

**AGROCAMPUS OUEST**

CFR Angers  CFR Rennes

<p>Année universitaire : 2020-2021</p> <p>Spécialité : Ingénieur Agronome</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) : Génie de l'Environnement (Préservation et Aménagement des Milieux – Ecologie Quantitative)</p>	<p><b>Mémoire de fin d'études</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de Montpellier SupAgro (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
---	--

## Evaluer la vulnérabilité des habitats forestiers face au changement climatique

---

### Le cas de la hêtraie-chênaie collinéenne atlantique acidiphile à houx (HIC 9120)

Par : Ceridwen DUPONT-DOARÉ

**Soutenu à Rennes**

**le 21/09/2021**

**Devant le jury composé de :**

Président : Didier LECOEUR

Maître de stage : Thomas BRUSTEN

Enseignant référent : Ivan BERNEZ

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

Mickaël MONVOISIN, Chef de projet naturaliste,  
Correspondant environnement, ONF

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST*



## Confidentialité

Non  Oui si oui :  1 an  5 ans  10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible <sup>(1)</sup>.

Date et signature du maître de stage <sup>(2)</sup> :  
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

**A la fin de la période de confidentialité**, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

## Droits d'auteur

L'auteur<sup>(3)</sup> **Dupont-Doaré Ceridwen**

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui  Non

Si oui, il autorise

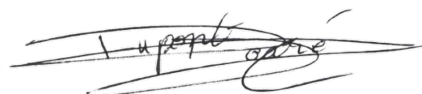
la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif)  accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : 17/09/2021



## Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui  Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

POUR LE DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME

Spécialisation Génie de l'Environnement

Option Préservation et Aménagement des Milieux – Ecologie Quantitative

## Evaluer la vulnérabilité des habitats forestiers face au changement climatique

### Le cas de la hêtraie-chênaie collinéenne atlantique acidiphile à houx (HIC 9120)

par Ceridwen Dupont-Doaré

Soutenu à Rennes le 21/09/2021, devant le jury composé de :

Président : Didier Lecoer  
Maître de stage : Thomas Brusten

Enseignant référent : Ivan Bernez  
Invité : Mickaël Monvoisin (ONF)



© C. Dupont-Doaré

## Avant-propos

Ce stage de 6 mois proposé par l'Institut pour le Développement Forestier du Centre National de la Propriété Forestière a été réalisé dans le cadre du dernier semestre du cursus Ingénieur Agronome, spécialisation Génie de l'environnement, option Préservation et Aménagement des Milieux – Ecologie Quantitative (PAMEQ). Mon travail s'est inscrit dans un projet partenarial avec l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) et AgroParisTech. Ce projet, cofinancé par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, a pour but de développer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des habitats forestiers face au changement climatique. Son objectif est de répondre aux préoccupations des gestionnaires forestiers quant à la résilience des peuplements en place et leur renouvellement dans le contexte des changements globaux. A terme, le fruit de ce travail a vocation à produire une méthode de diagnostic en regard de laquelle des préconisations de gestion seront proposées, et ce, afin de favoriser la conservation et la gestion durable des écosystèmes forestiers.

Dans le cadre de ce stage, divers documents ont été produits, qui n'ont pas vocation à figurer dans ce mémoire, parmi lesquels : une synthèse bibliographique portant sur la conceptualisation et la modélisation de la vulnérabilité climatique des écosystèmes forestiers tempérés ; un rapport de caractérisation phytoécologique des hêtraies-chênaies collinéennes atlantiques acidiphiles à houx ; une note synthétisant les mesures de gestion rencontrées sur le terrain et mises en perspective avec des notions de sylviculture adaptative.

Ces six derniers mois en milieu professionnel m'ont permis de m'immerger dans le secteur forestier, qui m'était inconnu, de continuer à me former en botanique et en sciences du sol, d'échanger avec les gestionnaires et de partager leur expérience de terrain.

*« A l'ombre des frondaisons du hêtre,  
colosse de verdure, vivent une multitude de vassaux qui  
s'échelonnent de la cime la plus hardie, jusqu'aux  
confins des racines les plus secrètes. »*

(*Le Hêtre*, Teissier du Cros et Le Tacon, 1981)

## Remerciements

Je remercie Thomas Brusten pour avoir proposé un stage si intéressant et pour m'avoir accompagnée tout au long de ce projet.

Je remercie Eric Sevrin, directeur de l'IDF, pour avoir permis la réalisation de ce stage.

Je remercie Christian Piedallu (AgroParisTech), Ingrid Bonhême (IGN), Fabienne Benest (IGN), Hedi Kebli (CNPF), Sylvain Pillon (CNPF), Lise Maciejewski (UMS PatriNat), Vincent Gaudillat (UMS PatriNat), Paul Rouveyrol (UMS PatriNat), François-Xavier Saintonge (DSF) pour avoir soutenu le projet. Je suis tout particulièrement reconnaissante envers Christian Piedallu pour sa patience et sa pédagogie pendant l'élaboration et la réalisation de la phase de modélisation, et envers Hedi Kebli pour la mise en œuvre de BioClimSol.

Je remercie nos correspondants CRPF qui nous ont accompagnés sur le terrain : David Houmeau et Marine Lauer, Patrick Blanchard, Pierre Brossier et ses collègues, Cristel Joseph, Béatrice Lacoste, Pauline Martin, Cyril Retout et Vincent Vaast.

Je remercie également nos correspondants de l'ONF : Mickaël Monvoisin et ses collègues, Lucas Aubert, Stéphanie Chevalier, Yves Normant, Laurent Levêque et Alexandre Peltier.

Enfin, je remercie les propriétaires, qui nous ont ouvert les « portes » de leurs forêts.

## Table des Matières

<b>Glossaire</b> .....	<b>a</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>f</b>
<b>Liste des illustrations</b> .....	<b>g</b>
<b>Liste des annexes</b> .....	<b>h</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>I – Méthode</b> .....	<b>3</b>
I.1 – Habitat d'étude .....	3
I.2 – Données habitat et essences structurantes .....	4
I.3 – Zone d'étude .....	5
I.4 – Périodes d'étude .....	6
I.5 – Données édaphiques .....	6
I.6 – Données climatiques .....	6
I.7 – Cadre analytique .....	7
I.7.1 – Exposition : Indices d'exposition stricte .....	7
I.7.2 – Sensibilité : Indice de perte de compatibilité climatique .....	8
I.7.3 – Sensibilité : Indices de contraction relative et absolue .....	9
I.7.4 – Sensibilité : Indices BioClimSol .....	9
I.7.5 – Capacité adaptative : Indices d'adaptation bioclimatique .....	10
I.8 – Modélisation .....	10
I.9 – Terrain .....	11
<b>II – Résultats</b> .....	<b>11</b>
II.1 – Méthodologie .....	11
II.2 – Modèle retenu .....	12
II.3 – Amplitudes écologiques .....	12
II.4 – Scores obtenus .....	12
II.4.1 – L'HIC 9120 serait principalement touché par des changements de températures... 14	
II.4.2 – L'habitat potentiel perdrait peu de compatibilité avec son environnement... 14	
II.4.3 – La niche potentielle initiale disparaîtrait sans être compensée par de l'extension.. 14	
II.4.4 – Le Hêtre a un risque plus important que le Chêne sessile d'être dépérissant... 15	
II.4.5 – L'habitat potentiel ne serait pas adapté aux nouvelles conditions climatiques. 15	
II.4.6 – Le Chêne sessile serait mieux adapté que le Hêtre aux nouvelles conditions climatiques. 15	
II.5 – Confrontation au terrain .....	16



II.5.1 – Dépérissement observé <u>vs</u> niche potentielle .....	16
II.5.2 – Dépérissement observé <u>vs</u> dépérissement prédit chez le Hêtre .....	16
II.5.3 – Dépérissement observé <u>vs</u> dépérissement prédit chez le Chêne sessile .....	17
II.5.4 – Dépérissement observé <u>vs</u> adaptation bioclimatique .....	17
<b>III – Discussion .....</b>	<b>17</b>
III.1 – Discussion des résultats.....	17
III.1.1 – La migration de l’habitat vers des conditions plus favorables est compromise..	17
III.1.2 – Puiser de la ressource génétique en France ne suffirait pas à conserver l’habitat..	18
III.1.3 – Le Chêne sessile semble plus à même que le Hêtre de conférer de la résistance à l’habitat en cœur de niche.....	19
III.1.4 – La niche potentielle et l’adaptation bioclimatique expliqueraient en partie le dépérissement observé sur le terrain.....	19
III.1.5 – La gestion, un levier de conservation de l’habitat .....	19
III.1.6 – Natura 2000 ne serait pas adapté à la conservation de l’HIC 9120.....	22
III.1.7 – La vulnérabilité de l’HIC 9120 est accrue .....	23
III.1.8 – <i>Quid</i> des autres Chênes ?.....	24
III.2 – Discussion méthodologique .....	24
III.2.1 – Limites méthodologiques et perspectives de développement .....	24
III.2.2 – Evaluer la vulnérabilité des habitats forestiers : ce que dit la littérature.....	26
III. 2.2.1 – Vulnérabilité et développement des arbres.....	26
III. 2.2.2 – Vulnérabilité et capacité d’adaptation.....	27
III. 2.2.3 – Habitat Climate Change Vulnerability Index (HCCVI).....	27
III. 2.2.4 – Evaluer la vulnérabilité : un long chemin à parcourir .....	28
<b>Conclusion.....</b>	<b>29</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>30</b>
<b>Webographie.....</b>	<b>35</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>i</b>



## Glossaire

**Abiotique** : qualifie un facteur écologique, de nature physique ou chimique, agissant dans l'environnement, par opposition aux facteurs biotiques (Bastien et Gauberville, 2011).

**Area under the ROC curve (AUC)** : indicateur de performance utilisé dans les cas de classification binaire. Sa valeur est comprise entre 0,5 et 1. La valeur 0,5 signifie que la distribution des deux groupes n'est pas différente du hasard, tandis que 1 indique l'absence de superposition dans la distribution des scores des deux groupes (Fielding et Bell, 1997).

**Bilan hydrique** : variation du contenu en eau du sol résultant des apports et des pertes en eau, calculés sur une période déterminée (jour, semaine, décennie, saison, année). Les principaux termes du bilan hydrique sont :

- les apports d'eau (entrées) par la pluie, l'irrigation ou les apports latéraux ;
- les pertes par évapotranspiration ou par drainage (sorties) ;
- la réserve utile maximale en eau du sol (réservoir)

(Bastien et Gauberville, 2011).

**Biotique** : qui est lié aux organismes vivants et aux processus dont ils sont responsables (facteurs biotiques) (Bastien et Gauberville, 2011).

**C/N** : dans une analyse de sol ou de matière organique, désigne le rapport entre la teneur en carbone et celle en azote total. Le C/N (ou « rapport carbone sur azote ») diminue au cours de la décomposition des matières organiques : aussi ne faut-il pas confondre les ordres de grandeur du C/N des litières fraîches et ceux des horizons A. A la chute des feuilles ou des aiguilles, le C/N de la litière varie de 25-30 (litières améliorantes) à 55-60 (litières dites acidifiantes) ; plus le C/N est élevé, plus la décomposition est difficile. Dans un horizon A, le C/N varie de moins de 15 pour les mullus les plus actifs à 25-30 dans les humus à très faible activité biologique (Bastien et Gauberville, 2011). Le C/N est généralement utilisé comme indicateur de l'approvisionnement en azote (Piedallu *et al.*, 2016).

**Capacité adaptative** : opportunités d'amélioration de la sensibilité d'un écosystème face au changement climatique et de l'exposition au changement climatique. La capacité adaptative est fonction des traits intrinsèques du système (*e.g.* comportement d'une espèce) et de facteurs externes (*e.g.* barrière physique) (Glick *et al.*, 2011).

**Climax** : état d'un écosystème ayant atteint, pour une période donnée et par des processus dynamiques, la phase de maturité. Il présente une certaine stabilité au niveau des espèces dominantes mais peut subir des perturbations au cours desquelles il se reconstitue plus ou moins rapidement (résilience). Il est conditionné par les seuls facteurs climatiques et édaphiques. Dans une région donnée, le climax n'est généralement pas unique et il est distingué :

- des **climax climatiques** (en général forestiers en Europe tempérée), en équilibre avec les seules conditions macroclimatiques ;
- des **climax édaphiques** dont l'existence est liée à la prédominance locale de certains facteurs pédologiques (ex : forêts marécageuses) ;
- des **climax stationnels**, dont l'existence est liée à la fois à des facteurs édaphiques particuliers et à des conditions topoclimatiques très différenciées (éblaies de ravin, tillaies sur éboulis)

(Bastien et Gauberville, 2011).

**CMIP5** : sous la directive du World Climate Research Programme (WCRP), le Working Group on Coupled Modelling (WGCM) a créé le Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) comme protocole expérimental standardisé d'étude des modèles de circulation générale océan-atmosphère (AOGCMs). Le CMIP est une infrastructure communautaire d'appui au diagnostic, à la validation, et à l'intercomparaison de modèles climatiques, mais aussi à la documentation et à l'accès aux données climatiques. Le CMIP5 (CMIP phase 5) a servi de support au 5<sup>e</sup> Rapport d'évaluation du GIEC (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>).

**Courbe ROC** : courbe qui traduit le comportement d'une classification binaire selon le seuil de classification obtenu dans un modèle. Pour un seuil donné, la courbe trace le taux de vrais-positifs (sensibilité) en fonction du taux de faux-positifs (1-spécificité).

**Déficit d'évaporation** : quantité d'eau manquante dans le sol pour satisfaire les conditions d'évaporation et de transpiration (Laboratoire SILVA, Université de Lorraine-AgroParisTech-INRA).

**Dette climatique** : déséquilibre constaté entre les espèces présentes à un endroit donné et les conditions abiotiques qui s'y trouvent (Svenning et Sandel, 2013).

**Dysmoder** : moder présentant un horizon OH de plus de 1cm d'épaisseur. Les dysmoders sont favorisés par une forte acidité du sol, des peuplements forestiers âgés ou serrés, des climats froids (Bastien et Gauberville, 2011).

**Ecosystème** : ensemble constitué de deux composantes en interaction :

- le biotope, défini par les conditions stationnelles régnant sur un espace homogène ;
- la biocénose, qui comprend l'ensemble des êtres vivants présents sur cet espace.

L'écosystème intègre aussi les relations fonctionnelles que les êtres vivants entretiennent entre eux et avec le milieu (Bastien et Gauberville, 2011).

**Ecosystème vulnérable** : écosystème dont le risque de changement de composition mène à une identité considérablement différente du système, ou s'il est prévu que le système souffre d'un déclin de santé ou de productivité considérable (Janowiak *et al.*, 2014)

**Engorgement** : état d'un sol dont la porosité totale est occupée par l'eau, suite à la remontée près de la surface d'une nappe phréatique ou à un mauvais drainage interne des eaux de pluie. L'eau apparaît alors sous la forme d'une nappe lorsque l'on creuse un trou dans le sol. Il n'y a presque plus d'air dans la porosité d'un sol engorgé et l'oxygène restant est consommé rapidement (Bastien et Gauberville, 2011).

**Evapotranspiration** : combine les pertes d'eau par évaporation (processus physique) et par transpiration d'un végétal (processus biologique). Elle s'exprime en millimètres (mm) d'eau par unité de temps. [...] Cette évapotranspiration dépend du rayonnement net, du déficit de saturation de l'air, de la disponibilité en eau et de l'ensemble des résistances qui s'opposent à son transfert depuis les sites de vaporisation jusqu'à l'air libre (résistance de l'air, résistance du couvert végétal, résistance des stomates, etc.). On peut définir trois valeurs particulières de l'évapotranspiration :

- **l'évapotranspiration potentielle (ETP)** correspond à la valeur atteinte pour une disponibilité en eau maximale en l'absence de résistance. Cette ETP ne dépend que des facteurs climatiques liés au bilan d'énergie et de la résistance de l'air au-dessus de la surface ;
- **l'évapotranspiration maximale (ETM)** correspond à la valeur atteinte pour des conditions hydriques optimales (humidité du sol proche de la capacité au champ

dans la zone racinaire) et des résistances du couvert minimales. Cette ETM correspond généralement aux valeurs observées pour un gazon maintenu ras et bien alimenté en eau. L'ETM est liée à l'ETP par des coefficients cultureux empiriques ;

- l'**évapotranspiration réelle** (ETR) est la valeur atteinte pour des conditions hydriques non optimales et des résistances non négligeables [...]

(Bastien et Gauberville, 2011).

**Exposition** : combien le changement climatique et ses effets toucheraient une espèce ou un écosystème. Elle dépend des changements physiques du climat (température, pluie) et de tout ce qui y est lié (feu, localisation des espèces, etc.) (Glick *et al.*, 2011).

**GIEC** : groupe intergouvernemental d'experts fondé en 1988, chargé d'étudier et de prévoir les effets du changement climatique.

**Global circulation models (GCM)** : famille de modèles prédisant les processus océaniques, atmosphériques et continentaux, ainsi que leurs interactions. D'abord développé pour la météorologie, ils servent aujourd'hui à anticiper les effets du changement climatique.

**Grande région écologique (GRECO)** : région représentant une synthèse des bioclimats, du relief et de la nature des roches, traduite notamment par les étages et les séries de végétation. A l'échelle de la France, l'*Inventaire forestier national* a défini 11 grandes régions écologiques (désignées par une lettre de A à K), auxquelles il faut rajouter l'ensemble des alluvions récentes et maritimes (désigné par la lettre L). Chacune a été divisée en sylvo-écorégions (Bastien et Gauberville, 2011).

**Habitat** : l'habitat est un ensemble non dissociable constitué :

- d'un compartiment stationnel (conditions climatiques régionales et locales, matériau parental et sol, géomorphologie et leurs propriétés physiques et chimiques).
- d'une végétation
- d'une faune associée (avec des espèces inféodées à une espèce végétale, à la végétation, ou utilisant un territoire plus grand que l'habitat considéré).

(Bensettiti *et al.*, 2001).

**Habitat potentiel** : habitat correspondant au niveau maximal de maturité pour une station donnée. Il dépend des facteurs historiques, écologiques (sol, topographie, exposition), et dynamiques (Bonhême, 2021).

**Hygrophile** : qualifie une espèce nécessitant ou tolérant des quantités d'eau importantes dans le sol tout au long de son développement (Bastien et Gauberville, 2011). Une espèce **mésophyphile** ne supporte pas les sols inondés.

**Moder** : forme d'humus résultant de l'absence d'activité des vers anéciques ; elle se caractérise par l'accumulation, au-dessus des horizons minéraux, des boulettes fécales holoraniques d'une faune active consommant les litières dans lesquelles elle vit (arthropodes, vers épigés et enchytréides). [...] En France, les moders sont généralement dus à une forte acidité des matériaux (pH<4,5) défavorable aux vers anéciques. En milieu plus modérément acide, ils peuvent résulter de la dégradation d'oligomulls ou de dysmulls à la suite d'une dégradation des conditions de vie des vers : sécheresse passagère, substitution d'essence (suppression d'un sous-étage de charme, substitution de feuillus par certains résineux à litières à fort C/N), densité de peuplement trop forte (ex : plantation de douglas, avant la première éclaircie), etc. (Bastien et Gauberville, 2011).

**Natura 2000** : réseau constitué à l'échelle de l'Union Européenne regroupant, pour chaque Etat, l'ensemble des zones spéciales de conservation (ZSC) et des zones de protection spéciale (ZPS) en réponse à deux directives européennes : la directive Habitat-Faune-Flore (1992) et la directive Oiseaux (1979). Dans ces zones, où s'applique un certain nombre de mesures réglementaires, la gestion mise en œuvre doit maintenir un bon état de conservation de la biodiversité existante (en particulier les habitats et les espèces visés par les directives) ou le restaurer en tenant compte des exigences économiques, sociales et culturelles (Bastien et Gauberville, 2011).

**Niche écologique** : ensemble des paramètres qui caractérisent les exigences écologiques ou le mode de vie d'une espèce ; leur analyse et leur quantification permettent l'élaboration de modèles de niche. La niche d'une espèce est définie par la fonction qu'elle occupe dans une biocénose (Bastien et Gauberville, 2011). On définit la **niche potentielle** comme la niche écologique d'une espèce en l'absence d'interactions biotiques. Dans le cas contraire, il s'agit de la **niche réalisée**.

**pH** : par convention, le pH d'un échantillon de terre est celui d'une solution résultant du mélange d'un volume de terre fine dans cinq volumes d'eau déminéralisée, après un temps de contact de 2 à 24 heures ; on parle alors de « pH eau », par opposition au « pH KCl » ou au « pH CaCl<sub>2</sub> » qui correspondent à la mesure du pH d'une suspension de terre fine dans du chlorure de potassium ou de calcium ; dans ce cas, les ions K<sup>+</sup> et Ca<sup>2+</sup> s'échangent sur le complexe absorbant avec les ions H<sup>+</sup>, le pH KCl ou CaCl<sub>2</sub> est donc inférieur au pH eau, de 0,2 à 1 unité selon les sols, ce qui permet d'évaluer l'acidité potentielle. Le pH se mesure horizon par horizon. En forêt, on parle souvent, par extension et à tort, du pH « d'un sol » pour désigner celui de l'horizon A. Le *Référentiel pédologique* qualifie ainsi le pH d'un horizon :

- très acide : pH 3,5 à 4,2 ;
- acide : pH 4,2 à 5 ;
- peu acide : pH 5 à 6,5 ;
- neutre : pH 6,5 à 7,5 ;
- basique : pH 7,5 à 8,7 (correspondant aux horizons carbonatés) ;
- très basique : pH > 8,7 (jusqu'à 10, voire plus, correspondant aux sols salés).

(Bastien et Gauberville, 2011).

**Plasticité phénotypique** : capacité d'un génotype à produire plusieurs phénotype. Un **phénotype** étant un attribut d'un organisme, tel que son comportement, sa morphologie ou sa physiologie (Relya et Ricklefs, 2019).

**RCP4.5** : scénario intermédiaire de mitigation et de stabilisation du forçage radiatif. Il prévoit la stabilisation du forçage radiatif à 4,5W/m<sup>2</sup>, soit une concentration de gaz à effet de serre d'environ 650ppm CO<sub>2</sub> eq., après 2100 (van Vuuren *et al.*, 2011). Ce scénario montre un pic de concentration de certains gaz à effet de serre vers 2050, pour diminuer ensuite vers l'objectif fixé pour 2100 (Meinshausen *et al.*, 2011).

**Réserve utile** : synonyme de réserve en eau du sol. Au sens strict, quantité d'eau du sol utilisable par les plantes, présente à un moment donné. C'est une partie du réservoir en eau utile [ou réserve utile maximale], en fonction de son remplissage et de la consommation par les plantes.

**Réserve utile maximale** : quantité d'eau utilisable par les plantes, contenue dans l'épaisseur de sol explorable par les racines. Elle correspond à la différence entre la quantité d'eau dans le sol après ressuyage (capacité au champ) et celle contenue au point de

flétrissement. Elle est exprimée en mm d'eau pour être facilement comparée la pluviosité et à l'évapotranspiration. C'est une caractéristique du sol (fonction de sa texture, de sa teneur en éléments grossiers, en matière organique, de sa densité apparente), mais aussi de l'enracinement de l'espèce présente (Bastien et Gauberville, 2011).

**Résilience** : capacité d'un écosystème à retourner à un état désiré après une perturbation (Millar *et al.*, 2007). Une forêt est résiliente si elle peut s'adapter à des changements graduels puis recouvrer un état antérieur après la perturbation, que ce soit naturellement ou grâce à la gestion (Thorne *et al.*, 2017).

**Résistance** : capacité d'un écosystème à résister à l'influence du changement climatique ou à éviter les effets nuisibles du changement (Parker *et al.*, 2000 dans Millar *et al.*, 2007).

**Sensibilité** : mesure dans laquelle une espèce ou un écosystème sera affecté(e) par le changement climatique. Elle est fonction des variables biologiques et physiologiques intrinsèques de l'espèce/l'écosystème (*e.g.* une espèce vivant à la limite supérieure de sa distribution selon les températures sera sensible au réchauffement climatique), de facteurs physiques et écologiques (*e.g.* l'intensité et l'occurrence des précipitations aura des conséquences sur un écosystème de rivière), et de facteurs de stress d'origine anthropique (*e.g.* le prélèvement non durable des individus provoque un appauvrissement génétique) (Glick *et al.*, 2011).

**Sylvo-écorégion (SER)** : la plus vaste zone géographique du territoire français métropolitain à l'intérieur de laquelle les facteurs déterminant la production forestière ou la répartition des habitats forestiers varient de façon homogène entre des valeurs précises, selon une combinaison originale, c'est-à-dire différente de celles des SER adjacentes (Bastien et Gauberville, 2011).

**Transition** : capacité d'un écosystème à s'adapter à l'accumulation des changements environnementaux (Millar *et al.*, 2007).

**Vulnérabilité** : susceptibilité d'un système face aux effets néfastes du changement climatique (IPCC, 2007).

**Xérophile** : qualifie une espèce ou une communauté tolérant une certaine sécheresse de l'atmosphère ou du sol, voire des deux à la fois (Bastien et Gauberville, 2011).

## Liste des abréviations

<b>AUC</b>	Area Under the Curve
<b>bhc_13</b>	bilan hydrique climatique annuel moyen
<b>bhc_et</b>	bilan hydrique climatique estival moyen
<b>C/N</b>	rapport carbone sur azote
<b>CC</b>	changement climatique
<b>CMIP5</b>	Coupled Model Intercomparison Project 5
<b>CNPF</b>	Centre National de la Propriété Forestière
<b>D<sup>2</sup></b>	déviante expliquée
<b>DE</b>	déficit d'évaporation en eau
<b>EP</b>	engorgement permanent
<b>ET</b>	engorgement temporaire
<b>ETP</b>	évapotranspiration potentielle
<b>GCM</b>	global circulation model
<b>GRECO</b>	grande région écologique
<b>HIC</b>	habitat d'intérêt communautaire
<b>IGN</b>	Institut national de l'information géographique et forestière
<b>INPN</b>	Inventaire National du Patrimoine Naturel
<b>N2000</b>	Natura 2000
<b>pH</b>	potentiel hydrogène
<b>prec_13</b>	précipitations annuelles moyennes
<b>prec_et</b>	précipitations estivales moyennes
<b>RCP4.5</b>	Representative Concentration Pathway 4.5
<b>RMT AFORCE</b>	Réseau mixte technologique pour l'adaptation des forêts au changement climatique
<b>ROC</b>	Receiver Operating Characteristic
<b>RU</b>	réserve utile
<b>RUM</b>	réserve utile maximale
<b>SER</b>	sylvo-écorégion
<b>tmax_et</b>	température maximale moyenne en été
<b>tmin_01</b>	température minimale moyenne de janvier
<b>tmin_03</b>	température minimale moyenne de mars
<b>tmoy_13</b>	température moyenne annuelle



## Liste des illustrations

### Figures :

- Figure 1** : Hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120). .....3
- Figure 2** : Localisation des points de l'inventaire forestier de l'IGN dans la zone d'étude entre 2009 et 2019.....5
- Figure 3** : Composantes de la vulnérabilité et indices associés.....9
- Figure 4** : Evolution de la niche potentielle de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).....14
- Figure 5** : Etat sanitaire des placettes de terrain selon la niche potentielle de 1991-2019...16
- Figure 6** : Evolution de la surface favorable à la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120) au sein du réseau Natura 2000 et du site Natura 2000 de Fontainebleau. ....16
- Figure 7** : Scores obtenus par les composantes de la vulnérabilité climatique de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).....24

### Tableaux :

- Tableau 1** : Scores obtenus par les différents indices d'exposition au sens strict de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).....13
- Tableau 2** : Scores obtenus par l'indice de perte de compatibilité climatique de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).....14
- Tableau 3** : Scores obtenus par les indices de contraction relative et de contraction absolue de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).....14
- Tableau 4** : Scores obtenus par l'indice BioClimSol appliqué au Hêtre et au Chêne sessile...15
- Tableau 5** : Scores obtenus par l'indice d'adaptation bioclimatique appliqué à la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120), au Hêtre et au Chêne sessile...15

## Liste des annexes

<b>Annexe I</b> : Espèces caractéristiques de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx. ...	<b>i</b>
<b>Annexe II</b> : Distribution des placettes potentielles d'HIC 9120 selon les gradients des variables étudiées.....	<b>iii</b>
<b>Annexe III</b> : Placettes prospectées sur le terrain. ....	<b>iv</b>
<b>Annexe IV</b> : Présentation des variables écologiques utilisées pour modéliser la distribution de l'HIC 9120.....	<b>v</b>
<b>Annexe V</b> : Feuille de relevé terrain.....	<b>vii</b>
<b>Annexe VI</b> : Distribution des occurrences potentielles de l'HIC 9120 selon le C/N et le pH bioindiqués.....	<b>x</b>
<b>Annexe VII</b> : Matrice des corrélations ( $R^2$ ) des variables utilisées et performance du modèle sélectionné.....	<b>xi</b>
<b>Annexe VIII</b> : Courbes de réponse écologique de l'HIC 9120.....	<b>xii</b>
<b>Annexe IX</b> : Niche potentielle de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120) en 1961-1990.....	<b>xiv</b>
<b>Annexe X</b> : Confrontation des amplitudes écologiques de l'HIC 9120 et des essences structurantes avec les gradients de bilan hydrique estival et de température maximale estivale.....	<b>xv</b>
<b>Annexe XI</b> : Effectifs des placettes potentielles de hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120) selon le niveau de vigilance BioClimSol.....	<b>xvi</b>
<b>Annexe XII</b> : Scores obtenus par les composantes de la vulnérabilité climatique de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).....	<b>xvii</b>
<b>Annexe XIII</b> : Dépérissement observé sur les placettes de terrain et leur localisation dans la niche potentielle de l'HIC 9120.....	<b>xx</b>
<b>Annexe XIV</b> : Confrontation du dépérissement observé sur le terrain au dépérissement prédit par BioClimSol pour le Hêtre et le Chêne sessile.....	<b>xxii</b>
<b>Annexe XV</b> : Confrontation du dépérissement observé sur le terrain à l'adaptation bioclimatique prédite pour l'habitat, le Chêne sessile et le Hêtre.....	<b>xxiv</b>
<b>Annexe XVI</b> : Significativité des tests statistiques des variables expliquant l'état sanitaire observé sur le terrain.....	<b>xxvi</b>
<b>Annexe XVII</b> : Evolution des scores d'adaptation bioclimatique du Hêtre et du Chêne sessile au niveau des placettes de hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx potentielle (HIC 9120).....	<b>xxvii</b>

## Introduction

Depuis son apparition il y a 300 000 ans, l'Homme exerce son influence sur la Terre. En façonnant son environnement au gré de ses besoins, l'humanité s'est faite la plus grande des espèces ingénieuses. Mais ce gain de confort a un coût, et avec l'essor de l'ère industrielle dans les années 1800, se produit l'amplification d'un phénomène naturel à l'échelle des temps géologiques : le réchauffement climatique. Face à ce constat préoccupant, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (**GIEC**) a été créé en 1988. Au regard des différents résultats et rapports qu'il publie, les Etats engagés dans l'Accord de Paris de 2015 se veulent acteurs de la riposte contre le changement climatique et se fixent pour trajectoire de ne pas dépasser une augmentation de 1.5°C par rapport aux niveaux de températures préindustriels (GIEC, 2018). Toutefois, cet effort de mitigation n'est pas libre de conséquences à l'échelle planétaire.

