

## **Forêt, Nature et Société**

# Enjeux et stratégies de substitution du hêtre en plaine

Approche des enjeux, de la vulnérabilité en fonction des contextes et contribution à la mise au point d'une méthode pour raisonner les stratégies de substitution d'essences pour l'adaptation face au changement climatique



*Mémoire de mission professionnelle*

Photographie de couverture : Hêtre mal feuillé au printemps 2006 dans la Vège. Louis-Michel Nageleisen, Département de la santé des forêts.

## **Enjeux et stratégies de substitution du hêtre en plaine**

Approche des enjeux, de la vulnérabilité et des choix d'essences possibles en fonction des contextes et contribution à la mise au point d'une méthode pour raisonner les stratégies de substitution d'essences pour l'adaptation face au changement climatique



FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN MEMOIRE DE FIN D'ETUDES  
DE LA FORMATION « FORET, NATURE ET SOCIETE »

TITRE : Enjeux et stratégies de substitution du hêtre en plaine	MOTS CLES : HETRE, CHANGEMENT CLIMATIQUE, ENJEUX SYLVICOLES, VULNERABILITE, RISQUE, MODELES D'IMPACTS
AUTEUR : Pauline PECQUET	PROMOTION FNS : 2010/2011
CARACTERISTIQUES : 1 volume ; 77 pages ; 31 figures dont 14 cartes; 8 annexes ; bibliographie.	
CADRE DU TRAVAIL : MEMOIRE DE FIN D'ETUDES	
ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Office National des Forêts NOM DU RESPONSABLE : MYRIAM LEGAY FONCTION : CHEF DU POLE RECHERCHE & DEVELOPPEMENT ONF DE NANCY	
NOM DU CORRESPONDANT ENGREF : FRANCOIS LEBOURGEOIS	
SUITE À DONNER (réservé au service des études)	
<input checked="" type="checkbox"/> Consultable et diffusable <input type="checkbox"/> Confidentiel de façon permanente <input type="checkbox"/> Confidentiel jusqu'au _____ , puis diffusable	

## Résumé

Le changement climatique annoncé va avoir de forts impacts sur les forêts de France. L'étude propose d'évaluer, à l'échelle de régions écologiques, la vulnérabilité du hêtre en prenant en considération les enjeux sylvicoles potentiellement menacés par la modification de son aire de distribution et par les perturbations phénologiques attendues. Par l'étude et la comparaison de modèles d'impact, l'essence apparaît très menacée et le risque, mesuré par la combinaison de la vulnérabilité et des enjeux, est majeur dans Nord-Est de la France et le long du littoral nord-atlantique. L'incertitude qui peut exister est quantifiée par l'analyse des divergences entre modèles. Des perspectives pour l'adaptation et une meilleure quantification du risque sont proposées

## Abstract

The announced climate change is going to have strong impacts on our forests. The study suggests estimating, on the scale of ecological regions, the vulnerability of the beech by considering the silvicultural stakes potentially threatened by the modification of its area of distribution and by the expected phenologic disturbances. By the study and the comparison of models of impact, the species seem strongly threatened and the risk, measured by the combination of the vulnerability and the stakes, is major in Northeast of France and along the coast of the North-Atlantic Ocean. The uncertainty which can exist is quantified by the analysis of the differences between models. Perspectives for the adaptation and better quantification of the risk are proposed.

# Remerciements

Durant ce stage, j'ai pu travailler et rencontrer des gens de la recherche, de la gestion ou autres, qui m'ont aidée par leurs connaissances, leur vision du sujet et par leurs personnalités à avancer. Je tiens ici à les remercier :

- Myriam Legay, mon encadrante de stage, tout d'abord pour m'avoir permis d'intégrer son équipe et d'avoir un aperçu du monde de la recherche, mais surtout par la liberté qu'elle m'a laissée durant ces six mois tout en étant très présente et d'un grand soutien dans la réalisation de ce travail. Son esprit de synthèse, qui n'est pas une de mes premières qualités, m'a permis de cadrer au mieux le sujet et j'ai surtout beaucoup appris pour la suite.

- Mon jury François Lebourgeois pour le penchant autécologique, Christophe Voreux pour le soutien et la bienveillance dont il a fait preuve au-delà du stage durant tout le mastère, Sylvain Gaudin pour sa vision du sujet en tant qu'« homme de terrain » mais aussi pour montrer, par son travail, que la gestion et la recherche peuvent être facilement reliées.

- Les chercheurs que j'ai pu rencontrer et qui m'ont permis d'utiliser leurs données pour ce travail : Vincent Badeau (pour son aide et sa vision des choses), Hervé Le Boulter (on apprécie forcément quelqu'un qui cite Audiard la première fois qu'on le rencontre), Christophe François, Alissar Cheaib et Christian Piedallu. Ainsi que Vincent Perez pour sa bonne humeur et son aide lorsque je venais travailler au LERFoB...

- Toutes les personnes du pôle de Velaine-en-Haye : Jean-Pierre Renaud et Alexandre Piboule pour tout le volet programmation et pour m'avoir évitée d'R-rer trop longtemps... et pour leur humour (!) également, Pascal George pour toutes les discussions, pour sa bonne humeur et pour les truffes ! Et tous les autres travaillant au pôle qui créent ensemble une ambiance de travail plus qu'agréable ainsi que tous les stagiaires qui sont passés là pour leur soutien dans cette dure épreuve !!

- Les compagnons d'aventures « mastériens », qu'elles soient forestières, nancéiennes, guyanaises ou même culinaires !

- Et enfin ma famille pour avoir accepté cette année d'étude supplémentaire et mes amis d'ici ou d'ailleurs...



# Avertissement

Dans cette étude, nous considérerons seulement les zones de plaines que nous avons identifiées comme les régions situées à une altitude inférieure à 400 mètres, valeur ne correspondant pas à une définition arrêtée. Le choix de ne traiter que les sylvoécotégions de basse altitude réside dans le fait que les impacts du changement climatique en montagne restent à ce jour difficiles à évaluer car les variations probables n'y sont pas correctement quantifiables à cause de la difficulté engendrée notamment par les étagements et les oppositions de versants. De plus, les sylvoécotégions de montagne contiennent à la fois des zones de recul potentiel du hêtre et des zones d'extension potentielle. Le résultat global sur l'ensemble de la zone est donc difficile à interpréter.

Dans les cartes présentées, les zones de montagnes seront grisées.

La présente étude se place en premier lieu du point de vue du gestionnaire forestier et ne se veut en aucun cas une remise en cause scientifique. Ce travail a bien pour objectif de se saisir des différentes méthodes de construction de modèles d'impact et de voir à quel point ceux-ci se rejoignent. Le but est de construire une vision synthétique de l'état actuel des connaissances.

Les mots imprimés en gras sont expliqués au glossaire ; p.65.

# Table des matières

Résumé.....	6
Abstract .....	6
Remerciements .....	7
Avertissement.....	9
Table des matières.....	10
Index des sigles .....	12
Avant-propos .....	13
Introduction .....	14
Partie I – Contexte et objet de l'étude : le hêtre en France aujourd'hui et demain .....	16
A. Distribution actuelle et passée.....	16
B. Description et autécologie du hêtre .....	19
C. Place du hêtre dans le paysage forestier français .....	22
D. Les changements climatiques attendus et l'impact sur les essences forestières .....	23
E. Impacts du changement climatique attendus sur les essences forestières .....	27
Partie II : Matériels et méthodes.....	31
A. Échelle d'étude : les sylvoécorégions (SER) .....	31
B. Les analyses à partir des données IFN .....	32
C. Les modèles utilisés dans l'étude .....	33
D. Production d'indices d'enjeux, de vulnérabilité et de risque.....	41
Partie III : Résultats.....	43
A. Analyse des enjeux sylvicoles des SER .....	43
B. Analyse comparée des simulations des 4 modèles .....	44
C. Analyse du RISQUE global pour le hêtre .....	51
Partie IV : Perspectives et discussion.....	52
A. Solutions possibles d'adaptation .....	53
B. Perspective 1 : vers une stratégie de substitution. Objectifs du projet Nomade.....	55
C. Perspective 2 : Travail sur les comparaisons de méthodes de modélisation .....	56
D. Discussion et limites de l'étude.....	57
Conclusion.....	59
Bibliographie.....	60
Liste des contacts.....	64
Glossaire.....	65
Table des annexes.....	66
Annexe 1 : Fiche modèle Place du hêtre dans les régions.....	67

Annexe 2 : Place du hêtre dans les régions françaises .....	68
Annexe 3 : Modèle de niche du LERFoB .....	69
Annexe 4 : Modèle de niche de l'INRA.....	71
Annexe 5 : Modèle de niche IKS .....	72
Annexe 6 : Modèle de processus CASTANEA.....	73
Annexe 7 : Tableau récapitulatif des enjeux sylvicoles par SER de plaines .....	74
Annexe 8 : Carte de l'indice de vulnérabilité à partir de la moyenne des modèles de niche .....	78

# Index des sigles

- ACP** : analyse en composante principale
- AFORCE** : réseau mixte technologique consacré à l'adaptation des forêts au changement climatique
- NOMADE** : NOUvelles Méthodes d'Acclimatation Des Essences forestières
- BP** : *Before Present*, c'est-à-dire avant 1950
- CNBF** : Conservatoire national de la biodiversité forestière
- CRGF** : commission ressources génétiques forestières
- DRA** : directive régionale d'aménagement
- DSF** : département de la santé des forêts
- ENGREF** : Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts
- ETP** : évapo-transpiration potentielle
- EUFORGEN** : *European Forest Genetics Resources Programme*
- FFN** : fonds forestier national
- GBIF** : *Global Biodiversity Information Facility*
- GES** : gaz à effet de serre
- GIEC** : groupe intergouvernemental d'experts sur le climat
- GRECO** : grandes régions écologiques
- IDF** : Institut pour le développement forestier
- IFN** : Institut forestier national
- INRA** : Institut national de la recherche agronomique
- LERFoB** : laboratoire d'études des ressources forêt - bois
- ONF** : Office national des forêts
- PEFPF** : pôle d'exploitation de la forêt privée française
- PLANTACOMP** : plantations comparatives (réseau d'expérimentation INRA)
- PPB** : production primaire brute
- RTM** : restauration des terrains en montagne
- RUM** : réserve utile maximale
- SER** : sylvoécorégions
- SIG** : système d'information géographique
- SRES** : *Special Reports on Emission Scenarios*

## Avant-propos

Le monde a tendance à attendre d'être dans une situation inéluctable pour se dire qu'il faut agir, ou qu'il aurait fallu agir avant d'en arriver là. Le changement climatique fait partie de ces sujets constamment remis en cause ou du moins face auxquels beaucoup de scepticisme se fait ressentir. Il est certes difficile d'imaginer des solutions pour un problème qui n'est pas « visible ». Dans nos forêts, plus qu'une tendance progressive, ce sont les événements extrêmes qui marquent, surtout par leur violence et par le fait que leur fréquence s'est accrue ces dernières années. La pensée forestière s'adapte progressivement et le danger qui menace les écosystèmes forestiers s'est inséré dans les esprits. Il faut maintenant que cette pensée perdure mais aussi qu'elle évolue or grâce aux connaissances qui augmentent et qui ne cessent de s'étoffer. La diffusion de celles-ci est un point crucial pour adapter les forêts à leur environnement futur.

Je citerai au préalable deux personnalités qui résument parfaitement la situation actuelle qui voit s'opposer deux mondes de pensées quant au changement climatique, sachant qu'il est facile de savoir dans quel camp je me situe.

Francis Blanche tout d'abord, magnifique tonton flingueur qui dit : « Face au monde qui bouge, il vaut mieux penser le changement que changer le pansement ».

Puis, avec un caractère plus poétique, un américain du nom de James Baldwin : « Ceux qui pensent qu'il est impossible d'agir sont généralement interrompus par ceux qui agissent ».

# Introduction

Aujourd'hui, le changement climatique est difficilement réfutable et les conséquences qu'il induit au niveau des écosystèmes, forestiers ou non, dans le futur sont considérées sérieusement, particulièrement du point de vue de la gestion et de l'adaptation. Le groupe intergouvernemental d'experts sur le climat précise bien dans son quatrième rapport que, dans les écosystèmes terrestres, le caractère hâtif des phénomènes printaniers et la migration d'espèces animales et végétales vers les pôles et vers les hauteurs sont associés au réchauffement récent avec un degré de confiance très élevé (Pachauri & Reisinger, 2007). Cette problématique reste encore une grande inconnue pour les gestionnaires forestiers même si la communication sur le sujet se développe de plus en plus depuis quelques années, notamment depuis l'émotion qu'avait suscitée la diffusion, dans des revues forestières, des cartes du projet **CARBOFOR** en 2004. Ces cartes montraient l'évolution potentielle des aires de distribution d'essences sociales françaises dans le futur sous l'impact d'un réchauffement global. Des projets de recherche tels que celui-ci ou le projet **CLIMATOR** mettent en évidence les conséquences du changement climatique sur les essences et aident à se doter d'outils meilleurs pour l'adaptation dont nous allons devoir faire preuve.

Le besoin d'adaptation pour une meilleure gestion, pour parer aux modifications futures des forêts, s'est fait de plus en plus ressentir et il est devenu indispensable de prévoir dès aujourd'hui les changements possibles au niveau des peuplements et de pouvoir imaginer le visage de la forêt de demain pour se préparer aux difficultés à venir. Le changement climatique doit être pris en compte à toutes échelles que ce soit en amont dans les décisions globales pour les forêts, comme l'orientation que va devoir prendre la production en fonction des besoins, ou que ce soit en aval, au sein des massifs avec l'adaptation des catalogues de stations inadaptés à ce jour à la situation future car ne prenant pas en compte le réchauffement global (Riou-Nivert, 2008). Parallèlement aux lacunes observées actuellement dans les outils de gestion, il s'avère que les connaissances sur l'**autécologie** des essences sont encore relativement faibles et celles qui existent sont parfois discutées. L'étude de toutes les espèces prend du temps mais il devient difficile de mettre cet argument en avant pour ne pas agir dès à présent.

L'étude qui va suivre porte sur le hêtre, grande essence sociale française, les enjeux sylvicoles qu'il représente à l'échelle française, et sur les stratégies de substitution possibles dans le cadre d'une adaptation de la gestion forestière aux bouleversements climatiques attendus. L'avantage de cette essence est qu'au vu de son importance dans la production française, mais également par sa place dans le paysage français, elle a été particulièrement étudiée, son autécologie est donc à ce jour une des plus documentées. Il représente en effet 20 % de la surface des forêts de production (Sardin, Pilard-Landeau, & Michon, 2007). Il est difficile de prévoir la façon dont le marché du bois va évoluer et quelle place l'essence va prendre au sein de celui-ci mais les enjeux qui en découlent pour une instance telle que l'ONF font que la question de sa sensibilité au changement climatique va devenir centrale ces prochaines années.

Dupouey en 1992, à propos des écosystèmes forestiers, précisait bien que l'amplitude attendue des déplacements d'aire de distribution des espèces allait se trouver dans une échelle allant de quelques centaines à plusieurs milliers de kilomètres (selon les espèces et les modèles pris en considération) (Dupouey, 1992). Le déplacement de ces aires provoquerait alors des dépérissements dans les limites sud actuelles de l'aire ou à la base des étages de végétation dans les zones d'altitude. Des modèles d'impact ont été créés au fil du temps pour rendre compte de ce phénomène en considérant le climat futur potentiel et le hêtre s'est avéré être une essence particulièrement vulnérable.

Les scientifiques ont donc commencé à penser à des outils nouveaux, pour permettre aux gestionnaires de s'adapter, et aux choix d'essences possibles surtout, face aux modifications prévues du couvert forestier dans des scénarios d'évolution du climat qui prédisent un profond bouleversement dans le paysage forestier français. L'impact du réchauffement devrait effectivement être important sur les forêts en France, constituées de peuplements peu artificialisés, dont la production se capitalise au fil du temps et dont le renouvellement se réalise à l'échelle du siècle (Roman-Amat, 2007).

Des essences telles que le hêtre vont voir leur aire de distribution évoluer progressivement dans l'avenir, se décalant notamment vers de plus hautes latitudes sous l'effet premier de l'accroissement des températures. Alors même s'il est vrai qu'à l'heure actuelle, nous ne savons pas à quelle ampleur les changements climatiques vont affecter les écosystèmes forestiers, ni même l'adéquation et la fiabilité des mesures d'adaptations préconisées (Lebourgeois & Mérian, 2011), il est important d'agir à court terme.

Dans ce travail, nous étudierons, dans une première partie, la façon dont le hêtre a évolué au cours du temps notamment au cours du Quaternaire, puis après avoir décrit l'essence et fait le point sur son autécologie, nous observerons la place qu'il occupe actuellement dans le paysage forestier français étant une des premières essences forestières du pays. Étant dans une période où nous commençons à cerner l'ampleur réelle du réchauffement global, nous verrons quels sont les changements climatiques attendus puis l'impact que peuvent avoir ces derniers sur les niches écologiques et particulièrement sur les espèces ligneuses.

Puis, nous développerons les outils utilisés dans l'analyse et la quantification des enjeux ainsi que pour la création des indices de vulnérabilité, de risque et d'incertitude, cela à l'échelle des sylvoécotopes (SER) qui seront définies au début de cette deuxième partie.

Les résultats présentés dans la troisième partie correspondront à l'analyse des enjeux sylvicoles à cette échelle spatiale, à la comparaison des simulations des quatre modèles sur lesquels porte l'étude et enfin à la quantification du risque global afin de définir les SER prioritaires pour l'adaptation.

Dans une dernière partie, nous évoquerons les solutions possibles d'adaptation ainsi que de nouvelles perspectives possibles pour affiner cette étude afin d'améliorer la construction des indices de vulnérabilité des essences dans le cadre du changement climatique.

# Partie I – Contexte et objet de l'étude : le hêtre en France aujourd'hui et demain

## A. Distribution actuelle et passée

### 1) L'histoire du hêtre

Avant de se différencier en *Fagus sylvatica*, le hêtre commun d'Europe qui nous est familier appartenait au groupe *Fagus grandifolia* qui survécut en Europe jusqu'à la fin du Tertiaire il y a 30 millions d'années. Les premiers *Fagus sylvatica* apparaissent à la fin du Miocène, il y a 8 millions d'années, et étaient très proches des *Fagus orientalis* que nous trouvons en Iran actuellement. La vraie différenciation s'effectue 2 à 3 millions d'années plus tard à l'époque du Pliocène sans que l'on sache précisément quand celle-ci est effectivement apparue. L'hypothèse la plus répandue est l'apparition de périodes glaciaires lors du Quaternaire qui éliminèrent les moins résistants (Teissier du Cros, 1981). Par la suite, au fil du Quaternaire, surtout après le Pléistocène moyen (Magri, *et al.*, 2006) ce sont les successions de périodes interglaciaires et glaciaires qui ont fait évoluer au cours du temps l'aire de distribution du hêtre.

Selon l'étude de Magri publiée en 2006 à partir de données paléobotaniques et d'études génétiques, le hêtre s'est développé à plusieurs reprises lors des derniers 500 000 ans, durant la plupart des périodes tempérées, mais son comportement apparaît très variable selon les sites et les différentes phases de réchauffement du Quaternaire. Il a par ailleurs survécu dans de nombreuses zones refuges lors de la dernière période glaciaire, sachant que ces zones n'étaient pas toutes reliées entre elles comme par exemple celle de l'Europe centrale et celle de la Méditerranée. Les populations de hêtre n'ont donc pas toutes évolué de la même façon, certaines se sont plus étendues par rapport à d'autres qui sont restées cantonnées à leur zone originelle.

La période clef pour l'essence est l'Eémien, qui est l'avant-dernière période interglaciaire du Quaternaire, entre 127 000 et 112 000 ans BP car suite à cette période, le hêtre s'est répandu dans de nombreux sites en Europe, en Italie, en France, dans les Balkans ou encore dans le Nord-Ouest de la Grèce. La période glaciaire qui suivit vit le hêtre régresser et se cantonner au Sud de l'Europe comme en Galice, dans les Pyrénées et ou encore dans la cordillère Cantabrique, et il semble avoir survécu aussi dans la zone côtière méditerranéenne et dans l'Est des Alpes. Par la suite, lors du réchauffement, à partir du début de l'Holocène, il y a 10 000 ans, son aire de distribution s'est de nouveau étendue gagnant peu à peu toute l'Europe, colonisant les différents massifs montagnards comme le Massif central, la chaîne alpine, les Carpates, les Apennins et cela jusqu'aux Vosges, il s'est ainsi diffusé le long des régions vallonnées et montagneuses du centre Sud de l'Europe. Puis, il est arrivé également au Luxembourg, en Allemagne s'étendant jusqu'en Pologne ou encore au Danemark colonisant ainsi les plaines du centre Nord du continent. Contrairement à ce que l'on aurait pu penser, les chaînes de montagnes ne sont donc pas apparues comme un facteur limitant dans sa diffusion qu'elles semblent plutôt avoir facilitée. En revanche, le hêtre commun semble avoir été freiné par les grandes plaines avec un climat continental et par les grandes vallées fluviales. Le hêtre atteint l'Angleterre entre 3000 et 2000 ans BP, s'étend alors jusqu'au Sud de la Scandinavie et au Nord-ouest de la Pologne. C'est vers 1000 ans BP que le hêtre va atteindre son extension maximale, très similaire à celle que nous connaissons aujourd'hui.

Les zones refuges n'ont pas toutes eu un rôle important vis-à-vis de la diffusion du hêtre à travers le continent européen car il ne s'est pas toujours diffusé à partir de celles-ci. Elles ont contribué à des degrés divers à la colonisation de cette espèce qui s'est étendue dans beaucoup de cas soit très lentement soit très tard durant la période post-glaciaire. Par contre, en Slovénie, la population de hêtre a eu une extension rapide et proche et cela a eu un effet beaucoup plus important que les populations ayant eu une extension lente et tardive. Les principales zones refuges qui ressortent de l'étude comme

sources de colonisation de l'Europe centrale et de l'Europe du Nord sont la Slovénie, les Alpes orientales, le Sud de la Moravie, le Sud de la Bohême et le Sud de la France, ce dernier n'étant cependant pas à l'origine de la dissémination du hêtre en Europe centrale (Magri, *et al.*, 2006).

## 2) Le hêtre aujourd'hui

Aujourd'hui, en Europe, le hêtre a une aire de répartition assez large, elle débute au Nord par l'occupation des zones méridionales des pays nordiques ainsi que d'une partie de l'Angleterre et vers le nord-est, elle arrive jusqu'en Ukraine à hauteur des Carpates ; au sud-ouest, elle descend jusqu'en Espagne près la chaîne pyrénéenne, se prolonge en Italie et vers le sud-est se dirige vers la Turquie où l'essence est peu présente à l'exception de petites poches de subsistance près de la mer Noire sachant qu'au-delà, l'aire de *Fagus sylvatica* s'arrête pour laisser place à celle de *Fagus orientalis* qui s'étend jusqu'en Iran.

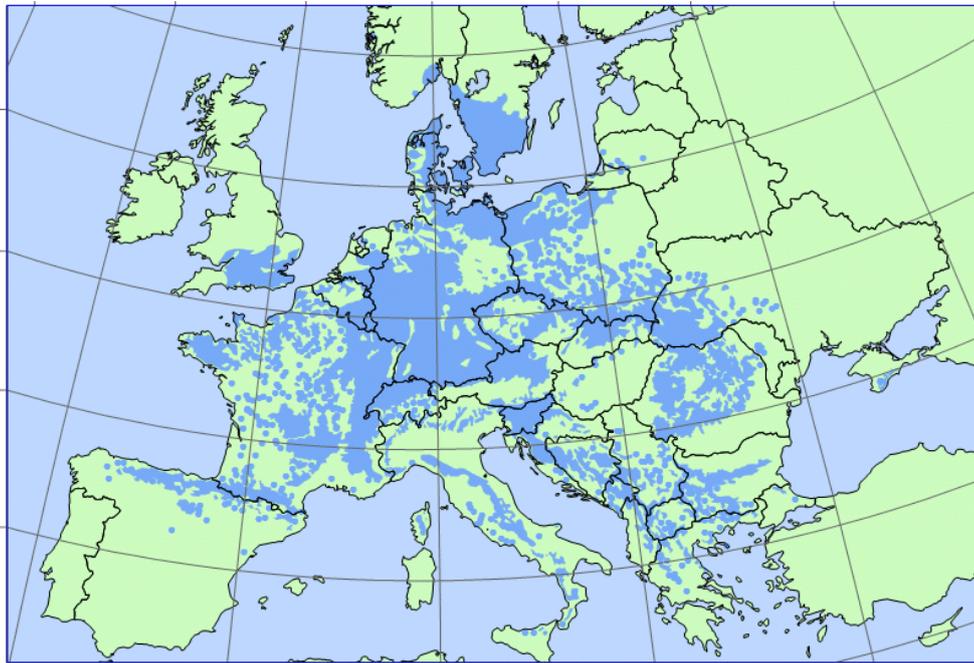


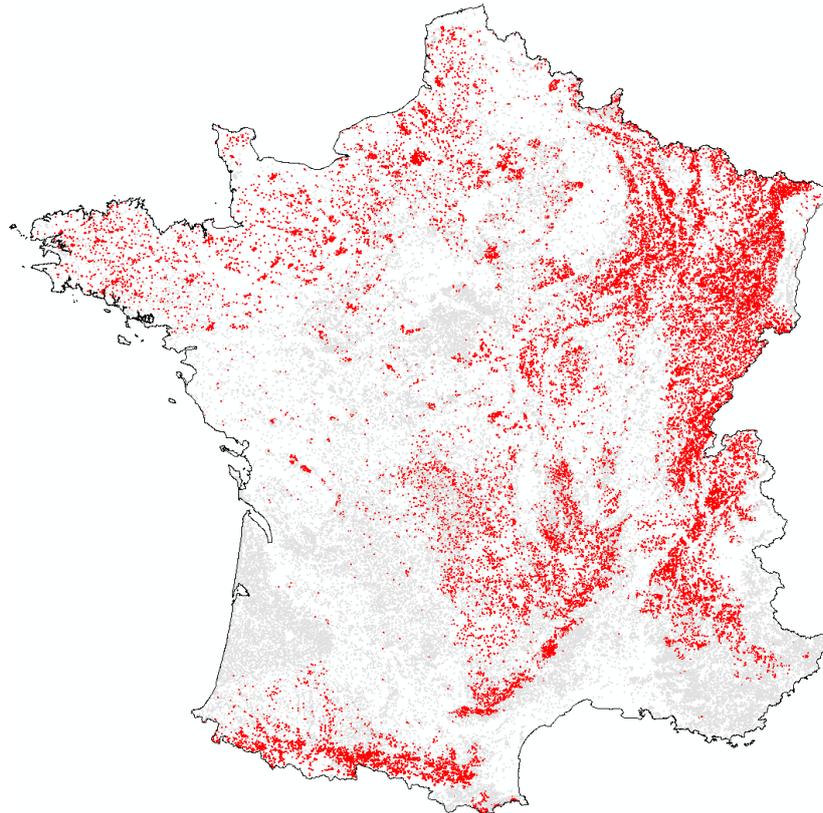
Figure 1 : Carte de distribution actuelle du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). EUROFORGEN 2009. [www.euroforgen.org](http://www.euroforgen.org)



Figure 2 : Carte de distribution du hêtre oriental (*Fagus orientalis*), Europe S-E, mer Noire. EUROFORGEN 2009. [www.euroforgen.org](http://www.euroforgen.org)

À l'échelle française, nous observons que le hêtre est présent dans la moitié nord en plaine et en montagne tandis qu'il se trouve principalement dans les zones de montagnes dans la partie sud, avec des exceptions comme le piémont de l'Ouest des Pyrénées et quelques zones disséminées en Aquitaine. C'est une essence européenne à tendance subatlantique. Les massifs forestiers composés de hêtres qui sont importants se situent soit en plaine sous influence océanique (Bretagne, Normandie, Bassin parisien et Picardie), soit sur les plateaux et les collines du Nord-Est (Bourgogne, Lorraine, Ardennes, Morvan et Franche-Comté) ou enfin à l'étage montagnard côtoyant le sapin et l'épicéa dans les grands massifs de montagnes françaises (Jacamon, 2001).

Selon les données IFN, à l'échelle française, la présence actuelle du hêtre se distribue comme le montre la carte suivante.



**Figure 3 : Distribution observée du hêtre en France dans les zones de plaines selon les données IFN. Source : Projet CARBOFOR**

À noter qu'ici, nous avons la distribution observée mais pas l'aire naturelle de *Fagus sylvatica*, l'impact anthropique est donc compris dans cette répartition. Nous observons sa forte présence dans tout le quart nord-est ainsi que le long du nord-ouest de l'hexagone du Sud de la Bretagne au Nord-Pas-de-Calais puis enfin aux abords des Pyrénées. En opposition, le hêtre est absent de la Loire-Atlantique à l'Aquitaine ainsi que dans toute la bordure méditerranéenne à quelques exceptions telles que la Sainte-Baume.

