

2.3 Sensibilité climatique des espèces végétales

Auteur : Rémi David, Contributeurs : Kévin Romeyer, Grégory Caze

Le Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique (CBNSA) est en charge des travaux sur la flore et les habitats naturels au sein du programme « les sentinelles du Climat ». Dans ce cadre, une réflexion sur la sensibilité climatique des espèces en termes d'évolution géographique a été menée avec pour objectif, *in fine*, de produire une liste d'espèces « sentinelles », de mesurer l'impact propre aux différentes composantes du climat sur le développement de ces espèces végétales, et enfin de générer des modèles de projection de la répartition future des plantes selon les différents scénarios climatiques.

Dans cette optique, le travail s'est préalablement concentré sur le développement d'indices de sensibilité de la flore aux changements climatiques. Des propositions raisonnées de protocoles pour la mise en place de ces indices ont été effectuées sur la base d'une liste d'espèces restreinte (DAVID, 2018).

Guidés par la nécessité d'extraire les informations les plus pertinentes d'un jeu de données relativement vaste, la démarche d'exploration s'est tout d'abord tournée vers les méthodes d'analyses multivariées. Puis, grâce aux résultats ainsi obtenus, nous avons commencé à évaluer le potentiel de méthodes d'un autre type, faisant cette fois intervenir des algorithmes d'apprentissage numérique en vue de proposer des cartes de potentialité de présence pour chaque taxon.

En suivant cette trajectoire méthodologique, ce travail s'inscrit dans la logique des travaux menés antérieurement par différents auteurs (THUILLER *et al.*, 2005 ; ARAUJO *et al.*, 2005 ; VENNETIER, 2007 ; FOREY *et al.*, 2008 ; BADEAU, 2010 ; BELLARD *et al.*, 2012 ; CHEAIB *et al.*, 2012 ; KESHTKAR & VOIGT, 2016 ; PREAU *et al.*, 2018) pour parvenir à définir l'approche la plus pertinente possible pour remplir les objectifs mentionnés plus haut, compte-tenu des données à disposition.

2.3.1 Matériel

- **Données climatiques**

Les données climatiques ont été obtenues via l'espace de commande du site PubliThèque (MÉTÉO-FRANCE, 2018a), grâce au partenariat développé par Cistude Nature avec Météo France dans le cadre du programme « les sentinelles du climat ». Nous avons ainsi accédé à l'ensemble des données spatialisées produites par cet organisme entre 1959 et la date de validation de notre commande, à savoir le 05/06/2018. Par soucis d'homogénéité entre le jeu de données climatiques et celui des données floristiques, seules celles obtenues pour la période allant de janvier 2000 à mai 2018 ont ensuite été conservées.

Ces données ont été produites par Météo France via les modèles SAFRAN et ISBA (SOUBEYROUX *et al.*, 2007 ; VIDAL *et al.*, 2010). Ils visent à analyser les paramètres météorologiques et à estimer les bilans d'eau et d'énergie en surface sur la France entière, avec une grille régulière de 8 kilomètres. Nous nous sommes donc basés sur les productions du CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) qui dispose de l'expertise pour traiter ces données. De plus, le choix des données modélisées et spatialisées assurait la possibilité d'associer facilement chaque donnée floristique avec une maille de 8 km, là où la tâche de relier flore et variables climatiques aurait été nettement plus complexe à partir

des valeurs acquises par des stations météorologiques ponctuelles et réparties de façon hétérogène sur le territoire. Les données de sortie des modèles SAFRAN et ISBA sont également homogénéisées sur l'ensemble du territoire en tenant compte de la topographie, ce qui n'est bien sûr pas le cas des données brutes. Pour toutes ces raisons, les valeurs modélisées et spatialisées pour les variables climatiques (Tab. IV) ont été utilisées.

Tab. IV. Liste des métadonnées, variables climatiques disponibles et 10 variables sélectionnées (en gras italique).

Mnémoniques	Libellés	Unités
LAMBX	E en Lambert II étendu	hm
LAMBY	N en Lambert II étendu	hm
DATE	Date	AAAAMMJJ
PRENEI	Précipitations solides (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
PRELIQ	Précipitations liquides (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
PE	Pluies efficaces (cumul quotidien)	mm et dixièmes
TMOY	Température (moyenne quotidienne)	°C et dixièmes
TINF	Température minimale des 24 températures horaires	°C et dixièmes
TSUP	Température maximale des 24 températures horaires	°C et dixièmes
FF	Vent (moyenne quotidienne)	m/s et dixièmes
RAY (DLI)	Rayonnement atmosphérique (cumul quotidien)	J/cm ²
SSI	Rayonnement visible (cumul quotidien)	J/cm ²
EVAP	Evapotranspiration réelle (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
ETP	Evapotranspiration potentielle (formule de Penman-Monteith)	mm et dixièmes
Q	Humidité spécifique (moyenne quotidienne)	kg/kg
HU_AIR	Humidité relative (moyenne quotidienne)	%
SWI	Indice d'humidité des sols (moyenne quotidienne 06-06 UTC)	%
DRAINC	Drainage (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
RUNC	Ruissellement (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
WG_RACINE	Contenu en eau liquide dans la couche racinaire à 06 UTC	m ³ /m ³
WGI_RACINE	Contenu en eau gelée dans la couche de racinaire à 06 UTC	m ³ /m ³
RESR_NEIGE	Equivalent en eau du manteau neigeux (moyenne quotidienne 06-06 UTC)	mm et dixièmes
RESR_NEIGE6	Equivalent en eau du manteau neigeux à 06 UTC	mm et dixièmes
HTEURNEIGE	Epaisseur du manteau neigeux (moyenne quotidienne 06-06 UTC)	m
HTEURNEIGE6	Epaisseur du manteau à 06 UTC	m
HTEURNEIGEX	Epaisseur du manteau neigeux maximum au cours de la journée	m
SNOW_FRAC	Fraction de maille recouverte par la neige (moyenne quotidienne 06-06 UTC)	%
ECOULEMENT	Ecoulement à la base du manteau neigeux	mm et dixièmes

Cette modélisation repose sur deux composants, SAFRAN et ISBA :

- Le modèle SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie) utilise des observations de surface issues de l'ensemble du parc de stations météorologiques de Météo France, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire les paramètres nécessaires au fonctionnement d'ISBA. Ces paramètres météorologiques sont analysés par pas de 300 m d'altitude puis interpolés sur la grille de calcul régulière de 8 km de côté.
- Le modèle ISBA (Interaction sol-biosphère-atmosphère) intervient donc ensuite pour simuler les échanges d'eau et d'énergie entre le sol et l'atmosphère. Il considère trois couches de sol (surface, zone racinaire, zone profonde), et deux températures (température de surface globale du continuum sol-végétation et température profonde) pour calculer l'ensemble des flux d'eau avec l'atmosphère (interception, évaporation, transpiration) et avec le sol (ruissellement des précipitations et drainage dans le sol).

La combinaison de ces deux modèles aboutit pour chaque maille à la production de valeurs quotidiennes pour 25 variables climatiques dont 10 ont été sélectionnées pour poursuivre notre étude (Tab. IV). Cette sélection a pour premier objectif de simplifier l'interprétation des résultats en limitant le nombre de variables supposées redondantes ou inadéquates dans le cadre de cette étude. Les différents indicateurs associés à la couverture neigeuse ont ainsi été mis de côté, tout comme la force du vent, la pluie efficace ou le drainage.

Les données quotidiennes ont ensuite été moyennées pour obtenir des variables climatiques sur une échelle mensuelle, puis saisonnière et annuelle. Enfin, un tri a été effectué pour ne retenir que les 1469 mailles de 8 km de côté correspondant au territoire de la Nouvelle-Aquitaine (Fig. 33 et Annexe 1).

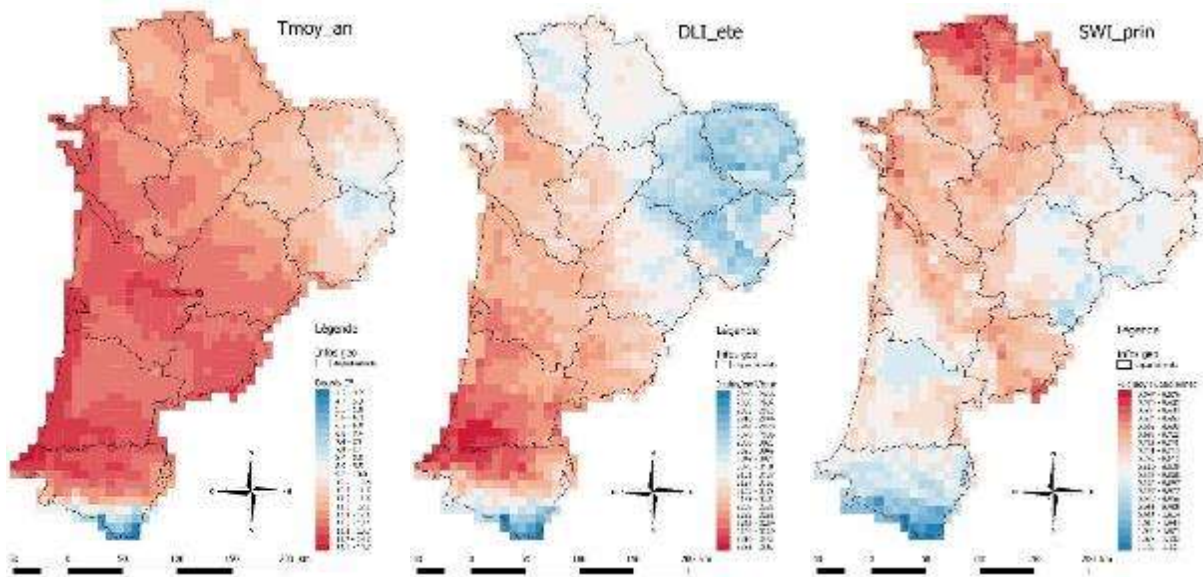


Fig. 33. Exemples de cartes de variables climatiques pour la Nouvelle-Aquitaine.

• Données floristiques

Les données floristiques proviennent de l'Observatoire de la Biodiversité Végétale de Nouvelle-Aquitaine (OBV, 2018), et plus précisément de la base de données « Flore, Fonge, Habitats » gérée par le CBNSA en partenariat avec les CBN Massif Central et Pyrénées et Midi-Pyrénées. Celle-ci rassemble les observations floristiques effectuées par les botanistes des trois CBN sur le territoire de la Nouvelle-Aquitaine, et ce depuis leur création et l'acquisition de données dans le cadre de leurs missions d'inventaires. Les relevés floristiques sont ainsi archivés, au fur et à mesure de leur production, et centralisés au sein d'une même base. Ils sont systématiquement associés à un pointage GPS qui permet de les géolocaliser précisément et ainsi d'interroger la base à partir de requêtes géographiques. L'OBV recense également les observations de partenaires (associations naturalistes, collectivités territoriales gestionnaires d'espaces naturels, bureaux d'études, etc.) acquises à travers leurs projets.

Afin de pouvoir confronter ces données floristiques avec celles issues du modèle SAFRAN-ISBA de Météo France, le découpage du territoire de Nouvelle-Aquitaine en mailles de 8 kilomètres de côté a été conservé. Chaque observation ponctuelle est ainsi associée à la maille dans laquelle figurait son

pointage GPS, l'objectif étant de produire un recensement qualitatif des taxons présents, et ce quel que soit le nombre de mentions de présence pour une même maille.

Parmi la somme des informations rassemblées, une petite partie provenait de relevés de type phytosociologique. La présence des taxons y est alors associée avec un coefficient d'abondance/dominance dit de Braun-Blanquet (BOUZILLE, 2007 ; ROYER, 2009 ; MEDDOUR, 2011). Les autres relevés, qui constituent une large majorité des enregistrements, correspondaient en revanche à des relevés de type floristique. Dans ce cas, seules les présences de chacune des espèces rencontrées sont mentionnées.

Le choix de ne retenir que les données qualitatives de présence des taxons s'est donc en grande partie appuyé sur la nette domination des relevés floristiques dans la base. D'autre part, l'expérience de terrain des botanistes du CBNSA, ainsi que les études menées au sein du programme RENECOFOR de l'ONF (ARCHAUX *et al.*, 2007 ; ARCHAUX *et al.*, 2009 ; NICOLAS *et al.*, 2013), montrent que la fiabilité des indices d'abondance/dominance pouvait assez largement être remise en question, particulièrement dans le cas des taxons de la strate arbustive (ARCHAUX *et al.*, 2009). Sur cette base, et dans le cadre d'une étude statistique à l'échelle régionale, seule l'information de présence des taxons a été gardée et les coefficients ont été mis de côté dans un premier temps.