Parmi la variété des effets du changement climatique (CC), ceux touchant l'équilibre des écosystèmes sont les plus alarmants. En effet, en raison des bouleversements prédits dans l'intensité et la fréquence des phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes (GIEC, 2018), des événements tels que les incendies, les sécheresses, les inondations ou les tempêtes déstabiliseront le fonctionnement des milieux. Face au besoin urgent d'adaptation que ces changements imposent, les forêts sont particulièrement vulnérables du fait de leur échelle de durée de vie, dont la longueur ne permet pas une évolution rapide (Lindner *et al.*, 2010; Pargade et Brusten, 2020). Ainsi, il est impératif que les décideurs et les gestionnaires revoient les stratégies de conservation appliquées aux écosystèmes forestiers, de sorte à favoriser leur **résistance**, leur **résilience** ou leur **transition** (Millar *et al.*, 2007). Pour ce faire, et afin d'adopter des mesures de gestion efficaces et durables, il est nécessaire de pouvoir apprécier la vulnérabilité des écosystèmes forestiers face au changement climatique.

La **vulnérabilité** se définit comme « la susceptibilité d'un système face aux effets néfastes du changement climatique » (IPCC, 2007). Elle est fonction de l'exposition du système aux changements, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation à ces changements (Smit et Pilifosova, 2003). Un **écosystème** est considéré **vulnérable** lorsque « le risque de changement de composition mène à une identité considérablement différente du système, ou s'il est prévu que le système souffre d'un déclin de santé ou de productivité considérable » (Janowiak *et al.*, 2014).

Dans leur guide d'évaluation de la vulnérabilité, Glick *et al.* (2011) définissent les concepts d'**exposition**, de sensibilité et de capacité d'adaptation. L'exposition évalue combien le CC et ses effets toucheraient une espèce ou un écosystème. Elle dépend des changements physiques du climat (température, pluie) et de tout ce qui y est lié (feu, localisation des espèces, etc.). Les paramètres d'exposition peuvent être à l'origine de zones refuges face au CC. Par exemple, une forêt dense de haute altitude ou exposée nord pourrait résister aux températures plus chaudes (Glick *et al.*, 2011).

La **sensibilité** représente la mesure dans laquelle une espèce ou un écosystème sera affecté(e) par le CC. Elle est fonction des variables biologiques et physiologiques intrinsèques de l'espèce/l'écosystème (*e.g.* une espèce vivant à la limite supérieure de sa distribution selon les températures sera sensible au réchauffement climatique), de facteurs physiques et écologiques (*e.g.* l'intensité et l'occurrence des précipitations aura des conséquences sur un écosystème de rivière), et de facteurs de stress d'origine anthropique (*e.g.* le prélèvement non durable des individus provoque un appauvrissement génétique).

Enfin, la **capacité adaptative** est fonction des traits intrinsèques du système (*e.g.* comportement d'une espèce) et de facteurs externes (*e.g.* barrière physique), et correspond

aux opportunités d'amélioration de la sensibilité et de l'exposition. Lindner *et al.* (2010) lui rajoutent des facteurs socio-économiques permettant l'implémentation d'une adaptation planifiée. Dans cette étude, la capacité d'adaptation est élargie à l'adaptation ou la résistance possible d'un système au CC.

De nombreux travaux s'intéressent à la réaction des espèces sous l'effet du CC, qui se concentrent généralement sur leurs aires de répartition. Etudier la réponse d'un écosystème au CC est en revanche moins répandu et plus complexe. Or, les espèces interagissant entre elles, cette approche s'avère nécessaire lorsque l'on souhaite saisir les conséquences du CC. En effet, il se peut que les réponses individuelles des espèces qui constituent un écosystème, prises indépendamment, ne traduisent pas la réalité de l'écosystème face au CC (Smuts, 1926). C'est pourquoi l'approche **habitat** se développe dans la littérature scientifique (*e.g.* Marage et Gégout, 2010; Janowiak *et al.*, 2014; Comer *et al.*, 2018). Un habitat peut être défini comme « un ensemble non dissociable constitué d'un compartiment stationnel (conditions climatiques régionales et locales, matériau parental et sol, géomorphologie et leurs propriétés physiques et chimiques), d'une végétation, et d'une faune associée » (Bensettiti *et al.*, 2001).

La présente étude se focalise sur la hêtraie-chênaie collinéenne atlantique acidiphile à sous-bois de Houx. Il s'agit de l'habitat d'intérêt communautaire 9120 (HIC 9120), intégré dans la Directive européenne Habitat-Faune-Flore et, à ce titre, décrit dans le cahier d'habitats forestiers (Bensettiti *et al.*, 2001). En Europe et en France, les essences structurant l'HIC 9120, *Fagus sylvatica* et *Quercus petraea*, montrent des signes de fragilité liés aux sécheresses récurrentes (défoliation, baisse de vitalité, etc.) (FOREST EUROPE, 2020 ; Département de la santé des forêts, 2021) induites par le changement climatique.

A l'échelle de la France métropolitaine, 245 sites **Natura 2000** recensent l'existence de l'HIC 9120 (INPN – Données du programme Natura 2000, [www.data.gouv.fr](http://www.data.gouv.fr)), et seulement 100 sites sont localisés dans les domaines atlantique et hyper-atlantique. L'HIC 9120 est présent sur 6% des sites N2000 terrestres de France métropolitaine (Centre de ressources Natura 2000, 2018). L'intégration de l'habitat dans le réseau Natura 2000 oblige à le maintenir dans un état de conservation favorable, de sorte à préserver son caractère représentatif de la biodiversité européenne. Or, les bouleversements induits par le changement climatique compromettent cet objectif, venant renforcer le besoin d'évaluation de la vulnérabilité de l'habitat face aux changements globaux.

A partir des données stationnelles et écologiques de l'inventaire forestier de l'IGN, ce travail développe une approche par indices, inédite en France, permettant d'évaluer la vulnérabilité des habitats forestiers face au changement climatique. Le protocole est testé sur la hêtraie-chênaie collinéenne atlantique acidiphile à Houx, considérée comme habitat pilote en raison des enjeux économiques qu'elle représente et de sa distribution nette selon les variables climatiques et édaphiques. Les résultats sont ensuite confrontés à des données de terrain relatives à l'état sanitaire de peuplements localisés en zone Natura 2000 afin de mettre en perspective la vulnérabilité théorique avec la réalité de terrain dans les aires protégées. A terme, cette étude permettra l'implémentation des mesures de gestion adaptative sur les peuplements HIC 9120, tout en suggérant des améliorations du dispositif Natura 2000 quant à la préservation des habitats forestiers.

## I – Méthode

### I.1 – Habitat d'étude

Dans un écosystème, la végétation traduit les conditions de milieu et le fonctionnement du système, ce qui permet d'identifier les habitats (Bensettiti *et al.*, 2001). Dans le contexte actuel de changement climatique, de nombreuses études s'intéressent aux réponses des espèces face aux changements en cours (*e.g.* Piedallu *et al.*, 2009; Taccoen *et al.*, 2019). Cependant, chaque espèce interagit avec son écosystème, ce qui modifie la réaction de ce dernier aux altérations climatiques. Adopter une approche habitat conserve une vision large, basée sur les associations végétales, et permet d'appréhender différemment les effets du changement climatique (Thorne *et al.*, 2017).

Dans le cahier des habitats forestiers (Bensettiti *et al.*, 2001), l'habitat d'intérêt communautaire 9120 (HIC 9120) est intitulé « Hêtraies atlantiques acidiphiles à sous-bois à *Ilex* et parfois *Taxus* ». Il présente plusieurs associations végétales, dont *Vaccinio myrtilli-Quercetum petraeae* défini par Clément, Gloaguen et Touffet en 1975, soit la hêtraie-chênaie collinéenne à Houx (Bensettiti *et al.*, 2001) (**Figure 1**). Cette association constitue notre habitat d'étude, que nous désignerons par la suite par hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120). D'après la Contribution au prodrome des végétations de France (Renaux *et al.*, 2019), *Vaccinio myrtilli-Quercetum petraeae* s'inscrit dans la classe *Quercetea robori-petraeae*, qui regroupe les forêts caducifoliées acidiphiles collinéennes, et dans l'ordre *Quercetalia roboris*, qui correspond à des communautés **xérophiles** à **mésohygrophiles**. Enfin, l'association d'étude fait partie de l'alliance *Quercion roboris*, caractérisée par des forêts acidiphiles de Chêne sessile et de Hêtre.



**Figure 1** : Hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à houx (HIC 9120). (a) Forêt de Quénécan, (b) houppier de Chêne déperissant en Forêt de Rennes.



Les travaux de Rameau *et al.* (2000), précurseurs du cahier d'habitats forestiers, mettent en évidence la structuration des hêtraies-chênaies atlantiques collinéennes acidiphiles à houx en 3 strates :

- une strate arborescente, dominée par le Hêtre et les Chênes (sessile et pédonculé), qui peuvent être accompagnés par des essences pionnières (*e.g.* Bouleaux, Sorbier des oiseleurs) ;
- une strate arbustive, dominée par le Houx, pouvant être dense et élevée. Il est possible d'y retrouver d'autres espèces comme le Coudrier ou le Néflier ;
- une strate herbacée, souvent recouvrante et pauvre en espèces, composée d'espèces comme la Myrtille, la Canche flexueuse, la Fougère aigle, la Laîche à pilule ou encore le Polytric élégant.

Le prodrome des végétations de France (Renaux *et al.*, 2019) et le cahier d'habitats (Bensettiti *et al.*, 2001) relèvent pour l'HIC 9120 une combinaison caractéristique d'espèces, développée en **annexe I**.

Rameau *et al.* (2000) associent les hêtraies-chênaies acidiphiles à Houx aux régions collinéennes atlantiques « bien arrosées » (>500-600mm/an). Le cahier d'habitats précise que l'HIC 9120 se situe là où le climat est humide et l'hiver frais, avec la possibilité de gelées printanières. Pour ce qui est de la température, l'habitat d'étude est localisé là où la température moyenne annuelle environne 10°C et où l'été est frais (température maximale estivale avoisinant 22°C) (**Annexe II**).

Comme leur nom l'indique, les hêtraies-chênaies acidiphiles à Houx sont caractéristiques des sols acides. Un sol est dit acide lorsque ses « horizons de surface ont un pH inférieur à environ 5. Ces sols se retrouvent sur des roches siliceuses (*e.g.* granites, schistes, grès) ou leurs formes altérées (*e.g.* limons à silex, sables) (Bensettiti *et al.*, 2001). D'après le cahier des habitats forestiers, les hêtraies-chênaies acidiphiles sont présentes sur un large éventail de sols (plus ou moins podzolisés, bruns acides, etc.), mais peu hydromorphes. L'HIC 9120 présente généralement un humus **moder** ou **dysmoder**, formes favorisés par une forte acidité du sol (Bastien et Gauberville, 2011).

L'HIC 9120 a été choisi comme habitat pilote en raison de sa surface importante, de ses enjeux de production et de sa distribution nette selon les variables climatiques et édaphiques. De plus, les essences qui le structurent sont sensibles aux changements globaux, notamment le Hêtre, que le Département de la santé des forêts (2021) reconnaît comme victime des vents violents, et des sécheresses depuis 2018. En parallèle, l'état du Chêne sessile reste stable malgré les sécheresses répétitives, car ce dernier peut mettre plusieurs années à réagir à un stress intense (Département de la santé des forêts, 2021). Toutefois, le devenir des hêtraies-chênaies est préoccupant du fait de l'état sanitaire dégradé du Hêtre qui compromet l'ambiance forestière dans les parcelles les plus atteintes.

## 1.2 – Données habitat et essences structurantes

Les données utilisées dans cette étude proviennent de l'inventaire forestier de l'IGN effectué entre 2009 et 2019. Les bases de données renseignent sur la présence ou l'absence de l'**habitat potentiel** sur une maille quasi-systématique de 1km<sup>2</sup>, ainsi que sur des données écologiques associées (*e.g.* données stationnelles et floristiques). Sur les 22581 placettes recensées dans la zone d'étude (voir ci-après), 1415 correspondraient à de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx si elles évoluaient naturellement. Les données d'occurrences réelles des essences structurant l'habitat (Hêtre et Chêne sessile) proviennent

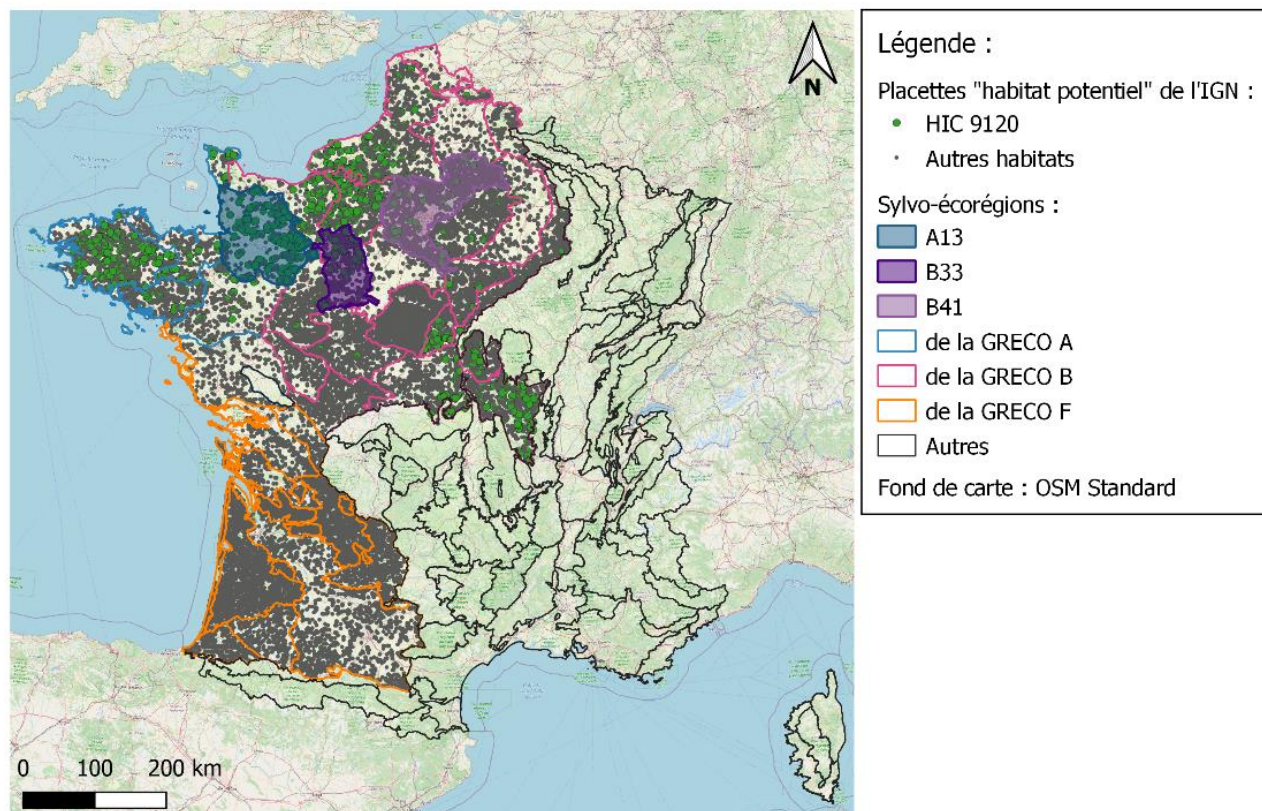
également de l'IGN et concernant la France entière sur une maille de 1km<sup>2</sup> pour la période 2005-2019.

### 1.3 – Zone d'étude

Les hêtraies-chênaies collinéennes atlantiques acidiphiles à Houx sont particulièrement bien représentées dans le quart nord-ouest de la France. Le cahier d'habitats forestiers signale leur présence dans les Hauts de France, en Normandie et en Bretagne, ainsi que dans le Massif central et le Morvan. Renaux *et al.* (2017) y ajoutent l'Ile-de-France, l'ouest de la Champagne-Ardenne et de la Bourgogne, l'ouest et le nord du Centre-Val de Loire, et les Pays-de-la-Loire.

La France métropolitaine est divisée en 12 **grandes régions écologiques** (GRECO). Il s'agit de régions « présentant une synthèse des bioclimats, du relief et de la nature des roches, traduite notamment par les étages et les séries de végétation » (Bastien et Gauberville, 2011). D'après les relevés de l'IGN, l'HIC 9120 (*Vaccinio myrtilli-Quercetum petraeae*) pourrait être présent dans 3 GRECO : le Grand Ouest cristallin et océanique (A), le Centre Nord semi-océanique (B) et le Sud-Ouest océanique (F) (**Figure 2**). Ces GRECO constituent donc la zone d'étude et sont elles-mêmes subdivisées en 39 **sylvo-écorégions** (SER) dont 3 seront analysées plus en détails : le Bocage normand et le Pays de Fougères (A13), le Perche (B33) et le Bassin parisien tertiaire (B41). Ces SER ont été choisies de sorte à représenter un gradient de compatibilité entre l'habitat et son environnement.

En tant qu'habitat d'intérêt communautaire, la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx est recensée dans les zones Natura 2000. Certaines d'entre elles ont été ciblées pour la phase de terrain (**Annexe III**).



**Figure 2** : Localisation des points de l'inventaire forestier de l'IGN dans la zone d'étude entre 2009 et 2019 (n=22581). SER : sylvo-écorégion. GRECO : grande région écologique. A13, B33 et B41 désignent respectivement le Bocage normand et le Pays de Fougères, le Perche, le Bassin parisien tertiaire.

#### I.4 – Périodes d'étude

Quatre périodes sont étudiées dans ce travail. La période 1961-1990 constitue la période de référence. Il est considéré qu'en France, des changements radicaux de température se sont opérés depuis 1987 (Taccoen *et al.*, 2021). Cette période représente donc une référence « avant » CC. Le pas de temps de 30 ans est cohérent avec la durée de vie des arbres.

Le présent est étudié sur la période 1991-2019. Ces trente dernières années ont fortement influencé les peuplements observés actuellement (état sanitaire, productivité). Ce présent est inclus dans le CC.

La période 2046-2065 correspond à un futur proche. Il s'agit d'un horizon important pour anticiper les changements accompagnant le CC. En foresterie, cette anticipation permet de faire évoluer les milieux progressivement (*e.g.* amélioration des jeunes peuplements, renouvellement de peuplements matures).

La période 2081-2100 représente un futur lointain. Le long terme est important en foresterie du fait de la durée de vie des peuplements. La plupart des milieux forestiers actuels seront renouvelés ou à renouveler à cette échéance, ils auront subi fortement les effets du CC. Des changements seront certainement à prévoir dans leur composition et leur fonctionnalité.

#### I.5 – Données climatiques

Huit variables climatiques déterminantes pour la physiologie et le cycle de vie des arbres ont été utilisées : la température moyenne annuelle (tmoy\_13), la température minimale de janvier (tmin\_01), la température minimale de mars (tmoy\_03), la température maximale estivale (tmax\_et), les précipitations annuelles (prec\_13), les précipitations estivales (prec\_et), le **bilan hydrique** climatique annuel (bhc\_13) et le bilan hydrique climatique estival (bhc\_et) (Piedallu *et al.*, 2013; Piedallu *et al.*, 2016). Elles sont rappelées en **annexe IV**. Les variables de températures sont exprimées en degrés Celsius et les variables hydriques en millimètres. Le bilan hydrique climatique est la différence entre les précipitations et l'**évapotranspiration** potentielle (ETP en mm). L'ETP intervenant dans le calcul de bhc\_13 et bhc\_et a été calculée selon la formule de Turc (Turc, 1955 dans Piedallu *et al.*, 2016).

Les variables estivales sont des moyennes entre juin et août. Pour les périodes 1961-1990 et 1991-2019, les données sont issues de la Base de données DIGITALIS (Laboratoire SILVA, Université de Lorraine-AgroParisTech-INRA). Pour les périodes futures, les données proviennent du **CMIP5** (Centre for Environmental Data Analysis, 2018). Le scénario de forçage radiatif **RCP4.5** a été étudié au moyen de 3 **GCM** : HadGEM2-ES, MIROC5 et MPI-ESM-LR. La résolution spatiale des données est 1km<sup>2</sup>.

#### I.6 – Données édaphiques

Sept variables édaphiques reconnues importantes pour les essences forestières ont été étudiées. Il s'agit du **pH**, du **C/N**, de l'indice d'**engorgement** permanent (EP), de l'indice d'engorgement temporaire (ET), de la **réserve utile maximale** (RUM) en millimètres, de la **réserve utile** (RU) en millimètres et du **déficit** annuel d'**évaporation** en eau (DE) en millimètres (Seynave *et al.*, 2008; Piedallu *et al.*, 2016). Les variables sont rappelées en **annexe IV**.

Ce travail utilise deux sources pour ces données. Les variables pH, C/N, EP et ET ont été estimées par bioindication (Gégout *et al.*, 2005) à partir de la flore relevée sur les placettes de l'IGN. Chaque placette s'est vue attribuer la valeur moyenne bioindiquée par



la flore lorsqu'au moins 7 espèces étaient associées à des valeurs indicatrices (Pinto *et al.*, 2016).

La RUM a été calculée selon la méthode d'Al Majou *et al.* (2008 dans Piedallu *et al.*, 2011) à partir des données de profondeur et de texture de l'IGN.

Les variables ci-dessus ont également été extraites à une résolution de 1km<sup>2</sup> de la Base de données DIGITALIS (Laboratoire SILVA, Université de Lorraine-AgroParisTech-INRA), tout comme la RU. Cette dernière a été recalculée pour les périodes futures à partir des données climatiques et de la RUM, tandis que le pH, le C/N, l'EP et l'ET sont considérés constants dans le temps.

Le DE a été calculée pour toutes les périodes comme la différence entre l'**évapotranspiration potentielle** (ETP) et l'**évapotranspiration réelle** (ETR).

### 1.7 – Fondements méthodologiques

Ce travail s'inspire des travaux de Comer *et al.* (2012; 2018; 2019). Ces derniers caractérisent la vulnérabilité globale des habitats au changement climatique en calculant différents scores relatifs aux 3 composantes de la vulnérabilité (*i.e.* exposition, sensibilité, capacité adaptative).

Pour appréhender l'exposition, Comer *et al.* (2012) définissent un seuil au-dessus duquel une variable peut être considérée comme significativement différente des gammes de valeurs habituelles pour un habitat donné. Pour chaque variable, le seuil correspond à la moyenne de la variable sur le territoire d'étude de l'habitat pendant la période de référence, plus ou moins 2 fois son écart-type. Ainsi, sur chaque unité élémentaire étudiée (*e.g.* un pixel), si la valeur prise sort de cet intervalle, l'unité élémentaire est exposée. D'après les auteurs, ce seuil signifie que, statistiquement, les valeurs prédites tombent en dehors de 95% des valeurs de la période de référence. Les auteurs cartographient alors leur zone d'étude selon le nombre de variables dépassant les gammes de référence et déterminent pour chaque variable la proportion du territoire affectée par le CC.

Pour évaluer la sensibilité, Comer *et al.* (2019) utilisent notamment un indice intitulé « Suitability Change », qui mesure le changement de compatibilité climatique d'un habitat par la soustraction des compatibilités entre deux périodes. Dans leurs travaux de 2012, Comer *et al.* définissent également le « Climate Envelope Shift Overlap Index » comme la proportion de l'enveloppe climatique actuelle de l'habitat recouverte par l'enveloppe climatique projetée dans le futur. L'inconvénient de l'indice construit comme tel est qu'il ne met en évidence que la part de la niche initiale conservée au cours du temps et omet les déplacements ou les extensions de l'enveloppe climatique. De plus, la sensibilité serait élevée pour un score proche de 0, tandis qu'il serait plus intuitif d'avoir une sensibilité forte pour un score important.

Comer *et al.* (2012) ont aussi créé un indice de variabilité bioclimatique. Ce dernier appréhende la capacité adaptative d'un habitat à travers la quantité de bioclimats qu'il chevauche par rapport aux autres habitats présents dans la zone d'étude.

Cette étude exploite également l'outil BioClimSol développé par le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF). Son but est d'accompagner les forestiers dans la gestion du risque de dépérissement des peuplements sur pied et d'orienter le choix des essences en reboisement dans le contexte de CC (Lemaire *et al.*, 2014). Il évalue le risque pour chaque essence d'un peuplement d'être dépérissante, *i.e.* le risque de présenter au moins 20% d'arbres dépérissants (Lemaire *et al.*, 2014). Pour une essence donnée, BioClimSol calcule à partir de données stationnelles la probabilité de présence d'au moins 20% de tiges avec plus de 50% de perte foliaire ou de déficit de ramification.

## 1.8 – Modélisation

Une régression logistique ascendante a été effectuée de sorte à calculer les indices de perte de compatibilité climatique, de contractions relative et absolue de la niche, et d'adaptation bioclimatique de l'habitat et des essences structurantes. Cette méthode permet de prédire une variable binaire (ici, la présence ou l'absence de l'habitat potentiel) par la sélection et l'ajout successifs de variables explicatives (Cox, 1958). Elle est répandue dans les analyses de distribution des essences forestières (e.g. Coudun, 2005; Coudun *et al.*, 2006; Piedallu *et al.*, 2009; Taccoen *et al.*, 2021).

Le modèle a été calibré sur la période 1961-1990 avec 70% des placettes sélectionnées aléatoirement. Les 30% restant ont servi à valider le modèle. Utiliser une période passée et des occurrences présentes pour calibrer un modèle est judicieux lors de la prise en compte de la **dette climatique**. Cette dernière implique un déséquilibre entre les communautés végétales observées et le climat contemporain, notamment dans les forêts de plaine (Bertrand *et al.*, 2011). Ainsi, les forêts actuelles reflètent le climat passé, d'où la période de calibration. Les valeurs des variables édaphiques utilisées lors de cette phase sont issues de la bioindication.

La détermination des variables se fait par sélection successive de la déviance expliquée ( $D^2$ ) la plus forte. Ne sont autorisées que les variables corrélées à moins de 70% entre elles. Des exceptions sont admises si le graphe  $y=f(x)$  (pour  $x$  et  $y$  des variables candidates) présente une séparation nette entre les présences et les absences. La construction du modèle s'arrête lorsque le gain de  $D^2$  entre le modèle à  $n$  variables et celui à  $n+1$  variables est inférieur ou égal à 0,01. En dehors des variables hydriques (i.e. précipitations et bilans hydriques), les courbes de réponse en cloche sont admises.

La qualité du modèle est évaluée grâce à l'aire sous la **courbe ROC (AUC)** (Fielding et Bell, 1997). La performance du modèle est acceptable lorsque son AUC est comprise entre 0.7 et 0.8, et excellente quand son AUC dépasse 0.9 (Hosmer *et al.*, 2013).

La projection du modèle sur les différentes périodes d'étude permet de cartographier la niche potentielle de l'habitat. Chaque maille de 1km<sup>2</sup> est associée à une probabilité de présence potentielle de l'habitat (i.e. probabilité que les conditions nécessaires à l'existence de l'habitat soient réunies). Cette étape utilise les données édaphiques de la base de données DIGITALIS.

## 1.9 – Confrontation à des données de terrain

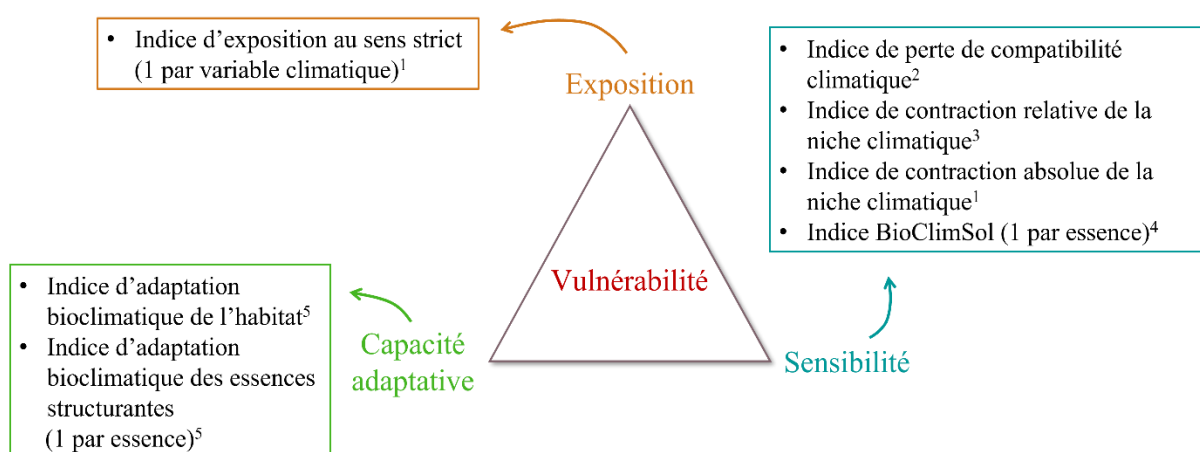
Quinze sites Natura 2000 répartis dans l'aire de distribution de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile ont été prospectés (**Annexe III**). Sur chaque site, des informations relatives au sol, à la flore, au peuplement et à l'état sanitaire ont été relevées sur 2 à 4 placettes considérées à dire d'expert comme représentatives de l'habitat et regroupant une variété de conditions écologiques. La feuille de relevé est disponible en **annexe V**. L'état sanitaire a été évalué selon le protocole DEPERIS développé par le Département de la santé des forêts (Goudet *et al.*, 2018). Lorsque cela était possible, au moins 5 arbres de chaque essence structurante ont été recensés pour l'état sanitaire. Un peuplement est considéré dépérissant lorsqu'au moins 20% des arbres recensés sont dépérissants. Il en va de même pour chacune des essences structurantes.

Afin de confronter l'état sanitaire observé sur le terrain et la vulnérabilité prédite de l'habitat, l'indice de perte de compatibilité climatique, les indices BioClimSol et les indices d'adaptation bioclimatique ont été calculés sur les placettes de terrain. Le dépérissement observé sur le terrain a également été mis en perspective avec la niche climatique potentielle en 1991-2019.

## II – Résultats

### II.1 – Trame analytique

La méthode innovante développée dans cette étude vise à appréhender la vulnérabilité d'un habitat face au changement climatique au moyen de calculs d'indices relatifs à ses 3 composantes (**Figure 3**). Adopter une approche par indices rend le protocole répliquable à d'autres habitats forestiers et facilite leur comparaison. L'exposition est ainsi divisée en autant d'indices d'exposition stricte au CC qu'il y a de variables climatiques étudiées. La sensibilité regroupe un indice de perte de compatibilité climatique, un indice de contraction relative de la niche climatique de l'habitat, un indice de contraction absolue de cette même niche, et les indices BioClimSol (<https://www.cnpf.fr/n/bioclimsol/n:558>) caractérisant le risque de dépérissement des essences structurant l'habitat (*i.e.* Hêtre et Chêne sessile). Enfin, la capacité adaptative se décompose en des indices d'adaptation bioclimatique relatifs à l'habitat et à ses essences structurantes.



**Figure 3 : Composantes de la vulnérabilité et indices associés.** <sup>1</sup> adapté de Comer *et al.* (2012) ; <sup>2</sup> adapté de Comer *et al.* (2019) ; <sup>3</sup> inspiré de Comer *et al.* (2012) ; <sup>4</sup> CNPF ; <sup>5</sup> idée originale (cf. partie II.1.5). « Adapté de » signifie modifier l'indice source pour qu'il fonctionne avec nos données. « Inspiré de » signifie construire un indice à l'objectif similaire à l'indice source.

#### II.1.1 – Exposition : Indices d'exposition stricte

L'indice d'exposition stricte au CC, compris entre 0 et 1, évalue l'ampleur avec laquelle les changements climatiques s'opèrent au niveau de l'habitat. Pour chacune des variables climatiques étudiées et pour une période donnée, l'indice correspond au pourcentage de placettes de l'habitat potentiel concernées par un changement de valeur important par rapport à la période de référence. Pour chaque SER étudié, la valeur de référence ne concerne que leur territoire. La condition à remplir pour qu'un changement soit considéré important est :

$$|x_{\text{placette, période étudiée}} - \bar{x}_{\text{période référence}}| > 2\sigma_{\text{période référence}}$$

avec  $x_{\text{placette, période étudiée}}$  : la valeur prise par la placette pour la variable étudiée ;  $\bar{x}_{\text{période référence}}$  : la valeur moyenne de la variable sur l'ensemble des placettes ;  $\sigma_{\text{période référence}}$  : l'écart-type de la variable sur l'ensemble des placettes. Pour les périodes futures, les résultats des 3 GCM sont moyennés. Un score égal à 1 signifie que l'ensemble

des zones de présence potentielle de l'habitat seraient exposées à un changement important dans les valeurs prises par la variable étudiée (*i.e.* exposition forte).