Dans le passé, le hêtre a été associé à de multiples essences selon l'époque et le lieu considérés. Au Pléistocène moyen, il est en mélange avec le pin sylvestre, le sapin, les chênes à feuilles caduques, l'orme, le noisetier et le tilleul lors de phases tempérées. Dans le Sud-Ouest de la France, nous le retrouvons aussi en présence avec du chêne vert lors de périodes interglaciaires. Lors de la dernière glaciation, le hêtre régressant, particulièrement dans le Nord de la France, est peu présent au sein des associations végétales dans lesquelles dominent les pins et les bouleaux. Dans la zone

méditerranéenne, il est comme dans le Sud-Ouest associé au chêne vert mais aussi à d'autres feuillus et au pin sylvestre (Teissier du Cros, 1981).

Actuellement, le hêtre est le plus souvent accompagné par le chêne sessile, le charme et les érables plane, sycomore et champêtre aussi, ce dernier se retrouvant en mélange avec le hêtre dans les zones plus calcaires. Nous retrouvons également en accompagnement dans les hêtraies le merisier, les tilleuls (principalement le tilleul à petites feuilles), les alisiers blanc et torminal et le bouleau. En montagne, il s'associe au sapin et à l'épicéa.

## B. Description et autécologie du hêtre

### 1) Traits de vie et caractères phénotypiques du hêtre

Le hêtre est une essence forestière **sciaphile** qui dans ses premières années, se développe dans la pénombre des étages supérieurs puis va s'adapter au fur et à mesure à la pleine lumière sans pour autant y être exposée de manière brutale : c'est une **héliophile** tolérante à l'âge adulte. À cet âge, il atteint une taille d'environ 30-40 mètres. C'est une (macro)**phanérophyte**, selon le système de classification de Raunkier, **caducifoliée** avec une longévité comprise entre 150 et 300 ans. Il fleurit en avril-mai en même temps que ses feuilles apparaissent.

En ce qui concerne les caractères phénotypiques à proprement parler, selon Rameau (Rameau, Mansion, & Dumé, 1989), le hêtre a un tronc droit et des branches redressées à environ 60° qui se divisent jusqu'à une ramification dense qui aide à la formation d'un couvert épais lors de la saison de végétation. Son écorce est grise, lisse et peu épaisse et s'éclaircit avec le temps avec l'apparition de tâches plus ou moins blanchâtres. Les jeunes rameaux sont alternes, lisses également et de couleur brun olive. Les bourgeons, longs de 2 cm, sont fusiformes, pointus, bruns et brillants. Ses feuilles sont aussi alternes de forme ovale aiguë, longues de 4 à 9 cm à bord entier (mais cilié à l'état jeune) avec un pétiole court et comportant entre 6 et 8 paires de nervures. Le bois du hêtre, dur et lourd, est homogène sans distinction entre l'aubier et le **duramen**, sa couleur variant du blanc - blanc jaunâtre (cas de la majorité des arbres) au blanc rougeâtre selon les provenances et les conditions de croissance. Son bois est très altérable et sensible aux divers aléas climatiques. Ses fruits tombent en octobre après avoir passé la saison dans une cupule. Ce sont des fânes de forme pyramidale avec une enveloppe dure de couleur brune. Chaque cupule renferme 3 à 4 fânes. Les fânées ont une périodicité de 3 à 5 ans, elles vont être d'ampleur proportionnelle à la taille du houppier des arbres (Bastien, 2000).

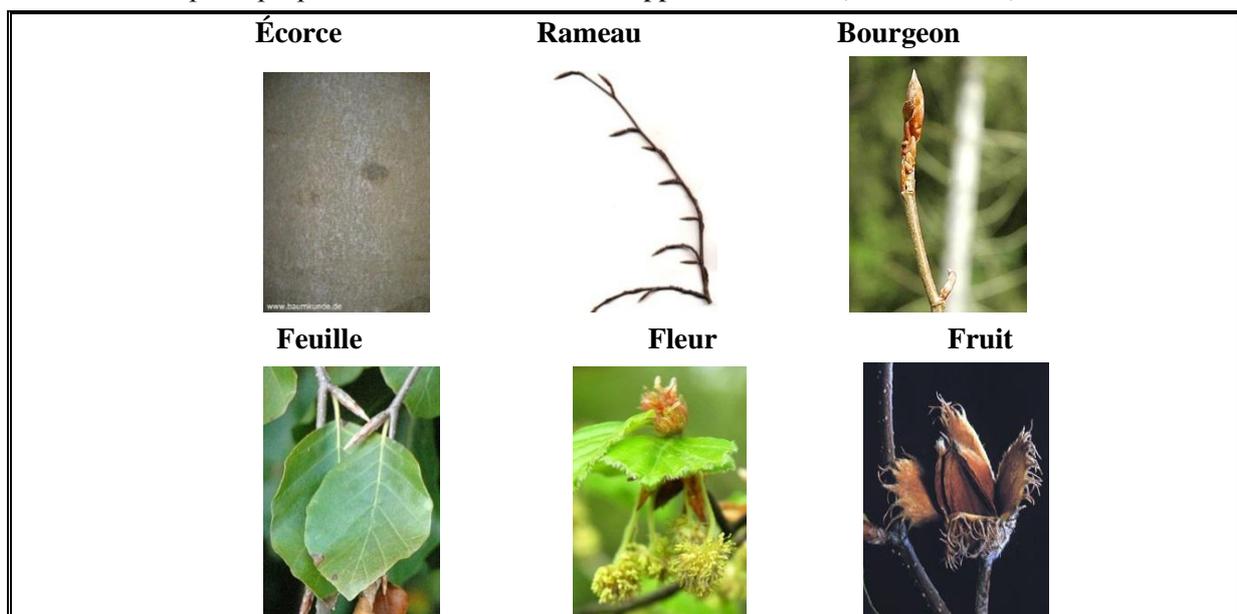


Figure 4 : Divers détails de *Fagus sylvatica*. Source : <http://www.afd-ld.org>

## 2) Les facteurs écologiques influençant la répartition du hêtre

Un facteur écologique est un facteur qui joue un rôle limitant dans l'écologie de la plante s'il est soit absent ou réduit au-dessous d'un seuil minimum critique pour celle-ci ou s'il est supérieur à un seuil maximum tolérable. Il conditionne les possibilités de succès de la plante dans ses tentatives de colonisation du milieu ; ou bien, pour des circonstances moins sévères, bien que l'organisme puisse effectivement subsister dans ce milieu, il affecte le métabolisme général de ce dernier (Masson, 2005). Cette notion se complète avec la définition de la niche écologique d'une espèce dont nous parlerons par la suite.

### → *Facteurs climatiques*

Les facteurs climatiques sont prépondérants pour l'essence notamment par rapport aux facteurs édaphiques, ce sont eux qui vont majoritairement influencer l'aire de distribution du hêtre (Masson, 2005).

En ce qui concerne les températures, le hêtre évolue plus facilement dans un écosystème aux températures modérées, son extension est limitée, en altitude surtout, par une température moyenne de janvier inférieure à -2 °C même si c'est une essence qui supporte relativement bien les grands froids, résistant au givre et à la neige après la chute des feuilles. Mais s'il apparaît limité par des températures trop basses de janvier, des études montrent également que ces dernières ne doivent pas non plus excéder des valeurs trop hautes (supérieures à 3 °C) car la levée de dormance chez *Fagus sylvatica* nécessite des températures hivernales relativement froides. Si les températures sont trop élevées en janvier, l'éclatement des bourgeons peut arriver plus tôt dans la saison et rendre le hêtre plus vulnérable aux gelées tardives, de plus, de telles températures peuvent réactiver la respiration chez l'arbre et engendrer une baisse précoce des réserves glucidiques (Seynave, Gégout, Hervé, & Dhôte, 2008). Cependant, le hêtre est présent dans des régions aux températures hivernales relativement douces comme en Bretagne.

C'est donc une essence rustique dont les conditions optimales pour la température moyenne annuelle se situent dans une fourchette allant de 7 à 10 °C (Masson, 2005). En France, il est présent dans une gamme de températures qui va de 4 à 13 °C (Seynave, Gégout, Hervé, & Dhôte, 2008). Par contre, il aime peu la chaleur et va être sensible aux coups de soleil, il est très sensible aux sécheresses estivales surtout à sa limite d'aire (Masson, 2005). En début de saison, lors du débourrement qui est rapide chez le hêtre, il sera très sensible aux gelées tardives surtout au stade juvénile.

À l'inverse, les gelées précoces d'automne ont moins d'impacts sur lui. Cependant, il faut rester prudent quant à ce fait car sa sensibilité à des épisodes froids survenant trop rapidement au cours de la saison a été démontrée en Wallonie suite à l'automne 1998 (ONF & IDF, 2010). En effet, dans cette région où le hêtre est en conditions climatiques, des décollements d'écorces inhabituels et l'apparition de champignons en hauteur sur les troncs avaient été remarqués l'année suivante, suivis de nécroses corticales favorisant alors les attaques d'insectes **xylophages** et des départs de pourriture interne. Il s'est avéré que la cause était la chute brutale des températures (sous -15 °C) lors de l'automne 1998 après une saison exceptionnellement douce qui blessa le **cambium** provoquant une nécrose qui rendit les hêtres très vulnérables et très attractifs et facilita la colonisation des arbres par des insectes et divers champignons. Le phénomène a par la suite décliné au fil des ans et par ailleurs il n'y a pas eu de baisse de la croissance et de la vigueur, les conséquences ne furent que technologiques car la qualité des bois touchés par la maladie, nommée la "maladie ardennaise du hêtre", fut dégradée (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010).

Durant la saison de végétation, le hêtre va apprécier des températures de printemps élevées qui favoriseront la croissance des premières hauteurs après le **débourrement** qui se produit entre la mi-avril et la mi-mai. À l'inverse, une baisse rapide de la conductance de la canopée est observée lorsque la température instantanée descend en dessous de 17 °C. Puis en période estivale, il va être sensible

aux fortes températures qui généralement accentuent le **déficit** hydrique et provoque la fermeture des **stomates** freinant alors la **photosynthèse**.

Effectivement, du côté des besoins en eau, le hêtre se développe dans des milieux avec une bonne pluviométrie, il apparaît que les précipitations doivent être supérieures à 600 mm sur toute l'année mais il aura une plus grande vigueur si celles-ci dépassent 750 mm, seuil retenu par beaucoup. Il convient mieux qu'elles soient bien réparties tout au long de l'année même si dans le cas contraire il est réputé pour compenser avec d'autres facteurs (Teissier du Cros, 1981) comme un bon état hygrométrique de l'air ou l'apparition fréquente de brouillards. Ainsi, des hêtraies sont présentes dans des lieux méridionaux mais où les brouillards sont fréquents comme la Sainte-Baume, le mont Ventoux ou encore la Montagne de Lure. Selon le botaniste Paul Duvigneaud, le hêtre aurait besoin d'une quantité d'eau comprise entre 3500 et 5000 m<sup>3</sup> par hectare par an (équivalent à 350-500 mm par an).

*Fagus silvatica* exige une saison de végétation correspondant à une période de 120 à 180 jours où la température est supérieure à 10 °C, d'après les écrits de Gaussen (1953) et de Teissier du Cros (1981). Le cycle végétatif peut être court et la date de débourrement n'aura pas d'incidence sur sa croissance en hauteur.

#### → Facteurs édaphiques

Les propriétés du sol favorables au hêtre sont variées car il s'adapte à un large panel de conditions stationnelles. Cependant, il disparaît lorsque les conditions au niveau du sol lui deviennent trop défavorables, ainsi, il ne supporte pas les très faibles réserves en eau, une très grande pauvreté chimique doublée d'un pH très bas ( $\leq 4$ ) et l'hydromorphie (Teissier du Cros, 1981). Cette dernière étant le facteur auquel le hêtre est le plus sensible et le plus vulnérable, il est donc exclu de tous les sols où l'hydromorphie est permanente souvent caractérisés par l'apparition d'un gley à profondeur plus ou moins grande. Ainsi, il n'est jamais présent sur tous les types d'**humus** hydromorphes ainsi que là où apparaissent des phénomènes d'oxydoréduction dans les premiers 20 cm du sol. Des textures argileuses dès la surface lui sont aussi néfastes mais il peut y apparaître si la pente est suffisante comme en Lorraine. À l'inverse, un excès d'aridité ne lui conviendra pas non plus (sols avec un type d'humus mor associé à un podzol humo-ferrugineux), il pourra y être naturellement remplacé par le chêne sessile comme sur les affleurements sableux du Bassin parisien (Teissier du Cros, 1981). Mais il s'agit très certainement d'un effet anthropique, comme l'évolution spontanée des réserves intégrales de Fontainebleau vers la hêtraie pure (Legay, communication personnelle).

À part dans ces dernières conditions édaphiques extrêmes, le hêtre est présent sur des humus allant du mull carbonaté au dysmoder sur des sols plus ou moins riches en bases avec des pH très variables, même s'il y est moins compétiteur sur des sols plus acides (Rameau, Mansion, & Dumé, 1989). On le trouve sur divers matériaux avec des sols plus propices à sa fertilité comme les limons ou le **loess** épais ou à la qualité technologique de son bois, comme les sols bruns calcaïques. Le bois est également de qualité supérieure sur les sols calcaires. Les modèles de distribution de la croissance nous démontrent que les plus gros potentiels de croissance se trouvent dans une gamme de pH allant de 4 à 5,5 et où le rapport C/N est relativement bas ( $< 20$ ), l'indice potentiel de croissance est alors de 30 m alors qu'il se situe en-dessous de 20 m pour des pH  $> 6$  et un C/N  $> 20$ . La croissance du hêtre semble donc très sensible à la nutrition azotée (Seynave, Gégout, Hervé, & Dhôte, 2008).

Le développement racinaire du hêtre est de nature traçante, en effet, ses racines se développent à l'horizontale dans les premières couches du sol. Cet enracinement apparaît alors relativement superficiel et rend le hêtre tolérant aux sols peu profonds. Mais cela augmente sa vulnérabilité face aux événements extrêmes tels que les tempêtes comme en Lorraine en 1999. Au niveau sylvicole, il convient de faire attention lors de la mise en éclaircie des plantations autour des hêtres. Il est également sensible au tassement de sol alors que c'est un bon prospecteur dans des sols aérés, peu compacts ou même des sols meubles (Masson, 2005).

Dans le diagramme acidité-eau de Rameau, l'espèce apparaît comme une espèce **mésoxérophile** à **mésophile**.

Très sec							
Sec		<b>TOLERE</b>					
Assez sec à moyennement sec							
Frais				<b>OPTIMUM</b>			
Assez humide							
Humide en permanence							
Inondé en permanence							
Humidité	Acidité	Très acide	Acide	Assez acide	Faiblement acide	Neutre	Calcaire

Figure 5 : Diagramme acidité-eau pour le hêtre européen (Rameau, Mansion, & Dumé, 1989)

→ *Sensibilité aux insectes et pathogènes*

Le hêtre a plusieurs ennemis dont certains lui sont spécifiques. Au niveau des feuilles, il peut être attaqué par le puceron laineux du hêtre qui provoquera une crispation puis un brunissement des feuilles. Il existe aussi le charançon sauteur du hêtre dont les atteintes peuvent évoquer un roussissement du feuillage suite à une gelée tardive et une cochenille typique à l'essence comme pour les autres feuillus. Un champignon attaque particulièrement le hêtre : le *Nectria* qui existe sous plusieurs formes : chancre du hêtre, maladie de l'écorce du hêtre, etc. Le *Nectria* provoque notamment des nécroses au niveau du tronc ce qui provoquera des suintements de l'arbre. Ce champignon affecte surtout les arbres déjà affaiblis (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010). Le chancre, quant à lui, peut provoquer des dégâts sur de jeunes arbres (Masson, 2005). Restent ensuite des ennemis tels que les **scolytes**, les **agriles** et plusieurs champignons lignivores.

### C. Place du hêtre dans le paysage forestier français

Le hêtre occupe une place importante au sein des forêts françaises d'un point de vue paysager autant que du point de vue de la production. En effet, le hêtre est la troisième essence dominante autant en termes de surface, de volume que de surface terrière à l'échelle du pays toutes forêts confondues. Il devient l'essence majeure lorsque l'on s'intéresse uniquement aux forêts publiques. Au total, le hêtre couvre une surface de 1 394 000 hectares et représente 261 millions de m<sup>3</sup> répartis de façon équivalente entre le domaine public et le domaine privé. En termes de surface terrière, il est évalué à 32,5 millions de m<sup>2</sup>. À l'échelle de la France, les autres essences feuillues importantes sont les différentes espèces de chênes (pédonculé, sessile et pubescent), le châtaignier, le charme et le frêne (IFN, 2011). Le hêtre est d'ailleurs souvent en mélange avec le chêne sessile et le charme. Un tiers des peuplements où il est l'essence dominante sont des futaies régulières.

Il est particulièrement présent dans l'Est de la France où il domine dans des départements comme la Meuse, les Vosges, la Meurthe-et-Moselle, la Haute-Marne. Ces dernières années, la surface des hêtraies de production représentée a eu tendance à augmenter autant que les autres forêts de production, même si l'on a remarqué que la hêtraie avait progressé davantage par rapport aux autres types de peuplements en forêt domaniale (Sardin, Pilard-Landeau, & Michon, 2007). À noter que cette progression semble due à un changement d'orientation dans la gestion sylvicole, le hêtre ayant été par le passé défavorisé au profit du chêne, il regagne donc depuis une trentaine d'années des surfaces où sa progression fut limitée par l'intervention humaine.

Si nous nous intéressons à la surface terrière, la moyenne nationale est de 23 m<sup>2</sup>/ha, valeur supérieure à ce que les guides de sylviculture conseillent. Deux causes peuvent engendrer cela, soit il y a une surcapitalisation soit nous sommes en présence de hêtraies âgées avec prédominance d'arbres âgés par rapport aux jeunes classes d'âge (Sardin, Pilard-Landeau, & Michon, 2007). Ce vieillissement est plus marqué dans le Sud et dans les montagnes notamment du fait de la difficulté de l'exploitation et de la sylviculture antérieure. Un début de décapitalisation est constaté dans les forêts domaniales et une légère hausse du volume sur pied en forêt publique, dans les zones de plaine notamment, mais il est dit que ces chiffres sont à prendre avec précaution au vu des changements de méthodes d'inventaire, dont nous parlerons par la suite, et du fait qu'ils ne prennent pas en compte les volumes perdus en décembre 1999. Selon l'ONF, les hêtraies où le hêtre est le moins mélangé avec d'autres essences dans les peuplements, se trouvent dans les Pyrénées et dans le domaine atlantique. À noter que le hêtre est très présent en mélange dans les peuplements où il n'est pas l'essence principale. Un chiffre est très parlant : les forêts où le hêtre est présent représentent 1 570 000 ha en forêts publiques (avec 613 000 ha en forêts domaniales), donc plus du double de la surface des peuplements où il domine (Sardin, Pilard-Landeau, & Michon, 2007).

Les orientations régionales forestières régies par le Code forestier sont dans chaque région expliquées dans les directives régionales d'aménagement (DRA) qui doivent préciser les objectifs et la stratégie de gestion durable pour les forêts domaniales. Chaque DRA présente les caractéristiques des forêts et les recommandations techniques pour la gestion des forêts domaniales (Code forestier, article R-133-1, 2011). Elle comprend également une analyse des perspectives d'évolution de cet environnement (article R-133-1-1). La lecture des DRA permet donc d'avoir par régions des données sur la surface forestière occupée par le hêtre en tant qu'essence dominante, la part de peuplements monospécifiques et le volume de bois sur pied entre autres. Grâce à ces documents, nous avons réalisé des fiches par régions (voir modèle en annexe 1) qui résument la place de la forêt dans la région administrative (taux de boisement, surface forestière et volume), la place du hêtre dans celle-ci (surface, volume et part relative du hêtre), les problèmes rencontrés par le hêtre, les remarques faites pour la gestion sylvicole, les autres essences en mélange et les essences suggérées en remplacement.

Le hêtre est une essence prépondérante dans le paysage forestier du Nord : en Alsace, en Lorraine et en Basse-Normandie où il représente plus de 20 % de la surface forestière avec pour chacune de ces régions environ 40% en peuplements monospécifiques. Les hêtraies représentent environ un tiers du volume des essences feuillues pour les deux premières régions citées. Suivent des régions telles que la Franche-Comté, la Haute-Normandie et la Picardie. Un résumé de la place du hêtre dans les régions françaises est disponible en annexe 2. Il est intéressant de se pencher sur la part de peuplements monospécifiques de hêtre car dans certaines régions, même s'il est peu important en surface, les hêtraies apparaissent très pures et des perturbations dues au changement climatique impacteraient fortement le paysage.

## **D. Les changements climatiques attendus et l'impact sur les essences forestières**

### **1) Les changements climatiques prévus aux échelles mondiales et françaises ; présentation des scénarios**

Aujourd'hui, il devient de plus en plus difficile de réfuter le réchauffement global au vu de toutes les perturbations observées depuis quelques décennies à l'échelle mondiale (augmentation des températures, élévation du niveau de la mer, fonte des glaciers) avec pour chacune de nombreuses conséquences sur la population humaine mais aussi sur les écosystèmes marins ou terrestres.

Dans son dernier rapport (Pachauri & Reisinger, 2007), le GIEC précise que les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) augmenteront de 25 à 90 % entre 2000 et 2030, notamment du

fait que les combustibles fossiles vont continuer à occuper une place importante dans les sources d'énergie. Les changements attendus seront très probablement plus accentués que ceux observés au XX<sup>e</sup> siècle et une augmentation de température de l'ordre de 0,2 °C par décennie est annoncée (Pachauri & Reisinger, 2007). De multiples scénarios climatiques ont été construits avec une divergence qui augmente au fur et à mesure que l'on se projette dans le futur, même si dans tous les cas une modification climatique est inévitable. Le tableau suivant issu du rapport du GIEC datant de 2007 montre ces derniers et les valeurs moyennes de réchauffement que chacun projette pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

Cas	Variation de température (°C, pour 2090-2099 par rapport à 1980-1999) <sup>a, d</sup>	
	Valeur la plus probable	Intervalle probable
Concentrations constantes, niveaux 2000 <sup>b</sup>	0,6	0,3 – 0,9
Scénario B1	1,8	1,1 – 2,9
Scénario A1T	2,4	1,4 – 3,8
Scénario B2	2,4	1,4 – 3,8
Scénario A1B	2,8	1,7 – 4,4
Scénario A2	3,4	2,0 – 5,4
Scénario A1FI	4,0	2,4 – 6,4

Tableau 1 : Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle selon les différents scénarios à l'échelle du globe (GIEC, 2007).

Les scénarios établis par le GIEC sont regroupés au sein de quatre canevas : A1, A2, B1 et B2 qui décrivent chacun des évolutions différentes des forces motrices des émissions mais aussi des contextes sociaux, démographiques économiques, technologiques et environnementaux différents qui évoluent soit de manière positive soit de manière négative selon les versions envisagées.

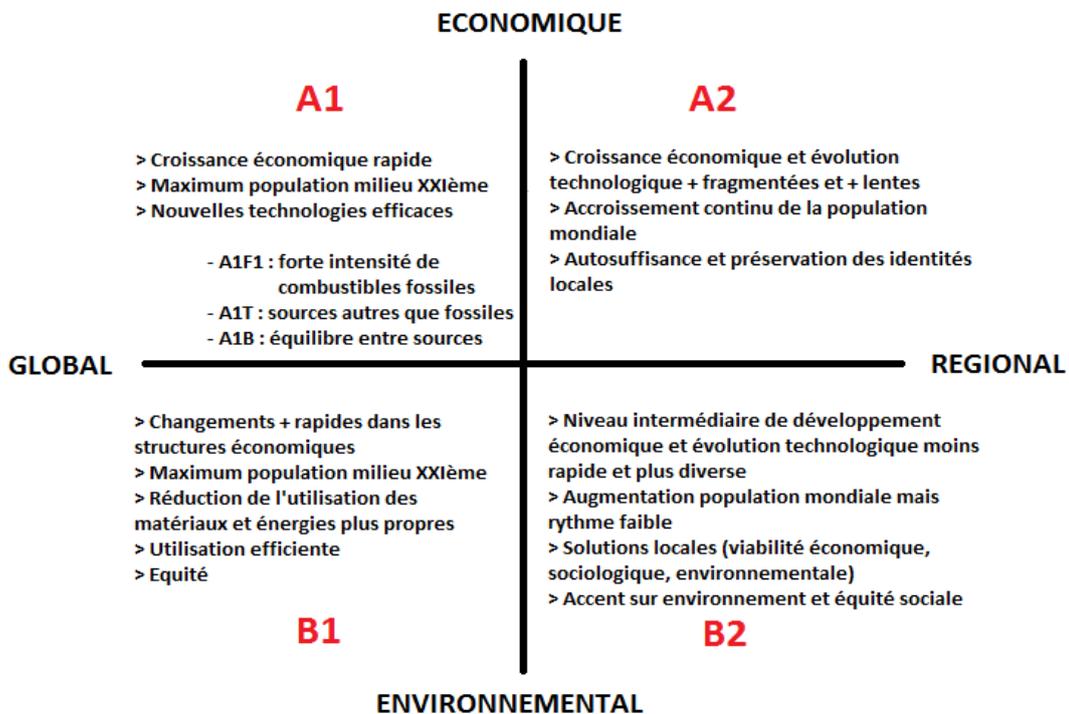


Figure 6 : Description des quatre grandes familles de scénarios de développement du GIEC dans un contexte de changement climatique.

Dans la majorité des scénarios, les surfaces forestières mondiales décroissent encore pendant quelques décennies, notamment parce que la population mondiale continue à augmenter ainsi que les revenus par habitant. Puis la tendance s'inverse allant même jusqu'à atteindre le plus fort taux d'accroissement aux alentours de 2100 pour les familles de scénarios B1 et B2 par rapport à 1900. À noter que les divers scénarios varient beaucoup quant à l'utilisation des terres. Ci-dessous la projection de ces scénarios d'émissions de GES.

Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface

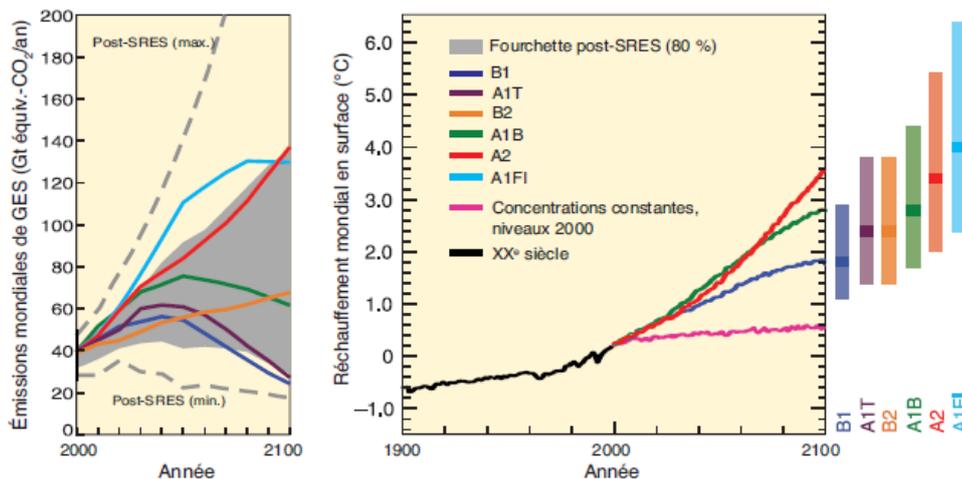


Figure 7 : Les différents scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100. À gauche : Émissions mondiales de GES en l'absence de politiques climatiques avec 6 scénarios illustratifs de référence, le SRES étant le rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (2000). Les GES sont le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, le N<sub>2</sub>O et les gaz fluorés. À droite : Les courbes en trait plein correspondent aux moyennes mondiales multimodèles du réchauffement en surface pour les scénarios A2, A1B et B1, en prolongement des simulations relatives au XX<sup>e</sup> siècle

À partir de ces scénarios, des centres de recherche tels le Hadley Centre ou Météo-France ont mis au point des modèles de simulation du climat.

