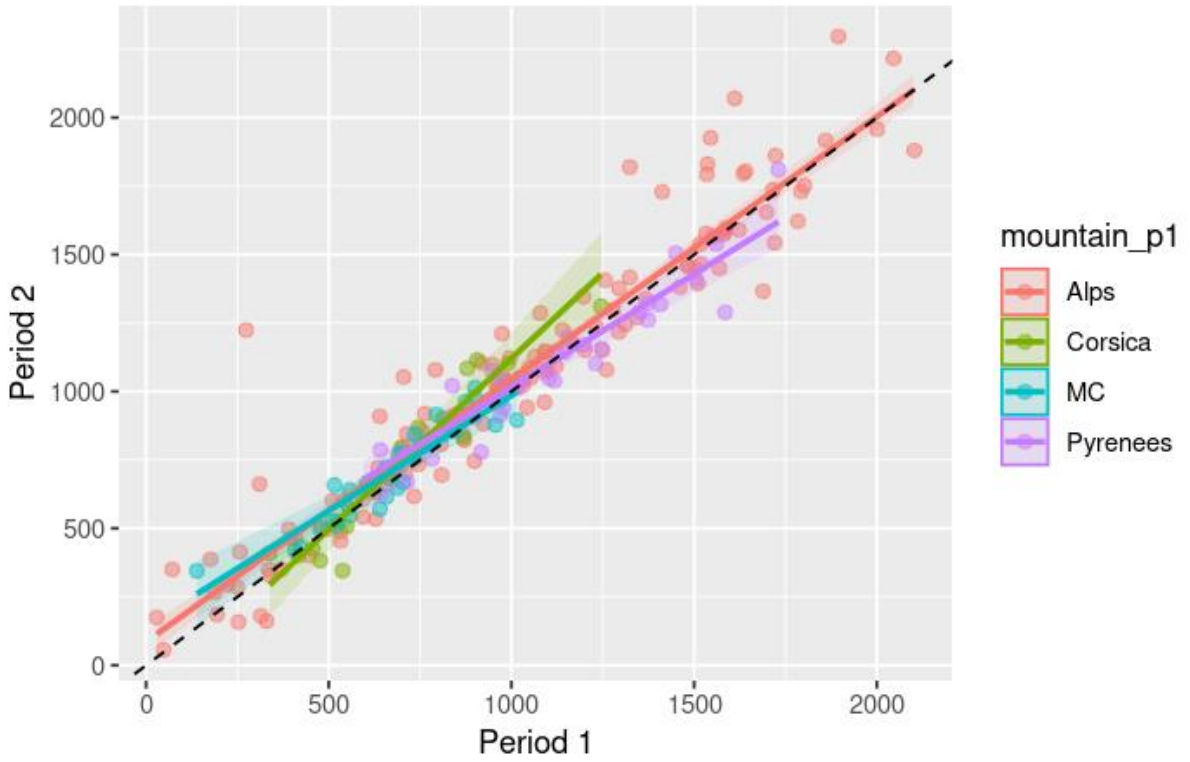

Figure 5 : Position de l'optimum altitudinal, calculé par massif (Alpes en saumon, Corse en vert, Massif Central en bleu, Pyrénées en violet), entre la 1ère période 2005-2012 et la seconde période 2013-2022. Notez que nous ne disposions pas de suffisamment de données pour calculer les déplacements par espèce au sein des massifs du Jura et des Vosges. Notez également qu'une même espèce peut apparaître dans plusieurs massifs et donc présenter des déplacements de l'optimum altitudinal différents d'un massif à l'autre.

III.1.3 Les déterminants de la vitesse de migration altitudinale des espèces végétales forestières

Pour répondre au second objectif du projet, nous nous sommes focalisés sur les 197 espèces végétales forestières pour lesquelles nous disposons de données sur la direction et l'amplitude des déplacements de la position de l'optimum altitudinal entre 2005-2012 et 2013-2022 (voir objectif traité au point III.2.2). Nous avons cherché à expliquer les variations observées entre espèces à l'aide de plusieurs facteurs d'expositions aux activités humaines, incluant (Fig. 6) : la densité de routes et chemins, l'évolution du couvert forestier au cours des dernières décennies, ainsi que l'impact des dépôts atmosphériques azotés, et ce en interaction avec la vitesse à laquelle le climat change.