### II.1.2 - Sensibilité : Indice de perte de compatibilité climatique

L'indice de perte de compatibilité climatique évalue la perte de compatibilité entre l'habitat potentiel et son environnement. Au moyen d'une modélisation par régression logistique, dont la méthode est détaillée ultérieurement, la perte de compatibilité au niveau de chaque placette se calcule comme :

$$p_{\text{période référence}} - p_{\text{période étudiée}}$$

avec  $p_{\text{période référence}}$  : la probabilité de présence potentielle de l'habitat pendant la période de référence ;  $p_{\text{période étudiée}}$  : la probabilité de présence potentielle de l'habitat pendant la période étudiée. Les scores négatifs (*i.e.* gain de compatibilité) sont ramenés à 0. Pour les périodes futures, la probabilité de présence potentielle prise en compte est la moyenne des probabilités prédites par les 3 GCM.

Le score pris par l'indice est la moyenne des pertes de compatibilité sur l'ensemble des placettes. Le score lu est donc la perte de compatibilité moyenne de l'environnement vis-à-vis de l'habitat entre la période étudiée et la période de référence. Plus le score est proche de 1, plus la probabilité de présence potentielle de l'habitat chute entre les deux périodes (*i.e.* sensibilité forte). Un score égal à 0 signifie soit une stabilité, soit un gain de compatibilité entre l'habitat potentiel et son environnement (*i.e.* sensibilité faible). Comme l'indice ne rend pas compte de si la perte s'effectue à partir d'une probabilité forte ou d'une probabilité faible, il est important de confronter le résultat obtenu aux cartes issues de la modélisation.

### II.1.3 – Sensibilité : Indices de contraction relative et absolue

L'indice de contraction relative évalue l'étrécissement de la niche climatique potentielle de l'habitat entre une période d'étude et la période de référence. Le score pris par l'indice est :

$$1 - \frac{\text{surface favorable de la période étudiée}}{\text{surface favorable de la période de référence}}$$

Les scores négatifs (*i.e.* gain de surface favorable) sont ramenés à 0. Un score proche de 1 signifie que la surface favorable pendant la période étudiée est quasi nulle (*i.e.* sensibilité forte). Un score égal à 0 signifie que la surface favorable pendant la période d'étude est équivalente ou supérieure à celle de la période de référence (*i.e.* sensibilité faible). Le score lu est donc le pourcentage de surface de niche perdue entre les deux périodes, indépendamment de leur superposition dans l'espace. De ce fait, l'indice tient compte de l'extension ou du déplacement éventuel de l'enveloppe climatique dans l'espace.

L'indice de contraction absolue évalue l'étrécissement de la niche climatique potentielle initiale depuis la période de référence. Il s'agit donc de la proportion de la niche climatique potentielle initiale qui deviendrait défavorable à l'habitat. Le score se calcule comme suit :

$$\frac{\text{surface devenue défavorable durant la période étudiée}}{\text{surface favorable de la période de référence}}$$

Un score proche de 0 signifie que la niche potentielle initiale est conservée (*i.e.* sensibilité faible) tandis qu'un score proche de 1 signifie que la niche potentielle initiale devient défavorable à l'habitat (*i.e.* sensibilité forte).

La conjonction des deux indices permet de mettre en évidence l'extension (*e.g.* indice de contraction relative faible / indice de contraction absolue constant) ou le déplacement de l'enveloppe climatique de l'habitat (*e.g.* indice de contraction relative faible / indice de contraction absolue fort).

Pour ces deux indices, un pixel est considéré favorable dans le futur si au moins 2 GCM l'avaient prédit comme tel (Comer *et al.*, 2012).

#### *II.1.4 – Sensibilité : Indices BioClimSol*

Pour chaque essence structurant l'habitat d'étude, le score pris par l'indice BioClimSol correspond à la moyenne des indices de vigilance obtenus sur l'ensemble des placettes de l'habitat potentiel puis ramenée entre 0 et 1 par une division par 10.

BioClimSol ne travaille pas avec les mêmes scénarios climatiques que cette étude, mais avec des scénarios basés sur l'augmentation de la température moyenne annuelle. Les périodes de présent, futur proche et futur lointain ont donc été associées respectivement aux scénarios +0°C, +1°C et +2°C.

#### *II.1.5 – Capacité adaptative : Indices d'adaptation bioclimatique*

Pour la capacité adaptative, les indices d'adaptation bioclimatique de l'habitat et de ses essences structurantes sont pensés de sorte à réduire le nombre d'informations nécessaires aux forestiers et de faciliter leur application à l'échelle locale. Cette étude se concentre sur les aspects climatiques de l'adaptation, l'adaptation liée aux pratiques de gestion sylvicole n'est donc pas prise en compte.

L'indice d'adaptation bioclimatique de l'habitat évalue combien celui-ci est adapté aux conditions climatiques qu'il est susceptible de rencontrer depuis la période référence. Pour les variables climatiques sélectionnées par la régression logistique, l'indice vérifie que les conditions au niveau de chaque placette de l'habitat potentiel coïncident avec l'amplitude écologique de l'habitat pendant la période de référence. L'intervalle [0;1] est divisé en autant de sous-intervalles qu'il y a de variables climatiques sélectionnées. Pour chaque placette, une note intermédiaire est prise qui correspond à l'intervalle équivalent au nombre de variables dont la valeur est comprise dans l'amplitude de l'habitat. Le score final est la moyenne des notes prises par chaque placette.

Les indices d'adaptation bioclimatique des essences structurantes évaluent combien les essences qui structurent l'habitat sont adaptées aux conditions que l'habitat est susceptible de rencontrer. Le calcul du score est le même que pour l'indice d'adaptation bioclimatique de l'habitat, mais les amplitudes des essences ont été calculées pour la France entière pour la période 1991-2019, de sorte à se rapprocher de la période de saisie des données IGN (2005-2019). Travailler sur la distribution des essences à l'échelle nationale permet d'identifier la possibilité de puiser de l'adaptation (*e.g.* ressource génétique) chez des individus d'autres provenances que la zone de répartition de l'habitat.

Pour ces trois indices, les scores futurs correspondent à la moyenne des scores obtenus pour chaque GCM. Un score proche de 1 signifie que l'amplitude de l'habitat ou des essences coïncide avec les conditions au niveau des placettes (*i.e.* capacité adaptative forte).

#### *II.1.6 – Synthèse des indices*

A l'issue de l'élaboration du protocole d'évaluation de la vulnérabilité climatique des habitats forestiers, la vulnérabilité est divisée en 8 indices d'exposition, 5 indices de sensibilité et 3 indices de capacité adaptative. Les scores sont synthétisés dans des diagrammes radar, un par composante, de sorte à rendre l'outil pédagogique et à faciliter

l'interprétation. La superposition sur le même diagramme des scores pour chacune des périodes d'étude retrace l'évolution attendue de la composante dans le temps.

Ainsi, le diagramme d'exposition met en évidence les variables les plus affectées par le CC. Notons cependant que toutes les variables ne sont pas déterminantes dans la distribution de l'habitat et qu'une attention particulière doit être portée aux variables climatiques sélectionnées par la régression logistique. L'exposition sera d'autant plus forte que les scores d'exposition stricte des variables sélectionnées dans le modèle seront grands.

Sur le diagramme de sensibilité, la juxtaposition des scores de perte de compatibilité et de contraction permet de mieux caractériser la sensibilité de l'habitat. Par exemple, une perte faible de compatibilité accompagnée d'une contraction faible sera moins inquiétante qu'une perte faible de compatibilité associée à une contraction importante de l'enveloppe climatique. De même, si les résultats précédents sont associés à des risques de dépérissements importants au niveau des placettes existantes, l'habitat sera plus sensible que si le risque de dépérissement demeurerait faible malgré la contraction de la niche climatique.

Enfin, la confrontation de la capacité adaptative de l'habitat et des essences structurantes renseigne sur la résistance éventuelle que les essences principales peuvent procurer à l'habitat face au CC. Le diagramme rend également compte de la vulnérabilité d'une essence en particulier en cas de différences entre les espèces.

Le profil des diagrammes et leur évolution dans le temps traduit la vulnérabilité de l'habitat d'étude face au CC. De fait, plus les profils des différentes composantes de la vulnérabilité seront proches de l'extérieur des diagrammes et plus l'exposition, la sensibilité et la capacité adaptative seront grandes. Un habitat sera donc d'autant plus vulnérable que son exposition et sa sensibilité seront importantes, et sa capacité adaptative sera faible. Pour finir, la vulnérabilité d'un habitat sera particulièrement élevée si elle s'aggrave au cours du temps.

## *II.2 – Application à la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx*

### *II.2.1 – Modèle retenu*

Le modèle retenu contient les variables pH,  $bhc_{et}$ , C/N,  $tmax_{et}$  et EP. La variable C/N est conservée malgré sa corrélation à -0.77 avec le pH car, à pH constant, elle sépare nettement les présences et les absences de l'habitat potentiel (**Annexe VI**). La performance du modèle est très bonne, avec une AUC de 0.947. Le modèle a été validé sur un jeu de données indépendant (**Annexe VII**). En dehors du C/N, toutes les variables ont été sélectionnées sous leur forme simple de sorte à conserver un sens biologique aux courbes de réponses (**Annexe VIII**).

La projection du modèle donne la niche potentielle de l'habitat sous forme de probabilités de présence des conditions favorables à l'habitat. Le seuil de probabilité obtenu et en dessous duquel l'habitat peut être considéré comme absent est 0.07. La niche projetée pour 1961-1990 est localisée en Bretagne et en Normandie, avec quelques zones peu favorables dans le Centre-Val de Loire et les Hauts de France (**Annexe IX**).

### *II.2.2 – Amplitudes écologiques*

Les amplitudes écologiques de l'habitat et des essences structurantes, obtenues par régression logistique du terme quadratique de  $tmax_{et}$  ou de  $bhc_{et}$ , ont été comparées aux gradients de ces mêmes variables rencontrés au niveau des placettes de l'habitat potentiel. Cette comparaison montre que l'HIC 9120 ne pourra pas couvrir le gradient futur de  $tmax_{et}$  et que l'habitat est déjà en marge des conditions de bilan hydrique estival habituelles pour le Hêtre à l'échelle de la France (**Annexe X**).

## II.2.3 – Scores obtenus

### II.2.3.1 – L’HIC 9120 serait principalement touché par des changements de températures

D’après le **tableau 1**, la température moyenne annuelle (tmoy\_13), la température minimale moyenne de janvier (tmin\_01) et la température maximale moyenne en été (tmax\_et) sont les variables dont les gammes de valeurs seraient le plus touchées par le CC, pour atteindre entre 80% et 100% de placettes affectées par le CC d’ici 2100. Les autres variables ne présentent pas de tendance claire, mais une augmentation importante du nombre de placettes exposées à une variation forte de bilan hydrique annuel moyen (bhc\_13), de bilan hydrique estival moyen (bhc\_et) ou de précipitations estivales moyennes (prec\_et) semble à prévoir à l’horizon 2050.

Pour ce qui est des SER, les variables les plus sujettes au CC sont également les températures : en dehors du Bocage normand et du Pays de Fougères (sylvo-écorégion A13) dans le présent, les scores d’exposition des températures sont proches de 1. Les résultats pour l’ensemble de l’habitat sont plus optimistes que ceux pour les 3 SER d’étude, notamment en ce qui concerne les variables de bilan hydrique. La sylvo-écorégion A13 serait globalement moins exposée au CC que les régions du Perche (B33) et du Bassin parisien tertiaire (B41).

**Tableau 1 : Scores obtenus par les différents indices d’exposition au sens strict de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).** A13, B33 et B41 correspondent respectivement aux sylvo-écorégions du Bocage normand et du Pays de Fougères, du Perche et du Bassin parisien tertiaire. GRECO ABF désigne l’ensemble de la zone d’étude. Les nombres en gras relèvent les variations importantes attendues de températures, précipitations et de bilan hydrique. Les abréviations désignent : tmoy\_13 : la température moyenne annuelle ; tmin\_01 : la température minimale moyenne de janvier ; tmin\_03 : la température minimale moyenne de mars ; tmax\_et : la température maximale moyenne estivale ; prec\_13 : les précipitations annuelles moyennes ; prec\_et : les précipitations estivales moyennes ; bhc\_13 : le bilan hydrique annuel moyen ; bhc\_et : le bilan hydrique estival moyen.

		1961-1990	1991-2019				2046-2065				2081-2100			
			A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF
<b>Indice d'exposition au sens strict</b>	tmoy_13	référence	0,75	1,00	0,91	<b>0,75</b>	0,97	1,00	0,99	<b>0,97</b>	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>
	tmin_01	référence	0,64	1,00	0,95	<b>0,20</b>	0,98	1,00	1,00	<b>0,58</b>	1,00	1,00	1,00	<b>0,84</b>
	tmin_03	référence	0,61	1,00	0,84	0,30	0,34	0,44	0,19	0,25	0,41	0,48	0,32	0,31
	tmax_et	référence	0,58	0,71	0,79	<b>0,25</b>	0,93	0,97	0,96	<b>0,73</b>	1,00	1,00	1,00	<b>0,86</b>
	prec_13	référence	0,09	0,18	0,16	0,10	0,51	0,68	0,82	0,36	0,22	0,69	0,82	0,17
	prec_et	référence	0,13	0,86	0,38	0,16	0,58	0,79	0,73	<b>0,53</b>	0,48	0,78	0,71	0,41
	bhc_13	référence	0,06	0,07	0,08	0,07	0,55	0,90	0,95	0,41	0,26	0,41	0,47	0,18
	bhc_et	référence	0,08	0,14	0,01	0,10	0,69	0,96	0,85	<b>0,74</b>	0,37	0,50	0,36	0,39

### II.2.3.2 – L’habitat potentiel perdrait peu de compatibilité avec son environnement

Entre les différentes périodes d’étude et la référence, la perte moyenne de compatibilité de l’habitat est faible (**Tableau 2**). Cela ne signifie pas nécessairement que l’habitat n’est pas vulnérable, puisque l’indice peu cacher la perte d’un grand nombre de probabilités de présence faibles.

Les scores de perte de compatibilité obtenus pour le Perche (B33) et le Bassin parisien tertiaire (B41) sont similaires à celui de l’habitat global. Pour le Bocage normand et le Pays de Fougères (A13), l’indice obtient un score légèrement plus élevé.



**Tableau 2 : Scores obtenus par l'indice de perte de compatibilité climatique de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).** A13, B33 et B41 correspondent respectivement aux sylvo-écorégions du Bocage normand et du Pays de Fougères, du Perche et du Bassin parisien tertiaire. GRECO ABF désigne l'ensemble de la zone d'étude.

	1961-1990	1991-2019				2046-2065				2081-2100			
		A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF
<b>Indice de perte de compatibilité climatique</b>	<i>référence</i>	0,11	0,10	0,07	0,17	0,32	0,19	0,10	0,09	0,35	0,22	0,11	0,20

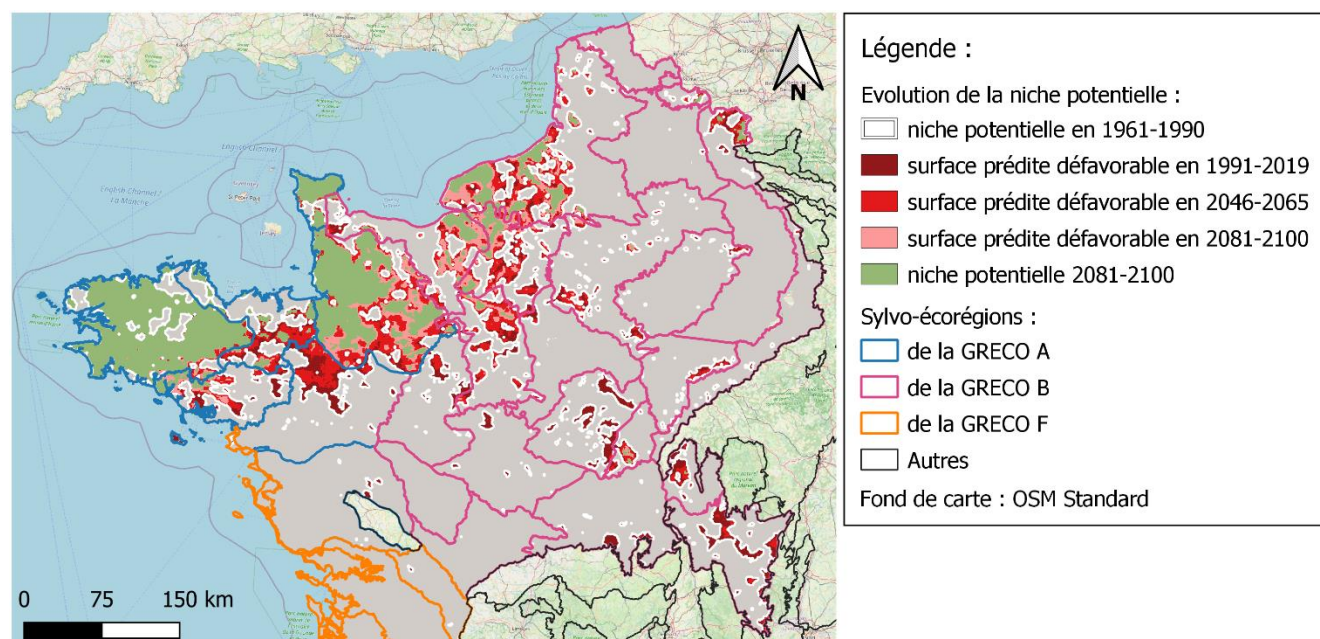
### 1.2.3.3 – La niche potentielle initiale disparaîtrait sans être compensée par de l'extension

Les résultats montrent une diminution importante de la surface favorable à la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx au cours du temps (**Tableau 3**). Entre les années 2000 et la période 1961-1990, 30% de la surface initialement favorable à l'habitat aurait été perdue. Les résultats de la modélisation prédisent une surface favorable divisée par 2 d'ici 2050, et c'est 60% de la surface initiale qui serait perdue à l'horizon 2100 (**Figure 4**).

A l'échelle des SER, un gradient de contraction est-ouest apparaît, avec de la contraction faible dans le Bocage normand et le Pays de Fougères (A13) et forte dans le Bassin parisien tertiaire (B41). Par ailleurs, l'égalité des indices de contractions absolue et relative indique que l'habitat n'est pas sujet à de l'extension ou du déplacement de niche.

**Tableau 3 : Scores obtenus par les indices de contraction relative et de contraction absolue de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).** A13, B33 et B41 correspondent respectivement aux sylvo-écorégions du Bocage normand et du Pays de Fougères, du Perche et du Bassin parisien tertiaire. GRECO ABF désigne l'ensemble de la zone d'étude.

	1961-1990	1991-2019				2046-2065				2081-2100			
		A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF
<b>Indice de contraction relative</b>	<i>référence</i>	0,07	0,42	0,63	0,27	0,27	0,84	0,93	0,48	0,45	0,96	0,99	0,58
<b>Indice de contraction absolue</b>	<i>référence</i>	0,07	0,42	0,63	0,28	0,27	0,84	0,93	0,49	0,45	0,96	0,99	0,59



**Figure 4 : Evolution de la niche potentielle de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à houx (HIC 9120).** Les niches ont été obtenues par modélisation à partir des données IGN, DIGITALIS et CMIP5.



### II.2.3.4 – Le Hêtre a un risque plus important que le Chêne sessile d’être dépérissant

D’après BioClimSol, le Chêne sessile possède un niveau de vigilance modéré qui risque de doubler à l’horizon 2100, mais restant en dessous de 25% de risque d’avoir des peuplements dépérissants (**Tableau 4**). Le Hêtre, quant à lui, a un risque élevé d’être dépérissant. A l’heure actuelle, si le Hêtre était effectivement présent sur l’ensemble des placettes, il aurait un risque d’environ 30% d’être dépérissant. Dès 2050, le risque de dépérissement serait d’environ 40%, pour atteindre près de 55% en 2100. Les résultats du Hêtre sont alarmants, puisqu’ils insinuent que dès à présent, près d’un tiers des hêtraies du territoire d’étude pourraient être dépérissantes.

A l’échelle régionale, le Perche (B33) aurait plus de risque que le Bassin parisien tertiaire (B41), le Bocage normand et le Pays de Fougères (A13) de présenter des peuplements dépérissants. Les SER B41 et A13 ont des résultats semblables dans le présent et le futur proche, mais une différence apparaît dans le futur lointain. Le Perche est toujours très au-dessus de la moyenne pour les GRECO A, B et F. Globalement, la sensibilité du Hêtre au dépérissement serait supérieure à celle du Chêne sessile (**Annexe XI**).

**Tableau 4 : Scores obtenus par l’indice BioClimSol appliqué au Hêtre et au Chêne sessile.** A13, B33 et B41 correspondent respectivement aux sylvo-écorégions du Bocage normand et du Pays de Fougères, du Perche et du Bassin parisien tertiaire. GRECO ABF désigne l’ensemble de la zone d’étude.

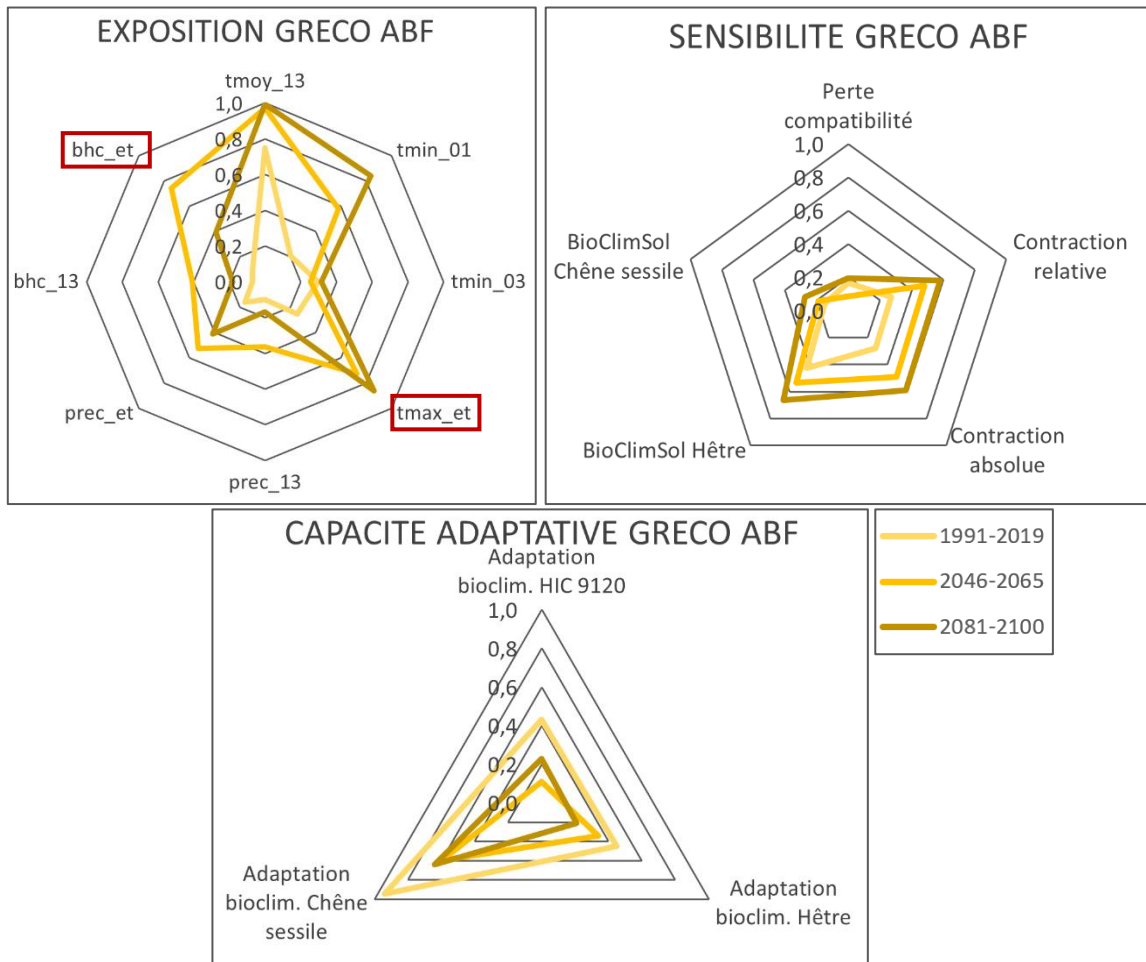
		1961-1990	1991-2019				2046-2065				2081-2100			
			A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF
Indice BioClimSol	Hêtre		0,41	0,58	0,46	0,43	0,52	0,72	0,59	0,53	0,64	0,84	0,73	0,66
	Chêne sessile		0,14	0,26	0,15	0,15	0,18	0,29	0,19	0,19	0,26	0,37	0,27	0,27

### II.2.3.5 – L’habitat potentiel ne serait pas adapté aux nouvelles conditions climatiques

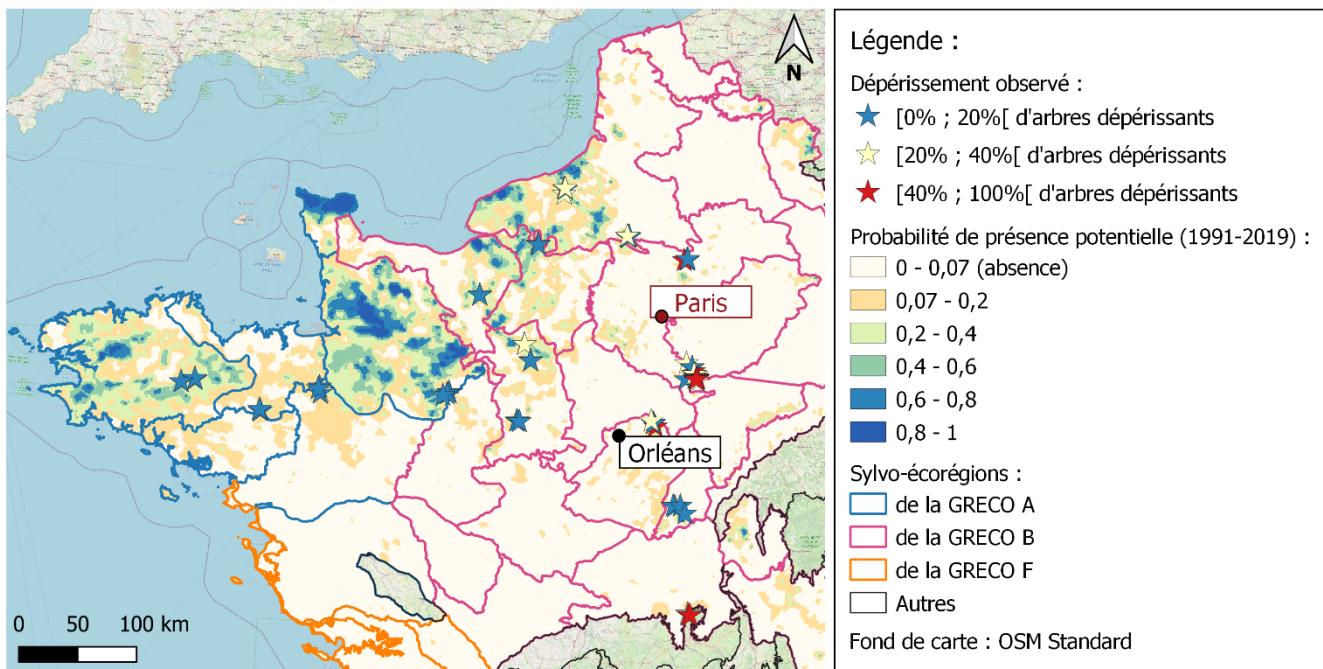
La hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120) ne serait actuellement adapté qu’à 43% des conditions rencontrées sur l’ensemble des placettes, pour ensuite diminuer entre 10% et 25% d’adaptation aux conditions futures (**Tableau 5**). Le détail du score d’adaptation bioclimatique de l’habitat permet de dire que les hêtraies-chênaies atlantiques ne sont adaptées qu’à 17% des valeurs de températures maximales en été (tmax\_et) présentes au niveau des placettes IGN en 1991-2019, pour diminuer à 4% et 2% d’adaptation dans le futur. L’habitat serait mieux adapté actuellement aux conditions de bilan hydrique estival (bhc\_et), avec 69% d’adaptation, mais avec une chute à 17% d’adaptation à l’horizon 2050, puis une légère hausse à 44% d’adaptation vers 2100.

**Tableau 5 : Scores obtenus par l’indice d’adaptation bioclimatique appliqué à la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120), au Hêtre et au Chêne sessile.** Les nombres en gras relèvent les variations importantes attendues. A13, B33 et B41 correspondent respectivement aux sylvo-écorégions du Bocage normand et du Pays de Fougères, du Perche et du Bassin parisien tertiaire. GRECO ABF désigne l’ensemble de la zone d’étude.

		1961-1990	1991-2019				2046-2065				2081-2100			
			A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF	A13	B33	B41	GRECO ABF
Indice d’adaptation bioclimatique	HIC 9120		0,57	0,26	0,30	<b>0,43</b>	0,11	0,10	0,03	<b>0,11</b>	0,28	0,24	0,30	<b>0,23</b>
	Hêtre		0,55	0,50	0,45	<b>0,45</b>	0,36	0,30	0,31	0,34	0,23	0,09	0,04	<b>0,21</b>
	Chêne sessile		0,97	0,96	0,99	<b>0,94</b>	0,75	0,52	0,52	<b>0,60</b>	0,76	0,62	0,60	0,64



**Figure 5 : Scores obtenus par les composantes de la vulnérabilité climatique de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à houx (HIC 9120).** Les variables sélectionnées dans le modèle sont encadrées en rouge. GRECO ABF : Grandes régions écologiques A, B et F ; tmoy\_13 : température moyenne annuelle ; tmin\_01 : température minimale moyenne de janvier ; tmin\_03 : température minimale moyenne de mars ; tmax\_et : température maximale moyenne estivale ; prec\_13 : précipitations annuelles moyennes ; prec\_et : précipitations estivales moyennes ; bhc\_13 : bilan hydrique annuel moyen ; bhc\_et : bilan hydrique estival moyen ; bioclim. : bioclimatique.



**Figure 6 : Etat sanitaire des placettes de terrain selon la niche potentielle de 1991-2019.** L'état sanitaire a été déterminé à l'aide du protocole DEPERIS sur 67 placettes réparties dans 15 sites Natura 2000.

Les 3 SER d'étude présentent une inflexion du score en 2046-2065 (**Tableau 5**). Le Bocage normand et le Pays de Fougères (A13) seraient adaptés à presque 60%, puis présenteraient une perte importante d'adaptation aux conditions futures sur les placettes. Les SER du Perche (B33) et de Bassin parisien tertiaire (B41) auraient presque la même note d'adaptation dans le présent, mais l'adaptation de l'habitat sur le territoire B41 chuterait très fortement en 2050 (*i.e.* adaptation divisée par 10) puis redeviendrait comme avant en 2100. L'adaptation en B33 serait quasi-constante et faible. Les 3 SER aboutissent environ tous à la même note d'adaptation que l'habitat dans son ensemble.