Les simulations climatiques associées à ces scénarios sont émises avec un degré de confiance plus grand que celui du troisième Rapport du GIEC en ce qui concerne le réchauffement et la portée régionale de celui-ci, comprenant la modification du régime des précipitations, des vents et certains aspects des phénomènes extrêmes (Pachauri & Reisinger, 2007). Parmi les changements prévus à l'échelle régionale, ceux concernant la France métropolitaine sont les suivants :

- Un réchauffement maximal sur les terres émergées,
- Une réduction de la couverture neigeuse,
- Une hausse très probable de la fréquence des extrêmes des températures élevées, des vagues de chaleur et des épisodes de fortes précipitations,
- Le déplacement vers les pôles de la trajectoire des tempêtes extratropicales avec en plus un changement dans la configuration des vents, des précipitations et des températures,
- Une modification du régime des précipitations, avec une réduction des précipitations estivales et une augmentation des précipitations notamment pendant la période hivernale.

D'ici le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle, on estime avec un grand degré de certitude que le débit annuel moyen des cours d'eau et la disponibilité en eau s'accroîtront aux hautes latitudes mais diminueront dans des zones plus sèches de latitudes moyennes comme la zone méditerranéenne, baissant ainsi les ressources en eau disponibles.

En France, au siècle dernier, les températures ont déjà augmenté entre 0,7 °C et 1,1 °C, la moyenne mondiale étant de 0,7 °C. Cette augmentation a été d'ailleurs plus marquée dans le Sud-Ouest (Roman-Amat, 2007). Dans un avenir proche de 50 à 100 ans, une hausse allant jusqu'à + 2 °C est

prévue (Riou-Nivert, 2005), avec une accentuation plus forte pour la période estivale sachant que le changement climatique aura un impact plus conséquent sur les températures maximales. Cette augmentation se fera d'autant plus ressentir dans le Sud que dans le Nord du pays (Ducouso & Dequé, 2005). Pour les précipitations, la quantité de pluie va augmenter en hiver mais diminuera durant la période de végétation, particulièrement dans le sud-ouest et en automne, ce qui est particulièrement important pour les plantes car ce qui prévaut est plus la répartition annuelle des précipitations que la quantité d'eau reçue. En parallèle, les réserves en eau du sol vont suivre les mêmes variations avec plus d'eau disponible en hiver et en début de printemps et une diminution en été et en début de la période automnale.

## 2) Niche écologique et modification climatique

Comme nous l'avons vu précédemment pour l'essence *Fagus sylvatica*, chaque espèce évolue dans des conditions écologiques données qui lui permettent de se développer et toutes les espèces ne requièrent pas les mêmes besoins, c'est pourquoi nous parlons de niche écologique où chacune va évoluer dans une gamme de conditions aussi bien climatiques qu'édaphiques qui conditionneront les territoires que la plante peut coloniser (Gégout, 2011).

Pour chaque variable, l'espèce aura une probabilité égale à la persistance de l'espèce (pour tous les points en dehors de la niche, l'espèce n'aura aucune chance de survie) Il y a cependant au sein même de la niche une partie optimale pour l'espèce (optimum écologique) qui comprendra les valeurs de la variable considérée où elle est dans les meilleures conditions de croissance et des conditions « sous-optimales » près des limites (Hutchinson, 1957). Regroupant toutes les variables écologiques significatives pour l'espèce, nous obtenons alors sa niche écologique avec une amplitude variable selon l'espèce et le facteur étudiés.

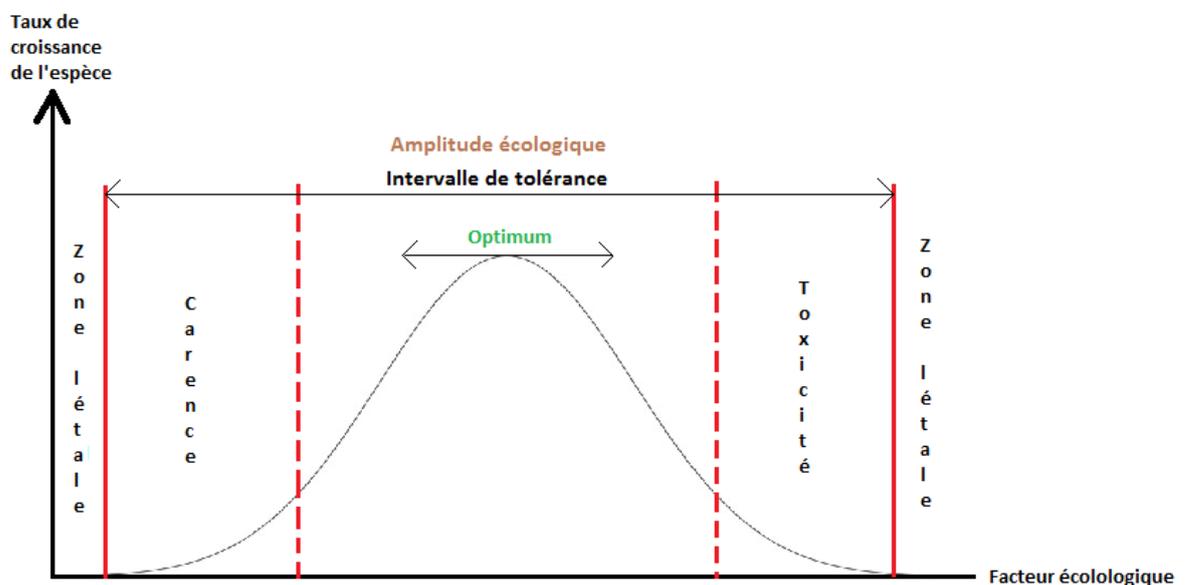


Figure 8 : Représentation de la niche écologique des espèces

Les principaux facteurs qui peuvent influencer sur la présence d'une espèce dans une aire géographique donnée concernent soit les conditions de vie que la plante peut avoir dans cette zone, à savoir la température ou le pH du sol qui influenceront le développement et la croissance ; soit les ressources que l'espèce peut consommer, à savoir la lumière qu'elle reçoit, l'oxygène du sol, le CO<sub>2</sub>, l'eau qu'elle peut puiser et les éléments minéraux qu'elle trouvera dans le sol (N, P, K, Ca, Mg/Al, H et Na) qui influenceront eux sa photosynthèse, sa respiration racinaire ou encore sa nutrition. À cela vont s'ajouter des perturbations extérieures telles que les facteurs mécaniques comme le vent et les facteurs abiotiques comme les événements climatiques (Gégout, 2011).

Ainsi, chaque espèce a une plage optimale d'intensité et de concentration pour chaque facteur pris en compte (ce qui définit son autécologie) et un changement anormal qui touche un de ces facteurs peut modifier le comportement de l'espèce en dérégulant sa physiologie. Suite à un dérèglement, il sera possible d'observer chez la plante des symptômes d'affaiblissement qui peuvent conduire à la mort de l'arbre (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010).

La variable température et l'apport en eau vont fortement dépendre du climat de la zone où est présente l'essence, avec la possibilité de perturbations sporadiques avec la survenue d'événements extrêmes et exceptionnels tels que les tempêtes comme celle qu'a connue la France en décembre 1999. La lumière reçue par les arbres au sein du peuplement ne dépendra pas fortement en France de la situation géographique mais de la structure même du peuplement et donc de la gestion forestière (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010). Le sol (humus et **réserve utile** notamment) va influencer quant à lui sur la nutrition de l'arbre que ce soit en ce qui concerne les minéraux qu'il peut puiser ou bien l'eau qu'il va avoir à sa disposition et qui dépendra de la réserve utile réelle des horizons supérieurs à la roche mère mais également de facteurs comme la granulométrie. La topographie de la zone aura aussi un rôle car les conditions écologiques changeront selon qu'on est en haut ou en bas de versants ou encore plus ou moins proche de zones alluviales. Pour ce qui est du CO<sub>2</sub>, celui-ci n'est pas un facteur limitant mais nous y reviendrons ultérieurement.

Enfin, il ne faut pas négliger l'impact anthropique sur la distribution des espèces, l'action de l'homme sur cette dernière introduit un écart entre la niche réalisée d'une essence donnée et sa niche potentielle. La distribution d'une essence sera aussi déterminée selon les interactions avec des facteurs indépendants de l'espèce même, à savoir la concurrence avec d'autres espèces occupant la même niche, ou encore les attaques biotiques possibles.

Tout cela détermine donc l'aire de distribution de l'espèce et nous allons voir que celle-ci risque d'être modifiée pour la plupart des essences forestières françaises sous l'influence du réchauffement climatique. Les limites qui conditionnent la niche écologique ne changeront pas mais, de ce fait, sous l'influence du réchauffement, l'ensemble de la niche elle-même risque de se déplacer, c'est le cas pour le hêtre comme nous le verrons plus loin en étudiant les prévisions futures de probabilité de présence des modèles de niche présentés.

## **E. Impacts du changement climatique attendus sur les essences forestières**

L'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> et le changement climatique vont affecter les peuplements forestiers de plusieurs manières, avec des divergences observées entre peuplements selon leur structure originelle, entre les arbres selon l'âge de ces derniers mais aussi selon les caractéristiques autécologiques et phénologiques des essences et, enfin, selon la provenance des espèces forestières et la concurrence qu'il existe entre elles (Bolte, *et al.*, 2009).

Les perturbations climatiques engendrées par le réchauffement global vont être de plusieurs sortes affectant les températures, le régime pluviométrique et celui des événements extrêmes et rendant par là même les arbres plus vulnérables aux attaques biotiques.

Trois « voies » seront possibles selon les essences forestières et les situations dans ce contexte futur : l'acclimatation, l'adaptation génétique, la migration (déplacement de l'aire de distribution) à quoi on ajoutera l'extinction si les changements potentiels se produisent dans un laps de temps trop réduit surtout en ce qui concerne les espèces d'arbres.

## **1) Les conséquences des changements du régime thermique**

Deux sortes d'impacts sont possibles ici : des impacts dus à une augmentation sur un laps de temps saisonnier comme par exemple une augmentation des températures hivernales conditionnant notamment la levée de dormance et la date de débournement et des impacts dus à des extrêmes de chaleur via l'augmentation des températures maximales avec la survenue de périodes de canicule.

Les températures moyennes mensuelles et annuelles vont augmenter dans le futur et pour chaque saison des perturbations phénologiques vont apparaître.

En automne, des températures trop hautes vont diminuer les capacités d'endurcissement de la plante pour la préparation aux froids hivernaux en perturbant les mécanismes d'aoûtement sensibilisant les espèces aux gelées précoces (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010) mais également aux grands froids qui suivront durant l'hiver.

Avec des températures hivernales et des températures printanières plus douces, la date de débournement des essences forestières risque de survenir plus tôt dans la saison et donc pourrait les rendre plus sensibles aux gelées tardives, les bourgeons venant d'éclorre n'appréciant pas les températures en-dessous de -4 °C. Les ligneux ont en effet besoin d'un certain nombre de degrés-jours pour effectuer la levée de dormance des bourgeons, ce qui correspond à une exposition plus ou moins longue à des températures comprises entre -5 et +5 °C selon les espèces et qui conditionnera d'ailleurs le développement de ceux-ci (Aussenac & Guehl, 2005). Les risques seraient plus accrus pour les résineux que pour le hêtre pour lequel ces risques diminueraient même.

Ce débournement plus précoce entraîne un épuisement plus rapide de la réserve en eau du sol et donc une augmentation du risque de sécheresse estivale.

Des températures plus élevées lors de la saison hivernale peuvent aussi réactiver la photosynthèse chez les arbres à feuilles sempervirentes et donc la respiration ce qui provoquera le rougissement de certains arbres si la demande en eau au niveau du houppier n'est pas satisfaite du fait d'une plus basse température au niveau du sol (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010).

En période estivale, les conséquences de chaleurs extrêmes sont plus importantes. Nous avons vu précédemment que le hêtre supportait moins les hautes températures d'été (Seynave, Gégout, Hervé, & Dhôte, 2008) et cela vaut pour de nombreuses essences forestières sociales. Une période de canicule souvent associée à une période de sécheresse va induire chez la plante un arrêt de la transpiration par fermeture des stomates, or cela provoque en même temps un arrêt des processus de refroidissement de la surface foliaire et des brûlures sont observées sur les plants (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010). Des « coups de soleil » apparaissent également principalement chez les arbres à fine écorce comme le hêtre. L'augmentation des températures va également engendrer une plus forte évapotranspiration provoquant une diminution de la croissance, ce qui peut être véritablement néfaste pour la survie de certaines espèces (Aussenac & Guehl, 2005).

Une simulation basée sur un modèle de bilan hydrique faite par l'INRA de Nancy a mis en évidence une multiplication par deux de l'intensité moyenne du déficit hydrique estival dans une hêtraie adulte, dans une hypothèse d'une augmentation des températures de 2 °C d'ici 2060 (Aussenac & Guehl, 2005).

## **2) Les conséquences du changement du régime hydrique**

Le changement climatique va probablement provoquer une diminution des précipitations estivales aux latitudes de la France (Roman-Amat, 2007). Accompagné de l'augmentation de la demande évaporative, du fait du réchauffement, il va induire plus fréquemment un déficit hydrique chez les arbres.

Le stress hydrique va être d'autant plus fort qu'il survient durant l'été. L'alimentation en eau de la plante combinée aux températures régule physiologiquement la plante par l'évapotranspiration, mécanisme contrôlé par les stomates de la feuille. L'eau absorbée par les arbres leur apporte les éléments nutritifs nécessaires à l'élaboration de la sève. La perturbation du régime hydrique des essences forestières sous l'influence du changement climatique va probablement être une des premières causes des dépérissements qui seront observés, surtout aux limites des niches écologiques.

Lorsqu'un stress hydrique survient, l'arrêt de la photosynthèse ralentit la croissance des arbres autant au niveau du tronc, que des branches et des racines. Des études ont d'ailleurs montré les effets d'un déficit hydrique sur la croissance radiale du hêtre et ont déterminé que plus de 70 % de la variance de la croissance radiale de deux années consécutives était expliquée par un déficit hydrique survenant durant l'été lors de ces deux mêmes années (Badeau, Dupouey, Cluzeau, & Drapier, 2005) (Lebourgeois, Bréda, Ulrich, & Granier, 2005).

Si le phénomène persiste, nous pouvons alors observer des flétrissements au niveau des feuilles de l'arbre suite à des phénomènes de cavitation et d'embolie des vaisseaux (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010). Cela peut aller jusqu'à la chute des feuilles voire la mort de l'arbre quand le système vasculaire de l'arbre est totalement embolisé. Les effets des sécheresses se font sentir pendant plusieurs années après l'année de la sécheresse. Les différents effets sur l'arbre dépendront non seulement de l'intensité de la sécheresse mais aussi de l'association avec les températures fortes (les canicules citées précédemment), la position topographique du peuplement et la profondeur des racines grâce auxquelles l'arbre peut puiser dans la réserve utile. La sécheresse de 2003 est un bon exemple d'évènement climatique extrême pour évaluer l'impact que peuvent avoir un tel phénomène sur les peuplements que ce soit en ce qui concerne l'apparence de l'arbre ou sa croissance. Les impacts de la sécheresse vont ressembler aux symptômes que l'on peut observer lors d'une canicule, des fentes de sécheresse vont se creuser et des nécroses cambiales vont apparaître. Au niveau des feuilles, les arbres peuvent développer une microphyllie ou un déficit foliaire comme réponse à une baisse des ressources en eau. Ce dernier est souvent observé l'année suivant celle de la sécheresse, particulièrement chez le hêtre chez qui se reflètent rapidement les conséquences d'une année sèche. Mais nous pouvons observer aussi des conséquences positives, en effet, les années suivantes, les fructifications sont souvent abondantes. Cela dit, la vulnérabilité des essences forestières est quand même accentuée, les arbres étant atteints par des symptômes dus à la sécheresse deviennent beaucoup plus sensibles aux attaques de pathogènes qui profitent de leur faiblesse.

Enfin, la combinaison de la sécheresse et de la canicule a souvent comme résultante une multiplication des feux de forêts comme ce fut le cas en 2003 en France où la surface forestière touchée par les incendies fut multipliée par deux par rapport à la moyenne (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010). Les pays méditerranéens furent les plus touchés particulièrement le Portugal.

### **3) Les conséquences de la multiplication des tempêtes**

Une des conséquences du changement climatique qui pourrait avoir des effets sur les peuplements forestiers serait la survenue plus fréquente d'évènements extrêmes tels que les tempêtes ou les épisodes de grands vents, comme ceux observés en France et en Europe ces dernières années.

En effet, les tempêtes, comme la tempête Lothar de décembre 1999, ont des impacts majeurs sur les forêts, impacts instantanés, brutaux et irréversibles. Les conséquences sont notables surtout sur des essences à l'enracinement superficiel comme c'est le cas pour le hêtre. Du fait de l'importance de leur stock sur pied et de la hauteur des peuplements, les forêts de production sont particulièrement touchées. En 1999, ce sont plus de 2 millions de m<sup>3</sup> qui sont tombés en quelques heures (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010). En plus des tempêtes mêlant de vents violents à d'intenses précipitations, des évènements comme les « rafales » de front d'orage ou des tornades d'été pourraient se produire de plus en plus fréquemment et augmenter le nombre de chablis particulièrement pour les

feuillus et le nombre de volis observés plus souvent dans les peuplements de résineux. De ce point de vue-là, dans un peuplement, les choix d'essences et de sylviculture seront importants pour prévenir ces phénomènes. En plus des effets immédiatement observables après passage des tempêtes, des effets différés se produisent suite aux chutes d'arbres ou aux bris de branches sur les arbres qui sont restés debout. Ainsi, un arbre ayant résisté à la tempête est ensuite plus vulnérable aux attaques de parasites dits parasites « de faiblesse » qui attaquent les arbres amenuisés. Les arbres sont aussi affaiblis dans leur aspect mécanique à savoir qu'ils peuvent avoir des écrasements ou des ruptures de fibres et développent alors des bourrelets de cicatrisation (Nageleisen, Piou, Saintonge, & Riou-Nivert, 2010). Plus les arbres sont vieux et hauts, plus ils sont vulnérables.

L'augmentation des précipitations prévue durant l'hiver par les divers scénarios climatiques va également rendre plus vulnérables les peuplements. Les précipitations pourront être de nature solide (grêle, neige ou verglas) et le poids de celles-ci sur les branches les fragiliseront voire provoqueront des cassures de branches, des courbures du tronc allant jusqu'à la rupture de celui-ci et donc à la mort de l'arbre. En cas d'épisode de vent, la saturation du sol en eau rend les arbres plus vulnérables au renversement.

#### **4) Les conséquences de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique**

Face à une plus forte concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air qu'ils absorbent, les arbres répondent généralement positivement dans un premier temps avec un profit plus marqué pour les essences à feuilles caduques. Des résultats ont montré qu'une multiplication par deux de la concentration en CO<sub>2</sub> pouvait provoquer une augmentation de 46 % de la croissance en biomasse (Aussenac & Guehl, 2005).

La photosynthèse des plantes est stimulée par le CO<sub>2</sub> atmosphérique, celui-ci augmente donc la production primaire brute du couvert, conduisant à un effet fertilisant de l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Il a été remarqué aussi que l'augmentation du CO<sub>2</sub> pouvait conduire à une diminution de l'ouverture des stomates, donc une baisse de la respiration atténuant cet effet fertilisant (Davi, 2004). Certaines espèces ne présentent pas cette réduction de l'ouverture des stomates lorsque la concentration en gaz carbonique augmente comme c'est le cas pour le hêtre (Aussenac & Guehl, 2005).

L'effet de l'enrichissement en CO<sub>2</sub> sur les plantes et sur leur photosynthèse résulte de relations et de phénomènes complexes au sein même des organismes et entre les organismes et leur environnement. La modélisation de la circulation du CO<sub>2</sub> et des échanges gazeux chez les plantes est complexe car il est difficile de faire la distinction entre les effets dus à une concentration en CO<sub>2</sub> plus forte et les effets dus par exemple à l'allongement de la durée de la saison de végétation qui vont induire des changements dans les peuplements forestiers. Une augmentation de CO<sub>2</sub> pourrait avoir d'autres effets qu'une photosynthèse accrue et donc une croissance plus forte. La structure et la quantité de biomasse forestière pourra être modifiée et les relations au sein des forêts entre les arbres et les insectes ou les pathogènes ravageurs seront probablement perturbées. D'un point de vue phénologique, nous pouvons également nous attendre aux mêmes effets qui seront observés avec des températures plus élevées et des changements dans le régime hydrique, à savoir des changements dans les dates de floraison, de fructification et pour la régénération des essences.

## Partie II : Matériels et méthodes

### A. Échelle d'étude : les sylvoécórégions (SER)

#### 1) Quand et pourquoi ont été créées les SER ?

Suite à sa création, l'Inventaire forestier national (IFN) créa une division du territoire français en 309 régions forestières qui correspondaient à une partition de celui-ci selon des similarités par rapport à la production sylvicole. Ces régions sont encore utilisées comme base de référence pour tous les documents d'aménagement publics ou privés et également pour des outils tels les catalogues de stations. Mais avec cette division, les résultats des inventaires départementaux étaient diffusés à des dates décalées ce qui ne permettait pas une actualisation des données régionales et nationales induisant un manque de réactivité lorsque le besoin de données était urgent notamment suite à des tempêtes pour l'évaluation des dégâts comme ce fut le cas en décembre 1999. De plus, ces résultats étaient moins précis pour des données de flux telles les données de recrutement (jeunes arbres arrivés au seuil de recensabilité), d'accroissement ou de prélèvement (coupes, accidents, mortalité).

C'est pourquoi l'échelle de travail et la méthode entreprise pour les inventaires furent revues. Ainsi, l'IFN a entrepris un nouveau découpage de la France par ensembles homogènes au niveau des peuplements forestiers et des variables écologiques. Et parallèlement, une nouvelle méthode de relevés d'inventaires a été pensée et mise en place pour la récolte de données. L'ancienne méthode fournissait des résultats par départements tous les 10 à 12 ans de manière asynchrone à l'intérieur du territoire. Voulant des données actualisées et pouvant être utilisées au sein des régions mais également à l'échelle européenne, l'IFN a mis en place à la fois une nouvelle méthode de prélèvement de données et une nouvelle échelle de lecture que sont les SER. Elles permettent d'un côté une certaine homogénéisation des conseils sylvicoles pour les gestionnaires et, de l'autre, des résultats plus précis en ce qui concerne les arbres avec des données concernant le volume, l'âge et la croissance ainsi que l'état du peuplement comme les coupes réalisées, les accidents et les mortalités observées. De plus, les résultats sont dorénavant remis à jour chaque année, basés sur les inventaires des cinq précédentes et qui correspondent donc à une moyenne de celles-ci. Moins de points sont inventoriés en une année mais les résultats sont diffusés à un rythme annuel, ils permettent une meilleure réactivité, et ils sont plus facilement utilisables par les gestionnaires.

#### 2) À quoi correspond une SER ?

Une sylvoécórégion est "l'aire correspondant à la plus vaste zone géographique à l'intérieur de laquelle la combinaison des valeurs prises par les facteurs déterminant la production forestière ou la répartition des habitats forestiers est originale, c'est-à-dire différente de celle caractérisant les SER adjacentes" (Cavaignac, 2009). Ainsi, ces SER reposent à la fois sur des caractéristiques forestières mais aussi sur les conditions écologiques du milieu.

86 SER ont ainsi été constituées auxquelles se sont surimposées dernièrement 5 SER correspondant aux milieux d'alluvions récentes autour des fleuves majeurs français. Avec elles, plusieurs objectifs :

- diviser le territoire métropolitain sur des bases écologiques qui peuvent servir de base à la gestion forestière et pouvoir alors avoir des résultats solides de stratification de l'inventaire forestier ;
- un suivi des forêts plus précis dans un cadre bioclimatique et écologique dans un contexte de changement climatique ;
- "établir une échelle optimisée pour la réalisation des guides pour le choix des essences" (Cavaignac, 2009).

Pour créer ces SER, l'IFN a d'abord divisé le territoire français en 11 domaines d'études particuliers appelés les grandes régions écologiques (GRECO) définies en fonction de variables bioclimatiques, de la topographie et de la nature des roches. Ces GRECO sont donc des régions relativement homogènes de ces points de vue-là et présentent une discontinuité majeure entre GRECO voisines. Pour définir cette partition en régions écologiques homogènes, l'IFN a confronté deux approches (par partition et par agrégation), comme décrit par la figure ci-dessous.

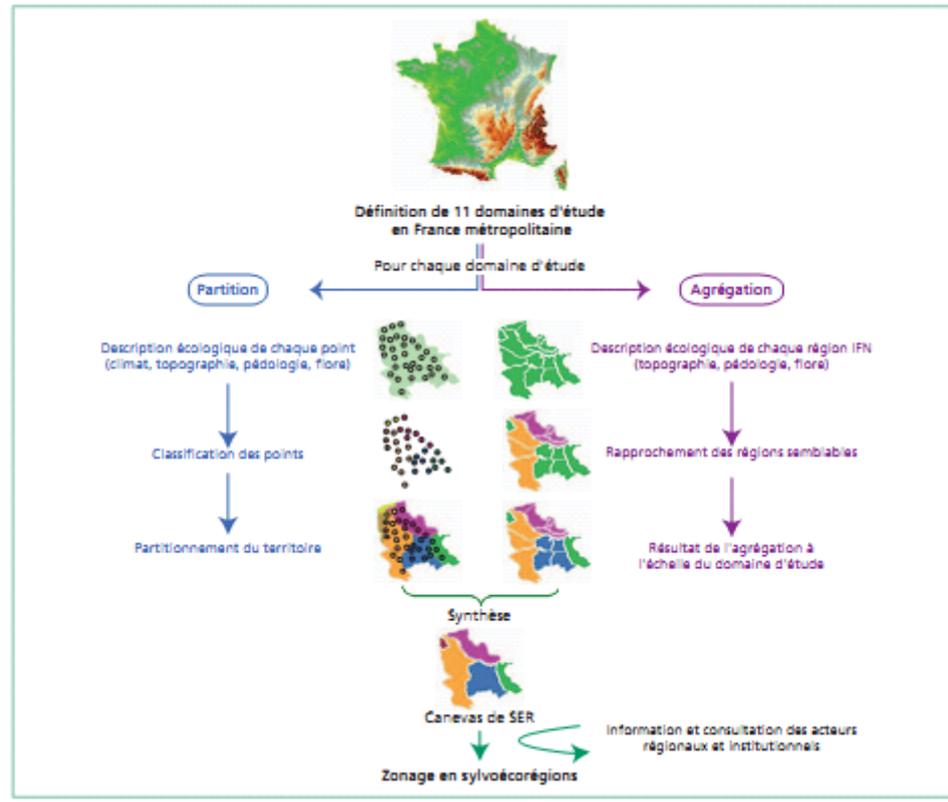


Figure 9 : Démarche d'élaboration des sylvoécorégions (Cavaignac, 2009)

La carte des SER est consultable sur le site de l'IFN ([www.ifn.fr](http://www.ifn.fr)) et des fiches descriptives de celles-ci seront disponibles en 2012.

## B. Les analyses à partir des données IFN

Avec la nouvelle méthode d'inventaire, l'IFN dispose de données diverses et variées précises par arbre et par placette avec une description des variables édaphiques, des variables portant sur le peuplement ou encore des variables physiologiques. Ce qui va permettre un suivi complet à un niveau d'étude plus adapté pour étudier les impacts du changement climatique sur les forêts et notamment pour la préparation à l'adaptation. Toutes ces données sont accessibles sur le site de l'IFN. Sur ce dernier sont aussi disponibles des tableaux de résultats à l'échelle des départements ou des régions nous informant des essences en place, des surfaces qu'elles occupent, du nombre de tiges, des volumes et des surfaces terrières qu'elles représentent. Les données sont fournies à plusieurs échelles allant du pays aux régions administratives pour la nouvelle méthode d'inventaire, les résultats départementaux sont encore ceux réalisés avec l'ancienne méthode. Les résultats par SER sont en cours de réalisation et seront disponibles en 2012.

Pour notre étude, nous avons utilisé : les données « Placettes » et les données « Arbres » issues des campagnes de recensement qui ont été faites annuellement de 2005 à 2009.

Dans les données concernant la placette, nous avons pris en compte l'essence principale (esspe) pour identifier les placettes où le hêtre est l'espèce dominante. Les données qui portent sur les arbres nous ont permis de calculer le volume et la surface terrière du hêtre par placette à partir de la circonférence à 1,30 m (c13), du volume de l'arbre (v) et du coefficient de pondération (w) de l'arbre qui correspond au poids de l'arbre rapporté à l'hectare.

Nous avons analysé et agrégé les résultats à l'échelle des SER en rattachant chaque point d'inventaire à la SER dans laquelle il se situe par sélection spatiale sous ArcGIS®. Pour l'étude, nous avons sélectionné les SER situées en zone de plaines, 55 SER sont concernées.

## C. Les modèles utilisés dans l'étude

### 1) Les modèles de niche

Les modèles de niche sont des modèles qui établissent une relation statistique entre des variables climatiques et édaphiques et la présence-absence d'une essence à une échelle donnée.

