MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES
de BORDEAUX AQUITAINE
1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex (1)

M E M O I R E de fin d'études

pour l'obtention du titre

d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

Evolution de la composition floristique pyrénéenne au regard du changement climatique

Picard, Julien

- 2021 -

Spécialisation : Management forestier et logistique d'approvisionnement en bois

Étude réalisée au : CNPF, Délégation Occitanie, 7 chemin de la Lacade, 31320 Auzeville-Tolosane

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES
de BORDEAUX AQUITAINE
1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex (1)

M E M O I R E de fin d'études

pour l'obtention du titre

d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

Pyrenean floristic composition modifications under climate change

Picard, Julien

Spécialisation : Management forestier et logistique d'approvisionnement en bois

Étude réalisée au : CNPF, Délégation Occitanie, 7 chemin de la Lacade, 31320 Auzeville-Tolosane

Maître de stage : Emmanuel Rouyer

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon maître de stage Emmanuel Rouyer qui m'a grandement aidé dans les moments les plus difficiles de ce stage par son soutien. Je tiens à le remercier également pour m'avoir fait découvrir différentes facettes de son métier notamment la partie terrain. Je souhaite remercier également Miquel de Caceres et Vicente Jesús Sandoval Altelarrea, correspondants espagnols qui m'ont grandement aidé à réaliser cette étude et à obtenir et traiter les données espagnoles. Côté français, je tiens à remercier Fabienne Benest de l'IGN qui nous a aidé beaucoup pour obtenir les données de la partie française des Pyrénées. Je témoigne aussi ma reconnaissance à Jonathan Lenoir, docteur ingénieur en sciences forestières et chercheur au CNRS qui a pu travailler sur des problématiques semblables et m'a apporté des conseils utiles dans la partie statistique. Je remercie également tous les membres du CRPF Occitanie qui m'ont apporté un soutien moral considérable dans les moments les plus difficiles de ce stage avec une pensée particulière pour Béatrice Castarède, Pascale Immordino et Emmanuelle Mathias. Je salue et remercie également les techniciens Aurélien Colas et Gaspard Bacher et l'ingénieure Flore Giraud forestier pour leur aide, leur écoute et pour m'avoir accompagné sur le terrain.

SOMMAIRE

I- Introduction 1
A- Changement climatique et évolution des niches écologiques 1
B- Présentation de la structure d'accueil : le CRPF Occitanie 1
C- Contexte local du stage : les Pyrénées et le projet Acclimafor 2
D- Objectifs et problématique 3
E- Hypothèses précédant l'analyse 4
II- Matériel et méthode 5
A- Choix des sources de données 5
B- Tri des données 8
1° Dans le temps 8
2° Dans les espèces étudiées 8
3° Dans l'espace 9
4° Tri des variables 9
C- Analyses spatiales et statistiques 10
1° Analyse cartographique 10
2° Etude statistique 10
III- Résultats 12
A- Comparaison cartographique 12
B- Statistiques descriptives et analytiques 14
1° Etude des liens entre espèces et variables environnementales 14
2° Altitude 15
3° Pente 16
4° Exposition 17
5° Longitude 17
6° Latitude 18
C- Régressions logistiques 19
1° Altitude 19
2° Pente, latitude et longitude 21
IV- Discussion 24
A- Déplacements en altitude, pente et exposition 24
B- Déplacements longitudinaux et latitudinaux 27
Références bibliographiques : 30
Annexes : i

Table des illustrations

Figures :

Figure de couverture : Forêts pyrénéennes dans le cirque de Cagataeille (CNPF, Occitanie)
Figure 1: Carte représentant les Pyrénées et les régions avoisinantes (photo aérienne issue de google satellite) 2
Figure 2: Carte de la zone pyrénéenne étudiée, zone montagne retenue par l'OPCC (photo aérienne issue de Google satellite) 2
Figure 3: Logo du projet Acclimafor de l'OPCC (GEIE ForespIr) 3
Figure 4 : Schéma explicatif des placettes IGN françaises (d'après IGN, novembre 2014) 6
Figure 5: : Schéma explicatif des placettes IFN espagnoles (d'après Alberdi et al., 2017) 7
Figure 6 : Placettes de relevés de la campagne 2 sur le territoire d'analyse retenu 9
Figure 7 : Evolution de la répartition du sapin pectiné entre les deux périodes d'analyse 12
Figure 8: Evolution de la répartition du romarin entre les deux périodes d'analyse..... 13
Figure 9 : Plan factoriel 1-2 de l'Analyse en Composantes Principale permettant de voir les liens entre variables environnementales et l'influence sur les espèces 14
Figure 10 : Régression linéaire entre l'altitude et la pente 15
Figure 11 : Boxplots de la répartition altitudinale de deux espèces ayant eu une évolution significative (au seuil de confiance 95%) entre les deux périodes d'inventaires 15
Figure 12: Boxplots de la répartition altitudinale de deux espèces ayant eu une évolution non significative (au seuil de confiance de 95%) entre les deux périodes d'inventaire 16
Figure 13: Boxplots de comparaison de la répartition des pentes sur les deux périodes pour deux espèces : l'épicéa (Picea abies) et la callune (Calluna vulgaris) 16
Figure 14: Répartition du châtaignier (Castanea sativa) et du romarin (Rosmarinus officinalis) en fonction de l'exposition au cours des deux campagnes..... 17
Figure 15: Répartition longitudinale du charme (Carpinus betulus) et du genévrier commun (Juniperus communis) pour les deux périodes considérées 18
Figure 16 : Répartition latitudinale du douglas (Pseudotsuga menziesii) et du charme (Carpinus betulus) pour les deux périodes considérées..... 19
Figure 17 : Modélisation de la répartition altitudinale de l'orme champêtre (à gauche) et du pommier sauvage (à droite)..... 20
Figure 18 : Evolution des optima d'altitude entre les deux campagnes de relevés... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 19 : Modélisation de la répartition latitudinale du chêne sessile (Quercus petraea) et du pin d'Alep (Pinus halepensis) avec une régression logistique..... 22
Figure 20 : Modélisation de la répartition longitudinale du noyer commun (Juglans regia) et de la bourdaine (Frangula alnus) 22
Figure 21 : Carte de la répartition des symptômes et mortalités liés à la sècheresse observée par les correspondants-observateurs du DSF entre juillet 2018 et juillet 2019 26

Tableaux :

Tableau 1: Synthèse des mouvements d'optima d'altitude et de pente pour chaque espèce étudiée. 5
Tableau 2: Explication du codage des valeurs d'exposition 10
Tableau 3: Résumé des évolutions de la distribution des espèces ayant connu un changement significatif 23

Glossaire :

Acclimafor : Projet franco-espagnol et andorran porté par l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique et qui s'intéresse à l'adaptation au changement climatique des forêts Pyrénéennes des
Essence : Espèce ou variété d'arbre poussant en forêt, en plantations ou en haies (*Centre national de ressources textuelles et lexicales*)

Hygrosciaphile : qualifie les espèces végétales préférant les milieux humides et ombragées (ex : le sapin pectinée)

Niche écologique : ensemble de ce qui conditionne l'existence d'une espèce à un endroit donné. Cela comprend donc à la fois des facteurs abiotiques (par exemple les précipitations) et des facteurs biotiques (la présence d'une espèce d'arbre qui conditionne le sous-bois par exemple). La niche écologique correspond ainsi aux conditions environnementales nécessaires à une espèce pour se maintenir et former des populations viables.

Xérophile : qualifie les espèces végétales appréciant les milieux secs

Liste des abréviations :

ACP : Analyse en Composante Principale

CBN : Conservatoire Botanique National

CNPF : Centre National de la Propriété Forestière qui se décline en délégations régionales encore souvent appelés CRPF (Centre Régionaux de la Propriété Forestière)

DSF : Département de la Santé des Forêts

IFN : Inventaire Forestier National en France ou en Espagne (Inventario Forestal Nacional)

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

OPCC : Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique

PDM : Plan de développement de massif

SIG : Système d'Information Géographique

SIVIM : Sistema de Información de la Vegetación Ibérica y Macaronésica (Système d'information de la végétation ibérique et macaronésienne)

I- Introduction

A- Changement climatique et évolution des niches écologiques

Mon stage s'est déroulé à Auzeville-Tolosane près de Toulouse au sein de la délégation Occitanie du CNPF (Centre National de la Propriété Forestière) encore souvent appelé CRPF (Centre Régional de la Propriété Forestière) Occitanie.

Le contexte général de ce stage est celui du changement climatique qui est un enjeu majeur pour la filière forêt-bois et notamment en amont pour les gestionnaires et sylviculteurs. En effet, face à une évolution des conditions climatiques, les essences forestières, et plus largement les écosystèmes forestiers verront se modifier les conditions dans lesquels ils vivent. L'analyse de l'état sanitaire des forêts pyrénéennes tend ainsi à montrer une détérioration de leur état et notamment une augmentation du déficit foliaire ces dernières années (figure 1). Ceci pourra avec le temps compromettre leur maintien dans certaines zones de leur aire de répartition actuelle. Dans le même temps, ces espèces pourront être aptes à coloniser de nouvelles régions dont le climat leur sera devenu favorable.

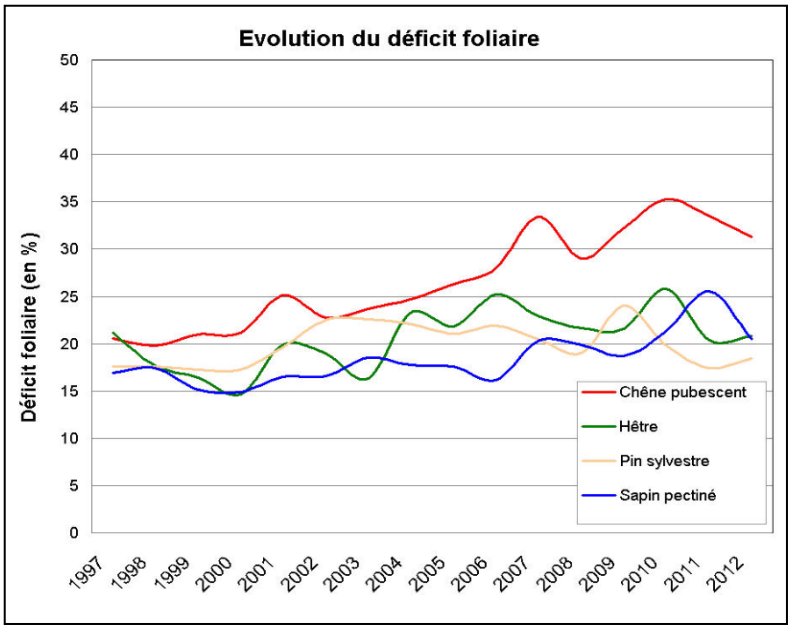


Figure 1 : Evolution du déficit foliaire dans les Pyrénées entre 1997 et 2012 (source : Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique)

La niche écologique d'une espèce peut être définie selon Grinnel (1917) par l'ensemble de ce qui conditionne l'existence d'une espèce à un endroit donné, et comprend donc à la fois des facteurs abiotiques (par exemple les précipitations) et des facteurs biotiques (la présence d'une espèce d'arbre qui conditionne le sous-bois par exemple). Ceci correspond ainsi aux conditions environnementales nécessaires à une espèce pour se maintenir et former des populations viables. De manière générale, le changement climatique peut induire une modification de la distribution spatiale des niches écologiques de la flore forestière. Par conséquent, les aires de répartition des espèces peuvent être surveillées pour anticiper les effets du changement climatique ; ceci est néanmoins conditionné par la capacité de migration des espèces au regard de la rapidité des modifications du climat.

B- Présentation de la structure d'accueil : le CRPF Occitanie

Le CNPF est un acteur important de la gestion forestière qui intervient en forêts privées ; il s'agit d'un établissement public qui travaille pour développer une gestion durable des forêts privées et la valorisation de leurs produits. Diverses actions sont menées pour favoriser cette gestion des forêts privées. Un certain nombre est directement en lien avec les propriétaires (par exemple agrément des plans de gestion, conseils techniques et juridiques, formations). Les autres actions menées par le CNPF

sont plus globales et liées aux enjeux de la filière ; par exemple l'implication dans le DSF (Département de la Santé des Forêts), dans des projets régionaux tels que des chartes forestières, plan de développement de massif (PDM) ou encore dans des projets de recherche et développement.

L'adaptation de la gestion forestière au changement climatique intéresse donc particulièrement le CNPF pour adapter les conseils et recommandations dans le choix des essences et des itinéraires sylvicoles aux évolutions climatiques. Pour ces raisons, le CNPF s'implique dans différents projets afin d'affiner ses connaissances et préconisations à apporter aux propriétaires visant à mieux connaître les exigences des essences et étudier les effets du changement climatique sur les écosystèmes forestiers afin d'adapter la gestion forestière.

C- Contexte local du stage : les Pyrénées et le projet Acclimafor

Le stage s'inscrit dans un projet européen, le projet Acclimafor (Adaptation au Changement Climatique des Forêts des Pyrénées) qui s'intéresse ainsi aux écosystèmes forestiers pyrénéens et à leur adaptation vis-à-vis du changement climatique. Acclimafor fait suite à la création de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC) en 2011. Ce dernier travaille aujourd'hui sur plusieurs projets liés à l'étude du changement climatique et Acclimafor en est le volet forestier.

Les Pyrénées constituent une chaîne de montagne entre la France, l'Espagne et l'Andorre dont les altitudes vont jusqu'à un peu plus de 3000 mètres. Dans ce stage, la zone étudiée sera l'ensemble de la chaîne montagneuse ; on s'intéressera aussi bien aux zones de haute montagne qu'au piémont. Le périmètre retenu est la zone montagne retenue par l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC) (figure 2).

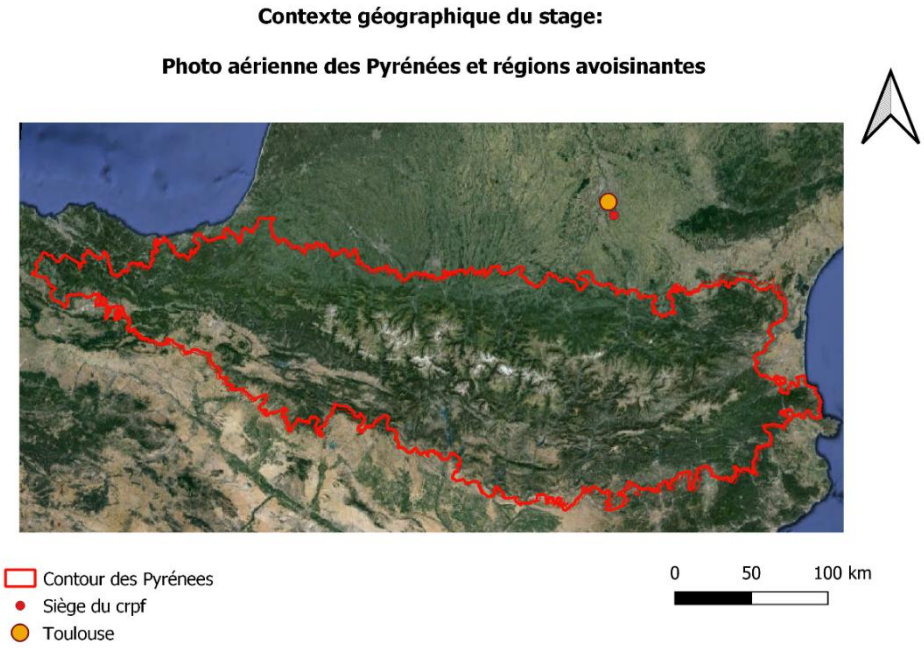


Figure 2: Carte de la zone pyrénéenne étudiée, zone montagne retenue par l'OPCC (photo aérienne issue de Google satellite)

Les Pyrénées forment un massif étalé avec des variations importantes (figure 2). Outre les variations d'altitude entre les sommets et le fond des vallons, il existe des écarts climatiques notables entre l'est méditerranéen et l'ouest sous influence atlantique. Cette hétérogénéité géographique entraîne ainsi une diversité d'écosystèmes qui complexifie l'étude de l'évolution de la flore sous l'influence du changement climatique. La surface totale considérée dans le cadre de ce travail (entourée en rouge) est de 5 050 700 hectares.