#### *II.2.3.6 – Le Chêne sessile serait mieux adapté que le Hêtre aux nouvelles conditions climatiques*

Pour les deux essences, dont les amplitudes écologiques sont déterminées à l'échelle de la France entière, le score d'adaptation bioclimatique diminue au cours du temps (**Tableau 5**). Le Hêtre passerait de 45% d'adaptation aux conditions de bilan hydrique estival (bhc\_et) et de température maximale estivale (tmax\_et) au niveau des placettes HIC 9120 à environ 20% d'ici 2100. Le Chêne sessile, qui possédait quant à lui un bon score d'adaptation, semble se stabiliser vers 60% de compatibilité avec les conditions futures. Notons toutefois la perte de 30% d'adaptation du Chêne sessile aux conditions climatiques au niveau des placettes HIC 9120 entre 1991-2019 et 2046-2065.

Les résultats par SER ne seraient pas très éloignés de ceux de l'habitat global, avec toutefois dans la sylvo-écorégion A13 le Chêne sessile qui resterait adapté à 75% des placettes. A l'horizon 2100, le Hêtre aurait une adaptation très faible aux conditions climatiques au niveau des placettes HIC 9120 des sylvo-écorégions B33 et B41 (*i.e.* <1%).

#### *II.2.4 – La vulnérabilité climatique de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx est accrue*

L'essentiel de ce travail se résume sous la forme de diagrammes radar synthétisant les scores obtenus par les différents indices pour les GRECO A,B et F (**Figure 5**) et les 3 SER d'étude (**Annexe XII**). Sur l'ensemble des diagrammes, il est possible de voir que l'exposition et la sensibilité augmentent au cours du temps, tandis que la capacité adaptative diminue. Ainsi, la vulnérabilité climatique de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx est croissante avec le temps, et l'habitat serait plus vulnérable dans les SER de l'est du cœur de niche (*i.e.* B33, B41) que dans le SER de l'ouest (*i.e.* A13).

#### *II.2.5 – Confrontation au terrain*

La phase de terrain de ce travail met en perspective les résultats obtenus avec la méthodologie développée. Les sites Natura 2000 prospectés sont rappelés en **annexe III**.

##### *II.2.5.1 – Dépérissement observé vs niche potentielle*

La superposition des placettes terrain avec la niche potentielle de 1991-2019 met en évidence l'importance de la niche dans l'état sanitaire observé (**Figure 6**). En effet, 69% des placettes localisées en zone défavorable à l'HIC 9120 sont dépériscentes. Par ailleurs, 64% des placettes observées dépériscentes sont en dehors de la niche potentielle de 1991-2019. Les données révèlent que le Hêtre n'est pas particulièrement plus dépériscent que le Chêne sessile (dépérissement sur 28% des placettes dans les deux cas). Notons toutefois que les hêtres sont souvent absents des zones les plus sèches de la niche de l'habitat, au profit des chênes, ce qui amène à nuancer les résultats.

Le score de perte de compatibilité climatique calculé sur chaque placette de terrain est systématiquement inférieure à 0.4, avec uniquement 4 sites perdant entre 0.2 et 0.4

points de probabilité de présence potentielle (*i.e.* Forêt de Tronçais, Massifs forestiers du Pays-Fort, Forêt d'Orléans, Massif forestier d'Halatte). Déjà 1/5<sup>e</sup> des sites seraient localisés en zone défavorable à l'habitat en 1991-2019 (*i.e.* Forêt de Tronçais, Forêt d'Orléans, Massif forestier d'Halatte). D'après les relevés, ces sites présentent au moins une placette avec plus de 40% d'arbres dépérissants (**Annexe XIII**). Un tiers des sites se situent au niveau d'une probabilité de présence potentielle de l'habitat inférieure à 0.2 (*i.e.* Forêt de Rennes, Massif forestier de Vibraye, Haute vallée de la Touques, Boucles de la Seine aval, Massif de Fontainebleau).

#### *II.2.5.2 – Dépérissement observé vs dépérissement prédit chez le Hêtre*

D'après BioClimSol, le Hêtre obtient un niveau de vigilance dépérissement maximal sur 6 sites, soit 12/67 placettes. De plus, 45 placettes sur 67 ont un niveau de vigilance élevé, correspondant à un risque de 30 à 60% de présenter du dépérissement chez le Hêtre. Le reste des placettes a un niveau de vigilance modéré.

Sur l'ensemble des placettes recensables pour l'état sanitaire du Hêtre, 27% présentent à la fois du dépérissement et un niveau de vigilance élevé ou maximal (**Annexe XIVa**), qui sont réparties dans 6 sites N2000, tandis que 52% de placettes avec le même niveau de vigilance ne sont pas considérées dépérissantes. Seulement 8% des placettes recensables sont non dépérissantes avec un niveau de vigilance modéré, contre 13% avec un niveau de vigilance élevé ou maximal.

Sur 6 sites et 19 placettes, bien qu'un niveau de vigilance dépérissement élevé ou maximal ait été renvoyé pour le Hêtre, les prédictions ne peuvent être vérifiées car le nombre d'individus était insuffisant pour déterminer l'état sanitaire du peuplement.

#### *II.2.5.3 – Dépérissement observé vs dépérissement prédit chez le Chêne sessile*

Le Chêne sessile n'obtient jamais un niveau de vigilance maximal d'après BioClimSol. Le score moyen de vigilance obtenu sur les placettes est d'environ 1.6, ce qui correspond à un risque de dépérissement proche de 10%.

Sur 11% des placettes recensables pour l'état sanitaire du Chêne sessile, du dépérissement a été observé et coïncide avec un niveau de vigilance élevé (**Annexe XIVb**).

Huit sites sur 15 (14% des placettes recensables) sont prédits avec un risque de dépérissement élevé sans pour autant en montrer les signes. En revanche, du dépérissement est observé sur 23% des placettes malgré un niveau de vigilance BioClimSol modéré. Plus de la moitié des placettes sur lesquelles l'état sanitaire des chênes était recensable sont non dépérissantes et s'accordent avec le niveau de vigilance modéré de BioClimSol.

Onze des 67 placettes de terrain prospectées étaient non recensables, mais seulement une concernait un niveau de vigilance élevé.

#### *II.2.5.4 – Dépérissement observé vs adaptation bioclimatique*

Sur les placettes de terrain, l'HIC 9120 n'est jamais 100% adapté aux conditions climatiques qui déterminent sa répartition (**Annexe XVa**).

Le Chêne sessile serait globalement adapté aux conditions actuelles de *bhc\_et* et *tmax\_et* dans tous les sites N2000, avec aucune placette inadaptée et seulement 5 placettes partiellement adaptées aux conditions climatiques (**Annexe XVb**). Ainsi, 66% des placettes recensables pour le Chêne sessile et adaptées partiellement ou totalement aux conditions actuelles ne sont pas dépérissantes, bien que quelques chênes dépérissants aient été observés sur 8 sites.

Pour le Hêtre, du dépérissement est observé sur 93% des placettes recensables inadaptées aux conditions climatiques actuelles (**Annexe XVc**). Les dépérissements de Hêtre observés à Tronçais, Orléans et Fontainebleau coïncident avec l'apparition de valeurs

de tmax\_et et bhc\_et sortant de l'amplitude du Hêtre sur l'ensemble de la France. En outre, 82% des placettes recensables et adaptées partiellement ou totalement aux conditions actuelles de bilan hydrique estival et de température maximale estivale sont en bonne santé.

#### II.2.5.5 – *La niche potentielle et l'adaptation bioclimatique expliqueraient en partie le dépérissement observé sur le terrain*

Les tests du Chi<sup>2</sup> effectués pour comprendre la relation entre l'état sanitaire observé sur le terrain et le caractère favorable/défavorable des placettes, ainsi qu'avec les scores d'adaptation bioclimatique de l'habitat et des essences structurantes, obtiennent une *p-value* significative (<0.05) (**Annexe XVI**). Cela signifie que le dépérissement observé peut être en partie prédit par la localisation de la placette dans la niche potentielle et par les scores d'adaptation bioclimatique associés. Les scores de perte de compatibilité et BioClimSol, quant à eux, n'ont pas d'effet marqué sur l'état sanitaire.

### III – Discussion

#### III.1 – *Quel avenir pour les hêtraies-chênaies ?*

De façon globale, le changement climatique s'opère plus vite que la migration des arbres. Selon Brewer *et al.* (2002 dans Pargade et Brusten, 2020), certaines essences forestières ont une capacité migratoire de 50km par siècle en latitude. Or, au vu de la vitesse des changements en cours, les arbres devraient se déplacer de 200km vers le nord en moins d'un siècle pour rester dans leur niche climatique (Pargade et Brusten, 2020). La migration naturelle des essences forestières ne permettant pas un tel déplacement, les surfaces forestières risquent d'être perturbées.

La réduction de l'aire de répartition de l'HIC 9120 n'est pas surprenante compte tenu du fait que celles de ses essences structurantes font de même. Les prédictions inquiétantes pour le Hêtre sont connues depuis de nombreuses années (Badeau *et al.*, 2004), et les signes de faiblesse associés se répandent partout en France (Landmann *et al.*, 2007). Bien que dans une moindre mesure que le Hêtre, le Chêne sessile devrait voir son aire de répartition se réduire fortement aux horizons 2050 et 2100 (Piedallu *et al.*, 2009). Les crises climatiques récentes poussent les deux essences dans leurs retranchements (Département de la santé des forêts, 2019; Département de la santé des forêts, 2021).

Face à la progression de conditions défavorables vers le nord-ouest de la France, la migration de l'association *Vaccinio myrtilli – Quercetum petrae* est compromise du fait de sa proximité avec l'océan qui tient lieu de barrière naturelle (**Figure 4**). Pour les autres associations de l'HIC 9120, comme celles présentes en montagne, il pourrait en être autrement. En outre, de par le caractère **climacique** de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx, et le caractère sciaphile du Hêtre (Dumé *et al.*, 2018), l'habitat ne peut aisément se déplacer dans l'espace, ce qui le rend d'autant plus vulnérable.

Si la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx ne peut se déplacer vers des conditions plus favorables, la question se pose de savoir s'il peut résister aux nouvelles conditions climatiques. La cartographie des scores d'adaptation bioclimatique des essences structurantes de l'habitat (**Annexe XVII**) montre que, dans la période présente, le Hêtre ne pourrait pallier que la moitié des conditions de la majeure partie des placettes. En 2046-2065, les placettes ne convenant qu'à moitié au Hêtre ont des conditions encore plus éloignées de son amplitude écologique. Pour 2081-2100, de nombreuses placettes deviendraient incompatibles avec le Hêtre. Cependant, certaines placettes situées sur le littoral redeviendraient clémentes, et bien que le Hêtre semble mésadapté aux conditions futures sur les placettes, le fait que l'indice ne tienne pas compte de l'effet peuplement (*i.e.*

mélange, couvert, structure, traitement) (Legay *et al.*, 2008) invite à nuancer les résultats pessimistes.

Pour ce qui est du Chêne sessile, 1991-2019 est marqué par la dominance des placettes dont plus d'une variable présentent des conditions compatibles avec l'essence. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Piedallu *et al.* (2009) qui trouvent que la distribution du Chêne sessile est peu affectée par le bilan hydrique de juillet et que l'essence est présente dans des zones à températures moyennes annuelles plus élevées que le Hêtre. Etant donné les résultats du Hêtre, il se peut que la préservation actuelle de l'HIC 9120 soit essentiellement permise par le Chêne sessile. Cependant, cette tendance est régionalisée selon le gradient sud-est/nord-ouest mis en évidence précédemment, notamment à partir de 2046-2065. Aux horizons 2050 et 2100, les placettes pour lesquelles le Chêne sessile serait adapté sont cantonnées à l'extrême nord-ouest de la France (*i.e.* Bretagne, Normandie, Hauts de France, nord du Bassin parisien).

En prévision des changements globaux et face aux déficits de migration et de résistance, les chercheurs et les gestionnaires forestiers se mobilisent pour évaluer le potentiel de résistance de phénotypes ou de génotypes adaptés à des climats plus chauds et secs, qui seraient importés ailleurs en France. Cette « migration assistée » est notamment à l'étude pour le Hêtre et le Chêne sessile dans le cadre du projet Giono (Legay *et al.*, 2020). Seulement, les auteurs mettent en garde sur les prédictions climatiques les plus pessimistes, dont les conditions dépasseraient même celles des marges des niches actuelles des essences en place (Legay *et al.*, 2020).

La confrontation des amplitudes écologiques et des gradients climatiques au niveau des placettes (**Annexe X**) montre que l'HIC 9120 est déjà en marge des conditions de bilan hydrique estival (bhc\_et) habituelles pour le Hêtre, et dans la moitié la plus déficitaire de l'amplitude du Chêne sessile. Ainsi, les conditions futures au niveau des placettes sont inhabituelles pour le Hêtre, ce qui remet en cause son adaptation aux climats futurs. Pour ce qui est des températures maximales estivales (tmax\_et), une augmentation forte des températures rencontrées par les placettes HIC 9120 est à prévoir. Les conditions de tmax\_et prédites aux horizons 2050 et 2100 dépassent fortement les amplitudes du Chêne sessile et du Hêtre, ce qui suggère que l'introduction d'individus de provenance française ne serait pas suffisante pour le maintien de l'habitat au niveau des placettes. Toutefois, l'effet peuplement (Legay *et al.*, 2008) n'est pas pris en compte ici, qui pourrait modifier les réponses des essences, et par conséquent de l'habitat, face aux nouvelles conditions de bilan hydrique et de température. En effet, Grossiord *et al.* (2015) expliquent que les forêts tempérées diversifiées sont moins exposées au stress hydrique que les peuplements purs. Attention également aux interactions possibles entre le sol et le climat qui ne sont pas traduites dans les amplitudes écologiques obtenues.

De plus, les placettes de terrain présentant la combinaison "dépérissement observé"/"adaptation prédite" sont isolées, et ne concernent jamais un site N2000 en entier (**Annexe XV**). Cela signifie que le dépérissement n'est pas dû à une mésadaptation locale des individus au climat, mais à d'autres facteurs locaux (*e.g.* gestion sylvicole). Dans ce cas de figure, rechercher de la ressource génétique de Hêtre et de Chêne sessile ailleurs en France n'est pas adéquat. Par ailleurs, sur les placettes présentant la combinaison "dépérissement observé"/"mésadaptation partielle ou totale", il semblerait que puiser de la ressource génétique en France soit insuffisant pour prévenir le dépérissement. Il s'agirait alors de jouer sur les mélanges et leurs proportions, ou encore de mettre en œuvre des pratiques de gestion favorisant la résistance des peuplements.

Les essences candidates à la migration assistée et aux mélanges sont essentiellement d'autres espèces de chênes. Le Chêne pédonculé (*Quercus robur*) est souvent présent en



mélange avec le Chêne sessile dans les hêtraies-chênaies. Il a été constaté sur le terrain que les chênes pédonculés présentaient généralement davantage de signes de dépérissement que les chênes sessiles. De fait, depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle partout en France, le Chêne pédonculé est reconnu comme une essence vulnérable à la sécheresse, particulièrement suite à un stress hydrique intense sur des sols à faible réserve utile estivale (Nageleisen *et al.*, 2013). La sensibilité de l'essence l'exclue donc des pistes d'adaptation au CC de l'HIC 9120.

En réponse aux changements en cours, une des solutions principales envisagées pour la hêtraie-chênaie est l'incorporation de Chêne pubescent (*Quercus pubescens*) en mélange. Il s'agit d'une essence plus thermophile que le Chêne sessile et suffisamment proche génétiquement de celui-ci pour que de l'hybridation se produise (Bonhême, 2018). Cette hybridation est recherchée car elle conférerait aux chênes, et donc au peuplement, plus de résistance face aux effets du réchauffement climatique. De la même façon que pour le Hêtre et le Chêne sessile, la détermination de l'amplitude écologique du Chêne pubescent et le calcul du score d'adaptation bioclimatique sur les placettes de la zone d'étude permettrait de conclure sur la capacité de l'essence à apporter de la résistance à l'HIC 9120 face au CC.

Les gestionnaires rencontrés sur le terrain ont également mentionné le déploiement d'un réseau d'îlots d'avenir destinés à expérimenter l'introduction du Chêne vert (*Quercus ilex*) dans certains peuplements de hêtraie-chênaie. Cette essence méditerranéenne est plus susceptible que les autres espèces de chênes de résister aux sécheresses et aux vagues de chaleur. Le Chêne vert est cependant sensible aux gelées, ce qui limite son introduction au nord de son aire de répartition. Cette espèce pourrait toutefois trouver sa place dans les zones littorales peu soumises au gel.

### III.2 – La gestion, un levier de conservation de l'habitat

Les informations recueillies sur le terrain mettent en évidence la difficulté d'expliquer l'état sanitaire observé uniquement par les variables climatiques et édaphiques. Par exemple, sur les placettes prédites avec un risque élevé de dépérissement chez le Hêtre selon BioClimSol, mais où le Hêtre était absent des peuplements, a-t-il disparu du fait des conditions défavorables ou bien les forestiers y ont-ils volontairement arrêté la sylviculture en faveur du Hêtre ? Sur les stations au niveau de vigilance élevé mais où aucun dépérissement n'est observé, les hêtres sont-ils maintenus en bonne santé grâce aux pratiques de gestion mises en place ou plutôt grâce à des phénomènes microclimatiques localisés (ex : brume à Sillé) ? Pour les deux essences structurant l'HIC 9120, le dépérissement ayant pu être observé sur des placettes au degré de vigilance BioClimSol modéré est-il associé à des pratiques de gestion intensives ? Enfin, le décalage entre les prédictions de BioClimSol et l'état sanitaire du Chêne sessile est-il dû à des pratiques de gestion favorables ou au délai de réponse aux perturbations de l'essence (Département de la santé des forêts, 2021) ?

En réponse à l'amplification du changement climatique émerge la notion de « sylviculture adaptative ». Son objectif est d'intégrer l'adaptation au changement climatique dans les pratiques de gestion sylvicole de sorte à faire face aux conditions futures incertaines (Nagel *et al.*, 2017). Les principes de la sylviculture adaptative à mettre en œuvre pour un habitat donné sont à réfléchir au cas par cas, car les territoires et les forêts ne sont pas tous égaux face au CC. Certains gestionnaires rencontrés sur le terrain soulignent notamment le décalage avec lequel s'opère le CC entre les marges et le cœur de la niche climatique de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx.

En matière de sylviculture adaptative, les actions à exécuter relèvent de l'objectif qui a été fixé pour le peuplement considéré. Nagel *et al.* (2017) définissent 3 objectifs adaptés des travaux de Millar *et al.* (2007) :

- la résistance, qui maintient des conditions relativement stables dans le temps. Elle se base sur des actions améliorant la résistance des forêts aux perturbations et aux effets du CC ;
- la résilience, qui accorde quelques changements dans les conditions environnant le système, mais avec pour objectif final un retour aux conditions de référence ;
- la transition, qui permet aux forêts de répondre au CC sans intervention directe de gestion. Elle consiste en des actions favorisant le changement et permettant à l'écosystème de s'adapter aux nouvelles conditions.

Ces objectifs dépendent majoritairement des mêmes leviers d'action, mais exécutés à des degrés différents.

Le premier levier utilisé en sylviculture adaptative est la gestion de la diversité. Que ce soient les gestionnaires rencontrés ou les auteurs de la littérature, tous évoquent l'importance du mélange des essences pour l'adaptation au CC (Nagel *et al.*, 2017; Thorne *et al.*, 2017; Pargade et Brusten, 2020; Thiffault *et al.*, 2021). Il est possible de jouer sur la composition des mélanges et la proportion des espèces, mais la diversité se traduit également par la diversité génétique d'une espèce au sein d'un peuplement (Thorne *et al.*, 2017; Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, 2019; Thiffault *et al.*, 2021). De même, l'introduction d'espèces plus adaptées aux conditions prédites (ex : sécheresse) peut permettre l'adaptation d'un système au CC. Certains gestionnaires de l'ONF ont mentionné l'implantation « d'îlots d'avenir » testant à la fois des essences déjà présentes mais provenant du sud de la France (ex : Chêne sessile), mais aussi de nouvelles essences (ex : Chêne vert, Chêne pubescent). Cette pratique est également encouragée par la littérature (Nagel *et al.*, 2017; Thorne *et al.*, 2017; Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, 2019; Thiffault *et al.*, 2021).

L'adaptation des forêts au CC passe par des actions relatives à leur structure. Tout d'abord, conserver une ambiance forestière est important pour la résistance ou la résilience d'un peuplement. Nous avons constaté sur le terrain que les parcelles ayant subi une éclaircie conséquente présentaient généralement du dépérissement, notamment lorsque les peuplements étaient âgés. Nagel *et al.* (2017) établissent des surfaces terrières objectifs variables selon que le gestionnaire vise de la résistance, de la résilience ou de la transition face au CC. Par ailleurs, gérer les peuplements en irrégulier leur confère une plus grande adaptation aux conditions futures. En effet, il semblerait que les peuplements réguliers et denses visités présentent davantage de signes de fragilité que les autres (compétition plus importantes ?). Il est également admis que les peuplements irréguliers sont plus résilients face aux perturbations. Maintenir un certain couvert, voire un couvert continu, lors de la régénération des peuplements prodigue une plus grande résistance des semis aux conditions climatiques défavorables (Pargade et Brusten, 2020).

Une autre façon d'adapter les forêts au CC est d'assurer le bon fonctionnement de l'écosystème. S'assurer que les écosystèmes forestiers soient fonctionnels et connectés entre eux donne l'opportunité aux espèces forestières de migrer et de se réaccorder aux conditions climatiques (Marage et Gégout, 2010; Stephens *et al.*, 2010 dans Thorne *et al.*, 2017). Certains experts proposent de s'inspirer des dynamiques naturelles des écosystèmes forestiers pour préparer l'adaptation au CC. En effet, dans le nord des Etats-Unis, les essences prédites comme adaptées aux conditions futures tolèrent mal l'ombre. Les



scientifiques suggèrent donc de simuler l'ouverture naturelle du milieu avec des coupes progressives irrégulières afin de favoriser ces essences (Thiffault *et al.*, 2021).

D'autres leviers d'adaptation existent. En forêt de Tronçais, par exemple, face à la récurrence de conditions défavorables, il arrive que les gestionnaires passent en régénération des parcelles qui étaient en phase d'amélioration. Raccourcir les cycles de production est également suggéré par l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (2019) à travers le choix d'essences à rotation plus rapide. Face aux aléas climatique, les gestionnaires peuvent également réduire la taille des parcelles en régénération pour avoir une marge de manœuvre en cas de dépérissement.

Optimiser la ressource en eau est une solution d'adaptation mise en œuvre sur le terrain. Il est ainsi possible de boucher d'anciens réseaux de drainage de sorte à diminuer les pertes en eau (en réflexion en forêt de Rennes). Cela pourrait toutefois être délétère en hiver pour les essences craignant l'excès d'eau (*e.g.* le Hêtre). Par ailleurs, l'utilisation de l'eau peut être optimisée en mélangeant des essences aux profondeurs de système racinaire différentes, ou encore en améliorant le bilan hydrique à travers la gestion des éclaircies (Bertin *et al.*, 2016).

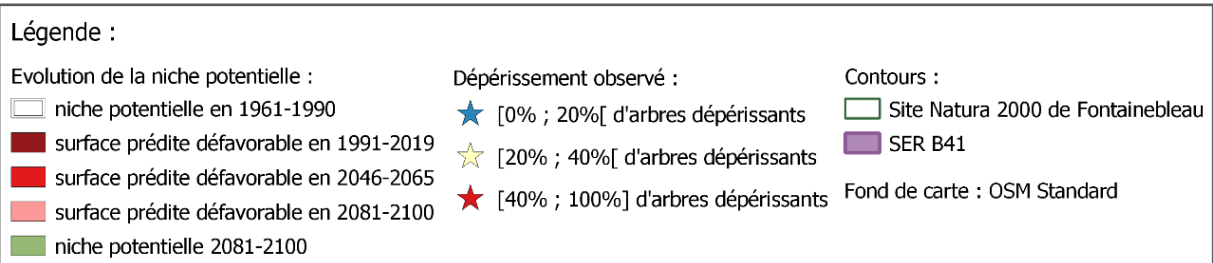
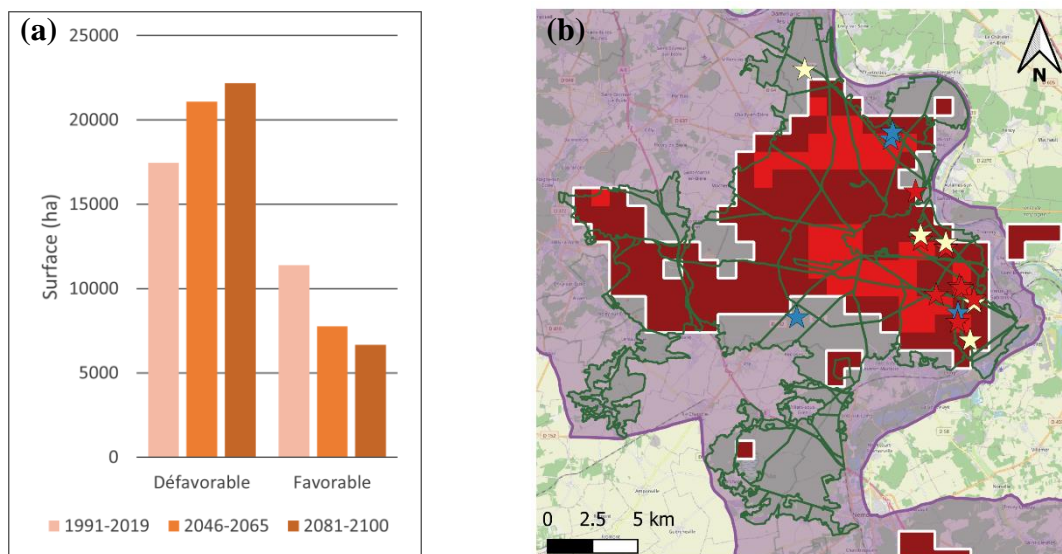
Certains gestionnaires ont mentionné la non-intervention comme solution d'adaptation du fait de la résilience intrinsèque des individus déjà en place. Cette piste d'adaptation est également évoquée par Schmitt *et al.* (2019). La non-intervention a pour inconvénient de ne pas tenir compte des fonctions économiques et sociales de la forêt, ce qui sort du cadre de la gestion forestière durable. Elle pourrait être envisagée à l'échelle locale, mais n'est pas une solution généralisable. La sélection naturelle d'espèces adaptées aux perturbations peut aussi s'opérer si l'on accepte que la composition de la forêt change (Thiffault *et al.*, 2021).

Pour finir, il n'existe pas une seule réponse quant au fait de savoir s'il faut agir sur un système donné. Certains scientifiques privilégieraient les zones vulnérables (Wang *et al.*, 2019), d'autres les zones refuges (Marage et Gégout, 2010), d'autres encore évalueraient le rapport risque/capacité d'adaptation avant d'investir des moyens dans la sylviculture adaptative (Thiffault *et al.*, 2021). Face à ces incertitudes, des outils d'aide à la décision émergent permettant aux gestionnaires de prioriser leurs actions. En France, des outils d'aide au choix des essences en contexte de CC, tels que BioClimSol ou ClimEssences, sont en développement. Des réseaux d'expérimentation étudient des solutions de gestion adaptative (*e.g.* Schmitt *et al.*, 2019), et le réseau mixte technologique pour l'adaptation des forêts au changement climatique (RMT AFORCE) produit des outils pour appuyer les gestionnaires dans leurs décisions. En proposant une approche par indice applicable à une grande diversité d'habitats forestiers, notre étude complète les outils déjà existants en adoptant une approche écosystème plutôt qu'une perspective économique et sylvicole.

Dans la suite de ce travail, une analyse approfondie des données récoltées sur le terrain permettra d'identifier pour chaque placette et chaque essence un ou plusieurs « facteur(s) limitant(s) » (*e.g.* hydromorphie, exposition à la lumière) pouvant expliquer le dépérissement éventuel, et ainsi relier l'état sanitaire effectif aux pratiques de gestion. À terme, cette analyse permettra la mise en œuvre de pratiques de gestion adaptative de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (voir Pargade et Brusten, 2020).

### III.3 – Quelle adaptation de Natura 2000 à la conservation de la hêtraie-chênaie collinéenne atlantique acidiphile à sous-bois de Houx ?

La diminution importante de la surface favorable aux hêtraies-chênaies atlantiques acidiphiles au sein des sites Natura 2000 présents sur les GRECO A, B et F, et l'augmentation associée de la surface défavorable à l'habitat, suggèrent que le réseau Natura 2000 actuel ne serait pas adapté à la préservation de l'HIC 9120 (**Figure 7a**). Ces conclusions sont alarmantes compte tenu du fait que, malgré la part importante de forêt dans le réseau Natura 2000, ce dernier couvre déjà peu les milieux forestiers situés en zone de plaine (Rouveyrol et Leroy, 2021). Selon la localisation du site N2000 dans la niche de l'habitat, la situation pourrait même être catastrophique, comme en témoigne la forêt de Fontainebleau avec une surface 100% défavorable aux hêtraies-chênaies dès 2046-2065 (**Figure 7b**). Pour des situations comme celle-ci, la question se pose de savoir si contraindre les gestionnaires à maintenir l'habitat dans les sites N2000 est encore pertinent. Intégrer le CC dans la gestion des aires protégées est nécessaire pour anticiper ses effets, ce qui pourrait passer par l'établissement de plans de gestion plus souples (Sordello *et al.*, 2014). Pour l'HIC 9120, cela pourrait se traduire par la tolérance de proportion de Hêtre plus faibles dans le couvert, ou encore l'incorporation de nouvelles essences en mélange (Pargade et Brusten, 2020).



**Figure 7 : Evolution de la surface favorable à la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à houx (HIC 9120) au sein du réseau Natura 2000 (a) et du site Natura 2000 de Fontainebleau (b).** Les surfaces occupées par l'HIC 9120 dans les 101 sites N2000 considérés proviennent des données de l'INPN. Les niches potentielles ont été déterminées par modélisation. L'état sanitaire observé a été évalué au moyen du protocole DEPERIS. SER B41 : sylvo-écorégion du Bassin parisien tertiaire.

Pour ce qui est des autres sites N2000 visités, leur superposition aux niches potentielles des différentes périodes d'étude révèle que les Forêts de Fontainebleau, d'Orléans, de Tronçais et les Massifs forestiers du Pays-Fort se situent déjà pour partie en zone défavorable à l'HIC 9120. Les sites de Vibraye et de Rennes, quant à eux, pourraient voir leur situation empirer à l'avenir.

### III.4 – Limites méthodologiques et perspectives de développement

Tester la méthode sur un habitat pilote a rendu compte des défauts de certains indices et de la nécessité de retravailler la démarche. Par exemple, si les 8 variables climatiques étudiées n'interviennent pas dans la distribution des habitats, les indices d'exposition stricte pourraient être calculés uniquement pour les variables sélectionnées par la régression logistique. Cela limiterait cependant la comparaison *a posteriori* des habitats entre eux dès lors qu'ils ne dépendent pas des mêmes variables. L'indice d'exposition est également limité par la non prise en compte des variables édaphiques, supposées constantes dans le temps. Pour des habitats comme la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx, dont la distribution est expliquée par 3 variables relatives aux propriétés du sol (*i.e.* pH, C/N, EP), considérer ces variables constantes cache une partie importante de l'information. Anticiper les évolutions des paramètres édaphiques est possible. De fait, Janowiak *et al.* (2014) utilisent le modèle PnET pour prédire la réponse des forêts face à la dynamique du carbone, de l'eau et de l'azote dans les sols sous l'effet des changements globaux. La question est de savoir si cette méthode est réaliste pour une étude généralisée des habitats forestiers, notamment à l'échelle locale (*i.e.* rassemblement des données d'entrée, durée, etc.).

Concernant la sensibilité, si nous reprenons l'idée des habitats distribués selon d'autres paramètres que les paramètres climatiques (*e.g.* aulnaies-frênaies riveraines), les scores obtenus par les indices de sensibilité seront faibles, sans pour autant que ça soit le cas de la vulnérabilité.