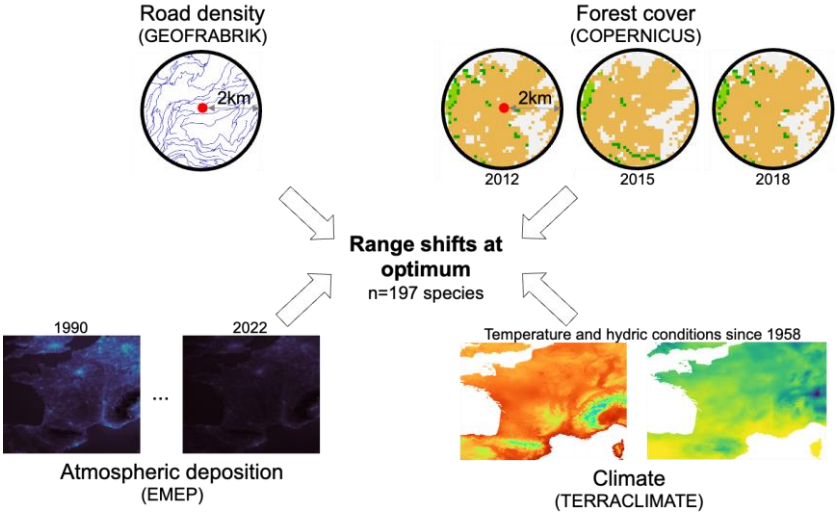

Figure 6 : Présentation des principaux facteurs pouvant expliquer les variations observées dans l'amplitude et la direction des déplacements de la position de l'optimum de 197 espèces végétales forestières le long du gradient altitudinal au sein des cinq massifs de la France hexagonale et de la Corse entre les périodes 2005-2012 et 2013-2022 (voir résultats dans la partie III.1.2).

Dans un premier temps, nous avons préparé l'ensemble des variables explicatives à associer aux 197 valeurs de différences de la position de l'optimum altitudinal mesuré entre 2005-2012 et 2013-2022, dont la différence moyenne traduit une remontée en altitude de 39,7 m (modèle linéaire à effet mixte ; $p < 0.05$) de la distribution des 197 espèces végétales forestières étudiées. Etant donné que la variable dépendante à expliquer (cf. les 197 valeurs de différences de position de l'optimum altitudinal) est constituée d'observations au niveau de l'espèce et que les facteurs d'expositions aux activités humaines (cf. densité de routes et chemins, changement dans la densité du couvert forestier, évolution de la charge critique en polluants atmosphériques et changements climatiques) sont spatialisés et donc rattachés aux localisations géographiques des placettes de l'IGN, nous avons commencé par calculer des métriques de ces facteurs d'expositions à l'échelle de la distribution de l'espèce. Pour tester l'effet de la densité de routes et chemins, nous avons extrait de la base de données GEOFABRIK, le linéaire cumulé de routes et chemins dans un rayon de 2 km autour de chaque placette IGN où l'espèce cible était présente au cours de la période de référence (2005-2012) (Fig. 6). Nous avons ensuite calculé la moyenne sur l'ensemble des placettes où l'espèce était présente pour la période de référence, correspondant à une valeur unique par espèce. Pour tester l'effet de la densité de couvert forestier et de son évolution au cours du temps, nous avons également extrait les données de la base Copernicus sur le couvert forestier, disponibles à 20 m de résolution pour toute l'Europe en 2012, 2015 et 2018. Pour cela, nous avons non seulement calculé le pourcentage de couvert forestier sur la carte de 2012, mais également son évolution entre 2012 et 2018 (cf. taux d'évolution du pourcentage de couvert forestier), dans un rayon de 2 km autour de chaque placette IGN où l'espèce cible était présente au cours de la période de référence (2005-2012) (Fig. 6). Comme pour la variable de densité de routes et chemins, nous avons calculé le pourcentage de couvert moyen en 2012, ainsi que son évolution moyenne entre 2012 et 2018, sur l'ensemble des placettes où l'espèce était notée présente à la période de référence, afin d'obtenir une valeur par espèce. Nous avons utilisé la même approche pour calculer la quantité de dépôts atmosphériques azotés, en mg/m^2, à la période de référence (2005-2012), ainsi que la vitesse à laquelle cette quantité de dépôts avait baissée au cours du temps (2005-2022), en utilisant les données spatialisées de la base EMEP, disponibles à une résolution spatiale de 50 km par 50 km sur toute l'Europe. Enfin, nous avons extrait de la base de données TerraClimate les séries temporelles, au pas mensuel, d'évolution des températures minimales, maximales, et des précipitations sur la période 2005-2022, disponible à une résolution de 4 km par 4 km à l'échelle globale. Ces séries temporelles longues nous ont permis de calculer les vitesses de changements des températures minimales et maximales (en °C/an) ainsi que des vitesses de changements des précipitations (en mm/an) pour chaque placette IGN où l'espèce cible était présente au cours de la période de référence (2005-2012), avant de résumer cette information à l'échelle de l'espèce en utilisant la moyenne sur l'ensemble des placettes où l'espèce cible était présente.

Sur la base de sept variables explicatives que sont (1) la densité de routes et chemins à la période de référence (road0), (2) le pourcentage de couvert forestier à la période de référence (pF_t0), (3) le taux d'évolution (positif) du pourcentage de couvert forestier entre 2012 et 2018 (pF_rate), (4) la quantité de dépôts atmosphériques azotés à la période de référence (dtn_t0), (5) le taux négatif (baisse) de dépôts atmosphériques azotés entre 2005 et 2022 (dtn_rate), (6) la vitesse de réchauffement des températures minimales (tmin_rate) (à noter que la la vitesse de réchauffement des températures maximales étant très corrélées à tmin_rate, nous avons fait le choix de sélection uniquement tmin_rate) et (7) la vitesse de changement des précipitations (ppt_rate), nous avons construit un modèle linéaire à effet mixte (considérant un effet de proximité phylogénétique des espèces en effet aléatoire), en testant toutes les interactions possibles entre la vitesse de réchauffement des températures minimales et les 6 autres variables (Table 1).