La sélection et l'extraction des données floristiques ont ensuite été effectuées en tenant compte de la nature des données, des protocoles de collecte et de la précision géographique. En effet, de fortes disparités dans le rythme d'acquisition de la donnée, les méthodes employées et les secteurs échantillonnés peuvent générer des données fragmentaires et non harmonisées. Nous avons donc fait le choix de n'utiliser que celles produites et intégrées à l'OBV entre le 01/01/2000 et le moment de la requête, à savoir le 01/06/2018. Cet intervalle correspond à la période d'activité du CBNSA au cours de laquelle les méthodes d'acquisition et de centralisation des données ont été standardisées.

Toutefois, il demeure une certaine hétérogénéité dans les méthodes d'échantillonnage de la flore au cours de cette période. Ainsi, entre 2000 et 2013, l'amélioration des connaissances a été exclusivement le fruit de programmes ciblant certains milieux ou habitats, ou encore certains territoires. C'est à partir de l'année 2013 qu'a été mis en place un inventaire systématique non ciblé de l'ensemble de la flore de 6 départements du territoire d'agrément du CBNSA. Il est effectué par mailles de 5 kilomètres (OFSA, 2012) et vient en complément de missions plus ciblées qui sont toujours menées à bien.

Ces 2 grandes phases d'acquisition des données, de par les moyens mis en œuvre et la différence entre les objectifs poursuivis, se montrent assez complémentaires en termes de connaissance globale de la flore à l'échelle du territoire de Nouvelle-Aquitaine. En effet, si les méthodes appliquées au cours de la première période sont généralement associées à un effort d'échantillonnage par unité de surface plus important, et donc à un meilleur taux de détection des espèces rares, elles restent en revanche trop fragmentaires lorsque l'on considère une échelle plus vaste. L'inventaire systématique permet alors de combler ces lacunes en considérant l'ensemble des milieux naturels et semi-naturels. Les relevés couvrant la période 2000-2018 ont ainsi été rassemblés et considérés comme représentatifs de la végétation de l'ensemble de cette période.

Un seuillage bas a également été appliqué par rapport au nombre de mailles associées à la présence de chaque taxon (+ de 20 mailles de présence). Dans une analyse statistique visant à identifier des taxons présentant une affinité avec un type de climat particulier, la probabilité est élevée quand les plantes les plus rares sont celles qui ressortent le plus clairement du lot. Cependant, ce résultat

pourrait être davantage dû aux faibles effectifs de ces espèces qu'à leur éventuelle particularité climatique. A l'inverse, les taxons présents dans un nombre plus conséquent de mailles ont de plus fortes chances de se voir associés à un climat plus moyen car ils couvrent un espace géographique plus important et donc moins spécifique. Par ailleurs, l'objectif de ces travaux étant d'identifier des plantes qui pourraient à l'avenir faire l'objet de mesures de protection, il apparaît peu pertinent d'inclure des taxons qui, s'ils sont très rares dans la région, sont généralement déjà classés comme espèces protégées.

Enfin, compte-tenu de la nature exploratoire de cette étude, ce n'est pas l'ensemble des quelques 4000 espèces, et plus de 5000 taxons (sous-espèces, variétés, accommodats, etc.) présentes en Nouvelle-Aquitaine qui ont été étudiés mais uniquement une sélection de 51 taxons réalisée à dire d'expert (Tab. V). Ces espèces ont été choisies pour leur sensibilité supposée au changement climatique (en termes de régression ou de progression potentielles), leur caractère emblématique d'un milieu ou d'un habitat ciblé par le programme « les sentinelles du Climat », leur relative rareté en Nouvelle-Aquitaine, ou encore leur caractère endémique dans la région.

Tab. V. Liste des 51 espèces sélectionnées, regroupées par écosystème cible du programme.

<i>cd_ref</i>	<i>Mnémoniques</i>	<i>Taxons</i>	<i>Ecosystèmes « Sentinelles »</i>	<i>Syntaxons préférentiels</i>
106863	Luzu.syl	Luzula sylvatica	Hêtraies	Quercetalia roboris
161784	Tract.lil.hya	Tractema lilio-hyacinthus	Hêtraies	Scillo lilio-hyacinthi – Fagenion sylvaticae
103057	Hyac.n.scr	Hyacinthoides non-scripta	Hêtraies	Endymio non-scriptae – Fagenion sylvaticae
109297	Narc.pse	Narcissus pseudonarcissus	Hêtraies	
101202	Helle.vir	Helleborus viridis	Hêtraies	Scillo lilio-hyacinthi – Fagenion sylvaticae
99488	Gali.odo	Galium odoratum	Hêtraies	Fagetalia sylvaticae
108537	Mili. eff	Milium effusum	Hêtraies	Fagetalia sylvaticae
97947	Fagu.syl	Fagus sylvatica	Hêtraies	Fagetalia sylvaticae
89200	Carp.bet	Carpinus betulus	Hêtraies	Carpino betuli – Fagetalia sylvaticae
88470	Care.dig	Carex digitata	Hêtraies	Fagetalia sylvaticae
97544	Euph.hyb	Euphorbia hyberna	Hêtraies	Scillo lilio-hyacinthi – Fagenion sylvaticae
124308	Sorb.auc	Sorbus aucuparia	Hêtraies	Fagetalia sylvaticae
128345	Vacc.myr	Vaccinium myrtillus	Hêtraies	Quercetalia roboris
96691	Eric.sco	Erica scoparia	Landes/tourbières	Ulici europaei – Cytision striati
96665	Eric.cil	Erica ciliaris	Landes/tourbières	Ulici minoris – Ericenion ciliaris
99922	Gent.pneu	Gentiana pneumonanthe	Landes/tourbières	Juncion acutiflori
6760	Sphag.mag	Sphagnum magellanicum	Landes/tourbières	Oxycocco palustris – Ericion tetralicis
96844	Erio.ang	Eriophorum angustifolium	Landes/tourbières	Scheuchzerietalia palustris
95442	Dros.rot	Drosera rotundifolia	Landes/tourbières	Scheuchzerietalia palustris
112426	Parn.pal	Parnassia palustris	Landes/tourbières	Scheuchzerietalia palustris
109372	Nart.oss	Narthecium ossifragum	Landes/tourbières	Scheuchzerietalia palustris
88489	Care.ech	Carex echinata	Landes/tourbières	Caricion fuscae
611455	Rhap.con	Rhaponticum coniferum	Pelouses sèches calcicoles	Xerobromenion erecti
124842	Stae.dub	Staelia dubia	Pelouses sèches calcicoles	Xerobromenion erecti
99015	Fuma.eri	Fumana ericifolia	Pelouses sèches calcicoles	Xerobromenion erecti
83722	Argy.zan	Argyrolobium zanonii	Pelouses sèches calcicoles	Xerobromenion erecti
141089	Side.hys	Sideritis hyssopifolia subsp. guillonii	Pelouses sèches calcicoles	Xerobromenion erecti
105312	Lava.lat	Lavandula latifolia	Pelouses sèches calcicoles	Xerobromenion erecti
83565	Aren.con	Arenaria controversa	Pelouses sèches calcicoles	Trachynion distachyae

<i>cd_ref</i>	<i>Mnémoniques</i>	<i>Taxons</i>	<i>Ecosystèmes « Sentinelles »</i>	<i>Syntaxons préférentiels</i>
123071	Sesl.cae	Sesleria caerulea	Pelouses sèches calcicoles	Seslerio caeruleae – Xerobromenion erecti
88582	Care.hum	Carex humilis	Pelouses sèches calcicoles	Seslerio caeruleae – Xerobromenion erecti
113748	Pist.ter	Pistachia terebinthus	Pelouses sèches calcicoles	Pistachio lentisci – Rhamnetalia alaterni
106419	Litt.uni	Littorella uniflora	Gazons amphibies des lagunes/Etangs	Elodo palustris – Sparganion
103842	Isoe.his	Isoetes histrix	Gazons amphibies des lagunes/Etangs	Isoetetalia – velatae
608144	Caro.ver.inu	Caropsis verticillato-inundata	Gazons amphibies des lagunes/Etangs	Elodo palustris – Sparganion
718211	Bald.rep.cav	Baldellia repens subsp. cavanelliesii	Gazons amphibies des lagunes/Etangs	Elodo palustris – Sparganion
106807	Luro.nat	Luronium natans	Gazons amphibies des lagunes/Etangs	Elodo palustris – Sparganion
113547	Pilu.glo	Pilularia globulifera	Gazons amphibies des lagunes/Etangs	Elodo palustris – Sparganion
128315	Utric.min	Utricularia minor	Gazons amphibies des lagunes/Etangs	Utricularietalia intermedio-minoris
83874	Arni.mon	Arnica montana	Pelouses psychrophiles acidiphiles	Galio saxatilis – Festucion filiformis
109366	Nard.str	Nardus stricta	Pelouses psychrophiles acidiphiles	Galio saxatilis – Festucion filiformis
82796	Ante.dio	Antennaria dioica	Pelouses psychrophiles acidiphiles	Galio saxatilis – Festucion filiformis
80988	Ajug.pyr	Ajuga pyramidalis	Pelouses psychrophiles acidiphiles	Galio saxatilis – Festucion filiformis
99903	Gent.lut	Gentiana lutea	Pelouses psychrophiles acidiphiles	Galio saxatilis – Festucion filiformis
101942	Hier.eri	Hieracium eriophorum	Dunes littorales	Euphorbio portlandicae – Helichryson stoechadis
94427	Daph.gni	Daphne gnidium	Dunes littorales	Pruno spinosae – Rubion ulmifoli
113142	Phill.ang	Phillyrea angustifolia	Dunes littorales	Pruno spinosae – Rubion ulmifoli
141198	Sile.uni.thor	Silene uniflora subsp. thorei	Dunes littorales	Ammophilion arenariae
116704	Quer.ile	Quercus ilex	Dunes littorales	Quercetalia ilicis
116774	Quer.sub	Quercus suber	Dunes littorales	Quercetalia ilicis
84802	Astr.bai	Astragalus baionensis	Dunes littorales	Ammophilion arenariae

La Fig. 34 illustre la répartition géographique des 68 805 relevés mentionnant la présence de l'une au moins de ces 51 espèces. Certaines mailles, principalement dans l'ex-région Poitou-Charentes, semblent dépourvues de ces espèces. Cependant, il faut plutôt y voir un effet du moindre effort de prospection ; le programme d'inventaires systématiques n'ayant pas débuté dans 3 départements. Le CBN Massif Central a réalisé l'inventaire systématique en Limousin au milieu des années 2000.

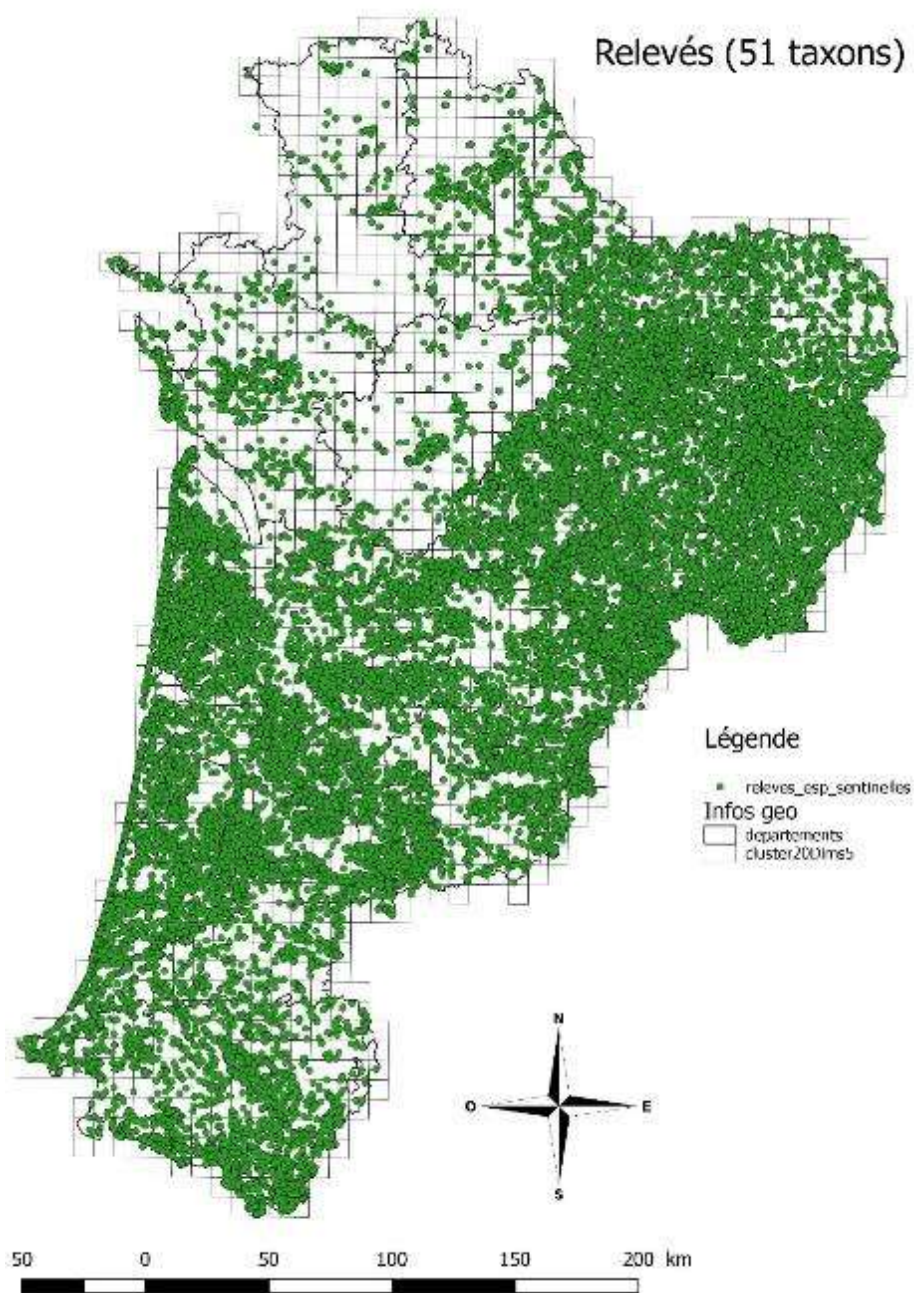


Fig. 34. Carte de localisation des relevés floristiques et/ou phytosociologiques de Nouvelle-Aquitaine attestant de la présence d'au moins une des 51 espèces sélectionnées.