Comme l'ont montré les résultats sur la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx, l'indice de perte de compatibilité traduit mal la sensibilité de l'habitat, puisqu'elle n'informe pas sur la surface relative à chaque valeur de perte ou sur l'état initial. En effet, la perte d'une grande surface de faible probabilité de présence potentielle peut être tout aussi grave que la perte d'une petite surface de forte probabilité de présence potentielle. De même, une même valeur de perte de probabilité de présence (*e.g.* 0.2) peut être obtenue de différente façon (*e.g.* 0.8-0.6 ou 0.3-0.1). Or, pour un habitat, le plus grave est-il la compatibilité perdue (0.2) ou la compatibilité finale (0.6 ou 0.1) ? Construit comme il l'est actuellement, l'indice de perte de compatibilité est indissociable des indices de contraction. Il nécessite d'être amélioré de sorte à transcrire davantage d'informations sur la sensibilité.

Les indices d'adaptation bioclimatique donnent également des résultats ambigus. En effet, comme le score cumule l'adaptation aux différentes variables climatiques sélectionnées dans le modèle, un score intermédiaire entre 0 et 1 peut cacher différents cas de figure. Prenons l'exemple de la hêtraie-chênaie : un score de 0.5 peut signifier que la moitié des placettes de l'habitat potentiel prennent des valeurs qui coïncident avec les amplitudes écologiques de l'habitat pour  $t_{max\_et}$  et  $b_{hc\_et}$ , mais encore que l'habitat n'est adapté qu'à une seule variable sur l'ensemble des placettes. Entre ces deux options, une infinité de possibilités existent qui sont toutes aussi mal rendues par l'indice. Les résultats ont été interprétés en regardant le détail des performances de chaque placette, ainsi que les cartes associées. Les indices d'adaptation bioclimatique pourraient donc être modifiés afin de mieux transmettre l'information.

Pour ce qui est de l'aspect ressource génétique apporté par les indices relatifs à l'adaptation bioclimatique des essences structurantes, il serait intéressant de calculer les

indices pour des amplitudes construites à partir de grandes régions européennes (e.g. Europe du sud, de l'est, du nord et de l'ouest) si la ressource française semble inadaptée. Par ailleurs, quelle que soit l'échelle utilisée, il faudrait pouvoir vérifier que les zones identifiées comme ressource du fait de la présence actuelle des individus correspondent à des peuplements en bonne santé, et non pas à des peuplements aujourd'hui dépérissants.

Comme tout travail s'appuyant sur de la modélisation, cette étude est le fruit de choix méthodologiques, chacun associé à des incertitudes. Tout d'abord, calibrer le modèle sur des données climatiques passées à partir d'occurrences présentes, et non pas passées, a été réfléchi dans la perspective de la dette climatique. Ce concept associé au changement climatique désigne le déséquilibre constaté entre les espèces présentes à un endroit donné et les conditions **abiotiques** qui s'y trouvent (Svenning et Sandel, 2013). De telles conclusions sont possibles grâce à la comparaison des richesses spécifiques attendues et effectives sous les conditions climatiques actuelles (e.g. Menéndez *et al.*, 2006). A l'heure actuelle, ce retard prend de l'importance dans les milieux forestiers car les espèces qui les composent résistent au CC (Bertrand *et al.*, 2016). Les communautés végétales visibles aujourd'hui sont donc le reflet du climat passé, notamment dans les forêts de plaine (Bertrand *et al.*, 2011).

Ensuite, les prédictions faites ne ciblent pas spécifiquement les étendues forestières. Ainsi, les résultats relatifs à la contraction de la niche potentielle pourraient concerner des territoires non forestiers, et une concentration importante de forêts pourrait se trouver en cœur de niche, en particulier celles en bon état de conservation. Dans ce cas, la question se pose de savoir s'il faut maintenir l'habitat en limite de niche alors que celui-ci se trouve certainement déjà dans un état de conservation dégradé. A l'inverse, ne serait-ce pas justement pour cette raison qu'il faudrait engager des mesures de préservation dans ces espaces ?

Par ailleurs, les résultats ne tiennent pas compte de la capacité intrinsèque des espèces à s'adapter au changement climatique. Par exemple, des recherches récentes mettent en évidence la **plasticité phénotypique** de certaines essences face au CC (Kijowska-Oberc *et al.*, 2020). Le réchauffement climatique favoriserait ainsi la résistance au stress des glands de Chênes, tout comme leur germination (Rossi, 2015 dans Kijowska-Oberc *et al.*, 2020). Les indices développés ne considèrent pas non plus le fait que les zones de stress varient selon les périodes : entre autres, les sécheresses ne touchent pas les mêmes territoires d'une année sur l'autre (cf. indicateur sécheresse d'humidité des sols en juillet 2019 et juillet 2020, Météo-France, 2020). Enfin, chaque espèce répond différemment au stress, comme c'est le cas du Chêne sessile qui montre des signes de faiblesses après plusieurs années de stress, tandis que la fragilité du Hêtre apparaît plus tôt (Département de la santé des forêts, 2021).

Pour finir, les prédictions développées ici conviennent au présent et au long terme (20-50 ans), mais ne peuvent être utilisées pour envisager le court terme (5-10 ans).

Les réflexions sur le protocole développé pour évaluer la vulnérabilité des habitats forestiers face au CC continuent de sorte à proposer une méthodologie adaptée à un maximum d'habitats. Les indices seront amenés à évoluer : il serait par exemple possible de mettre à profit l'outil ClimEssences développé par le RMT AFORCE (<https://climesences.fr/>), qui produit des indices d'adaptation des essences aux conditions climatiques futures de sorte à aider les forestiers dans le choix des essences en contexte de CC. L'incorporation de nouveaux indices pourrait également avoir lieu, comme un indice de refuge topoclimatique pour les habitats montagnards. Comme évoqué précédemment, évaluer la vulnérabilité d'autres habitats forestiers permettrait de mieux caractériser la vulnérabilité de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx. De même, il serait

intéressant d'appliquer la méthode à d'autres scénarios de forçage radiatif (RCP) et d'autres échelles (*e.g.* échelle nationale, échelle d'un massif). À l'avenir, le modèle sera étoffé afin d'identifier des zones ou des stations à risque. L'élaboration d'un score global de vulnérabilité est également en cours, qui permettrait de mieux comparer les habitats forestiers entre eux. Il se confronte toutefois à la question du poids que chaque indice possède dans la vulnérabilité globale d'un habitat.

### *III.5 – Approfondissement de la méthode par des indices liés au développement des arbres*

Dans la littérature scientifique, de nombreuses études s'intéressent à l'évaluation de la vulnérabilité climatique des habitats. Peu d'entre elles utilisent une approche par indice, mais les méthodologies qu'elles proposent pourraient venir enrichir notre démarche.

Prédire comment se comportera la niche climatique d'une forêt ne signifie pas qu'elle pourra effectivement s'implanter dans les nouvelles zones favorables, ni qu'elle disparaîtra des zones défavorables. Il est nécessaire de savoir si les essences pourront se développer dans l'aire de répartition prédite. Pour se rapprocher de la niche réalisée des espèces, certains scientifiques ont développé des modèles capables de tenir compte des conditions de la phénologie des arbres (*i.e.* conditions de croissance et de survie) dans leurs projections.

Prenons l'exemple de Sánchez-Salguero *et al.* (2017) qui intègrent un modèle de croissance basé sur la dendrochronologie à leur étude de vulnérabilité des forêts nord-espagnoles. À partir des cernes du bois prélevé sur des échantillons et des paramètres climatiques associés (*i.e.* températures et précipitations), un modèle calcule l'humidité du sol et la relie à la dynamique de croissance de l'arbre. Après cet étalonnage du modèle, il est possible de l'utiliser sur un ensemble de données climatiques futures pour lesquelles il estimera la croissance des forêts.

En France, un modèle a été développé qui associe paramètres climatiques et cycle de vie de l'arbre : c'est le modèle Phénofit (Morin et Chuine, 2018). Ce dernier identifie les variables climatiques et pédologiques permettant la réalisation des phases importantes de la croissance des arbres (*i.e.* feuillaison, floraison, fructification, production de graines). Les sous-modèles intégrés à Phénofit estiment ensuite la probabilité pour l'arbre de produire feuilles, fleurs et fruits, ainsi que les dommages que les sécheresses et le gel leur infligent. Puis, à partir des caractéristiques de l'espèce et de l'énergie thermique qui l'environne, le modèle estime le succès reproducteur de l'arbre à travers la simulation de la maturation de ses fruits. Pour finir, ce succès reproducteur est croisé avec la survie pour obtenir une probabilité de présence de l'espèce étudiée sur un site donné. Cette longue étape de calibrage précède la phase de simulation de l'aire de répartition sous les conditions climatiques futures. À l'aube de l'élaboration de cette étude, une réflexion a porté sur l'intégration d'un indice reposant sur Phénofit. Ce dernier n'a pas été développé dans un souci de respect des échéances, mais pourrait être réenvisagé dans la suite du projet.

### *III.6 – Approfondissement de la méthode par des indices liés à la capacité d'adaptation*

L'utilisation de données relatives à la biologie des arbres permet de se rapprocher de la niche réalisée des forêts lors des prédictions. Toutefois, ces approches négligent la possibilité des espèces à faire face au CC par des processus d'acclimatation et d'adaptation. Introduire la capacité d'adaptation des arbres dans la modélisation revient à y incorporer des informations sur certains traits d'histoire de vie.

Comme dans l'étude de Aubin *et al.* (2018), il est possible de se concentrer sur les traits liés à la sensibilité à la sécheresse (*e.g.* profondeur racinaire, résistance du xylème à l'embolie) et à la capacité de migration (*e.g.* production de graines viables, capacité de

dispersion, espèce spécialiste ou généraliste). Construire des indices relatifs à ces traits d'histoire de vie est envisageable, qui viendraient compléter notre méthode. Un indice relatif aux sécheresses seraient par exemple pertinent pour les pinèdes du sud de la France. Pour ce qui est de l'exposition, à partir de la différence entre l'enveloppe climatique actuelle et l'enveloppe future, les auteurs travaillent sur la distance entre la localisation de l'espèce et le lieu climatiquement favorable le plus proche à l'avenir. La sensibilité et l'exposition de chaque espèce d'un peuplement forestier sont ensuite réunies pour évaluer la vulnérabilité de l'ensemble de la communauté à la sécheresse et à l'échec de migration.

### *III.7 – Approfondissement de la méthode par des indices liés aux effets indirects du changement climatique*

Pour aller plus loin, la démarche de Comer *et al.* (2012) évoquée dans la partie méthodologie développe de nombreux autres indices. Ils intègrent notamment dans la sensibilité des indices liés aux effets indirects du changement climatique :

- un indice de condition paysagère : il utilise des cartes d'usage du sol (*e.g.* infrastructures de transport) et de couverture du sol (*e.g.* agriculture) pour estimer la condition écologique du paysage ;
- un indice sur les espèces exotiques envahissantes : il projette dans l'espace l'habitat favorable aux espèces invasives selon leur présence observée sur le territoire d'étude pour donner un probabilité de présence ou d'abondance ;
- un indice d'altération des processus dynamiques : il correspond à l'altération des régimes hydrologiques et des incendies à laquelle est associé un score de résilience de chaque habitat.

Pour ce qui est de la capacité adaptative, tout comme Aubin *et al.* (2018), Comer *et al.* (2012) ont construit un indice de diversité fonctionnelle intra-communauté qui se base sur les réponses des espèces végétales à la sécheresse, ainsi que sur leur mode de pollinisation et leurs formes caractéristiques de croissance. Un indice de vulnérabilité au CC des espèces clés de voûte est également intégré dans la capacité adaptative des habitats. Incorporer un tel indice dans notre travail semble malheureusement compliqué car chaque espèce nécessite que l'on détermine son enveloppe climatique et sa vulnérabilité propre.

Cette trame globale d'analyse peut être complétée par les méthodologies d'autres études. D'autres traits d'histoire de vie peuvent donner des indications importantes sur la vulnérabilité des écosystèmes forestiers, comme la capacité de dispersion, la tolérance au feu, ou encore les maladies pouvant toucher les espèces composant le système (Janowiak *et al.*, 2014; Thorne *et al.*, 2017). La prise en compte des maladies serait par exemple importante pour les frênaies-ormaies, et un indice lié au niveau de la nappe serait approprié aux habitats rivulaires. De plus, des informations sur les pratiques de gestion (*e.g.* récolte, plantation), lorsqu'elles existent, ou sur les processus liés aux nutriments, peuvent préciser l'évaluation de la vulnérabilité (Janowiak *et al.*, 2014).

### *III.8 – Evaluer la vulnérabilité, un long chemin à parcourir*

A l'heure actuelle, les méthodes de modélisation de la vulnérabilité des forêts face au CC continuent de s'améliorer pour préciser davantage les processus entrant en jeu dans la sensibilité et l'adaptation. Dès lors que l'on s'intéresse aux traits d'histoire de vie, les chercheurs sont confrontés au choix des espèces représentatives des communautés. Les simulations faites pour ces espèces sont bien souvent agrégées *a posteriori* pour reconstituer la réponse de la forêt (*e.g.* Aubin *et al.*, 2018). A l'échelle locale, il est possible de prédire plus précisément la vulnérabilité des écosystèmes forestiers en caractérisant les

mélanges d'essences et les pratiques de gestion. En France, le modèle ForCEEPS est en cours de calibrage et de validation qui permettra de comparer la réponse de mélanges forestiers et de monocultures au CC (Morin et Chuine, 2018).

Bien qu'aujourd'hui les paramètres définissant la vulnérabilité des écosystèmes, notamment forestiers, face au CC semblent faire consensus, il reste difficile d'incorporer toutes les informations nécessaires à l'évaluation précise de la vulnérabilité. Les scientifiques sont bien souvent confrontés aux choix des paramètres qu'ils peuvent intégrer à leurs modélisations (Thorne *et al.*, 2017). De plus, de nombreuses données ne sont disponibles qu'à l'échelle locale, rendant compliquée la généralisation des phénomènes, et d'autres données ne sont simplement pas disponibles (Morin et Chuine, 2018). Par ailleurs, les processus climatiques et physiques auxquels sont exposées les forêts peuvent n'être significatifs qu'à large échelle et perdre leur sens dans les études à l'échelle locale (Janowiak *et al.*, 2014). D'autre part, toute modélisation possède ses propres incertitudes du fait des processus mathématiques impliqués dans la réalisation et des hypothèses posées au départ de l'analyse (*e.g.* Thorne *et al.*, 2018). Par exemple, la distribution future de l'enveloppe climatique d'une forêt pourrait être différente de celles des espèces constitutrices de la communauté, chaque espèce pouvant répondre de façon indépendante au changement climatique (Thorne *et al.*, 2017). Enfin, la plupart de ces méthodologies négligent l'existence de climats locaux permettant à certains écosystèmes de perdurer dans une zone d'apparence défavorable (Dobrowski, 2011).

## Conclusion

L'évaluation de la vulnérabilité au CC des écosystèmes forestiers se veut être un outil d'aide à la décision pour la gestion durable et intégrée des forêts. Elle permet de répondre aux questions relatives aux enjeux et aux priorités face au CC (Glick *et al.*, 2011). La vulnérabilité aide donc à l'élaboration de stratégies d'adaptation et à l'allocation raisonnée des ressources (Glick *et al.*, 2011). Elle met également en évidence les méthodes de gestion qui doivent changer ou s'adapter aux changements globaux, mais ne dit pas quelles priorités choisir. En effet, la notion de vulnérabilité des écosystèmes ne tient pas compte des valeurs économiques et sociales qui leur sont associées : la décision revient donc aux gestionnaires de savoir s'il vaut mieux conserver les écosystèmes les plus vulnérables ou les plus viables, ou encore de permettre leur évolution vers un autre état (Glick *et al.*, 2011; Janowiak *et al.*, 2014).

Ce travail propose une méthodologie innovante permettant d'évaluer la vulnérabilité des habitats forestiers face au changement climatique. Pour ce faire, des indices ont été élaborés selon les trois composantes de la vulnérabilité : l'exposition, la sensibilité et la capacité adaptative. La méthode a ensuite été testée sur la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx, habitat d'intérêt communautaire 9120. Les résultats montrent que l'HIC 9120 serait principalement touché par des changements de températures, et que sa niche potentielle réduirait sans pouvoir se déplacer. Bien que le Chêne sessile semble moins sensible au CC que le Hêtre, l'habitat ne serait vraisemblablement pas adapté aux conditions futures de température et de bilan hydrique estivaux sur ses placettes de répartition potentielle. Enfin, l'exposition et la sensibilité de l'habitat risquent d'augmenter au cours du temps, tandis que la capacité adaptative devrait diminuer, ce qui accroît la vulnérabilité globale de l'habitat. Conclure sur la gravité de cette vulnérabilité n'est toutefois pas possible sans l'application de la méthode à d'autres habitats et la comparaison des résultats obtenus. Cependant, une certaine vigilance doit être adoptée à l'égard de l'HIC 9120 et de sa réponse future au changement climatique.

La confrontation des résultats théoriques aux observations de terrain nous apprend que l'état sanitaire de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx dépend pour partie de sa localisation dans la niche potentielle, de son adaptation bioclimatique aux nouvelles conditions, ainsi qu'à l'adaptation de ses essences structurantes. Mais la résistance ou la résilience future de l'habitat ne repose pas uniquement sur des facteurs climatiques et édaphiques. En effet, les pratiques de gestion, en préservant ou en aggravant la santé des arbres, pourraient influencer l'état sanitaire observé sur le terrain. Par ailleurs, la résistance reposant sur l'effet peuplement, ou encore les phénomènes d'adaptation reposant sur les caractéristiques intrinsèques des espèces, pourraient s'avérer cruciaux pour l'avenir des hêtraies-chênaies dans le contexte de changement climatique.

Pour finir, cette étude veut mettre en garde sur l'obsolescence du dispositif Natura 2000 face aux conséquences du changement climatique. Le regard fixiste que Natura 2000 porte sur l'identité des milieux confronte les gestionnaires à des non-sens écologiques et techniques. Préserver les habitats forestiers demandera de préparer la transition de ces derniers vers des écosystèmes de nature différente, tout en préservant leurs fonctionnalités.

Des mutations profondes sont à prévoir dans la conception des écosystèmes et de leur gestion, qui nécessitent la réunion et la discussion d'experts pour identifier « les défis de maintenant pour demain » (Allen *et al.*, 2015). Ces transformations concernent non seulement les espaces naturels, mais aussi les peuplements exploités pour leurs ressources. C'est ainsi que doivent se répandre les principes de la sylviculture adaptative (Nagel *et al.*, 2017).



## Bibliographie

- Allen CD, Breshears DD, McDowell NG** (2015) On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* **6**: art129
- Aubin I, Boisvert-Marsh L, Kebli H, McKenney D, Pedlar J, Lawrence K, Hogg EH, Boulanger Y, Gauthier S, Ste-Marie C** (2018) Tree vulnerability to climate change: improving exposure-based assessments using traits as indicators of sensitivity. *Ecosphere* **9**: e02108
- Badeau V, Dupouey J-L, Cluzeau C, Drapier J, Le Bas C** (2004) Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières. hal-02834220. p 11
- Bastien Y, Gauberville C, eds** (2011) Vocabulaire forestier: écologie, gestion et conservation des espaces boisés. Inst. pour le Développement Forestier, Paris. p 554
- Bensettiti F, Rameau J-C, Chevallier H** (2001) Tome 1: Habitats Forestiers. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire - "Cahiers d'habitats" Natura 2000, La Documentation française, Paris. p 399
- Bertin S, Balandier P, Becquey J, Bonal D, Bréda N, Perrier C, Riou Nivert P, Sevrin E** (2016) Le bilan hydrique des peuplements forestiers. Etat des connaissances scientifiques et techniques - Implications pour la gestion. RMT Aforce. p 190
- Bertrand R, Lenoir J, Piedallu C, Riofrío-Dillon G, de Ruffray P, Vidal C, Pierrat J-C, Gégout J-C** (2011) Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature* **479**: 517–520
- Bertrand R, Riofrío-Dillon G, Lenoir J, Drapier J, de Ruffray P, Gégout J-C, Loreau M** (2016) Ecological constraints increase the climatic debt in forests. *Nat Commun* **7**: 12643
- Bonhême I** (2021) La détermination des habitats naturels par l'inventaire forestier : Les objectifs et les concepts utilisés. IGN, Saint-Mandé. p 58
- Bonhême I** (2018) Évolutions de la ressource en chênes sessile, pédonculé et pubescent en Deux-Sèvres, Vienne, Pays de la Loire, Centre-Val de Loire, Ile de France et Bourgogne au cours des trois dernières décennies. IGN, Saint-Mandé. p 61
- Chytrý M, Tichý L, Holt J, Botta-Dukát Z** (2002) Determination of diagnostic species with statistical fidelity measures. *Journal of Vegetation Science* **13**: 79–90
- Comer PJ, Hak JC, Reid MS, Auer SL, Schulz KA, Hamilton HH, Smyth RL, Kling MM** (2019) Habitat Climate Change Vulnerability Index Applied to Major Vegetation Types of the Western Interior United States. *Land* **8**: 108
- Comer PJ, Reid M, Schulz K, Hak J, Auer S, Kling M, Hamilton H** (2018) Assessing Vulnerability and Resilience of Major Vegetation Types of the Western Interior

U.S.–Forests and Woodlands. Prepared for the U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management. NatureServe, Arlington, VA. p 288

**Comer PJ, Young B, Schulz K, Kittel G, Unnasch B, Braun D, Hammerson G, Smart L, Hamilton H, Auer S, Smyth R, Hak J** (2012) Climate Change Vulnerability and Adaptation Strategies for Natural Communities: Piloting methods in the Mojave and Sonoran deserts. Report to the US Fish and Wildlife Service. NatureServe, Arlington, VA. p 73

**Coudun C** (2005) Approche quantitative de la réponse écologique des espèces végétales forestières à l'échelle de la France. *Ecologie, Environnement*. ENGREF (AgroParisTech). tel-00011330. p 129

**Coudun C, Gégout J-C, Piedallu C, Rameau J-C** (2006) Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with *Acer campestre* (L.) in France. *Journal of Biogeography* **33**: 1750–1763

**Cox DR** (1958) The Regression Analysis of Binary Sequences. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* **20**: 215–232

**Département de la santé des forêts** (2021) La Lettre du DSF n°57 - Février 2021. p 18

**Département de la santé des forêts** (2019) La lettre du DSF n°54 : Spéciale sécheresses. p8

**Dobrowski SZ** (2011) A climatic basis for microrefugia: the influence of terrain on climate. *Global change biology* **17**: 1022–1035

**Dumé G, Gauberville C, Mansion D, Rameau J-C, Bardat J, Bruno É, Keller R** (2018) Flore forestière française. Guide écologique illustré. 1. Plaines et collines, Nouvelle édition. Institut pour le développement forestier, Paris. p 2460

**Fielding AH, Bell JF** (1997) A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Envir Conserv* **24**: 38–49

**Gégout J-C, Coudun C, Bailly G, Jabiol B** (2005) EcoPlant: A forest site database linking floristic data with soil and climate variables. *Journal of Vegetation Science* **16**: 257–260

**GIEC** (2018) Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté. p 32

**Glick P, Stein BA, Edelson NA** (2011) Scanning the conservation horizon: a guide to climate change vulnerability assessment. National Wildlife Federation, Washington, D.C. p 176

**Goudet M, Saintonge F-X, Nageleisen L-M** (2018) Quantifier l'état de santé de la forêt, méthode simplifiée d'évaluation. Département de la santé des forêts. p 6

- Grossiord C, Gessler A, Granier A, Bonal D** (2015) Les forêts tempérées face aux conséquences du changement climatique : est-il primordial de favoriser une plus forte diversité d'arbres dans les peuplements forestiers ? *Revue Forestière Française* **LXVII** : 99-110
- Hosmer DW, Lemeshow S, Sturdivant RX** (2013) *Applied logistic regression*, Third edition. Wiley, Hoboken, New Jersey. p 508
- IPCC** (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. p 52
- Janowiak MK, Iverson LR, Mladenoff DJ, Peters E, Wythers KR, Xi W, Brandt LA, Butler PR, Handler SD, Shannon PD, Swanston C, Linda R, Amman AJ, Bogaczyk B, Handler C, Lesch E, Reich PB, Matthews S, Peters M, Prasad A, Khanal S, Liu F, Bal T, Bronston D, Burton A, Ferris J, Fosgitt J, Hagan S, Johnston E, Kane E, Matula C, O'Connor R, Higgins D, St. Pierre M, Daley J, Davenport M, Emery MR, Fehringer D, Hoving CL, Johnson G, Neitzel D, Notaro M, Rissman A, Rittenhouse C, Ziel R** (2014) Forest ecosystem vulnerability assessment and synthesis for northern Wisconsin and western Upper Michigan: a report from the Northwoods Climate Change Response Framework project. Gen. Tech. Rep. NRS-136. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. p 247
- Kijowska-Oberc J, Staszak AM, Kamiński J, Ratajczak E** (2020) Adaptation of forest trees to rapidly changing climate. *Forests* **11**: 123
- Landmann G, Dupouey J-L, Badeau V, Lefevre Y, Bréda N, Nageleisen L-M, Chuine I, Lebourgeois F** (2007) Le hêtre face aux changements climatiques. *Rendez-vous Techniques de l'ONF, hors-série n°2*, Office national des forêts. hal-01195001. 29-38
- Legay M, Cordonnier T, Dhôte J-F** (2008) Des forêts mélangées pour composer avec les changements climatiques. *Revue Forestière Française* **LX** : 181-190
- Legay M, Musch B, Pousse N, Jolly A, Ladier J, Boulanger V, Deleuze C, Mengin-Lecreuxl P, Piboule A, Rousselle Y, et al** (2020) Comment l'Office national des forêts anticipe les effets du changement climatique ? *Sciences Eaux & Territoires Numéro 33*: 28–35
- Lemaire J, Guyon A, Weben C, Mathieu P, Formery T** (2014) Bioclimsol : un outil d'aide à la décision face au changement climatique. *Forêt entreprise* **218**. p 64
- Marage D, Gégout J-C** (2010) Réponses de quelques habitats naturels forestiers et de leurs espèces typiques au changement climatique. *Revue Forestière Française* **LXII** : 485-500
- Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K, Daniel JS, Kainuma MLT, Lamarque J-F, Matsumoto K, Montzka SA, Raper SCB, Riahi K, et al** (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* **109**: 213–241

- Menéndez R, Megías AG, Hill JK, Braschler B, Willis SG, Collingham Y, Fox R, Roy DB, Thomas CD** (2006) Species richness changes lag behind climate change. *Proc R Soc B* **273**: 1465–1470
- Millar CI, Stephenson NL, Stephens SL** (2007) Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications* **17**: 2145–2151
- Morin X, Chuine I** (2018) Mieux comprendre les processus d’influence du climat sur les arbres pour anticiper les effets de son évolution sur la composition et sur le fonctionnement des forêts. *Rendez-vous Techniques de l’ONF, n°58-59-60 spécial Renecofor*. 28–34
- Nagel LM, Palik BJ, Battaglia MA, D’Amato AW, Guldin JM, Swanston CW, Janowiak MK, Powers MP, Joyce LA, Millar CI, Peterson DL, Ganio LM, Kirschbaum C, Roske MR** (2017) Adaptive Silviculture for Climate Change: A National Experiment in Manager-Scientist Partnerships to Apply an Adaptation Framework. *Journal of Forestry* **115**: 167–178
- Nageleisen L-M, Schmuck H, Legay M, Bréda N** (2013) Dépérissement du Chêne pédonculé en Lorraine : des crises qui se succèdent... Bilan de la santé des forêts en 2012. p 9
- Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique** (2019) Des solutions fondées sur la nature pour s’adapter au changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement. La Documentation Française. p 306
- Pargade J, Brusten T** (2020) Les habitats forestiers face aux changements climatiques : quels enjeux, quelles actions ? *Forêt entreprise* **255** : 54–59
- Piedallu C, Gégout J-C, Bruand A, Seynave I** (2011) Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma* **160**: 355–366
- Piedallu C, Gégout J-C, Lebourgeois F, Seynave I** (2016) Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests. *Journal of Vegetation Science* **27**: 387–399
- Piedallu C, Perez V, Gégout J-C, Lebourgeois F, Bertrand R** (2009) Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l’Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française* **LXI** : 567-593
- Piedallu C, Gégout J-C, Perez V, Lebourgeois F** (2013) Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography* **22**: 470–482
- Pinto PE, Dupouey J-L, Hervé J-C, Legay M, Wurpillot S, Montpied P, Gégout J-C** (2016) Optimizing the bioindication of forest soil acidity, nitrogen and mineral nutrition using plant species. *Ecological Indicators* **71**: 359–367
- Rameau J-C, Drapier N, Gauberville C** (2000) Gestion forestière et diversité biologique: identification et gestion intégrée des habitats et espèces d’intérêt communautaire. Institut pour le développement forestier. p360

- Rameau J-C, Mansion D, Dumé G** (1989) Flore forestière française: guide écologique illustré. Institut pour le développement forestier : Ministère de l'agriculture et de la forêt, Direction de l'espace rural et de la forêt : Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Paris. p 1785
- Renaux B, Timbal J, Gauberville C, Boeuf R, Thebaud G, Bardat J, Lalanne A, Royer JM, Seytre L** (2019) Contribution au Prodrome des végétations de France : les Quercetea robori-petraeae Braun-Blanq. & Tüxen ex Braun-Blanq., Roussine & Nègre 1952. Documents phytosociologiques, 3e série, **10** : 137-215
- Rouveyrol P, Leroy M** (2021) L'efficacité du réseau Natura 2000 terrestre en France. UMS PatriNat (OFN/CNRS/MNHN), Paris. p 254
- Sánchez-Salguero R, Camarero JJ, Gutiérrez E, González Rouco F, Gazol A, Sangüesa-Barreda G, Andreu-Hayles L, Linares JC, Seftigen K** (2017) Assessing forest vulnerability to climate warming using a process-based model of tree growth: bad prospects for rear-edges. *Global Change Biology* **23**: 2705–2719
- Schmitt A, Trouvé R, Richter C, Seynave I, Lebourgeois F** (2019) Améliorer la capacité du chêne sessile à répondre à des sécheresses extrêmes : Réduction de la densité des peuplements. Étude dendro-écologique de réseaux d'expérimentations sylvicoles à long terme. Dossier "Forêt et changement climatique : Accompagner la décision d'adaptation ". *Forêt entreprise* **249** : 43–45
- Seynave I, Gégout J-C, Hervé J-C, Dhôte J-F** (2008) Is the spatial distribution of European beech (*Fagus sylvatica* L.) limited by its potential height growth? *Journal of Biogeography* **35**: 1851–1862
- Smit B, Pilifosova O** (2003) Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. *Sustainable Development* **8**, p 9
- Smuts JC** (1926) Holism and evolution. Рипол Классик. p375
- Sordello R, Herard K, Coste S, Conruyt-Rogéon G, Touroult J** (2014) Le changement climatique et les réseaux écologiques. Point sur la connaissance et pistes de développement MNHN, Service du patrimoine naturel. p 178
- Svenning J-C, Sandel B** (2013) Disequilibrium vegetation dynamics under future climate change. *American Journal of Botany* **100**: 1266–1286
- Taccoen A, Piedallu C, Seynave I, Gégout-Petit A, Nageleisen L-M, Bréda N, Gégout J-C** (2021) Climate change impact on tree mortality differs with tree social status. *Forest Ecology and Management* **489**: 119048
- Taccoen A, Piedallu C, Seynave I, Perez V, Gégout-Petit A, Nageleisen L-M, Bontemps J-D, Gégout J-C** (2019) Background mortality drivers of European tree species: climate change matters. *Proc R Soc B* **286**: 20190386
- Thiffault N, Raymond P, Lussier J-M, Aubin I, Royer-Tardif S, D'Amato AW, Doyon F, Lafleur B, Perron M, Bousquet J, Isabel N, Carles S, Lupien P, Malenfant A** (2021) Sylviculture d'adaptation aux changements climatiques : des concepts à

la réalité Compte-rendu d'un colloque tenu au Carrefour Forêts 2019. The Forestry Chronicle **97**: 28–42