En outre, les zones de montagne constituent des milieux particuliers notamment au regard des évolutions climatiques en cours. Elles peuvent être considérées comme particulièrement sensibles au changement climatique avec un risque de perte d'espèces plus élevé (pouvant avoisiner les 60% d'ici 2080 en Europe) (Thuiller et al., 2005). Les zones de montagne sont ainsi considérées comme les « sentinelles des effets du changement climatique » par le comité français de l'Union Internationale de la Conservation de la Nature (UICN, 2005). Néanmoins, les montagnes constituent également des milieux complexes et très hétérogènes ; cela peut favoriser, d'une part, l'existence de microclimats tamponnant les effets du changement climatique (Lenoir et al., 2013) et donc les migrations d'espèces entre des milieux différents (Ackerly et al., 2010). D'autre part cela peut favoriser la diversité génétique qui permet une plus grande adaptation aux modifications des conditions environnementales (Rosenzweig, 1995; Vellend & Geber, 2005).

Dans ce contexte local, la délégation Occitanie du CNPF s'implique dans l'adaptation face changement climatique via le projet Acclimafor dont fait partie ce stage. Le projet réunit de nombreux acteurs transfrontaliers. Acclimafor fait en effet partie des différents projets du programme européen de coopération transfrontalière Interreg POCTEFA. Le but de ce programme est de promouvoir le développement durable et la coopération des territoires frontaliers de la France, d'Espagne et d'Andorre en soutenant financièrement différentes initiatives telles que le projet Acclimafor. Les acteurs du projet sont acteurs des forêts privées ou publiques. Tous sont coordonnés par le Groupement Européen d'Intérêt Economique (GEIE) Forespir.

Figure 3: Logo du projet Acclimafor de l'OPCC (GEIE Forespir)

D- Objectifs et problématique

Le projet Acclimafor vise à acquérir des connaissances concernant l'impact du changement climatique sur les écosystèmes forestiers et la résilience et l'adaptation de ces derniers dans le but d'adapter efficacement la sylviculture. Ainsi trois axes sont étudiés dans le cadre de ce projet :

- La phénologie avec des études de débourrement d'espèces représentatives des Pyrénées
- L'état sanitaire et les dépérissements avec une analyse des données du réseau européen depuis une vingtaine d'années (évolution du déficit foliaire de quelques espèces visible en figure 1)
- L'évolution de la flore et donc des aires de répartition des espèces forestières

Nous nous intéresserons dans ce stage principalement au dernier axe du projet à savoir l'étude de l'évolution de la distribution des espèces. Par rapport aux deux autres axes d'étude, cette évolution ne devrait apparaître que sur le long-terme ; il s'agit ici d'analyser des données d'inventaires floristiques couvrant un laps de temps assez long (allant du début des années 1980 jusqu'à 2020) pour observer d'éventuelles évolutions comme cela a pu déjà être le cas pour le déficit foliaire par exemple (figure 1). Les données s'étalent sur un grand nombre d'années et recouvrent l'ensemble de la chaîne pyrénéenne (avec toute sa diversité d'altitudes et de climats). Le travail de ce stage consiste donc principalement à les regrouper, trier et les analyser pour étudier les évolutions temporelles et spatiales des aires de répartition des espèces forestières.

Nous étudierons ainsi si la flore pyrénéenne a connu une évolution spatiale en s'intéressant particulièrement aux trois axes suivants :

1° Voir s'il y a bien eu des évolutions des aires de répartition au cours du temps en comparant deux périodes de relevés.
2° Comparer les éventuelles évolutions selon la situation géographique
   i. Côté nord français ou sud espagnol
   ii. Domaine méditerranéen vs domaine atlantique
   iii. Forêts de haute altitude vs forêts du piémont
3° Chercher d'éventuels liens entre variables environnementales et intensité des changements (altitude, exposition, pente, latitude et longitude seront les variables considérées en priorité).

E- Hypothèses précédant l'analyse

Bien que le changement climatique, et plus encore ses effets sur les écosystèmes, nous paraissent assez difficiles à prédire, nous avions tout de même quelques hypothèses avant d'analyser nos données. Ainsi pour l'altitude, l'hypothèse que nous avons formée avant de réaliser les analyses est que les espèces montent en altitude sous l'effet du changement climatique. Pour la longitude, nous supposons que les espèces (en particulier les plus hygrophiles) ont tendance à se déplacer vers l'ouest moins méditerranéen et donc moins chaud et sec. Pour la latitude beaucoup d'espèces pourraient se déplacer vers le « centre » des montagnes où les altitudes sont plus élevées ; ceci correspondrait donc à un mouvement vers le sud côté français et vers le nord côté espagnol ; le mouvement global devrait donc varier selon les espèces mais nous nous attendons plutôt à une dominance de migrations vers le nord. En termes d'exposition, nous nous attendons à avoir plus d'expositions fraîches (nord et est) et moins de chaudes (sud et ouest).

Toutes ces suppositions devraient s'observer essentiellement pour les espèces d'affinité plus montagnarde (ou appréciant plus la fraîcheur et/ou l'humidité). Pour les espèces de plus basse altitude, on peut supposer aussi que certaines auront tendance à coloniser des altitudes plus hautes et donc à avoir des moyennes altitudinales plus élevées. Enfin, les espèces xérophiles devraient elles aussi avoir tendance à étendre leur aire de répartition. Du fait de l'augmentation des surfaces connaissant des conditions climatiques chaudes et sèches, ces espèces devraient pouvoir coloniser de nouveaux territoires sans nécessairement disparaître d'autres zones (cela devrait dépendre notamment de leur tolérance à la sécheresse).

De manière générale, nous supposons donc une réduction des espèces plus hygrosciaphiles vers la haute montagne et les zones plus fraîches (les expositions Nord et Est et le domaine océanique à l'ouest) et une extension (ou un déplacement) de l'aire des espèces plutôt xérophiles vers des zones jusqu'ici considérées plus fraîches et humides donc plus en altitude, vers des expositions plus fraîches et plus vers l'ouest (domaine océanique).

Enfin, la variable pente a été testée également mais s'avère plus difficile à prédire. La pente n'est pas nécessairement un paramètre auquel on pense en premier lieu parmi ceux qui peuvent moduler les effets du changement climatique. On peut supposer avant toute analyse que cette variable est assez liée à l'altitude ; les pentes pourraient être plus importantes en altitude sans forcément que les deux variables soient liées linéairement (une augmentation de la pente proportionnelle à l'altitude n'est pas supposée ici). Par ailleurs, la pente est nécessaire pour avoir une exposition, cependant nous ne

supposons pas de lien particulier entre exposition et pente. Enfin, la pente peut jouer sur l'engorgement en le réduisant, et plus globalement l'alimentation en eau du sol ; ce dernier dépend néanmoins de la pente en amont et en aval du point considéré et ne peut donc être déterminé uniquement en étudiant la valeur de pente du point de relevé de l'inventaire. Cette variable pourrait avoir une influence dans la mesure où la profondeur du sol diminue avec la pente. La réserve utile est donc en général moins importante sur les sols pentus, il se pourrait donc que les espèces plus hygrophiles se déplacent vers des pentes moins élevées.

II- Matériel et méthode

Pour répondre à la problématique énoncée plus haut concernant l'évolution de la flore pyrénéenne, nous utiliserons un nombre de données importantes issues d'inventaires floristiques. Ces données vont devoir être regroupées, triées, et compilées en vue d'être analysées à l'aide de SIG (Système d'Information Géographique) et de statistiques (sous le logiciel R). Nous présentons donc ici les choix que nous avons effectués pour la méthode de regroupement, le tri et l'analyse des données.

A- Choix des sources de données

Les données disponibles proviennent de cinq sources différentes.

Tableau n°1 : Récapitulatif des différentes bases de données utilisables et de leurs caractéristiques principales

Base IGN	Base IFN	Base SIVIM	Base SOPHY	Base du CBN
France	Espagne	Espagne	France	France
Echantillonnage systématique	Echantillonnage systématique	Echantillonnage non systématique	Echantillonnage non systématique	Echantillonnage non systématique
Relevé de toute la flore	Relevé des ligneux seuls	Relevé opportuniste d'une espèce (herbacée ou ligneuse)	Relevé opportuniste d'une espèce (herbacée ou ligneuse)	Relevé ponctuel d'une espèce (herbacée ou ligneuse)
Echantillonnage semi-permanent	Echantillonnage permanent	Non permanent	Non permanent	Non permanent
Placettes de 25m de rayon	Placettes de 25m de rayon	Relevé ponctuel	Relevé ponctuel	Relevé ponctuel
Retenue	**Retenue**	Non retenue	Non retenue	Non retenue

Les points importants qui diffèrent de la base IGN française (1ère colonne) ont été marqués en rouge

La base SOPHY et celle du Conservatoire Botanique National (CBN) en France ainsi que la base SIVIM côté espagnol bien qu'intéressantes diffèrent trop des données de l'IGN (côté français) et de l'IFN (côté espagnol). En effet, les données annexes sur l'écologie des placettes sont plus restreintes voire inexistantes dans ces trois bases. Or ces données sont utiles pour expliquer la répartition de la flore. A ceci, il faut ajouter l'échantillonnage non systématique et opportuniste des placettes de ces trois bases qui ne permet pas de disposer de données d'absence mais seulement de présence des espèces.

Aussi, après discussion et réflexion avec les partenaires du projet, nous avons décidé de garder dans cette étude uniquement les bases IGN française et IFN espagnole pour notre travail. Ces dernières

présentent un certain nombre de points communs mais aussi quelques différences que nous avons dû prendre en compte dans notre étude.

- L'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière), anciennement IFN (Inventaire Forestier National devenu IGN depuis sa fusion avec l'institut géographique national en 2012) a fourni des données pour la partie française des Pyrénées. Ces données ont été obtenues à partir d'un échantillonnage de placettes semi-permanentes de 25 mètres de rayon.
  Aux alentours de 7000 placettes sont inventoriées chaque année, ce qui forme un échantillonnage « complet » du territoire national tous les 5 ans. Au bout de ces 5 ans, d'autres placettes sont étudiées et certaines sont revisitées pour étudier l'accroissement des arbres (Dalmasso et al., 2014). Les placettes étudiées changent donc au cours du temps et sont qualifiées de semi-permanentes.
  Sur les placettes, les espèces présentes sont relevées (en plus d'autres données) ce qui nous fournit finalement un relevé dit en présence/absence. Les relevés s'effectuent en toutes saisons avec une répartition équitable entre départements. Cependant, pour les zones montagneuses (qui nous concernent en grande partie ici), les relevés ne se font qu'en saison de végétation.
  Avant 2005, le relevé des espèces était le même mais l'organisation des campagnes de relevés se faisait différemment : chaque année était consacrée à un certain nombre de département. Il fallait donc nécessairement plusieurs années d'inventaire pour couvrir tous les départements qui nous intéressent dans notre étude.
  Les arbres et arbustes sont recensés ; cependant seuls les arbres de plus de 7,5cm de diamètre (à 1,30m de hauteur) sont considérés « recensables » (ou « précomptables ») et donc inventoriés et mesurés sur une placette de 25m de rayon alors que l'espèce des arbustes ou arbres « non recensables » présents ainsi que des herbacées sont notées sur une placette de 15m de rayon.

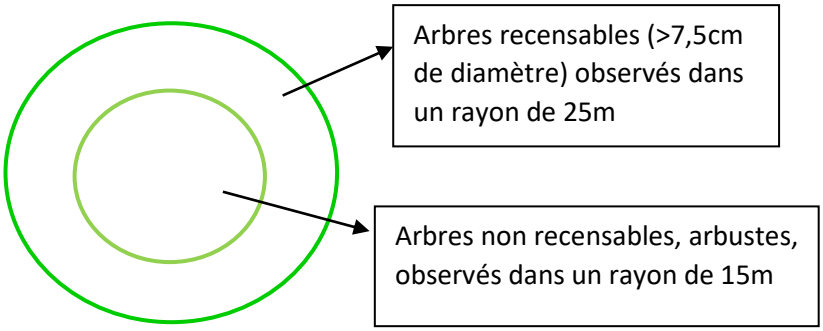


Figure 4 : Schéma explicatif des placettes IGN françaises (d'après IGN, novembre 2014)

- L'IFN (Inventario Forestal Naçional) espagnol est l'équivalent de l'IGN français. Sa méthode est à peu près semblable dans la mesure où il étudie des placettes de 25m de rayon sur un découpage territorial en carrés de 1km². Celles-ci sont cependant permanentes alors qu'elles évoluent ainsi entre différentes campagnes d'inventaire en France. L'autre différence principale réside dans le fait que seuls les ligneux (arbres et arbustes) sont inventoriés. En outre, si les placettes sont de même taille que pour l'IGN français (25m de rayon) le protocole visant à inventorier les arbres diffère de quelques peu. Ainsi seuls les plus gros arbres, dont le diamètre à 1,30m est supérieur ou égal à 42,5cm, sont relevés sur cette surface. Ensuite dans un cercle de 15 mètres de rayon, ceux dont le diamètre à 1,30m est supérieur ou égal à 22,5cm est relevé, puis dans un cercle de 10m de rayons ce sont ceux dont le diamètre est supérieur ou égal à 12,5cm enfin tous les autres dont le diamètre est supérieur à 2,5cm sont relevés dans un cercle de 5 mètres de rayon.

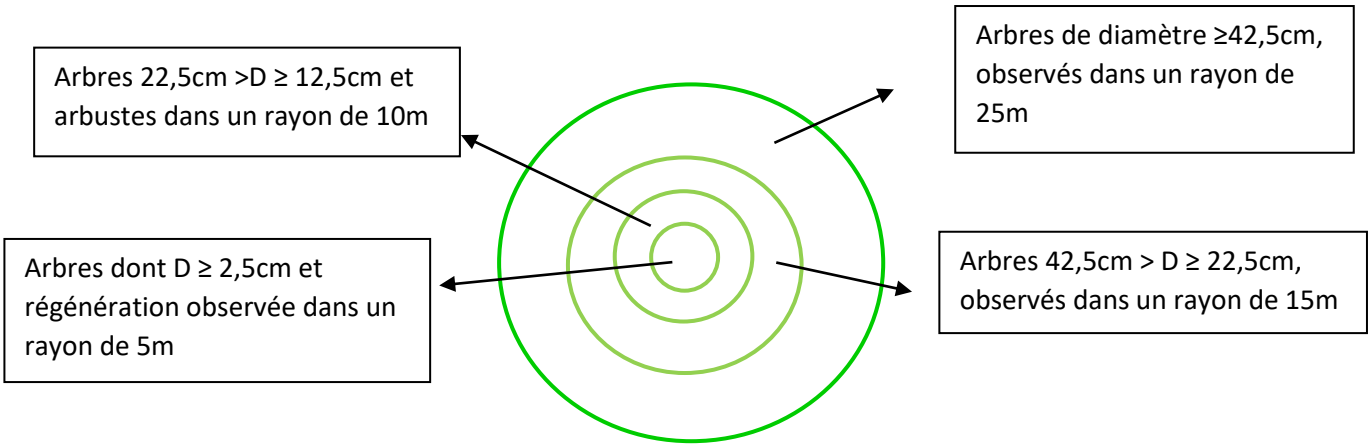


Figure 5: : Schéma explicatif des placettes IFN espagnoles (d'après Alberdi et al., 2017)

Les deux protocoles d'observation IGN et IFN sont donc comparables par l'organisation des relevés (cercles de 25m de rayon sur des carrés de 1km²) et par l'échantillonnage effectué en présence/absence mais diffèrent par plusieurs autres points comme nous avons pu le voir. Parmi les différences, nous pouvons ainsi noter que le protocole espagnol ne relève que les ligneux (arbres et arbustes) alors que le français relève en plus les herbacées. Si les herbacées peuvent se déplacer plus rapidement face aux évolutions climatiques, et sont plus révélatrices des conditions du milieu car en général moins impactées par la sylviculture, leur utilisation nous contraindrait à ne travailler que sur la partie française mais nous ferait perdre la dimension transfrontalière du projet qui nous semble particulièrement intéressante. En outre, les herbacées ne sont observables souvent qu'une partie de l'année et peuvent donc être manquées sur certaines placettes en cas de passage à une mauvaise période (en hiver ou trop tôt au printemps par exemple). Même si cet élément est plutôt pris en compte dans les inventaires de l'IGN nous avons décidé de ne considérer que les ligneux afin de pouvoir ajouter les données espagnoles à notre étude et réaliser celle-ci sur l'ensemble des Pyrénées. Enfin, il existe un risque d'erreur d'identification plus fort chez les herbacées ; notre sélection de ligneux limite donc les mauvaises déterminations.

L'autre différence importante qui existe entre les deux protocoles est la durée d'utilisation des placettes : alors que les placettes espagnoles sont permanentes celles de l'inventaire français sont semi-permanentes. Le fait d'avoir des placettes permanentes côté espagnol nous soumet davantage au vieillissement des forêts de ces placettes qu'avec des placettes qui évoluent (Bodin et al., 2013). En effet avec des placettes temporaires comme dans l'inventaire français, si une placette n'est pas exploitée alors que le zones forestières alentours le sont, on n'observera pas un phénomène de vieillissement du à la particularités de la placette non exploitée. L'utilisation de placettes permanentes peut entraîner une certaine modification de la flore au cours du temps. La limitation aux espèces arborées et arbustives limite ce risque d'évolution de la flore, néanmoins comme les temps étudiés sont relativement longs, il est possible que la maturation des forêts entraîne des modifications dans les espèces des placettes étudiées. Avec des placettes qui évoluent, même si le vieillissement global des forêts pyrénéennes impacte aussi nos résultats, nous sommes moins dépendants du vieillissement dû à certaines placettes particulières. Malgré cette petite différence, nous utiliserons ces données espagnoles en gardant à l'esprit que le vieillissement des forêts peut avoir un impact sur nos résultats du côté espagnol.

Concernant l'Andorre qui se trouve au milieu de notre zone d'étude, nous n'avons pas réussi à obtenir de données d'inventaire comparables avec les données des inventaires espagnol et français. Nous avons donc dû laisser cette zone des Pyrénées de côté et ne pas l'intégrer dans notre analyse. La partie andorrane des Pyrénées ne sera donc pas prise en compte dans notre analyse de la végétation.

B- Tri des données

1° Dans le temps

Comme nous nous intéressons dans ce projet à l'évolution des espèces en fonction du temps, nous allons comparer deux périodes qui couvrent les relevés floristiques dont nous disposons. Nous avons donc choisi de comparer les relevés effectués avant 2002 avec ceux effectués après 2005. D'une part car 2003 constitue une année où les températures ont été particulièrement élevées (avec une canicule importante en été) et d'autre part parce que les données françaises dont nous disposons pour les relevés floristiques marquent une coupure et un changement dans l'organisation des campagnes de relevés entre 2001 et 2005. Côté espagnol, nous disposons de trois inventaires ; le troisième compris entre 1997 et 2007 ne sera finalement pas conservé car il couvre, en partie, le laps de temps (2001-2005) que nous avons choisie comme limite entre les deux périodes d'inventaire comparées. Pour l'Espagne, nous comparerons donc les données du 2ème inventaire (1985-1996) à celles du 4ème inventaire (2006-2019). Ces deux périodes sont assez espacées et pourraient nous permettre de voir plus de différences que du côté français où l'écart entre les deux périodes relativement court risque de limiter la possibilité d'observer des évolutions importantes. Le choix de ces deux périodes de relevés nous permet également de comparer un nombre d'années équivalent entre les deux périodes afin de limiter les biais qui pourraient éventuellement être induits.

2° Dans les espèces étudiées

Nous avons dû nous limiter tout d'abord aux espèces ligneuses car les herbacées ne sont pas inventoriées du côté espagnol (cf A-choix des sources de données). Le nombre d'espèces que nous pouvions utiliser s'est donc trouvé réduit par rapport à l'ensemble des espèces existant côté français. Par la suite, en traitant les données des inventaires forestiers (et principalement de l'inventaire espagnol) il est apparu qu'un certain nombre d'espèces n'était pas inventorié de la même façon au cours des deux inventaires. Pour l'inventaire espagnol n°2 principalement, seuls les noms de genre étaient parfois renseignés ce qui ne permettait pas une comparaison adéquate. Par exemple, pour les aubépines aucune distinction n'est faite entre l'aubépine monogyne (*Crataegus monogyna*) et l'aubépine lisse (*Crataegus laevigata*) dans la deuxième campagne de l'inventaire forestier espagnol (IFN 2) alors que la distinction est faite dans la quatrième campagne (IFN 4). Nous avons donc décidé de nous intéresser uniquement aux espèces ayant été identifiées avec la même précision dans les deux campagnes (ancienne et nouvelle) d'un inventaire. Ceci entraîne encore une réduction importante du nombre d'espèces étudiées. Enfin, parmi les espèces ligneuses inventoriées correctement et avec la même précision dans les deux campagnes nous n'avons gardé que celles qui présentaient un minimum de quarante occurrences (par période sur l'ensemble des territoires donc France et Espagne réunis). Ce un seuil minimal a été choisi en faisant un compromis entre la robustesse des résultats obtenus, ce qui nécessite suffisamment d'occurrences pour une meilleure validité des régressions logistiques (Coudun et Gégout, 2006) et le nombre d'espèces pouvant être étudiées. Or ce dernier est grandement restreint par rapport à ce que nous prévoyions. Néanmoins, ceci permet alléger les traitements et simplifier quelques peu l'étude. Quarante-six espèces (liste des espèces dans le récapitulatif du tableau

n°3, page 23) seulement sont donc considérées. Toutes ces restrictions réduisent certes la taille de notre jeu de données déjà limité aux ligneux mais nous évite de mauvaises interprétations en garantissant la bonne reconnaissance des espèces.

3° Dans l'espace

Par ailleurs, toujours dans un souci de bonne comparaison de la distribution des espèces, nous avons voulu comparer la répartition des espèces au cours du temps en étudiant un même territoire. Or pour le quatrième inventaire forestier national espagnol (IFN 4), certaines provinces n'ont pas encore eu de résultats publiés. Ces provinces (dans les Pyrénées : l'Aragon) ne seront donc pas étudiées afin de considérer l'évolution des espèces sur un même territoire et ne pas entraîner de biais. La région étudiée concerne donc l'ensemble des forêts des Pyrénées françaises, et des Pyrénées espagnoles excepté l'Aragon (voir figure 6).

Figure 6 : Placettes de relevés de la campagne 2 sur le territoire d'analyse retenu

4° Tri des variables

Nous avons choisi de nous intéresser à cinq variables qui impactent la répartition des végétaux. En premier, l'altitude précise au mètre a été choisie, ensuite la pente (en %), la longitude et la latitude (en km) et enfin l'exposition. La variable exposition dont nous disposions est un angle en grades. Nous avons choisi de la mettre en classes. Le codage n'est en effet pas très explicite aux non-initiés ; par ailleurs les valeurs moyennes obtenues ne donnent pas vraiment une idée de l'exposition dominante.

Nous avons donc recodé la variable en créant les classes suivantes (tableau 2) :

Tableau n° 2 : Explication du recodage des valeurs d'exposition du plus frais au plus chaud et sec

Code d'exposition	Intervalles de valeurs (en grades)	Point cardinal correspondant
1	0 à 50 et 351 à 400 grades	Nord
2	51 à 150 grades	Est
3	251 à 350 grades	Ouest
4	150 à 250 grades	Sud

C- Analyses spatiales et statistiques

1° Analyse cartographique

A partir des données triées, une première analyse descriptive est réalisée à l'aide de SIG (Systèmes d'information géographique). Tout d'abord, nous souhaitons observer géographiquement (à l'aide du logiciel de SIG QGIS), la position des espèces entre les deux périodes d'inventaire comparées. Le but est de rechercher les premières grandes tendances.

2° Etude statistique

Après cette première approche spatiale, une étude statistique est menée avec le logiciel R :

- Tout d'abord, une ACP (Analyse en Composantes Principales) est réalisée avec un cercle des corrélations sur les différentes variables environnementales étudiées (altitude, exposition, latitude(y), longitude(x) et pente) afin de visualiser les liens qu'il peut y avoir entre ces variables ainsi que le poids des différentes variables sur les essences étudiées. Pour les variables qui semblent pouvoir être corrélées, nous prévoyons de faire une régression afin de tester cette hypothèse de corrélation entre variables.

- Ensuite, des diagrammes en boîte (ou boxplots) donnant la répartition des espèces en fonction de l'altitude, de la longitude et de la latitude ainsi que des diagrammes en barres en fonction de l'exposition sont réalisés pour chaque période d'inventaire. Deux diagrammes sont donc réalisés pour chacune des espèces ayant des données pour chaque période et chaque pays où elles sont présentes. Ceci a pour but d'observer avec un peu plus de précision les éventuelles tendances de migrations d'espèces et de voir selon quelle(s) variables elles ont lieu pour aller au-delà de la simple observation géographique vue précédemment.

- Pour aller encore plus loin et tester la significativité des écarts que l'on peut observer entre les deux périodes avec les diagrammes, nous réalisons pour les variables quantitatives des tests de comparaison de moyenne non paramétriques (tests de Wilcoxon Mann-whitney) car les données sont hétérogènes et ne respectent pas les conditions nécessaires à la réalisation d'un test paramétrique (homoscédasticité et normalité des résidus). Ceci est effectué pour les altitudes, longitudes et latitudes ainsi que pour les pentes en retenant un seuil de confiance de 95%. Pour la pente, il faut noter que certaines placettes n'ont pas de données car la pente est inférieure à 5% ou car la situation topographique est complexe (topographie hétérogène, anciennes

terrasses, talus ou micro-versant < 50m de long…) (Dalmasso & Drapier, 2019). Pour l'exposition qui est une variable qualitative, nous calculons la proportion de chaque exposition avec des intervalles de confiance à 95% et réalisons des diagrammes en barres (barplots). Pour aller plus loin, des intervalles de confiance sur la proportion de chaque orientation sont réalisées et ajoutées au graphique. Ceci nous permet d'avoir graphiquement une idée de la significativité des écarts observés.

- Enfin, une modélisation par régression de type logistique est effectuée. Cette dernière méthode permettra encore une fois de comparer la répartition d'une espèce vis-à-vis d'un facteur quantitatif entre deux périodes. Cependant, la représentation est différente car on travaille avec des probabilités de présence. De plus, cela permet de calculer des optima de présence des espèces pour chaque période et de les comparer afin d'étudier l'importance des évolutions d'optimum comme cela a pu être fait dans des études antérieures sur d'autres territoires (Bodin et al., 2013 ; Lenoir, 2008). Cette dernière analyse a été réalisée également avec le logiciel R. Plutôt qu'une régression logistique simple, c'est une régression logistique quadratique (qui consiste à trouver une relation polynomiale de degré 2) qui a été utilisée. Les deux modèles (degré 1 et degré 2) ont néanmoins été testés mais il apparait clairement que le modèle polynomial est plus adapté pour modéliser une croissance et décroissance autour d'un optimum. Malgré tout, nous avons également tester les deux modèles afin de voir lequel est le plus pertinent avec une anova qui nous a conduit à choisir le modèle polynomial.
  Le but est de pouvoir représenter la variation de la répartition des espèces avec un pic au niveau des valeurs pour lesquelles la probabilité de présence est maximale ; ceci est justement permis par une régression logistique polynomiale de degré 2 quelle que soit la position de cette valeur de probabilité maximale. La fonction logistique simple est, elle, strictement croissante ou décroissante et ne pourra modéliser un maximum avec des valeurs moyennes comme nous en avons avec nos variables (altitude, longitude, latitude et pente) (L. Bombrun et J. Lenoir communications personnelles ; Coudun & Gégout, 2006). Les régressions ont ainsi été effectuées pour trouver des optima d'altitude de différentes espèces puis testées pour les autres variables quantitatives auxquelles nous nous sommes intéréssées ensuite (longitude, latitude et pente).
  Enfin, pour avoir une vision globale des mouvements d'espèces vis-à-vis de l'altitude, un graphique représentant la position altitudinale optimale de chaque espèce lors de la campagne la plus récente en fonction de sa position altitudinale lors de l'ancienne période a été réalisé.

III- Résultats

A- Comparaison cartographique

L'analyse cartographique de la répartition des espèces montre peu d'évolutions visibles. L'intérêt d'une telle observation était de voir d'éventuels déplacements en longitude et latitude (voire également en altitude).

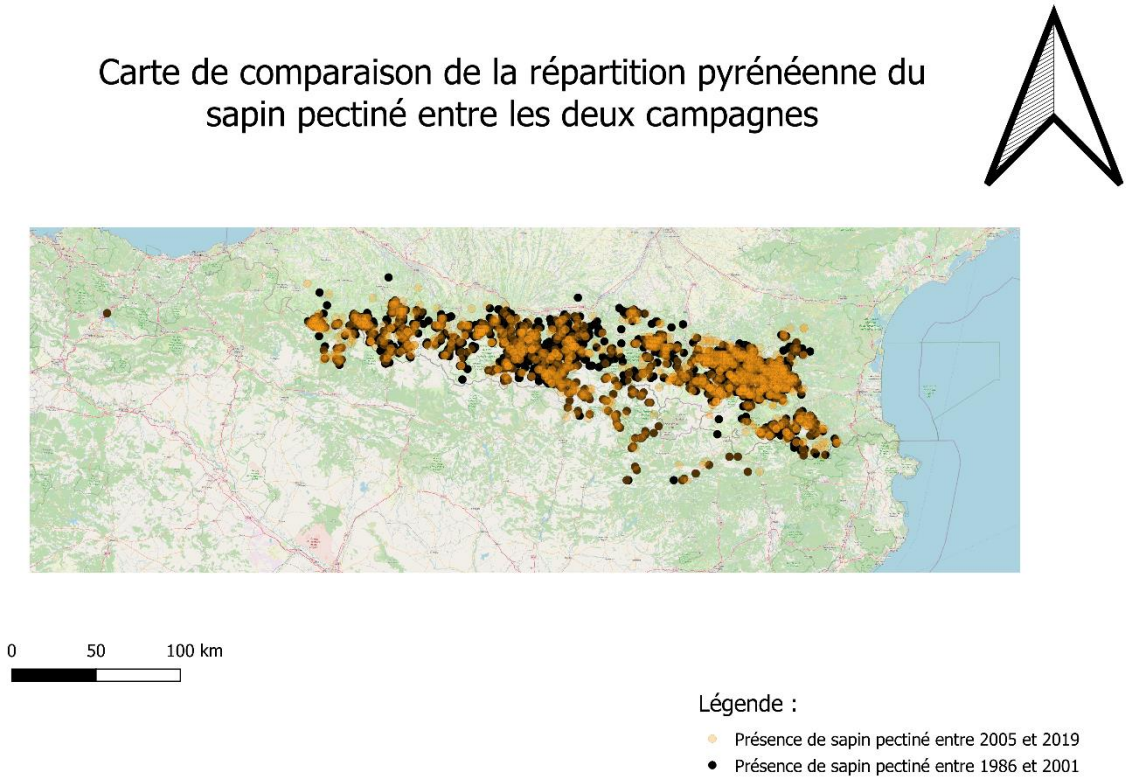


Figure 7 : Evolution de la répartition du sapin pectiné entre les deux périodes d'analyse

Ainsi si l'on prend l'exemple du sapin pectiné (*Abies alba)* qui est une essence hygrosciaphile, on n'observe pas de franche différence de répartition (figure 7). Côté espagnol les placettes sont permanentes du fait du protocole d'inventaire ; il y a donc beaucoup de recouvrements . Côté français, seuls quelques points orange (donc de la campagne récente) apparaissent légèrement plus éloignés de la partie plus montagneuse des Pyrénées (notamment au nord-ouest et au nord-est) mais de manière générale cette observation ne montre pas de tendance flagrante.

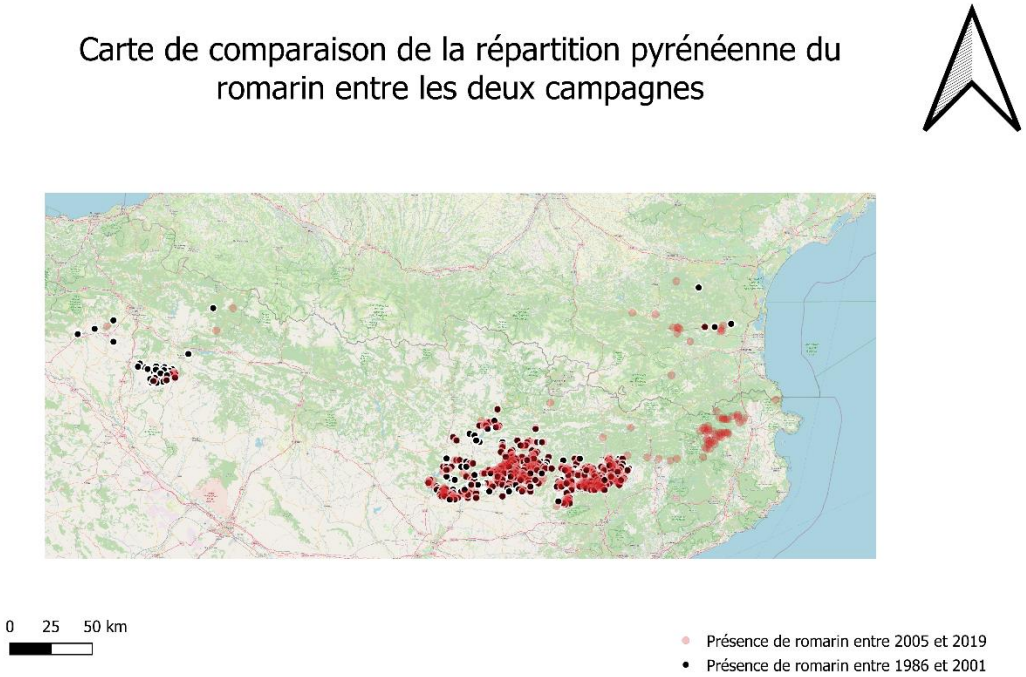


Figure 8: Evolution de la répartition du romarin entre les deux périodes d'analyse

Le romarin (*Rosmarinus officinalis*) est une espèce plutôt xérophile. On n'observe pas non plus de grand changement de répartition pour cette espèce (figure 8).

Malgré tout, nous pouvons noter la disparition de certains points à l'est (dans les zones les plus méditerranéennes et l'apparition de points à l'ouest (côté espagnol) dans des régions un peu plus océaniques et à priori plus arrosées.

B- Statistiques descriptives et analytiques

1° Etude des liens entre espèces et variables environnementales

Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée pour voir globalement quelle(s) variable(s) affecte(nt) plus quelles espèces et quels liens peuvent exister entre les variables.

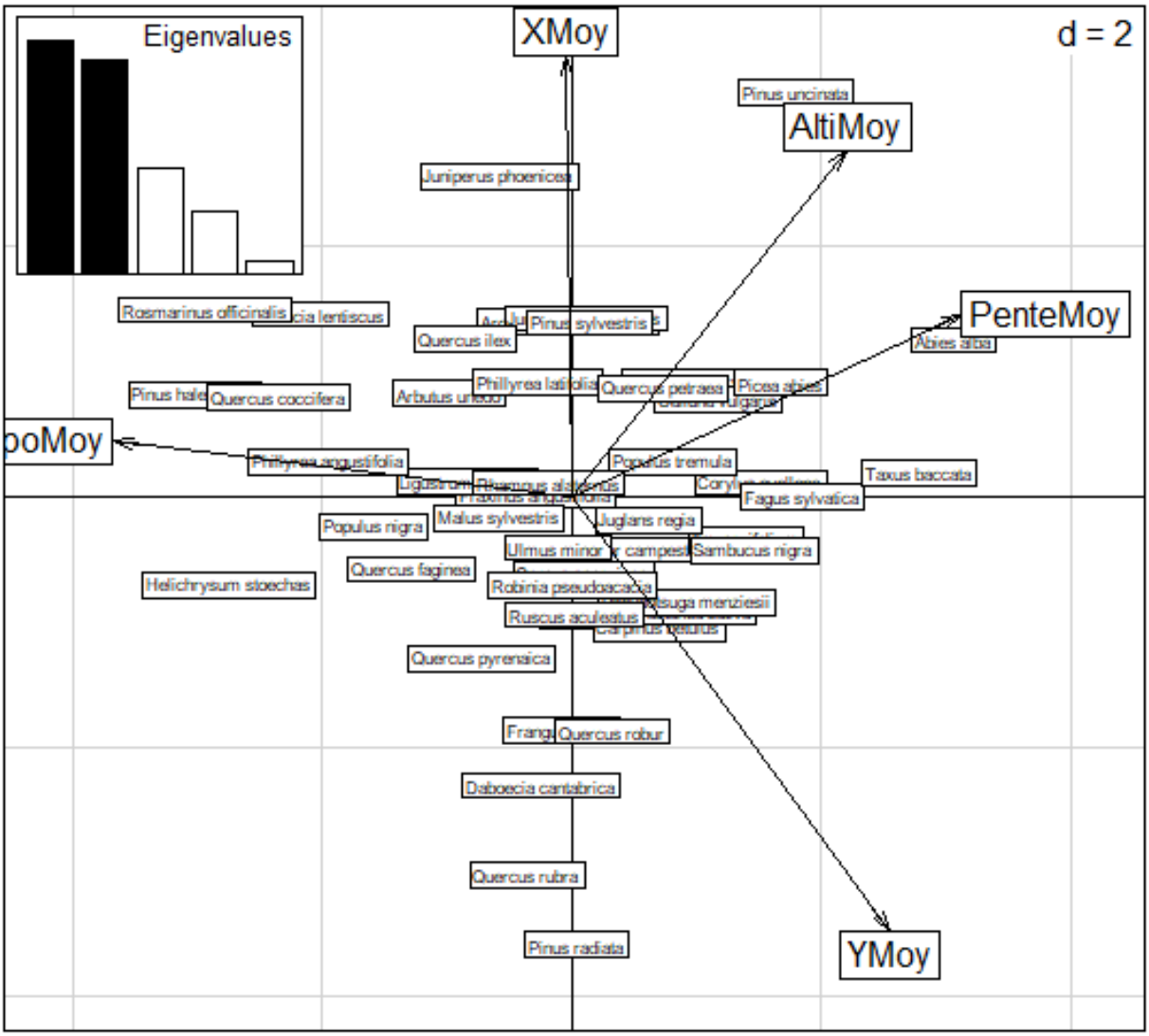


Figure 9 : Plan factoriel 1-2 de l'Analyse en Composantes Principale permettant de voir les liens entre variables environnementales et l'influence sur les espèces

<u>Variables</u> : XMoy : Longitude moyenne, YMoy : Latitude moyenne, AltiMoy : Altitude moyenne, PenteMoy : Pente moyenne, ExpoMoy (à gauche) : Moyenne de la classe d'exposition

On constate sur l'ACP (figure 9) que les variables environnementales n'ont pas vraiment de relations entre elles. Ainsi la pente apparaît plutôt décorrélée de la latitude Y et assez peu corrélée à la longitude X. L'exposition ne semble être vraiment corrélée à aucune variable également. Seules la pente et l'altitude ont des droites assez proches mais pas assez pour parler de corrélation. Une régression a en effet été réalisée pour chercher une éventuelle relation entre ces deux variables (figure 10).

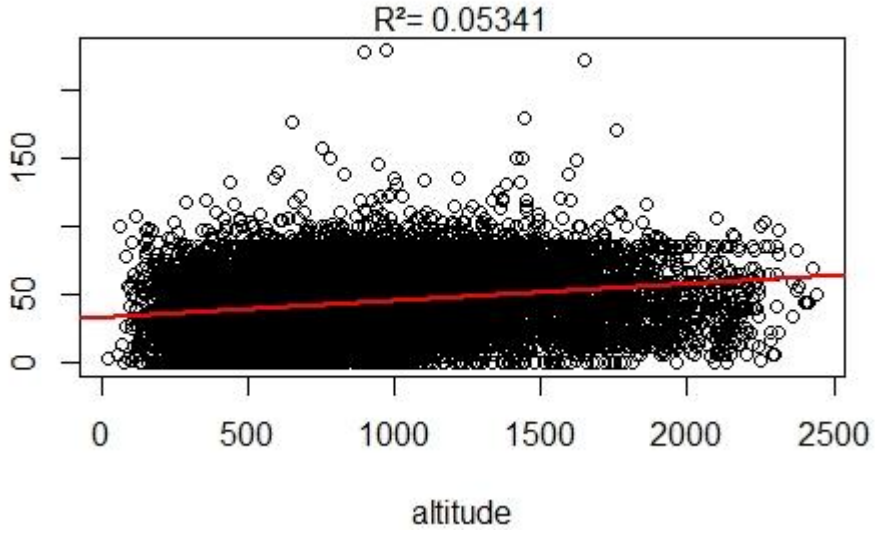


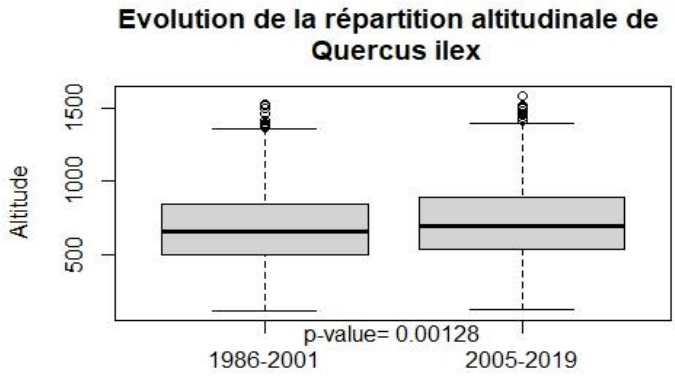
Figure 10 : Régression linéaire entre l'altitude et la pente

Le modèle ne convient pas ; en effet le coefficient de détermination est proche de 0 (R^2=0,05341) et il n'y a pas de normalité des résidus d'observée. La pente n'augmente donc pas linéairement avec l'altitude.

L'intérêt de l'ACP apparaît surtout dans la mesure où elle montre quelles variables impactent fortement la distribution de quelles espèces. Par exemple, on voit que *Pinus radiata* est fortement influencé (négativement) par la longitude X ou encore *Pinus uncinata* est corrélé positivement à l'altitude (fortement) et à la longitude (plus légèrement).

2° Altitude

Les boxplots permettent d'observer plus franchement (qu'une simple observation géographique, cf paragraphe III-A) des écarts entre les deux périodes étudiées, et pour aller plus loin la p-value nous indique si ces écarts sont significatifs au seuil de confiance 95% (autrement dit si l'on peut être sûr que les écarts observés témoignent d'une réelle différence de moyenne altitudinale entre les deux périodes).



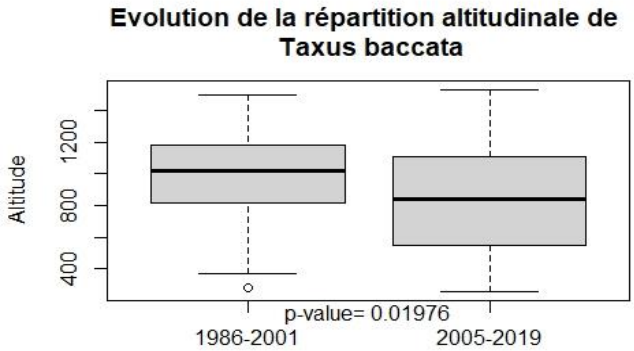


Figure 11 : Boxplots de la répartition altitudinale de deux espèces ayant eu une évolution significative (au seuil de confiance 95%) entre les deux périodes d'inventaires

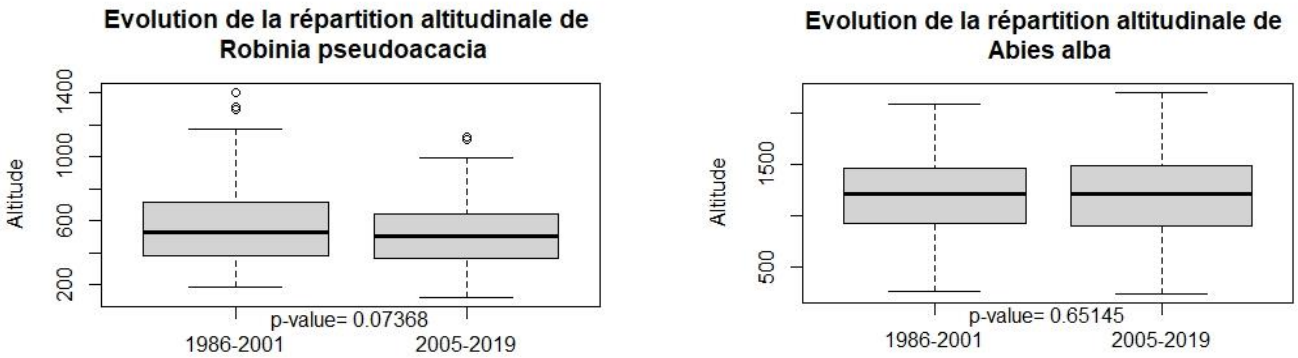


Figure 12: Boxplots de la répartition altitudinale de deux espèces ayant eu une évolution non significative (au seuil de confiance de 95%) entre les deux périodes d'inventaire

On constate sur les précédents graphiques que certaines essences présentent en moyenne une différence significative en altitude (figure 11). Ce « déplacement » peut être vers des altitudes plus élevées comme pour le chêne vert (*Quercus ilex*), espèce xérophile ou vers des altitudes moins élevées comme pour l'if (*Taxus baccata*), espèce indifférente à la lumière et supportant l'ombre.
Avec ce même seuil de confiance, on a à l'inverse des espèces qui ne présentent pas d'écart altitudinal significatif (voir figure 12) comme c'est le cas du robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*) ou le sapin pectiné (*Abies alba*). On compte en tout dix-huit espèces avec un déplacement significatif sur les quarante-six espèces étudiées. L'ensemble des résultats est synthétisé dans le tableau 3 page 23.

3° Pente

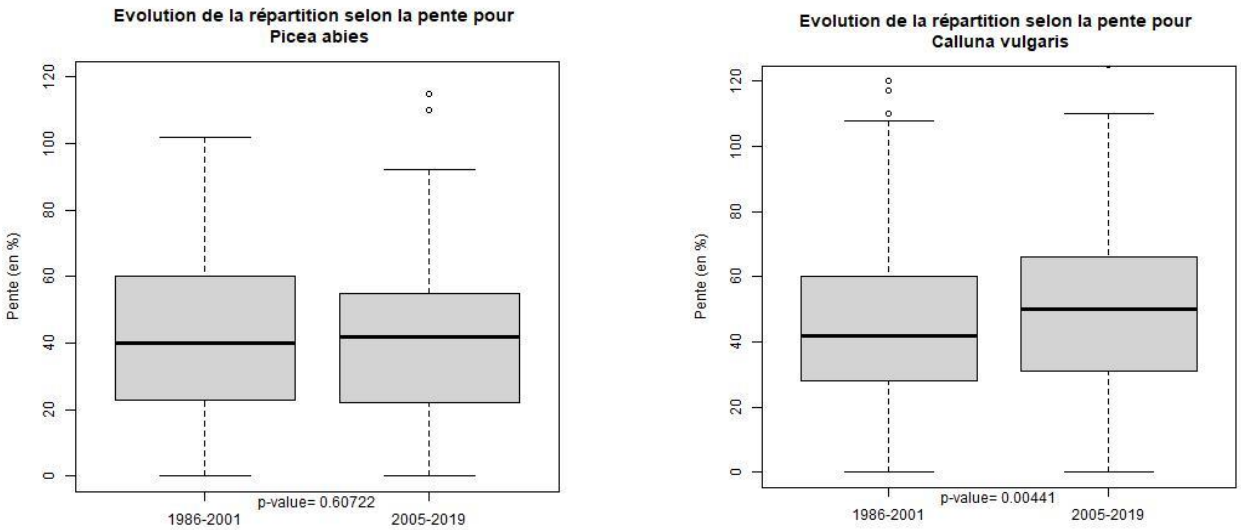


Figure 13: Boxplots de comparaison de la répartition des pentes sur les deux périodes pour deux espèces : l'épicéa (Picea abies) et la callune (Calluna vulgaris)

De nombreuses espèces ne présentent pas de mouvement significatif vis-à-vis de la pente, cependant comme pour l'altitude un certain nombre d'écarts le sont (cas de la callune, visible à droite de la figure 13 par exemple). On dénombre seulement onze espèces sur les quarante-six analysées avec un écart significatif. L'ensemble des résultats est synthétisé dans le tableau 3 page 23. Parmi ces écarts, certains sont très faibles.