On aboutit ainsi à un jeu de données « Flore » qui associe chacune des 1469 mailles (8x8km) de Nouvelle-Aquitaine à des mentions qualitatives de présence / pseudo-absence pour les 51 taxons étudiés (Fig. 35).

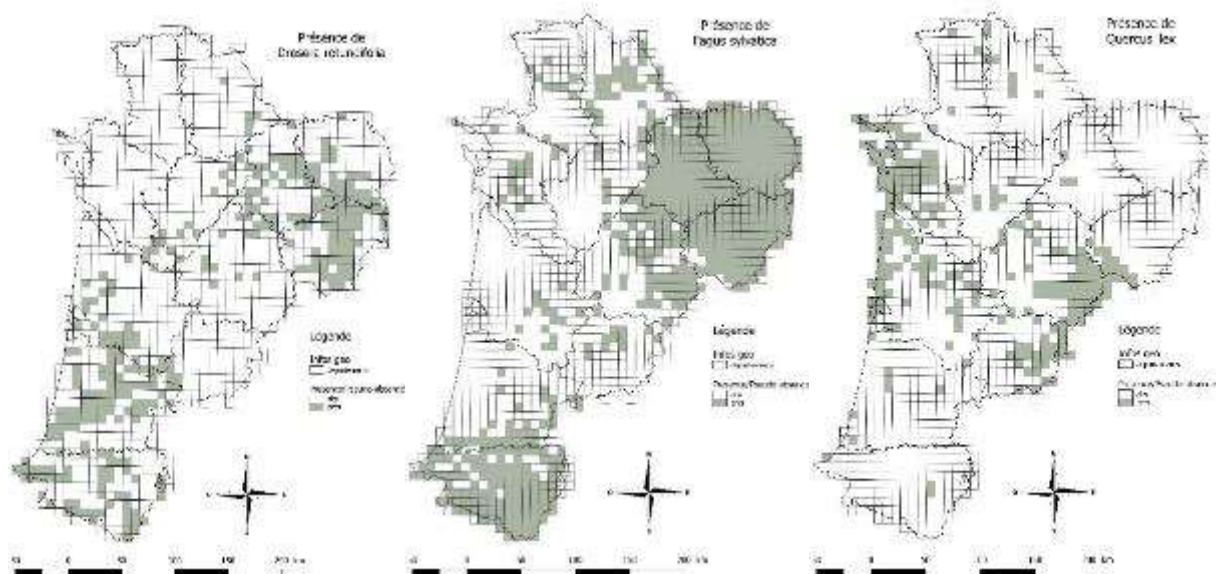


Fig. 35. Exemples de présence et pseudo-absences de trois espèces en Nouvelle-Aquitaine

Il s'agit bien ici de pseudo-absences et pas d'absences strictes. En effet, celles-ci peuvent en général difficilement être prouvées. Même dans le cas de plantes rares dans certaines localités, nous ne pouvons jamais tout à fait exclure leur présence discrète qui aurait pu échapper aux botanistes. Le problème est d'autant plus fréquent lorsque l'on herborise en limite d'aire de répartition d'un taxon. La probabilité de « passer à côté » est alors d'autant plus importante que sa fréquence décroît dans le paysage en s'éloignant du cœur de la population. Cependant, par commodité de langage, nous continuerons à utiliser plutôt le terme d'absence que celui de pseudo-absence dans le reste du document.

2.3.2 Traitement statistique des données par analyse multivariée

Les analyses multivariées se prêtent bien au traitement de jeux de données présentant de nombreuses variables. Elles permettent non seulement de faire ressortir les variables ou individus qui contribuent le plus à la variance globale, mais aussi de relier des variables ou individus entre eux selon qu'ils sont considérés comme proches, opposés ou sans lien.

Elles permettent aussi et surtout de réduire le nombre de dimensions nécessaires à la compréhension des relations entre les individus, sans pour autant altérer la richesse de l'information de départ. Pour la réalisation de cette première analyse multivariée sur la base des 10 variables climatiques sélectionnées plus haut (Tab. IV), c'est l'échelle saisonnière qui est retenue. Ce niveau de découpage temporel semble présenter un bon compromis entre la précision apportée par les moyennes mensuelles et l'aspect trop synthétique des moyennes annuelles. Il permet également de conserver l'information sur la saisonnalité du climat qui peut être assez marquée dans la région. Ceci porte donc le nombre de variables climatiques entrant en jeu dans le calcul à 40 (10 variables sur 4 saisons), ce qui s'avère trop complexe pour une analyse descriptive simple de l'interaction de ces variables avec les données floristiques (51 espèces).

Pour toutes ces raisons, un premier protocole de traitement statistique des données par le biais d'une analyse multivariée a été mis en place, sur la base de notre jeu de données restreint, de manière à pouvoir étendre cette approche à un jeu de données plus large à l'avenir.

- **Choix d'une méthode d'analyse statistique multivariée**

Il existe de nombreuses variantes de ces méthodes avec chacune leurs spécificités. Certaines méthodes permettent de traiter en simultané des données de type quantitatif et qualitatif. C'est notamment le cas de l'AFDM (Analyse Factorielle de Données Mixtes) et de l'AFM (Analyse Factorielle Multiple). Cette dernière autorise en outre la création de groupes de variables qui seront eux-mêmes projetés sur les différentes dimensions de l'analyse.

Compte-tenu de la nature à la fois qualitative (présence/absence de chacune des espèces dans les mailles) et quantitative (valeurs des variables climatiques) des données recueillies pour cette étude, et de l'intérêt d'associer des variables entre elles, c'est vers l'AFM que s'est logiquement porté notre choix.

Les valeurs des différentes variables quantitatives ont par ailleurs été centrées et réduites afin de donner la même importance à toutes les variables climatiques et de ne pas accorder plus de valeur à celles présentant une amplitude de variation plus importante du seul fait de leurs unités différentes.

L'analyse a été conduite sous R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2018) avec le package *FactoMineR* (LE et al., 2008 ; HUSSON et al., 2018).

- **Choix des variables**

Dans notre étude, les variables climatiques saisonnières (quantitatives) ont été définies comme actives et les variables floristiques (qualitatives) ont été considérées comme illustratives (Tab. VI).

Cette première étude ne portant pour l'instant que sur une cinquantaine de taxons et non pas sur tout l'éventail de la biodiversité floristique régionale, il apparaît logique de baser le calcul sur la partie « stable » du jeu de données, c'est-à-dire sur les variables climatiques. L'un des objectifs futurs étant de passer d'une sélection réduite de plantes étudiées à un panel beaucoup plus large voire exhaustif

des espèces, il était intéressant dans un premier temps de fixer l'association maille/climat plutôt que de fixer une association maille/groupe de plantes. Celle-ci aurait de toute façon été amenée à être modifiée suite à l'insertion de nouvelles espèces dans le jeu de données actives.

Ainsi, les données climatiques sélectionnées ont été intégrées à l'analyse en tant que variables actives. Ceci permet donc d'associer chaque maille à un type de climat, tel que défini par ces dix variables, pour en tirer ensuite des conclusions vis-à-vis des plantes présentes dans cette maille. L'ajout ultérieur de nouveaux taxons ne viendra pas modifier cette association mais enrichira les conclusions sur le plan floristique.

Tab. VI. Choix des groupes de variables actives et illustratives pour l'AFM

		Groupes de variables	Variables
variables illustratives	Hétraies		Luna_ort
			Tract_ill_hya
			Hyac_nesol
			Narc_ose
			Helle_vir
			Galindo
			Mil_eff
			Fogu_ort
			Caro_bot
			Care_dig
			Euph_hyb
			Sorb_auc
			Vacc_myr
			Eric_sob
			Eric_ol
	Landes / Tourbières		Gent_pneu
			Schag_meg
			Eric_ang
			Dros_rot
			Parn_pal
			Nart_osa
			Care_ech
			Rhap_con
			Slax_dub
			Fuma_ort
	Pelouses sèches calcareoles		Argy_zan
			Sida_hys
			Lava_lot
			Aren_con
			Resl_cae
			Care_hum
			Pist_for
			Lif_uni
			Isoc_his
			Caro_ver_litu
	Gazons amphibies des lagunes / Etangs		Solidrep_cav
			Lumo_nat
			Pitu_glo
			Utric_min
			Arnimon
			Nard_etr
	Pelouses psychrophiles acidiphiles		Arhe_de
		Aug_ort	
		Gant_lut	
		Hier_en	
		Daph_ort	
Dunes littorales		Phil_ang	
		Sileun_thor	
		Quer_fe	
		Quer_sub	
		Astr_bal	
variables actives	Proiq		Freqq_pdn
			Freqq_ete
			Freqq_aut
			Freqq_hiv
	Tmoy		Tmoy_pdn
			Tmoy_ete
			Tmoy_aut
			Tmoy_hiv
	Tinf		Tinf_pdn
			Tinf_ete
			Tinf_aut
			Tinf_hiv
	Tsup		Tsup_pdn
			Tsup_ete
			Tsup_aut
			Tsup_hiv
	Ray		OU_pdn
			OU_ete
			OU_aut
			OU_hiv
Evap		Evap_pdn	
		Evap_ete	
		Evap_aut	
		Evap_hiv	
ETP		ETP_pdn	
		ETP_ete	
		ETP_aut	
		ETP_hiv	
Hu_air		Hu_air_pdn	
		Hu_air_ete	
		Hu_air_aut	
		Hu_air_hiv	
SWI		SWI_pdn	
		SWI_ete	
		SWI_aut	
		SWI_hiv	
Racine		Racine_pdn	
		Racine_ete	
		Racine_aut	
		Racine_hiv	

2.3.3 Résultats des traitements par analyses multivariées

- Dimensions

Chaque dimension résume une partie de la variance totale du jeu de données. A partir du jeu de données rassemblées ici, il faudrait examiner les douze premières dimensions pour arriver à décrire près de 100 % de la variance totale.

Les deux premières dimensions totalisent un peu plus de 60% du total, ce qui est relativement correct mais pas suffisant pour résumer toute la variabilité du jeu de données. Il faut prendre en compte les sept premières dimensions pour dépasser les 95% (Fig. 36 et Tab. VII).

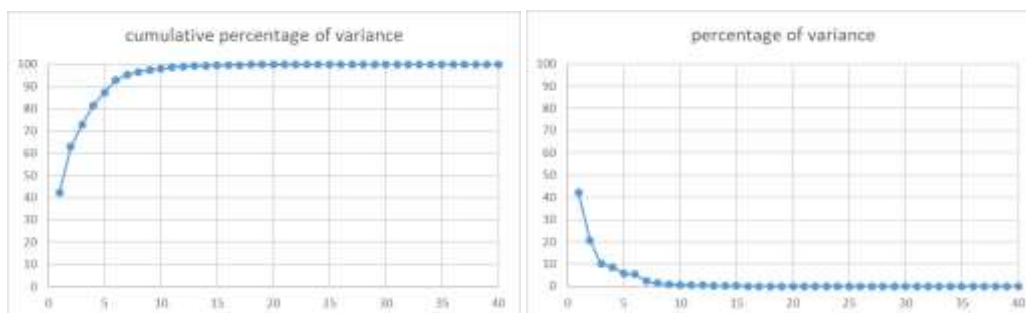


Fig. 36. Evolution de la variance expliquée en fonction du nombre de dimensions considérées.