**Thorne JH, Choe H, Stine PA, Chambers JC, Holguin A, Kerr AC, Schwartz MW** (2017) Climate change vulnerability assessment of forests in the Southwest USA. Climatic Change **148**: 387–402

**Turc L** (1955) Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Journées de l'hydraulique **3**: 36–44

**van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque J-F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ, Rose SK** (2011) The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change **109**: 5–31

**Wang C-J, Zhang Z-X, Wan J-Z** (2019) Vulnerability of global forest ecoregions to future climate change. Global Ecology and Conservation **20**: e00760

## Webographie

**Centre de ressources Natura 2000** (2018) Chiffres clés. Consulté le 26/03/2021. <https://www.natura2000.fr/chiffres-cles>

**Centre for Environmental Data Analysis** (2018) CMIP5 20-Year AR5 Climatology Data for the IPCC DDC. Centre for Environmental Data Analysis. Consulté le 26/07/2021 <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/d269d748cafe40ec8601125caf5cb2fa>

**Centre national de la propriété forestière** (s.d.) BIOCLIMSOL. Consulté le 10/08/2021. <https://www.cnpf.fr/n/bioclimsol/n:558>

**ClimEssences by AFORCE** (s.d.) CLIMESSENCES. Consulté le 10/08/2021. <https://climessences.fr/>

**Météo-France** (2020) Des sécheresses qui se répètent sans être identiques. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/des-secheresses-qui-se-repetent-sans-etre-identiques>







# ANNEXES



## Annexe I : Combinaison caractéristique d'espèces de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx.

Le prodrome des végétations de France (Renaux *et al.*, 2019) relève comme combinaison caractéristique d'espèces :

- Hêtre *Fagus sylvatica*
- Chêne sessile *Quercus petraea*
- Chêne pédonculé *Quercus robur*
- Bouleau pubescent *Betula pubescens*
- Bouleau verruqueux *Betula pendula*
- Sorbier des oiseleurs *Sorbus aucuparia*
- Alisier torminal *Sorbus torminalis*
- Poirier commun *Pyrus communis*
  
- Canche flexueuse *Deschampsia flexuosa*
- Blechne en épi *Blechnum spicant*
- Callune *Calluna vulgaris*
- Laîche à pilules *Carex pilulifera*
- Néflier *Crataegus germanica*
- Dicrane en balai *Dicranum scoparium*
- Bourdaine *Frangula dodonei*
- Lierre grimpant *Hedera helix*
- Hypne cyprès *Hypnum cupressiforme*
- Millepertuis élégant *Hypericum pulchrum*
- Houx *Ilex aquifolium*
- Coussinet des bois *Leucobryum glaucum*
- Chèvrefeuille des bois *Lonicera periclymenum*
- Polytric élégant *Polytricum formosum*
- Fougère aigle *Pteridium aquilinum*
- If commun *Taxus baccata*
- Thuidie à feuilles de Tamaris *Thuidium tamariscinum*

Le cahier d'habitats (Bensettiti *et al.*, 2001) identifie d'autres espèces « indicatrices » des hêtraies-chênaies atlantiques collinéennes acidiphiles à houx :

- Myrtille *Vaccinium myrtillus*
- Hypne courroie *Rhytidiadelphus loreus*
- Mélampyre des prés *Melampyrum pratense*
- Solidage verge d'or *Solidago virgaurea*
- Houlque molle *Holcus mollis*

A partir des relevés floristiques des placettes de l'Inventaire Forestier National dans les grandes régions écologiques (GRECO) A, B et F, recensant un total de 27 habitats, les indices de fidélité des espèces ont été calculés (Sokal and Rohlf, 1995 dans Chytrý *et al.*, 2002). Les espèces suivantes ont été déterminées comme « typiques » de l'HIC 9120 :

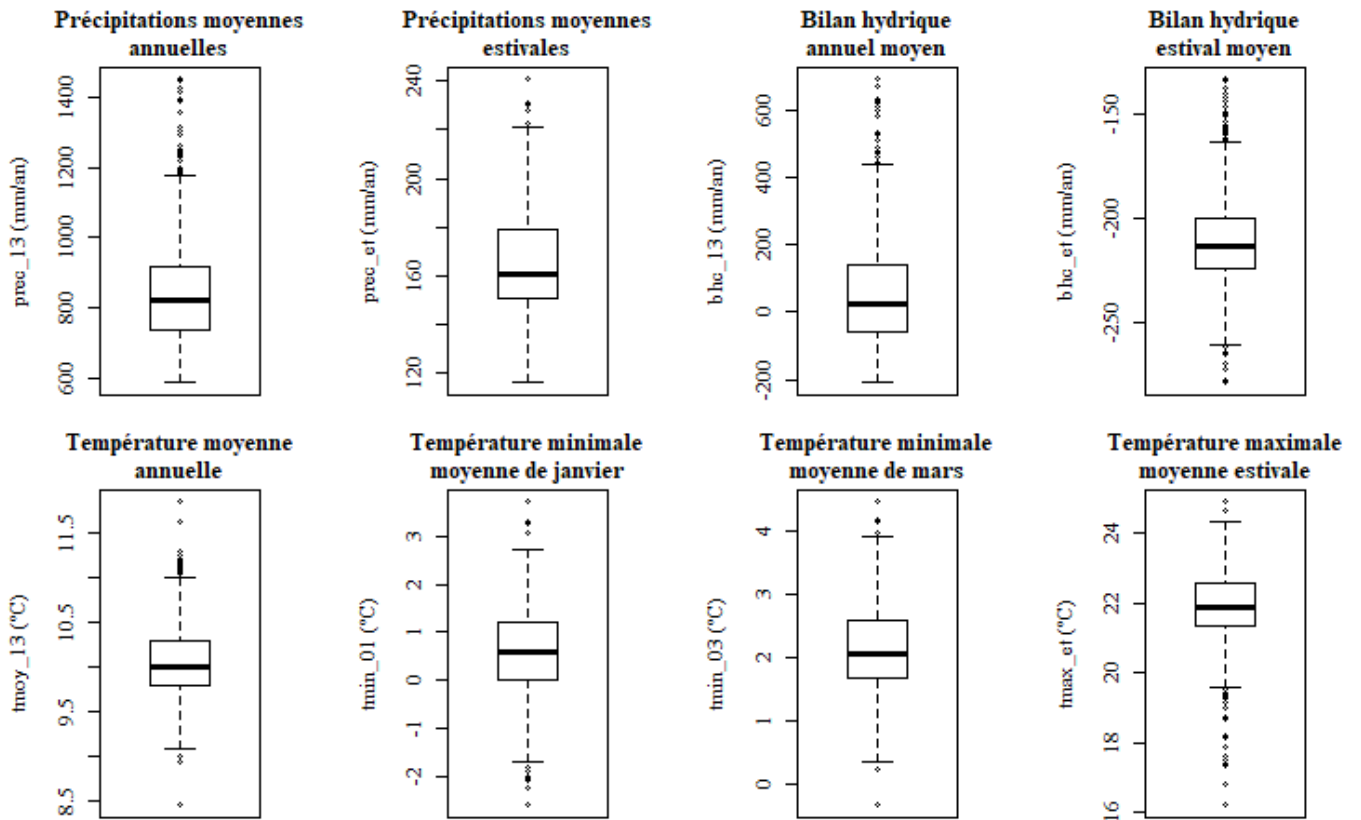
- **Sapin blanc** *Abies alba*
- **Bouleau verruqueux** *Betula pendula*
- **Blechnum en épi** *Blechnum spicant*
- **Laîche à pilule** *Carex pilulifera*
- **Canche flexueuse** *Deschampsia flexuosa*

## Annexe I (suite)

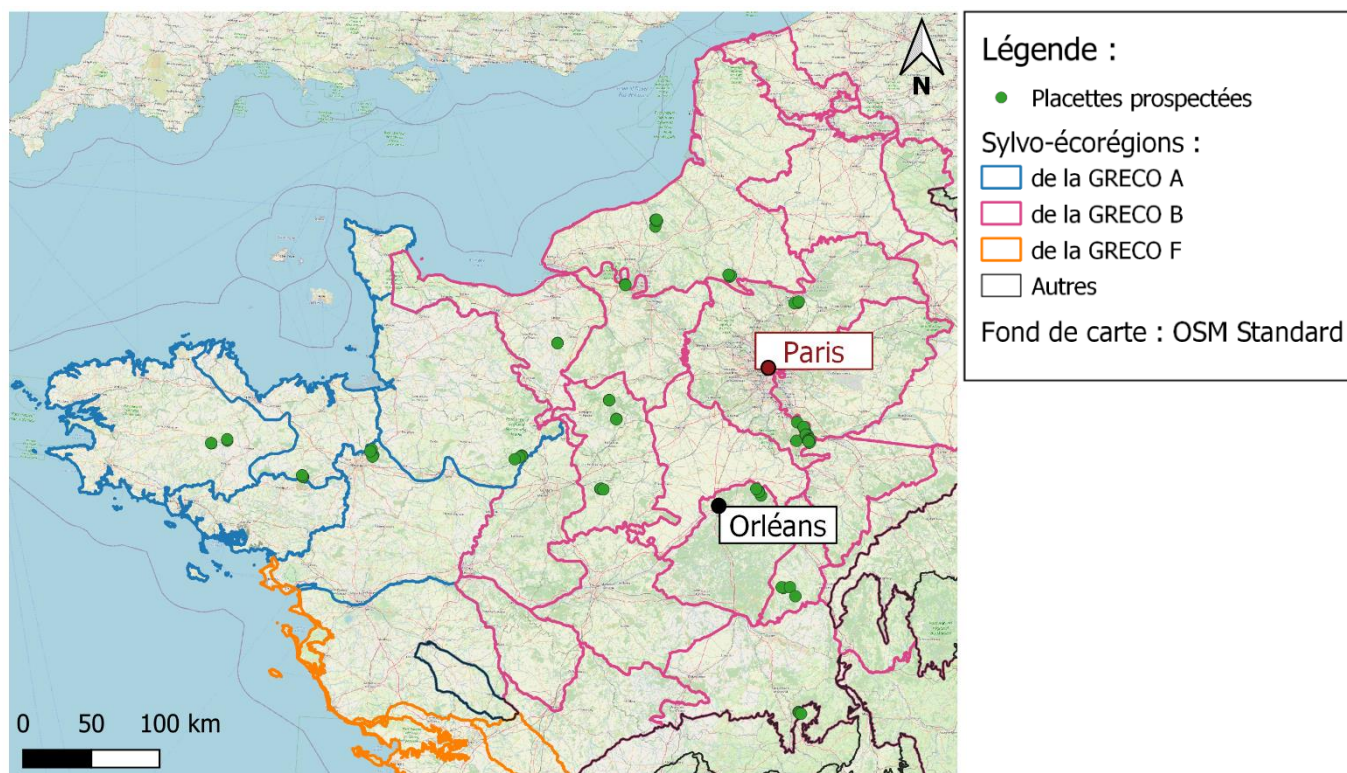
- <b>Dicrane en balai</b>	<i>Dicranum scoparium</i>
- Fougère dilatée	<i>Dryopteris dilatata</i>
- <b>Hêtre commun</b>	<i>Fagus sylvatica</i>
- <b>Houx</b>	<i>Ilex aquifolium</i>
- <b>Coussinet des bois</b>	<i>Leucobryum glaucum</i>
- Molinie bleue	<i>Molinia caerulea</i>
- <b>Épicéa de Sitka</b>	<i>Picea sitchensis</i>
- <b>Polytric élégant</b>	<i>Polytrichum formosum</i>
- <b>Pin Douglas</b>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>
- <b>Fougère aigle</b>	<i>Pteridium aquilinum</i>
- <b>Chêne sessile</b>	<i>Quercus petraea</i>
- <b>Sorbier des oiseleurs</b>	<i>Sorbus aucuparia</i>
- <b>Myrtille</b>	<i>Vaccinium myrtillus</i>

Parmi les 18 espèces considérées typiques de l'HIC 9120, 13 apparaissent dans les listes du Prodrome des végétations de France et du cahier d'habitats (noms en **gras**). Notons la présence de bryophytes de caractère indicateur acidiphile de moder pour *Dicranum scoparium*, acidiphile de dysmoder et de mor pour *Leucobryum glaucum*, et acidiphile à large amplitude pour *Polytrichum formosum* (Rameau *et al.*, 1989). De même, les fougères sont caractéristiques des sols acides, avec *Dryopteris dilatata* indicatrice acidiphile de mull mésotrophe ou de mull-moder, et *Pteridium aquilinum* indicatrice acidiphile à large amplitude (Rameau *et al.*, 1989). Les essences en **rouge** sont des artéfacts liés à la sylviculture.

**Annexe II : Distribution des placettes potentielles d’HIC 9120 selon les gradients des variables étudiées** (n=1412). prec\_13 : précipitations moyennes annuelles ; prec\_et : précipitations moyennes estivales ; bhc\_13 : bilan hydrique climatique annuelle moyen ; bhc\_et : bilan hydrique climatique estival moyen ; tmoy\_13 : température moyenne annuelle ; tmin\_01 : température minimale moyenne de janvier ; tmin\_03 : température minimale moyenne de mars ; tmax\_et : température maximale moyenne estivale.



**Annexe III : Placettes prospectées sur le terrain.** Un ensemble de 15 sites Natura 2000 et 67 placettes ont fait l'objet de relevés.



Site Natura 2000	Surface HIC 9120 (ha)	Nombre de placettes
Forêt de Tronçais	482,03	4
Massifs forestiers du Pays-Fort	2166,1	4
Forêt d'Orléans	122,44	4
Massif de Fontainebleau	9074,4	17
Massif forestier d'Halatte, de Chantilly et d'Ermenonville	212,35	4
Massif forestier du Haut-Bray de l'Oise	230,6	4
Forêt d'Eawy	301,7	4
Boucles de la Seine Aval	369,4	2
Haute vallée de la Touques et affluents	244,66	2
Forêts du Haut Perche	698,25	4
Massif forestier de Vibraye	161,4	3
Forêt de Sillé	197,98	4
Complexe forestier de Rennes-Liffré-Chevré	632,6	4
Forêt de Paimpont	67,39	3
Forêt de Quénécan, Vallée du Poulancre	253,55	4

**Annexe IV : Présentation des variables écologiques utilisées pour modéliser la distribution de l'HIC 9120.** Les données climatiques, la réserve utile et le déficit d'évaporation en eau sont des moyennes sur la période 1961-1990, 1991-2019, 2046-2065 ou 2081-2100.

Nom	Abréviation	Définition	Unité	Type de variable	Sources
Température moyenne annuelle	t moy_13	Valeur moyenne de la température sur l'année	°C	Energie	DIGITALIS, CMIP5
Température minimale moyenne de janvier	t min_01	Valeur moyenne de température de la journée en moyenne la plus froide de janvier	°C	Energie	DIGITALIS, CMIP5
Température minimale moyenne de mars	t min_03	Valeur moyenne de température de la journée en moyenne la plus froide de mars	°C	Energie	DIGITALIS, CMIP5
Température maximale moyenne en été	t max_et	Valeur moyenne de température de la journée en moyenne la plus chaude entre juin et août	°C	Energie	DIGITALIS, CMIP5
Précipitations moyennes annuelles	prec_13	Cumul annuel des précipitations	mm	Alimentation en eau	DIGITALIS, CMIP5
Précipitations moyennes en été	prec_et	Cumul des précipitations de juin à août	mm	Alimentation en eau	DIGITALIS, CMIP5
Bilan hydrique annuel moyen	bhc_13	Cumul annuel de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle	mm	Alimentation en eau	DIGITALIS, calcul avec données du CMIP5
Bilan hydrique estival moyen	bhc_et	Cumul de juin à août de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle	mm	Alimentation en eau	DIGITALIS, calcul avec données du CMIP5
pH du sol	pH	pH de l'horizon A des sols forestiers	/	Contraintes nutritionnelles	Bioindication, DIGITALIS
Rapport carbone sur azote	C/N	Rapport carbone sur azote des sols forestiers	/	Contraintes nutritionnelles	Bioindication, DIGITALIS

## Annexe IV (suite)

Nom	Abréviation	Définition	Unité	Type de variable	Sources
Engorgement permanent	EP	Indice d'engorgement permanent des sols forestiers	/	Contraintes hydriques	Bioindication, DIGITALIS
Engorgement temporaire	ET	Indice d'engorgement temporaire des sols forestiers	/	Contraintes hydriques	Bioindication, DIGITALIS
Réserve utile maximale	RUM	Capacité maximale d'un sol à stocker l'eau	mm	Alimentation en eau	Calcul avec des données IGN, DIGITALIS
Réserve utile	RU	Moyenne annuelle de l'eau réellement disponible dans les sols	mm	Alimentation en eau	DIGITALIS, calcul avec données du CMIP5
Déficit d'évaporation en eau	DE	Cumul annuel de la quantité d'eau manquante dans le sol	mm	Contraintes hydriques	DIGITALIS, calcul avec données du CMIP5



## Annexe V : Feuille de relevé terrain.

### Fiche relevés terrain - HIC 9120

Page 1. Identifiant du relevé :

Opérateurs :

#### Données contextuelles

Date : ..... Département : .....

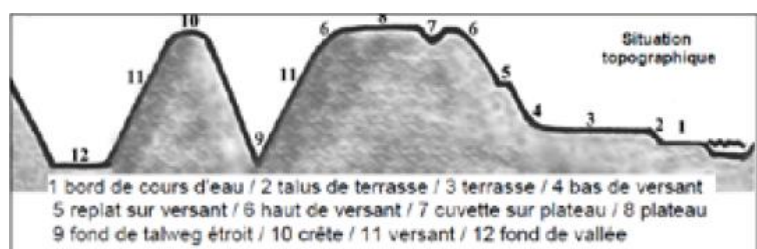
Propriété : ..... Numéro parcelle (si forêt domaniale) : .....

Altitude : ..... Coordonnées GPS : .....

Topographie : ..... Expo degré : ..... Pente (%) : ..... Confinement (masque) % : .....

Circulation de l'eau (sens de la pente) : ..... Circulation de l'eau (courbe de niveau) : .....

Observation : .....



Circulation de l'eau

**dans le sens de la pente**

- 1 départ supérieur à l'arrivée
- 2 départ égal à l'arrivée
- 3 départ inférieur à l'arrivée
- 4 arrivée très supérieure au départ
- 5 source

**suivant les courbes de niveau**

- 1 versant convexe
- 2 versant plan
- 3 versant concave

#### Données écologiques

Roche mère : ..... Affleurement rocheux ( /10) : .....

Text 1\* : ..... Prof 1 (cm)\* : ..... Text 2\* : ..... Prof 2 (cm)\* : .....

\*Text 1 : text. de l'horizon sup., Prof 1 : prof. de l'horizon sup, Text 2 : text. de l'horizon inf., Prof 2 : prof total du sondage

Profondeur hydromorphie marquée\* : ..... Nature hydromorphie : .....

\* marquée si engorgement permanent (gley) ou temporaire (pseudogley avec plus de 40% de taches d'oxydo-réduction)

Charge en cailloux ( /10) : ..... Cause arrêt : ..... ; Forme

d'humus : .....

Unité stationnelle (préciser le guide des stations) : .....

Type de station (préciser le catalogue des stations) : .....

Remarque sur le sol : .....

#### Peuplement et régénération

Type de peuplement : voir annexe « Typologie des peuplements »

.....

Qualité de la régénération (préciser la raison : présence et avenir des semis des essences en place, présence de trouées, impact des herbivores, dépérissements ou mortalités des tiges d'avenir....)

- aucun problème de régénération ;
- régénération moyennes (quelques problèmes de régénération) ;
- problème de régénération très important ;

.....  
.....

## Annexe V (suite)

### Relevé floristique sur placette de 15 m de rayon

A (lign. >7 m), a (ligneux < 7 m), h (herb. et lign. < 50 cm de hauteur)

Recouv. A (%) : ..... Recouv. a (%) : ..... Recouv. h (%) : .....

Nom latin	A	a	h	Nom latin	A	a	h
<i>Abies alba subsp. alba</i>				<i>Luzula multiflora</i>			
<i>Agrostis capillaris</i>				<i>Luzula sylvatica</i>			
<i>Ajuga reptans</i>				<i>Maianthemum bifolium</i>			
<i>Anemone nemorosa</i>				<i>Malus sylvestris</i>			
<i>Anthoxanthum odoratum</i>				<i>Moehringia trinervia</i>			
<i>Asplenium adiantum-nigrum</i>				<i>Molinia caerulea</i>			
<i>Athyrium filix-femina</i>				<i>Oxalis acetosella</i>			
<i>Betula pendula</i>				<i>Picea abies subsp. abies</i>			
<i>Blechnum spicant</i>				<i>Picea sitchensis</i>			
<i>Brachypodium pinnatum</i>				<i>Pinus nigra</i>			
<i>Brachypodium sylvaticum</i>				<i>Pinus sylvestris</i>			
<i>Buxus sempervirens</i>				<i>Poa chaixii</i>			
<i>Calluna vulgaris</i>				<i>Poa nemoralis</i>			
<i>Cardamine flexuosa</i>				<i>Poa trivialis</i>			
<i>Carex pilulifera</i>				<i>Polygonatum multiflorum</i>			
<i>Carex sylvatica</i>				<i>Polypodium vulgare</i>			
<i>Castanea sativa</i>				<i>Polystichum setiferum</i>			
<i>Conopodium majus</i>				<i>Potentilla erecta</i>			
<i>Convallaria majalis</i>				<i>Prenanthes purpurea</i>			
<i>Corylus avellana</i>				<i>Prunus avium</i>			
<i>Crataegus monogyna</i>				<i>Prunus spinosa</i>			
<i>Cytisus oromediterraneus</i>				<i>Pseudotsuga menziesii</i>			
<i>Cytisus scoparius</i>				<i>Pteridium aquilinum</i>			
<i>Dactylis glomerata</i>				<i>Quercus petraea</i>			
<i>Daphne laureola</i>				<i>Quercus pubescens</i>			
<i>Deschampsia cespitosa</i>				<i>Quercus robur</i>			
<i>Deschampsia flexuosa</i>				<i>Ribes alpinum</i>			
<i>Digitalis purpurea</i>				<i>Rosa canina</i>			
<i>Dryopteris affinis</i>				<i>Rubia peregrina</i>			
<i>Dryopteris dilatata</i>				<i>Rubus fruticosus</i>			
<i>Dryopteris filix-mas</i>				<i>Rubus idaeus</i>			
<i>Epilobium montanum</i>				<i>Rubus ulmifolius</i>			
<i>Erica cinerea</i>				<i>Rumex acetosella</i>			
<i>Erythronium dens-canis</i>				<i>Ruscus aculeatus</i>			
<i>Euphorbia amygdaloides</i>				<i>Salix caprea</i>			
<i>Fagus sylvatica</i>				<i>Sambucus nigra</i>			
<i>Festuca heterophylla</i>				<i>Sambucus racemosa</i>			
<i>Festuca ovina</i>				<i>Solidago virgaurea</i>			
<i>Fragaria vesca</i>				<i>Sorbus aria</i>			
<i>Frangula dodonei</i>				<i>Sorbus aucuparia</i>			
<i>Fraxinus excelsior</i>				<i>Stachys officinalis</i>			
<i>Galeopsis tetrahit</i>				<i>Stellaria holostea</i>			
<i>Galium mollugo</i>				<i>Teucrium scorodonia</i>			
<i>Genista pilosa</i>				<i>Ulex europaeus</i>			
<i>Geranium robertianum</i>				<i>Vaccinium myrtillus</i>			
<i>Hedera helix</i>				<i>Veronica montana</i>			
<i>Hieracium murorum</i>				<i>Veronica officinalis</i>			
<i>Holcus lanatus</i>				<i>Viola reichenbachiana</i>			
<i>Holcus mollis</i>				<b>Autres</b>			
<i>Hypericum montanum</i>				<i>Avenella flexuosa</i>			
<i>Hypericum perforatum</i>				<i>Betula pubescens</i>			
<i>Hypericum pulchrum</i>				<i>Crataegus germanica</i>			
<i>Ilex aquifolium</i>				<i>Dicranum scoparium</i>			
<i>Juniperus communis</i>				<i>Hypnum cupressiforme</i>			
<i>Lactuca muralis</i>				<i>Leucobryum glaucum</i>			
<i>Lathyrus linifolius</i>				<i>Melampyrum pratense</i>			
<i>Linaria repens</i>				<i>Polytricum formosum</i>			
<i>Lonicera periclymenum</i>				<i>Pyrus communis</i>			
<i>Luzula forsteri</i>				<i>Rhytidadelphus loreus</i>			
				<i>Sorbus torminalis</i>			
				<i>Taxus baccata</i>			
				<i>Thuidium tamariscinum</i>			

+ (quelques individus et <5%), **1** (<5%),  
**2** (5-25%), **3** (25-50%), **4** (50-75%), **5**(>75%)

## Annexe V (suite)

Page 2. Identifiant relevé :

Opérateurs :

### Données dendrométriques (voir annexe « Typologie des peuplements »)

1<sup>er</sup> tour d'horizon : appréciation de la richesse du peuplement (*évaluation de la surface terrière des arbres de plus 17.5 cm de diamètre avec une jauge d'angle*) (*faire moyenne de 2 mesures*)

Surface terrière mesurée à la jauge d'angle (**prisme 2**) : .....(m<sup>2</sup>/ha)

2<sup>ème</sup> tour d'horizon : appréciation de la structure peuplement : *Décompte du nombre de PB (diamètre : 17.5-27.5 cm), BM (diamètre 27.5-47.5 cm), GB (diamètre 47.5-57.5 cm) et TGB (diamètre > 57.5 cm) sur une placette circulaire contenant les 20 tiges les plus proches.*

N°	Essence	Catég.	Diam (cm)	N°	Essence	Catég.	Diam (cm)
1				11			
2				12			
3				13			
4				14			
5				15			
6				16			
7				17			
8				18			
9				19			
10				20			

Nombre PB : ..... Nombre BM : ..... Nombre GB : ..... Nombre TGB : .....

### (Hauteur dominante (vertex))

Mesurer la hauteur de minimum 2 arbres de l'essence principale du peuplement

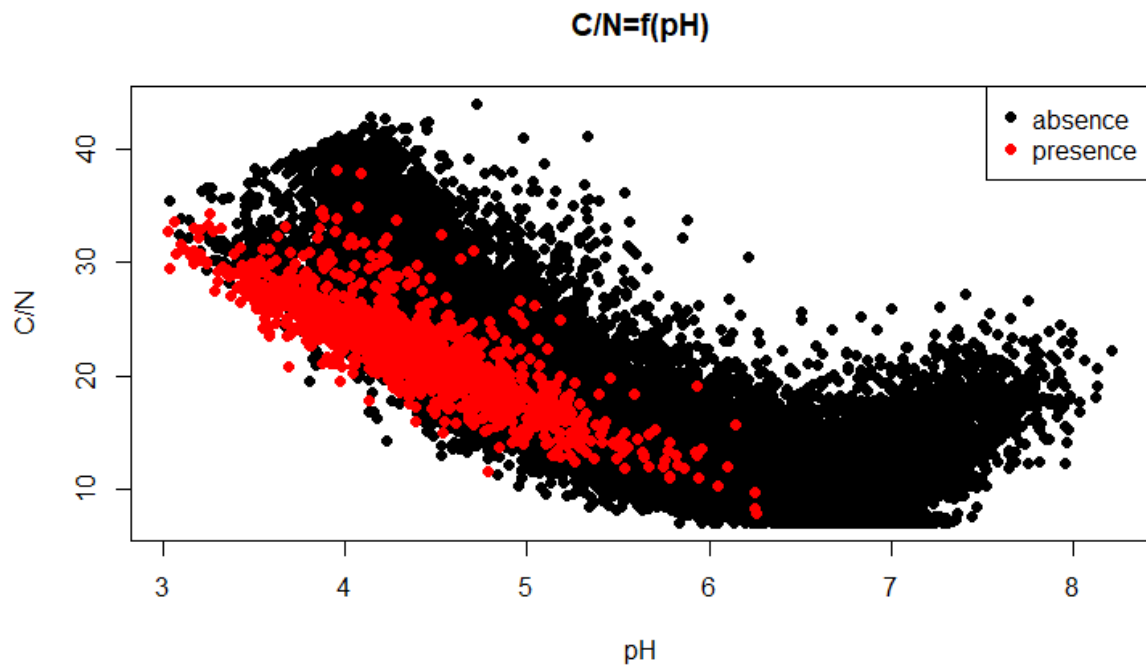
Essence							
Hauteur (m)							

### Etat sanitaire du peuplement

Evaluation des 20 arbres dominants les plus proches du centre de la placette (voir annexe « Montage\_photo\_DEPERIS »)

N°	Essence	MB	MR	Note	N°	Essence	MB	MR	Note
1					11				
2					12				
3					13				
4					14				
5					15				
6					16				
7					17				
8					18				
9					19				
10					20				

**Annexe VI : Distribution des occurrences potentielles de l'HIC 9120 selon le C/N et le pH bioindiqués (n=22699). Les valeurs de pH et C/N ont été obtenues par bioindication à partir des données flores de l'IGN.**



**Annexe VII : Matrice des corrélations (R<sup>2</sup>) des variables utilisées (a) et performance du modèle sélectionné (b).** RU : la réserve utile ; DE : le déficit d'évaporation ; C.N : le rapport carbone sur azote ; EP : l'indice d'engorgement permanent ; ET : l'indice d'engorgement temporaire ; tmoy\_13 : la température moyenne annuelle ; tmin\_01 : la température minimale moyenne de janvier ; tmin\_03 : la température minimale moyenne de mars ; tmax\_et : la température maximale moyenne estivale ; prec\_13 : les précipitations annuelles moyennes ; prec\_et : les précipitations estivales moyennes ; bhc\_13 : le bilan hydrique annuel moyen ; bhc\_et : le bilan hydrique estival moyen. Le modèle obtenue par régression logistique ascendante est de forme glm(occurrences ~ pH + bhc\_et + C/N + (C/N)<sup>2</sup> + tmax\_et + EP), avec bhc\_et le bilan hydrique estival, tmax\_et la température maximale estivale et EP l'engorgement permanent.