La modélisation statistique permet aussi par la construction de la niche potentielle actuelle de se renseigner sur la gamme de valeurs d'une variable écologique dans laquelle l'essence se développe et donc de préciser les différentes composantes de la niche (Landmann, *et al.*, 2007). Chaque modélisateur aura le choix d'attribuer ou non une plus ou moins forte importance à une variable rentrée dans son modèle et de ne considérer que les variables climatiques ou alors toutes les variables écologiques comprenant par exemple des facteurs portant sur le sol. Les modèles de niche étant basés sur la présence observée actuellement sont dits empiriques.

Ces modèles peuvent permettre de simuler l'impact des changements climatiques. Puis selon les scénarios et les modèles climatiques choisis, dans les variables d'entrée du modèle, les valeurs actuelles sont remplacées par les valeurs prédites à une date d'échéance donnée (2050 dans ce présent travail). Ce calcul va alors permettre d'obtenir l'aire de répartition potentielle de l'essence dans le futur et d'examiner alors la régression ou l'extension potentielle de l'essence sous l'influence du changement climatique.

#### → Le modèle LERFoB (Nancy)

Le LERFoB a développé plusieurs modèles pour simuler la distribution potentielle de plusieurs essences forestières à différentes périodes futures en prenant en compte des variables climatiques mais également des variables édaphiques. Les données pour le climat actuel sont les données Aurelhy fournies au pas d'un kilomètre par Météo-France.

Le modèle de la distribution du hêtre a ainsi pu être réalisé et les facteurs les plus importants pour expliquer celle-ci ont été mis en évidence ainsi que l'intervalle de valeurs où les conditions écologiques sont les meilleures pour la croissance de l'arbre.

Pour ce modèle, la période de référence qui a permis de le calibrer est celle de 1961 à 1990 durant laquelle 6920 relevés phytoécologiques géoréférencés ont été sélectionnés à partir des bases de données EcoPlant et Sophy (Piedallu, Perez, Gégout, Lebourgeois, & Bertrand, 2009), permettant de caractériser la présence ou l'absence du hêtre selon un quadrillage de maille un kilomètre.

Le laboratoire a, au final, sélectionné 9 variables écologiques concernant trois gradients majeurs (les conditions thermiques, l'alimentation en eau et le niveau trophique des sols) en fonction desquelles une régression logistique donnant une probabilité de présence a été ajustée aux données de distribution.

Type de variable	Dénomination		
Energie	Température moyenne annuelle	Température moyenne d'hiver (décembre à février)	ETP Thornthwaite de printemps (mars à mai)
Alimentation en eau	Précipitations moyennes annuelles	Bilan hydrique de juillet (P-ETP Turc)	Réserve utile maximale des sols (RUM)
Contraintes hydriques et nutritionnelles	Engorgement temporaire	pH*	C/N*

\* variables bio-indiquées par la flore

**Figure 10 : Tableau des variables prises en compte dans le modèle de niche du LERFoB. Source : Piedallu *et al.* (2009)**

Pour modéliser la répartition future de *Fagus sylvatica*, les chercheurs du laboratoire ont ensuite simulé l'évolution de l'aire potentielle de distribution en fonction des prévisions du modèle HadCM3 (développé par le Hadley Centre) pour les deux scénarios A2 et B2. Les variables liées avec le climat (températures, précipitations, ETP, RUM) ont été simulées dans le futur pour représenter les conditions potentielles dans lesquelles les essences se trouveront. Les données ont été extraites pour la période de référence (1961-1990) mais également pour le futur divisé en trois périodes : 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100. Ensuite, les anomalies entre ces périodes et la période de référence ont été calculées puis interpolées au pas d'un kilomètre et ajoutées aux valeurs de la période 1961-1990 pour obtenir alors des simulations d'évolution de températures et de précipitations (Piedallu, Perez, Gégout, Lebourgeois, & Bertrand, 2009).

Avec ces données modélisées, la distribution des différentes espèces étudiées par le laboratoire, dont le hêtre, a été projetée, sur les périodes futures citées précédemment (voir annexe 3). Ceci a été réalisé à l'aide de SIG et pour chaque espèce étudiée, il a été possible de fixer un seuil de probabilité optimal au-dessus duquel l'espèce est considérée présente et en dessous duquel, elle est prédite absente.

Dans la modélisation de la distribution des espèces (le modèle ayant été fait sur 4 essences forestières françaises), sur les variables écologiques sélectionnées, seulement 4 à 5 se sont révélées significatives. En effet, les premières à ressortir dans les modèles sont les températures moyennes annuelles et le bilan hydrique de juillet ainsi que les variables édaphiques (pH et C/N).

Pour le hêtre, les variables les plus importantes dans la construction du modèle sont en premier les variables édaphiques (C/N et pH), puis la température moyenne annuelle, l'engorgement temporaire et le bilan hydrique de juillet. Comme l'autécologie du hêtre le montre, nous voyons dans ce modèle que l'essence est exclue des sols hydromorphes ou engorgés temporairement. De plus, il semble préférer les sols riches en azote.

Le hêtre présente une aire de distribution située plutôt dans des zones où la température moyenne annuelle est relativement fraîche (voire moyenne) et le bilan hydrique de juillet favorable. En ce qui concerne sa distribution future, les surfaces occupées par l'essence diminuent fortement au cours du temps. Les surfaces propices à l'essence sont divisées par deux entre la période de référence et 2040 puis diminuent entre 80 et 93 % d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

#### → Le modèle INRA (Champenoux)

Les étapes de construction du modèle de l'INRA sont identiques à celles présentées pour le modèle du LERFoB, seules les méthodes diffèrent, le principe restant le même.

Pour calculer l'aire climatique potentielle de l'essence, on recherche le modèle statistique qui explique le mieux la présence et l'absence de l'espèce à partir des données climatiques actuelles, ici les données Cerfacs. Les variables climatiques actuelles sont ensuite remplacées par leurs valeurs futures données par le modèle ARPEGE (scénario A1B) et le modèle nous donne la carte de présence potentielle du hêtre à l'horizon 2050. Le modèle ARPEGE qui prévoit l'évolution du climat à long terme a été conçu par le CNRM, laboratoire de Météo-France. Il est à maille variable centré sur la zone méditerranéenne, la maille se relâche donc lorsque l'on s'en éloigne. Sur la France, la résolution est de 100 à 150 km (Landmann, *et al.*, 2007). Mais la grille de ce modèle peut être basculée afin de changer la position du pôle et ainsi être étirée pour avoir une résolution plus fine qui permet de faire des études régionales. Les données utilisées par l'INRA ont ensuite été rentrées dans sa modélisation à une maille d'échelle 8 km (maille SAFRAN) pour la totalité de la période 1950-2100 (Voir annexe 4).

Contrairement au modèle du LERFoB, la méthode de régionalisation utilisée pour les prédictions futures n'est pas celle des anomalies mais la méthode des types de temps qui prend en compte, à l'inverse de la première, les changements de variabilité du temps. Un type de temps est un concept fondamental de la climatologie mais encore très complexe à expliquer car il est élaboré à partir de méthodes différentes et concerne des ensembles très divers (Boé, 2007). Trois échelles spatio-temporelles distinctes sont intégrées : l'échelle zonale des grands flux à laquelle les changements sont lents (ordre de la semaine, du mois ou de la saison), l'échelle régionale des masses d'air et des perturbations pluri-horaires et journalières et enfin l'échelle locale où les modifications sont rapides et horaires. Par l'imbrication de ces trois niveaux de prise en compte du climat, chaque situation atmosphérique au-dessus d'une zone obtient une spécificité et une variabilité (Godard & Tabeaud, 2004).

De ce fait, un type de temps peut être caractérisé par « l'apparition reconnaissable et récurrente, au-dessus d'un territoire géographique donné, d'une situation météorologique associée à des caractéristique bien déterminées du temps sensible ». Un de ses avantages est qu'en conséquence, il peut décrire finement les variables du climat sensible (température, précipitations, vents, etc.) aux échelles régionales à locales. En Europe occidentale, il existe une grande variété de types de temps avec une prédominance des situations cycloniques, notamment du fait de l'imbrication particulière des terres et des mers.

Dans le modèle de l'INRA, les variables les plus significativement corrélées à la présence-absence du hêtre sont introduites pas à pas. Le modèle le plus simple compte deux variables mais pour tester l'incertitude sur les projections futures, des modèles comptant jusqu'à sept variables ont été calibrés. Le modèle pris en compte dans ce travail est le modèle à sept variables. À l'inverse du modèle du LERFoB, les variables n'ont pas été choisies au préalable selon les connaissances autécologiques de l'espèce mais ont été évaluées à partir d'un échantillon de plus de quatre cents régresseurs.

Ces variables, selon un ordre décroissant de significativité sont :

- le nombre de jours de stress hydrique durant la saison de végétation
- le nombre de jours de gel durant la période estivale (juin à août)
- le nombre de degrés-jours de janvier à avril (base de 10 °C)
- les précipitations de février et mars
- les précipitations de novembre
- les températures maximales hivernales (décembre à février).

Les présences avec l'ajout de variables dans le modèle ne sont pas mieux modélisées mais la modélisation de l'absence de l'espèce est plus pertinente, ce qui apparaît plus intéressant pour l'étude de l'évolution future de la répartition du hêtre.

La présence du hêtre est donc fortement corrélée au stress hydrique estival, ce qui correspond aux connaissances actuelles sur l'autécologie du hêtre. La variable des degrés-jours est intéressante car

nous observons que son entrée dans le modèle le rend beaucoup plus pessimiste sur la présence potentielle future du hêtre (Voir annexe 4).

→ **Le modèle IKS ou indice Klimastrud (CNBF, Guéméné-Penfao)**

Dans ce modèle, pour s'informer sur la présence actuelle du hêtre, les données utilisées sont celles de l'IFN pour la distribution de l'essence à l'échelle française et celles d'Euforgen (European Forest Genetics Resources Programme) pour examiner la présence du hêtre au niveau européen, les limites de l'aire de répartition du hêtre ne se limitant pas aux frontières françaises, et enfin en ce qui concerne la distribution dans d'autres régions du monde, celles de GBIF (Global Biodiversity Information Facility).

Comme les autres modèles de niche étudiés, le modèle IKS se base sur la présence avérée de l'essence, mais avec le principe que la présence (naturelle ou suite à une introduction réussie) est une condition suffisante pour que l'on considère l'espèce présente dans tous les autres points ayant le même climat.

Les données climatiques utilisées sont, pour l'actuel, les données ARPEGE sans inclure les valeurs de rayonnement et, pour le futur, les données Worldclim. Pour établir le climat actuel, sont pris en compte les précipitations et les températures minimales et maximales mensuelles moyennes. L'insolation et l'humidité sont aussi calculées par une équation de régression, établie sur l'ensemble de l'hémisphère nord pour tous les mois, qui déduit le rayonnement net en fonction du rayonnement brut, des précipitations et des températures. Pour le futur, ce sont les scénarios et modèles du troisième rapport du GIEC qui sont utilisés, les données climatiques étant fournies étant les données Worldclim.

Le modèle est construit avec les variables climatiques dites limitantes pour les essences prises en compte :

- La température moyenne minimale du mois le plus froid (°C) (TMIA) : la valeur calculée est la moyenne des minimas du mois le plus froid (représentant la contrainte de froid pour les plantes et l'impact sur les différents organes de croissance et de reproduction tels les bourgeons et les fruits).
- La somme des températures maximales positives de l'année avec un calcul pour chaque mois (°C) (STMAX) exprimée en degrés-jours (représentant l'énergie solaire disponible pour la croissance et la reproduction de la plante).
- Le déficit hydrique (mm) (SDEF) : avec prise en compte de l'ETP, des précipitations et des variations de la réserve en eau du sol (représentant le déficit hydrique que subit la plante).

Pour chaque variable, les valeurs limites pour les essences sont fixées avec des gammes de valeurs variant pour chacune. Dans ses limites, l'espèce sera dite présente sachant que pour chacune des trois variables, les trois hypothèses suivantes sont énoncées :

- 1) Un facteur limitant n'exerce son action qu'au travers d'une seule limite.

En effet :

- Le froid hivernal n'est jamais insuffisant (limite dans les valeurs basses), c'est-à-dire que si la TMIA de la SER est supérieure à la limite inférieure de l'essence, celle-ci sera prédite présente.
- La quantité d'énergie n'est jamais trop forte (limite dans les valeurs basses), c'est-à-dire que si la STMAX de la SER est supérieure à la limite inférieure de l'essence, celle-ci sera prédite présente.
- Le stress hydrique n'est jamais trop faible (limite dans les valeurs basses), c'est-à-dire que si la SDEF de la SER est supérieure à la limite inférieure de l'essence, celle-ci sera prédite présente.

- 2) Les facteurs n'interagissent pas entre eux même si dépendant des mêmes variables climatiques, ils sont corrélés. Mais l'hypothèse veut alors que chaque variable ait un impact indépendant sur l'essence et donc l'effet d'une des variables ne dépend pas de la valeur prise par les autres.
- 3) Dans l'aire climatique potentielle calculée, la présence réelle de l'essence est influencée par des facteurs secondaires tels que la pédologie, les facteurs biotiques, la migration antérieure de l'espèce entre phases glaciaires et interglaciaires et enfin l'intervention de l'Homme), ces facteurs n'étant pas pris en compte dans le modèle.

Ainsi, pour chaque essence, nous avons trois probabilités climatiques de présence qui correspondent aux trois variables (TMIA, STMAX et SDEF) : P1, P2 et P3. La probabilité de présence climatique est donc le produit de ces trois valeurs.

Chaque limite climatique correspond à une courbe d'isovaleurs sur l'aire géographique à laquelle s'ajoute une zone de transition où l'espèce est disséminée. La plage d'incertitude est exprimée soit en % par rapport à la valeur moyenne fixée pour l'essence (ex : pour le hêtre, valeur du déficit hydrique : 250 mm avec, pour une marge d'incertitude de 10 %, une zone de transition allant de 225 mm à 275 mm), soit fixée par les valeurs minimales et maximales observées.

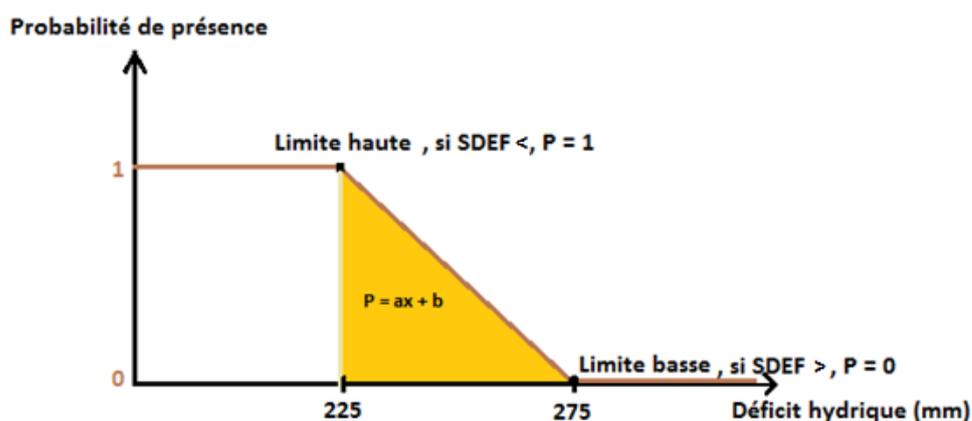


Figure 11 : Exemple graphique d'application du modèle IKS (source Hervé Le Bouler, communication personnelle)

Les valeurs limites sont obtenues par calcul SIG en émettant l'hypothèse fondamentale que ce sont les exigences autécologiques, aussi bien climatiques qu'édaphiques, de l'essence qui conditionnent la réussite de l'introduction ou de la conservation de l'essence. Puis une comparaison est faite avec la présence de l'essence selon les bases de données servant pour décrire la présence actuelle, ce qui permet de mettre en évidence la limite de l'aire, c'est-à-dire là où nous observons l'arrêt de la présence.

Pour un point  $P_i$  dans la zone d'étude, nous avons trois variables climatiques locales ( $V_{i1}$ ,  $V_{i2}$  et  $V_{i3}$ ) avec donc trois probabilités climatiques ( $P_{i1}$ ,  $P_{i2}$ ,  $P_{i3}$ ), la probabilité de présence climatique est égale au produit de ces trois valeurs. Pour chaque point une valeur est attribuée et par projection sous SIG, nous obtenons alors une matrice de probabilité de présence.

La même méthode est mise en œuvre avec les données futures pour observer la diminution de l'aire de distribution avec l'impact des changements climatiques (annexe 5).

## 2) Le modèle de processus : le modèle CASTANEA

Les modèles basés sur les processus sont réalisés à l'échelle de l'arbre, du peuplement voire de la région ou du biome lorsque l'on considère une espèce ou un groupe d'espèces. Ils représentent des mécanismes qui contrôlent la présence de l'espèce comme la croissance, la reproduction, la dispersion, la mortalité, etc. (Landmann, *et al.*, 2007).

Le modèle CASTANEA est un modèle basé sur les processus écophysologiques construit à partir de synthèse de plusieurs modèles. Il simule les flux et les stocks de matière et d'énergie dans un peuplement forestier équienne et monospécifique.

Le peuplement forestier est représenté par un arbre moyen sans prendre en compte la variabilité entre arbres, le houppier est homogène horizontalement mais divisé verticalement en plusieurs strates d'indice foliaire de même épaisseur. En fonction de la profondeur du couvert, le bilan radiatif, l'azote foliaire et la masse surfacique suivent des fonctions décroissantes. La photosynthèse pour chacune de ces strates est alors calculée. La lumière incidente directe et diffuse ainsi que la masse foliaire diminuent de manière exponentielle à l'intérieur de la canopée. L'azote foliaire, exprimé en masse d'azote par unité de surface foliaire en  $\text{g.m}^2$  de feuilles, est calculé à partir de la concentration d'azote mesurée dans la matière sèche des feuilles. Celui-ci est supposé constant à l'intérieur de la canopée. L'arbre moyen est subdivisé en différents compartiments fonctionnels : les compartiments ligneux (tronc, branches et grosses racines), les feuilles, les racines fines et les réserves carbonées localisées dans le compartiment ligneux.

Le fonctionnement du modèle nécessite des données d'entrée météorologiques à un pas de temps semi-horaire, horaire ou journalier. Les principaux processus simulés par le modèle sont :

1) à l'échelle semi-horaire ou horaire : la production primaire brute, la respiration autotrophe (respiration de croissance et d'entretien) de tous les organes, la respiration hétérotrophe (sol et matière organique), la transpiration et l'évapotranspiration du couvert ;

2) à l'échelle journalière : l'allocation du carbone aux différents compartiments et leurs croissances, la dynamique de l'indice foliaire, la **phénologie**, la mortalité des racines fines et le contenu en eau dans le sol.

Le carbone alloué aux organes correspond aux assimilats carbonés disponibles pour la croissance après la satisfaction de la respiration d'entretien, la formation et la respiration de croissance des feuilles lors de la saison de végétation. Le carbone disponible est réparti vers les différents organes selon des coefficients d'allocation variables selon la saison, l'organe et sa priorité, l'année, l'âge des arbres et la fertilité de la parcelle (Davi *et al.* 2009). L'effet de la concentration de  $\text{CO}_2$  est directement pris en compte par le modèle de photosynthèse. Le modèle reproduit en même temps l'amélioration observée de la photosynthèse et la réduction de la conductance stomatique en raison de l'augmentation du  $\text{CO}_2$ , supposée ici sans aucun effet direct.

Les différents évènements phénologiques (croissance des feuilles, débourrement, croissance, début de jaunissement des feuilles et enfin chute des feuilles) sont modélisés par jour, selon les degrés-jours et la durée jour (Delpierre, 2010). Lors du débourrement, le développement et la croissance des feuilles dépendent de la surface foliaire maximale, qui est simulée à partir des réserves de carbone disponibles et représentée par la concentration des réserves dans l'**aubier**. Tant que la productivité primaire brute (PPB) est nulle, les réserves sont la seule source d'assimilats pour satisfaire la respiration d'entretien de tous les organes et la croissance des feuilles. Une fois que l'assimilation nette du carbone devient positive (après allocation pour les processus cités auparavant), les assimilats restants sont attribués, selon la saison, à la croissance des organes ligneux, aux racines fines et aux réserves.

Dans le modèle, la mortalité des arbres est aussi prise en compte, elle est estimée à partir de la concentration de glucides des réserves, l'arbre étant considéré comme mort lorsque celle-ci devient trop faible.

Pour la simulation de ces processus, CASTANEA prend en compte diverses variables météorologiques qui sont, à l'échelle de l'heure, la pluviométrie, le rayonnement global, la vitesse du vent, l'humidité atmosphérique, la température ou encore la concentration en  $\text{CO}_2$ . La durée des simulations correspond à un cycle dans la gestion forestière, on considère qu'une première coupe est faite quand le peuplement atteint 40 ans puis ensuite les autres coupes interviennent tous les 10 ans. Le climat actuel a été retranscrit à partir des données des années 1970-2001 et pour le futur, la période 2046-2065 a été choisie. La durée du cycle complet de gestion forestière est de 150 ans pour le modèle. Le modèle fournit alors des données sur la productivité des peuplements au présent et dans le futur. L'analyse de ces prédictions repose sur un indicateur principal, choisi par les modélisateurs, qui est la somme du volume de bois récolté au cours du cycle de gestion, considéré ici comme un indicateur d'aptitude des arbres. Leur mortalité est prise en compte et est représentée dans le modèle par une quantité de bois mort accumulée au cours du cycle et enlevée ensuite à la quantité simulée de bois récolté dans le même temps.

CASTANEA nous permet d'avoir une prévision future de la productivité pour l'année 2050. La carte est disponible en annexe 6, en gardant à l'esprit que la distribution actuelle du hêtre comprend aussi les choix sylvicoles faits par les gestionnaires (impacts anthropiques). Pour une meilleure description plus complète et détaillée du modèle, il est conseillé de se référer aux articles de Dufrêne *et al.* (2005) et de Davi *et al.* (2005).

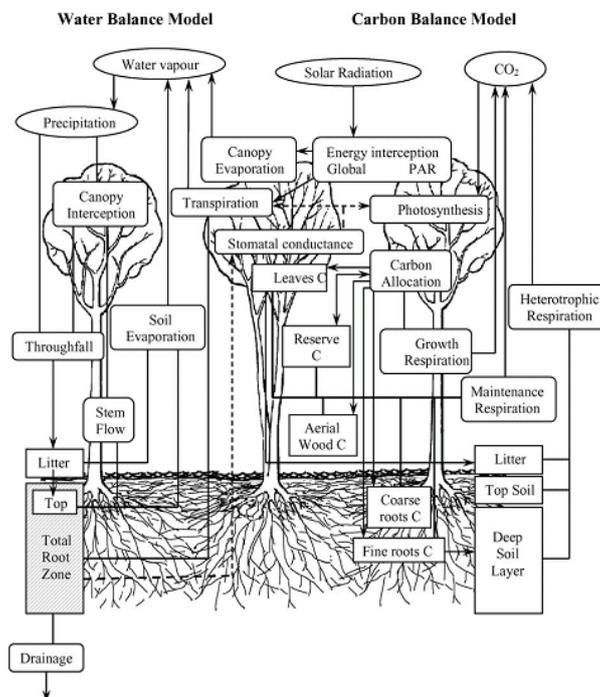


Figure 12 : Diagramme de flux de l'eau et du carbone. Les carrés correspondent à des variables d'état ( $\text{C}$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ), les carrés arrondis correspondent à des flux ( $\text{C}$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ) et les ronds en forme d'ellipses à des variables de forçage météorologique. Chaque flèche correspond à un flux d'eau ou de carbone d'un compartiment à un autre. Les flèches en pointillé correspondent à (i) l'influence de l'eau du sol sur l'ouverture des stomates et (ii) le contrôle des stomates par la transpiration et la photosynthèse. (Dufrêne, Davi, François, Lemaire, Dantec, & Granier, 2005).

### 3) Tableau récapitulatif des méthodes des différents modèles

	Modèle LERFoB	Modèle INRA	Modèle IKS	Modèle CASTANEA
<b>Variables écologiques prises en compte dans le modèle</b>	C/N	Nombre de jours de stress hydrique	Déficit hydrique annuel	Production primaire brute (PPB)
	pH	Nombre de jours de gel en été (06, 07, 08)	Somme des températures mensuelles maximales positives	Respiration autotrophe aérienne et souterraine
	T°C moyenne annuelle	Degrés-jours de janvier à avril	Moyenne des minimales du mois le plus froid	Allocation du carbone (croissance)
	Engorgement temporaire	P de février à mars		Evapotranspiration du couvert
	BH 07 (P - ETP Turc)	P de novembre		Phénologie (indice foliaire)
	RUM des sols	T°C maximales hivernales		Processus modélisés
	P moyennes annuelles			
	T°C moyenne d'hiver (12, 01, 02)			
	ETP de Thorntwaite de printemps (03, 04, 05)			
<b>Maille</b>	1km	8km (maille SAFRAN)	5min (environ 10km)	8km
<b>Données de distribution</b>	ECOPLANT et SOPHY	IFN	IFN + Euforgen	Forêt monospécifique équienne
<b>Données Climat actuel</b>	Données Aurehly (1961-1990)	Données ARPEGE	Aurehly (P, T) + modèle de rayonnement à partir de données CRU	Arbre moyen représente le peuplement simulé
<b>Scénario émission</b>	A2	A1B	Moy. 6 projections	Pas de temps pour la simulation des processus : horaire et journalier. Durée de simulation : 150 ans.
<b>Modèle climatique</b>	HadCM3 (IPCC)	ARPEGE	ARPEGE	ARPEGE
<b>Régionalisation</b>	Tyndall + Méthode des anomalies	Méthode des types de temps à partir de la base de données SAFRAN	ARPEGE + méthode des anomalies	Types de temps
<b>Modélisation futur</b>	Carte des probabilités de présence/absence	Carte des probabilités de présence/absence	Carte des probabilités de présence/absence	Carte de prédiction des variations entre 1985 et 2055 de la productivité

Figure 13 : Tableau récapitulatif des méthodes utilisées dans la confection des 4 modèles d'impacts (Pecquet, 2011)

## **D. Production d'indices d'enjeux, de vulnérabilité et de risque**

### **1) Les enjeux sylvicoles**

Dans notre étude, il nous importait de quantifier les enjeux sylvicoles représentés par le hêtre dans chaque SER pour mettre en évidence dans un premier temps un classement des SER allant des SER où les enjeux sont les plus importants aux SER où les enjeux sont négligeables notamment car le hêtre n'y est pas présent.

L'analyse des enjeux a été réalisée grâce au logiciel R (Husson, Lê, & Pagès, 2009) (Lafaye, Drouilhet, & Liquet, 2011) à partir des données IFN citées précédemment à savoir les données « Placettes » et les données « Arbres ». Pour représenter l'importance sylvicole du hêtre dans la SER, nous avons choisi de calculer le volume et la surface terrière qu'il y représentait.

Nous avons calculé tout d'abord le volume et la surface terrière pour chaque arbre répertorié dans la placette en le pondérant par le coefficient qui permet de lui allouer un poids à l'hectare ; tous les arbres n'étant pas mesurés, cela amène à avoir une valeur générale de l'essence après calcul.

Pour le volume (noté  $V$ ), la valeur du volume de l'arbre a donc été multipliée par ce coefficient :

$$V = v * w \text{ (} V \text{ et } v \text{ en mètres cubes)}$$

Pour la surface terrière (notée  $G$ ), nous avons utilisé la formule suivante :

$$G = ((c13/100)^2/4\pi) * w \text{ (} G \text{ en mètres carrés, } c13 \text{ en centimètres)}$$

Ces calculs nous ont permis d'obtenir le volume et la surface terrière par placette. Pour chacune d'entre elles, nous avons calculé selon la même méthode le volume et la surface terrière du hêtre.

Nous avons pu calculer ainsi la part du hêtre au sein de chaque placette. Puis par agrégation, nous avons obtenu les mêmes résultats mais cette fois-ci à l'échelle de la SER.

Pour avoir une représentation correcte de la place du hêtre dans la SER, après avoir séparé les placettes où le hêtre était présent (le hêtre apparaissant au moins une fois dans les données) ou absent, par multiplication avec ce nombre de placettes, nous avons obtenu le volume de hêtre et la surface terrière totaux représentés par chaque SER. Les SER ont ensuite été classées selon le niveau d'enjeu dégagé, niveau que nous avons choisi de valoriser par la valeur de la surface terrière totale de hêtre de la SER (tableau en annexe 7).

### **2) L'indice de vulnérabilité**

Comme le précisent Kolström, Vilén et Lindner (2011) dans leur étude sur l'impact du changement climatique sur les forêts européennes, la vulnérabilité se définit comme le degré auquel les individus, groupes et systèmes à des niveaux et dans des situations géographiques différents sont en mesure de faire face au changement climatique et de s'adapter à celui-ci, à sa variabilité et à ses extrêmes. Plus l'essence aura des difficultés à s'adapter, plus elle sera considérée comme vulnérable.

Pour ce travail, la vulnérabilité est définie comme la perte que le changement climatique va éventuellement engendrer que ce soit en termes de présence potentielle ou en termes de productivité, cela dépendant du modèle considéré. Il a été décidé de l'évaluer par le taux de variation entre la période actuelle et l'horizon 2050 pour les données de chaque SER.

$$\text{Taux de variation} = (\text{Valeur future} - \text{Valeur présente}) / \text{Valeur présente}$$

Pour la quantifier, nous avons fait le choix de prendre une valeur relative permettant de comparer le modèle CASTANEA, qui modélise des productivités, et les modèles de niche, qui modélisent des probabilités de présence.

Pour les modèles de niche, nous avons calculé, pour chacun et par SER, le taux de variation de la probabilité de présence entre l'actuel et 2050 puis nous avons moyenné pour avoir une valeur de la vulnérabilité du hêtre pour l'ensemble des trois modèles de niche.

L'indice de vulnérabilité final est la moyenne du taux de variation observé chez les modèles de niche avec le taux de variation du modèle CASTANEA. Il représente l'impact du changement climatique sur l'essence en donnant ainsi une estimation de la perte ou du gain potentiels vis-à-vis des peuplements où le hêtre est présent.

### 3) L'indice de risque global

En considérant que le risque est la combinaison des enjeux exposés et de leur vulnérabilité, notre indice de risque associé à l'impact du changement climatique sur le hêtre est une pondération de l'indice de vulnérabilité globale par les enjeux sylvicoles exprimés par la surface terrière. Nous avons ainsi un ordre de grandeur de la perte potentielle en m<sup>2</sup> par hectare du hêtre par SER.

### 4) L'incertitude

En comparant quatre modèles d'impacts, nous nous confrontons inévitablement à des résultats hétérogènes. Des divergences sont donc observées entre les modèles INRA, LERFoB et IKS ainsi qu'entre les résultats de ces derniers et du modèle CASTANEA.

Cette divergence nous apparaît être une façon d'apprécier l'incertitude qui existe quant aux impacts modélisés sur l'essence, finalement représentés par l'indice de vulnérabilité défini auparavant. Nous calculerons cet indice au sein des modèles de niche d'une part, et entre ces derniers et le modèle de processus d'autre part.

Pour la mesurer, nous avons calculé l'écart type entre les valeurs des taux de variation par SER. L'indice d'incertitude pour les modèles de niche est évalué selon la formule suivante :

Indice d'incertitude (modèles de niche) =

$$((\text{Var LB} - \text{Var MN})^2 + (\text{Var VB} - \text{Var MN})^2 + (\text{Var CP} - \text{Var MN})^2)^{0,5}$$

Où : Var LB = Vulnérabilité modèle IKS (modélisateur Hervé Le Bouler)

Var VB = Vulnérabilité modèle INRA (modélisateur Vincent Badeau)

Var CP = Vulnérabilité modèle LERFoB (modélisateur Christian Piedallu)

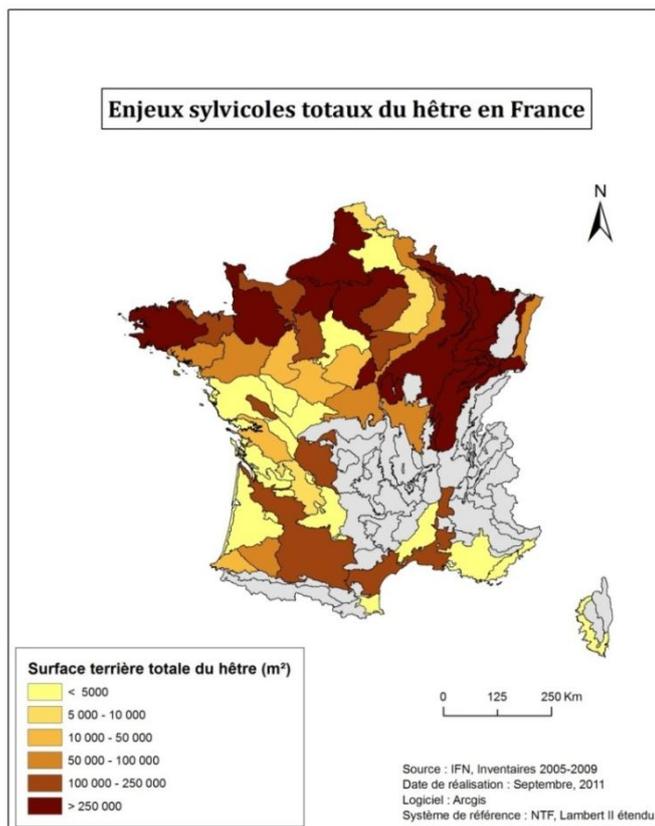
Var MN = Vulnérabilité modèles de niche

Le même principe a été appliqué pour le calcul de l'incertitude globale entre les quatre modèles. Pour avoir une meilleure représentation du comportement des modèles, de la divergence qui existe entre eux, des analyses statistiques ont été faites grâce au logiciel R (Lafaye, Drouilhet, & Liquet, 2011) et au package FactoMineR.

## Partie III : Résultats

### A. Analyse des enjeux sylvicoles des SER

Les enjeux sylvicoles que l'on a choisi de représenter par la surface terrière totale de hêtre dans la SER (en m<sup>2</sup>) sont exprimés dans la carte ci-dessous.



**Figure 14 : Carte de distribution des enjeux sylvicoles totaux du hêtre par SER (Réalisation : Pauline Pecquet, septembre 2011)**

Nous observons que les enjeux sont plus importants dans la moitié nord de l'hexagone notamment dans le Nord-Est et en Normandie. La présence de la Bretagne étonne plus étant donné le faible taux de boisement de la région (13 %) et la faible part du hêtre dans les peuplements (moins de 5 %) mais les enjeux étant une valeur de surface terrière, le hêtre apparaît comme une essence importante pour la production (il représente d'ailleurs 8,5 % du volume total de la région). Les enjeux les plus importants sont donc en zone de plaine les plateaux calcaires du Nord-Est, les collines périvosgiennes et le Warndt ainsi que les dépressions argileuses du Nord-Est, viennent par la suite des SER de la façade Ouest telles que les côtes et les plateaux de la Manche où le hêtre occupe effectivement une place importante dans la région. En effet, en région Basse-Normandie, il représente un tiers de la surface forestière et presque la moitié est en peuplements monospécifiques. La zone des enjeux les plus importants se poursuit ensuite vers les plateaux de l'Eure et le bassin parisien tertiaire. Vers l'Est, les zones aux forts enjeux sylvicoles forment une ligne droite partant des Ardennes et de l'Alsace puis qui descend vers le Nivernais, le long de la Saône jusqu'à la Bresse et les Dombes. Les abords pyrénéens au bord de l'aire de distribution de hêtre ressortent également comme les plaines languedociennes en région méditerranéenne. Les enjeux deviennent de plus en plus faibles par la suite à mesure que le hêtre disparaît des paysages forestiers vers les littoraux atlantiques et nordistes.

## B. Analyse comparée des simulations des 4 modèles

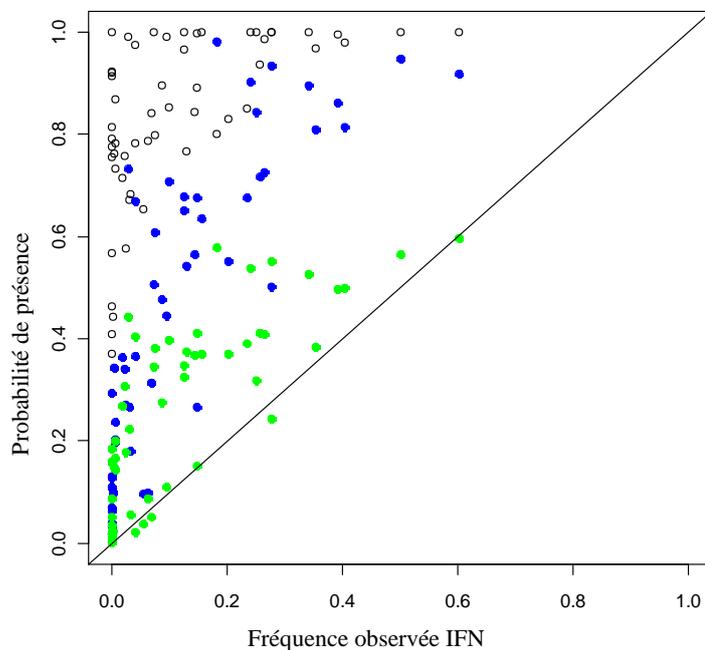
Dans un premier temps, nous avons choisi de nous pencher sur l'analyse des modèles de niche plus facilement comparables entre eux car basés sur les mêmes principes de construction et simulant tous une probabilité de présence.

### 1) Comparaison des simulations des modèles

#### ➤ Sur la période actuelle

Les trois modèles de niche, comme nous l'avons vu précédemment, sont basés certes sur le même principe de construction mais la méthode entreprise par chaque modélisateur est différente que ce soit au niveau des données prises en compte ou dans les méthodes de calcul. La comparaison de la distribution des probabilités simulées pour la période actuelle par les trois modèles l'illustre bien (figure 15). En effet, chaque modèle a une amplitude différente dans la distribution des probabilités par SER.

**Figure 15 : Distribution des probabilités de présence moyenne par SER selon les 3 modèles de niche en fonction de la fréquence observée du hêtre dans les placettes de l'IFN (ronds vides : modèles IKS, ronds bleus : modèles INRA, ronds verts : modèle LERFoB).**



Nous observons tout d'abord que tous les modèles sont situés bien au-delà de la fréquence réelle du hêtre (égale ici au rapport entre le nombre de placettes où le hêtre est présent, c'est-à-dire où il existe au moins un hêtre avec un diamètre de plus de 7,5 cm, et le nombre total de placettes dans la SER), dont la distribution estimée à partir des données de l'IFN est représentée à titre de comparaison. Cela est dû au principe même du modèle de niche qui prédit une probabilité de présence d'un point de vue climatique, l'impact anthropique n'étant pas pris en compte. Puis nous voyons qu'entre modèles de niche, les disparités surviennent et sont assez frappantes. Le modèle IKS, qui a une médiane située au-dessus de 0,8, laisse supposer que le hêtre pourrait être présent dans la majorité des SER, tandis que celles des autres modèles sont bien plus basses. Les différences intrinsèques aux modèles dues à des choix de méthodes différentes ou des sources de données peuvent expliquer cette disparité à ce stade, le choix de la maille spatiale peut jouer également. Le modèle IKS utilise un grain spatial plus grossier et prend en compte la présence du hêtre à l'échelle européenne, cela peut expliquer ses hautes valeurs de probabilité.

Par convention, les modèles de niche font un partage net entre la présence et l'absence de l'essence autour d'une probabilité de 0,5. L'espèce étudiée devrait alors être réellement observée sur tous les points au-delà du seuil de probabilité de présence, choisi grâce à la courbe ROC, c'est-à-dire là où elle

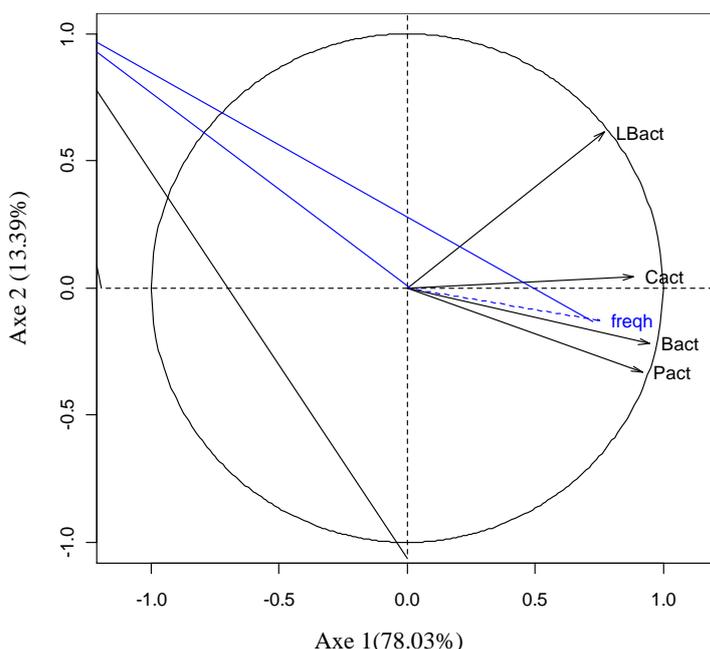
est climatiquement susceptible d'être présente. Or pour tous les modèles de niche, la comparaison avec les données IFN nous montre que la dispersion du hêtre sur le territoire métropolitain n'est pas aussi nette et que l'essence est absente d'une multitude de points où elle pourrait être présente au vu des conditions climatiques.

Cela est dû soit à la dynamique naturelle de la forêt ou soit à l'effet anthropique, à savoir l'impact des choix sylvicoles passés (Landmann, *et al.*, 2007), si l'on considère que ces modèles expriment parfaitement la réalité. Dans les SER de la façade atlantique, le hêtre est absent ou rare actuellement mais cela serait plutôt dû à l'histoire des peuplements ou à la compétition avec des essences plus dynamiques qu'aux conditions climatiques qui n'apparaissent pas si défavorables pour le hêtre. Même si à ce propos, nous pouvons souligner que le hêtre apparaît très compétiteur dans la forêt de Fontainebleau là où il n'est pas dans ses conditions optimales de croissance (Myriam Legay, communication personnelle). L'histoire du hêtre a beaucoup plus joué dans cette répartition. La mise en valeur du taillis sous-futaie dans certaines régions a pu favoriser son élimination, de plus l'essence est une dryade donc une espèce de fin de succession, elle a besoin d'une certaine maturité des peuplements pour être présente. Par ailleurs, le hêtre plus présent dans les forêts publiques, l'est moins dans les forêts privées qui représentent environ 2/3 des forêts françaises.

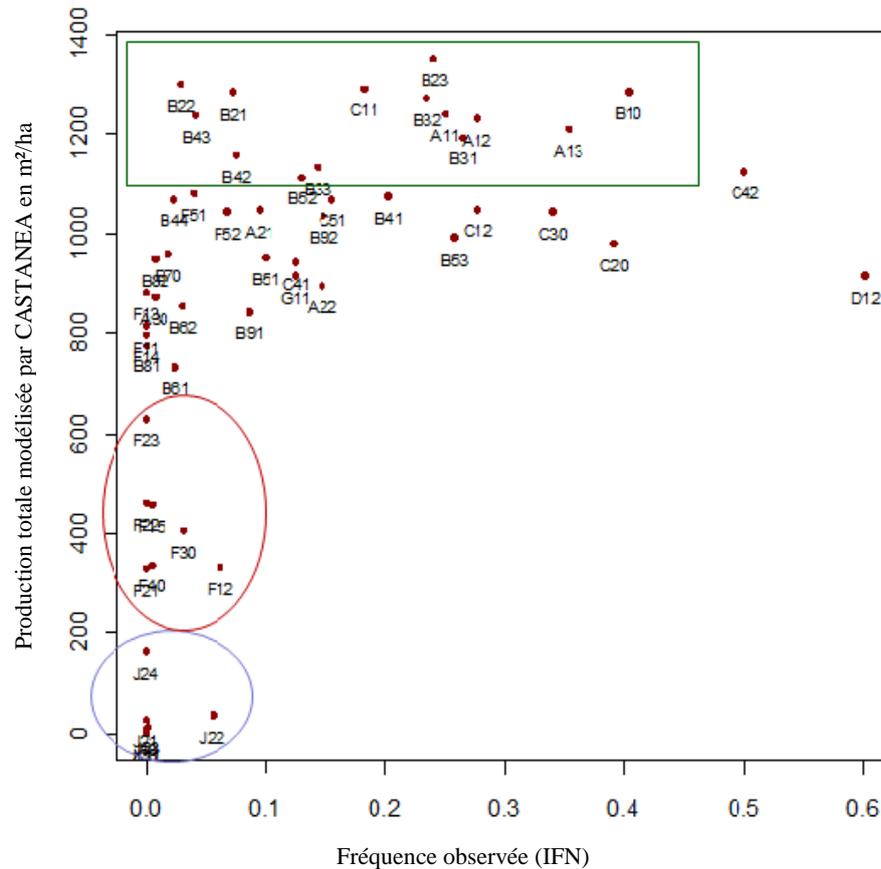
Les modèles de niche, même s'ils calculent des valeurs absolues de probabilités de présence actuelles différentes, semblent tous correctement reproduire les modulations dans l'espace de l'aire de distribution du hêtre en France comme le montre le graphique (figure 15). La répartition des probabilités de présence moyenne de chaque modèle suit une même tendance. Nous observons une relation entre les probabilités de présence simulées et le patron de l'IFN. Cela illustre donc bien le fait que la niche réalisée d'une essence est différente de sa niche théorique. Il serait très difficile pour un modèle de représenter la niche réellement observée, l'influence de la gestion passée et actuelle étant trop forte et impossible à prendre en compte.

Considérons maintenant les projections des modèles, après centrage et réduction, ce qui permet d'introduire CASTANEA dans la comparaison.

Dans le graphique 16, nous observons la façon dont le modèle CASTANEA, modèle de processus, s'insère dans la comparaison entre les divers modèles d'impact. Nous pouvons observer que CASTANEA projeté dans l'ACP ne diverge pas fortement des autres modèles, il semble plus corrélé aux modèles de l'INRA et du LERFoB qu'au modèle IKS.



**Figure 16 : ACP sur les probabilités de présence moyenne des modèles d'impact centrés-réduits pour la période actuelle. LBact = modélisation actuelle IKS, Bact = modélisation actuelle INRA, Pact = modélisation actuelle LERFoB, Cact = modélisation actuelle CASTANEA. (Sources : V. Badeau (2011), H. Le Boulter (2011), C. Piedallu (2009), C. François (2011))**



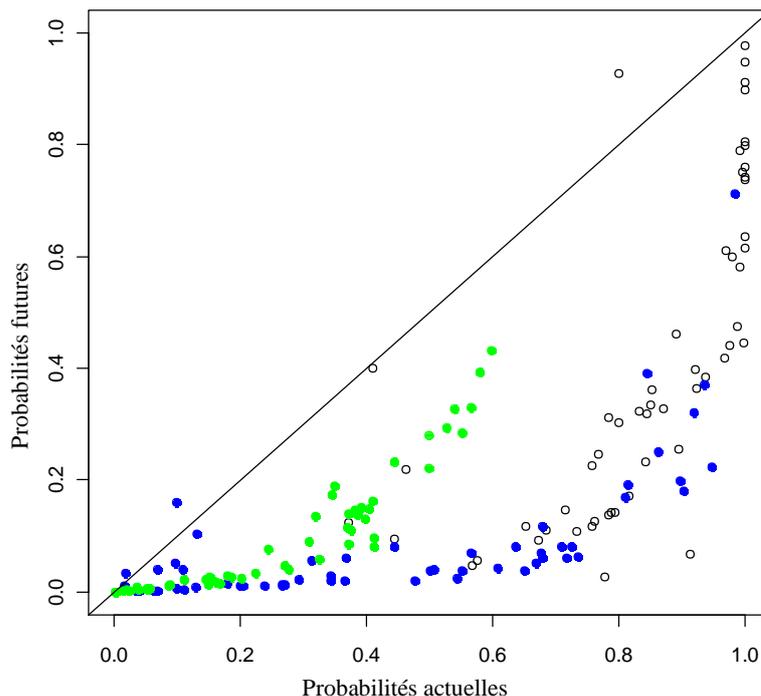
**Figure 17 : Graphique représentant la productivité modélisée par le modèle CASTANEA (pour une révolution de 150 ans) par rapport à la fréquence observée IFN pour la période actuelle (sources : C. François, CNRS, 2011 & données IFN, 2009). Les ronds rouges représentent les SER dont le code est cité.**

Le graphique 17 montre la productivité modélisée par le modèle CASTANEA selon la fréquence observée du hêtre dans les placettes IFN. Entourées en bleu, les SER méditerranéennes : nous voyons que le modèle y calcule une faible productivité du hêtre, ce qui rejoint la réalité. Les SER entourées en rouge correspondent aux SER du Sud-Ouest océanique, où le hêtre est absent ou rare actuellement, ce qui laisse supposer que soit la concurrence a été forte au vu de la faible vitalité du hêtre, et qu'une sélection naturelle s'est produite, ou alors que les choix de gestion antérieurs étaient bien pensés. Enfin, les SER situées sur le graphique dans le carré vert foncé sont des SER où le modèle calcule de fortes productivités, or nous voyons que ce n'est pas forcément là où le hêtre est fréquent actuellement, particulièrement dans le Nord de la France comme dans la Plaine picarde (B22), la Flandres (B21), la Brie et le Tardenois (B42) ou encore la Champagne crayeuse (B43). Les SER où le hêtre aurait une meilleure productivité actuellement seraient le Mosan, la Thiérache et le Hainaut, l'Ardenne primaire et les Côtes et plateaux de la Manche.

### ➤ La période future

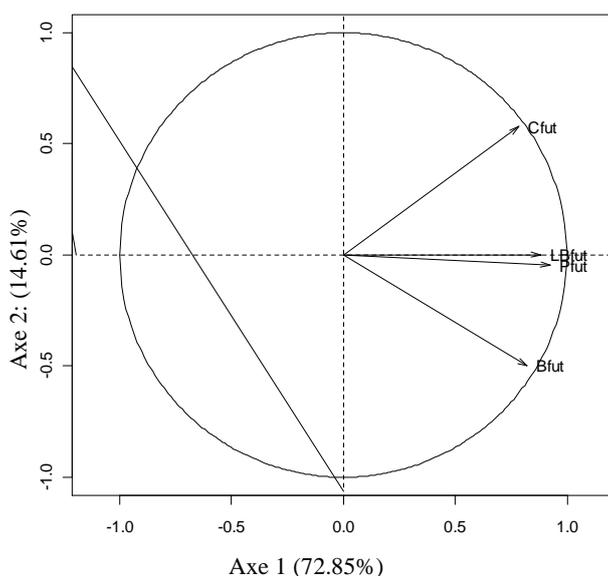
Nous nous apercevons en premier lieu avec le graphique 18 ci-dessous que la gamme des probabilités de présence du hêtre se réduit entre l'actuel et l'horizon 2050. Dans tous les cas, les modèles suivent une tendance générale croissante. Nous remarquons quelques exceptions, en effet dans quelques projections du modèle de l'INRA, celui-ci calcule une probabilité de présence future plus élevée que la probabilité actuelle. Or ces SER sont les SER méditerranéennes qui ont actuellement une faible probabilité de présence du hêtre au vu du climat. Cette particularité est probablement due au fait que, comme pour les zones d'altitude que nous avons exclues de notre étude, les modèles climatiques divergent dans leurs prévisions dans le Sud de la France.

**Figure 18 : Distribution des probabilités de présence moyenne par SER de 2050 par rapport à l'actuel (ronds vides : modèle IKS, ronds bleus : modèle INRA, ronds verts : modèle LERFoB). Sources : V. Badeau (2011), C. Piedallu (2009), H. Le Bouler (2011), C. François (2011).**



Par ailleurs, nous observons que pour une probabilité actuelle donnée, les projections des modèles INRA et IKS sont proches du moins dans la gamme où ils sont comparables. Par contre, le modèle du LERFoB est plus conservatif que le modèle de l'INRA, c'est-à-dire que pour une probabilité de présence actuelle donnée, il projette une probabilité future plus élevée. Cela est peut-être dû à l'utilisation de données sol dans le modèle du LERFoB.

Comme pour l'actuel, considérons maintenant les projections des modèles, après centrage et réduction, ce qui permet d'introduire CASTANEA dans la comparaison (figure 19).

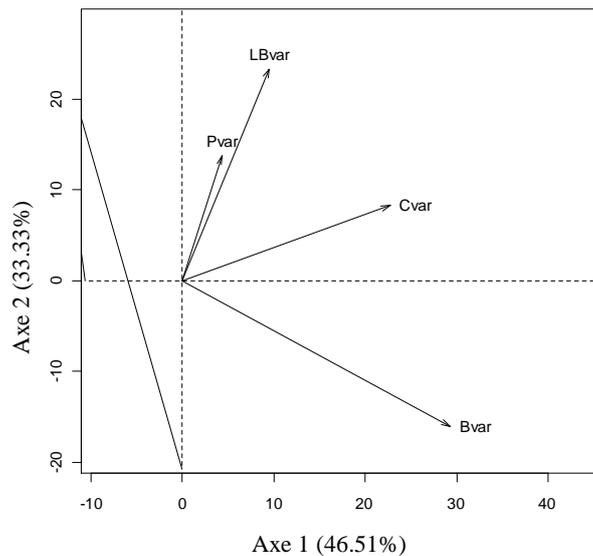


**Figure 19 : ACP sur les probabilités de présence moyenne des quatre modèles centrés-réduits pour 2050. Lbfut = modélisation future IKS, Bfut = modélisation future INRA, Pfut = modélisation future LERFoB, Cfut = modélisation future CASTANEA (sources : V. Badeau (2011), H. Le Bouler (2011), C. Piedallu (2009), C. François (2011))**

Comme pour l'actuel, le modèle CASTANEA apparaît comparable aux modèles de niche. Le modèle IKS qui apparaissait plus proche du modèle de l'INRA apparaît maintenant plus proche du modèle du LERFoB. Même pour la comparaison entre modèles de niche, cette façon de procéder semble plus pertinente que la précédente car elle permet de s'affranchir du problème du niveau absolu de probabilités mis en évidence sur l'actuel.

### ➤ Taux de variation

Par calcul de la différence du taux de variation entre les probabilités modélisées dans le présent et pour 2050, la vulnérabilité globale pour les modèles de niche a été évaluée. La prise en compte du taux de variation permet d'intégrer CASTANEA dans la comparaison sans centrage et réduction préalable.



**Figure 20 : ACP sur les taux de variation moyens des quatre modèles d'impacts non centrés-réduits (sources : V. Badeau (2011), H. Le Bouler (2011), C. Piedallu (2009), C. François (2011))**

Nous observons une nouvelle fois sur la figure 20 que l'opposition des méthodes entre les modèles de niche, d'une part et CASTANEA, d'autre part, ne se traduit pas par une opposition dans les projections. C'est le modèle de l'INRA qui s'écarte plus des autres.

De notre point de vue pragmatique, ce constat justifie la prise en compte du modèle CASTANEA dans la construction de nos indices.

## 2) Synthèse des simulations des modèles

### ➤ Pour le taux de variation des 4 modèles : indice de VULNÉRABILITE

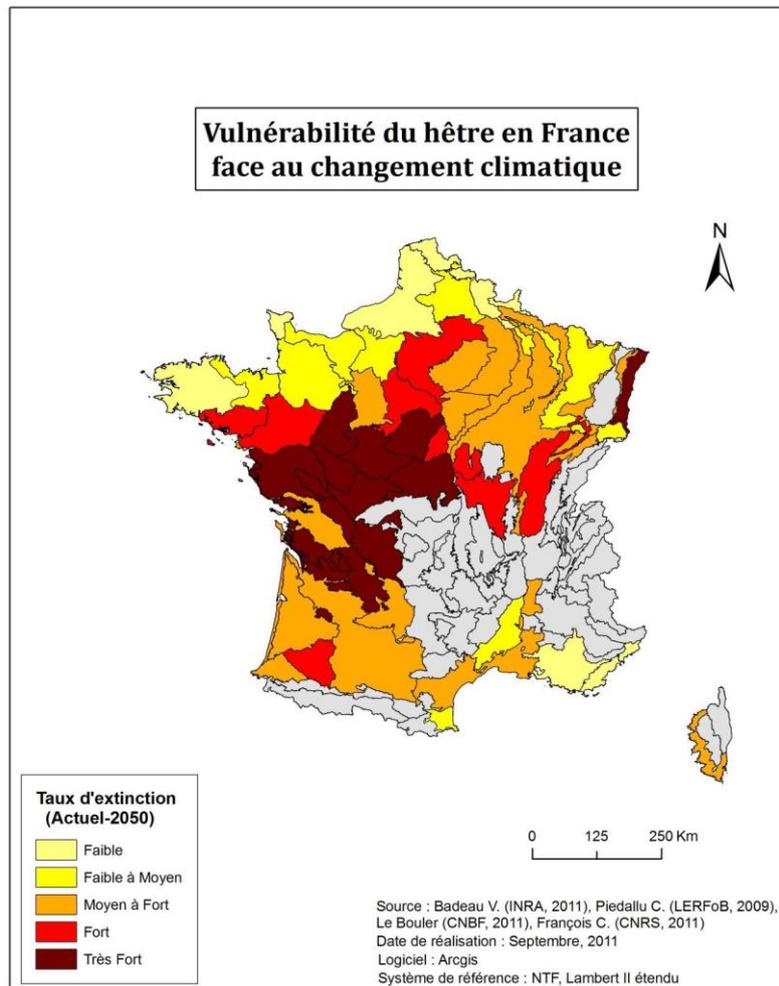


Figure 21 : Carte de la vulnérabilité par SER du hêtre selon les quatre modèles d'impact (Sources : V. Badeau (2011), C. Piedallu (2009), H. Le Bouler (2011), C. François (2011)). Les taux d'extinction correspondant en % : Faible = < 20%, Faible à Moyen = 20-35%, Moyen à Fort = 35 à 47%, Fort = 47-65%, Très Fort = > 65%, intervalles faits à partir des intervalles de Jenks sous ArcGIS. Réalisation : Pauline Pecquet, septembre 2011.

Nous observons sur la carte de la figure 21 représentant notre indice de vulnérabilité global que celui-ci est en général moins fort que l'indice ajusté seulement sur les modèles de niche à l'échelle de la France. Le hêtre est faiblement vulnérable le long de la façade qui va de la Bretagne au Nord sur une marge comprise entre 150 et 200 km ainsi qu'en zone méditerranéenne. La vulnérabilité est toujours aussi forte dans les SER du centre nord semi-océanique et du Sud-Ouest océanique. Elle reste importante lorsque l'on se dirige vers l'est avec un pic dans le Sundgau alsacien et belfortain avec un taux d'extinction du hêtre proche de 70 %.

L'introduction de CASTANEA dans le calcul de l'indice de vulnérabilité, par rapport à l'indice calculé seulement pour les modèles de niche, semble amoindrir l'intensité des prévisions. En effet, des SER qui apparaissaient très vulnérables dans le calcul pour les seuls modèles de niche sont dorénavant dotées d'un indice global de vulnérabilité plus bas.

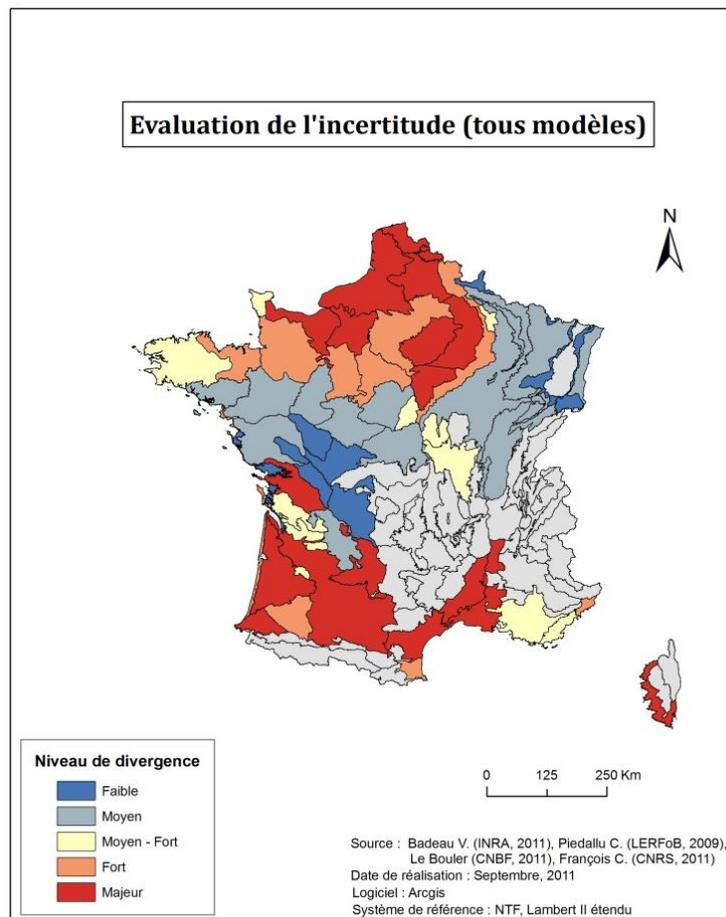
Ceci vient probablement du fait que CASTANEA juge une variation de la productivité des arbres, il apparaît donc moins violent dans son taux de variation que les modèles de niche qui jugent soit de

l'absence du hêtre soit de sa présence potentielle. Seules deux réponses sont possibles : 0 pour l'absence, 1 pour la présence. Ce qui peut paraître simpliste dans le sens où dans une SER où nous avons une faible probabilité de présence, cela ne va pas affecter l'ensemble des forêts de la même façon et la hêtraie ne va pas disparaître brutalement. CASTANEA semble mieux représenter une progression dans la prévision de l'impact du changement climatique sur le hêtre. De plus, ce n'est pas parce que des hêtraies vont être plus vulnérables au vu des nouvelles conditions dans lesquelles évolueront les peuplements que la productivité va diminuer parallèlement. La productivité est notamment quantifiée par les échanges gazeux et la prise en compte du CO<sub>2</sub> peut potentiellement jouer sur la croissance des arbres. À ce jour, nous ne pouvons prédire la façon dont l'augmentation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère va influencer la productivité des arbres.

CASTANEA nous permet en quelque sorte de modérer la vulnérabilité prévue par les modèles de niche même s'il faut garder à l'esprit que les modèles ne jugent pas la vulnérabilité à partir des mêmes critères. Il est donc intéressant d'analyser l'indice de vulnérabilité quantifié à partir des modèles de niche (annexe 8), du modèle CASTANEA (annexe 6) et de l'ensemble de ces modèles comme le montre la carte figure 21.

➤ **Pour les divergences entre les 4 modèles : indice d'INCERTITUDE**

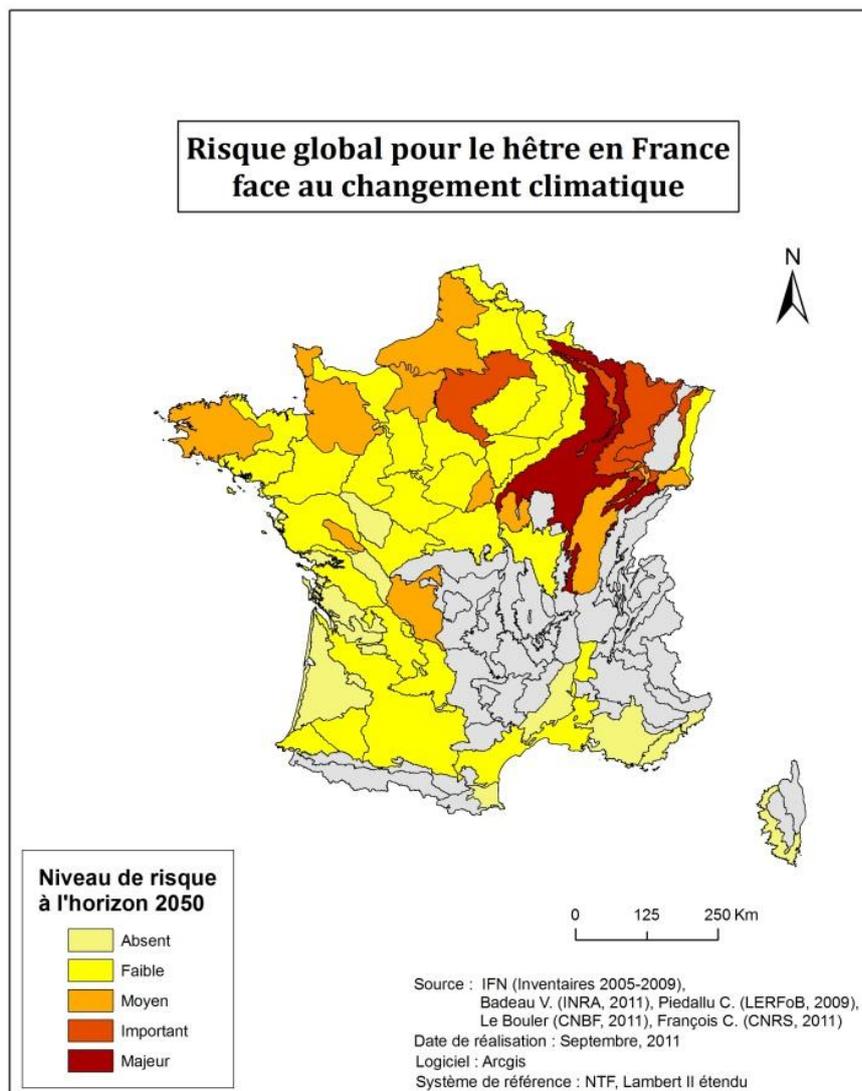
La carte de la figure 22 nous montre que l'incertitude évaluée entre tous les modèles d'impacts est relativement hétérogène sur le territoire.



**Figure 22 : Carte de la divergence observée entre les quatre modèles d'impacts par SER sur la vulnérabilité du hêtre. Le niveau d'incertude correspondra au niveau de divergence observé entre modèles. Sources : V. Badeau (2011), C. Piedallu (2009), H. Le Bouler (2011), C. François (2011). Réalisation : Pauline Pecquet, septembre 2011.**

Les modèles divergent particulièrement dans la partie sud-ouest de la France et dans la partie nord notamment le long du littoral normand et nordiste. À l'inverse, la convergence est relativement faible le long d'un axe transversal qui va de la Vendée à l'Alsace. Dans le Nord, les divergences sont probablement dues au fait que le modèle CASTANEA prévoit une hausse de la productivité (annexe 6). Dans le Sud-Ouest, la productivité modélisée stagne entre la période actuelle et 2050. Par contre, le modèle CASTANEA prévoit un taux de variation négatif le long de l'axe centre, les modèles de niche prévoient pour toutes les SER une baisse de la probabilité de présence du hêtre, il est donc normal que les modèles convergent. Cette carte est intéressante car elle permet de savoir, par confrontation des deux types de modèles, quelles sont les SER où non seulement le hêtre va commencer à disparaître mais également où cette disparition va être couplée avec une baisse de la productivité car, comme vu ci-dessus, les deux ne vont pas forcément de pair.

### C. Analyse du RISQUE global pour le hêtre



**Figure 23 : Carte du risque global pour le hêtre en France évalué à l'échelle des SER face au changement climatique. (Sources : V. Badeau (2011), C. Piedallu (2009), H. Le Bouler (2011), C. François (2011)). Réalisation : Pauline Pecquet, septembre 2011.**

Cette carte (figure 23) montre la spatialisation du risque global concernant le hêtre face au changement climatique. Son importance est donc évaluée par SER en fonction de la vulnérabilité,

c'est-à-dire le taux d'extinction potentiel du hêtre, et des enjeux de la SER. Le couplage des deux indices nous permet donc d'avoir une vision de l'enjeu global et donc de la nécessité d'agir plus ou moins rapidement selon ce risque. Par exemple, dans une SER où la vulnérabilité a été quantifiée comme étant importante si les enjeux sont absents en ce qui concerne le hêtre, alors le risque sera dit nul. Tandis que même si dans une SER, la vulnérabilité de cette dernière est faible ou moyenne, si les enjeux sylvicoles sont majeurs et que le hêtre est prédominant dans les peuplements, notamment si ceux-ci sont monospécifiques, alors le risque sylvicole autant que paysager va être important.

Pour la France, suite à la création de cet indice par pondération de la vulnérabilité, nous nous apercevons que le risque est globalement situé dans la partie nord de la France, ce qui est en premier lieu dû au fait que dans le Sud, le hêtre est présent majoritairement en zones d'altitude, zones que nous n'avons pas pris en compte dans cette étude. Une SER se détache particulièrement du lot, en effet, les Plateaux calcaires de Lorraine sont affectés d'un risque global majeur. La vulnérabilité y est moyenne mais les enjeux y sont importants au vu de la place du hêtre dans les peuplements. Cette SER comprend la région Lorraine où la part du hêtre est de 23 %, dont 36 % sont en peuplements monospécifiques. Les changements climatiques risquent d'avoir un impact majeur sur le hêtre dans le sens où même si les conséquences du réchauffement vont impacter moins de forêts que dans des SER atlantiques par exemple, le fait que ces régions aient un fort taux de boisement et que le hêtre y soit une essence prépondérante va faire que même disséminés, les impacts toucheront une grande surface forestière.

Les SER où le risque futur est important se situent également dans l'Est de la France comme les Plaines et dépressions argileuses, les collines périvosgienne et le Warndt. Deux autres SER comportent un risque fort : le Bassin parisien tertiaire et les Côtes et plateaux de la Manche. Un risque moyen est observé le long des côtes bretonnes et normandes, dans la vallée de la Saône, en Bresse et dans les Châtaigneraies du Centre et de l'Ouest.

Des SER aux enjeux importants actuellement apparaissent avec un risque moindre, à ne pas négliger néanmoins, comme dans les régions Champagne-Ardenne (Ardenne primaire et Argonne), le Centre où il faut rappeler que la vulnérabilité moyenne prévue par les seuls modèles de niche est très importante, ou encore le Languedoc-Roussillon (Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes).

Même en prenant du recul vis-à-vis de cet indice par l'observation de l'incertitude qui existe entre les modèles au sein de ces SER, nous nous apercevons que là où le risque est dit majeur, les modèles convergent. Les modélisateurs semblent d'accord en ce qui concerne la quantification de la vulnérabilité et en pondérant avec les enjeux, le fait d'obtenir un risque important dans ces SER permet de s'apercevoir de l'urgence qu'il y a à agir dès maintenant pour trouver des solutions d'adaptation adéquates pour préserver les forêts. Par contre, il est vrai qu'une étude plus approfondie sera nécessaire pour les SER des littoraux bretons et normands ainsi que pour le Bassin parisien tertiaire car l'incertitude y est élevée. Mais les enjeux étant importants, la pensée d'une adaptation face au réchauffement global ne doit pas être écartée et des études au sein de la SER seront à envisager.

## **Partie IV : Perspectives et discussion**

Le fait que ce soit des SER de l'Est de la France où le risque associé à la vulnérabilité du hêtre face au changement climatique soit le plus élevé contraste avec la vision actuelle qui oriente plutôt les actions vers les régions atlantiques et méditerranéennes. Les gestionnaires forestiers aussi bien des régions occidentales qu'orientales devront donc être dotés d'outils (guides de gestion, orientations à suivre, etc.) pour les aider dans la gestion du changement climatique car il est important de penser dès maintenant, au vu de la longueur des cycles forestiers, à l'adaptation des forêts françaises dans un contexte de réchauffement global.

## A. Solutions possibles d'adaptation

### 1) Adaptation de la sylviculture

Les changements attendus vont affecter les peuplements forestiers de différentes manières selon la situation géographique mais aussi selon les conditions stationnelles. Les gestionnaires, autant que les chercheurs produisant l'information, doivent dès à présent comprendre les dépérissements passés pour se préparer au futur en analysant les causes et en réfléchissant aux actions à entreprendre pour atténuer les impacts des accidents climatiques. Une expertise collective est nécessaire surtout face à des phénomènes tels que la sécheresse qui sont documentés depuis longtemps (Landmann, Bréda, Houllier, Dreyer, & Flot, 2003). Les méthodes de suivi après des événements extrêmes sont importantes pour une meilleure prévention de ceux-ci ; à chaque peuplement atteint doit être portée une attention particulière. Il est primordial de tirer des leçons des impacts passés, de tirer profit des différents dispositifs expérimentaux et surtout de surveiller la réaction des essences introduites qui connaissent leur premier événement extrême comme la sécheresse en 2003 (Landmann, Bréda, Houllier, Dreyer, & Flot, 2003) pour savoir si dans l'avenir, elles seront aptes à résister au réchauffement global. La principale conséquence du changement global sera la hausse des températures, il est donc à prévoir que la fréquence des sécheresses va augmenter si cette hausse est couplée avec un manque de précipitations. La canicule de 2003 a rappelé aux forestiers que pour beaucoup d'essences le stress hydrique était une des causes premières de dépérissement. Mais l'impact qu'a une sécheresse sur les arbres est à prendre avec précaution car les conséquences sur les arbres ne sont pas forcément visibles l'année de la sécheresse ou l'année suivante mais bien plusieurs années après. Les premiers symptômes apparents peuvent au contraire correspondre à une stratégie d'évitement de la part de l'arbre et celui-ci peut reprendre normalement sa croissance par la suite (Legay, Ginisty, & Bréda, 2006). Le gestionnaire doit donc attendre au moins le printemps suivant pour observer le débourrement et marquer, si besoin est, les récoltes dues à un été sec l'année précédente, et non récolter de façon hâtive l'hiver suivant. À noter que la sécheresse de 2003 se fait encore ressentir dans les peuplements, comme ce fut le cas après la sécheresse de 1976 dans la forêt de Tronçais (Becker, 1983).

Il est certes difficile pour le gestionnaire de faire face à des événements de grande ampleur tels que la sécheresse de 2003 ou les tempêtes de 1999 et 2009 mais il n'est cependant pas impossible de les prévenir pour diminuer leurs impacts. Les peuplements les plus vulnérables sont souvent les peuplements arrivés au stade de maturité qui sont plus sensibles aux perturbations comme les chablis (étant donné la hauteur des arbres, les tempêtes ont plus d'impacts), les scolytes et les maladies fongiques (Kolström, Vilén, & Lindner, 2011) qui augmentent suite à un stress abiotique. Des rotations plus courtes ne sont-elles pas alors préférables ? Cela réduirait la vulnérabilité des peuplements au vent mais l'accélération du renouvellement du peuplement favoriserait son adaptation au changement climatique par sélection ou adaptation spontanée (Legay, 2011). De plus, les risques seraient diminués car, d'une part, les peuplements seraient exposés moins longtemps, d'autre part, les aléas climatiques concerneraient moins de volumes (Piermont, 2007).

Au sein du peuplement, notamment aux abords des peuplements, une moindre exposition au soleil direct et aux vents dominants est conseillée (Kolström, Vilén, & Lindner, 2011). Le gestionnaire peut dès la plantation penser à rendre son peuplement plus résistant par quelques précautions simples. Le type de plants choisis pour une plantation, leur transport et leur mise en terre peuvent être autant d'étapes importantes pour la vitalité future du peuplement (Legay, Ginisty, & Bréda, 2006). La gestion du sous-bois apparaît également importante, les végétaux arbustifs ou herbacés vont induire une compétition avec les jeunes pousses d'arbres. Il convient d'entretenir les zones de régénération ou de plantation récente en limitant les populations des autres espèces ligneuses (DGA & DRCE) au moins le temps que l'essence passe au stade juvénile, en particulier chez le hêtre qui subit plus la concurrence à ce stade face à des espèces gourmandes en eau (Sylvain Gaudin, communication personnelle).

Dans un peuplement adulte, le sylviculteur peut influencer sur l'évapotranspiration, la quantité d'eau interceptée et les conditions climatiques au sein du peuplement en agissant particulièrement sur l'indice foliaire par le biais d'éclaircies (Legay, Ginisty, & Bréda, 2006). En contrôlant la densité et la surface foliaire, il peut améliorer le bilan hydrique des différentes strates (Legay, 2011). Une attention est aussi à porter sur les engins qui sont utilisés pour la récolte qui devront être de plus en plus adaptés aux conditions locales, surtout pour prévenir d'éventuels tassements de sol. Au niveau du sol, la préservation de la fertilité du sol en évitant l'exportation des éléments minéraux est aussi importante (Legay, 2011).

Mais il est important de penser en amont, en réfléchissant correctement aux essences à mettre en place et surtout à celles qui vont être plantées en essence-objectif. Le forestier doit prendre des essences adaptées au climat, au sol et à la position topographique (Legay, Ginisty, & Bréda, 2006). À noter que même si le forestier adapte sa gestion et les essences de son peuplement, ce sera probablement par rapport aux conditions actuelles. Une coordination avec la recherche est donc à mettre en œuvre pour bien informer des choix d'essences adaptées aux conditions futures. Nous y reviendrons par la suite.

## **2) L'intérêt des mélanges**

Le mélange d'espèces ou de provenances adaptées peut améliorer la résistance des peuplements forestiers, étant donné que les peuplements mélangés demeurent moins affectés par les pathogènes ou les maladies que les monocultures (Kolström, Vilén, & Lindner, 2011). Le phénomène de modification des aires de distribution, au vu des capacités d'une espèce à se déplacer et à la vitesse des changements climatiques prévus, ne va pas se réaliser à une échelle de temps réduite, les gestionnaires doivent penser dès maintenant à de nouvelles essences à introduire dans le paysage français, en privilégiant bien évidemment celles déjà en place. De plus, les phénomènes observés aux limites actuelles de l'aire de l'essence au nord et au sud ne seront pas les mêmes et ne se produiront pas à la même vitesse. Sur le front de progression, nous observerons l'avancée de l'espèce par dissémination et installation de jeunes plants alors que sur le front de recul, les phénomènes visibles seront des dépérissements, la mort des arbres ou encore un échec du renouvellement (Legay, Cordonnier, & Dhôte, 2008). Et même si des îlots de résistance apparaissent, ils ne résisteront pas forcément à plus long terme, sauf si l'adaptation génétique se fait rapidement, et seront souvent vite diminués.

Des mélanges d'essences vont apparaître d'eux-mêmes car les essences n'évolueront pas de la même façon ni à la même vitesse. La composition des peuplements va se modifier au profit d'essences pionnières car plus mobiles ou d'essences introduites par l'homme. À noter que le hêtre est plutôt une essence de fin de succession, une essence sciaphile surtout au stade juvénile. Face à la multiplication des événements extrêmes qui créeront des trouées au sein des peuplements ou au minimum une baisse de leur densité, des espèces plus adaptées aux nouvelles conditions, espèces pionnières ou nomades, apparaîtront dans la régénération et les mélanges seront plus courants de manière naturelle (Legay, Cordonnier, & Dhôte, 2008). À cela s'ajouteront les choix faits par les gestionnaires dans le cadre de l'adaptation au changement de climat.

Les qualités d'un mélange d'essences pour pallier les modifications climatiques sont multiples, sans néanmoins être très solidement scientifiquement établies dans le cas des forêts. Les stress dus à des perturbations abiotiques, comme la sécheresse, ou à des perturbations biotiques comme les attaques de pathogènes n'atteignent pas les essences de manière identique. Certaines vont mieux résister que d'autres et les pathogènes affectant souvent une espèce particulière, les mélanges apparaissent comme un facteur positif pour la résistance d'une forêt. Cela dit, cet effet apparaît moindre dans nos forêts tempérées vu que les essences actuellement présentes poussent moins en mélange (Legay, Cordonnier, & Dhôte, 2008). Les mélanges peuvent aussi permettre, à l'échelle

stationnelle, de combler un espace où une des essences ne peut se développer car, par exemple, les conditions édaphiques ne lui sont pas favorables mais le sont pour l'autre espèce. Enfin, par rapport au changement climatique, favoriser le mélange peut être l'occasion d'introduire des espèces nouvelles dans le cadre de l'adaptation.

### **3) Le transfert actif de provenances**

Le stade de la régénération offre une opportunité directe et immédiate pour agir sur les espèces et sur la composition des peuplements (Kolström, Vilén, & Lindner, 2011). Lors de la plantation, le forestier a le choix de la provenance des plants et avant de penser à de nouvelles essences, il est important de se demander s'il n'existe pas une provenance de la même espèce venant d'une région où le climat correspondrait au climat futur attendu de la région. En effet, le forestier peut agir directement à ce stade où la diversité génétique de l'essence se met en place. Une des mesures conseillées pour pallier la vulnérabilité des essences forestières est de choisir, en complément des sources de graines locales, des sources exogènes qui peuvent permettre l'introduction de plants de la même espèce mais avec un meilleur profil génétique au vu des conditions dans lesquelles le peuplement évolue (DGA & DRCE). De plus, au sein des gestionnaires, il a été remarqué que les demandes pour obtenir un matériel végétal plus adapté aux conditions climatiques futures se multipliaient (Riou-Nivert, 2008) que ce soit vis-à-vis des espèces présentes que vis-à-vis de nouvelles espèces à introduire.

Il faut pouvoir éviter les erreurs au niveau des essences introduites actuellement, et à cette fin, des informations sur le matériel végétal disponible et adapté doivent être fournies aux gestionnaires grâce à une meilleure coordination entre les organismes de terrain qui gèrent les banques de graines ou les pépinières (Riou-Nivert, 2008).

Par ailleurs, un diagnostic préalable doit être fait pour savoir si un dépérissement observé dans une forêt est dû au changement climatique ou pas afin d'adapter la réponse pour l'adaptation de la gestion (CRGF, 2008). La régénération naturelle sera privilégiée si aucun dépérissement n'est observé actuellement en favorisant la diversité génétique particulièrement au stade juvénile du peuplement. Le recours à un autre matériel forestier de reproduction doit avoir lieu si le dépérissement devient significatif. Il peut permettre un enrichissement génétique là où le dépérissement atteint une bonne partie du peuplement, l'autre partie restant saine, ou il peut être l'unique choix si la nécessité de transférer des provenances mieux adaptées aux conditions futures s'impose. Il sera dans tous les cas important d'assurer la traçabilité du matériel utilisé en plantation et d'avoir des informations sur la diversité génétique qui existe au sein du matériel introduit (CRGF, 2008).

## **B. Perspective 1 : vers une stratégie de substitution. Objectifs du projet Nomade**

Cette étude faite dans le cadre d'un stage à l'ONF a été réalisée en parallèle d'un projet de recherche du réseau AFORCE pour l'adaptation des forêts au changement climatique. Ce projet intitulé NOMADE, Nouvelles méthodes d'acclimatation des essences forestières, travaille donc sur l'adaptation des forêts françaises de plaines et collines par la substitution d'essences.

En effet, la substitution des essences actuelles comme le hêtre par des essences exotiques, au sens du terme où elles ne sont pas présentes de manière naturelle dans la région concernée, est une des solutions possibles d'adaptation pour le futur si les essences en place ne s'adaptent pas au réchauffement et au cas où l'ajustement des provenances se révélerait inopérant. Pour cela, le but est de récolter le plus d'informations possibles sur les essences à introduire potentiellement (connaissances autécologiques) et la façon dont elles doivent être gérées au sein de peuplements forestiers.

Il est vrai qu'une des grandes interrogations face au changement climatique est de savoir si les essences actuelles vont ou peuvent s'adapter aux nouvelles conditions climatiques ou si leur ajustement au climat ne peut se faire que par un déplacement dont le rythme dépasserait probablement leurs capacités de migration spontanées. La question de la réponse des essences au réchauffement global concerne autant les essences autochtones que les essences qui pourront être introduites, pour lesquelles cette introduction peut aussi être vue comme une mesure de conservation.

Le projet NOMADE est réalisé en deux temps. Tout d'abord, en faisant un bilan des essences introduites par le passé dans une perspective écologique mais aussi économique, pour voir quelles essences ont été insérées avec succès dans les peuplements (étude des travaux lors de restauration écologique RTM, reconstitution de forêts dégradées, plantations FFN, réseaux arboretums, PLANTACOMP, PEFPP). Puis une liste d'espèces d'intérêt potentiel pour le reboisement sera faite au vu des résultats mais aussi de leur autécologie et de leur potentialité de croissance qui devra être adaptée aux nouvelles conditions pédoclimatiques, sachant que ces essences introduites devront être adaptées aux conditions actuelles comme aux conditions futures. La modélisation de la niche climatique des espèces sera faite par le modèle IKS d'Hervé Le Bouler, coordinateur du projet.

Les propositions issues de ce travail seront élaborées par SER, sous forme d'une liste d'espèces potentiellement adaptées, en ciblant notamment les SER où les dépérissements des essences en place risquent d'être les plus importants en particulier dans les chênaies, les chênaies-hêtraies et les douglasaies. Un essai est prévu d'être installé en région Centre.

Il est à noter que la substitution d'essences est déjà évoquée pour le hêtre au sein des directives régionales d'aménagement, avec une information d'inégale qualité selon les régions. Des recommandations sont donc faites pour les essences possibles afin de le remplacer. Celles qui sont citées le plus souvent sont le chêne sessile que l'on conseille de favoriser dans les mélanges et les résineux tels que les divers pins (maritime, sylvestre, laricio de Corse et de Calabre) notamment sur les sols acides, le sapin pectiné également. Le douglas est conseillé sur des sols plus modérément acides ainsi que le châtaignier mais à condition que les sols soient bien drainés. Des choix sont plus surprenants comme en Alsace où l'épicéa est aussi recommandé en essence de remplacement, ou encore en Basse-Normandie, où l'on propose le chêne rouge.

Notre étude porte sur le hêtre, une grande essence sociale en France et met en évidence les régions où le besoin d'essences de substitution est potentiellement le plus important. Le projet NOMADE va permettre de réaliser ce travail sur toutes les essences et de dresser ainsi une liste complète d'essences pour la substitution. Insérer le modèle développé par Hervé Le Bouler permet la comparaison de ce modèle à des modèles de niche déjà publiés, et donc de valider – à partir du cas du hêtre – la démarche de modélisation adoptée.

## **C. Perspective 2 : Travail sur les comparaisons de méthodes de modélisation**

Le présent travail a analysé les résultats donnés par trois modèles de niche en ne tenant compte que de la sortie de ces modèles. La divergence entre ces modèles a servi pour quantifier l'incertitude quant aux impacts possibles du changement climatique sur le hêtre. Il serait intéressant de pousser l'analyse pour comprendre ce qui induit cette divergence entre des modèles qui indiquent tous une probabilité de présence actuelle et future.

À ce stade, nous ne pouvons savoir à quoi est dû l'écart entre les probabilités prédites, or il est important de soutenir les résultats d'une telle étude par une compréhension totale des mécanismes de construction des modèles au vu des enjeux qu'ils représentent pour les gestionnaires forestiers. La violence de la chute des probabilités de présence du hêtre entre l'actuel et 2050, qui est un horizon très proche lorsque l'on considère la durée de vie d'un arbre, peut apparaître très négative et très difficile à

comprendre et à accepter par le monde forestier qui gère continuellement et depuis longtemps les peuplements. L'incertitude qui existe quant au changement climatique risque d'être mise en avant pour discréditer ou atténuer les résultats concernant des essences aussi importantes dans la production forestière française que le hêtre.

Il devient important pour justifier les changements à venir dans la gestion forestière d'affiner les études de comparaison de modèles. Ainsi, il serait intéressant de voir l'impact de l'utilisation de différents scénarios et de divers modèles climatiques dans les prévisions. Nous avons vu que les divergences entre les quatre modèles de niche et entre modèles de niche et modèle de processus n'étaient pas spatialisées de la même manière et influençaient les résultats sur différentes parties de la France. Il est donc important de savoir à quel degré les choix des modélisateurs concernant les données climatiques, actuelles et futures, influencent cette répartition et jouent dans les prévisions.

De même, nous avons observé que les trois modèles de niche ne considéraient pas les mêmes variables, ce qui provient également des choix faits par les modélisateurs. Il convient alors de comprendre d'où viennent ces choix, pourquoi telle variable est choisie plutôt qu'une autre (notamment dans le cadre du modèle du LERFoB) et est-ce qu'il est préférable de choisir les variables rentrant dans le modèle ou de faire une sélection statistique. Puis, il faudrait faire tourner les modèles avec un nombre différent de variables, c'est-à-dire faire une entrée pas à pas de chacune de celles-ci pour voir à ce moment à quel point elles aussi jouent sur les prévisions et observer quels effets a chacune d'elles. La question des données pédologiques est également à approfondir. Elle est d'ailleurs revenue régulièrement lors de ce travail dans la comparaison entre modèles. Les données concernant le sol, surtout le pH et le rapport C/N, doivent-elles être prises en compte alors qu'on ne sait pas à quel degré elles absorbent une partie du signal climatique par confusion de facteurs (autocorrélation spatiale).

Nous avons, dans notre étude, comparé deux sortes de modèles d'impact : trois modèles de niche et un modèle de processus. Le fait que ces deux types de modèles n'aient pas la même échelle de travail est important. Même si après avoir centré-réduit les modèles, nous avons pu voir que CASTANEA devenait comparable en terme de taux de variation, il convient de garder à l'esprit que les données modélisées ne sont pas échelonnées sur les mêmes espaces. Les modèles de niche spatialisent la présence potentielle de l'essence à partir de données sur toute la France tandis que CASTANEA spatialise une productivité potentielle à partir d'étude de peuplements singuliers. Il est intéressant à ce stade de comprendre à quel degré le changement climatique va influencer sur ces mesures, la productivité semblant décroître moins rapidement que la présence de l'essence.

Enfin, tous les modèles ne travaillaient sur la même maille (1, 8, 10 km), l'agrégation des données climatiques et l'attribution à des points au sein des mailles n'avaient donc pas le même degré de précision. De plus, le fait d'affecter une même probabilité de présence pour une maille et que celle-ci soit d'échelle différente pour chaque modèle influe sur la moyenne de probabilité par SER de chacun. Et cela joue encore une fois sur l'écart entre les valeurs.

## **D. Discussion et limites de l'étude**

Le travail est réalisé à l'échelle des SER c'est-à-dire de tous les peuplements de la région sans distinction. Les résultats présents sont donc à considérer comme globaux et ils doivent ensuite être affinés en pensant à l'échelle stationnelle. Ils sont à considérer comme un patron de risque qu'il faut ensuite coupler avec les données que le gestionnaire a à sa disposition dans les catalogues par exemple. Des effets locaux comme la réserve utile, la pente, l'orientation vont déterminer une multitude de niches de survie longue du hêtre dans un contexte général régional de dépérissement (communication personnelle Hervé Le Bouler), par exemple en situation de ripisylve, à la faveur de l'accès à la nappe fluviale, comme c'est le cas actuellement dans la vallée du Ciron dans les landes de Gascogne (communication personnelle Myriam Legay).

Pour ce qui est du changement climatique, il est à noter que nous travaillons ici dans des hypothèses de climat moyen qui vont évoluer régulièrement. Or la réalité risque d'être une conjonction d'événements climatiques à évolution variable (alternance de décennies sèches ou humides) qui vont soit accélérer soit ralentir le changement moyen avec, rajoutée à cela, la survenue de phénomènes de rupture (communication personnelle Hervé Le Boulter).

Dans ce travail, la pondération de la vulnérabilité par les enjeux fait apparaître un risque global lié à la place actuelle du hêtre dans la SER. Mais cela ne veut pas dire que la question doit être négligée si les enjeux sont mineurs dans une SER, d'autant que les enjeux ont été appréciés ici par un critère global rustique qui ne rend pas compte de l'intérêt patrimonial de l'essence dans toutes ses dimensions (conservation de la nature, paysage...). Si le hêtre est important même seulement d'un point de vue paysager, il est utile de s'intéresser dès maintenant à la gestion de ces hêtraies. Il faut ainsi tenir compte de l'aspect local et du fait que dans cette étude, l'échelle utilisée doit être affinée par la suite au niveau des massifs.

Les résultats de cette étude doivent être vus comme une synthèse partielle et provisoire des principaux résultats disponibles en matière de modélisation des impacts potentiels des changements climatiques sur le hêtre, illustrée par les différentes cartes réalisées.

Suite à ce travail, dans le cadre du projet NOMADE, il est intéressant de mettre en évidence les SER où le risque global est le plus important, afin de définir les contextes forestiers pour lesquels des essences de substitution doivent être recherchées. Les conditions écologiques actuelles et futures correspondantes doivent être considérées, notamment les variables dites limitantes dans le modèle IKS qui sert pour la modélisation dans ce projet. Il est intéressant de considérer également les variables sol qui peuvent apporter des contraintes supplémentaires (calcaire, hydromorphie), ou éventuellement compenser partiellement les contraintes climatiques. Suite à cela, la modélisation des conditions futures nous permettra de voir, d'une part les changements que risquent de subir les essences actuellement en place, et d'autre part, d'envisager de nouvelles essences à mettre en place, essences qui se doivent d'être adaptées aussi bien aux conditions pédoclimatiques actuelles que futures de la SER.

Ce travail a ainsi permis de définir quelles étaient les SER où le hêtre encourait un plus fort risque face au réchauffement climatique et cibler ainsi les zones où il est primordial de faire le point sur les contextes forestiers pour dès aujourd'hui dresser une liste d'essences potentielles de remplacement.

# Conclusion

Grâce à cette étude, nous pouvons voir que le hêtre est une essence particulièrement vulnérable dans les zones de plaine face au changement climatique avec un taux d'extinction moyen en 2050 de 50 % pour l'ensemble des modèles d'impact pris en compte. Il apparaît encore plus en danger dans le bassin ligérien et la plaine d'Alsace.

Le fait de coupler cette vulnérabilité avec les enjeux sylvicoles permet d'avoir une meilleure vision des impacts potentiels sur les forêts françaises. De plus, cela permet de se défaire des idées reçues que certains gestionnaires peuvent avoir dans la perception des peuplements qu'ils gèrent et qu'ils ne conçoivent pas comme zones à risque actuellement. En effet, en insérant la notion d'enjeux par la pondération du taux de variation moyen par SER, qui seul ne semble pas significatif, par la surface terrière qui évalue la quantité de bois des peuplements, nous avons une réelle vision du risque encouru vis-à-vis du hêtre, notamment en termes de production.

La comparaison des modèles d'impact montre les convergences, mais aussi les limites de la confiance à accorder à ces projections à l'échelle régionale. Elle met en évidence que les divergences tiennent en bonne part aux limites de nos connaissances sur l'autécologie des essences. Une analyse de la sensibilité des résultats aux différents choix de données et de méthodes permettrait de mieux évaluer les sources d'incertitude.

Enfin, pour avancer dans la gestion et l'adaptation des forêts face au changement climatique, il est important que de meilleures liaisons soient faites entre la recherche et le monde forestier qui n'est que trop peu informé des avancées qui sont faites ; et pourtant, les gestionnaires sont les premiers à observer les modifications engendrées par les perturbations climatiques sur le terrain. Une coordination est nécessaire et un appui réciproque serait utile pour une mise en place de solutions d'adaptation plus rapide. Cela est d'autant plus vrai que la vitesse du changement climatique reste une incertitude que seul le temps saura lever. Les observations que feront les forestiers les prochaines années permettront de mieux préciser la stratégie adéquate et les plans d'action qui seront adaptés en conséquence en fonction d'une part des résultats atteints et d'autre part de l'actualisation des prévisions climatiques ( Roman-Amat, 2007).

Enfin à cela s'ajoute un effort d'éducation concernant aussi bien le monde forestier, recherche ou gestion, que le public ayant accès aux forêts que ce soit les propriétaires privés ou tous les utilisateurs quels qu'ils soient. Les paysages forestiers vont changer de profil ces prochaines années et la forêt étant un domaine particulièrement apprécié, ces perturbations et la gestion qui en découlera doivent être expliquées pour qu'elles soient acceptées et plus encore comprises par tous.

# Bibliographie

- Aussenac, G., & Guehl, J.-M. (2005). Variations climatiques et physiologie des arbres. *Forêt Entreprise*, 2(162), 20-24.
- Badeau, Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., & Drapier, J. (2005). Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Forêt Entreprise*, 162, 25-29.
- Badeau, V., Bréda, N., & Landmann, G. (1997). La récente crise de vitalité du hêtre en plaine semble largement liée aux déficits hydriques. *Les Cahiers du DSF*, 1, 60-63.
- Badeau, V., Dupouey, J., Cluzeau, C., Drapier, J., & Bas, C. L. (2004). *Rapport final projet CARBOFOR*. Inra and Ecofor.
- Bastien, Y. (2000). *Sylviculture du hêtre*.
- Becker. (1983). Le dépérissement du chêne - Les causes écologiques. *Revue Forestière Française*, 35(5), pp. 341-356.
- Boé, J. (2007). *Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Bolte, A., Ammer, C., Lö, M., Madsen, P., P., G.-J. N., Spathelf, P., et al. (2009). Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24, 473-482.
- Bréda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (2000). Evolutions possibles des contraintes climatiques et conséquences pour la croissance des arbres. *Revue Forestière Française, Numéro spécial*, 73-90.
- Cavaignac, S. (2009). *Les sylvoécotémoins (SER) de France métropolitaine. Étude de définition*.
- CDAC. (1998). *Diagnostic stationnel et sylvicole*. Centre de développement agroforestier de Chimay ASBL.
- CRGF. (2008). *Préserver et utiliser la diversité des ressources génétiques forestières pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique*. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
- Davi, H. (2004). *Modélisation des flux et des stocks de carbone et d'eau dans les écosystèmes forestiers dans le cadre des changements climatiques : Vers un modèle forestier générique et méthodologie du changement d'échelle*. Université Paris-Sud XI, Orsay.
- Delpierre, N. (2010). *Étude du déterminisme des variations interannuelles des échanges carbonés entre les écosystèmes forestiers européens et l'atmosphère : une approche basée sur la modélisation des processus*. Thèse de Doctorat. Spécialité : Écophysiologie Végétale, Université Paris XI – UFR Scientifique d'Orsay.
- DGA & DRCE. *Étude des impacts du changement climatique sur les forêts européennes et mesures possibles d'adaptation*.

- Dittmar, C., Zech, W., & Elling, W. (2003). Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - a dendrological study. *Forest ecology and management*, 173, 63-78.
- Ducousso, A., & Dequé, M. (2005). Augmentation de l'effet de serre : constatations et prévisions. *Forêt Entreprise*, 2(162), 15-19.
- Dufrêne, E., Davi, H., François, C., Lemaire, G., Dantec, V. L., & Granier, A. (2005). Modelling carbon and water cycles in a beech forest. Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. *Ecological Modelling*, 185, 407-436.
- Dupouey, J.-L. (1992). Déplacement des aires de répartition des essences forestières et évolution de la composition des peuplements. In: Landmann G. (ed), *Les recherches en France sur les écosystèmes forestiers. Actualités et perspectives. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche*, 57-58.
- Gaudin, S. (2007). Prise en compte du changement climatique dans les guides et catalogues de stations : première approche. *CRPF de Champagne-Ardenne*, 16.
- Gausсен, H. (1953). La hêtraie sans hêtre. *Revue forestière française*, 10, 650-652.
- Godard, A., & Tabeaud, M. (2004). *Les climats. Mécanismes, variabilité, répartition* (éd. Paris). (A. Colin, Éd.)
- Husson, F., Lê, S., & Pagès, J. (2009). *Analyse de données avec R*. Presses Universitaires de Rennes.
- Hutchinson, G. (1957). Concluding remarks. Cold Springs Harbor Symp. Quant. Biol, 22, 415-427.
- Kolström, M., Vilén, T., & Lindner, M. (2011). *Climate change impacts and adaptation in European forests*. Technical Report, EFI Policy brief 6.
- Lafaye, P., Drouilhet, R., & Liqueur, B. (2011). *Le logiciel R. Maîtriser le langage. Effectuer des analyses statistiques*. Springer.
- Landmann, Dupouey, J.-L., Badeau, V., Lefèvre, Y., Bréda, N., Nageleisen, L.-M., et al. (2007). Le hêtre face aux changements climatiques. *Rendez-vous Techniques, Hors-série n°2*, 29-38.
- Landmann, G., Bréda, N., Houllier, F., Dreyer, E., & Flot, J.-L. (2003). Sécheresse et canicule de l'été 2003 : Quelles conséquences pour les forêts françaises ? *Revue forestière française*, 55 (4), 299-308.
- Landmann, G., Dupouey, J.-L., Badeau, V., Lefèvre, Y., Bréda, N., Nageleisen, L.-M., et al. (2008). Le hêtre face aux changements climatiques. Partie I. Le hêtre en France en 2100 : la portion congrue ? *Forêt Entreprise*, 180, 28-33.
- Landmann, G., Dupouey, J.-L., Badeau, V., Lefèvre, Y., Bréda, N., Nageleisen, L.-M., et al. (2008). Le hêtre face aux changements climatiques. Partie II. Connaître les points faibles du hêtre pour mieux les surmonter. *Forêt Entreprise*, 182, 30-34.
- Lebourgeois, F. (2005). Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. *Revue forestière française*, 1, 33-50.

- Lebourgeois, F., & Mérian, P. (2011). Has sensitivity of forest species to climate changed in the 20th century ? *Revue forestière française*, 63(1), 17-32.
- Lebourgeois, F., Bréda, N., Ulrich, E., & Granier, A. (2005). Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19, 385-401.
- Lebourgeois, F., Granier, A., & Bréda, N. (2001). Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers. *Annals of Forest Science*, 58, 733-754.
- Lebourgeois, F., Granier, A., & Bréda, N. (2001). Variations climatiques en France : + 1,2°C depuis 40 ans... *Forêt Entreprise*, 139, 53-59.
- Legay, M. (2011a). Le changement climatique : les effets attendus sur la forêt française et les leviers d'action des forestiers.
- Legay, M. (2011b). Les grandes orientations d'adaptation au changement climatique : point d'étape. *Forêt Méditerranéenne*, 32 (2), 179-186.
- Legay, M., Cordonnier, T., & Dhôte, J.-F. (2008). Des forêts mélangées pour composer avec les changements climatiques. *Revue Forestière Française*, 2, 181-190.
- Legay, M., Ginisty, C., & Bréda, N. (2006). Que peut faire le gestionnaire forestier face au risque de sécheresse ? *Rendez-vous Techniques*, 11, 35-40.
- Le Tacon, F. L., & Timbal, J. (1972). A propos des conditions écologiques des hêtraies dans le Nord-Est et dans le Nord-Ouest de la France. *Revue Forestière Française*, 24, 187-200.
- Lindner, M. (2008). *Impacts of climate change on european forests and options for adaptation*. Technical report, EFI.
- Magri, D., Vendramin, G., Comps, B., Dupanloup, I., Geburek, T., Gömöry, D., et al. (2006). A new scenario for the Quaternary history of European beech populations : palaeobotanical evidence and genetic consequences. *New Phytologist*, 171, 199-221.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place ?* (T. \. DOC, Éd.) Lavoisier.
- Nageleisen, L.-M., Piou, D., Saintonge, F.-X., & Riou-Nivert, P. (2010). *La santé des forêts : maladies, insectes, accidents climatiques... Diagnostic et prévention*. (Vol. 7). (CNPFF, IDF, & DSF, Éd.) ENGREF.
- Nakicenovic, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., La, E. L., et al. (2000). *Rapport spécial du Groupe de travail III du GIEC. Scénarios d'émission*. IPCC.
- ONF (Éd.). (2007). Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises. *Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises, Rendez-vous techniques, Hors-série n°2*.
- ONF, & IDF. (2010). *Guide de gestion. Des forêts en crise sanitaire*. ONF and IDF.
- Ozenda, P. (1994). *Végétation du continent européen*. Delachaux et Niestlé.

- Pachauri, R., & Reisinger, A. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Rapport de synthèse, GIEC.
- Perrin, R. (1977). Le dépérissement du hêtre. *Revue forestière française*, 25, 101-126.
- Peters, R. (1997). *Beech forests*. (M. Werger, Éd.) Kluwer academic publishers.
- 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*, 6, 567-593.
- Piermont, L. (2005). Gérer la Nature. *Natures Sciences Société*, 13, 62-67.
- Piermont, L. (2007). Changement climatique : l'inflexion de sylviculture engagée par la Société Forestière de la Caisse des Dépôts. *Revue forestière française*, 59 (2), 129-135.
- Rameau, J.-C., Mansion, D., & Dumé, G. (1989). *La flore forestière française - Plaines et collines*. (IDF, Éd.).
- Reuter, J.-C. (2005). Problèmes phytosanitaires sur hêtre dans le Nord-Est. *Les cahiers du DSF*, 4.
- Riou-Nivert. (2005). Climat, tempêtes et forêts : le temps des inquiétudes. *Forêt Entreprise*, 139, 15-16.
- Riou-Nivert. (2008). Changement climatique : questions des sylviculteurs et réponses des chercheurs. *Forêt Entreprise*, 180, 16-29.
- Riou-Nivert, P. (2007). Les exotiques : envahisseurs insidieux ou honnêtes travailleurs immigrés ? *Feuille de Silva* (41), 32-34.
- Roman-Amat, B. (2007). *Préparer les forêts françaises au changement climatique*. Ministères de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Ecologie et du Développement et de l'Aménagement Durables.
- Sardin, T., Pilard-Landeau, B., & Michon, J.-M. (2007). Le hêtre : une essence majeure des forêts publiques en France. *Rendez-vous Techniques (ONF), Hors-série n°2*, 3-8.
- Seynave, 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.
- Seynave, I., Gégout, J.-C., Hervé, J.-C., & Dhôte, J.-F. (2006). Facteurs écologiques et production du hêtre en France. *Forêt Entreprise*, 167, 41-45.
- Silva, D. E. (2010). *Ecologie du hêtre (Fagus sylvatica L.) en marge sud-ouest de son aire de distribution*. Université Henri Poincaré.
- Teissier du Cros, E. (1981). *Le hêtre*. (INRA, Éd.)

## Liste des contacts

NOM	Fonction	Organisme	Adresse	Mail
Badeau Vincent	Ingénieur de recherche	INRA	UMR 1137 INRA-Nancy F 54280 CHAMPENOUX	<a href="mailto:vincent.badeau@nancy.inra.fr">vincent.badeau@nancy.inra.fr</a>
Cheab Alissar	Post-doctorante	CNRS	Laboratoire Ecologie Systématique et Evolution (UMR 8079) Université Paris Sud, Bâtiment 362 91405 ORSAY Cedex	<a href="mailto:alissar.cheab@u-psud.fr">alissar.cheab@u-psud.fr</a>
François Christophe	Chargé de recherche	CNRS	Laboratoire Ecologie Systématique et Evolution (UMR 8079) Université Paris Sud, Bâtiment 362 91405 ORSAY Cedex	<a href="mailto:christophe.francois@u-psud.fr">christophe.francois@u-psud.fr</a>
Gaudin Sylvain	Ingénieur expérimentation et développement	CRPF	CRPF - Maison régionale de la forêt et du bois - Complexe agricole du Mont-Bernard - 51000 CHALONS en CHAMPAGNE	<a href="mailto:sylvain.gaudin@crpf.fr">sylvain.gaudin@crpf.fr</a>
Le Bouler Hervé	Chef technicien Directeur de la pépinière	CNBF Pépinière de l'Etat Guéméné	La pépinière, route de Redon 44290 GUEMENE PENFAO	<a href="mailto:herve.le-bouler@agriculture.gouv.fr">herve.le-bouler@agriculture.gouv.fr</a>
Legay Myriam	Chef Pôle Recherche & Développement ONF de Nancy	ONF	Bâtiment 802 - Les Merises 54840 VELAINE EN HAYE	<a href="mailto:myriam.legay@onf.fr">myriam.legay@onf.fr</a>
Piedallu Christian	Ingénieur de recherche	LERFoB - ENGREF	UMR LERFoB -Equipe écologie forestière AgroParisTech - ENGREF Nancy 14, rue Girardet - CS 14216 54042 NANCY Cedex	<a href="mailto:christian.piedallu@agroparistech.fr">christian.piedallu@agroparistech.fr</a>

**Tableau 2 : Liste des contacts rencontrés dans le cadre du travail**

# Glossaire

**Agrile** : petit coléoptère à reflets métalliques dont les larves sont très nuisibles pour les arbres.

**Aubier** : partie externe d'un arbre correspondant aux couches les plus récemment formées.

**Autécologie** : science qui étudie les exigences d'une espèce vis-à-vis des facteurs du milieu.

**Caducifolié** : se dit des arbres qui perdent leurs feuilles en hiver.

**Cambium** : tissu végétal qui marque la limite entre le bois et l'écorce

**CARBOFOR** : projet de recherche de l'INRA (2002-2005) qui avait pour but de quantifier les impacts du changement climatique sur le bilan et le stockage de carbone, la production primaire et l'hydrologie des grands écosystèmes forestiers français (feuillus sociaux de plaine, pinède atlantique, chênaie méditerranéenne).

**CLIMATOR** : projet de recherche (2007-2010) qui visait à fournir des méthodes et des résultats sur l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés variés, à l'échelle de la parcelle, et dans des climats contrastés français.

**Débourrement** : moment de l'année où les bourgeons floraux et végétatifs des arbres se développent. Cet épisode marque la fin de la période de dormance.

**Déficit hydrique** : bilan des précipitations (P) moins l'évapotranspiration potentielle (ETP). Il dépend donc uniquement du climat.

**Duramen** : partie interne du bois qui correspond aux accroissements les plus anciennement formés.

**Lœss** : roche sédimentaire détritique meuble formée par l'accumulation de limons issus de l'érosion éolienne, généralement pendant des périodes interglaciaires.

**Héliophile** : se dit d'une essence qui recherche l'ensoleillement pour se développer.

**Humus** : couche supérieure du sol créée et entretenue par la décomposition de la matière organique.

**Phanérophyte** : plante dont le bourgeon est situé à plus de 50 cm au-dessus du sol : arbres, arbuste et lianes.

**Phénologie** : étude de l'apparition d'événements périodiques (annuels le plus souvent) dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat.

**Photosynthèse** : processus bioénergétique qui permet aux plantes de synthétiser de la matière organique en exploitant la lumière du soleil.

**Mésophile** : se dit d'une essence pour qui l'état hydrique optimal du milieu est un état moyen à bien drainé.

**Mésoxérophile** : se dit d'une essence dont l'état hydrique optimal du milieu est sec, notamment l'été.

**Réserve utile maximale** : quantité d'eau présente dans le sol mobilisable par la végétation (mesurée en mm). Elle va dépendre de la profondeur prospectable par les racines de la plante, de la charge en éléments grossiers du sol, de sa texture et de la densité des divers horizons.

**Sciaphile** (=dryade) : se dit d'une essence qui recherche l'ombre pour se développer.

**Scolyte** : petits insectes xylophages de l'ordre des coléoptères. Ils constituent une grande famille d'insectes dits « ravageurs ».

**Stomate** : orifice de petite taille présent dans l'épiderme des organes aériens des végétaux généralement sur la face inférieure des feuilles, et qui permet les échanges gazeux entre la plante et l'air ambiant.

**Xylophage** : organisme vivant dont le régime alimentaire est composé de bois.

# Table des annexes

<a href="#"><u>Annexe 1 : Fiche modèle Place du hêtre dans les régions</u></a> .....	67
<a href="#"><u>Annexe 2 : Place du hêtre dans les régions françaises</u></a> .....	68
<a href="#"><u>Annexe 3 : Modèle de niche du LERFoB</u></a> .....	69
<a href="#"><u>Annexe 4 : Modèle de niche de l'INRA</u></a> .....	71
<a href="#"><u>Annexe 5 : Modèle de niche IKS</u></a> .....	72
<a href="#"><u>Annexe 6 : Modèle de processus CASTANEA</u></a> .....	73
<a href="#"><u>Annexe 7 : Tableau récapitulatif des enjeux sylvicoles</u></a> .....	74
<a href="#"><u>Annexe 8 : Carte de l'indice de vulnérabilité à partir de la moyenne des modèles de niche</u></a> .....	78

## Annexe 1 : Fiche modèle Place du hêtre dans les régions

Région
<u>SER concernées</u>
<u>Place de la forêt dans la région</u>
Taux de boisement (%)
Surface forestière (ha)
Part de forêts fermées (%)
Volume de bois sur pied (Mm <sup>3</sup> )
<u>Place du hêtre dans la forêt</u>
Surface forestière occupée par le hêtre en tant qu'essence principale (ha)
Part du hêtre (%)
Part de peuplements monospécifiques (sur les forêts où le hêtre est dominant) (%)
Volume de bois sur pied (Mm <sup>3</sup> )
Répartition (Petit Bois, Moyen Bois et Gros Bois)
Qualité des bois (niveau 1, 2, 3)
<u>Problèmes rencontrés par le hêtre</u>
<u>Remarques</u>
<u>Autres essences</u>
- Autres essences dans la région
- Essences suggérées en remplacement
- Essences non recommandées

Figure 24 : Fiche modèle décrivant la place de la forêt et du hêtre dans celle-ci dans les régions administratives françaises (Source : Pecquet, 2011).

## Annexe 2 : Place du hêtre dans les régions françaises

Régions	Taux de boisement (%)	Surface forestière (ha)	Part du hêtre dans les forêts (%)	Part en peuplements monospécifiques (%)	Volume de hêtre (Volume feuillus) (millions de mètres cubes)
ALSACE	39	325 000	22	48	17 (43)
AQUITAINE	48	1 800 000	7	66	12 (115)
AUVERGNE	28	2 600 000	12	84	23 (75)
BASSE-NORMANDIE	10	169 000	24	42	4 (24)
BOURGOGNE	41	981 000	8	24	14 (139)
BRETAGNE	13	357 000	4,6	35	5 (37)
CENTRE	24	932 000	X	X	X (125)
CHAMPAGNE-ARDENNE	24	713 000	12	18	13 (103)
FRANCHE-COMTE	44	720 000	18	33	26 (100)
HAUTE-NORMANDIE	18	221 000	19	56	8 (34)
ILE DE France	22	269 000	X	X	X
LANGUEDOC-ROUSSILLON	43	1 200 000	12	64	14 (52)
LIMOUSIN	33	570 000	7	24	10 (69)
LORRAINE	37	869 000	23	36	33 (111)
MIDI-PYRENEES	30	1 362 000	11	66	26 (139)
NORD-PAS DE CALAIS	9	108 000	X	X	2 (17)
PACA	48	1 517 000	4,5	42	6 (36)
PAYS DE LA LOIRE	10	337 000	X	X	± 1 (36)
PICARDIE	16	321 000	14	49	9 (54)
POITOU-CHARENTES	15	398 000	X	X	-39
RHONE-ALPES	38	1 677 000	23	39	34 (126)
ENSEMBLE	28	17 446 000	10,4	34,6	257 (1474)

**Tableau 3 : Tableau récapitulatif de la place du hêtre dans les régions françaises (Source : IFN, 2010).**

### Annexe 3 : Modèle de niche du LERFoB

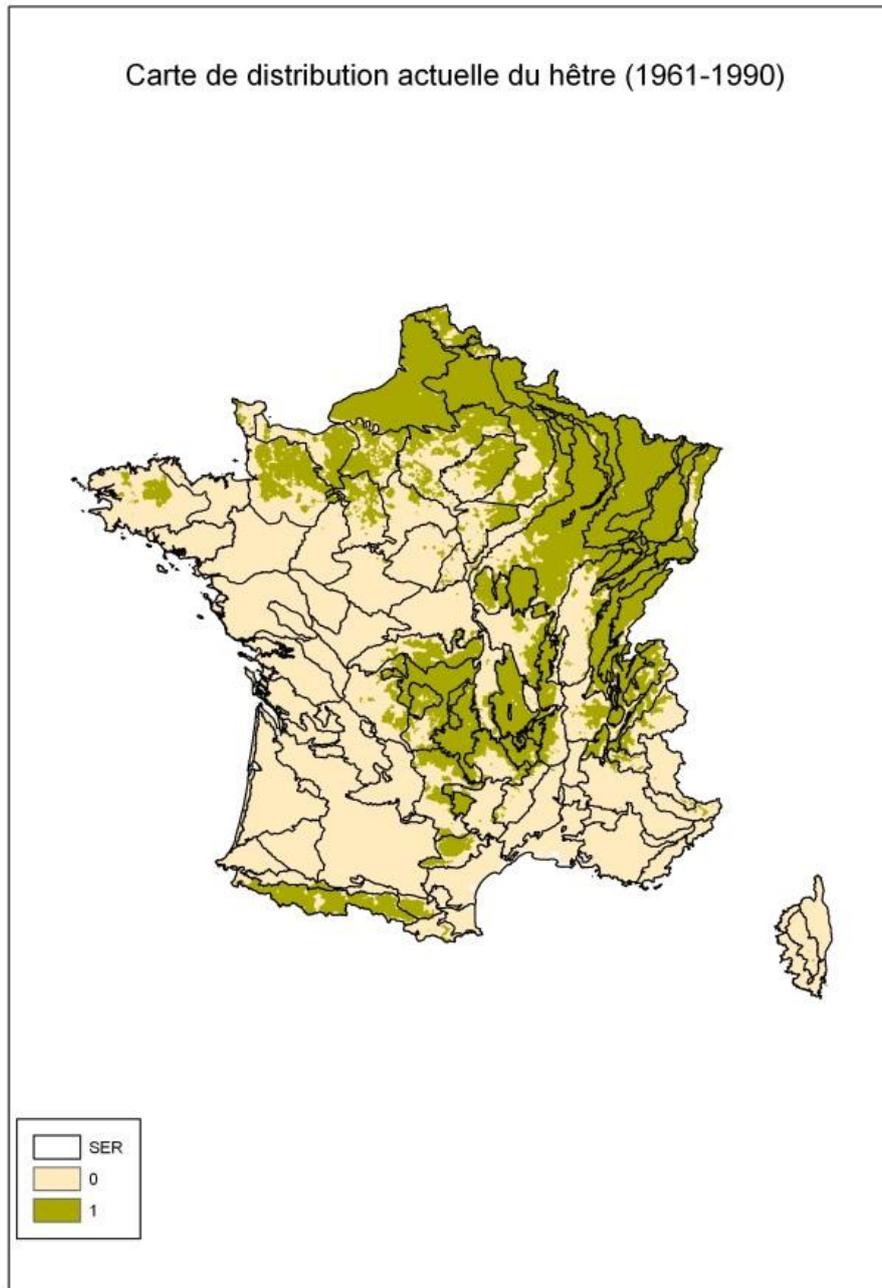


Figure 25 : Carte de distribution des probabilités de présence moyenne pour la période actuelle (modèle LERFoB). Les limites correspondent aux SER, les zones claires sont les zones où le hêtre est absent et les zones vertes où il est présent. Source : Christian Piedallu (Données 2009). Carte réalisée par Pauline Pecquet à partir des données du LERFoB.

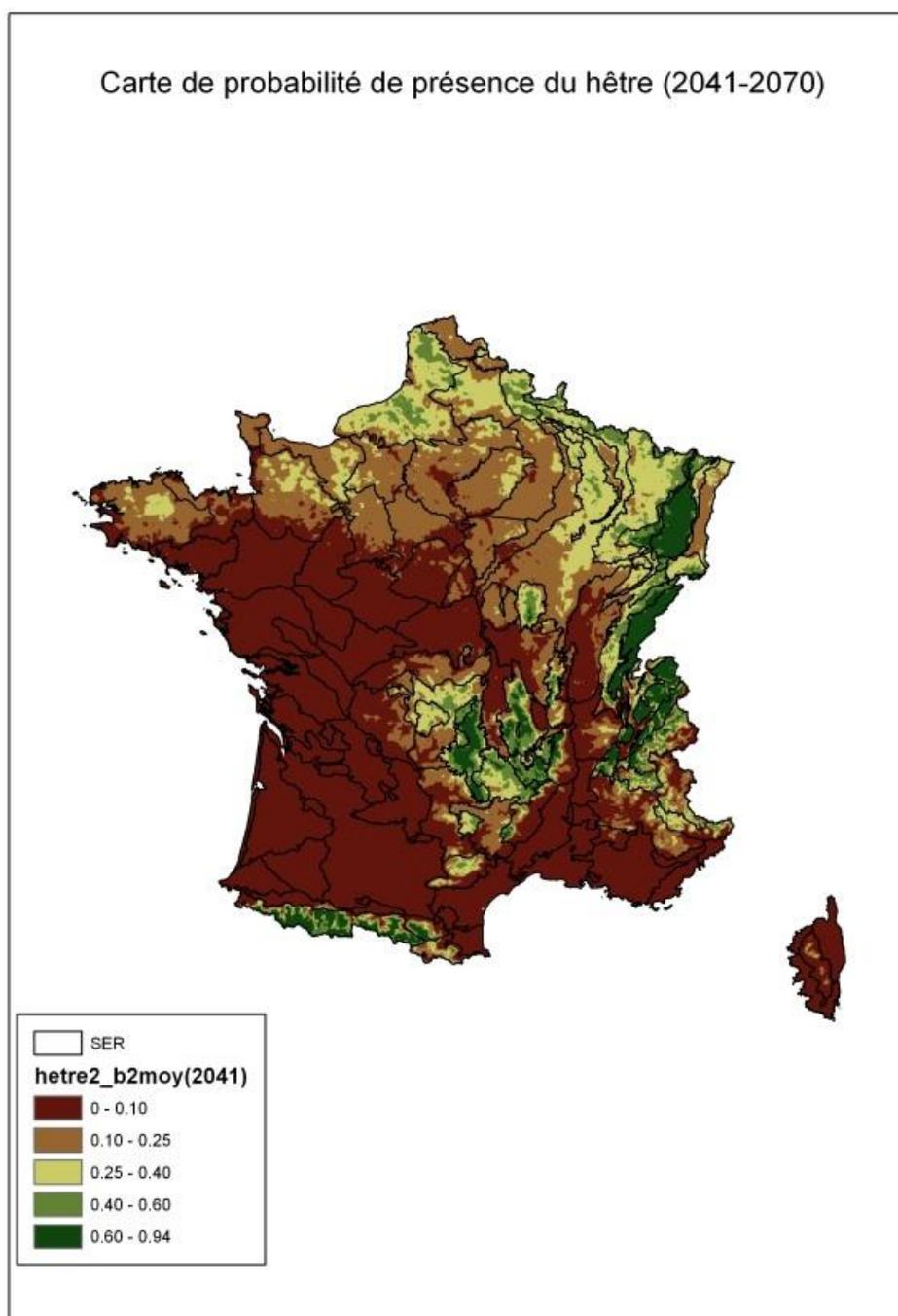


Figure 26 : Carte de la distribution des probabilités de présence moyenne pour la période future (modèle LERFoB). Scénario B2, modèle HadCM3. Les couleurs correspondent à l'échelle de la probabilité de présence du hêtre. Source : Piedallu et al. (2009). Carte réalisée par Pauline Pecquet à partir des données du LERFoB.

## Annexe 4 : Modèle de niche de l'INRA

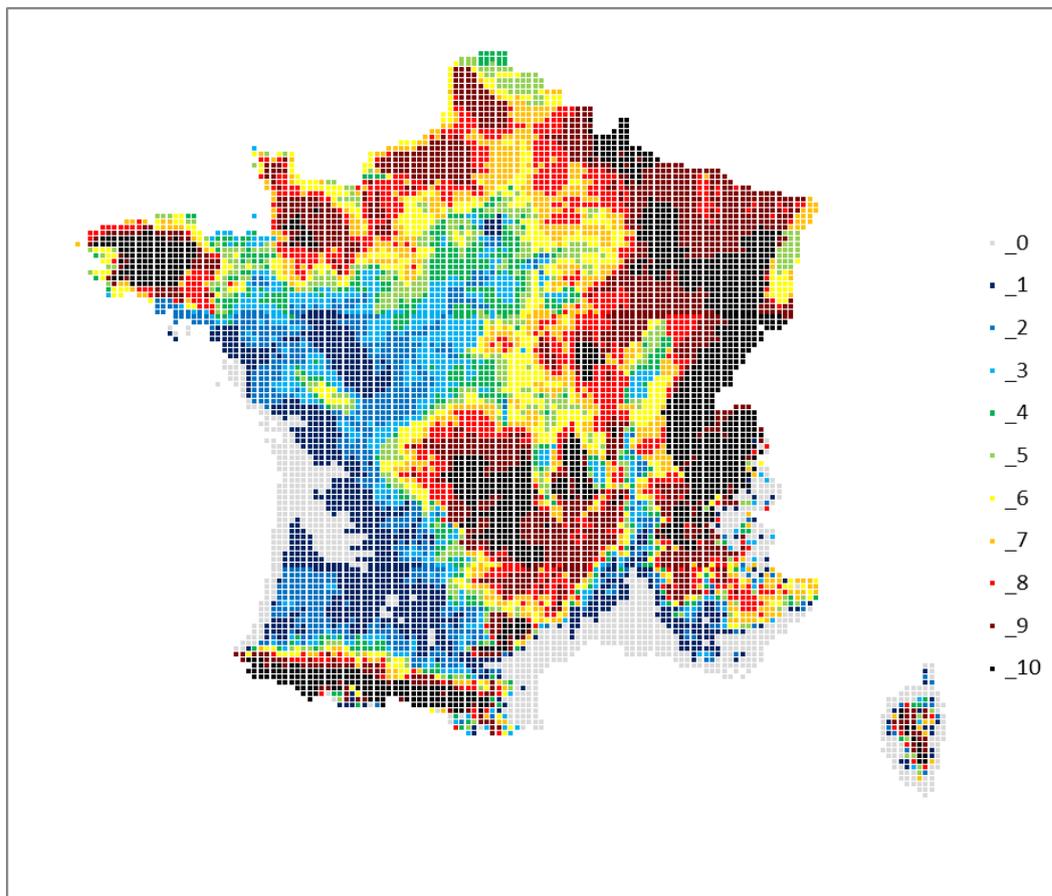


Figure 27 : Carte de distribution des probabilités de présence future pour le modèle INRA avec 7 variables (source : Vincent BADEAU). Données 2011. À noter que ceci est une carte de travail.

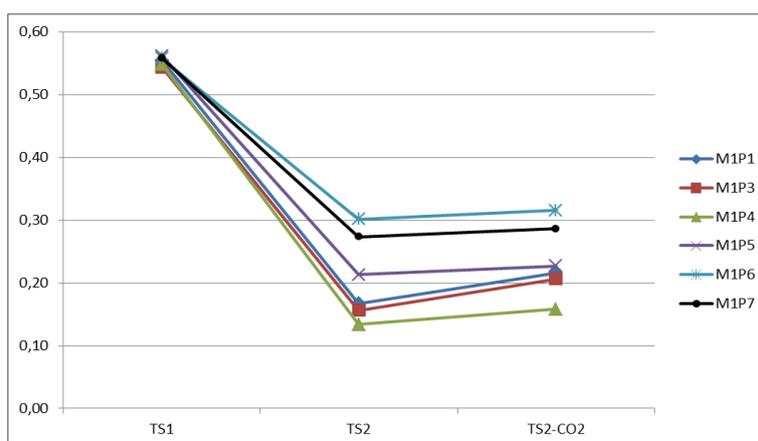


Figure 28 : Graphique de distribution des probabilités de présence moyenne pour l'actuel (TS1), 2050 (TS2) et 2050 Avec prise en compte du CO<sub>2</sub> selon 6 versions du modèle de l'INRA (Source : Vincent Badeau). Données 2011.

## Annexe 5 : Modèle de niche IKS

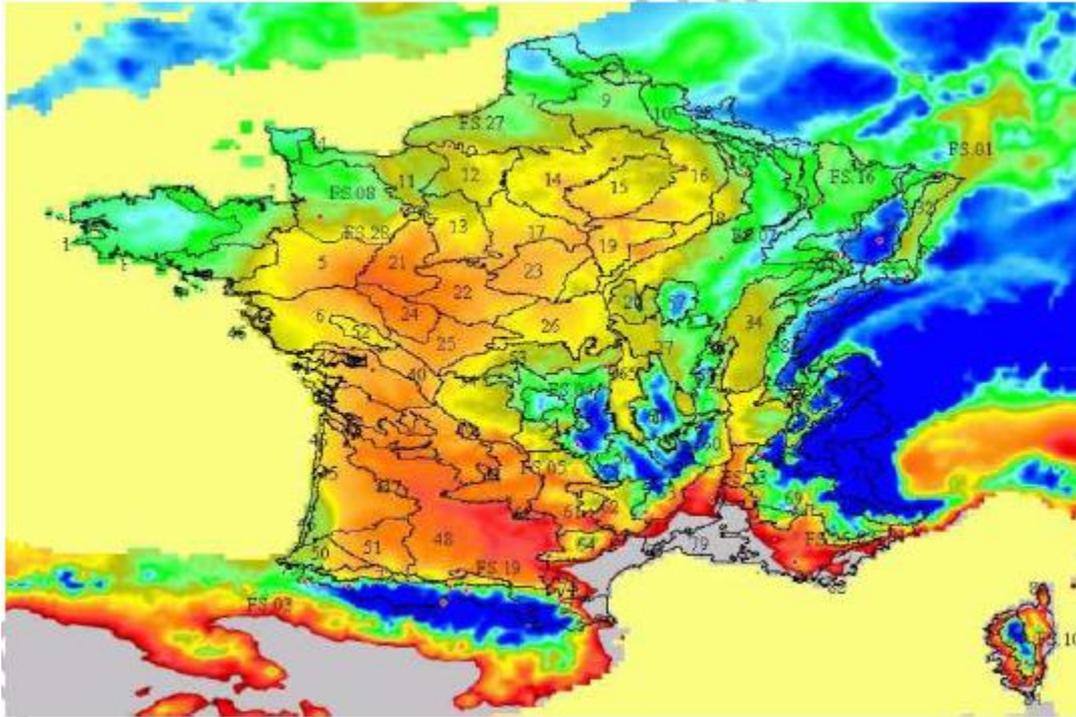


Figure 29 : Carte des probabilités de présence moyenne du hêtre pour 2080. Gris clair : hors aire. Bleu :  $p=1$ , Vert :  $p=0.75$ , Jaune :  $p=0.5$ , Rouge :  $p=0$ . Les traits sont les limites des SER et les codes sont les positions des unités de conservation. Source : Hervé Le Bouler (2011).

## Annexe 6 : Modèle de processus CASTANEA

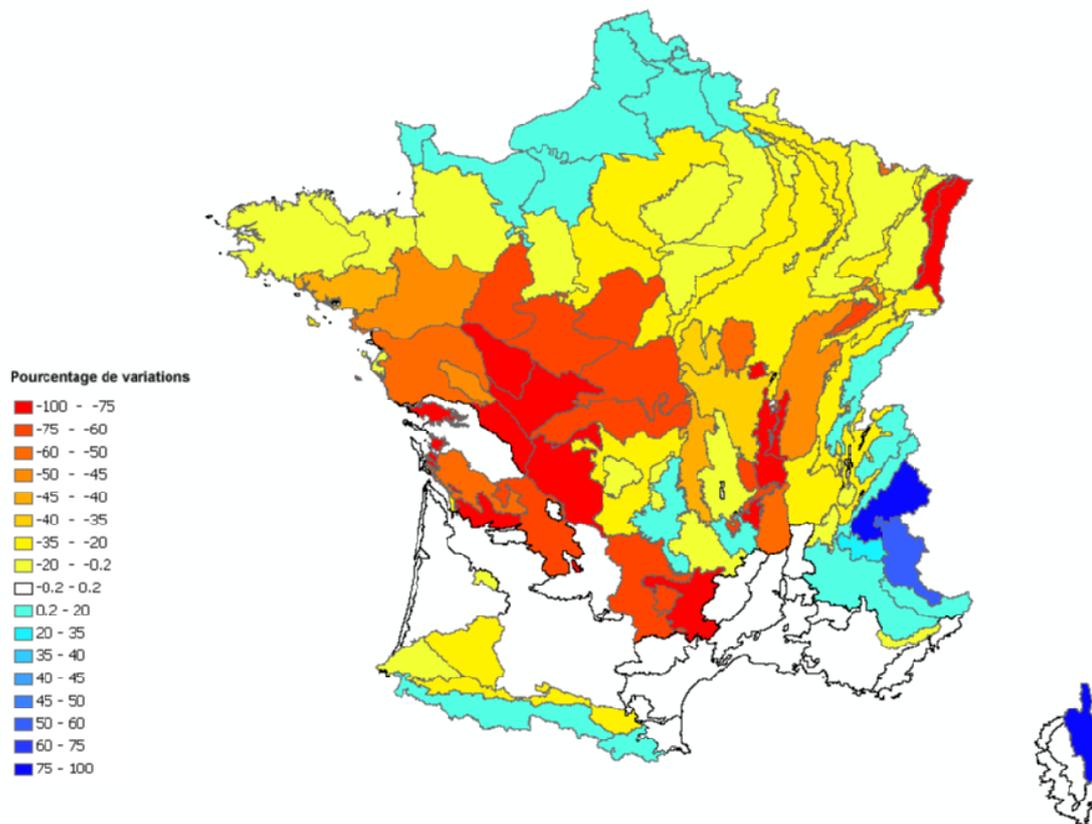


Figure 30 : Carte de la variation de la productivité entre la période actuelle et 2050 (Source : Christophe François, données 2011).

**Annexe 7 : Tableau récapitulatif des enjeux sylvicoles  
par SER de plaine**

SER	Nom de la SER	Volume de bois par placettes (m3/ha)	Surface terrière par placette (m²/ha)	Volume de hêtre par placettes (m3/ha)	Surface terrière de hêtre (m²/ha)	Nombre de placettes total	Nombre de placettes avec hêtre	Surface forestière totale	Volume de hêtre total	Surface terrière de hêtre totale
C20	Plateaux calcaires du Nord-Est	156,63	20,48	29,38	3,33	2584	1011	1237736	36365182	4119616
D12	Collines périvosgiennes et Warndt	251,88	25,65	83,71	8,19	419	252	200701	16801174	1643075
B10	Côtes et plateaux de la Manche	184,56	22,62	47,23	5,09	459	185	219861	10383082	1118925
C30	Plaines et dépressions argileuses du Nord-Est	194,40	22,30	26,72	2,72	814	277	389906	10418015	1060444
B41	Bassin parisien tertiaire	182,55	21,93	20,23	2,10	791	160	378889	7664584	797181
A11	Ouest Bretagne et Nord-Cotentin	155,90	23,43	15,68	2,12	459	115	219861	3446549	466048
A13	Bocage normand et Pays de Fougères	181,67	22,64	25,92	3,09	309	109	148011	3836072	457550
C51	Saône, Bresse et Dombes	170,85	20,88	12,06	1,26	661	103	316619	3817328	397929
B32	Plateaux de l'Eure	176,02	22,08	20,18	2,31	329	77	157591	3180814	363393
C42	Sundgau alsacien et belfortien	242,74	26,39	61,53	6,09	114	57	54606	3359922	332603
B53	Pays-Fort, Nivernais et plaines prémorvandelles	199,80	22,81	12,58	1,47	362	93	173398	2181993	255503
G11	Châtaigneraie du Centre et de l'Ouest	161,23	22,10	6,01	0,76	519	65	248601	1494576	189186
J22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	59,14	13,79	3,83	0,73	433	24	207407	794129	150430
C12	Argonne	239,34	25,15	21,87	2,20	130	36	62270	1361754	137238
A12	Pays de Saint-Malo	186,79	26,73	13,28	1,71	148	41	70892	941791	121082
C11	Ardenne primaire	200,77	23,36	10,26	1,21	192	35	91968	943644	110970
B33	Perche	205,38	23,79	6,84	0,78	292	42	139868	957123	109317
B52	Pays d'Othe et Gatinais oriental	186,56	22,33	6,07	0,69	332	43	159028	965003	109222
B31	Campagne de Caen et Pays d'Auge	186,15	22,79	16,91	1,94	117	31	56043	947433	108790
F30	Côteaux de la Garonne	142,00	20,51	1,90	0,25	856	27	410024	779103	103287
B42	Brie et Tardenois	171,69	20,70	4,25	0,49	437	33	209323	890073	101898

B92	Bourbonnais et Charolais	198,47	23,90	5,05	0,69	290	43	138910	700897	96016
B23	Mosan, Thiérache et Hainaut	227,10	24,50	16,94	1,89	104	25	49816	843960	94152
A21	Bretagne méridionale	174,26	25,27	7,75	0,94	200	19	95800	742862	90502
B51	Champagne humide	194,39	22,20	4,41	0,45	394	39	188726	831707	85487
A22	Bocage armoricain	166,78	22,55	7,53	0,92	190	28	91010	685037	83868
B91	Boischaut et Champagne berrichonne	183,76	22,59	4,20	0,48	360	31	172440	725053	82417
C41	Plaine d'Alsace	136,31	17,01	8,41	0,83	184	23	88136	741027	73186
F52	Collines de l'Adour	171,47	22,22	3,89	0,49	251	17	120229	467734	59037
F51	Adour atlantique	150,80	20,21	3,46	0,43	199	8	95321	329710	41357
B70	Sologne - Orléanais	154,03	20,49	0,66	0,08	850	15	407150	270750	32663
F12	Groies	92,57	16,14	3,11	0,41	146	9	69934	217835	28960
B62	Champagne - Gâtine tourangelle	187,07	24,66	0,85	0,12	425	13	203575	173020	24079
B61	Baugeois - Maine	180,88	23,98	1,02	0,13	335	8	160465	163358	20089
B43	Champagne crayeuse	114,73	16,13	0,95	0,12	122	5	58438	55425	7017
F15	Périgord	148,49	21,36	0,17	0,02	583	3	279257	46233	6763
B21	Flandres	176,68	21,20	2,45	0,30	41	3	19639	48130	5901

B22	Plaine picarde	179,37	23,66	0,60	0,14	69	2	33051	19682	4589
F40	Causse du Sud-Ouest	85,87	15,68	0,15	0,02	468	2	224172	33276	4546
B44	Beauce	135,55	19,61	0,50	0,07	88	2	42152	20980	3003
B82	Brenne et Brandes	156,91	22,95	0,10	0,01	291	2	139389	14265	2045
A30	Bocage vendéen	115,50	18,24	0,12	0,03	144	1	68976	8258	1724

J23	Provence calcaire	61,66	13,71	0,03	0,00	786	1	376494	10969	1715
K11	Corse occidentale	70,64	16,97	0,00	0,00	203	0	97237	0	0
J30	Maures et Esterel	66,87	16,78	0,00	0,00	185	0	88615	0	0
J24	Secteurs niçois et préligure	71,46	15,48	0,00	0,00	53	0	25387	0	0
J21	Roussillon	52,79	13,21	0,00	0,00	99	0	47421	0	0
J10	Garrigues	49,85	12,59	0,00	0,00	415	0	198785	0	0
F23	Bazadais, Double et Landais	103,41	15,23	0,00	0,00	370	0	177230	0	0
F22	Dunes atlantiques	150,89	20,41	0,00	0,00	217	0	103943	0	0
F21	Landes de Gascogne	125,38	16,01	0,00	0,00	1027	0	491933	0	0
F14	Champagne charentaise	129,21	19,74	0,00	0,00	133	0	63707	0	0
F13	Marais littoraux	77,97	14,77	0,00	0,00	8	0	3832	0	0
F11	Terres rouges	122,13	19,66	0,00	0,00	107	0	51253	0	0
B81	Laudunais et Saumurois	121,95	19,11	0,00	0,00	152	0	72808	0	0

**Tableau 4 : Classement des SER par les enjeux sylvicoles calculés à partir de la surface terrière du hêtre (Source : données IFN, 2009).**

Légende	Niveau d'enjeu	Gamme de valeurs (Surface terrière)
	<b>Fort</b>	> 250000
	<b>Moyen_Fort</b>	100 000 à 250 000
	<b>Moyen_Faible</b>	50 000 à 100 000
	<b>Faible</b>	10 000 à 50 000
	<b>Très faible</b>	5 000 à 10 000
	<b>Absent</b>	< 5 000

## Annexe 8 : Carte de l'indice de vulnérabilité à partir de la moyenne des modèles de niche

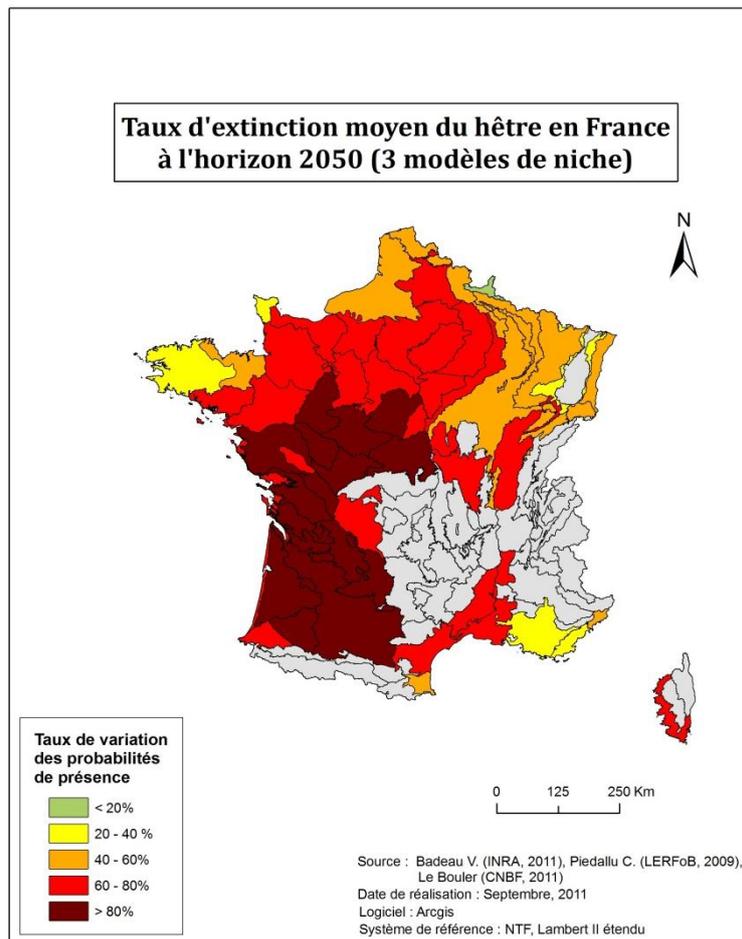


Figure 31 : Carte de la vulnérabilité du hêtre calculée à partir des trois modèles de niche (Sources : V. Badeau (2011), C. Piedallu (2009), H. Le Bouler (2011)).



## Résumé

Le changement climatique annoncé va avoir de forts impacts sur les forêts de France. L'étude propose d'évaluer, à l'échelle de régions écologiques, la vulnérabilité du hêtre en prenant en considération les enjeux sylvicoles potentiellement menacés par la modification de son aire de distribution et par les perturbations phénologiques attendues. Par l'étude et la comparaison de modèles d'impact, l'essence apparaît très menacée et le risque, mesuré par la combinaison de la vulnérabilité et des enjeux, est majeur dans Nord-Est de la France et le long du littoral nord-atlantique. L'incertitude qui peut exister est quantifiée par l'analyse des divergences entre modèles. Des perspectives pour l'adaptation et une meilleure quantification du risque sont proposées