4° Exposition

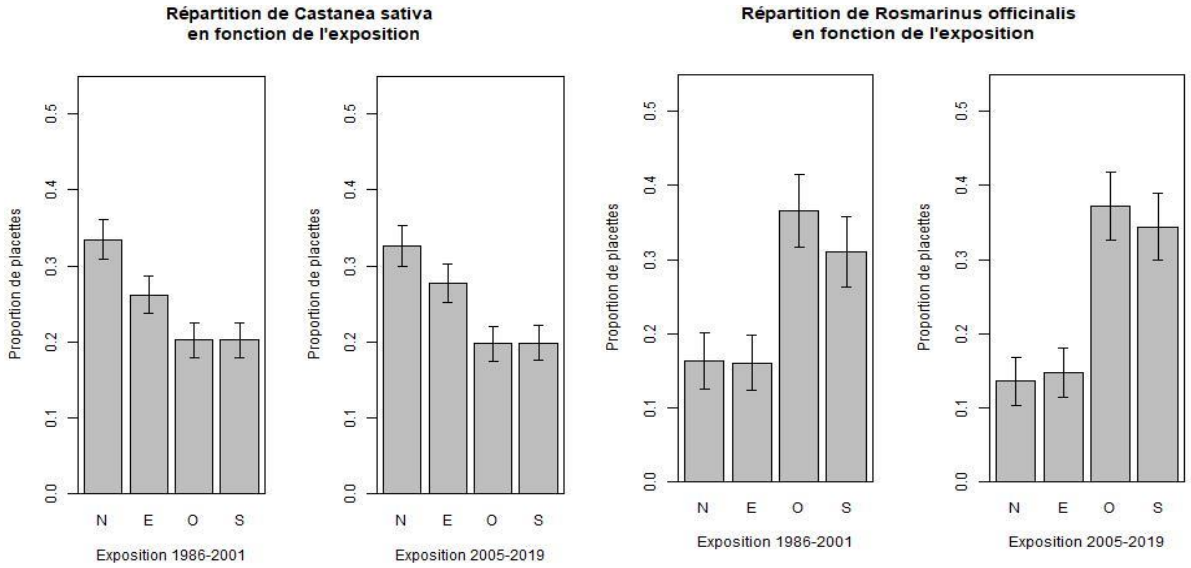


Figure 14: Répartition du châtaignier (Castanea sativa) et du romarin (Rosmarinus officinalis) en fonction de l'exposition au cours des deux campagnes

Nous n'observons pas de grand écart d'expositions entre les deux périodes (figure 14). On remarque pour le châtaignier uniquement, une légère différence avec une proportion de présence un peu plus importante pour l'exposition Est et un peu moins importante pour l'exposition Nord au cours de la deuxième campagne. Néanmoins, la différence n'est pas très importante et ne concerne que des expositions plutôt fraîches et pas un passage d'une « exposition sèche » à une « exposition fraîche » (passage de Nord à Sud par exemple).

Pour les autres essences observées, beaucoup de celles qui pourraient montrer des changements, affichent en fait des barres d'erreur importantes. Malgré tout, on peut observer 14 espèces (sur les 46 étudiées) avec des écarts significatifs (parfois faibles) au seuil de confiance 95% (graphes de ces espèces en annexe 1). Les résultats qui sont significatifs sont synthétisés dans le tableau 3 page 23.

5° Longitude

Pour étudier l'évolution en termes de longitude, des boxplots ont également été réalisés (exemples en figures 15).

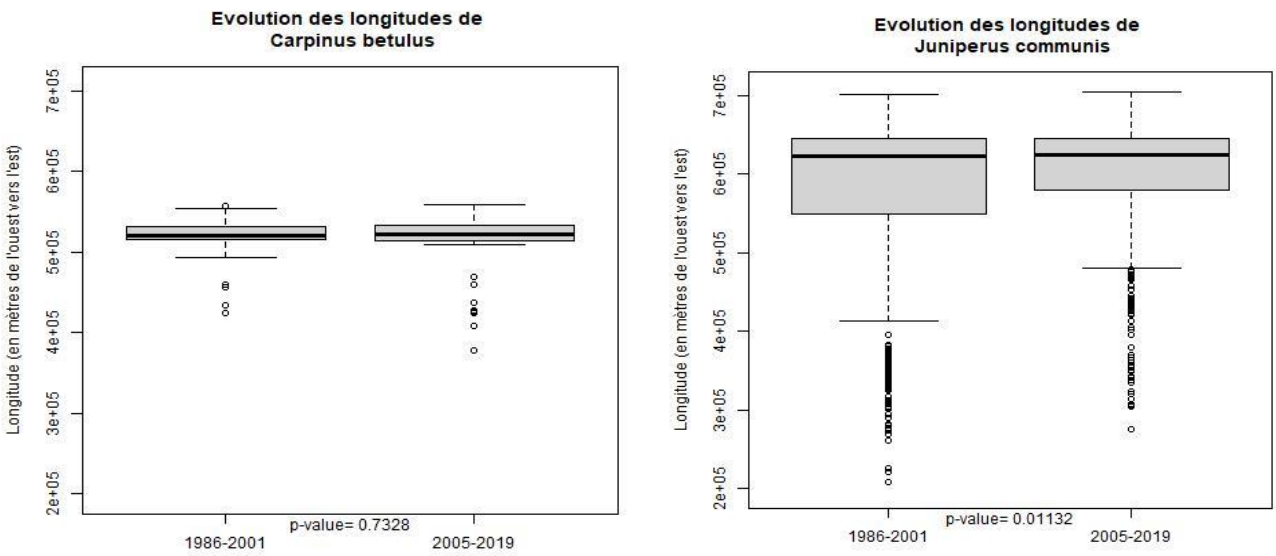


Figure 15: Répartition longitudinale du charme (Carpinus betulus) et du genévrier commun (Juniperus communis) pour les deux périodes considérées

Graphiquement, on n'observe pas de véritable changement de longitude pour le charme (*Carpinus betulus*) entre les deux campagnes. Il semblerait qu'il y ait un peu plus de points à l'est (bas du graphique) lors de la nouvelle campagne mais il n'y a pas de changement significatif (p-value>0,05). Pour le genévrier commun (*Juniperus communis*), il semble y avoir un léger déplacement longitudinal (la p-value<0,05 montre un écart significatif entre les deux périodes) avec la disparition des valeurs des placettes les plus occidentales.

Plus de la moitié des espèces présentent un déplacement significatif en longitude (vingt-sept espèces sur quarante-six) et pour la plupart (22 espèces) vers l'ouest. L'ensemble des résultats est synthétisé dans le tableau 3 page 23.

6° Latitude

Les valeurs de latitude occupent un intervalle plus restreint que celles de la longitude car les Pyrénées s'étalent plutôt longitudinalement selon un axe sud-ouest/nord-est (presque ouest/est). Néanmoins, on pourra éventuellement observer certains écarts pour des essences plutôt situées au nord donc avec des expositions en général plus fraîches et d'autres au sud donc plutôt avec des expositions chaudes. Là encore des diagrammes en boîtes ont été réalisés. On distingue clairement des essences situées plus au nord, donc plutôt côté français (comme le charme ou le douglas, cf figure 16) et des essences plus présentes au sud donc plutôt côté espagnol. Il y a également des essences avec une répartition plus centrale comme le sapin (*Abies alba*) qui est plus montagnarde et donc présente sur les hauteurs de la chaîne à des latitudes moyennes.

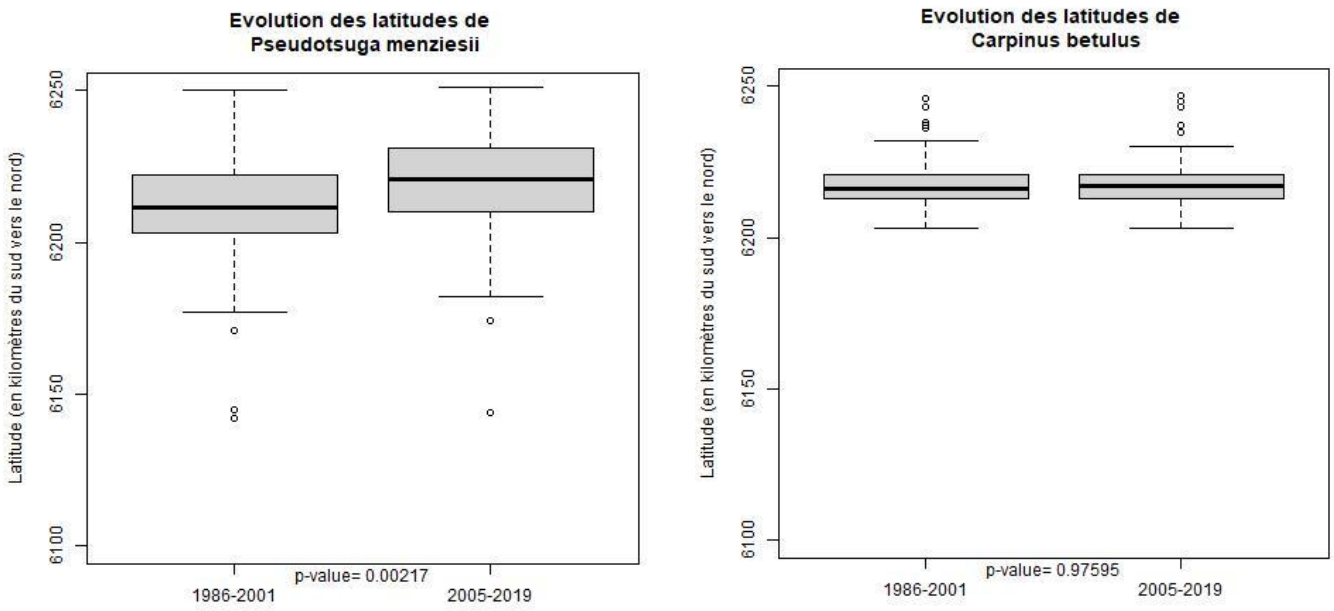


Figure 16 : Répartition latitudinale du douglas (Pseudotsuga menziesii) et du charme (Carpinus betulus) pour les deux périodes considérées

Les écarts latitudinaux entre deux périodes pour une même espèce sont parfois significatifs. C'est notamment le cas du douglas (*Pseudotsuga menziesii*) dont la p-value est bien inférieure à 5%. La moitié des espèces montrent un déplacement latitudinal significatif (23 sur les 46 étudiées). L'ensemble des résultats est synthétisé dans le tableau 3 page 23.

C- Régressions logistiques

1° Altitude

La figure 17 montre ainsi un exemple de régression effectuée pour l'orme champêtre (*Ulmus minor*), et le pommier sauvage (*Malus sylvestris)*. On observe pour *Ulmus minor* comme pour d'autres espèces plutôt une descente en altitude de l'espèce entre les deux campagnes. Dans certains cas néanmoins on observe plutôt une montée en altitude comme pour le pommier sauvage (*Malus sylvestris).*

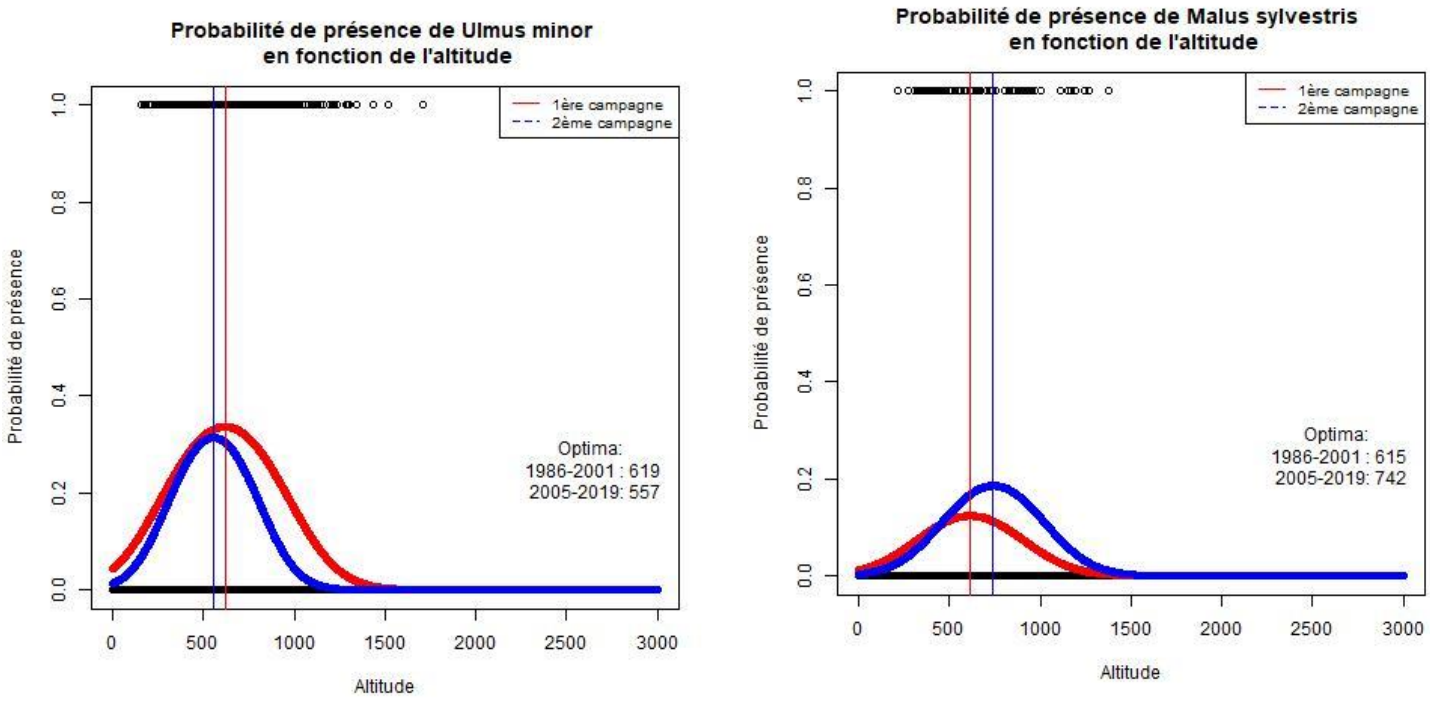


Figure 17 : Modélisation de la répartition altitudinale de l'orme champêtre (à gauche) et du pommier sauvage (à droite)

Le résumé des mouvements par espèce apparaît en figure 18. On constate sur cette figure que parmi les espèces étudiées, les évolutions entre les deux périodes sont variables avec tout d'abord un grand nombre d'espèces qui montrent peu de mouvements d'optimum d'altitude. Ces espèces se trouvent très proches de la bissectrice. Ensuite, on peut noter que parmi les espèces qui s'écartent un peu plus de la bissectrice, certaines ont un mouvement ascendant (espèces au-dessus de la bissectrice) et d'autre un mouvement descendant (espèces en-dessous de la bissectrice).

Enfin nous avons voulu identifier avec de la couleur quelques espèces pouvant être indicatrices du climat et donc par leur migration de son évolution. En rouge, les espèces plutôt xérophiles montrent une diversité de mouvement ; trois ont un mouvement ascendant et deux un mouvement descendant, cependant ces deux dernières sont un peu particulières. En bleu, nous avons indiqué deux espèces hygrosciaphiles qui ne montrent pas de véritable mouvement d'optimum même si l'une (*Abies alba*) semble plutôt monter alors que l'autre paraît descendre (*Alnus glutinosa*).

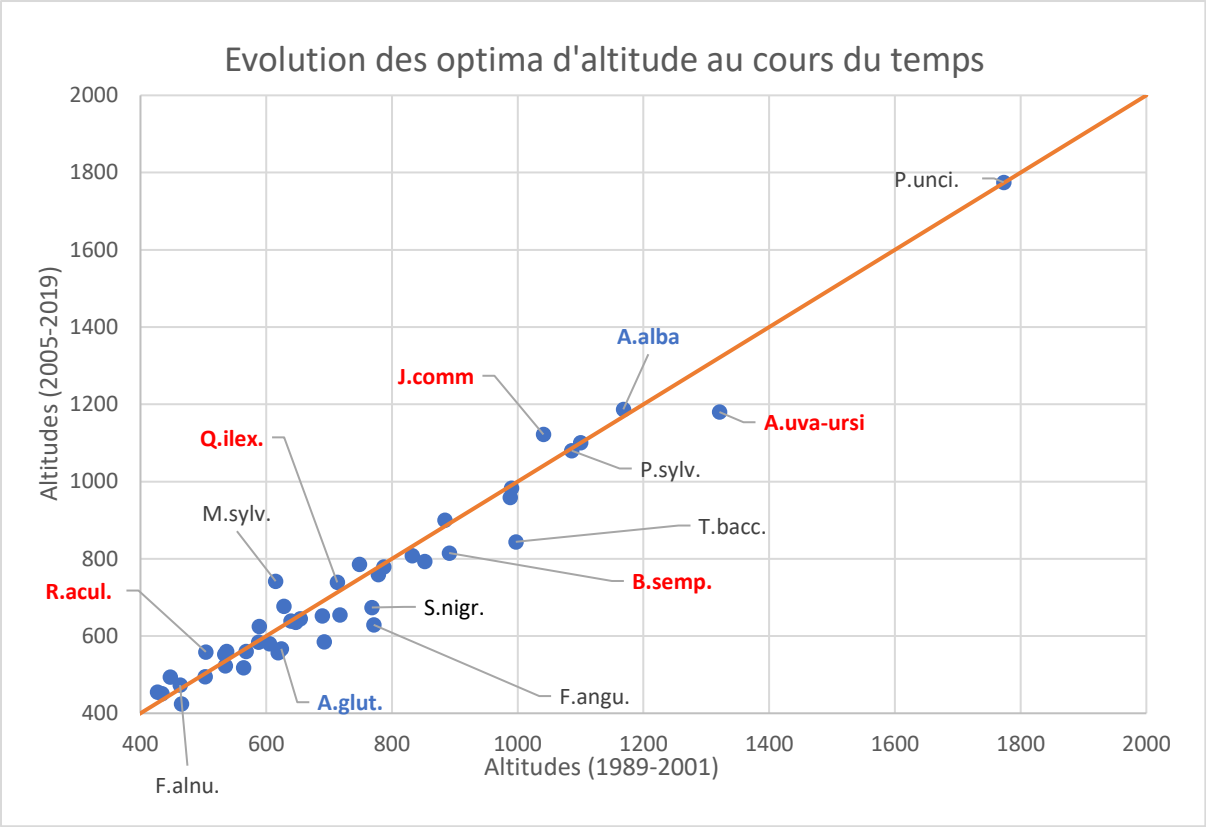


Figure 18 : Evolution des optima d'altitude entre les deux campagnes de relevés

NB : Le nom de quelques espèces est indiqué en abrégé, notamment celles qui présentent un déplacement d'optimum notable.

Les espèces écrites en bleu ont un comportement plus hygrophile (ou hygrosciaphile) alors que celles en rouge sont plutôt xérophiles

2° Pente, latitude et longitude

La régression logistique a ensuite été testée pour la pente, latitude et la longitude. Cependant nous avons plus de doutes sur la validité du modèle logistique (même polynomial) pour ces variables. Nous reviendrons sur nos réserves vis-à-vis de cette méthode dans la discussion de nos résultats.

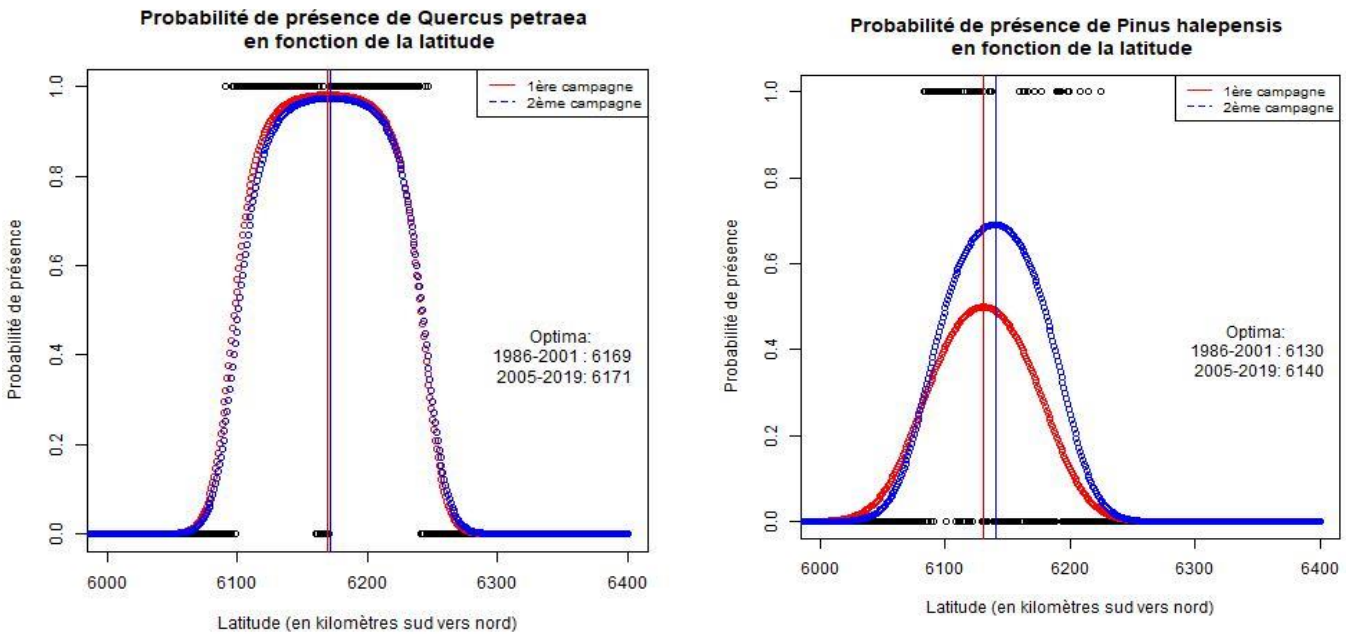


Figure 19 : Modélisation de la répartition latitudinale du chêne sessile (Quercus petraea) et du pin d'Alep (Pinus halepensis) avec une régression logistique

Pour les latitudes, on observe particulièrement peu de variations avec les régressions logistiques, comme dans le cas du chêne sessile (*Quercus petraea,* figure 19). Certaines essences montrent un peu plus d'évolutions comme le pin d'Alep (*Pinus halepensis)*, en marge de la zone pyrénéenne, qui semble se déplacer légèrement vers le nord (figure 19).

Pour la longitude, les résultats sont variables également avec certaines espèces qui présentent très peu de déplacements (comme par exemple la bourdaine sur la figure 20).

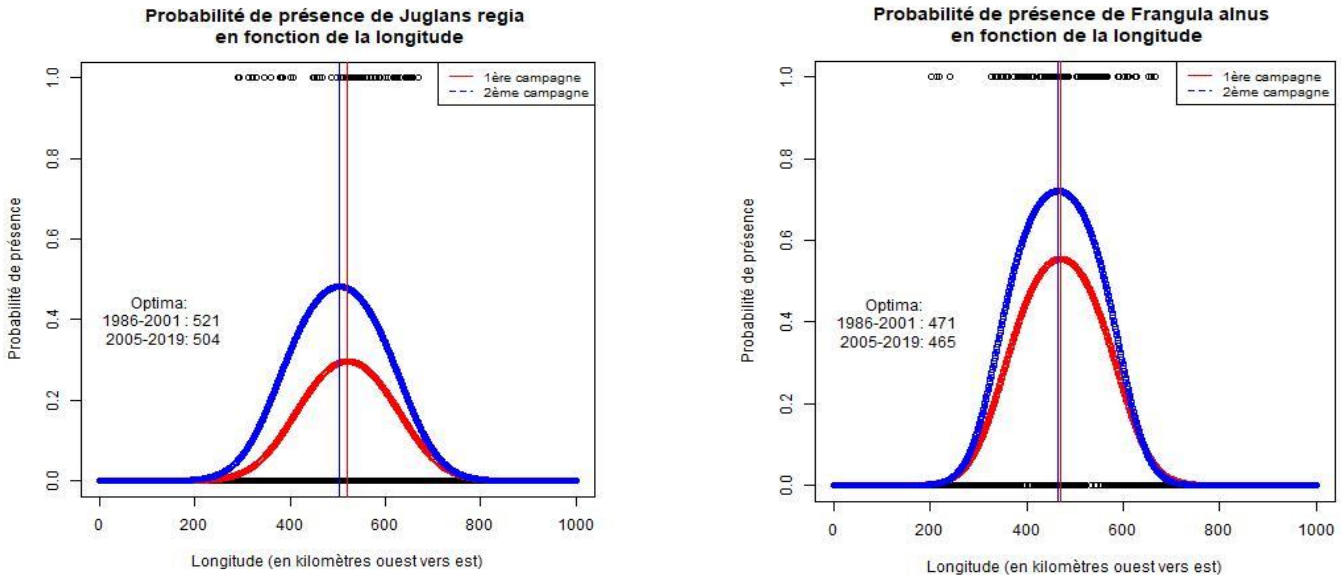


Figure 20 : Modélisation de la répartition longitudinale du noyer commun (Juglans regia) et de la bourdaine (Frangula alnus)

Quelques-unes paraissent avoir un changement d'optimum comme le noyer commun (figure 20), la plupart du temps vers l'ouest.

Tableau n° 3 : Synthèse des variations des paramètres étudiés pour chaque espèce pyrénéenne retenue entre les périodes 1986-2001 et 2005-2019

	Evolution des optima observés selon chaque paramètre considéré				
Espèce	Altitude (en m)	Latitude (en km) sud vers nord	Longitude (en km) ouest vers est	Pente (en %)	Exposition
Abies alba	19	-1	**1**	-2	Ouest -> sud
Acer campestre	**-62**	**1**	**-16**	22	
Alnus glutinosa	-57	-1	**-22**	**2**	
Arbutus unedo	28	4	-50	-8	
Arctostaphylos uva-ursi	**-141**	**3**	**-49**	16	**Nord -> sud**
Buxus sempervirens	**-76**	**30**	21	**23**	Est (sud et ouest) -> nord
Calluna vulgaris	-7	**3**	**-10**	**12**	
Carpinus betulus	23	0	-10	1	
Castanea sativa	-4	**-1**	**-15**	**10**	Nord -> est
Cornus sanguinea	-8	**19**	**-19**	0	
Corylus avellana	**-24**	**4**	**1**	0	
Daboecia cantabrica	0	**43**	**-97**	**26**	Est et sud -> ouest
Fagus sylvatica	**-29**	**0**	**-4**	**0**	Nord (et ouest) -> Est (et Sud)
Frangula alnus	10	0	-6	**8**	
Fraxinus angustifolia	**-142**	-4	**75**	0	
Ilex aquifolium	**-8**	**7**	**-8**	-29	**Est et ouest -> sud**
Juglans regia	-9	0	-17	6	
Juniperus communis	**81**	**3**	**32**	**44**	
Juniperus phoenicea	-59	7	5	-6	
Ligustrum vulgare	**36**	**-4**	-41	6	Nord -> est et sud
Malus sylvestris	**127**	**-10**	-4	-41	
Phillyrea angustifolia	-41	**-14**	-16	-2	
Phillyrea latifolia	-8	5	-41	-6	
Picea abies	1	2	-6	34	Nord -> ouest, est et sud
Pinus halepensis	-12	**10**	**-28**	5	**Ouest et sud -> nord et est**
Pinus radiata	45	0	-4	49	
Pinus sylvestris	-6	**2**	**-8**	-9	
Pinus uncinata	2	-1	**-6**	**2**	
Pistacia lentiscus	17	8	**-18**	0	
Populus nigra	-25	-9	-18	-23	

Populus tremula	38	-4	-23	-1	**Nord -> est, ouest et sud**
Pseudotsuga menziesii	-37	**7**	**-62**	1	**Est et ouest -> nord (et un peu sud)**
Quercus coccifera	-11	0	**-31**	3	
Quercus faginea	-19	**19**	**-100**	-31	
Quercus ilex	**26**	0	**-31**	0	**Nord -> est, ouest et sud**
Quercus petraea	16	2	**-15**	45	
Quercus pyrenaica	**-107**	**58**	**-132**	41	
Quercus robur	**19**	7	-3	**-4**	
Quercus rubra	**-68**	-1	-14	50	
Rhamnus alaternus	47	1	18	-1	
Robinia pseudoacacia	-46	8	15	7	
Rosmarinus officinalis	**49**	3	**-52**	17	
Ruscus aculeatus	**55**	**-20**	**-40**	**-34**	**Nord -> Est et sud**
Sambucus nigra	**-94**	**1**	-4	6	
Taxus baccata	**-153**	**11**	**-32**	2	
Ulmus minor	-62	**-1**	**15**	0	

Les nombres en couleur indiquent un déplacement significatif (vert s'il est négatif et rouge s'il est positif)

IV- Discussion

A- Déplacements en altitude, pente et exposition

Nous avons étudié et comparé la répartition de quarante-six espèces entre deux périodes (1986-2001 et 2005-2019) vis-à-vis de différentes variables potentiellement explicatives que sont l'altitude, la pente, l'exposition, la longitude et la latitude.

La réalisation d'une ACP nous a d'abord permis de voir que les variables étudiées avaient une influence sur la répartition des espèces étudiées mais que selon les espèces, l'influence des différentes variables n'est pas la même. On a ainsi pu observer que *Pinus radiata* est fortement influencé (négativement) par la longitude X et se trouverait donc plus à l'ouest (c'est ce qui peut d'ailleurs être observé car il est abondant dans le Pays basque espagnol (CRPF Occitanie, communication personnelle). Ou encore *Pinus uncinata* qui est corrélé positivement à l'altitude (fortement) et à la longitude (plus légèrement) ; or on le trouve en effet à des altitudes élevées mais également plutôt à l'est de la chaîne pyrénéenne en Catalogne et dans les Pyrénées orientales (CRPF Occitanie, communication personnelle) .

On peut noter également que les classes d'expositions élevées correspondent aux expositions les plus chaudes (sud et ouest). Or, on trouve plutôt des espèces à affinité méditerranéenne (*Pinus halepensis, Quercus coccifera, Rosmarinus officinalis*) qui sont liées positivement à cet axe. A l'inverse, des espèces plus sciaphiles et qui apprécient plutôt l'humidité comme le hêtre (*Fagus sylvatica*), l'if (*Taxus baccata*) ou même le noisetier (*Corylus avellana*) se trouvent de l'autre côté de cet axe donc vers des expositions plus fraîches et moins ensoleillés (nord et est).

Ensuite, nous avons analysé l'évolution de la répartition des espèces forestières. De manière générale, nous voyons assez peu d'effet du changement climatique à partir de nos résultats. Ainsi la première observation géographique que l'on a pu effectuer avec un système d'information géographique (SIG) n'est pas probante. Nous avons vu que l'on peut néanmoins remarquer pour certaines espèces comme *Daboecia cantabrica* ou *Quercus pyrenaica* une disparition d'une partie des points les plus à l'est des Pyrénées. Cependant, de manière générale, les changements ne sont pas encore flagrants au point de marquer le paysage régional mais nécessitent une analyse statistique plus poussée pour en évaluer l'ampleur.

Pour aller plus loin, les statistiques descriptives ont permis de s'intéresser à un facteur abiotique en particulier et de voir l'évolution de la répartition de chacune des espèces étudiées vis-à-vis de ce facteur. Ceci avait pour but d'identifier des variables pouvant impacter la modification de la répartition des espèces et de voir cette répartition plus précisément qu'avec une simple observation cartographique.

Ainsi nous nous sommes intéressés d'abord à l'altitude, aux expositions et aux pentes. L'altitude nous semblait être un paramètre essentiel vis-à-vis du changement climatique en montagne ; néanmoins il peut être modulé par d'autres facteurs comme l'exposition ou la pente. Ainsi sur les quarante-six espèces étudiées, les statistiques inférentielles nous ont permis de montrer que seules dix-huit espèces présentaient un mouvement significatif en altitude. Nos hypothèses de départ étaient que la plupart des espèces auraient tendance à se déplacer vers des altitudes plus élevées où se trouvent des conditions plus humides et/ou plus fraîches. Cependant, nos résultats montrent des tendances bien différentes : parmi les espèces qui ont un déplacement significatif, plus de la moitié a un mouvement descendant (11 espèces) et les autres (7 espèces) ont un mouvement ascendant. Notre hypothèse de départ ne peut donc être confirmée par ces résultats. Cependant, nous avons constaté dans notre analyse bibliographique que des résultats semblables avaient pu être observés. Ainsi *Lenoir et al.* (2008) se sont intéressés à des espèces végétales des régions montagneuses pas uniquement forestières. Leurs résultats ont montré que beaucoup d'espèces avaient en moyenne une augmentation d'altitude de leur optimum de présence mais qu'une partie importante descendait plutôt. Le mouvement descendant de certaines espèces pourrait être expliqué par la déprise agricole. Celle-ci a en effet entraîné une fermeture progressive des espaces de basse altitude qui correspond donc à un remplacement des espèces de milieu ouvert par des espèces forestières (*Bodin et al.*, 2013). Lors d'une étude similaire, réalisée dans le nord de la France, des résultats contre intuitifs ont également pu être observés (vis-à-vis de la latitude et du climat associé cette fois) et attribués à l'influence anthropique sur les forêts (Denelle, 2014). Ainsi, les friches et prairies de basse altitude récemment délaissées sont gagnées par des espèces héliophiles telles que *Fraxinus angustifolia* et *Acer campestre* et les accrus d'après-guerre sont progressivement colonisés par des essences sciaphiles telles que *Fagus sylvatica* ou encore *Taxus baccata*. L'arrivée de ces espèces dans des milieux de basse altitude anciennement agricoles induit de fait un changement d'optimum dans la répartition (mouvement descendant). Enfin certaines espèces ont pu voir leur répartition modifiée par la sylviculture indépendamment de leur caractère vis-à-vis de la lumière ou du climat (*Quercus rubra* en est un exemple intéressant puisqu'il a été fortement planté à des faibles altitudes ces dernières en remplacement du châtaignier *Castanea sativa* dépérissant (G. Tierle, communication personnelle)). On peut noter, cependant, deux espèces descendantes plutôt xérophiles : *Buxus sempervirens* et *Arctostaphylos uva-ursi*. Le buis (*Buxus sempervirens)* a été fortement attaqué par la pyrale du buis

depuis les années 2010 (J. Moret, communication personnelle) ce qui a pu modifier un peu sa répartition.

Une autre explication possible concerne les zones sous influence méditerranéenne où seules les espèces les plus tolérantes à la sécheresse sont présentes. Si on pense souvent que ces espèces sont plus résistantes, on peut surtout craindre qu'elles soient en limite de leur aire de répartition. En effet, le déficit foliaire des espèces thermophiles semble plus important que celui des autres espèces dans la zone pyrénéenne sous l'effet d'une influence méditerranéenne croissante (voir figure 1). Dans les zones les plus sèches cela peut conduire à une mortalité accrue excepté, peut-être dans les zones de refuge que peuvent constituer les zones confinées de fond de vallon. En effet, dans des cuvettes topographiques sont constatés des phénomènes d'inversion thermiques pouvant conduire à des inversions d'étages de végétation comme en Slovénie (E. Rouyer, communication personnelle) ou encore en France dans le massif du Risoux (PNR Haut Jura et ONF, 2002).

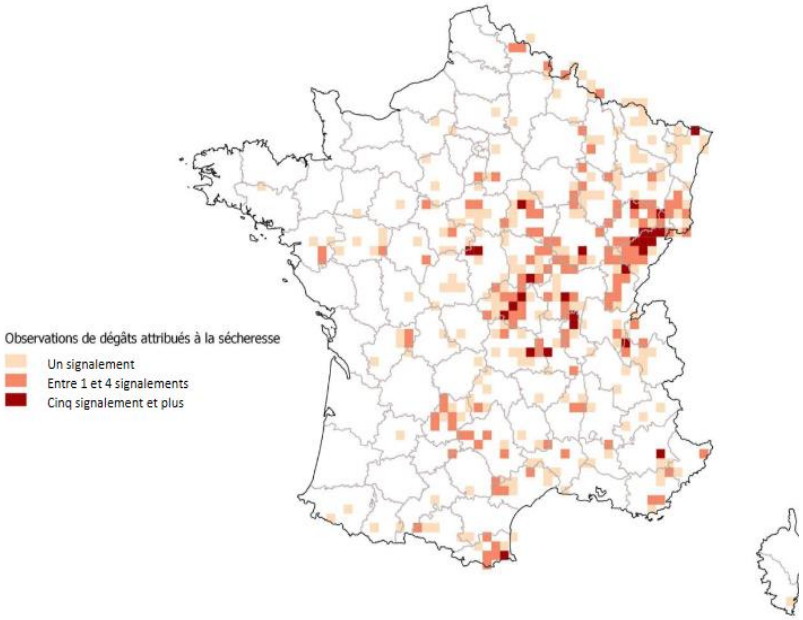


Figure 21 : Carte de la répartition des symptômes et mortalités liés à la sècheresse observée par les correspondants-observateurs du DSF entre juillet 2018 et juillet 2019

Une autre explication à ce changement de répartition serait que certaines espèces pourraient se trouver, à des altitudes plus élevées dans les zones à influence méditerranéennes où le climat est plus difficile. Le changement climatique crée cependant beaucoup de mortalité dans ces zones à tendance méditerranéenne (et moins ailleurs) ; on remarque en effet sur la figure 21 que la mortalité dans la zone à tendance méditerranéenne (département des Pyrénées orientales, principalement) est la plus importante des Pyrénées. Pour les espèces dont nous venons de parler, ces mortalités d'individus se produiraient donc à de hautes altitudes ; ceci diminuerait ainsi leur optimum d'altitude.

Il est cependant difficile d'énoncer une règle générale qui puisse dicter la répartition des espèces. En effet, plusieurs facteurs peuvent influencer simultanément les changements de distribution des espèces. Ainsi nous avons proposé plusieurs explications possibles de l'évolution de la répartition en altitude. L'ensemble de ces hypothèses peut également coexister et donc expliquer les résultats obtenus. Enfin, il faut noter également que l'altitude n'est pas le seul paramètre qui explique la répartition d'une espèce et ces modifications éventuelles. Nous nous sommes en effet également intéressés à l'exposition et la pente ainsi qu'à la latitude et la longitude comme autres paramètres pouvant influencer la répartition des espèces.

Bien que la pente ne nous paraissait pas à priori être un facteur déterminant pour la distribution des espèces, elle ne présente pas un poids beaucoup moins important que celui des autres variables sur notre cercle de corrélation (figure 9). La pente apparaissait sur ce cercle de corrélation comme assez proche de l'altitude mais nous ne pouvons en fait pas parler de corrélations entre les deux variables. Cependant, nous avons observé que beaucoup d'espèces avaient plutôt une augmentation significative de leur pourcentage de pente entre les deux périodes. Il nous est difficile d'interpréter ces

résultats vis-à-vis du réchauffement climatique. La pente peut certes jouer un rôle en procurant plus d'ombre et de fraîcheur ou au contraire en favorisant l'ensoleillement mais cela est révélé par l'exposition (paragraphe suivant) et non uniquement par la valeur de pente. L'augmentation significative des valeurs de pente d'une espèce pourraient néanmoins être due en partie là encore à la déprise agricole qui est certainement plus importante dans les zones pentues plus difficiles à exploiter, à entretenir ou simplement moins accessibles. Par ailleurs, la détermination des optima avec une régression logistique polynomiale nous est apparue moins adaptée pour beaucoup d'espèces, concernant la variable pente. Le modèle polynomial ne s'est d'ailleurs avéré pas plus significatif que le modèle logistique simple pour des espèces comme le noisetier par exemple (*Corylus avellana).*

Pour l'exposition, nous avons constaté que quatorze espèces montraient des évolutions d'exposition significatives au seuil de confiance de 95% (graphes en annexe 1). De manière générale, seules quatre espèces montrent une augmentation significative de la proportion de relevés en exposition nord (plus fraîche). Les autres ont bien souvent une réduction de la proportion de l'exposition nord (7 espèces). Là encore ces résultats assez contre intuitifs peuvent éventuellement être dus à une fermeture des forêts sur les expositions un peu plus chaudes qui étaient traditionnellement plutôt pâturées et moins forestières (ressource herbacée plus abondante) que les expositions nord. Une autre explication qui peut s'ajouter à celle-ci serait un effet de la sylviculture qui peut entraîner des changements d'essence et affecterait ainsi la répartition des arbres (voire des arbustes dans une moindre mesure). Le douglas qui est une essence très plantée depuis quelques décennies pourrait par exemple être dans ce cas. On observe, en effet, une augmentation de la proportion d'exposition nord et une baisse de la proportion des expositions est et ouest. Peut-être est-ce déjà le reflet d'une adaptation sylvicole qui pousse les forestiers à cantonner cette espèce dans les conditions optimales (exposition nord) en anticipation du changement climatique.

B- Déplacements longitudinaux et latitudinaux

Sur le cercle des corrélations de l'ACP, la latitude Y apparaît comme ayant un poids particulièrement important (flèche la plus longue). Cependant, elle ne suffit pas à elle seule à expliquer la variation des espèces. En effet, aucune espèce n'est vraiment positionnée à l'extrémité de cette flèche ni à l'opposé. Elle n'intervient donc certainement qu'en s'ajoutant à l'influence d'autres variables sur la répartition des espèces. On peut penser que cette variable traduit la tendance plus ou moins méditerranéenne du climat qui est susceptible d'impacter fortement la répartition des végétaux.

Les déplacements en longitude et latitude ont pu être observés avec des boxplots et des régressions. Les résultats des deux outils étaient en accord, néanmoins l'utilisation de régressions logistiques en latitude et longitude nous est parue moins appropriée que pour l'altitude. En effet, la régression logistique quadratique modélise la présence d'une espèce avec une fonction croissante puis décroissante et un maximum qui est l'unique sommet de la courbe. Si ce modèle convient bien pour l'altitude, il peut être erroné pour la longitude ou la latitude car il peut y avoir des variations multiples dues à différents facteurs (tels que les effets microclimatiques ou le sol) qui font varier beaucoup la probabilité d'occurrence d'une espèce de sorte qu'elle ne suit pas une répartition gaussienne comme celle que nous fournit la régression logistique quadratique.

On observe peu de déplacements en longitude qui soient significatifs parmi les espèces étudiées. Néanmoins, un certain nombre d'espèces parmi les plus courantes comme le sapin pectiné (*Abies alba*) ou le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) montrent un déplacement significatif vers l'ouest. Le déplacement

vers l'ouest de la plupart des espèces qui ont un déplacement significatif (on compte notamment l'if, le romarin, et différentes espèces de chênes) pourraient s'expliquer par des conditions qui deviennent globalement plus sèches. Ceci permettrait donc d'une part à des espèces xérophiles de coloniser de nouveaux espaces leur devenant favorables ; d'autre part, les espèces ayant besoin de plus de précipitations, pourraient être « contraintes » de coloniser des régions plus arrosées plus à l'ouest sous l'effet du changement climatique. Ces observations sont en accord avec nos hypothèses de départ d'une influence méditerranéenne accrue. Ces résultats devront toutefois être confirmés ultérieurement.

Il n'y a que trois espèces qui présentent un déplacement significatif vers l'est. On peut noter l'orme champêtre (*Ulmus minor*) qui devient plus présent à l'est ; il a cependant été fortement atteint par la graphiose (Benest et al., 2018) et les résultats sont donc à tempérer par cette particularité. Autre essence à montrer un déplacement vers l'est significatif, le frêne à feuilles étroites (*Fraxinus angustifolia*) qui est une essence souvent proche des cours d'eau ou des zones plutôt humides et qui est par ailleurs héliophile et thermophile. Il se peut donc qu'elle subisse moins les effets de sécheresse à proximité des cours d'eau et qu'elle se soit étendue dans l'est méditerranéen où la chaleur plutôt élevée lui est favorable. Enfin, nous avons vu un déplacement significatif vers l'est pour le genévrier commun (*Juniperus communis*) ce qui est contraire à notre hypothèse de départ qui supposait une extension ou un déplacement des aires de répartition vers l'ouest sous l'effet du changement climatique. Il faut noter cependant que cette espèce plutôt pionnière est fortement influencé par l'abandon du pastoralisme en colonisant les milieux xérophiles laissés à l'abandon (Dumé et al., 2018). Ainsi une fermeture importante des milieux à l'ouest de la chaîne, due à une déprise agricole plus ancienne, pourrait entraîner sa diminution dans ces zones et expliquer ce « déplacement » vers l'est.

Si l'on s'intéresse maintenant aux migrations selon un axe nord-sud (en latitude donc), il nous faut d'abord noter que les Pyrénées sont beaucoup moins étendues en latitude qu'en longitude. Néanmoins, on dénombre plusieurs espèces (23 sur 46 espèces étudiées) qui montrent des déplacements latitudinaux significatifs. Il est cependant assez difficile de les interpréter car un déplacement vers le nord peut être dû, côté français, à un déplacement vers des altitudes plus basses, ou au contraire vers des altitudes plus hautes côté espagnol. Les Pyrénées forment en effet une sorte de barrière naturelle à la migration et pour la latitude, il aurait peut-être été préférable de réaliser l'étude en distinguant le nord et le sud de la chaîne ou autrement dit la France et l'Espagne. On observe cependant que les moyennes se déplacent pour beaucoup d'essence vers le nord (côté français) et donc vers des altitudes plus basses. Cette tendance peut paraître à premier vue contradictoire mais s'accorde avec la baisse en altitude de nombreuses essences que l'on a pu observer par ailleurs. Ceci pourrait être dû notamment à la déprise agricole et à la maturation des accrus forestiers des zones les plus basses en altitude comme nous l'avons vu plus tôt.

Enfin, pour finir, il faut noter que la répartition des essences est déterminée par d'autres facteurs qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude. Ainsi le pH a un impact important sur la répartition de certaines espèces (les acidiphiles et les calcicoles) ; le châtaignier (*Castanea sativa*) comme d'autres espèces calcifuges ne tolérera ainsi pas les sols calcaires et peu acides (Dumé et al., 2018). Le châtaignier pourrait ainsi avoir, par exemple, tendance à migrer vers de nouveaux territoires plus arrosés sous l'effet du changement climatique. Cependant, les sols calcaires de certaines stations pyrénéennes (IGN, 2012) risquent de limiter sa migration. De manière plus générale, le sol va jouer un rôle important qui n'a pas été pris en compte dans cette étude. Au-delà du pH, la nature du sol va jouer sur la capacité d'enracinement d'une espèce et sur la réserve et l'alimentation en eau de ce sol. Or ces critères sont déterminants vis-à-vis du changement climatique. Ainsi une espèce qui rencontre des

difficultés face au climat de la zone qu'elle occupe peut cependant en trouver de plus grandes encore à cause de l'hétérogénéité géologique et pédologique (IGN, 2012) du sol dans d'autres régions bien que le climat y soit plus favorable à son développement. Le sol peut impacter en effet la répartition des végétaux de différentes manières : par son pH d'une part qui peut limiter la présence de certaines espèces, de même pour sa texture. Mais le sol va jouer également sur l'alimentation en eau par sa profondeur mais aussi par sa texture et ses éventuelles alimentations latérales en eau. Des modèles plus complexes peuvent donc déterminer l'évolution de la répartition des végétaux sous l'effet du changement climatique en prenant en compte le type de sol.

Conclusion

Nous avons obtenu des résultats foncièrement différents de ceux auxquels nous pouvions nous attendre. Ils ont en effet souvent été en contradiction avec nos hypothèses de départ et ne montraient pas forcément autant de changements que ce que l'on pouvait attendre. Néanmoins, cela nous a montré que les effets du changement climatique en termes de répartition d'essences étaient complexes et difficiles à analyser. De nombreux facteurs entrent en jeu comme nous avons pu le voir et d'autres phénomènes que le climat peuvent avoir un impact important comme le sol ou encore plus important l'action anthropique directe (la sylviculture, et l'usage des sols dont la déprise agricole est une conséquence). Par ailleurs, l'effet du climat sur la répartition des végétaux (et surtout des ligneux que nous étudions ici) est long à observer. En effet, il faut observer des intervalles de temps assez longs pour espérer voir des changements notables. D'autant plus que les conséquences du changement climatique n'apparaissent plus visibles que depuis peu et devraient s'amplifier avec le temps (perturbations climatiques avec des vagues de chaleur). D'autres évolutions plus sensibles aux effets du climat peuvent être plus facilement observées sur de courtes durées comme les dates de débourrements des arbres ou les phénomènes de dépérissement qui font également partie du projet Acclimafor. L'étude de la répartition des espèces dont il est question ici est le troisième volet de ce projet mais il nécessite un temps d'observation plus long. Une autre possibilité pour s'intéresser aux premiers effets du changement climatique sur les forêts serait d'étudier la répartition des plantes herbacées qui est susceptible d'évoluer plus vite et qui est moins soumise aux choix sylvicoles. L'étude des herbacées n'a cependant pas été possible car les espèces herbacées ne sont pas relevées dans l'inventaire espagnol. Une étude uniquement sur la partie française des forêts pyrénéennes pourrait néanmoins se révéler intéressante et apporter des compléments intéressants à notre sujet avec là encore cependant des limites semblables. Une étude de la végétation des montagnes françaises qui s'intéresse aussi aux herbacées (mais non spécifique à la végétation forestière) a ainsi pu être effectuée (Lenoir, 2008) et pourrait servir de comparaison à un tel travail. L'autre possibilité pour pouvoir travailler simultanément sur les parties françaises et espagnoles des Pyrénées serait de s'intéresser aux régénérations naturelles qui plus jeunes et plus sensibles que les arbres adultes répondent plus vite au climat.

Références bibliographiques :

Ackerly, D. D. *et al.* (2010) 'The geography of climate change: implications for conservation biogeography', *Diversity and Distributions*, 16(3), pp. 476–487. doi: https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00654.x.

Alberdi, I., Cañellas I., Bombin R.V (2017) 'The Spanish National Forest Inventory : history, developement, challenges and perspectives', *Brazilian Journal of Forestry Research,* v. 37, n. 91, p. 361-368. doi: 10.4336/2017.pfb.37.91.1337

Benest, F., Collin, E., Piou, D. (2018), 'Est-il possible de tirer des enseignements des introductions anciennes d'agents pathogènes ? L'exemple de la graphiose de l'orme', *Revue forestière française, L XX - 6 -2018 - © AgroParisTech*

Bodin, J. *et al.* (2013) 'Shifts of forest species along an elevational gradient in Southeast France: climate change or stand maturation?', *Journal of Vegetation Science*, 24(2), pp. 269–283. doi: https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01456.x.

Coudun, C. and Gégout, J.-C. (2006) 'The derivation of species response curves with Gaussian logistic regression is sensitive to sampling intensity and curve characteristics', *Ecological Modelling*, 199(2), pp. 164–175. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.05.024.

Dalmasso, M., Drapier, J. (2019), 'La synthèse périodique de l'inventaire forestier', *Synthèse périodique de l'inventaire forestier*, n°45, IGN

Dalmasso, M., Derrière, N., Wurpillot S. (2014), 'Les données de l'inventaire forestier : état des lieux et évolution', *L'IF La feuille de l'inventaire forestier* n°34, IGN

Denelle, P. (2014), '*Observation d'un signal de changement de distribution de la flore forestière face aux changements globaux en Nord - Pas-de-Calais et en Picardie'*, Mémoire de dominante d'approfondissement : gestion des milieux naturels, Agroparistech

Dumé, G., Gauberville, C., Mansion, D., Rameau, J.-C. (2018), *Flore forestière française, guide écologique illustré, 1 Plaines et collines,* Nouvelle édition, CNPF Institut pour le développement forestier

Grinnell, J. (1917), 'The niche-relationships of the California trasher', *The Auk*, 34 : 427-433

Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), (2012), 'Grande région écologique I : Pyrénées'

Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), Inventaire forestier national, 2011 à 2019

Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), (2021), 'Méthodologie, Pour bien comprendre les résultats publiés 2015-2019', pp 5-120

Inventaire Forestier National (IFN), (2011), 'La forêt française, Pour bien comprendre les résultats publiés 2006-2010', pp 3-24.

Lenoir, J. *et al.* (2008) 'A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century', *Science*, 320(5884), pp. 1768–1771. doi: 10.1126/science.1156831.

Lenoir, J. *et al.* (2013) 'Local temperatures inferred from plant communities suggest strong spatial buffering of climate warming across Northern Europe', *Global Change Biology*, 19(5), pp. 1470–1481. doi: https://doi.org/10.1111/gcb.12129.

Rosenzweig, M.L. (1995) 'Species diversity in space and time'. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

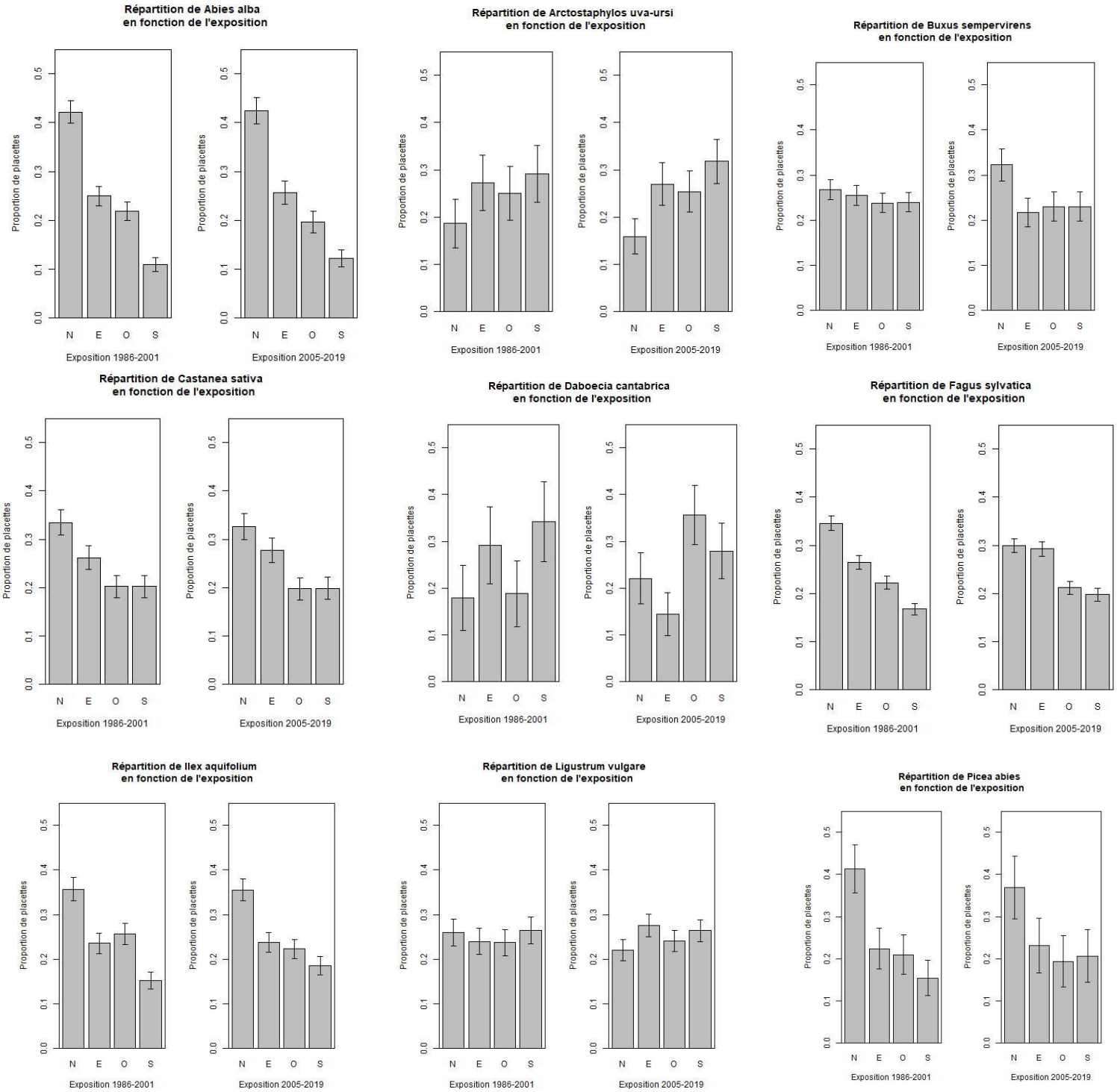
Thuiller, W. *et al.* (2005) 'Climate change threats to plant diversity in Europe', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(23), pp. 8245–8250. doi: 10.1073/pnas.0409902102.

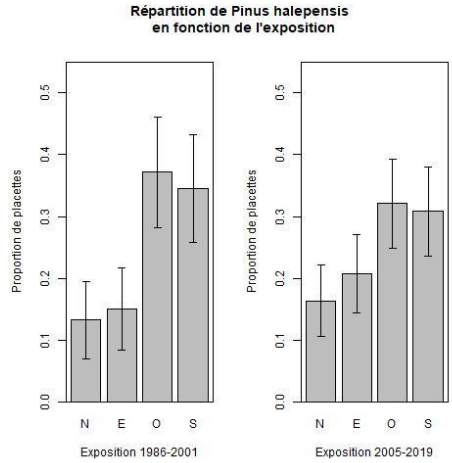
Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), (2015) « news-27018-montagnes-risques-naturels.pdf ». s. d. Consulté le 26 Janvier 2021. Disponible sur : https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-27018-montagnes-risques-naturels.pdf.

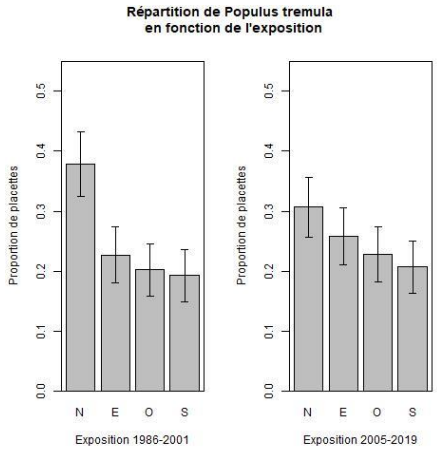
Vellend, M. and Geber, M. A. (2005) 'Connections between species diversity and genetic diversity', *Ecology Letters*, 8(7), pp. 767–781. doi: https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00775.x.

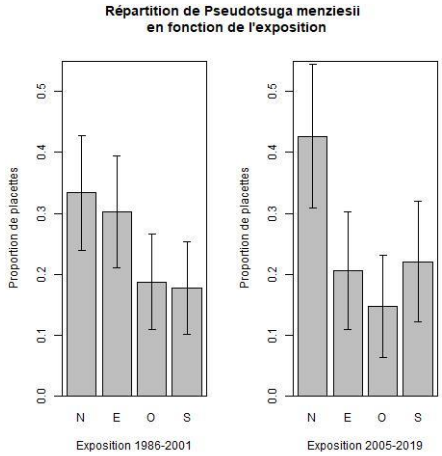
Annexes

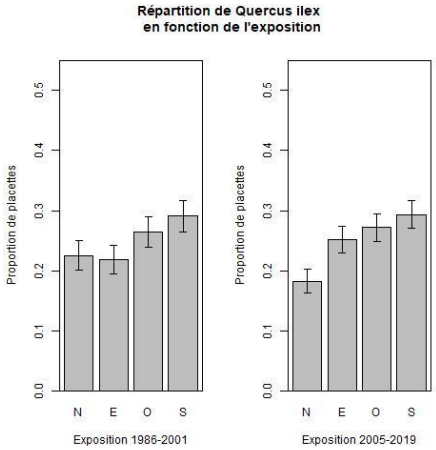
Annexe 1 : Diagrammes en barres de la répartition en exposition des espèces présentant un déplacement significatif entre les deux périodes

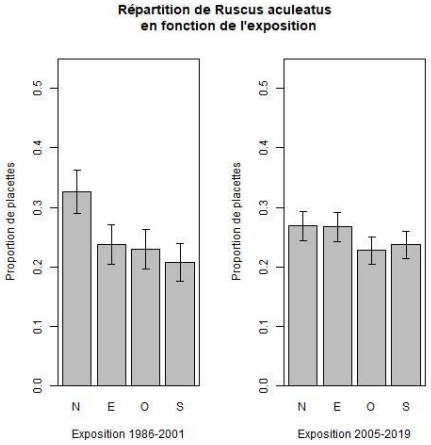



Répartition de Pinus halepensis
en fonction de l'exposition
Proportion de placettes
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
N
E
O
S
Exposition 1986-2001
Exposition 2005-2019


Répartition de Populus tremula
en fonction de l'exposition
Proportion de placettes
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
N
E
O
S
Exposition 1986-2001
Exposition 2005-2019


Répartition de Pseudotsuga menziesii
en fonction de l'exposition
Proportion de placettes
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
N
E
O
S
Exposition 1986-2001
Exposition 2005-2019


Répartition de Quercus ilex
en fonction de l'exposition
Proportion de placettes
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
N
E
O
S
Exposition 1986-2001
Exposition 2005-2019


Répartition de Ruscus aculeatus
en fonction de l'exposition
Proportion de placettes
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
N
E
O
S
Exposition 1986-2001
Exposition 2005-2019

Annexe 2 : Script r de la fonction réalisant une régression logistique (pour une espèce donnée)

```
new_reg=function(espece){

  #Travail sur la première campagne d'inventaire, période 1989-2001 (import et traitement)

  data_1=subset(campagne_1, campagne_1$nom_espece==espece)
#extraction des données pour la première période

  altitudes_1=data.frame(altitude=1:3000,abs_pres=0)

  alti_prez_1=levels(as.factor(data_1$Alti_IFN))

  altitudes_1[alti_prez_1,2]=1

  y_prez1=altitudes_1$abs_pres

  x_alt1=altitudes_1$altitude

  reg_log1=glm(y_prez1~poly(x_alt1,2), family = binomial)
#réalisation d'une première régression logistique (présence/absence en fonction de
l'altitude)

  coeff_reg1=coef(reg_log1)  #extraction des coefficients de la première régression


#création de la variable y_predit qui prédit la probabilité de présence

  pred_logit1=predict(reg_log1)

  y_predit1=plogis(pred_logit1)  #création de la fonction logistique


  #Travail sur la deuxième période d'inventaire, période 2005-2019 (import et traitement)

  data_2=subset(campagne_2, campagne_2$nom_espece==espece)
#extraction des données pour la deuxième période

  altitudes_2=data.frame(altitude=1:3000,abs_pres=0)

  alti_prez_2=levels(as.factor(data_2$Alti_IFN))

  altitudes_2[alti_prez_2,2]=1

  y_prez2=altitudes_2$abs_pres

  x_alt2=altitudes_2$altitude

  reg_log2=glm(y_prez2~poly(x_alt2,2), family = binomial)

#réalisation d'une deuxième régression logistique (présence/absence en fonction de
l'altitude)
```

```
  coeff_reg2=coef(reg_log2)  #extraction des coefficients de la deuxième régression

  pred_logit2=predict(reg_log2)

  y_predit2=plogis(pred_logit2)

  nom_fichier=paste(especе,".jpeg")

  jpeg(nom_fichier)


#réalisation d'un graphe avec les données de présence et d'absence de la première période

  plot(x_alt1, y_prez1, main=paste("Probabilité de présence de",especе,"\n", "en fonction de
l'altitude"), xlab="Altitude", ylab="Probabilité de présence")

  legend("topright",legend=c("1ère campagne", "2ème campagne"),col=c("red","blue"),
lty=1:2, cex=0.8)


#Ajout des courbes pour les deux périodes

  points(x_alt1,y_predit1, col="red")

  points(x_alt2, y_predit2, col="blue")

  max1=which.max(y_predit1)

  abline(v=x_alt1[max1],col="red")   #affichage d'une ligne verticale pour l'altitude où la
probabilité de présence est maximale (première campagne d'inventaire)

  max2=which.max(y_predit2)

  abline(v=x_alt2[max2], col="blue")   #affichage d'une ligne verticale pour l'altitude où la
probabilité de présence est maximale (deuxième campagne d'inventaire)

  text(2645,0.25,paste("Optima:", "\n", '1986-2001 :', x_alt1[max1], "\n", '2005-2019:',
x_alt2[max2]) ,col="black", cex=1)      #Ecriture valeurs d'altitude où la probabilité de
présence et maximale (deux campagnes)

  dev.off()
```

Résumé

Face au changement climatique, la gestion forestière tente de s'adapter pour continuer d'assurer les fonctions de production, protection et la fonction sociale (récréative) des forêts. Il est donc intéressant d'étudier les effets des évolutions climatiques des dernières années sur les écosystèmes forestiers. Le but est d'observer la réponse de ces écosystèmes afin d'adapter la gestion des forêts et continuer à assurer au mieux leurs différentes fonctions. Pour ce faire, nous avons comparé les données d'inventaires forestiers nationaux (français et espagnol) de deux périodes distinctes (1989-2001 et 2005-2019) dans le but d'étudier l'évolution des espèces forestières selon différentes variables (altitude, exposition, pente, longitude et latitude). L'évolution de la distribution de quarante-six espèces ligneuses des forêts pyrénéennes a ainsi été étudiée avec des systèmes d'information géographique (SIG), puis avec des statistiques descriptives et inférentielles pour étudier plus précisément les résultats, variable par variable. Enfin, pour certains paramètres, l'intensité des évolutions a été étudiée plus précisément à travers des régressions logistiques polynomiales et la détermination d'optima de présence des espèces pour chaque période. Les changements observés sont souvent inattendus car d'autres phénomènes influencent grandement l'évolution des forêts françaises. La déprise agricole et la gestion des forêts a pu influencer de manière notable la flore pyrénéenne et son évolution au cours des dernières décennies. Les effets plus directs du changement climatique n'apparaissent eux pas encore de manière très marquée sur les essences étudiées mais pourraient apparaître plus nettement à l'avenir.

Abstract

Facing climate change, forest management try to adapt itself in order to continue to assure the differents functions of forests (production, protection and social function). So, it's interesting to study the effets of the last climate changes on the forest ecosystems in order to adapt forests management and continue to provide the best way their different functions. We compare the data of national forests inventory (french and spanish inventories) between two different periods (1989-2001 and 2005-2019) in order to study forest species evolution depending on different variables (altitude, sun exposure, slope, longitude, latitude). The evolution of the distribution of forty six woody species from pyrenean forests was so studied with GIS (Geographic information system), then with descriptive and inferential statistics in order to study more precisely the results (each variable separately). Lastly, for some parameters, intensities of the evolutions have been studied more precisely with logistic polynomial regression and by determining optima of presence for species of each period. The changes are often unexpected because other phenomenons influence also the evolution of french forests. Indeed, land abandonnement and forest management could have largely impact pyrenean flora and its evolution the last decades. More direct effects of climate change don't seem to be strong for the moment. However, they should appear more clearly in the future.