(a)

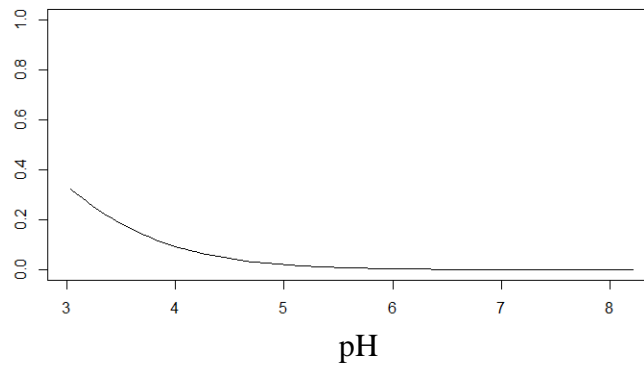
	RUM	RU	DE	pH	C.N	EP	ET	tmoy_13	tmin_01	tmin_03	tmax_et	prec_13	prec_et	bhc_13
RU	0.39													
DE	-0.25	-0.70												
pH	-0.11	-0.23	0.20											
C.N	-0.12	-0.06	0.16	-0.77										
EP	0.17	0.21	-0.20	0.31	-0.38									
ET	0.30	0.36	-0.31	-0.58	0.18	-0.01								
tmoy_13	-0.16	-0.26	0.65	0.06	0.34	-0.10	-0.32							
tmin_01	-0.15	-0.17	0.42	-0.13	0.34	-0.03	-0.22	0.72						
tmin_03	-0.16	-0.20	0.52	-0.06	0.35	-0.04	-0.28	0.86	0.97					
tmax_et	-0.10	-0.27	0.66	0.16	0.21	-0.14	-0.23	0.79	0.23	0.42				
prec_13	-0.07	0.11	-0.24	-0.14	0.24	0.02	-0.15	0.42	0.43	0.43	0.12			
prec_et	0.07	0.31	-0.62	0.03	-0.09	0.10	-0.01	-0.12	-0.40	-0.32	-0.02	0.56		
bhc_13	0.00	0.26	-0.64	-0.20	0.08	0.10	0.02	-0.11	0.13	0.04	-0.37	0.85	0.63	
bhc_et	0.13	0.40	-0.92	-0.09	-0.23	0.18	0.21	-0.75	-0.52	-0.62	-0.72	0.16	0.64	0.61

(b)

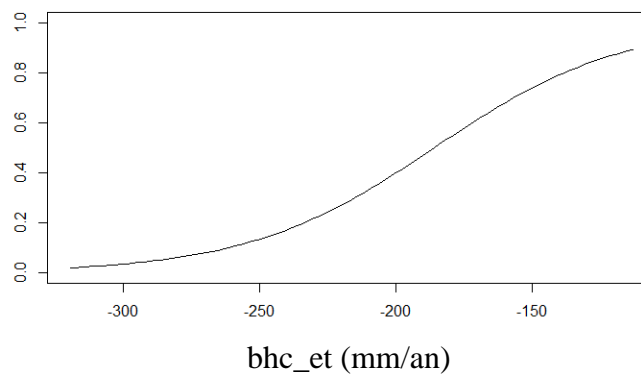
	AUC	succès	sensibilité	spécificité
Calibration (n=15189)	0.947	87	91	87
Validation (n=6510)	0.936	87	86	87

**Annexe VIII : Courbes de réponse écologique de l'HIC 9120.** Pour chaque courbe, la variable étudiée varie selon son gradient observé et les autres variables du modèle sont fixées à leur valeur moyenne (sauf pH qui est fixé à une valeur favorable à l'habitat). Les ordonnées correspondent à la probabilité de présence potentielle de l'habitat.  $tmax\_et$  obtient une courbe décroissante et non pas une courbe en cloche car le modèle est calibré sur une partie du gradient de températures (GRECO ABF plutôt que France entière ou Europe).  $bhc\_et$  : bilan hydrique estival ;  $tmax\_et$ , température maximale estivale ; EP, engorgement permanent.

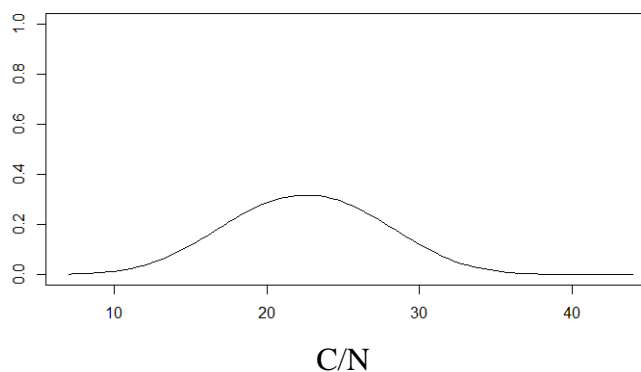
(a)



(b)

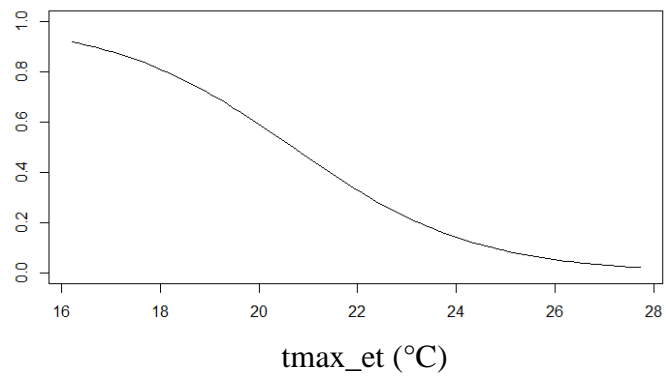


(c)

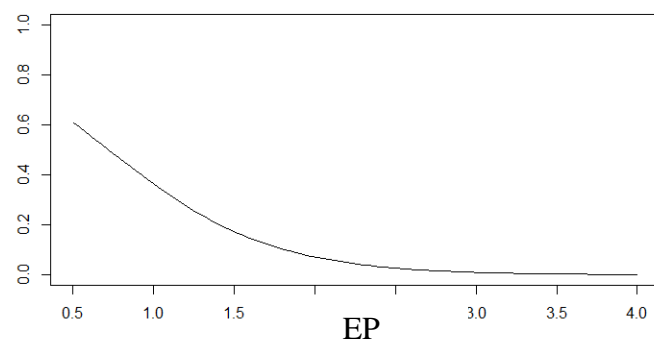


**Annexe VIII (suite)**

**(d)**

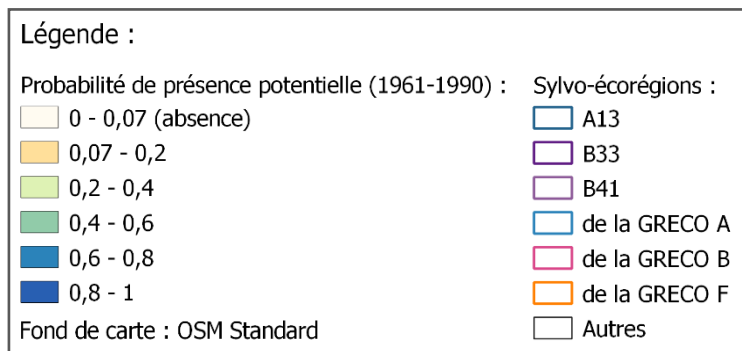
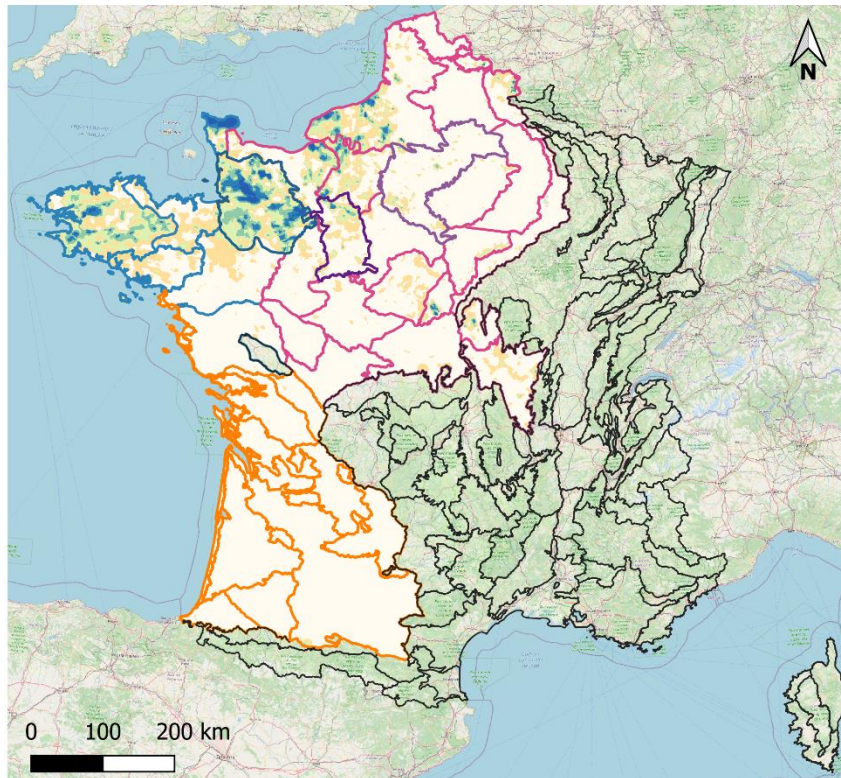


**(e)**

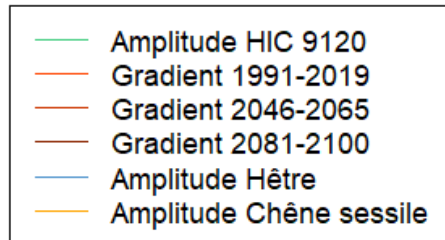




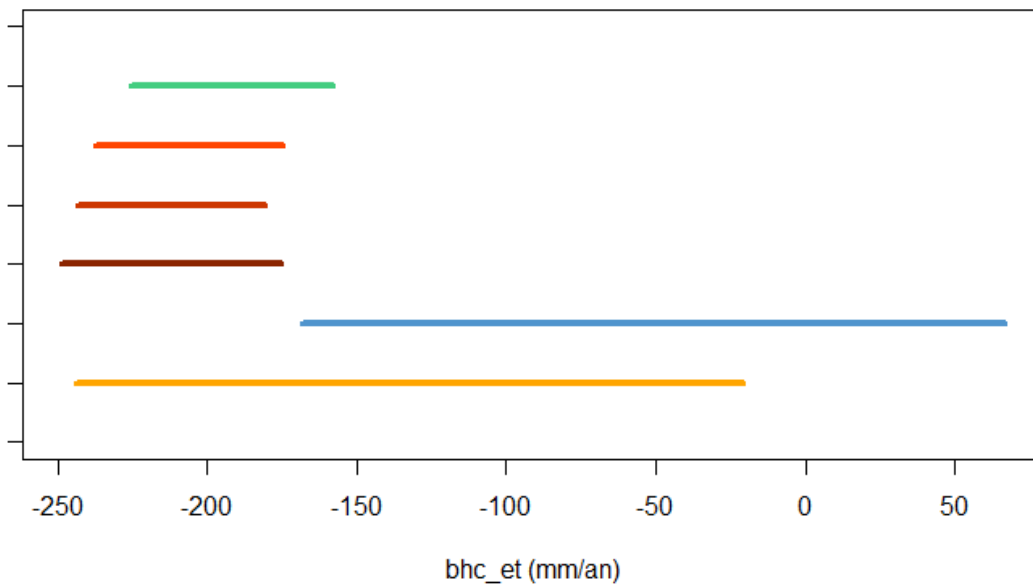
**Annexe IX : Niche potentielle de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120) en 1961-1990.** Les probabilités de présence potentielle sont issues d'une modélisation par régression logistique. Le seuil de probabilité en dessous duquel l'habitat peut être considéré comme absent est 0.07.



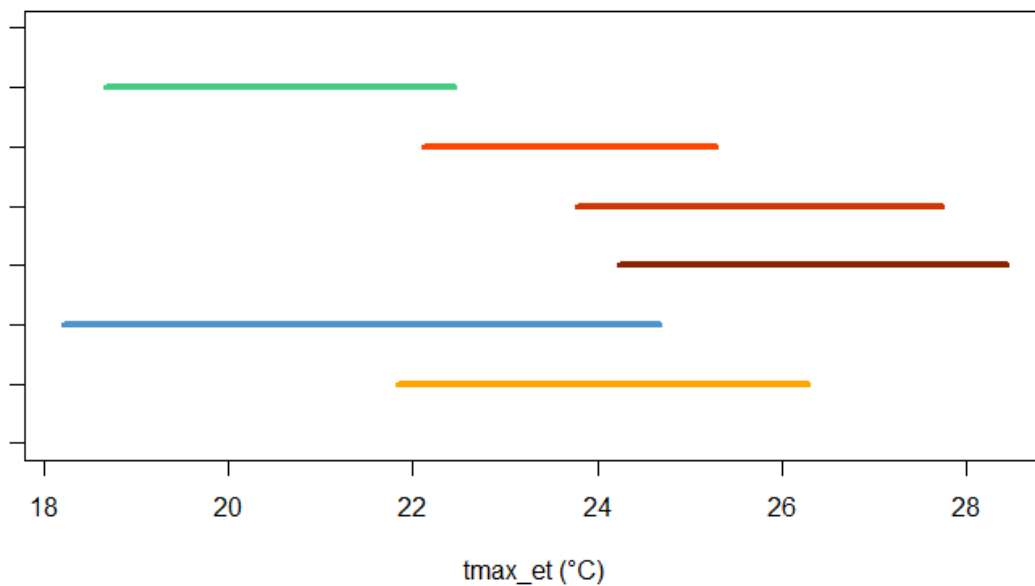
**Annexe X : Confrontation des amplitudes écologiques de l'HIC 9120 et des essences structurantes avec les gradients de bilan hydrique estival (a) et de température maximale estivale (b).** L'amplitude de l'HIC est déterminée pour les GRECO A, B et F durant la période 1961-1990 à partir des données d'occurrences potentielles de l'IGN (n=1415). Les amplitudes du Hêtre et du Chêne sessile ont été évaluées sur la France entière pour la période 1991-2019 à partir des données d'occurrences réelles de l'IGN (n=22842 et n=20307 respectivement). bhc\_et : bilan hydrique climatique estival ; tmax\_et : température maximale estivale.



(a)

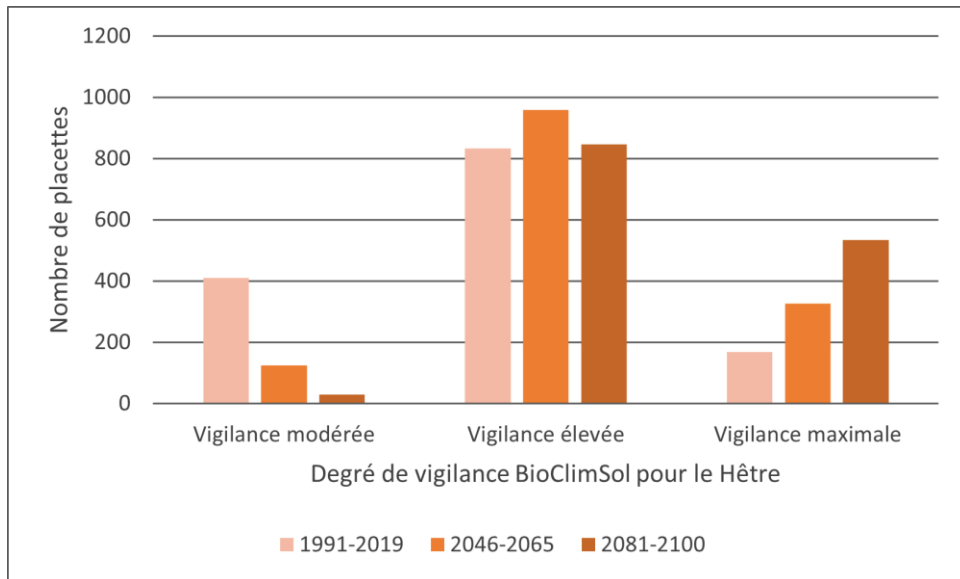


(b)

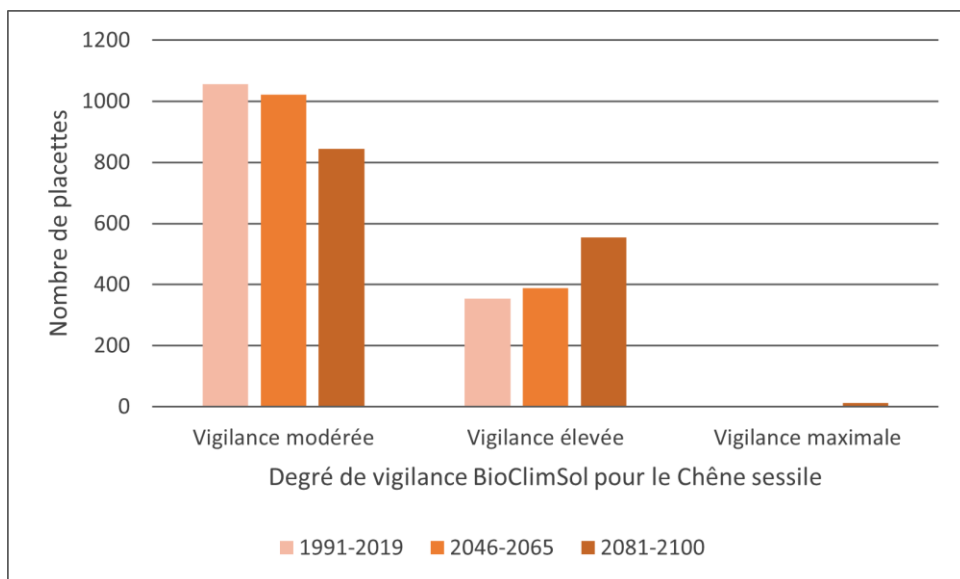


**Annexe XI : Effectifs des placettes potentielles de hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120) selon le niveau de vigilance BioClimSol.** Il s'agit de la vigilance associée au Hêtre (a) et au Chêne sessile (b) (n=1411). Pour une essence donnée, le niveau de vigilance est modéré en dessous de 25% de risque de dépérissement, élevé entre 30% et 60% de risque de dépérissement et maximal entre 75% et 85% de risque de dépérissement.

(a)

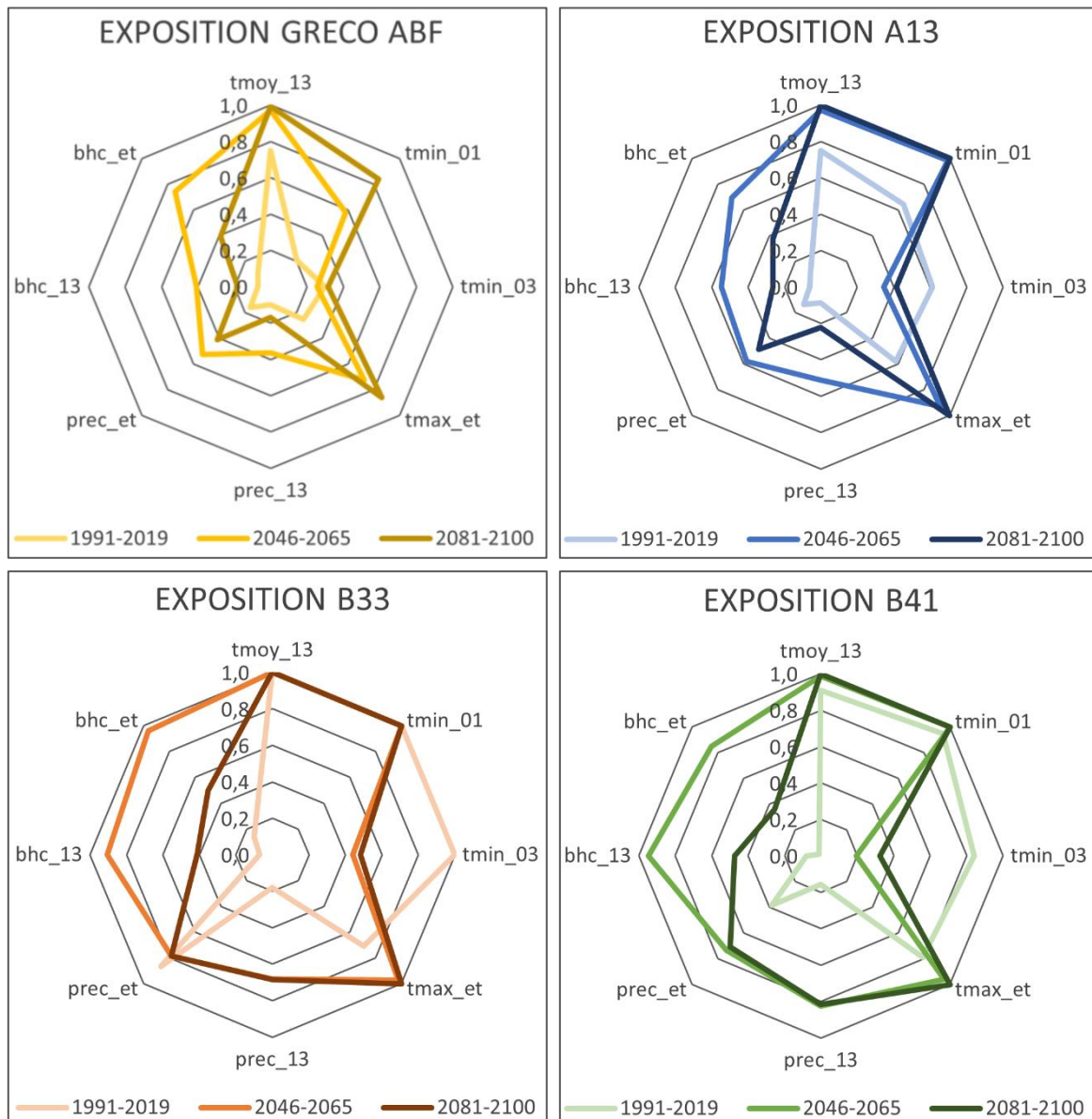


(b)



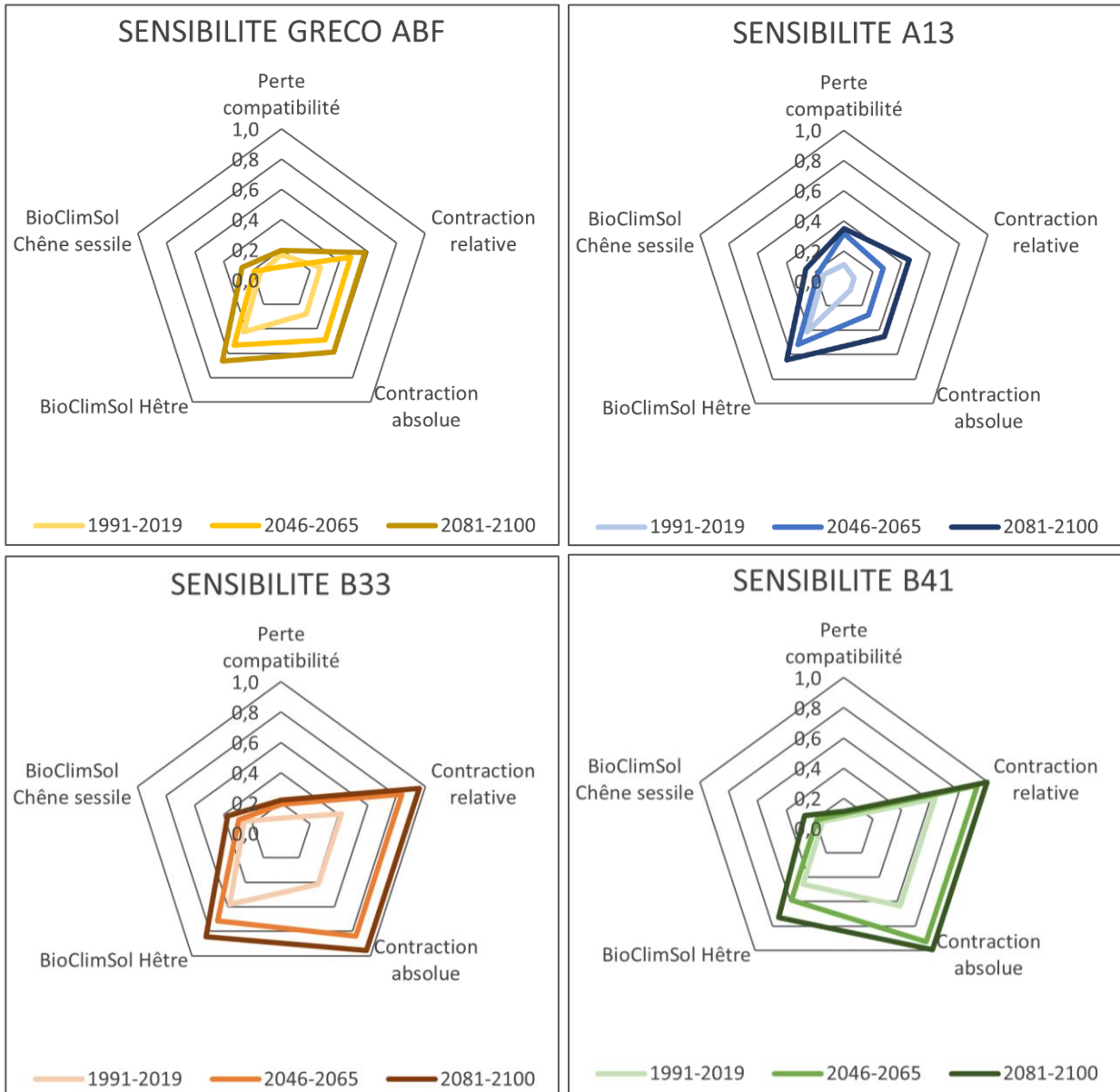
**Annexe XII : Scores obtenus par les composantes de la vulnérabilité climatique de la hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx (HIC 9120).** Scores pour : (a) l'exposition, (b) la sensibilité, (c) la capacité adaptative. GRECO ABF : Grandes régions écologiques A, B et F ; A13 : Bocage normand et Pays de Fougères ; B33 : Perche ; B41 : Bassin parisien tertiaire ; tmoy\_13 : température moyenne annuelle ; tmin\_01 : température minimale moyenne de janvier ; tmin\_03 : température minimale moyenne de mars ; tmax\_et : température maximale moyenne estivale ; prec\_13 : précipitations annuelles moyennes ; prec\_et : précipitations estivales moyennes ; bhc\_13 : bilan hydrique annuel moyen ; bhc\_et : bilan hydrique estival moyen ; bioclim. : bioclimatique.

(a)



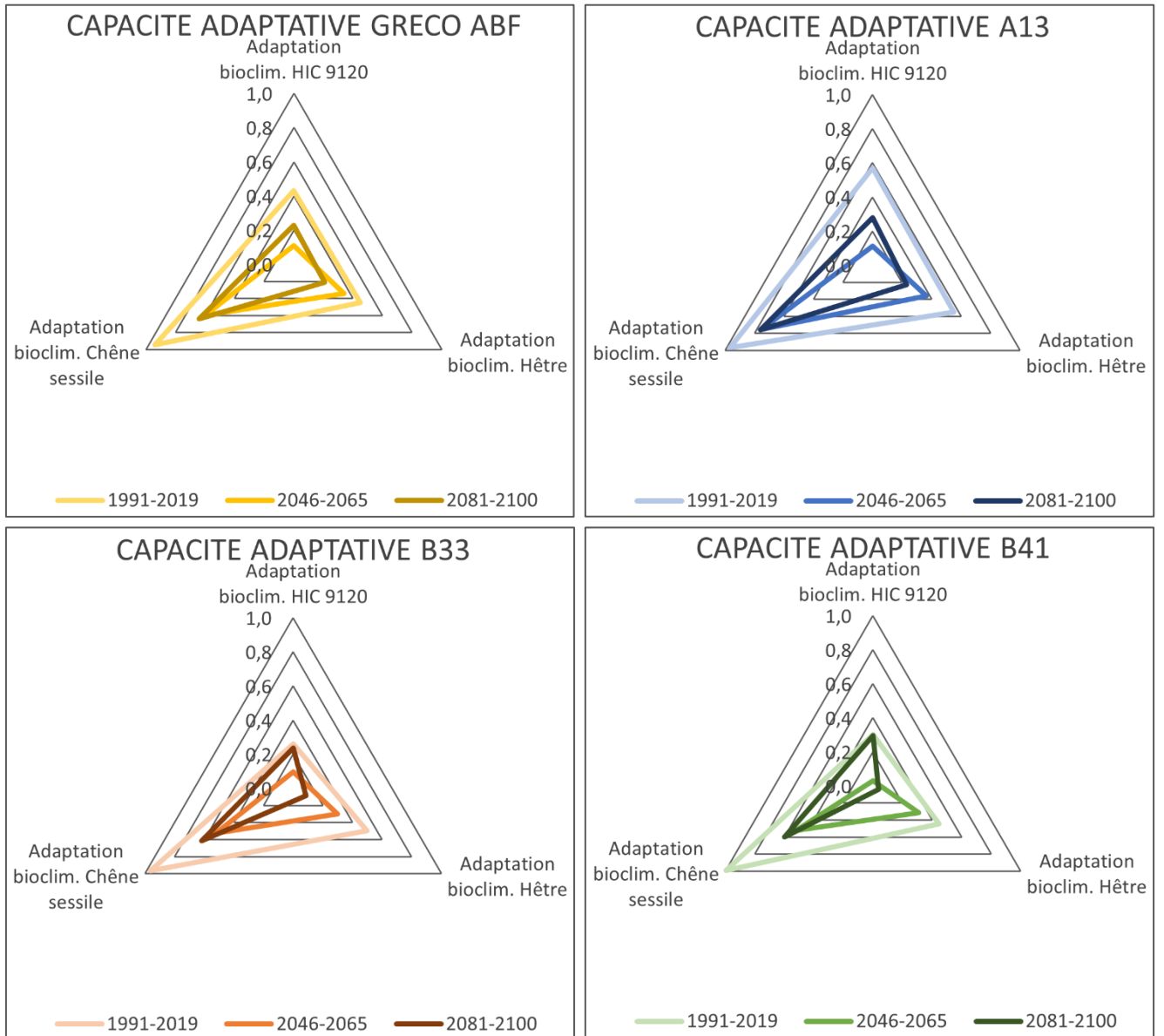
Annexe XII (suite)

(b)



**Annexe XII (suite)**

(c)





**Annexe XIII : Dépérissement observé sur les placettes de terrain et leur localisation dans la niche potentielle de l'HIC 9120.** L'état sanitaire a été relevé à l'aide du protocole DEPERIS sur 67 placettes réparties dans 15 sites Natura 2000. La correspondance entre les noms des placettes et des sites Natura 2000 est : « ORL », Forêt d'Orléans ; « FON », Massif de Fontainebleau ; « Paysfort », Massifs forestiers du Pays-Fort ; « Vibraye », Massif forestier de Vibraye ; « Sille », Forêt de Sillé ; « Rennes », Complexe forestier de Rennes-Liffré-Chevré ; « Poulancre », Vallée du Poulancre ; « Quenecan », Forêt de Quénécán ; « Paimpont », Forêt de Paimpont ; « Tronçais », Forêt de Tronçais ; « Halatte », Massif forestier d'Halatte ; « Bray », Massif forestier du Haut-Bray de l'Oise ; « Eawy », Forêt d'Eawy ; « Caumont », Boucles de la Seine aval ; « Touques », Haute vallée de la Touques ; « Belloy » et « Moutiers », Forêts du Haut Perche. Les placettes sont dites défavorables lorsqu'elle sont associées à une probabilité de présence potentielle de l'habitat inférieure à 0.07.