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	df	t value	Pr(>|t|)	
(Intercept)	43.845	11.325	117.435	3.871	0.000178	***
scale(tmin_rate)	**22.938**	**12.105**	**179.018**	**1.895**	**0.059709**	.
scale(road0)	9.202	17.433	182.989	0.528	0.598243	
scale(pF_t0)	4.586	11.991	182.620	0.382	0.702552	
scale(pF_rate)	1.556	15.571	180.307	0.100	0.920525	
scale(dtn_t0)	7.682	36.592	182.980	0.210	0.833956	
scale(dtn_rate)	37.022	29.459	182.915	1.257	0.210458	
scale(ppt_rate)	-14.594	13.146	182.999	-1.110	0.268400	
scale(tmin_rate):scale(road0)	**32.422**	**13.131**	**179.465**	**2.469**	**0.014483**	*
scale(tmin_rate):scale(pF_t0)	-3.328	11.290	163.853	-0.295	0.768577	
scale(tmin_rate):scale(pF_rate)	**-37.260**	**16.639**	**182.775**	**-2.239**	**0.026343**	*
scale(tmin_rate):scale(dtn_t0)	10.702	28.274	179.040	0.378	0.705511	
scale(tmin_rate):scale(dtn_rate)	**62.902**	**25.461**	**181.132**	**2.471**	**0.014415**	*
scale(tmin_rate):scale(ppt_rate)	3.940	9.115	170.896	0.432	0.666084	

Table 1 : Résultat du modèle linéaire généralisé mixte, de famille gaussienne, testant l'effet de toutes les interactions entre la vitesse de réchauffement des températures minimales (tmin_rate) et les 6 autres variables (road0, pF_to, pF_rate, dtn_to, dtn_rate, ppt_rate). La famille taxonomique et le genre de l'espèce ont été ajoutés en tant que variables aléatoires agissant sur l'ordonnée à l'origine.

Le modèle montre que les variables testées expliquent jusqu'à 15% de la variation observée dans les déplacements de l'optimum de la distribution des espèces végétales forestières le long du gradient altitudinal représentatif des montagnes françaises, entre les périodes 2005-2012 et 2013-2022. L'intensité des déplacements de l'optimum d'altitude est modulé par des interactions complexes entre la vitesse de réchauffement des températures minimales (tmin_rate) et trois autres facteurs d'expositions aux activités humaines que sont : la densité de routes et chemins à la période de référence (road0), l'augmentation du pourcentage de couvert forestier entre 2012 et 2018 (pF_rate) et enfin la baisse (cf. taux négatif) des taux dépôts atmosphériques azotés entre 2005 et 2022 (dtn_rate). Notamment, la densité du réseau routier et des chemins semble amplifier la remontée en altitude des espèces amorcée par le réchauffement climatique de sorte que les routes et chemins semblent favoriser la migration des espèces vers les sommets lorsque le réchauffement des températures minimales est plus important.

L'autre résultat majeur de nos analyses préliminaires sur les déterminants de la redistribution altitudinale des espèces végétales forestières de montagne est que plus le pourcentage de couvert forestier augmente au cours du temps, moins les déplacements vers les sommets sont importants à mesure que les températures minimales augmentent au cours du temps. En d'autres termes, l'expansion du territoire forestier en France au cours de la dernière décennie tend à freiner, voir inverser, cette tendance moyenne à la migration vers les sommets. Ce résultat contre-intuitif de prime abord n'est cependant pas si surprenant. En effet, même si la recolonisation forestière à plus haute altitude, parfois liée à la déprise agricole, devrait *a priori* favoriser la remontée altitudinale des espèces végétales forestières, il n'en demeure pas moins que les milieux se « referment » également à plus basses altitudes et que cela implique non seulement des conditions microclimatiques plus fraîches et plus stables, mais aussi des cortèges d'espèces forestières plus spécialistes et plus tolérantes à l'ombre, également connues pour leurs plus faibles capacités de migration que les espèces forestières plus généralistes. Par conséquent, il est possible que la fermeture des milieux, liée aux dynamiques de successions végétales, soit un frein à la migration vers les sommets en limitant la progression des espèces les plus généralistes tout en favorisant les espèces les plus spécialistes en termes de tolérance à l'ombre. Parmi les perspectives de recherche pouvant confirmer cette hypothèse contre-intuitive selon laquelle les successions végétales freinent la migration des cortèges de la sous-trame boisée vers les sommets, il serait intéressant de tester si un trait intrinsèque comme la tolérance à l'ombre, ou l'affinité vis-à-vis de microclimats plus frais et tamponnés, peut interagir avec des facteurs extrinsèques, comme l'ouverture ou la fermeture des milieux, pour expliquer les

variations observées dans les vitesses de migrations altitudinales des espèces végétales forestières, variations qui sont plus fortes au cours des deux dernières décennies que par le passé (voir Fig. 3 en partie III.1.2). Une telle approche pourrait être testée prochainement dans le massif des Pyrénées où nous avons à disposition des données spatio-temporelles du microclimat forestiers allant de 2001 à 2021 (Bertrand et al. 2022).

Enfin, notre modèle semble indiquer que dans les zones où la diminution récente des dépôts atmosphériques azotés tend à s'atténuer, la remontée en altitude amorcée par le réchauffement climatique s'accentue (cf. le coefficient de pente positif de l'interaction entre tmin_rate et dtn_rate). Par conséquent, l'amélioration de la qualité de l'air, liée à la désindustrialisation de la France, semble bénéficier aux communautés végétales forestières des montagnes françaises qui migrent plus rapidement vers les sommets en réponse à l'augmentation des températures minimales.

III.1.3 Références bibliographiques

Bertrand et al. (2022) µTEMPY: a spatio-temporal microclimate database of air, ground level and water temperature conditions in the Pyrenees. Microclimate Ecology & Biogegography, Antwerp, Belgique

Bertrand et al. (2024) Impacts of habitat fragmentation on species range shift velocities (FRAGSHIFTS), *6th meeting of the BIOSHIFTS working group*, december

Comte et al. (2020) BioShifts: a global geodatabase of climate-induced species redistribution over land and sea. *figshare*, dataset, https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7413365.v1

Lenoir et al. (2008) A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science*, 320, 1768-1771

Lenoir et al. (2020) Species better track climate warming in the oceans than on land. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 1044-1059

terBraak & Looman (1986) Weighted averaging, logistic regression and the Gaussian response model. *Vegetatio*, 65, 3-11

III.2 Description des travaux menés et des résultats scientifiques obtenus à l'attention du grand public

III.2.1 Introduction (environ 300 caractères, espaces inclus)

Ceci pourra être utilisé dans la fiche résultat du projet. FRB se réserve le droit de modifier le texte pour publication sur ses plateformes. Vous serez consulté avant la publication. Ces éléments étant destinés au grand public, veillez à rédiger ce texte dans une optique de vulgarisation.

Les travaux les plus récents montrent que les activités humaines peuvent tout autant entraver ou faciliter la redistribution du vivant en réponses aux changements climatiques, ce qui a tendance à obscurcir notre compréhension des facteurs sous-jacents à cette redistribution et donc rendre difficile, voire impossible, la scénarisation des trajectoires futures de la biodiversité.

[EN] III.2.1 Introduction (around 300 characters including spaces): *This could be used in the project summary. FRB reserves the right to modify the text for publication on its platforms. You will be consulted before publication. As these elements are intended for the general public, be sure to write this text in a way that is easy to understand.*

The most recent scientific advances have shown that anthropogenic activities can either hinder or foster biodiversity redistribution in response to global warming, which tends to obscure our understanding of the main drivers underlying species range shifts and thus rendering biodiversity modelling under future climate change scenarios difficult, if not impossible.

III.2.2 Méthode et approches utilisées pour le projet (environ 700 caractères, espaces inclus)

Afin de mieux comprendre les déterminants récents de la redistribution des espèces, nous nous sommes appuyés sur deux sources de données : (1) une étude passée qui donne la vitesse à laquelle les espèces végétales forestières sont remontées en altitude en France entre 1905 et 2005 et (2) des données plus récentes de distribution des espèces végétales forestières issues de la nouvelle méthode de l'Inventaire géographique national (IGN) qui a débuté en 2005. La 1ère étape a consisté à actualiser les vitesses de redistribution altitudinale des espèces sur la période 2005-2022 pour les comparer à la période antérieure. Puis, nous avons construit un modèle permettant de tester l'importance relative de plusieurs variables liées aux activités humaines, comme : la densité de routes et chemins, l'augmentation du couvert forestier au cours de la dernière décennie, le réchauffement climagtique et la diminution récente des dépôts atmosphériques azotés.

[EN] III.2.2 Methods and approaches used for your project (around 700 characters including spaces):

To better understand the main determinants of species redistribution, we used two data sources: (1) a former study which reported the velocity at which understory plants shifted upslope across French mountain over the period 1905-2005 and (2) more recent data on understory plant species distribution from the new monitoring method of the National Forest Inventory (NFI) which started in 2005. First, we recomputed the velocities at which understory plants have shifted upslope across French mountain forests during the more recent period covered by NFI data (2005-2022) to be compared against velocities from the previous period. Then, we fitted a model to assess the relative importance of several human-induced drivers of change such as: road network density, the increase in forest cover over the last decade, climate warming and the recent decrease in nitrogen deposition.

III.3 Accès aux données

Décrivez les données et/ou les bases de données créées ou ajoutées au cours du projet, ainsi que les éléments de votre plan de gestion des données :

(a) les types de données collectées et utilisées :

- Données de vitesse de déplacement de la distribution altitudinale pour 171 espèces végétales forestières en France, extraites de la base de données *BioShifts* ;
- Données géolocalisées (latitude, longitude, altitude) de 73629 relevés forestiers comprenant la liste détaillée, par placette, des espèces végétales vasculaires co-occurrentes au sein de chaque placette, extraites de la base de données de l'IGN ;
- Données spatialisée (format vecteur) sur la densité de routes et chemins en Europe, extraites de la base de données GEOFABRIK ;
- Données spatialisées (format raster à 20 m de résolution spatiale) sur l'évolution du couvert forestier en Europe, extraites de la base Copernicus ;
- Données spatialisées (format raster à 50 km de résolution spatiale) sur l'évolution des dépôts azotés en Europe, extraites de la base EMEP ;
- Séries temporelles, au pas mensuel sur la période 1958 à nos jours, de données climatiques (températures minimales, maximales et précipitations) spatialisées à l'échelle globale pour les écosystèmes terrestres (format raster à 1 km de résolution spatiale), extraites de la base TerraClimate.

(b) les normes utilisées pour documenter les données :

Voir les métadonnées des bases de données renseignées ci-dessus et qui sont toutes en libre accès, soit directement téléchargeable sur le site (cf. liens hypertextes renseignées ci-dessus dans la liste des bases de données utilisées pour le projet), soit disponible sur demande pour les données précises de géolocalisation en altitude des placettes de l'IGN.

(c) la politique d'accès et de réutilisation, de stockage et de gestion à court et à long terme

Toutes les bases de données listées dans le point (a) sont libres et directement accessibles en ligne (cf. liens hypertextes renseignées ci-dessus dans la liste des bases de données utilisées pour le projet).

(d) les personnes à contacter après la fin du projet :

- Jonathan LENOIR (jonathan.lenoir@u-picardie.fr) ;
- Romain BERTRAND (romain.bertrand2@univ-tlse3.fr).

III.4 Résultats et valorisations scientifiques du projet

- Liste de TOUTES les publications (articles, livres, chapitres de livres...) publiées, soumises ou prévues (avec les dates de soumission prévues). Mettez en évidence les 3 plus importantes à vos yeux.

- Sarah Orth, Lise Comte, Gaël Grenouillet, Brunno Oliveira, Jonathan Lenoir, Romain Bertrand (2025-2026) Accelerated upward shifts of understory forest plants across French mountains involves complex interplays between anthropogenic drivers of change. *To be submitted in 2025-2026 to an international journal such as Ecology Letters or Nature Ecology & Evolution*
- Zhihao Fu*, Qinghua Zhan*, Jonathan Lenoir*, Shengwei Wang, Hong Qian, Jiongming Yang, Wenxuan Sun, Yuvenalis Morara Mbuni, Veronicah Mutele Ngumbau, Guangwan Hu, Xue Yan, Qingfeng Wang, Si-Chong Chen, Yadong Zhou (2025) Climate change drives plant diversity attrition at the summit of Mount Kenya. *New Phytologist*, Early View, https://doi.org/10.1111/nph.20344

- Lise Comte, Romain Bertrand, Sarah Diamond, Lesley T. Lancaster, Malin L. Pinsky, Brett R. Scheffers, J. Alex Baecher, R. M. W. J. Bandara, I-Ching Chen, Jake A. Lawlor, Nikki A. Moore, Brunno F. Oliveira, Jerome Murienne, Jonathan Rolland, Madeleine A. Rubenstein, Jennifer Sunday, Laura M. Thompson, Fabricio Villalobos, Sarah R. Weiskopf, Jonathan Lenoir (2024) Bringing traits back into the equation: A roadmap to understand species redistribution. *Global Change Biology*, 30, e17271, https://doi.org/10.1111/gcb.17271

- Liste des communications orales et des posters présentés lors de conférences, passées ou prévues (veuillez indiquer les dates de ces conférences).

- Jonathan Lenoir (2025) BioShifts – A database of species range shifts under anthropogenic climate change. *The 72nd Annual Meeting of the Ecological Society of Japan*, 15-18 March 2025, University of Hokkaido, Hokkaido, Japan ;
- Romain Bertrand, Brunno Oliveira, Lise Comte, Jonathan Lenoir (2024) Impacts of habitat fragmentation on species range shift velocities (FRAGSHIFTS), *6th meeting of the BIOSHIFTS working group*, 9-13 December 2024, CESAB, Montpellier, France

- Autres résultats (bases de données, logiciels, code R, sites web, etc.).

- Les scripts utilisés sont disponibles sur GitHub (https://github.com/Bioshifts/FRAGSHIFTS). Le lien sera en accès libre une fois la publication acceptée.

- Liste des propositions de subventions soumises ou prévues (avec les dates prévues pour la soumission).

- Convention de stage de Sarah Orth (ENS Lyon) dans le cadre d'une année de césure impliquant 6 mois de stage, de mars à août 2025, au Centre de recherche sur la biodiversité et l'environnement (CRBE) à Toulouse, encadrée par Romain Bertrand (encadrant principal) et moi-même (Jonathan Lenoir). Sarah Orth va poursuivre les analyses déjà menées dans le but de rédiger une publication scientifique ;
- Soumission d'un dossier de demande de financement de thèse. Ce dossier a été soumis à l'ENS Lyon en mars dernier (mars 2025), dans le cadre de la formation de Sarah Orth qui est actuellement en stage de césure, pour 6 mois, au CRBE. La thèse sera dirigée par Gaël Grenouillet au CRBE (CNRS, Toulouse), et co-endadrée par Romain Bertrand et Jonathan Lenoir. Cette thèse aura pour objectif de continuer nos recherches amorcées dans le cadre des projets BIOSHIFTS et FRAGSHIFTS, notamment sur la redistribution des espèces végétales forestières, en explorant l'impact des interactions biotiques sur cette redistribution.

Notes :

- *Nous sommes conscients que l'élaboration et la diffusion des résultats du projet se feront pendant plusieurs années après la fin du projet.*

- *La mention pour les remerciements dans les publications à comité de lecture ou tout autre support de publication est la suivante: This research is product of the "Fragshifts" group funded by the French Foundation for Research on Biodiversity (FRB; "http://www.fondationbiodivrsite.fr", the Ministry of the Ecological Transition (MTE) and the French Office of Biodiversity (OFB).*

- *Pour des articles publiés suite à la rédaction du rapport final, veuillez contacter directement Coline Léandre (coline.leandre@fondationbiodiversite.fr) afin que nous puissions vous accompagner dans la communication (communiqué de presse éventuel, résumé de l'article sur le site web de la FRB, etc.).*

IV. Principales conclusions (publiables)

Principales conclusions (environ 1000 caractères, espaces inclus) à l'attention du grand public

Mettez en évidence les résultats à l'aide d'illustrations (graphique, carte, image, etc.) et faites-nous connaître sa signification. Ceci sera utilisé dans la fiche résultat du projet. La FRB se réserve le droit de modifier le texte pour publication sur ses plateformes. Vous serez consulté avant la publication. Ces éléments étant destinés au grand public, veillez à rédiger ce texte dans une optique de vulgarisation.

Le premier résultat majeur est celui d'une accélération significative de la remontée en altitude de 100 espèces végétales forestières françaises, passant d'une vitesse moyenne de 1,13 m/an ($p < 0.05$) sur la période 1905-2005 à une vitesse moyenne de 3,82 m/an ($p < 005$) sur la période 2005-2022, soit une augmentation de +2,69 m/an ($p < 0.05$) sur les deux dernières décennies (voir Fig. 3 en partie III.1.2). Le second résultat majeur est que les activités humaines interagissent de manière complexe avec l'augmentation rapide des températures modulant ainsi la vitesse à laquelle les espèces remontent en altitude, de sorte que les infrastructures routières semblent amplifier la migration altitudinale tandis que l'augmentation du couvert forestier au cours de la dernière décennie semble la freiner. Ce dernier résultat contre intuitif demande à être confirmé par des analyses plus approfondies mais nous pouvons d'ores et déjà conclure à un impact majeur des activités humaines dans la modulation de la grande redistribution du vivant dans un contexte de réchauffement global.

[EN] Principal conclusions (around 1000 characters including spaces): for large audience

Highlight a key outcome with illustration (graph, map, picture, etc.) and let us know its significance. This will be used in the project summary. FRB reserves the right to modify the text for publication on its platforms. You will be consulted before publication. As these elements are intended for the general public, be sure to write this text in a way that is easy to understand.

The first most important finding is a significant acceleration of the velocity at which 100 understory forest plant species have shifted their elevational distribution upslope, switching from an average velocity of 1.13 m/yr ($p < 0.05$) over the period 1905-2005 to an average velocity of 3.82 m/yr ($p < 0.05$) over the period 2005-2022, which corresponds to an increase of +2.69 m/yr ($p < 0.05$) over the last two decades (see Fig. 3 in section III.1.2). The second most important finding involves complex interplays between anthropogenic activities and the rapid increase in temperature conditions which modulate the velocity at which understory plant species have shifted their elevational ranges upslope, such that roads seem to amplify upslope range shifts while the increase in forest cover over the last decade seems to hinder it. This last result is rather counter intuitive and calls for more research to confirm that this trend is real but we can already conclude that human activities have a profound impact in modulating the widespread redistribution of life as climate warms globally.

V. Impacts des résultats

Impact pour la science, la société et la décision publique et privée (environ 1500 caractères, espaces inclus) à l'attention du grand public

Ceci sera utilisé dans la fiche résultat du projet. La FRB se réserve le droit de modifier le texte pour publication sur ses plateformes. Vous serez consulté avant la publication. Ces éléments étant destinés au grand public, veillez à rédiger ce texte dans une optique de vulgarisation.

Nos résultats sont importants pour la communauté scientifique car très peu d'études, voire aucune à notre connaissance, n'a mis en évidence une tendance nette à l'accélération des vitesses de migrations des espèces vers les sommets des montagnes. Néanmoins, on notera que cette tendance moyenne cache une forte variation, bien plus forte au cours des deux dernières décennies que par le passé (voir Fig. 3 en partie III.1.2), de sorte que certaines espèces migrent soit beaucoup moins vite,

soit plus rapidement mais dans des directions opposées. Plus surprenant, nos résultats suggèrent que les activités humaines peuvent, dans certaines circonstances, accélérer les vitesses de migrations, ce qui va à l'encontre des observations les plus récentes sur le sujet. Pour ce qui est des implications pour la société civile et les pouvoirs publics, nos travaux suggèrent que certaines infrastructures d'origines humaines, comme les routes et chemins, peuvent servir de couloir de migration. Ainsi, en moyenne, les espèces végétales forestières semblent profiter des perturbations le long de ces infrastructures pour échapper à la compétition et migrer plus rapidement vers les sommets. A l'inverse, nos résultats suggèrent aussi que la progression de l'espace forestier tend à freiner, voire inverser, cette tendance moyenne à la migration vers les sommets. Là où les milieux se « referment », au grès des successions végétales et à basses altitudes également, les conditions microclimatiques deviennent plus fraîches et plus stables, favorisant des cortèges d'espèces forestières plus spécialistes et plus tolérantes à l'ombre, également connues pour leurs plus faibles capacités de migration. Il ne fait aucun doute que ces résultats intéresseront les acteurs socio-économiques de la forêt publique et des forêts privées françaises suivant les objectifs de gestion, que ce soit pour accélérer la « transformation » des socio-écosystèmes forestiers par migration naturelle ou assistée vers les sommets en ouvrant les peuplements, par exemple, ou pour freiner celle-ci en renforçant la « résistance » de certaines populations par le maintien de conditions microclimatiques plus fraîches et stables.

[EN] Anticipated (or actual) impact of theses results for science, society, public and private decision making (around 1500 characters including spaces): for large audience

This will be used in the project summary. FRB reserves the right to modify the text for publication on its platforms. You will be consulted before publication. As these elements are intended for the general public, be sure to write this text in a way that is easy to understand.

Our findings are relevant for the scientific community given that few studies, and possibly none to the best of our knowledge, have ever demonstrated an accelerated trend in the velocity at which species are shifting upslopes in mountain ecosystems. However, we also note that this trend hides a large variation in species range shift velocities, one that is larger than previously reported (see Fig. 3 in section III.1.2), such that some species are shifting upslope at a much slower pace or even at rapid speed but in opposite directions. More surprising, our findings suggest that anthropogenic activities can, in some circumstances, accelerate the velocity at which species are shifting their ranges, which contradicts the most recent scientific advances on the matter. Regarding implications for human societies and stakeholders, our findings suggest that human-made infrastructures, such as roads, can act as migration corridors. For instance, understory plant species seem to benefit from disturbances along road verges to escape competition and to expand faster upslope. By contrast, our findings also suggest that the increase in the percentage of forest cover tend to limit, or even reverse, the mean trend of upslope range shifts. The shift from open to canopy-close conditions, following vegetation succession that also happens at lower elevations, generates cooler and more stable microclimatic conditions, which in turn favours forest specialist species that are more shade tolerant but also more limited in their dispersal abilities. We are convinced these results will be of interest to forest managers and stakeholders from the public and private sector to guide their management objectives, either by accelerating the "transformation" of forest socio-ecosystems through more open conditions to foster natural and assisted migration upslope or by reinforcing the "resistance" of local populations through management actions that will maintain cooler and more stable microclimatic conditions.

VI. Activités de sensibilisation et de diffusion auprès des porteurs d'enjeux (le cas échéant)

La FRB encourage fortement la diffusion des résultats auprès de divers acteurs non académiques, y compris les décideurs politiques. Les résultats des projets de recherche peuvent être diffusés et valorisés de différentes manières et par différents canaux : publications, conférences scientifiques, posters ou synthèses scientifiques (cf. section III), mais aussi via des sites internet, des synthèses pour les décideurs politiques, des articles dans divers médias, des conférences impliquant des acteurs non académiques, des systèmes d'aide à la décision, des bases de données, etc.

- Veuillez décrire les activités de diffusion et de transfert de connaissances qui ont été menées à l'attention des décideurs politiques, des gestionnaires, des acteurs socio-économiques (ou de toute autre partie prenante) en rapport avec le projet.

Pas d'activité de transfert de connaissances avec la société civile à ce stade mais j'ai (Jonathan Lenoir) récemment (février 2025) intégré le Conseil scientifique (CS) de l'association *Pro Silva France*, sur invitation de son Président (Evrad de Turckheim) et je fais également parti, depuis peu de temps (mars 2025), du groupe technique de l'association *Canopée Forêts Vivantes*. Enfin, dans le cadre du PEPR FORESTT et notamment du Projet ciblé MONITOR, dans lequel Romain Bertrand et moi-même (Jonathan Lenoir) sommes fortement impliqués, nous échangeons régulièrement avec Serge Cadet et Jordane Gavinet qui ont initié le réseau naturaliste habitats-flore de l'Office national des forêts (ONF). Par conséquent, nous comptons bien partager nos résultats et travaux les plus récents, notamment ceux du projet FRAGSHIFTS, avec les acteurs socio-économiques et les parties prenantes de la forêt publique et des forêts privées.

- Faites-nous part de tout article de presse, interview, projet éducatif, etc. en rapport avec la recherche menée dans le cadre du projet.

- Participation à la réalisation d'un film documentaire réalisé par Gilles Dufraisse, de la société Boréales Films, et intitulé « *Notre Nouveau Monde - Quand la Terre nous surprend* ». Diffusion prévue en 2025 sur une chaîne de France Télévisions à une horaire de grande écoute ;
- Rédaction d'un article de vulgarisation à destination du grand public, sur invitation de Véronique Sales. Jonathan Lenoir (2024) A la conquête des zones froides. *Le Courrier de la Nature*, n°343, novembre 2024, pages 53-56 (https://www.snpn.com/produit/le-courrier-de-la-nature-n-343-novembre-2024/).

- Existe-t-il des outils de gestion ou de prise de décision qui ont été développés à la suite du projet (par exemple, conception/mise en œuvre d'indicateurs de biodiversité) ?

Non, pas à ce stade. Cependant, dans le cadre du PEPR FORESTT et notamment du projet ciblé MONITOR, dans lequel Romain Bertrand et moi-même (Jonathan Lenoir) sommes fortement impliqués, la conception d'un modèle permettant de prédire la redistribution de la biodiversité forestière est prévue. Ce modèle prendra en compte l'effet de la dynamique des peuplements forestiers et du microclimat. A terme, l'objectif est que ce modèle serve d'outils au gestionnaire forestier et de la nature pour mieux anticiper l'effet des changements globaux et des pratiques sylvicoles sur la biodiversité. D'autres développements (comme une approche plus fonctionnelle et service écosystémique de la redistribution des espèces) pourront être initiés dans le futur si nos demandes de financement aboutissent.

- Existe-t-il des activités planifiées (ou qui pourraient être planifiées) pour étendre l'utilisation ou l'application des résultats ?

Oui, nous espérons pouvoir publier un article de vulgarisation destiné au grand public, en plus de l'article scientifique prévu, sur la base des résultats préliminaires présentés en parte III.1 du présent rapport final. Mais

avant cela, nous souhaitons consolider ces résultats préliminaires et affiner notre compréhension des déterminants d'origine anthropique qui modulent la vitesse à laquelle les espèces végétales se redistribuent le long du gradient altitudinal des montagnes françaises. Pour cela, nous avons récemment recruté Sarah Orth sur un stage de 6 mois, qui a débuté en mars 2025 et qui se terminera en août 2025. Sarah Orth (ENS Lyon) va poursuivre les analyses déjà menées dans le but de rédiger une publication scientifique de rang international ainsi qu'un article de vulgarisation à publier sur une plateforme telle que *The Conversation France*.

VII Prochaines étapes

Des actions sont-elles prévues à la suite du projet FRB ? Avez-vous soumis des propositions résultant des travaux menés dans le cadre du projet FRB pour des travaux ultérieurs ? Si oui, avez-vous obtenu gain de cause ? En cas de recrutement de post-doctorant, quel est son statut actuel ?

Le projet FRAGSHIFTS a permis de prolonger, pour 10 mois, le contrat postdoctotal de Brunno OLIVEIRA qui était déjà en contrat postdoctoral (48 mois) pour le groupe de synthèse BIOSHIFTS. A l'heure actuelle, Brunno OLIVEIRA est toujours en recherche d'emplois. Il a candidaté à plusieurs concours de recrutement dans des instituts de recherche au Brésil.

A l'heure actuelle, et pour poursuivre nos recherches initiées avec le projet FRAGSHIFTS, nous sommes en attente de réponses concernant un dossier de demande de financement de thèse de Sarah Orth (ENS Lyon). L'obtention de ce financement nous permettrait d'approfondir nos connaissances quant à l'effet des interactions biotiques sur la redistribution des espèces végétales (forestières notamment). En parallèle, avec le consortium de chercheur ayant participé au projet BIOSHIFTS, nous avons soumis des demandes de financement (notamment à iDiv) pour continuer nos recherches et collaborations sur la redistribution des espèces.

VIII Commentaires sur la réalisation du projet

Veuillez commenter les aspects pratiques, les difficultés rencontrées, les questions particulières liées à la gestion des données, etc.

Pas de commentaire particulier.