L'AFM remplit bien son rôle de simplification. Nous passons en effet de 40 variables actives à 7 dimensions expliquant la quasi-totalité de la variance du jeu de données, les 2 premières en résumant à elles seules près des deux tiers.

Tab. VII. Pourcentages de variance pour les 7 premières dimensions de l'AFM

	Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4	Dim 5	Dim 6	Dim 7
Variance	5,3951	2,6465	1,28	1,1045	0,7437	0,7022	0,2999
% of variance	42,2008	20,7007	10,0125	8,6395	5,8175	5,4926	2,3462
cumulative % of var.	42,2008	62,9015	72,9141	81,5536	87,3711	92,8637	95,2098

- Variables actives

Pour la 1^{ère} dimension, la partie gauche du graphique (Fig. 37) regroupe des mailles issues des régions relativement froides toute l'année, peu ensoleillées et où il pleut suffisamment en période estivale pour que l'évaporation puisse continuer à être assez importante. Selon les cartes climatiques (Annexe 1), cela semble bien correspondre avec le Limousin et les Pyrénées béarnaises.

De l'autre côté du graphique, se retrouvent les zones qui, à l'inverse, connaissent des étés plus secs et où la température est en moyenne plus clémente toute l'année. La plupart des départements

• **Classification Ascendante Hiérarchique des mailles**

Nous avons opéré une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les résultats des 7 premières dimensions de l'AFM pour les individus, de façon à rassembler des groupes de mailles présentant des affinités climatiques de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'on descend dans l'échelle de la classification (Fig. 38 et Fig. 39).

La représentation cartographique de ces groupes de mailles (Fig. 40) permet ensuite de visualiser l'emprise géographique de chacune des zones climatiques ainsi délimitées.

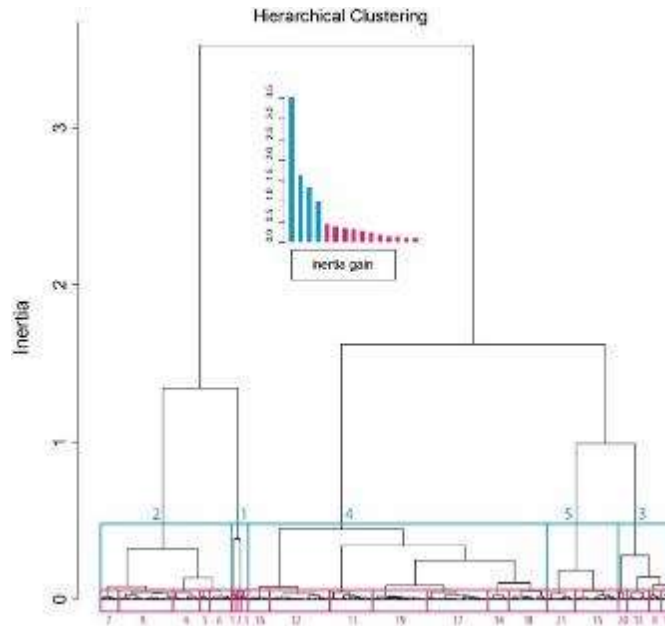


Fig. 38. Dendrogramme des mailles obtenu à partir de la Classification Hiérarchique Ascendante des résultats de l'AFM pour les 7 premières dimensions.

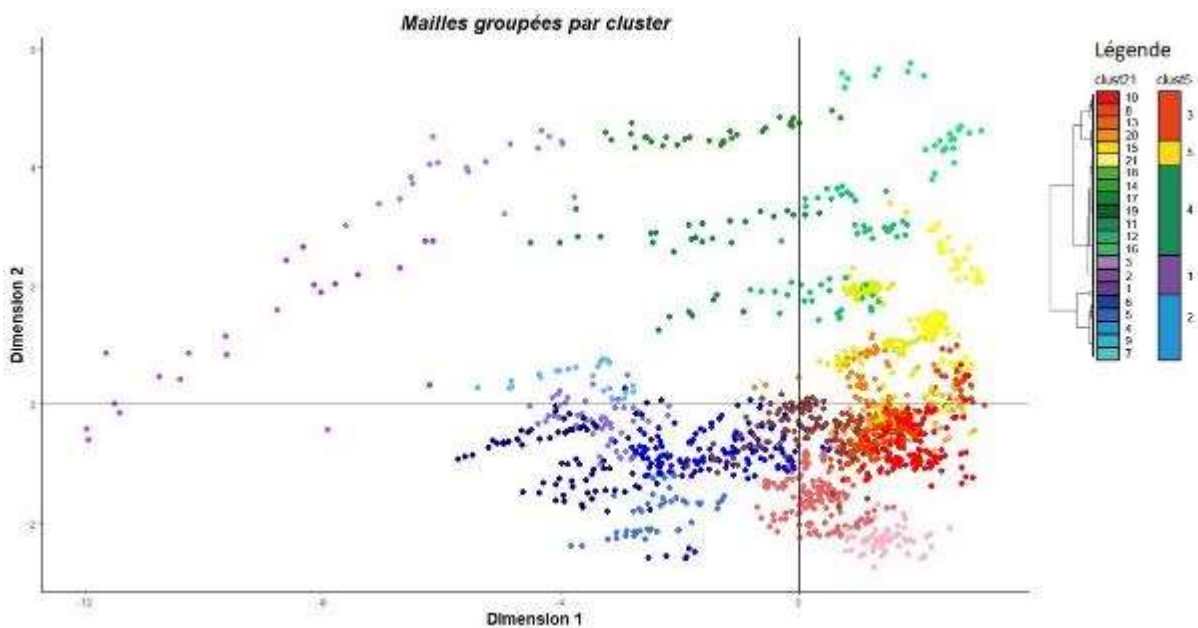


Fig. 39. Regroupement des mailles en 21 clusters.

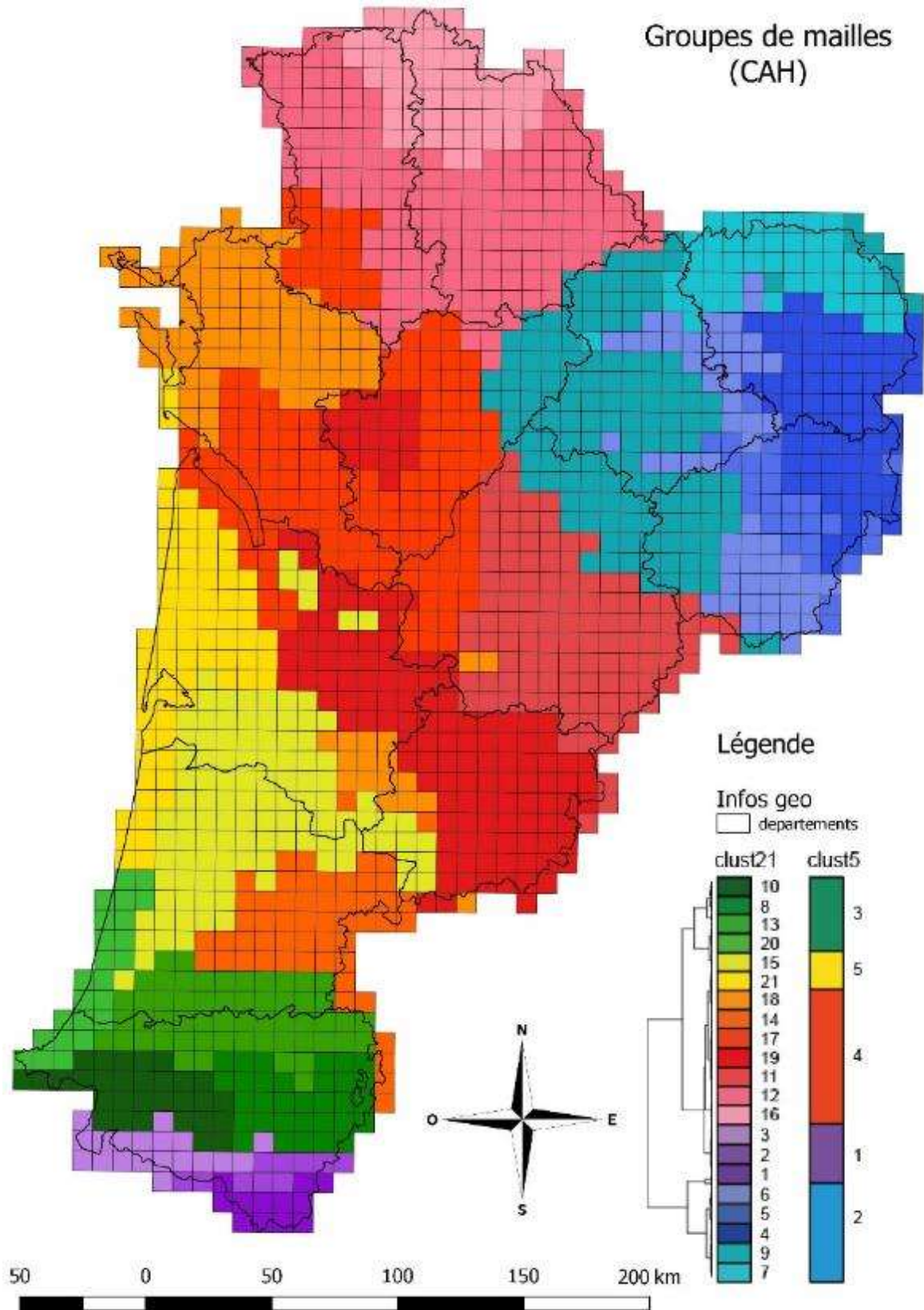


Fig. 40. Carte des mailles regroupées par clusters selon deux niveaux de découpage (5 et 21 clusters).

Au niveau de découpage en 5 groupes (clusters), les principaux traits climatiques structurants de la région Nouvelle-Aquitaine apparaissent (Tab. VIII) : le Limousin (cluster 2, en bleu), la chaîne des Pyrénées (cluster 1, en violet), la partie nord des Pyrénées-Atlantiques et la bordure méridionale des Landes (cluster 3, en vert), le plateau landais et le Médoc (cluster 5, en jaune), la grande partie centrale (cluster 4, orange-rouge) qui s'étend en diagonale, du nord-ouest avec le Poitou-Charentes au sud-est avec le Lot-et-Garonne, la Dordogne et la partie orientale des Landes.

Le niveau de découpage plus fin (21 clusters) permet ensuite de percevoir des nuances à l'intérieur de ces grands ensembles climatiques.

Dans l'optique de déterminer des liens entre des espèces et des conditions climatiques particulières, l'un des résultats les plus notables de cette classification est la mise en évidence de relations d'association plus ou moins fortes entre les zones climatiques (groupes de mailles) et la présence ou l'absence de certaines plantes (Tab. IX).

Le premier indice, Classe/Modalité, permet de se faire une idée de la spécificité (*Spé*) d'une espèce vis-à-vis d'une zone climatique, tandis que le second, Modalité/Classe, renseigne sur la fréquence (*Freq*) de cette même espèce dans le groupe de mailles en question.

Ainsi, certains taxons peuvent s'avérer tout à fait spécifiques d'une zone sans pour autant que leur présence y soit commune. C'est notamment le cas d'*Antennaria dioica* pour les Pyrénées (cluster 1), de *Sphagnum magellanicum* pour le Limousin (cluster 2) ou encore de *Hieracium eriophorum* pour le Pays Basque et le Béarn (cluster 3). Pour ces taxons, toute modification des paramètres climatiques de la zone géographique dont ils semblent fortement dépendants aura très probablement une influence sur leur répartition, ou du moins sur la dynamique de leurs populations.

Tab. VIII. V-test des variables climatiques significativement supérieures ou inférieures à la moyenne régionale

Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3		Cluster 4		Cluster 5	
var clim	v-test	var clim	v-test	var clim	v-test	var clim	v-test	var clim	v-test
preliq_aut	20,5442	evap_ete	24,8327	hu_ete	15,2354	etp_ete	21,6154	ray_prin	14,9451
preliq_ete	20,7234	preliq_ete	26,4882	preliq_hiv	17,7671	etp_prin	17,6541	ray_ete	14,6202
swi_prin	15,7003	evap_prin	17,7858	preliq_aut	11,0892	hu_hiv	17,5019	ray_aut	14,4765
evap_aut	18,7883	preliq_prin	13,9882	preliq_prin	19,0186	racine_hiv	16,0055	swi_hiv	14,4136
swi_aut	17,8091	evap_aut	13,4405	tsup_hiv	17,7055	ray_hiv	16,0441	ray_hiv	14,3626
swi_ete	15,8839	hu_aut	19,4432	etp_hiv	17,7852	tsup_ete	15,8746	tsup_hiv	13,2707
evap_ete	14,0754	swi_prin	6,0859	swi_aut	16,8331	tmoy_ete	15,7677	tsup_aut	12,7045
preliq_prin	13,0744	swi_ete	6,0713	evap_aut	16,0776	racine_prin	14,6446	evap_hiv	12,1101
etp_hiv	11,1112	swi_hiv	3,5503	swi_ete	15,3104	ray_aut	11,8254	tsup_prin	11,2588
swi_hiv	10,7443	preliq_aut	11,1567	ray_ete	14,3302	racine_ete	13,8547	tmoy_hiv	11,2302
racine_aut	7,3871	preliq_hiv	11,7493	tmoy_hiv	14,4763	etp_aut	11,7028	tmoy_aut	10,4046
etp_aut	6,1071	hu_ete	12,1599	tinf_aut	12,4447	racine_aut	11,3638	tmoy_prin	10,3683
preliq_hiv	6,0956	hu_prin	11,2495	tmoy_aut	12,3748	tmoy_prin	11,3899	etp_hiv	9,3717
racine_ete	6,0138	etp_ete	10,1312	swi_prin	12,3366	tinf_hiv	11,1802	tinf_prin	9,2705
racine_prin	5,1462	etp_prin	12,5757	tsup_aut	12,1786	tinf_ete	11,0511	tinf_hiv	9,2717
racine_hiv	2,3089	tsup_ete	16,6548	ray_prin	10,7865	tsup_prin	11,2837	etp_aut	8,3833
etp_ete	1,8386	evap_hiv	17,2234	ray_hiv	10,7727	tmoy_aut	11,3825	tsup_ete	8,3666
hu_ete	1,9982	tsup_prin	18,1743	tinf_hiv	10,3117	tinf_prin	11,2509	tinf_ete	8,2718
evap_hiv	1,8421	tmoy_ete	19,1025	evap_ete	10,5772	tinf_aut	10,9868	tinf_aut	8,1743
ray_ete	1,3352	tmoy_prin	20,3616	tinf_ete	10,7168	ray_prin	10,9741	tmoy_ete	8,0128
hu_prin	1,9535	tinf_ete	20,6588	swi_hiv	10,5456	tmoy_hiv	10,6227	swi_aut	7,7285
ray_prin	10,0723	etp_hiv	20,9739	racine_aut	10,9199	tsup_aut	11,126	hu_ete	5,9011
etp_prin	11,151	tinf_prin	21,0704	preliq_ete	10,7969	ray_ete	10,4487	preliq_hiv	5,724
tinf_aut	12,3979	tsup_aut	21,8519	tmoy_prin	10,3807	tsup_hiv	10,152	swi_prin	5,636
ray_aut	13,3591	tsup_hiv	23,1329	evap_ete	10,6532	evap_hiv	10,4568	etp_prin	4,8157
tinf_hiv	14,5945	tinf_aut	23,2482	racine_ete	10,5154	hu_aut	10,3402	hu_hiv	3,662
tsup_hiv	14,6524	tinf_hiv	23,5191	tsup_prin	10,8263	etp_hiv	10,7013	swi_ete	3,436
tmoy_hiv	14,9583	tmoy_aut	23,8394	racine_prin	10,5786	hu_ete	10,5577	hu_aut	2,3081
ray_hiv	15,0424	tmoy_hiv	24,2986	racine_hiv	10,517	preliq_hiv	10,1906	hu_prin	2,095
evap_prin	15,5165	etp_aut	24,8009	hu_prin	10,2984	swi_ete	10,6667	evap_aut	1,101
tmoy_aut	16,6321	ray_ete	25,7804	ray_aut	10,8732	swi_prin	10,0644	preliq_prin	1,668
tinf_ete	17,3421	ray_hiv	26,0962	tmoy_ete	10,1193	swi_hiv	10,4657	preliq_ete	1,098
tinf_prin	17,7059	ray_aut	26,5985	ray_hiv	10,4348	swi_aut	10,4782	evap_ete	1,102
tsup_aut	18,4356	ray_prin	27,6179	hu_aut	10,6288	evap_ete	10,8003	evap_prin	1,4535
tmoy_prin	18,4758			etp_prin	10,791	preliq_aut	10,1194	racine_aut	1,0216
tmoy_ete	18,3965			hu_hiv	10,74662	preliq_ete	10,3672	racine_ete	1,0801
tsup_prin	18,4159			etp_ete	10,1562	preliq_prin	10,1295	racine_hiv	1,0786
tsup_ete	18,0038					evap_aut	10,2495	racine_prin	1,4426
hu_hiv	18,9662								
hu_aut	18,2766								

A l'inverse, les plantes qui ont la caractéristique d'être à la fois non spécifiques d'une zone climatique et pourtant particulièrement communes dans cette zone n'apparaissent a priori pas comme celles qui sont associées aux plus forts enjeux. Dans cette catégorie, nous pouvons citer *Luzula sylvatica* pour les Pyrénées, *Carpinus betulus* pour le Limousin ou *Erica scoparia* pour le plateau landais (cluster 5).

Les valeurs de ces indices dépendent du niveau de découpage utilisé. Les résultats affichés ici sont donc relatifs à cette échelle de segmentation de la Nouvelle-Aquitaine et mériteraient d'être affinés à l'avenir en se basant sur un niveau de découpage plus précis pour mettre en valeur d'éventuelles spécificités locales et définir des zones à enjeux par espèces.

Nous pouvons néanmoins poursuivre la démarche à cette échelle en combinant ces deux indices pour en créer un nouveau qui permette de répondre plus précisément à la problématique initiale, à savoir déterminer la sensibilité des taxons au changement climatique en cours.

Cette sensibilité locale (S_{loc}) peut alors être définie comme variant entre 0 (aucune sensibilité) et 100 (très forte sensibilité) au niveau de chaque zone climatique à partir de la formule suivante :

$$S_{loc_{i_c}} = \left(\frac{Spé_{i_c}}{Fréq_{i_c}} \div S_{loc_{max_c}} \right) \times 100$$

avec : $Spé_{i_c}$ = Mod/Cla pour le taxon i dans le cluster c

$Fréq_{i_c}$ = Cla/Mod pour le taxon i dans le cluster c

$S_{loc_{max_c}}$ = valeur maximale de sensibilité locale pour l'ensemble des taxons dans le cluster c

Ensuite, la sensibilité au niveau régional (S_{reg}) est définie comme suit :

$$S_{reg_i} = \frac{S_{loc_{i_c}}}{S_{loc_{max}}}$$

avec : S_{reg_i} = Sensibilité régionale du taxon i

S_{loc_i} = Sensibilité locale du taxon i dans le cluster c

$S_{loc_{max}}$ = valeur maximale de sensibilité locale pour l'ensemble des taxons dans l'ensemble des clusters

Deux valeurs de sensibilité sont obtenues pour chaque taxon qui s'exprime en pourcentage (Tab. X).

Cette méthode se rapproche fortement de celle mise en place par Dufrêne & Legendre (1997) pour produire un indice, nommé INDVAL pour « INDicator VALue », qui associe des valeurs fortes à une fréquence importante du taxon sur la zone étudiée. Il vise à mettre en lumière la présence de taxons indicateurs d'un territoire donné. L'indice produit ici est en quelque sorte l'opposé de ce dernier, en cela que de fortes fréquences seront, à l'inverse, associées à de faibles valeurs d'indice.

Parmi les taxons sélectionnés pour cette étude, celui qui apparaît comme le plus sensible à l'échelle de la région Nouvelle-Aquitaine est *Pistachia terebinthus*. Si l'on combine cette information avec celle obtenue pour son affinité climatique, ce taxon plutôt thermophile et d'origine méditerranéenne, devrait connaître une certaine expansion dans les prochaines décennies. Du moins, sa zone de présence actuelle (cluster 4) pourrait évoluer vers des conditions qui lui seront favorables, entraînant l'extension de sa niche climatique en Nouvelle-Aquitaine et favorisant ainsi son développement.

A l'inverse, *Ajuga pyramidalis* et *Sphagnum magellanicum* devraient connaître un sort moins enviable. Leur affinité pour des climats relativement frais qui explique leur spécificité assez forte pour les Pyrénées et le Limousin (clusters 1 et 2), associée à leur sensibilité importante, amènent à placer ces deux espèces dans la catégorie des plantes menacées par le réchauffement climatique.

Tab. X. Indices de sensibilité des taxons à une modification du climat dans chacun des 5 principaux groupes de mailles.

Cluster 1			Cluster 2			Cluster 3		
espèce	sensibilité locale	sensibilité régionale	espèce	sensibilité locale	sensibilité régionale	espèce	sensibilité locale	sensibilité régionale
Ante.dio	100,0	5,7	Ajug.pyr	100,0	39,4	Phill.ang	100,0	39,1
Ajug.pyr	84,2	4,8	Sphag.mag	100,0	39,4	Hier.eri	61,5	24,0
Gent.lut	25,4	1,4	Gent.lut	30,2	11,9	Astr.bai	42,1	16,4
Care.dig	23,9	1,4	Arni.mon	27,5	10,9	Sile.uni.thor	25,0	9,8
Gali.odo	11,4	0,6	Luro.nat	18,6	7,3	Pilu.glo	9,6	3,8
Euph.hyb	10,1	0,6	Gali.odo	13,6	5,4	Quer.sub	7,6	3,0
Parn.pal	9,9	0,6	Litt.uni	13,1	5,2	Helle.vir	4,7	1,8
Helle.vir	9,5	0,5	Euph.hyb	12,0	4,7	Nart.oss	4,0	1,6
Vacc.myr	8,7	0,5	Parn.pal	11,8	4,7	Tract.lil.hya	3,9	1,5
Mili.eff	8,1	0,5	Vacc.myr	10,4	4,1	Gent.pneu	3,8	1,5
Tract.lil.hya	7,9	0,4	Mili.eff	9,6	3,8	Dros.rot	2,7	1,0
Gent.pneu	7,5	0,4	Nart.oss	9,5	3,7	Luzu.syl	2,2	0,9
Erio.ang	6,7	0,4	Erio.ang	7,9	3,1	Eric.cil	2,0	0,8
Nard.str	5,4	0,3	Narc.pse	6,6	2,6	Fagu.syl	1,3	0,5
Dros.rot	5,3	0,3	Nard.str	6,5	2,5			
Sorb.auc	5,3	0,3	Dros.rot	6,3	2,5			
Luzu.syl	4,4	0,3	Sorb.auc	6,3	2,5			
Care.ech	3,9	0,2	Luzu.syl	5,3	2,1			
Fagu.syl	2,7	0,2	Care.ech	4,7	1,8			
			Hyac.n.scr	4,1	1,6			
			Fagu.syl	3,2	1,3			
			Carp.bet	2,2	0,9			

Cluster 4			Cluster 5		
espèce	sensibilité locale	sensibilité régionale	espèce	sensibilité locale	sensibilité régionale
Pist.ter	100,0	100,0	Hier.eri	100,0	31,0
Side.hys	85,0	85,0	Astr.bai	68,4	21,2
Lava.lat	51,5	51,5	Isoe.his	68,4	21,2
Rhap.con	35,4	35,4	Sile.uni.thor	40,6	12,6
Aren.con	31,5	31,5	Utric.min	23,6	7,3
Sesl.cae	29,8	29,8	Pilu.glo	15,7	4,9
Care.dig	25,4	25,4	Caro.ver.inu	13,8	4,3
Argy.zan	24,6	24,6	Luro.nat	12,7	4,0
Care.hum	24,3	24,3	Quer.sub	12,4	3,8
Fuma.eri	20,2	20,2	Bald.rep.cav	9,1	2,8
Stae.dub	13,3	13,3	Litt.uni	9,0	2,8
Quer.ile	6,9	6,9	Gent.pneu	6,1	1,9
Eric.sco	2,8	2,8	Quer.ile	5,2	1,6
Carp.bet	2,0	2,0	Dros.rot	4,3	1,3
			Eric.cil	3,3	1,0
			Eric.sco	2,1	0,7

• Variables illustratives

Grâce aux relations mises en évidence entre les variables climatiques et les dimensions, il est maintenant possible d’interpréter la position des taxons sur les axes de l’AFM en termes d’affinité de ces derniers avec des types de climats. Chaque maille étant associée avec une information de présence ou d’absence pour chaque espèce, ou du moins de pseudo-absence, nous pouvons sélectionner celles qui sont caractérisées par la présence d’un taxon en particulier.

Le graphique (Fig. 41) ci-dessous correspond par exemple à la sélection des mailles en fonction de la présence de *Fagus sylvatica*. Les barycentres des mailles sélectionnées pour chaque modalité permettent de synthétiser ces informations. Les mailles de présence se situant pour la plupart dans la partie gauche du graphique, cette espèce apprécie les climats frais et peu ensoleillés qui restent suffisamment bien alimentés en eau durant la période estivale. Elle est donc particulièrement à l’aise sur le piémont pyrénéen et dans le Limousin, là où se retrouvent en effet d’importants peuplements

de hêtre. Il ne semble en revanche pas y avoir d'influence particulière de la seconde dimension car nous notons de manière indifférenciée des présences de part et d'autre de l'axe 2. Les barycentres restent donc alignés le long du premier axe et autour de la valeur zéro pour le second. Dans la gamme des climats présents en Nouvelle-Aquitaine, cette espèce semble relativement peu sensible à la disponibilité en eau.

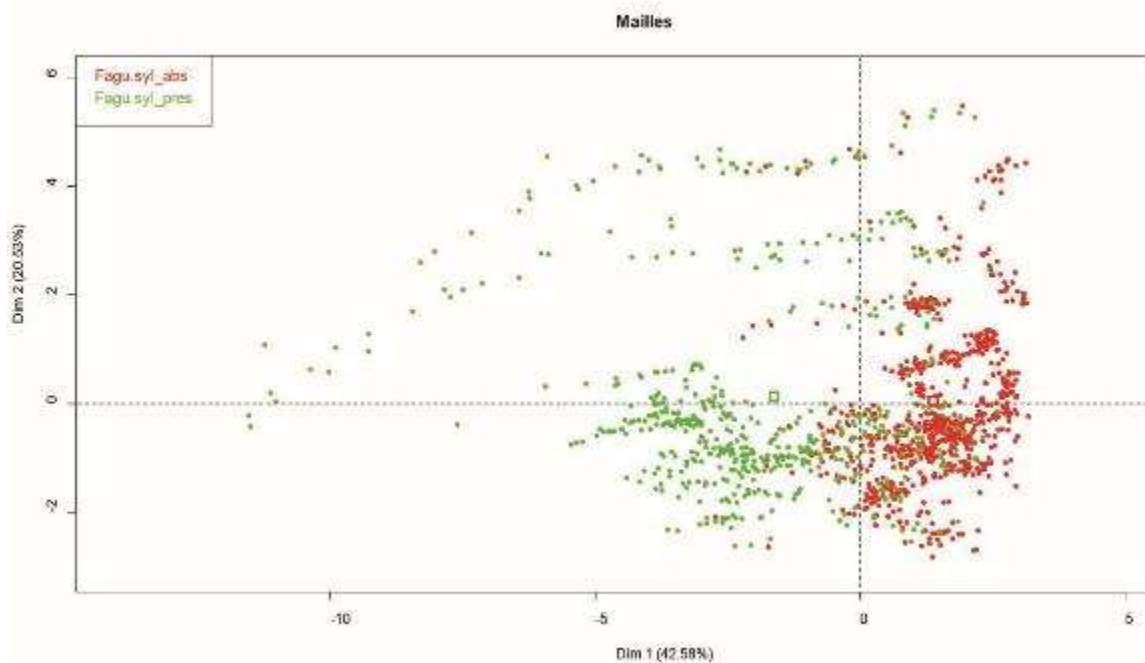


Fig. 41. Sélection des mailles caractérisées par la présence de *Fagus sylvatica* (points : mailles ; carrés : barycentres)

Si les résultats obtenus sont rassemblés pour l'ensemble des taxons sélectionnés, les affinités climatiques des espèces entre elles peuvent être comparées, et ce de manière quantitative. En faisant apparaître les milieux auxquels ces taxons se rattachent (Fig. 42), nous voyons nettement ressortir une répartition des barycentres de présence des espèces qui reprend assez largement la division en groupes d'habitats. Cette succession est retrouvée, des espèces de pelouses psychrophiles acidiphiles jusqu'à celles des dunes littorales, selon un gradient qui va de la partie gauche du graphique (climats frais et relativement pluvieux l'été) jusqu'à la partie supérieure droite (climats plutôt chauds et humides).

Les espèces présentant les effectifs les plus faibles se situent sans surprise sur les bordures externes du nuage de point tandis que les taxons présentant un plus grand nombre de mailles de présence sont généralement au centre. Il semble en effet logique que les plantes représentées dans la majorité des mailles soient issues de la zone climatique la plus étendue sur le territoire régional.

Néanmoins, il n'est pas exclu qu'en intégrant à l'avenir un nombre beaucoup plus conséquent d'espèces dans les analyses, certaines pourraient tout à fait être à la fois associées à un faible nombre de mailles et à une position assez centrale dans le nuage de points. Une explication non climatique à leur zone d'extension restreinte par rapport à leur niche climatique potentielle peut être suspectée (ex : espèces favorisées ou éliminées par la gestion sylvicole, l'eutrophisation, le drainage, etc.).

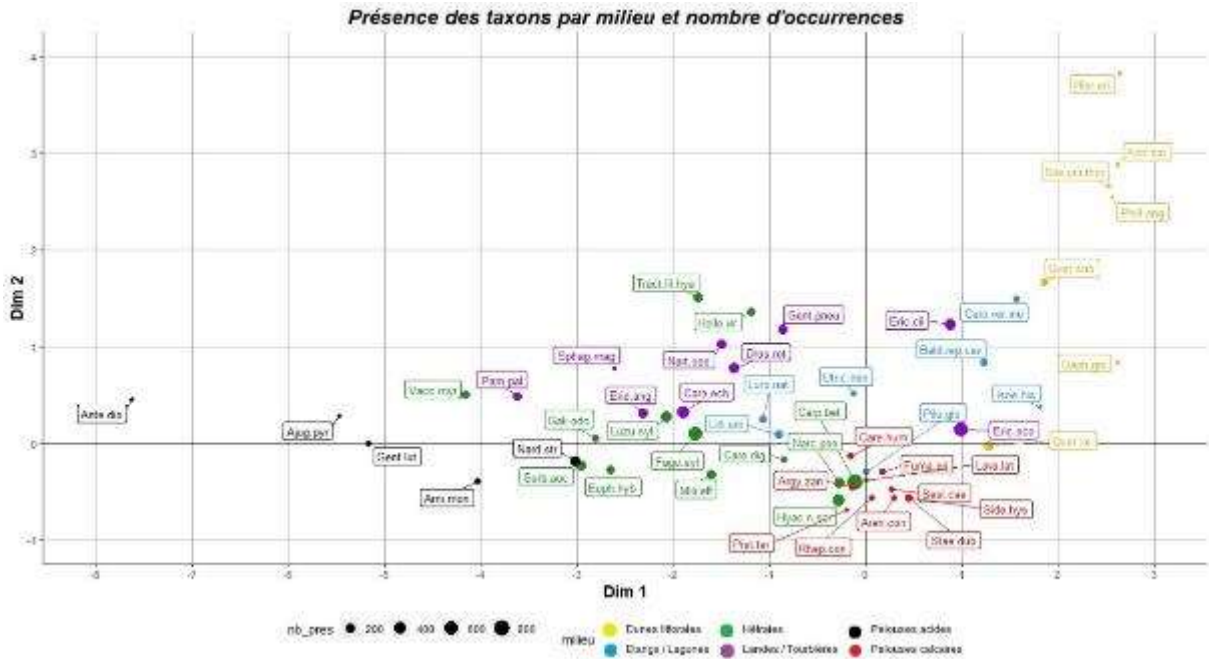


Fig. 42. Projection des barycentres de présence des taxons sur les dimensions 1 et 2 de l'AFM en fonction des milieux associés et du nombre d'occurrences.

- Niches climatiques

L'étape suivante serait de comparer les zones d'expression actuelles et futures des niches climatiques de chacun des taxons étudiés. A partir de données climatiques futures, obtenues grâce aux résultats de simulation de différents modèles sur la base de plusieurs scénarios de développement économique, nous serions en mesure de réitérer le processus conduit jusqu'ici pour aboutir de nouveau à la projection des mailles sur les dimensions de l'AFM. Les valeurs des variables climatiques pour chacune de ces mailles dans 10, 30 ou 50 ans étant différentes de celles d'aujourd'hui, les valeurs de projection sur les axes des dimensions seront elles-aussi modifiées. Le nuage de points ainsi reconstruit devrait alors vraisemblablement se déplacer vers le haut (plus de précipitations) et surtout vers la droite (températures plus élevées) du graphique (JOUZEL *et al.*, 2014 ; DRIAS, 2018).

En comparant le nombre de mailles actuellement situées dans la zone d'affinité climatique d'un taxon (Fig. 43) avec la somme de celles qui se retrouveraient dans cette zone dans plusieurs décennies (Fig. 44), nous pouvons de manière assez rapide et intuitive affiner l'indice de sensibilité déjà obtenu à partir de la CAH des mailles. En effet, si celui-ci permettait de faire ressortir les espèces présentant les plus grands potentiels d'évolution, il ne donnait en revanche aucune indication sur le sens de ces changements. La Fig. 44 illustre ce que pourrait être le nouveau nuage de points, issu de la projection des mailles à partir des valeurs des paramètres climatiques simulées pour le futur. La forme même du nuage devrait être modifiée afin de représenter fidèlement ce que seront vraisemblablement les conséquences du changement climatique. Dans le but d'illustrer schématiquement ces modifications, il ne s'agit pour l'instant que d'une simple translation du nuage de points actuel.

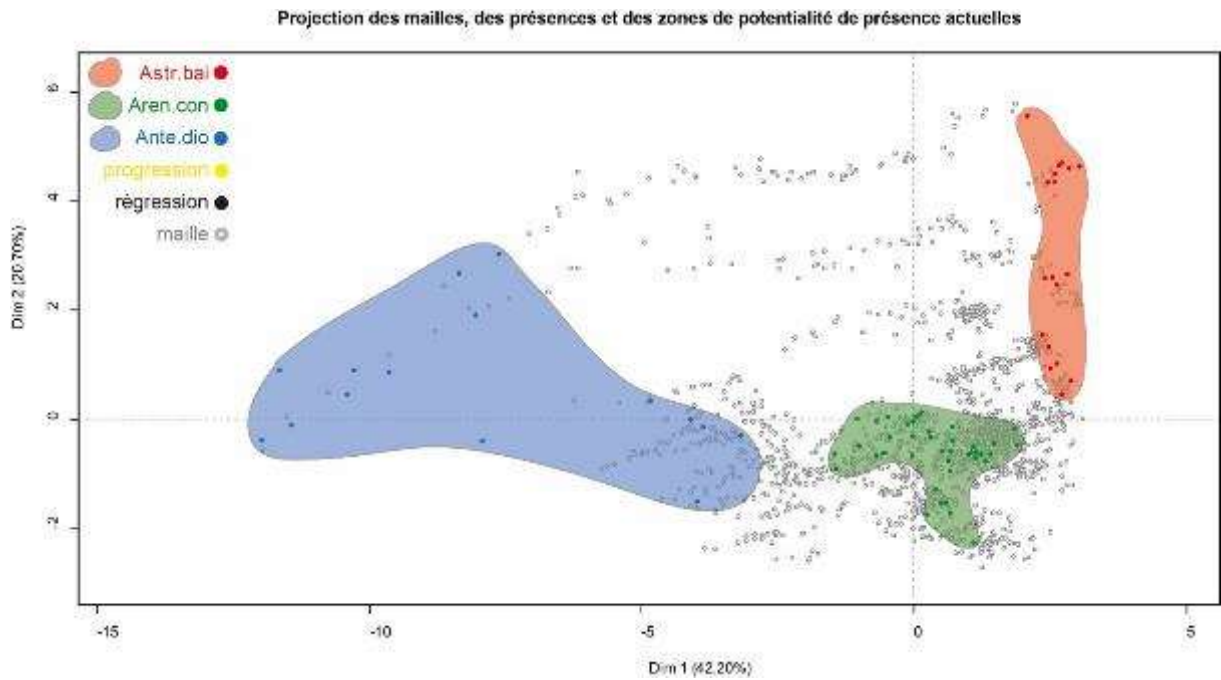


Fig. 43. Niches climatiques potentielles de 3 taxons définies à partir de leurs mentions de présence actuelles.

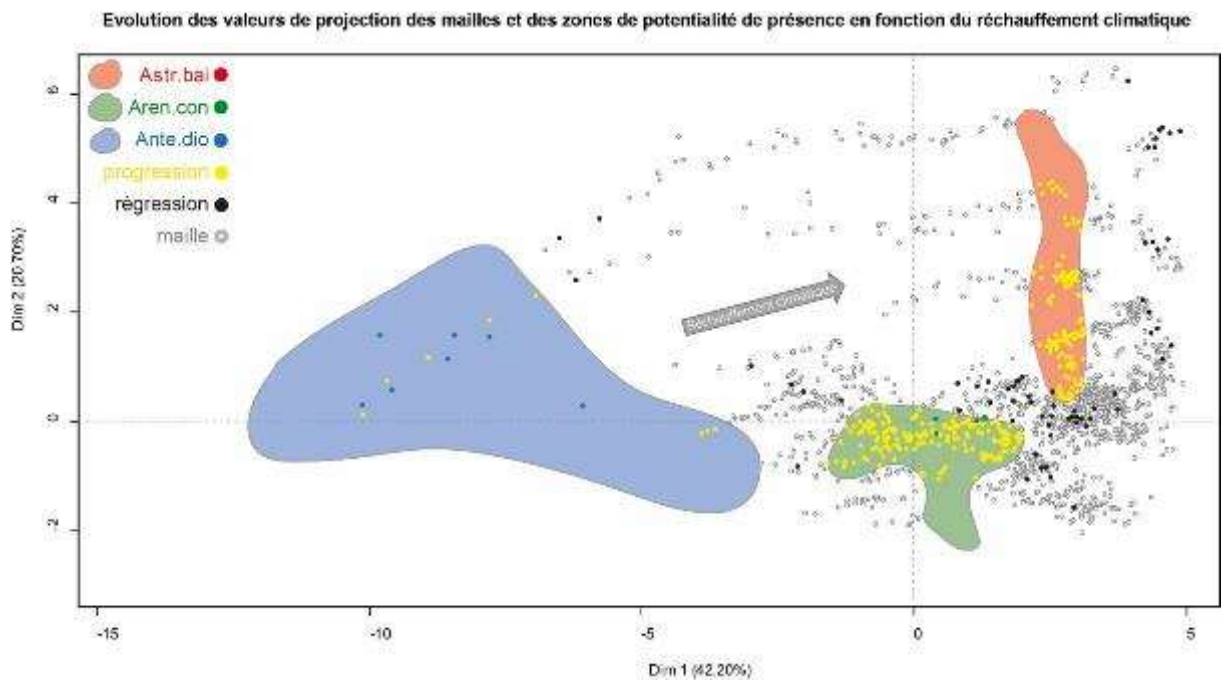


Fig. 44. Exemple d'évolution supposée des populations de 3 taxons soumises au réchauffement climatique.

Une hypothèse envisagée serait que des taxons présentant une affinité pour des climats particulièrement frais, comme *Antennaria dioica*, verraient l'aire géographique couverte par leur niche climatique se restreindre dans la région. Cette diminution se traduirait sur le graphique par une baisse

du nombre de mailles projetées dans la gamme climatique de présence potentielle de cette espèce (en bleu – Fig. 44).

A l'inverse, des taxons plus thermophiles comme *Astragalus baionensis*, devraient voir la surface de leur niche climatique potentielle s'étendre, sans pour autant que cela ne soit une garantie d'expansion pour leurs populations. En effet, le climat n'est pas l'unique facteur influençant la dynamique des espèces. En l'absence de nouvelles données concernant notamment la nature du substrat, son acidité ou sa trophie notamment, il sera impossible de conclure sur la possibilité d'expansion de l'espèce. Si les nouvelles mailles présentant le climat adéquat ne fournissent pas au taxon les autres conditions nécessaires à son développement, il est envisageable que celui-ci subisse le même sort que certaines plantes psychrophiles, à savoir un déclin des populations.

Enfin, pour une troisième catégorie d'espèces, telle qu'*Arenaria controversa*, le déplacement géographique de la niche climatique ne devrait pas s'accompagner d'une diminution ou d'une augmentation de la surface potentielle mais plutôt d'une stagnation. Là encore, sans plus d'informations sur les conditions qui attendent ces plantes dans leur nouvelle aire climatique de présence potentielle, ni sur leur capacité de migration, impossible de conclure dans un sens ou dans l'autre quant à la dynamique de leurs populations.

En gardant à l'esprit qu'une zone climatique de présence potentielle pour un taxon ne peut être directement considérée comme une garantie de présence future de ce taxon dans une maille donnée, une cartographie des futures aires de présence supposée pour chaque plante pourrait être réalisée. Il faudrait pour cela associer les mailles nouvellement projetées avec les niches climatiques de telle ou telle espèce en fonction de leur position sur les dimensions de l'AFM (points jaunes de la Fig. 44).

Cette méthode constituerait une première avancée dans notre compréhension de la sensibilité des espèces aux modifications du climat mais ne permet pas d'associer la potentialité de présence avec une valeur chiffrée de probabilité. Nous restons en effet sur une alternative qualitative binaire entre présence et absence potentielles. Une réponse à cette limite pourrait passer par l'utilisation de méthodes de classification ou d'apprentissage (« machine learning ») telles que les forêts aléatoires (RF, Random Forest (BREIMAN, 1984)), les machines à vecteurs de support (SVM, Support Vector Machines (VAPNIK, 1995 ; VAPNIK, 1998)), les réseaux neuronaux (ANN, Artificial Neural Networks (LEK & GUEGAN, 1999) ou encore le modèle de maximum d'entropie (MaxEnt, Maximum Entropy (PHILLIPS *et al.*, 2004 ; PHILLIPS *et al.*, 2006 ; ELITH *et al.*, 2011)).

Dans cette optique, une nouvelle étape d'analyse en utilisant la technique du Random Forest a été initiée. Le choix de cette méthode plutôt qu'une autre ne repose pour l'instant pas sur la pertinence de ce modèle vis-à-vis de la structure de notre jeu de données, mais plutôt sur des critères d'accessibilité des outils numériques et de faisabilité pour cette première étude exploratoire. En effet, un modèle qui ne nécessite pas de données d'absence « avérée » et permet donc de travailler à partir de la seule information de présence, comme le modèle MaxEnt, pourrait mieux correspondre à notre cas. Les résultats décrits dans la partie suivante ont donc pour finalité d'illustrer la démarche et les possibilités offertes par ce genre de méthodes, plutôt que celle de présenter des conclusions définitives sur la répartition potentielle, l'affinité ou la sensibilité de tel ou tel taxon, actuellement ou dans le futur.

2.3.4 Modèles d'apprentissage

La technique des forêts aléatoires (Random Forest, (BREIMAN, 2001b) est basée sur un algorithme générant un grand nombre d'arbres aléatoires, d'où son nom. Ces arbres fonctionnent comme des

classifieurs (CUTLER *et al.*, 2007) et sont, dans leur mode de construction, issus de la méthode CART initiée des années auparavant par le même auteur (BREIMAN, 1984). Pour chacun d’eux, une séparation binaire du jeu de données est effectuée à chaque nœud à partir de critères quantitatifs (valeurs pour l’une des variables sélectionnées) et qualitatifs (présence ou absence du taxon étudié), créant ainsi deux nouvelles branches (Fig. 45). Le processus se répète de nœud en nœud jusqu’à atteindre le nombre limite d’embranchements définis par l’utilisateur.

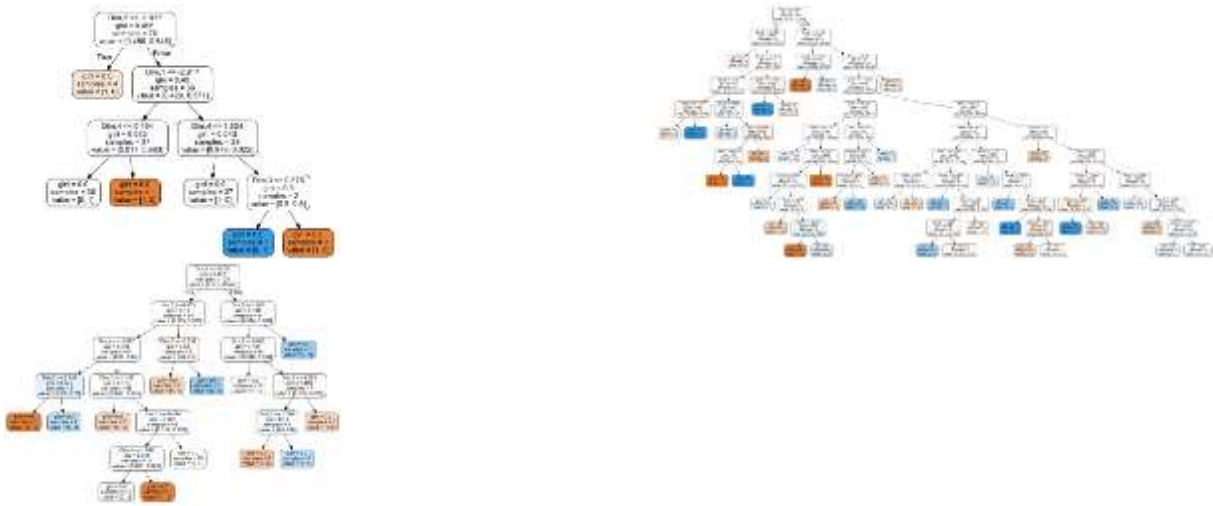


Fig. 45. Exemples d’arbres générés aléatoirement pour des taxons différents à partir des valeurs de chaque maille, soit pour les 7 premières dimensions de l’AFM, soit pour les variables climatiques brutes.

Dans notre cas, les individus (mailles : « samples ») contenus dans chacune des feuilles situées à l’extrémité des branches sont alors regroupés par affinités de valeurs pour certaines variables (dimensions 1 à 7, ou variables climatiques brutes) sélectionnées aléatoirement, puis ramenées à une alternative binaire, présence ou absence du taxon dans ces mailles (présence : orange ; absence : bleu). De nombreux arbres sont ainsi générés, triant les mailles en fonction de variables à chaque fois différentes, puisque sélectionnées aléatoirement. Une « forêt » d’arbres uniques est obtenue, qui, pris tous ensemble, permettent de classer plus efficacement les mailles de présence et d’absence en fonction des variables.

Tout d’abord cette classification s’opère sur un lot restreint de données sélectionnées aléatoirement parmi le jeu de données initial. Il s’agit d’un jeu de données d’entraînement pour lequel les mentions de présence ou d’absence sont connues. Puis ensuite le classifieur au jeu de données tout entier est appliqué sans lui indiquer la présence ou l’absence réelle du taxon étudié. Les mailles sont alors triées en fonction de leurs valeurs pour les différentes variables (dimensions de l’AFM) et l’algorithme affecte en bout de chaîne une mention de présence ou d’absence supposée du taxon, pour l’ensemble des mailles regroupées dans chacune des feuilles. Une maille sera donc classée dans l’une ou l’autre des alternatives, présence ou absence, autant de fois qu’il y a d’arbres. La somme des arbres qui indiquent une présence du taxon dans cette maille, rapportée à la somme totale des arbres créés, permet enfin d’obtenir un pourcentage de probabilité de présence du taxon dans la maille. Nous pouvons ainsi produire des cartes de probabilité de présence sur toute la Nouvelle-Aquitaine, taxon par taxon, et les comparer aux données de présence avérées (Fig. 46 et Annexe 2).

Cette probabilité de présence étant obtenue à partir de données climatiques uniquement, elle correspond à un indice d'affinité de l'espèce avec le climat de chacune des mailles. Là encore, d'autres paramètres biotiques ou abiotiques pourraient tout à fait être intégrés en amont, en tant que variables de l'AFM, dans le but d'affiner les résultats de prédiction. L'objectif ici n'est cependant pas de produire des prédictions fiables quant à l'implantation géographique de l'une ou l'autre des espèces, mais plutôt d'évaluer l'étendue de la niche climatique potentielle de chacune.

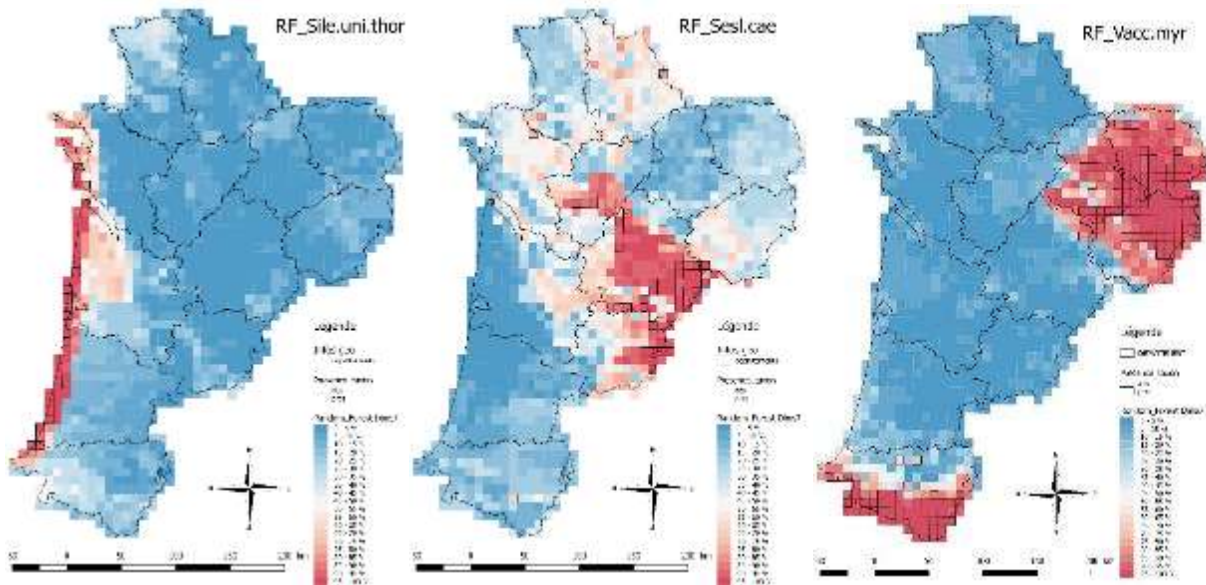


Fig. 46. Exemples de cartes de probabilité de présence de trois taxons en Nouvelle-Aquitaine, obtenues à partir des valeurs des mailles pour les 7 premières dimensions de l'AFM et comparées aux présences attestées (carrés noirs) par des relevés floristiques et/ou phytosociologiques.

Ainsi, suivant les espèces, les zones présentant de fortes probabilités de présence s'étendent plus ou moins au-delà des zones de présence attestée par des relevés botaniques.

La première hypothèse expliquant ce résultat est que le modèle surestime le potentiel de présence, notamment du fait de l'absence de certains paramètres qui influeraient fortement sur la chorologie de la plante. Certains facteurs limitants, comme l'acidité des sols par exemple, ne sont pas pris en compte ici et expliqueraient l'écart entre niche climatique potentielle et niche réalisée.

La seconde hypothèse est liée au biais d'échantillonnage et à la présence de faux négatifs au sein du jeu de données floristiques. En effet, malgré l'effort d'échantillonnage considérable réalisé depuis plusieurs années, certains taxons discrets ont parfois pu échapper à l'œil des botanistes.

Une troisième explication pourrait enfin se trouver tout simplement dans les choix effectués lors du calibrage du modèle par l'analyste. En effet, un certain nombre de paramétrages sont nécessaires en amont du calcul (BARBET-MASSIN *et al.*, 2012) et ces choix ont pour l'instant dû être réalisés arbitrairement (nombre d'arbres générés, limite du nombre d'embranchements, taille du jeu de données d'entraînement, choix des variables, etc.). Idéalement, chacune de ces décisions devrait être justifiée sur la base de connaissances théoriques et testée à partir de critères chiffrés d'évaluation des

résultats (AUC-ROC, TSS, AIC, etc.). Ces développements n'ont pour l'instant pas pu être menés à bien et les cartes de probabilité de présence produites (Annexe 2) doivent donc être prises avec un certain recul.

Néanmoins, nous pouvons d'ores et déjà réfléchir à ce que pourrait être la suite d'une chaîne de traitements qui aboutirait à la production d'un indice de sensibilité des plantes au changement climatique. Une fois un certain niveau de fiabilité dans les prédictions atteint, il sera alors possible de réutiliser les valeurs actuelles des paramètres climatiques pour les mailles de Nouvelle-Aquitaine en tant que jeu de données d'entraînement. Nous pourrons ensuite effectuer le classement des mailles entre présence et absence d'un taxon donné, mais cette fois à partir des valeurs simulées du climat pour les décennies à venir. De cette manière des probabilités de présence de l'espèce dans chacune des mailles seront obtenues à horizon 2030, 2050 ou 2100, et en fonction des différents scénarios climatiques modélisés (DRIAS, 2018).

Ces probabilités de présence définies, la comparaison avec celles déjà produites pour la période actuelle pourra être effectuée, maille par maille ou en calculant des moyennes à l'échelle de toute la région. En effectuant cette différence, des indices locaux et régionaux de sensibilité de l'espèce au changement climatique seront générés. A partir de l'indice local (par maille), de nouvelles cartes dites « de sensibilité » pourront être produites et servir de base de réflexion pour la mise en place de mesures de conservation ciblées.

La corrélation des variables étant un biais possible soulevé par certains auteurs (MAHARAJ & NEW, 2013 ; GAUDREAU *et al.*, 2015 ; JARNEVICH *et al.*, 2015 ; FOURCADE, 2016), il apparaît judicieux de réutiliser les résultats obtenus précédemment pour les 7 premières dimensions de l'AFM comme variables pour effectuer la classification des mailles. Celles-ci présentent l'avantage d'être par construction totalement décorréelées les unes des autres. Il est à noter cependant que l'inventeur de la technique du Random Forest s'oppose quant à lui à cette notion de biais de corrélation concernant sa méthode (BREIMAN, 2001a). Il avance même la théorie inverse, postulant que tout apport de données au modèle l'enrichit et que des variables, même fortement colinéaires, ne délivrent jamais exactement les mêmes informations. Sur cette base, il serait éventuellement possible d'utiliser directement les variables climatiques brutes, et même d'en faire intervenir un maximum d'autres, qu'elles soient corrélées entre elles ou pas.

Enfin, dans l'esprit de la méthode employée pour les packs BIOMOD (THUILLER *et al.*, 2009) et MigClim (KESHKAR & VOIGT, 2016) qui combinent différentes approches pour créer des modèles de distribution d'espèces (SDM, Species Distribution Models), il serait intéressant de réitérer les calculs à partir de nouvelles techniques de modélisation (MaxEnt, SVM, ANN, etc.) puis de chercher à moyenniser, pondérer ou sélectionner les résultats de sortie (LI & WANG, 2013) pour produire des prédictions de présence les plus fiables possible pour la Nouvelle-Aquitaine.

2.3.5 Discussion & Perspectives

Ce travail de synthèse montre qu'il est possible de créer des indices de sensibilité des plantes aux changements climatiques de diverses manières. Chaque approche développée ici renseigne à sa façon sur l'un des aspects de cette sensibilité. Ainsi, au-delà de la combinaison des différents modèles d'apprentissage et de prédiction de la potentialité de présence des espèces, il semblerait opportun de conserver également les étapes précédentes pour aboutir à une vision la plus précise possible du devenir probable des espèces végétales de la région. Outre ces différents développements possibles,

de nombreuses pistes de développements techniques pourront également être explorées à l'avenir, dans l'objectif d'améliorer la connaissance des impacts du réchauffement climatique sur les plantes.

L'une de ces approches nouvelles pourrait être de recréer de la fréquence pour les taxons au sein des mailles de 8 km de côté. Disposant en effet de la position GPS précise de l'ensemble des relevés floristiques, il est envisageable de redécouper les mailles actuelles en mailles plus fines. La somme des mentions de présence pour l'ensemble des petites mailles comprises dans une plus grande (ex : x mailles de présence sur 64 mailles de 1 km de côté au sein d'une maille de 8 km) donnerait ainsi une information supplémentaire particulièrement utile dans le cas de taxons largement représentés à l'échelle de la région (ex : *Carpinus betulus*, *Erica ciliaris*, etc.). En recréant une échelle de valeurs quantitatives renseignant, d'une certaine manière, l'abondance relative de ces espèces d'une maille 8x8km à l'autre, les résultats obtenus pour les zones d'affinité et pour la sensibilité climatique de ces plantes pourraient être précisés.

Parallèlement, des méthodes de « downscaling » pourraient être employées pour affiner les cartes des variables climatiques basées sur les données brutes des modèles SAFRAN et ISBA. De mailles 8x8km, passer à des mailles 1x1km correspondant alors à l'échelle plus fine du climat serait intéressant à appliquer sur les données floristiques. Une autre option possible pour parvenir à une augmentation de la précision des cartes climatiques passerait par le remplacement des variables spatialisées de Météo France par des données issues de bases en libre accès sur internet via différents sites tels que CHELSA (KARGER *et al.*, 2017) ou WorldClim2 (FICK & HIJMANS, 2017). Ces bases reposent en effet sur un découpage plus fin du territoire qui permettrait là encore de modéliser les relations plantes-climat à une échelle plus réduite.

Une des critiques les plus récurrentes à l'encontre de l'utilisation de modèles de distribution spatiale des espèces (SDM) pour le futur est la non prise en compte des interactions biotiques entre les espèces. Il en est de même au sujet de leur capacité de migration, depuis leur aire de présence actuelle vers leur niche climatique future telle que simulée par ces modèles (GUISAN & THULLER, 2005). Dans l'optique d'évaluer l'influence des changements climatiques sur les plantes, cette question ne pourra évidemment pas être laissée de côté.

En termes d'applications plus concrètes, l'établissement d'une liste d'espèces « sentinelles du climat » constitue donc l'objectif premier des recherches qui pourront être menées à la suite de cette étude exploratoire. Parmi ces taxons, les espèces qui apparaîtront comme les plus menacées pourront ensuite venir enrichir les listes rouge de la Flore d'Aquitaine (LEBLOND *et al.*, à paraître), du Limousin (NAWROT, 2013) et de Poitou-Charentes (GOUEL, à paraître). A l'inverse, les espèces plus thermophiles qui ne seraient pas encore présentes dans la région mais qui pourraient bénéficier du réchauffement climatique, parmi lesquelles certaines espèces allochtones potentiellement envahissantes, pourront être ciblées pour faire l'objet d'une attention particulière.

Lorsque la fiabilité de la prédiction par les modèles de probabilité de présence sera suffisante, les zones présentant de fortes potentialités pour un taxon, et où sa présence n'aura pas déjà été attestée, pourront être de nouveau parcourues dans le cadre de l'inventaire permanent qui sera bientôt mis en place dans la région, en remplacement de l'inventaire systématique qui se termine. Cette aide à la prospection, associée à d'autres critères de sélection des zones d'inventaire, pourrait permettre un ciblage des efforts et donc une plus grande efficacité dans la récolte des données floristiques. Ceci conduirait à l'amélioration générale de notre connaissance de la flore de Nouvelle-Aquitaine.

Enfin, en parallèle de l'amélioration des modèles de distribution, les données quantitatives sur l'évolution de la flore récoltées dans le cadre du programme « les sentinelles du climat » au fur et à mesure des campagnes de suivis seront analysées et traitées statistiquement. La comparaison des résultats obtenus pour chacune de ces deux approches permettra alors d'évaluer la justesse des projections réalisées jusque-là en faisant le lien entre les observations réalisées à l'échelle de la Nouvelle-Aquitaine et celles effectuées au niveau de chaque site (MALLARD, 2017b).

2.3.6 Conclusion

Les objectifs de cette étude étaient de produire une liste d'espèces « sentinelles » caractérisées par leur sensibilité aux changements climatiques, de mesurer l'impact propre aux différentes composantes du climat sur le développement de ces espèces végétales, et enfin de générer des modèles de projection de la répartition future des plantes selon les différents scénarios climatiques.

Concernant le premier élément attendu, il est apparu au fil des recherches que cet objectif, supposé préalable au développement de la suite de notre démarche, s'avérait en être plutôt un aboutissement. En effet, pour faire ressortir les plantes les plus sensibles aux changements climatiques, il semble préférable d'en passer tout d'abord par les différentes étapes de la chaîne de traitements développées ici. En partant d'un jeu de données floristiquement complet, il sera alors possible d'effectuer un tri parmi les taxons présents en Nouvelle-Aquitaine, en fonction de la dynamique projetée pour leurs populations respectives.

Ensuite, grâce à l'analyse multivariée, les variables climatiques ont pu être hiérarchisées en fonction de leur importance générale à l'échelle de la région, mais aussi en fonction de leur influence au sein des sous-régions climatiques. Dans une certaine mesure, un rapport indirect avec chacun des taxons a également pu être mis en évidence au travers de la position des barycentres de ces derniers sur les axes de l'AFM. La technique du Random Forest permettra théoriquement d'établir un lien plus direct entre chacune des espèces et les variables climatiques prises individuellement. Des hiérarchisations du même type pourront également être obtenues et évaluées via d'autres modèles d'apprentissage automatique.

Enfin, des premières cartes de potentialité de présence ont été produites en utilisant une seule méthode d'apprentissage. Celles-ci doivent cependant encore faire l'objet d'évaluations et de confrontations avec les résultats issus d'autres techniques de modélisation avant de pouvoir faire l'objet d'une quelconque interprétation.

Il ressort de cette étude que les perspectives de développement, tant au niveau théorique que technique, sont relativement vastes. La précision et la qualité du jeu de données floristiques à disposition participe pour une grande part de la fiabilité des prédictions qui pourront être réalisées à l'avenir. En cela, il mérite que l'on applique les méthodes les plus actuelles à son exploitation pour permettre d'en retirer le maximum d'informations qui pourront mener à la mise en place de politiques efficaces de prise en compte et de conservation de la biodiversité végétale de Nouvelle-Aquitaine, dans le contexte des changements climatiques.