Placettes prospectées	Placettes défavorables 1961-1990	Placettes défavorables 1991-2019	Dépérissement observé Total	Dépérissement observé Hêtre	Dépérissement observé Chêne sessile
ORL_1		x	[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]
ORL_2		x	[ 20% ; 40% ]	-	[ 20% ; 40% ]
ORL_3		x	[ 0% ; 20% ]	-	[ 0% ; 20% ]
ORL_4		x	[ 20% ; 40% ]	-	[ 20% ; 40% ]
FON_2018		x	[ 40% ; 100% ]	-	[ 40% ; 100% ]
FON_2045		x	[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]
FON_2107		x	[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	-
FON_2114		x	[ 20% ; 40% ]	[ 20% ; 40% ]	[ 40% ; 100% ]
FON_2127	x	x	[ 0% ; 20% ]	-	[ 0% ; 20% ]
FON_2134		x	[ 20% ; 40% ]	-	[ 0% ; 20% ]
FON_2164			[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	-
FON_3014	x	x	[ 20% ; 40% ]	[ 40% ; 100% ]	-
FON_3050			[ 0% ; 20% ]	-	[ 0% ; 20% ]
FON_3060		x	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
FON_3075		x	[ 40% ; 100% ]	-	[ 40% ; 100% ]
FON_3076		x	[ 20% ; 40% ]	-	[ 20% ; 40% ]
FON_3081		x	[ 20% ; 40% ]	-	[ 20% ; 40% ]
FON_3090			[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	-
FON_3096		x	[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	-
FON_3097		x	[ 0% ; 20% ]	-	[ 0% ; 20% ]
FON_3118			[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	-
Paysfort_1			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 20% ; 40% ]
Paysfort_2			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Paysfort_3			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Paysfort_4			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Vibraye_1			[ 0% ; 20% ]	-	[ 0% ; 20% ]
Vibraye_2			[ 0% ; 20% ]	-	[ 0% ; 20% ]
Vibraye_3		x	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Sille_1			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Sille_2			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Sille_3			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Sille_4			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Rennes_1			[ 20% ; 40% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 20% ; 40% ]
Rennes_2			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Rennes_3			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]
Rennes_4			[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]	[ 0% ; 20% ]



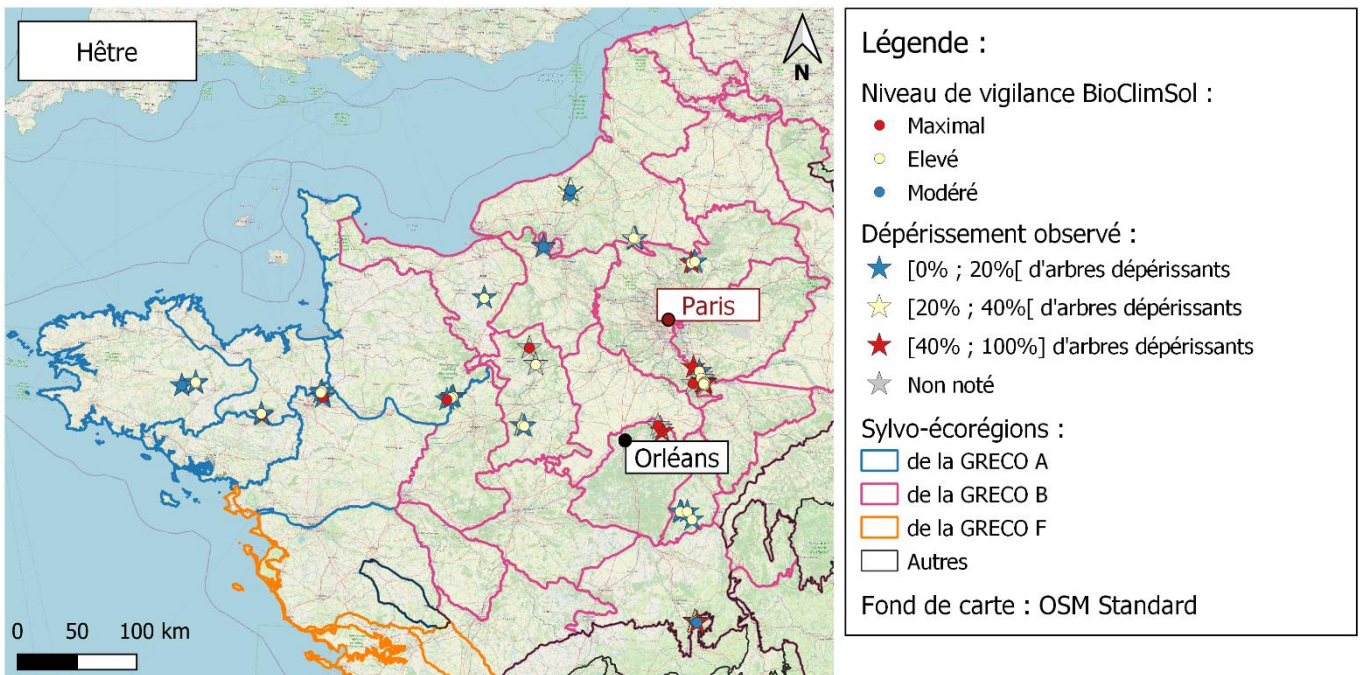
## Annexe XIII (suite)

Placettes prospectées	Placettes défavorables 1961-1990	Placettes défavorables 1991-2019	Dépérissement observé Total	Dépérissement observé Hêtre	Dépérissement observé Chêne sessile
Poulancre_1			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Poulancre_2			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 20% ; 40% [
Quenecan_1			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Quenecan_2			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Paimpont_1			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	-
Paimpont_2			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Paimpont_3			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Tronçais_1	x	x	[ 20% ; 40% [	[ 20% ; 40% [	[ 20% ; 40% [
Tronçais_2	x	x	[ 20% ; 40% [	[ 20% ; 40% [	[ 20% ; 40% [
Tronçais_3	x	x	[ 40% ; 100% ]	[ 20% ; 40% [	[ 40% ; 100% ]
Tronçais_4	x	x	[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	[ 0% ; 20% [
Halatte_1		x	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Halatte_2		x	[ 0% ; 20% [	-	[ 0% ; 20% [
Halatte_3	x	x	[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	[ 0% ; 20% [
Halatte_4		x	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	-
Bray_1			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Bray_2			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Bray_3			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Bray_4			[ 20% ; 40% [	-	[ 20% ; 40% [
Eawy_1			[ 20% ; 40% [	[ 20% ; 40% [	-
Eawy_2			[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	-
Eawy_3			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 40% ; 100% ]
Eawy_4			[ 20% ; 40% [	[ 20% ; 40% [	-
Caumont_1			[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]	[ 40% ; 100% ]
Caumont_2			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Touques_1			[ 0% ; 20% [	[ 20% ; 40% [	[ 0% ; 20% [
Touques_2			[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [	[ 0% ; 20% [
Belloy_1			[ 0% ; 20% [	-	[ 0% ; 20% [
Belloy_2			[ 20% ; 40% [	-	[ 20% ; 40% [
Moutiers_1			[ 0% ; 20% [	-	[ 0% ; 20% [
Moutiers_2			[ 0% ; 20% [	-	[ 0% ; 20% [

**Annexe XIV : Confrontation du dépérissement observé sur le terrain au dépérissement prédit par BioClimSol pour le Hêtre (a) et le Chêne sessile (b).** Pour une essence donnée, le niveau de vigilance est modéré en dessous de 25% de risque de dépérissement, élevé entre 30% et 60% de risque de dépérissement et maximal entre 75% et 85% de risque de dépérissement. NA : placettes présentant moins de 5 individus de l'essence cible dans l'étage dominant.

(a)

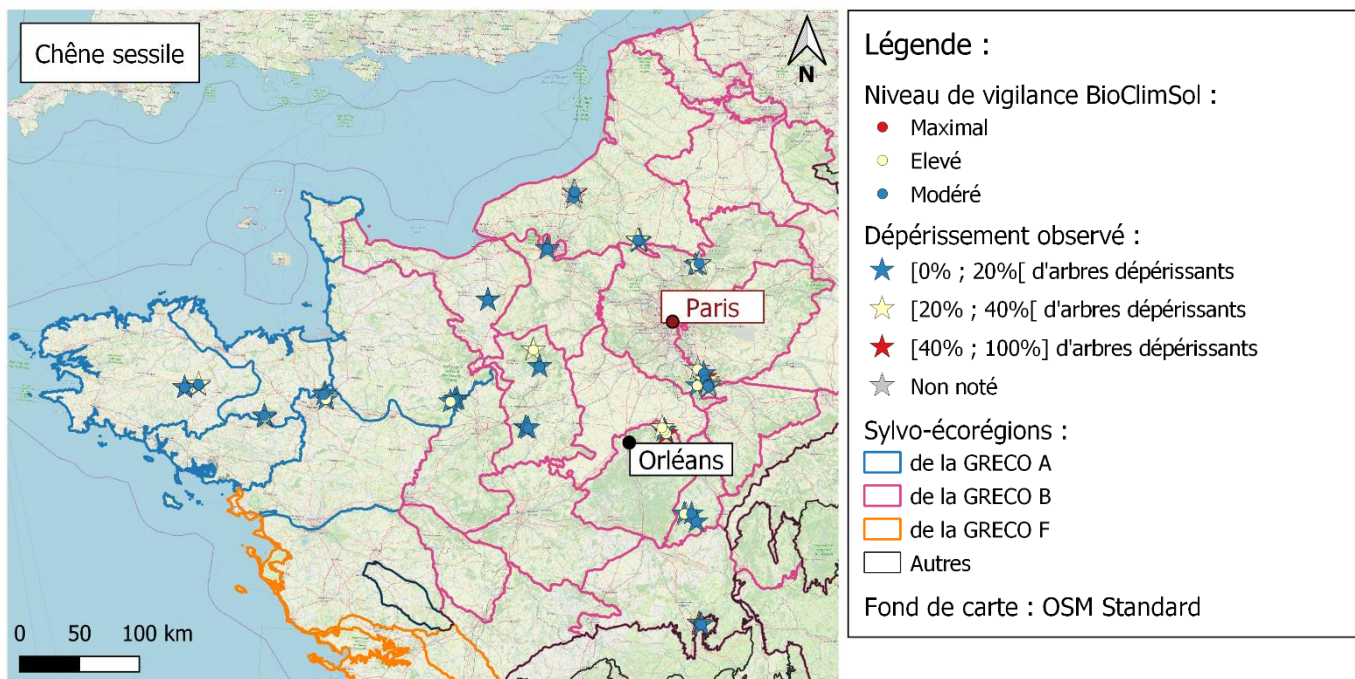
	placette dépérissante	placette non dépérissante	NA
Vigilance modérée	6	4	0
Vigilance élevée	11	21	13
Vigilance maximale	2	4	6



**Annexe XIV (suite)**

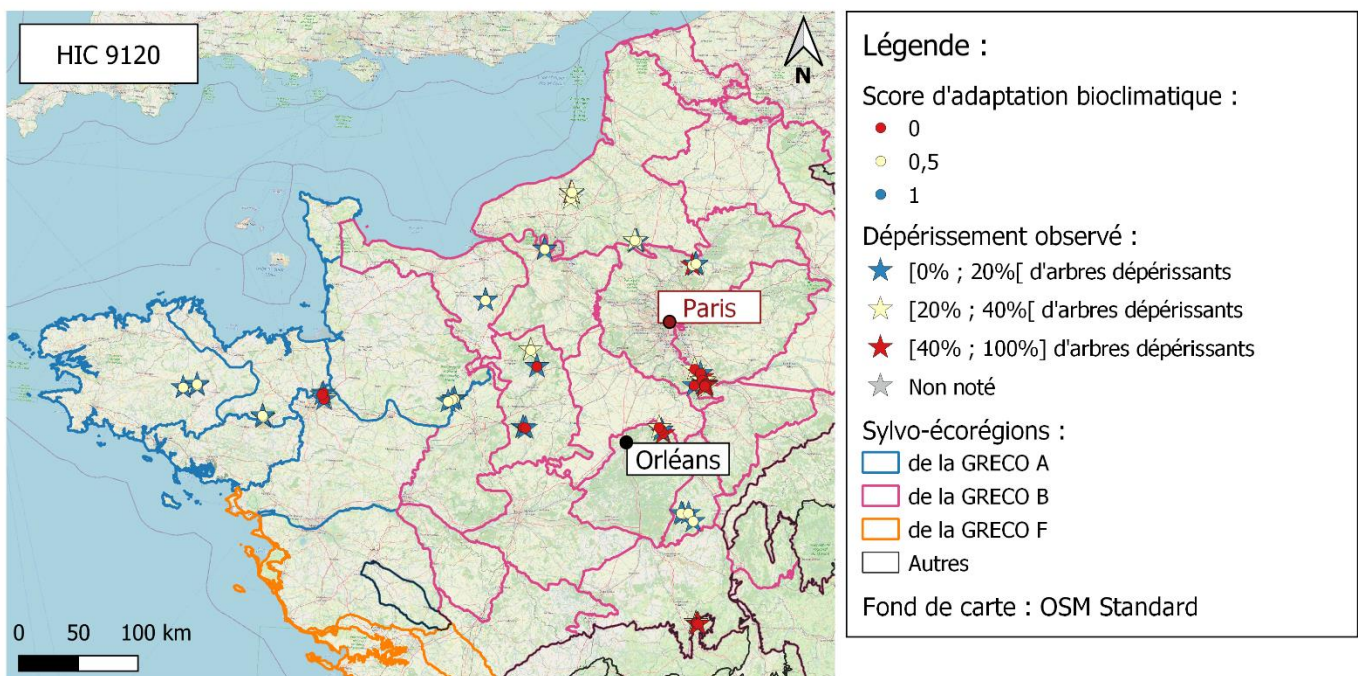
**(b)**

	placette dépérissante	placette non dépérissante	NA
Vigilance modérée	13	29	10
Vigilance élevée	6	8	1
Vigilance maximale	0	0	0



**Annexe XV : Confrontation du dépérissement observé sur le terrain à l'adaptation bioclimatique prédite pour l'habitat (a), le Chêne sessile (b) et le Hêtre (c). Un score d'adaptation bioclimatique égal à 1 signifie que les amplitudes de l'habitat ou l'essence pour le bilan hydrique estival et la température maximale estivale coïncident avec les conditions rencontrées au niveau des placettes sur la période 1991-2019. Un score de 0.5 signifie que l'habitat ou l'essence n'est adapté qu'à une seule des deux variables. Un score de 0 est obtenu si aucune variable ne coïncide avec les amplitudes écologiques de référence. NA : placettes présentant moins de 5 arbres de l'essence cible dans l'étage dominant.**

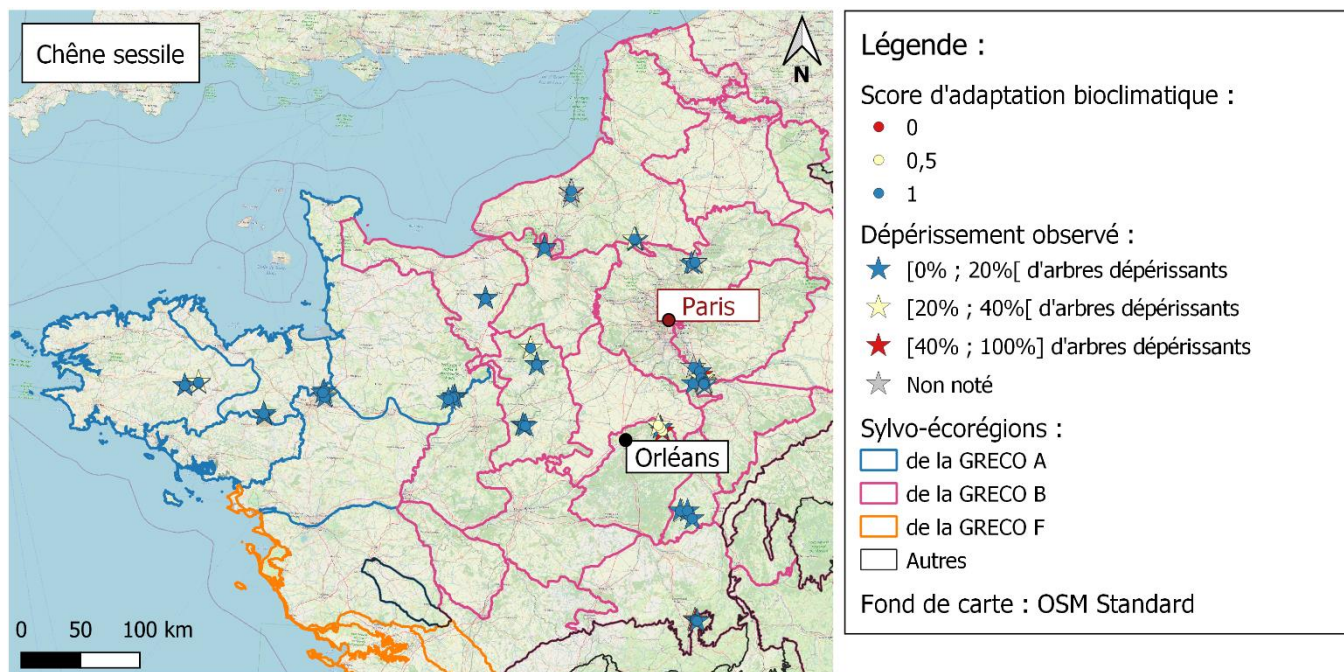
(a)



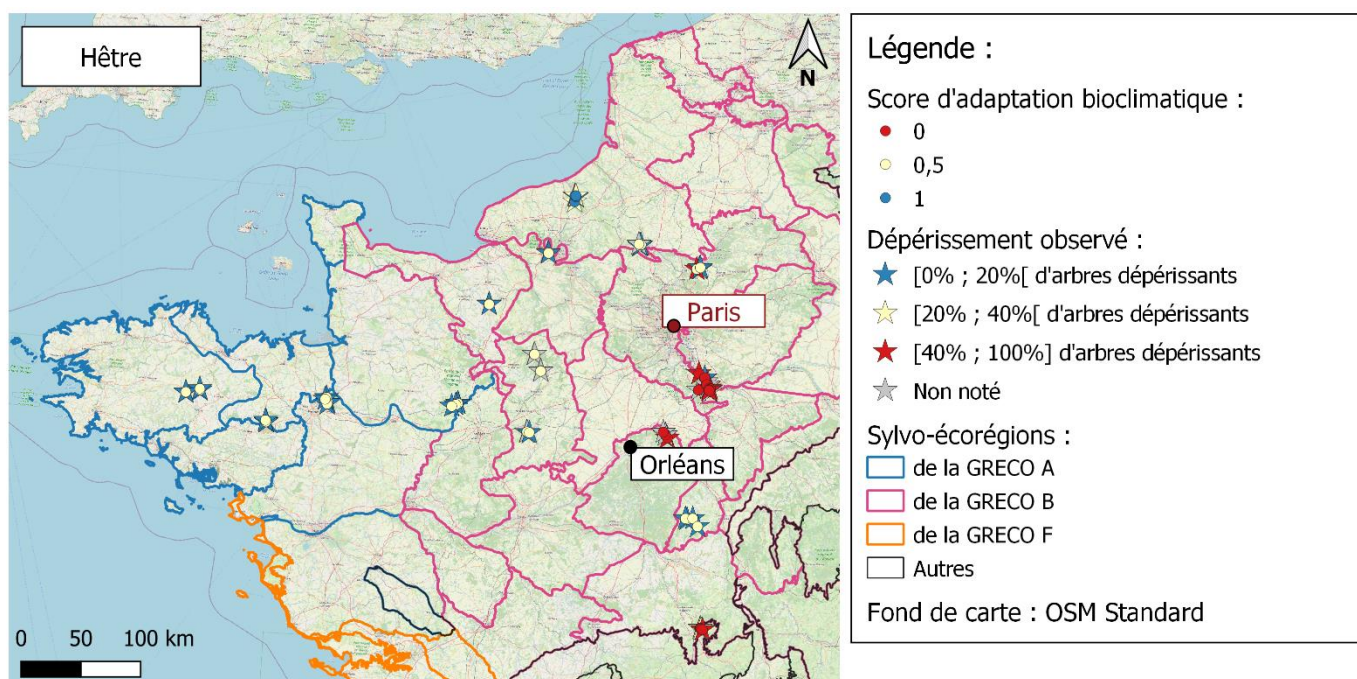


**Annexe XV (suite)**

	placettes dépérissantes	placettes non dépérissantes	NA
<b>(b)</b> Mésadaptation	0	0	0
Adaptation partielle	4	1	0
Adaptation totale	15	36	11



	placettes dépérissantes	placettes non dépérissantes	NA
<b>(c)</b> Mésadaptation	13	1	11
Adaptation partielle	3	27	8
Adaptation totale	3	1	0



**Annexe XVI : Significativité des tests statistiques des variables expliquant l'état sanitaire observé sur le terrain.** (a) niche potentielle, (b) adaptation bioclimatique de l'HIC 9120, (c) adaptation bioclimatique du Hêtre, (d) adaptation bioclimatique du Chêne sessile. Les *p-values* sont encadrées en rouge.

(a)

	placettes non déperissantes	placettes déperissantes
placettes favorables (1991-2019)	31	10
placettes défavorables (1991-2019)	8	18

```
Pearson's Chi-squared test with Yates' continuity correction
data: tab4
X-squared = 11.372, df = 1, p-value = 0.0007456
```

(b)

```
Analysis of Deviance Table

Model: binomial, link: logit
Response: varex

Terms added sequentially (first to last)

      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev Pr(>Chi)
NULL                66    91.068
v4      1   11.728     65    79.340 0.0006157 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

(c)

```
Analysis of Deviance Table

Model: binomial, link: logit
Response: varex

Terms added sequentially (first to last)

      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev Pr(>Chi)
NULL                47    64.443
v5      2   33.235     45    31.209 6.069e-08 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

(d)

```
Analysis of Deviance Table

Model: binomial, link: logit
Response: varex

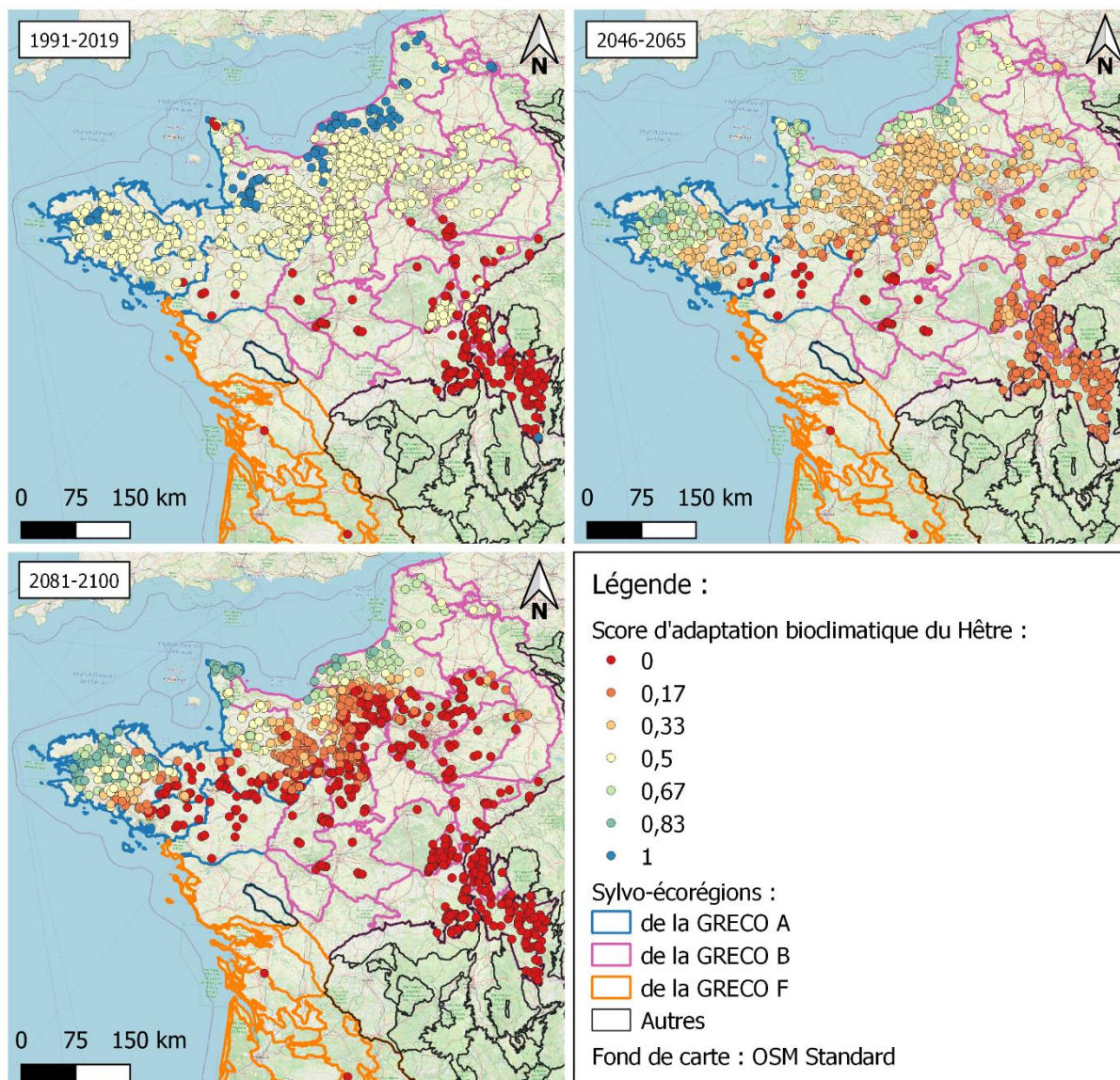
Terms added sequentially (first to last)

      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev Pr(>Chi)
NULL                55    71.743
v6      1   4.9474     54    66.795 0.02613 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```



**Annexe XVII : Evolution des scores d'adaptation bioclimatique du Hêtre (a) et du Chêne sessile (b) au niveau des placettes de hêtraie-chênaie atlantique acidiphile à Houx potentielle (HIC 9120) (n=1415). Les valeurs prises ne peuvent qu'être 0, 0.5 et 1 en 1991-2019. Pour les périodes futures, les 3 GCM sont moyennés, ce qui fait apparaître des valeurs intermédiaires.**

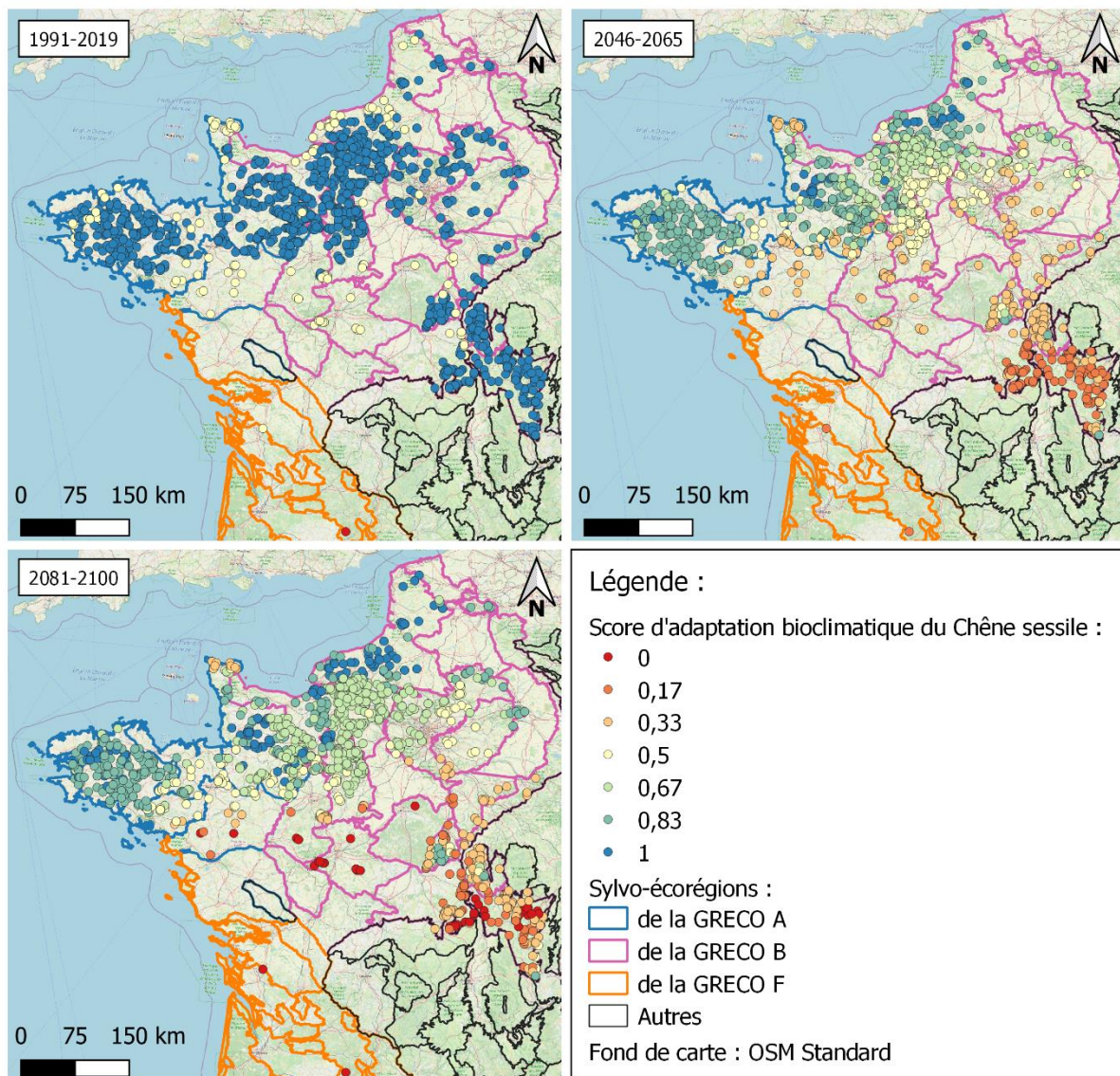
(a)






Annexe XVII (suite)

(b)





 agriculture • alimentation • environnement	Diplôme : Ingénieur Agronome Spécialité : Génie de l'Environnement Spécialisation / option : Préservation et Aménagement des Milieux – Ecologie Quantitative Enseignant référent : Ivan BERNEZ
Auteur(s) : Ceridwen Dupont-Doaré  Date de naissance* : 25/09/1998	Organisme d'accueil : Institut pour le développement forestier – Centre national de la propriété forestière
Nb pages : 36                      Annexe(s) : 17	Adresse :
Année de soutenance : 2020-2021	13 avenue des Droits de l'Homme 45921 Orléans Cedex 9  Maître de stage : Thomas BRUSTEN
Titre français : Evaluer la vulnérabilité des habitats forestiers face au changement climatique – Le cas de la hêtraie-chênaie collinéenne atlantique acidiphile à houx (HIC 9120)  Titre anglais : Assessing the vulnerability of forest habitats to climate change – A case study of Atlantic acidophilous beech forests with Ilex	
Résumé (1600 caractères maximum) :  <p>Depuis quelques années, les effets du changement climatique se font sentir sur les écosystèmes forestiers tempérés. Face au besoin urgent d'adaptation que ces changements imposent aux forêts, il est impératif d'appréhender la vulnérabilité climatique des habitats forestiers afin de mieux les accompagner dans les bouleversements en cours. Cette étude propose une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des habitats forestiers face au changement climatique adoptant une approche par indices. Cette méthode est ensuite testée sur l'habitat d'intérêt communautaire 9120 : la hêtraie-chênaie collinéenne atlantique acidiphile à houx. Les résultats indiquent que l'HIC 9120 est vulnérable, avec notamment une enveloppe climatique en réduction, et que cette vulnérabilité augmenterait au cours du temps. La confrontation de ces résultats à la réalité de terrain a mis en évidence l'importance des pratiques de gestion dans l'état sanitaire observé, ainsi que l'obsolescence du dispositif Natura 2000 quant à la préservation de cet habitat. Enfin, les indices construits ont révélé des failles qui seront comblées dans la suite du projet. La méthodologie est donc en cours d'approfondissement et proposera, à terme, des préconisations de gestion fondées sur la sylviculture adaptative.</p>	
Abstract (1600 caractères maximum) :  <p>For some years, the effects of climate change over temperate forest ecosystems are being exerted. To meet the urgent need of adaptation imposed upon forests, it is imperative to grasp the climatic vulnerability of forest habitats in order to better support them in current upheavals. This study puts forward a methodology to evaluate forest habitats vulnerability to climate change by taking an index approach. This method is then tested on the habitat of community interest 9120: the Atlantic acidophilous beech forest with Ilex. Results indicate that beech forests are vulnerable, with a reducing climatic envelope, and that the vulnerability could increase over time. The confrontation of the results to field reality brought to light the importance of management practices in the observed sanitary condition, as well as the obsolescence of the Natura 2000 device regarding acidophilous beech forests preservation. Finally, the indexes built revealed some flaws that will be addressed during the continuation of the project. Therefore, the methodology is under development and will suggest, with time, management recommendations based on adaptive silviculture.</p>	
Mots-clés : hêtraie-chênaie acidiphile, vulnérabilité, indices, Natura 2000, sylviculture adaptative Key Words: acidophilous beech forest, vulnerability, index, Natura 2000, adaptive silviculture	

\* Elément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires