



Le chêne pédonculé face aux changements climatiques



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Aurélia RODRIGUES
17^e promotion (2006-2009)
Maîtres de stage : C. Piedallu, E. Lacombe et O. Lanter

Septembre 2009



Le chêne pédonculé face aux changements climatiques

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Aurélia RODRIGUES
17^e promotion (2006-2009)
Sous la tutelle de : C. Piedallu, E. Lacombe et O. Lanter

Septembre 2009

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVES FIF

F.I.F. - E.N.G.R.E.F.	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Le chêne pédonculé face aux changements climatiques	Mots clés: Changement climatique – dépérissement – chêne pédonculé – modélisation
AUTEUR(S): Aurélie RODRIGUES	Promotion 17 ^e (2006-2009)
Caractéristiques : 1 volume ; 64 pages ; 20 annexes	

CADRE DU TRAVAIL	
ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Office National des Forêts – DT Lorraine AgroParisTech - ENGREF Nancy	
Nom du responsable : Olivier Lanter (ONF) Fonction : Christian Piedallu et Eric Lacombe (AgroParisTech)	
Nom du correspondant ENGREF :	
Tronc Commun <input type="checkbox"/> Stage entreprise <input type="checkbox"/> Autres <input type="checkbox"/> Option <input type="checkbox"/> Stage étranger <input type="checkbox"/> Spécialité <input type="checkbox"/> Stage fin d'études <input checked="" type="checkbox"/>	
Date de remise : 18/09/2009	
Contrat Junior Entreprise	OUI- NON

SUITE A DONNER (réservé au Service des Etudes)	
Non consultable <input type="checkbox"/> si oui permanent <input type="checkbox"/> jusqu'à .../.../...	Consultable et Diffusable <input type="checkbox"/>

Résumé

En France, de nombreux massifs forestiers constitués de chênaies pédonculées présentent des taux de mortalité particulièrement élevés, ce qui inquiète propriétaires et gestionnaires. Dans cette étude, nous allons chercher à voir s'il existe un lien entre ces mortalités constatées et le réchauffement climatique grâce à deux approches complémentaires. La première consiste à réaliser un modèle de l'aire de distribution potentielle pour une période antérieure au changement climatique (1961-1990) et à projeter ce modèle dans le futur. La seconde consiste en une modélisation des dépérissements basés sur les deux indicateurs relevés par l'IFN (branches mortes et arbres morts). Les résultats obtenus à l'issue de la confrontation des deux approches laisseraient penser qu'il puisse exister un lien entre l'évolution des aires de distributions potentielles du chêne pédonculé et les probabilités de mortalités des houppiers et des arbres.

Abstract

In France, many forests consist of pedonculate oak present mortality rates particularly high, what worries owners and managers. In this study, we will try to see if there is a link between these deaths and the observed global warming through two complementary approaches. The first one consists in modelling distribution for any period prior to climate change (1961-1990) and projects these models in the future. The second one is a model of dieback based on two indicators identified by the IFN (dead branches and dead trees). The results obtained from the comparison of these two approaches would suggest there may be a link between changes in areas of potential distributions of oak and the probability of mortality and tree crowns.

Remerciements

Avant de présenter les résultats de mon travail, je souhaite vivement remercier tous ceux qui de près ou de loin ont su m'aider à avancer dans l'élaboration de ce projet et à le faire aboutir.

Je tiens à remercier tout particulièrement Christian Piedallu pour toute l'aide qu'il m'a apportée. Je le remercie pour m'avoir consacré beaucoup de son temps précieux et pour toute la pédagogie dont il a fait preuve.

Je remercie également Eric Lacombe sans qui ce projet n'aurait pas pu voir le jour, mais aussi pour ses bons conseils et le soutien qu'il m'a apporté.

Et bien sûr, je n'oublie pas Olivier Lanter et Dominique Messant pour leurs conseils, leurs participations et l'intérêt qu'ils ont su garder tout au long du projet.

Je remercie aussi François Morneau et Jean-Christophe Hervé de l'IFN pour la mise à disposition des données dans le cadre de la thèse de Christian Piedallu.

Un grand merci également à Louis Michel Nageleisen et Myriam Legay pour leurs conseils avisés, ainsi qu'à Benoit Marçais pour m'avoir mis à disposition certaines données.

Je remercie Vincent Perez pour son soutien technique et sa bonne humeur. Enfin un grand merci à toute l'équipe du Lerfob pour leur écoute, leur disponibilité et leur participation de près ou de loin à la réalisation de cette étude.

Je tiens aussi à citer ma famille et mes amis qui m'ont énormément soutenue et conseillée à leur manière. Merci à vous, Yvonne, Tozé, Alexandre et bien sûr Samuel.

SOMMAIRE

Introduction	1
I. - Contexte de l'Étude	2
1. - Changements climatiques globaux	2
2. - Impacts redoutés d'un tel réchauffement sur les essences forestières	3
2.1. - Conséquences déjà observées sur les essences forestières	3
2.2. - Conséquences probables sur les essences forestières	4
3. - Le chêne pédonculé est-il en danger ?	5
3.1. - Éléments d'écologie de <i>Quercus robur</i>	5
3.1.1. - Aire de distribution actuelle	5
3.1.2. - Autécologie de l'essence	5
3.2. - Le dépérissement : définition	6
3.3. - Constat général de l'état de santé des chênaies françaises	6
3.4. - Symptômes du dépérissement	7
3.5. - Facteurs conduisant aux dépérissements	7
II. - DÉMARCHE GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE	8
1. - Objectifs	8
2. - Description globale de la méthode	8
3. - Choix et origine des données à expliquer	10
3.1. - Variables caractérisant la distribution des essences	10
3.2. - Variables caractérisant le dépérissement	11
3.2.1. - Les indicateurs de vitalité	11
4. - Choix et origine des données explicatives	15
4.1. - Une approche temporelle	15
4.2. - Origine des données climatiques	15
4.2.1. - Données Aurelhy de Météo France pour la période 1961-1990	15
4.2.2. - Obtention des données pour la période 1991 – 2004 et l'année 2003	16
4.3. - Données calculées	19
4.3.1. - Données disponibles au Lerfob	19
4.3.2. - Données calculées dans le cadre de cette étude	22
5. - Démarche statistique	25
5.1. - Cadre conceptuel, hypothèses écologiques	25
5.2. - Principe de la sélection des variables	25
5.3. - La régression linéaire multiple	25
5.3.1. - Application	25
5.3.2. - Evaluation de la qualité de la régression linéaire	26
5.4. - La régression logistique	26
5.4.1. - Critères de qualité de la régression logistique	26
5.5. - Outils d'interprétation	27
5.6. - Apport des variables aux modèles	28

III. - MODÉLISATION DE L'AIRE POTENTIELLE DE DISTRIBUTION DU CHÊNE PÉDONCULÉ	29
1. - Facteurs écologiques influençant la distribution	29
1.1. - Première variable explicative : l'indice d'engorgement total	29
1.2. - Deuxième variable explicative : la réserve utile de mars	30
1.3. - Troisième variable explicative : l'évapotranspiration potentielle de juillet	31
1.4. - Quatrième variable explicative : la température minimale de février	33
1.5. - Cinquième variable explicative : l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse	34
1.6. - Sixième variable explicative : le pH	36
2. - Apport des variables à l'explication de la distribution	37
3. - Cartographie du modèle	38
3.1. - Un modèle robuste à l'échelle de la France	38
3.2. - Prédictions à l'échelle de la Lorraine	39
4. - Evaluation des prédictions du modèle	40
5. - Quelques erreurs de prédiction	41
6. - Projections du modèle dans le futur	43
IV. - Modélisation de la mortalité des houppiers et des arbres	46
1. - Variables constitutives des modèles de mortalité de branches	46
1.1. - Première approche : la régression logistique	46
1.1.1. - Choix des variables pour la modélisation des mortalités de branches au seuil de 5 %	46
1.1.2. - Apport des variables à l'explication des probabilités de mortalité de branches	50
1.1.3. - Représentation spatiale des probabilités de mortalité de branches au seuil de 5 %	51
1.1.4. - Elaboration des modèles de branches mortes au seuil de 25 et 50 %	51
1.2. - Deuxième approche : la régression linéaire	52
2. - Modélisation des mortalités des arbres sur la période de référence 1961-1990	53
2.1 - Résumé de l'élaboration du modèle de mortalité des arbres	53
2.2 - Représentation spatiale des prédictions de mortalité du chêne pédonculé	54
3. - Evolution des conditions écologiques depuis 1990	54
3.1. - Evolution des variables écologiques	54
3.2. - Modélisations réalisées sur la période 1991 – 2004 et l'année 2003	55
V. - Confrontation des résultats issus des modèles de distribution potentielle et de mortalité du chêne pédonculé	57
 Discussion	 60
 Conclusion	 63
 Bibliographie	
Carnet d'adresse	
Annexes	

Introduction

Alors qu'aujourd'hui le réchauffement climatique est un fait indiscutable, le devenir des essences est un sujet qui préoccupe de plus en plus les gestionnaires (Riou-Nivert, 2005). Depuis plusieurs années, de nombreux massifs forestiers français subissent d'importants dépérissements, notamment de chênes pédonculés, et on peut s'attendre à des répercussions économiques importantes sur la filière bois (Riou-Nivert, 2008).

Avec 1,48 millions d'hectare de surface productive qui représentent 40 % du volume des bois sur pied, les chênes pédonculé (*Quercus robur*) et sessile (*Quercus petraea*) constituent la première ressource forestière française en superficie et en volume. (Sardin, 2008). Les dépérissements massifs de chênes pédonculés ne sont pas uniquement observés en France (forêt de Vierzon, de Fénétrange) mais aussi dans d'autres pays européens (Delatour, 1983).

Ils sont généralement attribués aux événements climatiques extrêmes (sécheresse intense, canicules exceptionnelles) qui risquent d'être de plus en plus fréquents avec les changements climatiques. (Landmann, Bréda *et al.*, 2003). De plus, les conditions écologiques actuelles vont très probablement évoluer (Peyron, 2005) et l'ONF souhaite obtenir des informations sur le devenir du chêne pédonculé. L'enjeu est de taille puisqu'il intervient à court terme (quelques dizaines d'années), ce qui est très proche si l'on considère le temps d'une révolution sylvicole.

Cependant, aucun lien scientifique n'a jusqu'alors été démontré entre les dépérissements observés et les changements climatiques.

Ce travail a pour but de déterminer si un lien de cause à effet peut être fait entre les changements climatiques et les dépérissements du chêne pédonculé. Cela permettrait de déterminer les régions où les risques potentiels de dépérissement seraient les plus importants.

Pour cela, une première phase de travail consistera à comparer les modélisations de l'aire de distribution potentielle élaborée sur une période de référence (période 1961-1990) et différentes périodes ultérieures (1991-2004 ; année 2003 ; 2021-2050 et 2071-2100). Les modèles seront calibrés et validés à l'échelle de la France.

Au cours de la deuxième phase de l'étude, des modèles de dépérissement se basant sur des indices d'état sanitaire des arbres relevés par l'IFN seront réalisés. Il s'agira de tenter de caractériser les facteurs écologiques qui risquent d'influer sur les mortalités.

Puis, une analyse croisée des résultats obtenus par les deux approches sera réalisée. À partir de là, et dans les limites des moyens actuels, le travail consistera à tenter de voir s'il est possible d'établir un lien entre le réchauffement climatique et les dégradations de l'état de santé des chênaies pédonculées.

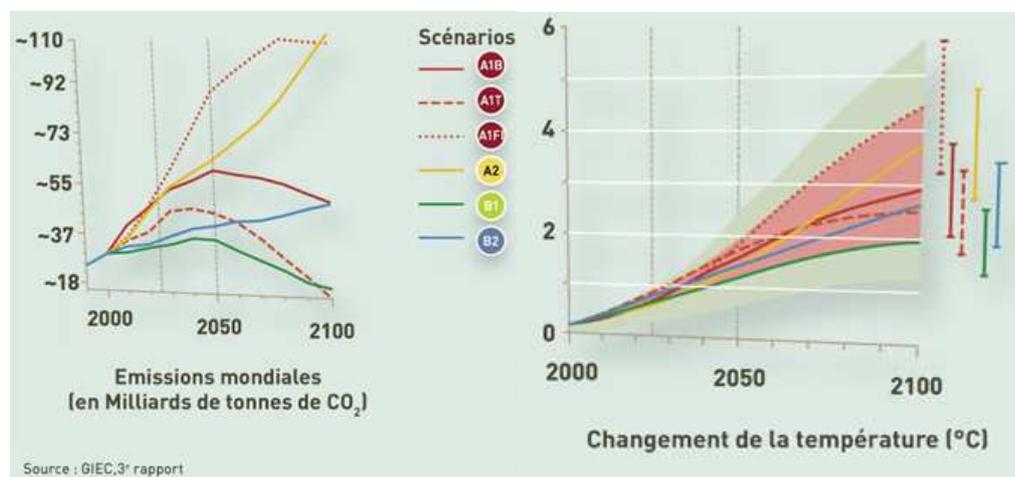
I. - CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1. - Changements climatiques globaux

Il est aujourd'hui admis très largement que les augmentations des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, protoxyde d'azote...) sont responsables des élévations globales des températures et par là-même du réchauffement planétaire (Ducousso et Déqué, 2005).

Depuis les années 1850 et la révolution industrielle, les concentrations de ces gaz ont augmenté de façon exponentielle. Ces concentrations n'ont jamais été aussi élevées qu'au cours de ces dernières années, principalement à cause des combustions d'énergie fossile et de l'agriculture. Le GIEC (groupe d'experts international sur l'évolution du climat), suite à l'analyse de séries historiques de données climatiques mondiales, a montré un réchauffement moyen de l'ordre de $0,74 \text{ °C} \pm 0,18 \text{ °C}$ entre 1906 et 2005 et une hausse de la pluviométrie décennale de 0,5 à 1 % en hiver, et une réduction des pluies en été. (GIEC, 2007)

L'évolution du climat étant directement liée aux activités humaines, quatre scénarios de développement économique mondial sont étudiés pour tenter de prédire le climat de demain (GIEC, 2007). Des politiques de développement va dépendre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre et donc le changement climatique à venir. Le graphique 1 présenté ci-dessous, extrait du 3^e rapport du GIEC, présente les scénarios faisant le plus consensus au sein de la communauté scientifique. A1 et A2 sont les scénarios les plus pessimistes avec des prévisions d'augmentation exponentielle des émissions de gaz à effet de serre. Les scénarios B1 et B2 sont considérés comme plus optimistes avec la mise en place de politiques de préservation de l'environnement conduisant à une stabilité des émissions voire une légère réduction.



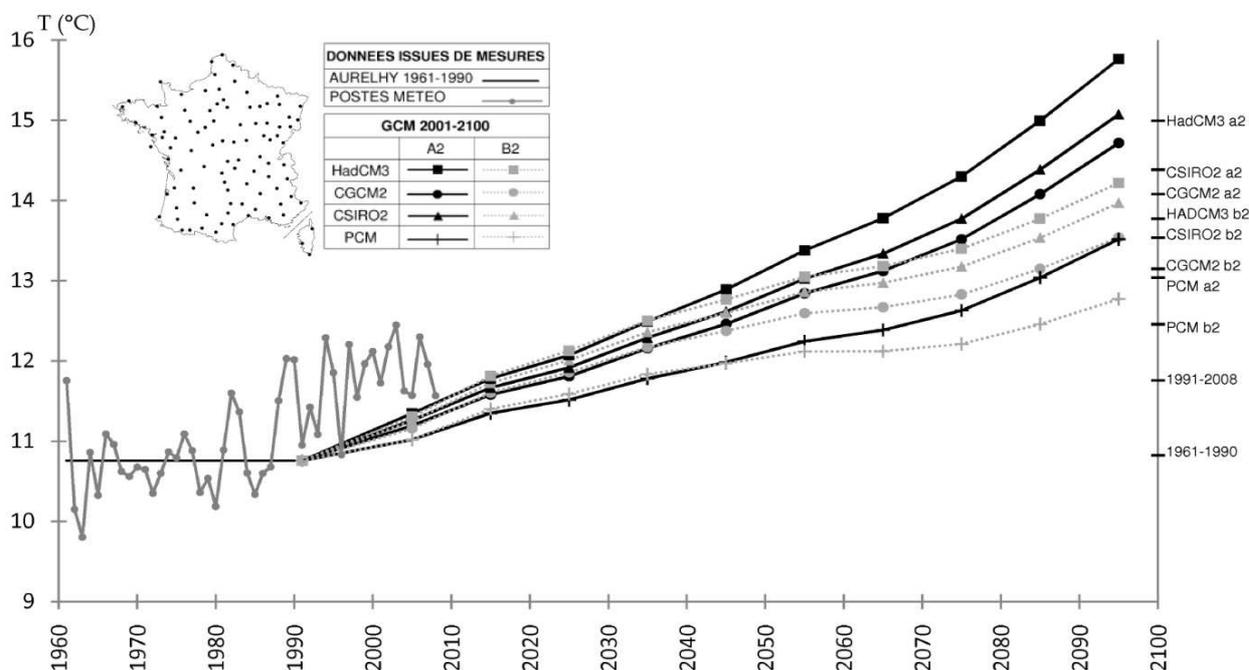
Graphique 1 : Prédiction de l'évolution des émissions de dioxyde de carbone et des changements de température d'ici à 2100 (Source : GIEC, 3^e rapport - 2001)

En France, des modélisations ont été réalisées par Météo France pour prévoir les évolutions du climat (températures, pluviométrie). Il en résulte une élévation de la température tant en hiver qu'en été d'ici à la fin du siècle, une augmentation de la pluviométrie en hiver et une baisse en été et en automne, et une augmentation des quantités d'eau potentiellement disponible pour les plantes en hiver et au printemps suivie par une forte baisse en été et en automne. Ces résultats sont synthétisés dans le tableau 1 (A. Ducousso *et al.* 2005 ; Planton *et al.*, 2004).

	Scénario B2	Scénario A2
Températures moyennes annuelles	+ 2 à 2,5°C	+3 à 3,5°C
Précipitations hivernales	Augmentation d'environ 25% des jours où précipitations > 10mm	
Précipitations estivales	Diminution (plus importante pour A2)	
Périodes de chaleur	7 jours/an où la température maximale dépasse 35°C	14 jours/an où la température maximale dépasse 35°C
Sécheresses estivales	+ 4 jours/an de sécheresse	+ 9 jours/an de sécheresse

Tableau 1: Prévisions du modèle climatique de Météo France en fonction des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre à la fin du 21e siècle pour la France (Source : Planton, 2004).

Si on examine les températures mesurées et si on les compare aux modèles, on s'aperçoit que pour les années 1990 à 2008, les valeurs mesurées sont supérieures aux estimations des modèles (Cf. graphique 2). Même si cela ne permet pas de tirer de conclusions pour la suite, la tendance actuelle est plus haute que les prédictions.



Graphique 2: Comparaison de l'évolution des températures prédites par les différents modèles et scénarios avec celle réellement observée sur les postes Météo France. (Source : Christian Piedallu)

2. - Impacts redoutés d'un tel réchauffement sur les essences forestières

2.1. - Conséquences déjà observées sur les essences forestières

La distribution et la croissance des essences sont conditionnées par leurs exigences écologiques. Ainsi la température est un facteur considéré comme limitant tout comme l'alimentation en eau. Des études ont été réalisées en forêt pour tenter d'évaluer l'impact déjà mesurée ou prévisible d'un réchauffement climatique (Becker et Lévy, 1983 ; Delatour, 1983 ; Landmann, Bonneau, 1994 ; Bréda *et al.*, 2004 ; Aussenac et Guehl, 2005, Morin et Chuine, 2007).

Les premiers résultats montrent que le réchauffement climatique est à l'origine de modifications de la croissance et du développement des essences forestières. Avec l'augmentation globale des températures, on constate un allongement de la saison de végétation qui se traduit par un débourrement plus précoce et une chute des feuilles plus tardive (Moisselin et al., 2002). Cela a pour conséquence directe une plus forte exposition des arbres aux gelées précoces et tardives ce qui peut compromettre la floraison et la capacité photosynthétique des arbres. (Seguin, 2007). Il est à noter que la résistance des arbres aux froids (endurcissement) varie au cours de l'année, elle est maximale en hiver et faible durant la saison de végétation. En automne, le réchauffement tend à retarder l'apparition des premières gelées mais entraîne un retard dans l'endurcissement au froid d'où une sénescence plus précoce des feuilles.

Combinés avec la température, les précipitations vont conditionner le fonctionnement physiologique des arbres. La diminution des quantités de pluies estivales est à l'origine des déficits hydriques qui, lorsqu'ils sont répétés, perturbent le fonctionnement physiologique des arbres en provoquant l'embolie ou la cavitation des vaisseaux du xylème malgré les mécanismes mis en place par les arbres pour résister à la sécheresse (enracinement profond, arrêt de l'évapotranspiration puis contrôle de l'ouverture des stomates, réajustement osmotique, ajustement de la surface foliaire). Ces dégâts occasionnés au niveau du système conducteur ne peuvent être restaurés au cours de la saison de végétation et conduisent à un blocage de la circulation de l'eau et donc de la transpiration (système de refroidissement des feuilles inefficace occasionnant des brûlures qui peuvent atteindre les bourgeons et compromettre la pousse de l'année suivante), de la photosynthèse et de la croissance (Bréda *et al.*, 2004, 2006 ; Ducouso et Dequé, 2005).

Des facteurs secondaires sont également évoqués comme les vents. L'augmentation de la force des vents affecte la physiologie (transpiration, photosynthèse et croissance) mais aussi la morphologie des arbres. Un vent fort peut occasionner des ruptures au niveau des racines de l'arbre mais aussi le décollement des anneaux ligneux ou des fentes dans le bois d'aubier. La neige comme le vent peut entraîner des bris au niveau des branches, parfois irréversibles (Aussenac et Guehl, 1994).

Certaines essences forestières sont présentes dans des stations sur des sols superficiels (faible porosité, forte compacité, structure instable, texture grossière) ou hydromorphes. Au niveau de l'arbre, on peut observer au printemps un mauvais fonctionnement du système racinaire (réduction de la respiration des racines, diminution de l'absorption d'eau et de minéraux) allant souvent jusqu'à la nécrose d'une partie du système racinaire. En été, le système racinaire diminué reprend la colonisation du sol en retard (Lefèvre et al., 2006). Aussi, les conditions écologiques dans lesquelles évoluent les essences forestières peuvent être à l'origine de plus forts risques de dépérissement et de mortalité (Aussenac et Guehl, 2000).

2.2. - Conséquences probables sur les essences forestières

Depuis plusieurs années, des modèles climatiques ont été réalisés pour tenter de prédire l'évolution de l'aire de distribution des essences forestières (Badeau, Dupouey, Cluzeau et Drapier, 2005). Les changements climatiques annoncés pourraient se traduire par une régression des espèces septentrionales et l'expansion des espèces thermophiles, une modification de l'action des pathogènes et ravageurs (impact plus significatif des attaques d'oïdium en lien avec les hivers plus doux et son arrivée plus précoce), une croissance accrue dans les stations bien alimentées en eau. Les risques abiotiques seraient également plus importants, comme pour les tempêtes, et les incendies. (Ducouso et Dequé, 2005 ; Legay et Mortier, 2006).

3. - Le chêne pédonculé est-il en danger ?

3.1. - Eléments d'écologie de *Quercus robur*

3.1.1. - Aire de distribution actuelle

Le chêne pédonculé est une espèce eurasiatique subocéanique caractéristique des zones au climat océanique à continental. Il est présent sur une large amplitude de climats en Europe (de l'ouest à l'Europe centrale), mais il est absent des zones trop sèches ou trop froides.

En France, le chêne pédonculé est commun partout en plaine et vallée sauf en région méditerranéenne. Il est présent dans la partie Nord du pays, dans le Massif central, l'Aquitaine et la Bretagne. On le retrouve jusqu'à 1300 m, de l'étage collinéen à la base de l'étage montagnard (Rameau et al., 1989). Actuellement, le chêne pédonculé déborde de son aire naturelle au détriment du chêne sessile (Lebourgeois, 2000) en raison de l'action humaine et de son caractère colonisateur (meilleure fructification, meilleur taux de germination). Cette espèce a donc une répartition relativement diffuse sur le territoire français.

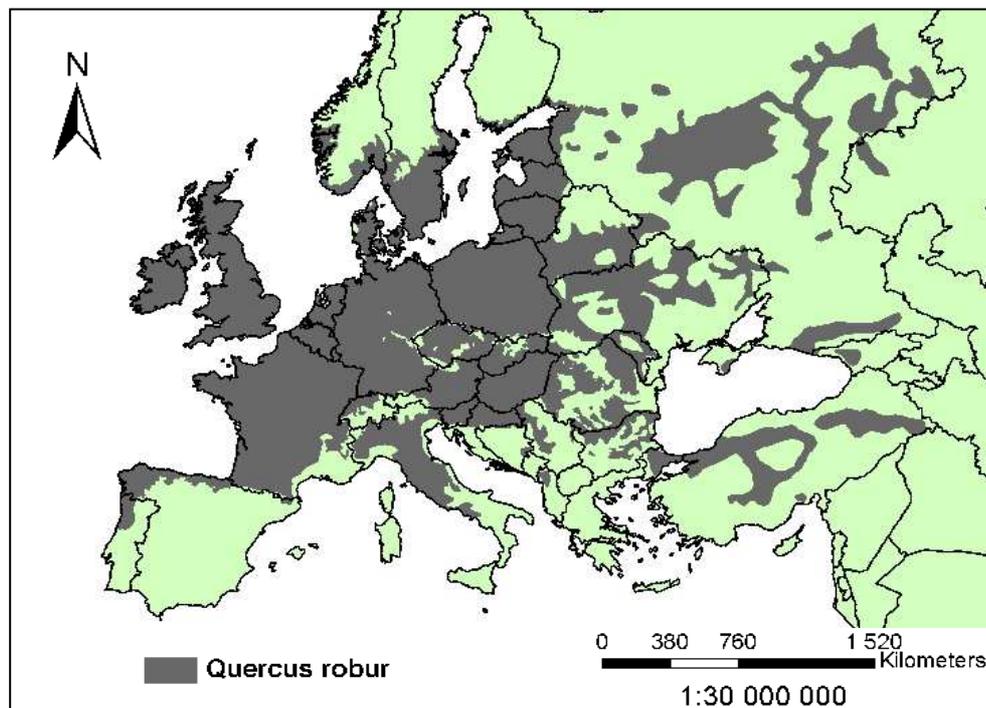
3.1.2. - Autécologie de l'essence

3.1.2.1.- *Facteurs climatiques*

Le chêne pédonculé recherche une température moyenne annuelle relativement élevée (en période de végétation), allant de 8 à 14°C, la température moyenne annuelle optimale étant de 13°C. Il est sensible aux froids trop rigoureux en hiver ainsi qu'aux gelées précoces d'automne et aux gelées tardives de printemps (du fait de sa période de fructification ayant lieu d'avril à mai).

Il se situe dans une gamme de précipitations moyennes de 700 à 1000 mm/an (Lebourgeois, 2000).

Le chêne pédonculé est exigeant en lumière : il ne tolère aucune concurrence au niveau du houppier (essence héliophile dès le semis, postpionnière nomade) (Rameau et al, 1989).



Carte 1 : Carte de distribution du chêne pédonculé en Europe
(Source : www.biodiversityinternational.org)

3.1.2.2.- Facteurs édaphiques

Cette essence est présente sur des humus variés : mull carbonaté à hydromor ; sols plus ou moins riches en bases. Elle se trouve sur une large gamme de pH (basique à très acide) avec une préférence sur une gamme un peu plus réduite (neutre à acide), (Rameau et al, 1989).

Le chêne pédonculé affectionne les milieux humides jusqu'à la limite du mésophile. C'est le plus hygrophile des chênes puisqu'il est mésohygrophile, parfois mésoxérophile (comportement pionnier). Il affectionne les sols riches et bien équilibrés (structure et texture) constamment approvisionnés en eau. Il est donc présent préférentiellement sur les sols constamment alimentés en eau ou ayant une réserve utile en eau suffisante (optimum : sols alluviaux). Il tolère relativement bien l'engorgement temporaire superficiel du sol et il prédomine sur sols engorgés à texture fine, argileux (prospection dans les horizons anoxiques et développement d'adaptations racinaires), (Lebourgeois, 2000).

Le chêne pédonculé est très sensible au déficit hydrique pendant la période de végétation (mai à octobre) et il craint les fortes sécheresses estivales. Il réagit fortement à une rupture brutale des conditions d'alimentation lors d'« accidents climatiques ». Les sécheresses exceptionnelles peuvent provoquer une rupture de la colonne d'eau sous tension (cavitation), induisant le blocage de la circulation de la sève (embolie).

En résumé : l'optimum de l'essence est un mull eutrophe à mésotrophe sur sols profonds bien alimentés en eau et son caractère indicateur est neutrocline à large amplitude.

3.2. - Le dépérissement : définition

Pour pouvoir mieux comprendre le phénomène de dépérissement, il est important de bien définir ce terme. Dans la présente étude, le terme « dépérissement » traduit « une altération durable de l'aspect extérieur des arbres (mortalité d'organes pérennes, réduction de la qualité et la quantité du feuillage) et une réduction de la croissance. La mort d'un certain nombre de sujets est observée mais l'issue n'est pas obligatoirement fatale même si la situation est préoccupante » comme le définit Delatour en 1990. Il s'agit d'un « phénomène complexe évolutif, dans lequel interviennent des facteurs de plusieurs types : prédisposants, déclenchants, aggravants en partie interchangeables » (Sinclair, 1964, 1967 ; Manion, 1981).

Au-delà d'une perte de 50 % des ramifications de son houppier (mortalité, chute, réduction), un arbre est considéré comme dépérissant de façon quasi irréversible. (Nageleisen, 1994).

3.3. - Constat général de l'état de santé des chênaies françaises

En France comme plus largement en Europe, depuis la fin du XIX^e siècle, des constats de déclin de la vigueur des chênes et plus particulièrement de chêne pédonculé ont été relatés. Sur notre territoire, plusieurs années ressortent comme particulièrement sèches : les principales sont 1921, 1947 à 1949, 1976 et la période 1989 -1991. Les chênaies touchées sont réparties sur l'ensemble du territoire, plusieurs rapports font état de mortalités exceptionnelles de massifs de chêne pédonculés en Île-de-France (Forêt de Compiègne, Fontainebleau), dans le Centre (Forêt de Vierzon), en Lorraine (Rambervillers, Blâmont...) (Delatour, 1983). Ces événements ont précédé des épisodes de mortalité importante dans les chênaies notamment. Mais la sécheresse de 2003 est la sécheresse édaphique la plus sévère qu'ont subi les chênaies depuis près de 60 ans (Bréda *et al.*, 2004).

3.4. - Symptômes du dépérissement

Les symptômes du dépérissement concernant les chênes ont été décrits (Nageleisen, 1994) et concernent les différents organes de l'arbre.

Tout d'abord, au niveau du houppier, il a été observé :

- une diminution de la taille des feuilles et une altération de la couleur des limbes,
- des changements dans l'architecture des houppiers suite à une diminution de la masse foliaire.
- les observations font également état de dessèchements des rameaux et des branches de diamètres de plus en plus gros du haut vers le bas équivalant à une descente de cime ;
- d'une chute importante des rameaux verts durant la saison de végétation entraînant une diminution de la ramification secondaire consécutive à une diminution de l'évaporation suite à un stress hydrique intense ;
- enfin, une diminution de la longueur des pousses annuelles est observée entraînant la formation de rameaux en fouet dans le haut du houppier.

Au niveau du tronc sont observées :

- des traces de suintements noirâtres qui ont vraisemblablement deux causes possibles, soit des lésions cambiales (gels hivernaux) par lesquelles se sont introduit des parasites, soit des attaques de Scolytes ou d'Agrile.

Au niveau des racines est souvent notée la présence d'Armillaire.

Des illustrations de différents symptômes sont disponibles en annexe 1.

3.5. - Facteurs conduisant aux dépérissements

S'agissant du dépérissement, trois grands types de facteurs sont mis en évidence dans la littérature:

- Les facteurs prédisposants : il s'agit de facteurs permanents contribuant à l'affaiblissement général de l'arbre qui causent un stress plus ou moins permanent comme les changements climatiques à long terme, les pollutions chroniques, la réduction de vigueur liée à l'âge, la pauvreté du sol ou des sols subissant des sécheresses estivales.
- Les facteurs déclenchants qui sont facteurs agissant de façon intense sur une relativement courte période tels que la sécheresse édaphique (entraînant des déficits hydriques répétés), le gel, les attaques d'insectes défoliateurs, l'oïdium.
- Les facteurs aggravants qui accentuent la perturbation. Ce sont le plus souvent des facteurs biotiques comme les champignons, les insectes attaquant le tronc et les branches mais aussi des facteurs sylvicoles comme le traitement en peuplement pur, la surexploitation en pâturage ou encore les accidents climatiques comme les tempêtes. (Bonneau, 1994).

Le dépérissement des chênes pédonculés résulterait d'une combinaison de phénomènes se produisant successivement. D'après ces observations, il semblerait que le réchauffement climatique au travers des sécheresses qu'il occasionne soit au centre de la dégradation de l'état de santé de cette essence. Aux vues des prévisions faites par le GIEC, les gestionnaires forestiers se questionnent sur l'avenir de l'essence.

II. - DÉMARCHE GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE

1. - Objectifs

Le chêne pédonculé est une essence largement répartie sur le territoire français. Différents organismes, dont l'Office National des Forêts, connaissent des difficultés pour la gestion de cette essence. Au vu des dépérissements observés et du contexte de changement climatique annoncé, la situation semble préoccupante. Ainsi, cette étude à la demande de l'ONF, vise à apporter davantage de visibilité pour mettre en œuvre une sylviculture minimisant les risques.

L'objectif de ce stage est d'étudier l'évolution de la distribution potentielle du chêne pédonculé face aux changements climatiques pour tenter d'en déduire des mesures en matière de gestion. Cela nécessitera de mener une approche quantitative de l'écologie du chêne pédonculé, en cernant plus finement les facteurs ayant le plus d'influence sur son fonctionnement physiologique. Le travail consistera à tenter de voir s'il est possible d'établir un lien entre le réchauffement climatique et les dégradations de l'état de santé des chênaies pédonculées. Les résultats espérés permettraient d'apporter des éléments de réflexion en matière de choix sylvicole.

L'étude va s'effectuer à l'échelle de la France ce qui va permettre de couvrir un vaste gradient écologique (situations dans lesquelles le chêne pédonculé est présent). La direction territoriale Lorraine de l'ONF, commanditaire de l'étude, souhaite pouvoir s'appuyer sur les résultats obtenus pour évaluer la situation à l'échelle locale. Aussi, un zoom sur la Lorraine sera réalisé.

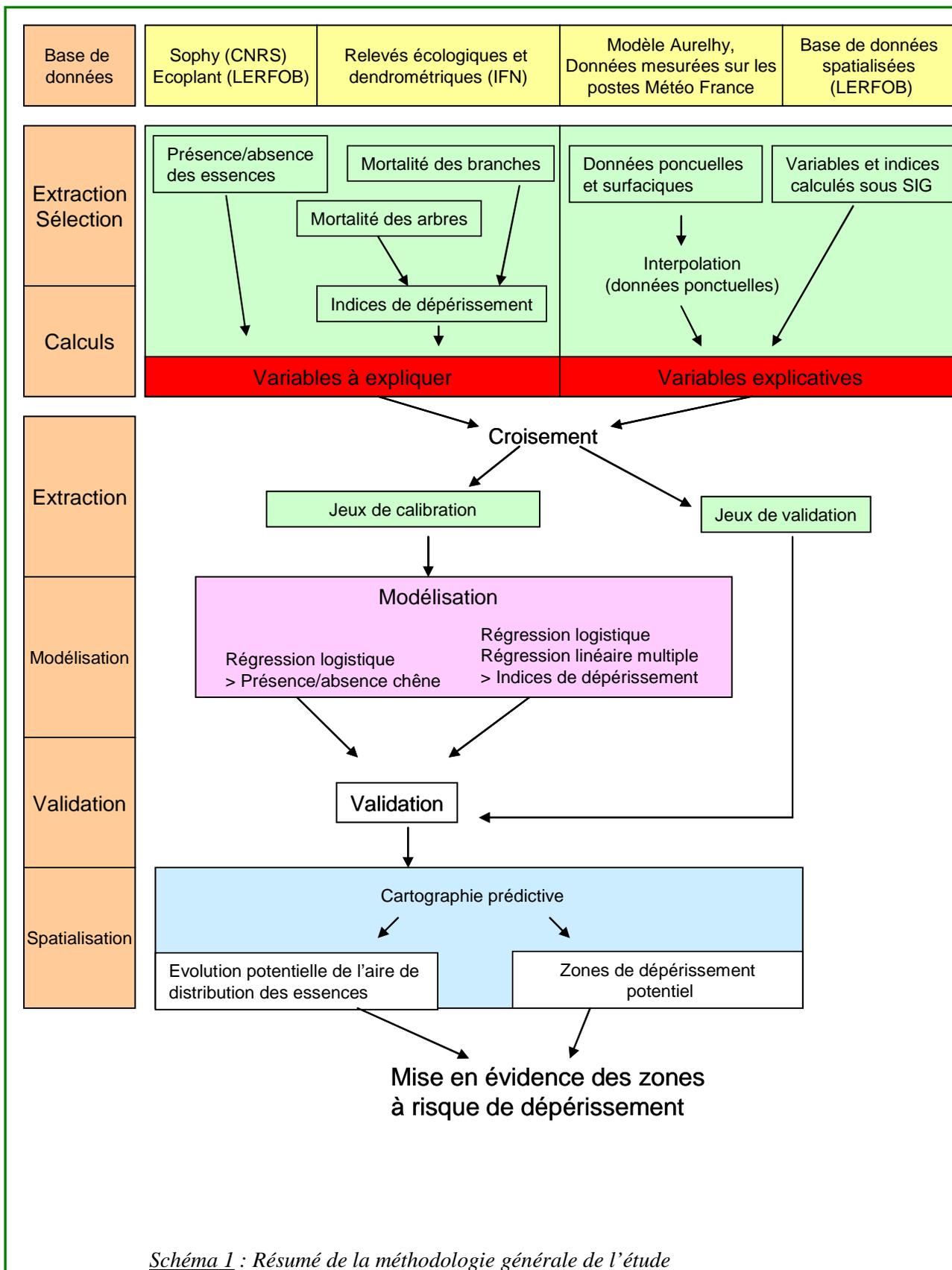
2. - Description globale de la méthode

Pour pouvoir comprendre et tenter d'entrevoir les zones présentant le plus de risques pour le chêne pédonculé, une première approche consiste à essayer de cerner au mieux les facteurs écologiques régissant sa distribution. Une approche complémentaire visera à appréhender son état sanitaire.

La première approche passe par la réalisation de modèles de l'aire de distribution potentielle de l'essence. Cette modélisation va mettre en évidence les facteurs écologiques déterminants pour la distribution sur une période de référence entre 1961 et 1990. Le modèle est ensuite projeté selon différents scénarios de réchauffements climatiques mesurés pour des périodes plus proches puis issues des modèles du GIEC. Les cartes établies à l'issue des prédictions de distributions 1961-1990 et des périodes ultérieures sont comparées pour mettre en évidence les zones de régressions potentielles de l'aire de distribution de l'essence qui sont *a priori* les zones où les risques de dépérissement seront les plus importants.

La seconde approche passe par l'établissement de modèles de dépérissement. Des indicateurs de dépérissements sont relevés depuis quelques années par l'IFN. La répartition géographique de ces données caractérisant le dépérissement peut également être expliquée par des facteurs écologiques. Les cartes établies à l'issue de ces modélisations vont mettre en évidence des zones où les dépérissements sont potentiellement les plus marqués.

Nous allons ensuite comparer les deux approches en cherchant à voir si les zones où les probabilités de présences potentielles risquent de diminuer correspondent aux zones de dépérissement.



3. - Choix et origine des données à expliquer

3.1. - Variables caractérisant la distribution des essences

Les relevés de présences et d'absences du chêne pédonculé provenant des bases de données Sophy issue du CNRS et Ecoplant créée par l'équipe forestière de l'ENGREF (Gégout *et al.*, 2005) ont été utilisés. Ces bases de données contiennent plus de 36 000 relevés floristiques forestiers. Un premier traitement des données est nécessaire. Il consiste à éliminer les relevés dont la précision de localisation (coordonnées géographiques) est supérieure à 1 km car considérés comme trop peu précise. Ensuite, les relevés floristiques trop proches les uns des autres (< à 1 km) sont éliminés afin de limiter les biais dus à de trop fortes concentrations de points. Deux jeux de données sont créés : un jeu de calibration, servant à établir le modèle (détermination des paramètres et coefficients) et un jeu de validation, servant à évaluer la qualité du modèle (sur une grille régulière de 20 km).

On dispose alors d'un jeu de calibration de 6920 relevés utilisables sur la période 1961-1990 parmi lesquels 1997 présences de chênes pédonculés ont été identifiées. Le jeu de validation comporte 533 placettes et 204 relevés de présences de l'essence (Cf. tableau 2).

Données Sophy et Ecoplant	Nombre de placettes	Nombre de présences du chêne pédonculé
Jeu de calibration	6920	1997
Jeu de validation	533	204

Tableau 2 : Résumé des données de présence/absence utilisées pour modéliser et valider l'aire de distribution potentielle du chêne pédonculé.

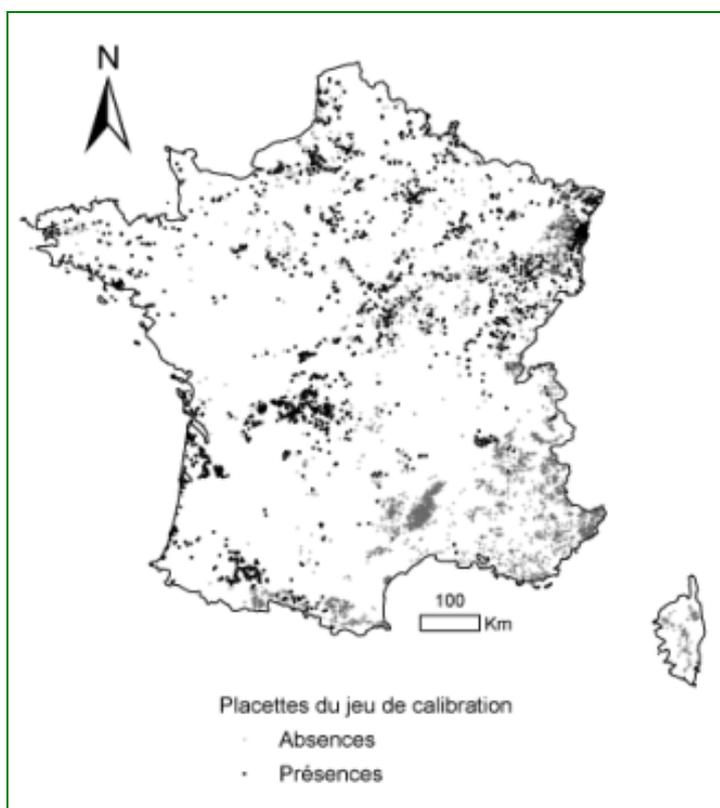


Fig. a : Localisation des placettes du jeu de calibration

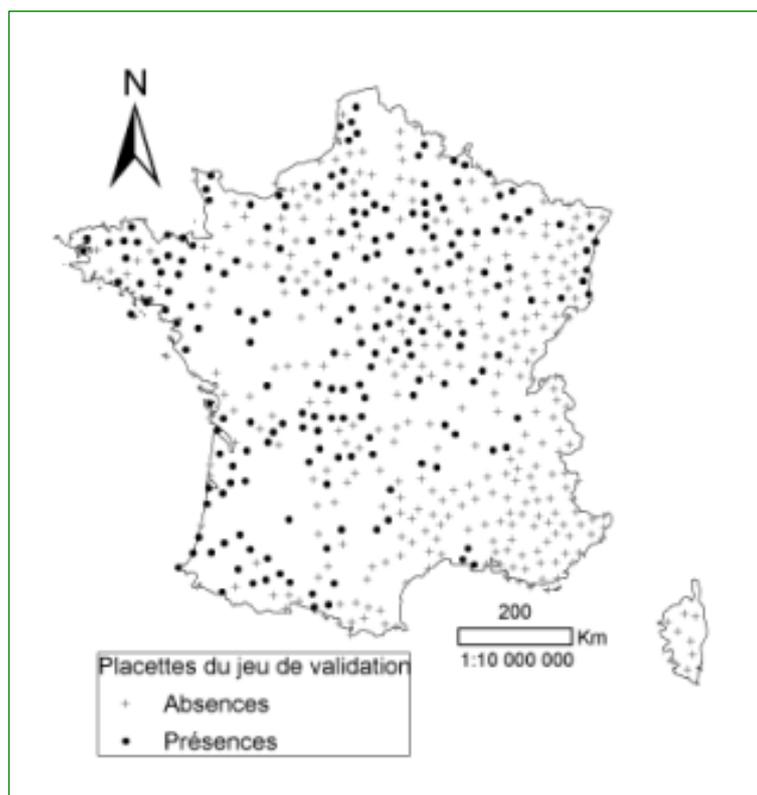


Fig. b : Localisation des placettes du jeu de validation

Carte 2 : Cartes de localisation des relevés de présences et absences du chêne pédonculé utilisées pour le jeu de calibration (Fig.a) et le jeu de validation (Fig.b).

3.2. - Variables caractérisant le dépérissement

3.2.1. - Les indicateurs de vitalité

Pour caractériser le dépérissement, on dispose des données phytosanitaires relevées lors des campagnes d'inventaires menées annuellement par l'IFN. Chaque point de relevé est constitué de trois sous-placettes circulaires de 6, 9 et 15 mètres de rayon. Sur celles-ci sont recensés respectivement les petits bois (diamètres à 1,30 m compris entre 7,5 et 22,4 cm), les bois moyens (diamètres à 1,30 m compris entre 22,5 et 37,4 cm) et les gros bois (diamètres à 1,30 m supérieurs à 37,5 cm).

NB : D'autres données sont également disponibles. Il s'agit de la base de données du DSF et de celle du réseau européen 16 * 16 km. Cependant, dans le premier cas, les données ne sont pas géoréférencées et dans le second, la densité de points de relevé est trop faible pour notre étude.

3.2.1.1.- La mortalité des branches

L'une des mesures relevées pour traduire l'état sanitaire des arbres est l'abondance de la mortalité des branches dans la moitié supérieure du houppier relevée lors des campagnes 2006 et 2007 par l'IFN. Il s'agit d'un indicateur de vitalité apprécié de façon visuelle. Cette mesure ne concerne que les arbres dominants dont le diamètre à 1,30 m est supérieur à 7,5 cm.

Les données sont codées de 0 à 4 selon le pourcentage de branches mortes observées dans la moitié supérieure de son houppier (comme le décrit le tableau 3 à la page suivante).

Code IFN	Signification (branches mortes observées dans la moitié supérieure du houppier)	Nombre de placettes concernées	Nombre d'arbres concernés
0	Pas de branche morte ou présence inférieure à 5 %	2924	9875
1	Nombre de branches mortes compris entre 6 et 24 %	700	1290
2	Nombre de branches mortes compris entre 25 et 49 %	239	300
3	Nombre de branches mortes compris entre 50 et 94 %	110	118
4	Nombre de branches mortes \geq 95 %	19	23

Tableau 3 : Résumé des données de mortalité de branches à disposition

3.2.1.2.- Indices basés sur la mortalité des branches

A partir de ces relevés de mortalité de branches, deux séries d'indices (continus et qualitatifs) ont été créés pour caractériser le dépérissement sur les placettes IFN.

Le premier indice créé est un indice continu qui apporte une vue globale de l'état sanitaire. Il est calculé en considérant la surface terrière des chênes pédonculés présentant au moins 5 % de mortalité de branches divisé par la surface terrière totale des chênes pédonculés par hectare. En pondérant ainsi la donnée, on s'affranchit du biais lié à la corrélation entre le pourcentage de branches mortes et la quantité de chêne pédonculé présent. Le calcul est le suivant :

$$\text{Indice continu de mortalité de branches} = \text{Somme} \left(\frac{\pi \times (D_{1.30 \text{ Qr touchés}})^2 \times w}{4} - \frac{\pi \times (D_{1.30 \text{ Qr placette}})^2 \times w}{4} \right)$$

Avec : $D_{1.30}$ = diamètre des tiges de chêne pédonculé à 1,30 m
 w = poids de l'arbre ramené à l'hectare
 Qr touchés = chênes pédonculés touchés
 Qr placette = chênes pédonculés de la placette

Deux autres indices continus sont calculés de la même manière mais en sélectionnant les chênes pédonculés présentant au moins 25 % de mortalité de branches dans la moitié supérieure de leur houppier d'une part et 50 % d'autre part. Ces seuils de mortalité sont considérés respectivement comme étant un bon indicateur du déclin de l'arbre et comme un stade au-delà duquel le processus de dépérissement est engagé de façon sévère (Nageleisen, 1994).

En plus de ces trois variables continues, trois variables binaires sont élaborées sur le même principe. Elles distinguent les présences et absences de mortalité de branches. On considère une présence dès l'instant où au moins un chêne pédonculé de la placette a plus de 5, 25 ou 50 % de branches mortes dans son houppier supérieur. La carte 3 illustre la répartition des placettes de présences et absences de mortalité de branches dans la moitié supérieure du houppier selon les trois seuils.

N.B. : Quelque soit l'indice, ne sont retenus que les arbres dominants (taux de couvert libre non nul)

Carte 3 : Cartes de localisation des placettes présentant des mortalités de branches supérieures à 5 % (Fig.a), 25 % (Fig.b) et 50 % (Fig.c).

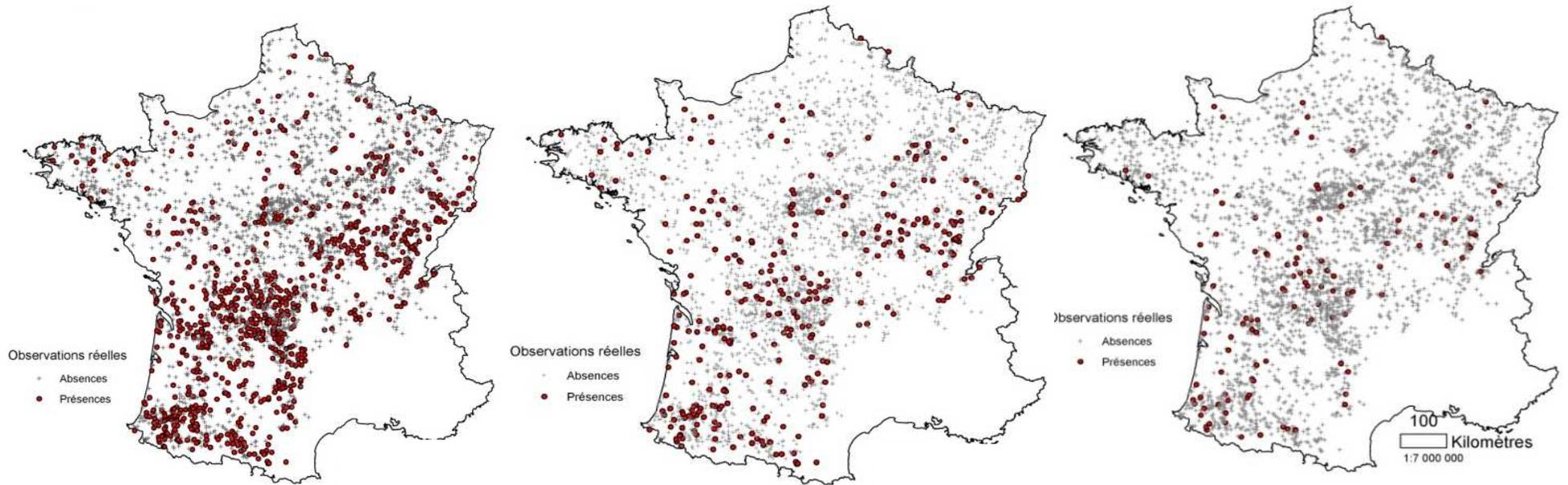


Fig. a

Fig. b

Fig. c

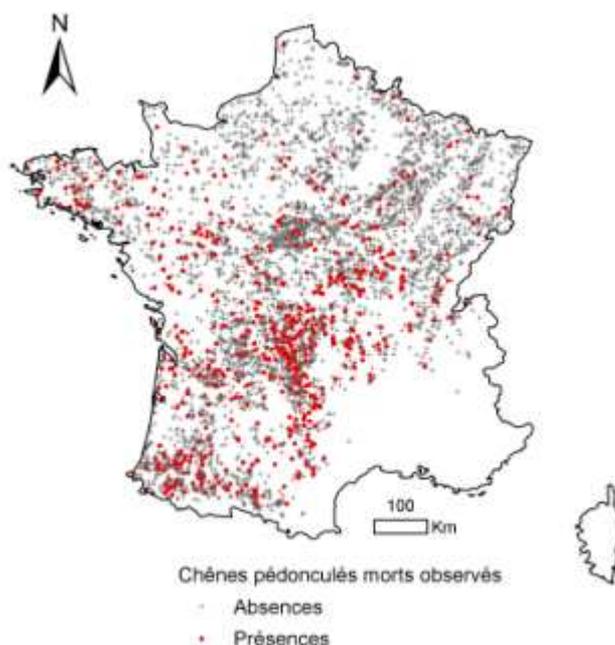
3.2.1.3.- La mortalité des arbres

D'autres variables permettent d'approcher les dépérissements, elles sont basées sur le relevé des arbres morts. Il s'agit d'une donnée recueillie depuis longtemps par l'IFN à la différence de la mortalité des branches relevée uniquement depuis 2006. Les données de mortalité de chênes pédonculés dont nous disposons pour cette étude couvrent la période 2005 à 2007. Cet état correspond au stade d'évolution ultime du dépérissement. Les relevés concernent uniquement les arbres morts précomptables ($> 7,5$ cm de diamètres à 1,30 m) sur la sous-placette de 15 m de rayon. Le chêne pédonculé est présent sur 4956 placettes dont 657 présentent des chênes pédonculés morts. Au total, ce sont 1573 chênes pédonculés morts qui sont recensés.

3.2.1.4.- Indices basés sur la mortalité des arbres

Deux variables ont été créées. Un premier indice de mortalité des chênes pédonculés, calculé à partir des données d'arbres morts, tient compte de la surface terrière des chênes pédonculés morts à l'hectare divisée par la surface terrière totale des chênes pédonculés par hectare. Le calcul est le même que pour l'indice continu de mortalité de branches mais en tenant compte cette fois uniquement des chênes pédonculés morts.

La seconde variable qualifiant la mortalité des arbres est une variable binaire. Dès l'instant où un chêne pédonculé est noté mort sur une placette, elle est considérée comme présentant de la mortalité. La carte 4 permet de visualiser la localisation des placettes de présences et d'absences de chênes pédonculés morts.



Carte 4 : Carte de localisation des présences et absences de chênes pédonculés morts. Sont représentées par des points rouges les placettes présentant au moins un chêne pédonculé mort et en gris celles où l'essence est vivante.

4. - Choix et origine des données explicatives

4.1. - Une approche temporelle

Les modèles de distribution potentielle ont tout d'abord été réalisés pour une période de référence (1961-1990), concordante avec la période des relevés de la flore. Ces modèles ont été projetés dans le futur sur quatre périodes, à savoir 1991-2004, 2003 (avec données mesurées) et 2021-2050 et 2071-2100 (à l'aide de modèles climatiques).

Périodes temporelles	Modélisations	
	Aire de distribution potentielle	Indices de mortalité
1961 - 1990	Elaboration du modèle de distribution à partir de données Météo France	Mise en évidence des conditions stationnelles "normales" favorables au dépérissement
1991 - 2004	Projection de l'aire potentielle de distribution	Effet du changement climatique récent sur les mortalités observées
2003		Impact d'un évènement extrême sur les mortalités observées
2021 - 2050 2071 - 2100	Projection dans le futur : hypothèses sur l'avenir	

Tableau 4 : Résumé des objectifs aux différentes périodes de temps

La mortalité des chênes pédonculés est observée entre 2005 et 2007 sur les placettes IFN. Nous allons caractériser ce dépérissement par rapport à différentes conditions écologiques.

Le premier moyen de mettre en évidence un lien entre conditions écologiques et mortalités observées consiste à observer si le dépérissement a un lien avec des conditions stationnelles particulières. Les conditions stationnelles ont été déterminées pour leur part climatique avec les données de la période de référence 1961-1990. Il s'agit donc de cibler les stations les plus à risques par rapport à des conditions climatiques dites « normales ».

Le climat ayant évolué depuis 1990, il convient également d'étudier l'impact du réchauffement climatique récent sur les mortalités observées aujourd'hui. On considère alors que la dégradation de l'état sanitaire des arbres est le fruit d'un réchauffement continu sur une longue période (moyenne mensuelle de la période 1991-2004).

Enfin, il est également intéressant d'étudier l'impact de la sécheresse de 2003 (connue comme étant l'évènement ultime ayant conduit aux dépérissements massifs). Ces résultats permettraient à terme de mieux comprendre les seuils à partir desquels les conditions écologiques deviennent limitantes. Cette approche temporelle est résumée dans le tableau 4.

4.2. - Origine des données climatiques

4.2.1. - Données Aurelhy de Météo France pour la période 1961-1990

Les variables climatiques susceptibles d'expliquer la distribution actuelle du chêne pédonculé et les dépérissements doivent être judicieusement sélectionnées. Elles sont fournies en partie par la base de données Aurelhy de Météo France. Le modèle Aurelhy (Analyse utilisant le relief pour l'hydrométéorologie, Benichou et Le Breton, 1987) utilise des normales trentenaires (1961-1990) de plusieurs milliers de postes météorologiques. Il modélise les températures (moyenne mensuelle des températures minimales, maximales et moyennes), les précipitations et le nombre de jours de gel. Ce modèle a permis la création de fichiers raster au pas kilométrique disponibles sur l'ensemble de la France. Afin d'avoir une échelle compatible avec le rayonnement solaire, ces données ont été ré-interpolées au pas de 50 m.

On s'est attaché à trois pas de temps pour mettre en évidence les variables induisant des contraintes physiologiques déterminantes pour expliquer la distribution des essences. On considère le pas de temps annuel pour avoir une idée de l'apport global de la variable, puis le pas de temps saisonnier qui traduit davantage l'impact des conditions saisonnières limitantes et enfin l'échelle du mois pour mettre plus finement en exergue ces conditions limitantes. Le découpage en saison est le suivant : printemps (moyenne des mois de mars, avril, mai), été (juin, juillet, août), automne (septembre, octobre, novembre), hiver (décembre, janvier, février).

4.2.2. - Obtention des données pour la période 1991 – 2004 et l'année 2003

Nous ne disposons pour ces périodes d'aucune couche SIG. Nous allons donc calculer ces données à partir de valeurs relevées sur différents postes Météo France et de données du modèle Aurelhy. La démarche générale peut se résumer par le schéma 2.

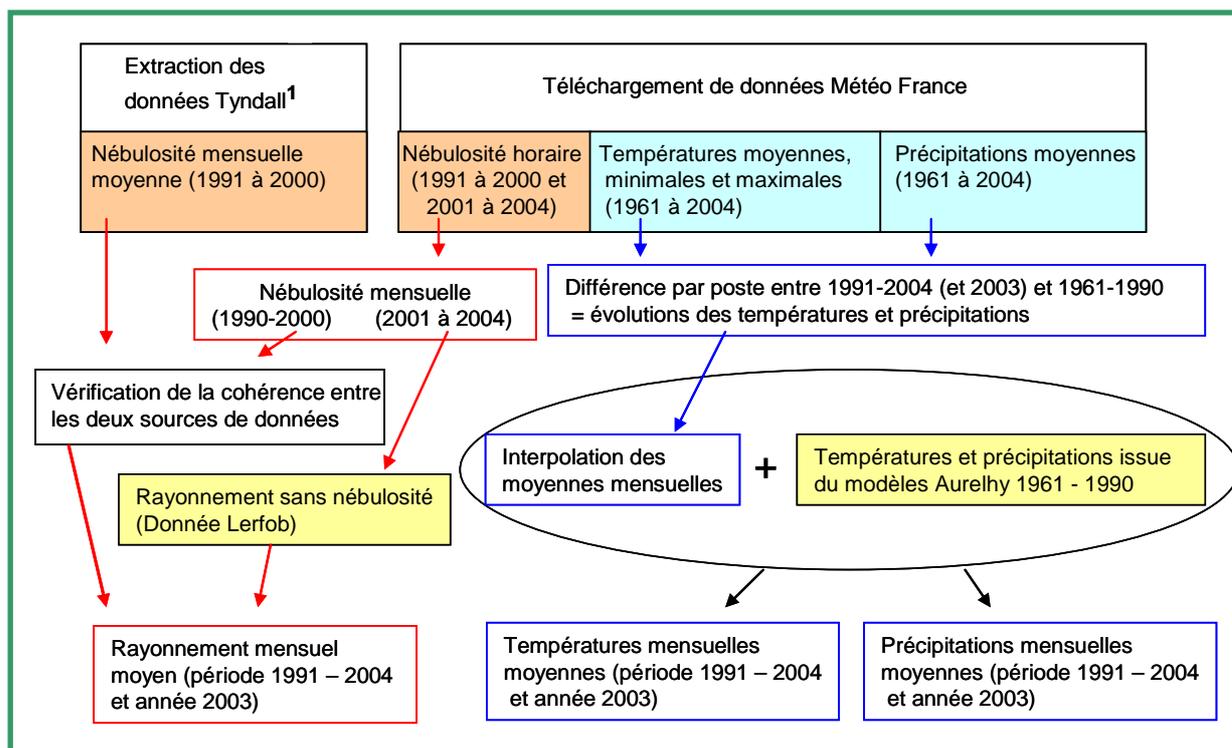
Concernant les températures et les précipitations moyennes mensuelles, les valeurs ont été extraites pour les périodes 1961-1990 (période de référence), 1991-2004 et l'année 2003 sur respectivement 460 (températures) et 585 (précipitations) postes Météo France (Cavalheri, 2009). Un calcul de différence par poste entre les données de la période 1991-2004 et 2003 par rapport à la période de référence a été réalisé. On obtient alors les valeurs d'évolution des températures et des précipitations par rapport à 1961-1990. Ces données d'évolution sont ensuite interpolées (au pas kilométrique) puis ajoutées aux données du modèle Aurelhy de Météo France. On obtient alors les précipitations et températures moyennes mensuelles pour la période 1991-2004 et pour l'année 2003.

Concernant le rayonnement solaire moyen mensuel, cette indice se compose de deux parties : le rayonnement solaire par ciel clair qui ne varie pas et la nébulosité qui elle change. On dispose de données du modèle Tyndall¹ couvrant la période 1991-2000 calculées à partir de valeurs réelles et pour la période et pour la période 2001-2004, il est possible d'obtenir des valeurs de nébulosités horaires dans la climathèque Météo France. On cherche alors à savoir si les données (théoriques) du modèle Tyndall de la période 1991-2000 dont on dispose, sont cohérentes avec les relevés mesurés par Météo France à la même période. Dans ce cas où les données sont bien cohérentes, il sera possible d'utiliser les deux bases de données pour établir les cartes de rayonnement solaire moyen couvrant l'ensemble de la période 1991-2004.

Pour vérifier la cohérence des données, quatre postes Météo France sont sélectionnés, ils sont situés dans des contextes biogéographiques différents afin de couvrir un maximum de variabilité (Rennes, Grenoble, Toulon, Lille). Le téléchargement des données de nébulosité horaire a été limité à 8 h par jour (10h à 17h). Ensuite, on peut calculer la nébulosité mensuelle moyenne (moyenne des nébulosités horaires par jour, elles-mêmes moyennées sur le nombre de jour du mois). Disposant d'un fichier spatialisé de rayonnement sans nébulosité, on obtient par addition le rayonnement mensuel moyen. L'ensemble des données est en octats. Les valeurs obtenues pour ces quatre postes Météo France sont ensuite comparées avec celles issues du modèle Tyndall.

¹ Les données écologiques Tyndall ont été élaborées par le Tyndall Center qui est un centre de recherche britannique sur les changements climatiques ayant développé des modèles de reconstitution du climat. Les modélisations passées sont basées sur des données réelles de températures et d'émissions de dioxyde de carbone. Les prédictions futures sont calculées selon l'hypothèse d'une augmentation des températures de 3,9°C d'ici à la fin du siècle (scénarios moyen du GIEC) et selon une moyenne de scénarios climatiques nationaux. Les données disponibles couvrent la période 1901 à 2100.

Pour cela, une mesure statistique est alors effectuée. Il s'agit de l'erreur quadratique moyenne ou RMSE (Root mean square error). Cet indice est calculé en faisant la racine carré des moyennes des écarts. Sa valeur est de 0,549 pour l'ensemble des quatre postes. Les graphiques de comparaison des données par poste figurent en annexe 2. Celle-ci étant assez faible, cela va nous permettre de travailler avec les deux jeux de données pour obtenir des cartes de rayonnements mensuels et annuels moyens couvrant la période 1991 - 2004. Les données de 1991 à 2000 étant fournies par Tyndall et celles couvrant la période allant de 2001 à 2004 étant téléchargées à partir de la base de donnée Météo France. Pour avoir une bonne couverture du territoire français, 84 postes Météo France sont cette fois retenus.



Après obtention de ces variables élémentaires, d'autres variables écologiques plus élaborées ont été calculées, telles que l'ETP (à partir des données de rayonnements et de températures) et les bilans et déficits hydriques (à partir des ETP et des précipitations) (Cf. Schéma 3).

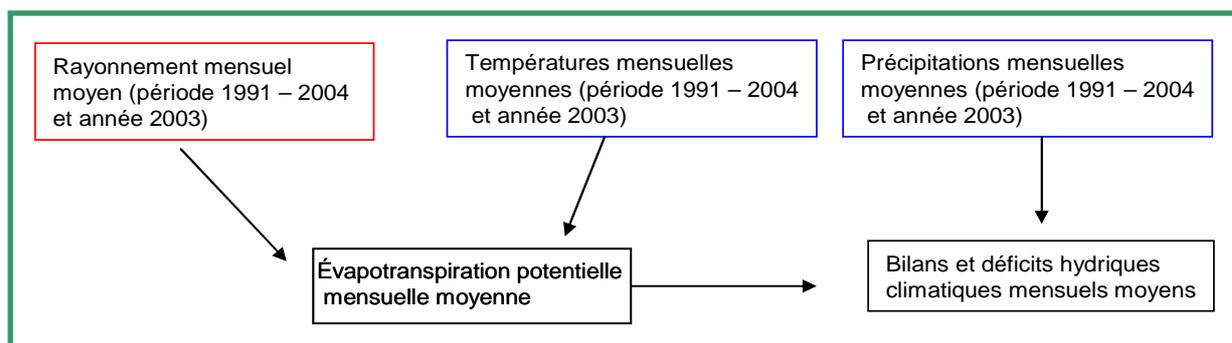


Schéma 3 : Obtention des variables climatiques secondaires.

4.2.2.1.- *Données futures*

a. - *Choix des périodes futures*

Deux périodes ont été sélectionnées pour tenter d'évaluer l'évolution de l'aire de distribution potentielle des essences au cours du 21^e siècle. La première période est choisie volontairement dans un futur proche, il s'agit de la période 2021 – 2050. Celle-ci va permettre de voir à relativement court terme les conséquences possibles des changements climatiques globaux sur le chêne pédonculé. La seconde période est dans un futur plus lointain, et nous donne une vision à plus long terme. Il s'agit de la période 2071 – 2100.

b. - *Les modèles et scénarios climatiques employés*

Pour extrapoler les variables dans le futur, nous disposons de 4 modèles qui sont chacun déclinés en deux scénarios (2 intensités de changements climatiques du GIEC). Les modèles climatiques sont des simulations informatiques reproduisant un climat global. Ils permettent d'évaluer la façon dont le climat va évoluer dans les 10, 50 ou 100 prochaines années en tenant compte des modifications (pollutions, déforestations, etc.) engendrées par les comportements humains. Il existe une trentaine de modèles climatiques différents. Ceux utilisés dans cette étude ont été choisis parmi ceux disponibles. De plus, tous les modèles climatiques n'intègrent pas l'ensemble des paramètres nécessaires au calcul des différentes variables écologiques dans le futur (c'est le cas de la nébulosité qui n'est pas toujours prise en compte). Ainsi, les modèles sélectionnés sont les suivants :

- le modèle HADCM3 réalisé par le Hadley center for climate prediction and research. Il s'agit d'un modèle britannique.
- Le modèle CGCM3 provenant du centre canadien de la modélisation et l'analyse climatique.
- Le modèle CSIRO2 élaboré par l'Organisation fédérale pour la recherche scientifique et industrielle. Il s'agit de l'organisme gouvernemental australien pour la recherche scientifique.
- Le modèle PCM produit par le centre national de la recherche atmosphérique du Département de l'Énergie des Etats-Unis

Seuls deux des scénarios futurs élaborés par le GIEC sont testés ici. Il s'agit tout d'abord du scénario A2 basé sur les perspectives d'une augmentation de la population mondiale jusqu'à atteindre 15 milliard d'individus en 2100. La croissance économique sera forte, engendrant une augmentation des émissions de gaz à effet de serre et les disparités économiques selon les régions seront accentuées. Ce scénario 2 est un « scénario pessimiste ».

Le second scénario retenu est le scénario 2 qui à l'inverse est le plus « optimiste ». C'est-à-dire que la population mondiale sera de 10 milliards d'individus en 2100. On considère alors que la croissance sera constante avec une augmentation de l'utilisation des énergies propres. Les politiques s'orienteront vers un développement à l'échelle régionale.

4.3. - Données calculées

4.3.1. - Données disponibles au Lerfob

Un grand nombre de variables climatiques et édaphiques ont été utilisées dans cette étude. Concernant le travail mené sur la période de référence, 1961-1990, nous disposons de fichiers spatialisés issus des bases de données internes du Lerfob.

4.3.1.1.- *Les facteurs climatiques*

- les rayonnements solaires théoriques mensuels et annuels calculés avec le modèle Helios (Piedallu et Gégout, 2007, 2008) et cumulés pendant la période de végétation (mars à septembre inclus). La modélisation de la course du soleil permet le calcul du rayonnement solaire théorique en j/cm^2 . L'indice prend en compte, la pente et l'orientation du site ainsi que l'effet de masque occasionné par les reliefs environnants, tout comme la nébulosité et la latitude.

- Les évapotranspirations potentielles théoriques mensuelles et annuelles selon Turc, cumulée pendant la période de végétation (mars à septembre inclus). Le calcul réalisé pour obtenir cette variable est le suivant :

$$ETP (\text{mm}/\text{mois}) = 0.4 * (R_g + 50) * (T / (T + 15)),$$

où T est la température moyenne mensuelle en degrés Celsius et R_g est le rayonnement global en $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{j}$. Les rayonnements solaires théoriques modélisés (ci-dessus) sont utilisés (Turc, 1955 ; Lebourgeois et Piedallu, 2005).

- Les évapotranspirations potentielles théoriques mensuelles et annuelles selon Hargreaves (Hargreaves, 1994), qui prennent en compte les amplitudes thermiques et qui sont calculées de la façon suivantes :

$$ETP (\text{mm} / \text{jour}) = 0,0023 Ra \times (t + 17,8) \times \text{Racine}(\Delta t)$$

Où R_a est le rayonnement annuel moyen et Δt est l'amplitude thermique.

- Les évapotranspirations potentielles théoriques mensuelles et annuelles selon Thornthwaite, qui prennent en compte les températures du mois en fonction du total annuel, avec une correction selon la latitude (Lebourgeois et Piedallu, 2005). Le calcul

est le suivant : $ETP (\text{mm} / \text{mois}) = 16 * \left[\left(\frac{10 * t}{I} \right) \right]^a * F$

Où t est la température moyenne mensuelle, I est un indice de chaleur dérivé des températures moyennes mensuelles, ^a est un facteur empirique dérivé d'une fonction de I et F est un facteur de correction.

- Les bilans hydriques climatiques théoriques mensuels et annuels (en mm), cumulés pendant la période de végétation allant de mars à septembre, sont calculés selon Turc, Hargreaves et Thornthwaite de la façon suivante :

- Bilan hydrique Turc = Précipitations – ETP Turc

- Bilan hydrique Hargreaves = Précipitations – ETP Hargreaves

- Bilan hydriques Thornthwaite = Précipitations – ETP Thornthwaite

(Thornthwaite *et al.*, 1957 ; Lebourgeois et Piedallu, 2005)

- Les déficits hydriques climatiques théoriques (en mm) sont la somme des bilans hydriques présentant des valeurs négatives (ETP > Précipitations). Ils sont calculés selon les trois méthodes (Turc, Hargreaves et Thornthwaite).

4.3.1.2.- Les facteurs hydriques

- Les indices d'engorgement sont obtenus par bio-indication. Ils correspondent aux valeurs indicatrices d'espèces floristiques pour respectivement un engorgement permanent, temporaire et total (permanent et/ou temporaire). Elles ont été calculées (puis standardisées) à partir des 5400 relevés d'Ecoplant (Gégout *et al.*, 2005) présentant des descriptions de sols. Les 3 indices ont été calculés à partir de la fréquence de chaque espèce dans les sols à horizon réductique < 40 cm (indice d'engorgement permanent) ; de leur fréquence dans les sols à horizon rédoxique < 40 cm (sans horizon réductique) (indice d'engorgement temporaire) ; et de leur fréquence dans les sols à horizon rédoxique < 30 cm ou réductique < 50 cm (indice d'engorgement total).

N.B. : Les valeurs prédites supérieures à 3 indiquent généralement un engorgement d'autant plus fort et plus proche de la surface que la valeur est élevée. Les valeurs prédites supérieures à 5 indiquent généralement un engorgement permanent. Les valeurs d'engorgement temporaire et permanent présentent la particularité de pouvoir se sommer pour donner la valeur d'engorgement total.

- La réserve utile maximale (RUM) d'un sol correspond à la part maximale d'eau qu'un sol peut stocker et qui peut être utilisée par la végétation (en mm). Cette variable a été obtenue par modélisation puis spatialisée (Piedallu *et al.*, 2007 ; Reboul, 2008 ; communication personnelle de J.-D. Bontemps).
- Les réserves utiles mensuelles et annuelles sont également disponibles. Elles sont obtenues à partir de la réserve utile maximale et des données d'évapotranspirations potentielles de Turc et des données de précipitations.
- L'indice de Moore encore appelé CTI (Compound Topographical Index). Cet indice dérivé du modèle numérique de terrain Bdati de l'IGN traduit l'approvisionnement et le départ latéral en eau. Il est fonction de la taille du bassin versant drainant et de la pente du pixel. Plus le bassin versant est grand et plus le pixel est plat et plus l'apport potentiel en eau est fort. Son calcul est le suivant :
$$CTI = \ln(a/\tan b)$$
, avec a = bassin versant amont drainé, et b = pente du pixel

4.3.1.3.- Les facteurs trophiques

- Le pH est obtenu par bio-indication à partir de relevés d'Ecoplant et spatialisé à l'échelle de la France. Le pH est le logarithme décimal de l'inverse de la concentration d'une solution en ions H⁺ (AgroParisTech-ENGREF et IFN, 2008).
- Le rapport carbone sur azote (C/N) est également obtenu par bio-indication (relevés floristiques issus de la base de données Ecoplant). Ce rapport permet d'apprécier la vitesse de minéralisation de l'humus. Plus le rapport est grand est plus le sol est pauvre en azote, plus la fertilité est faible.

N.B. : Les indices obtenus par bio-indication ne sont pas transposables dans le futur, c'est également le cas de l'indice de Moore.

On a cherché de préférence à prendre en compte des variables connues comme ayant une action physiologique sur l'essence. Le tableau 5 résume les variables sélectionnées (les variables surlignées en jaune clair sont celles élaborées dans le cadre de cette étude toute période confondue et celles en vert clair sont celles créées en plus pour la période 1991-2004 et l'année 2003) :

Type de donnée	Signification physiologique	Variables	Unités	Résolution
Données climatiques	Froid hivernal, conditions de débournement, altitude, stress hydrique	Températures saisonnières et mensuelles moyennes, minimales et maximales	° Celsius	1000 m
		Températures extrêmes absolues et moyennes	° Celsius	1000 m
	Sécheresses estivales	Bilans hydriques climatiques saisonniers et mensuels moyens	mm	50 m
		Déficits hydriques climatiques saisonniers et mensuels moyens	mm	50 m
	Effet thermique	Evapotranspiration potentielle mensuelle moyenne	mm	50 m
	Capacité photosynthétique	Rayonnement solaire moyen saisonnier et mensuel	joule/cm ²	50 m
Données édaphiques	Capacité à retenir l'eau du sol	Réserve utile maximale	mm	1000 m
		Réserves utiles annuelle et mensuelles moyennes	mm	1000 m
	Contraintes d'engorgement	Indices d'engorgement temporaire, permanent et total		1000 m
	Disponibilité en eau	Déficits hydriques édaphiques moyens mensuels et saisonniers	mm	1000 m
	Apport latéraux en eau	Indice de Moore hydrologique		50 m
	Stress hydrique, sécheresse estivale	Indice de fluctuation des réserves en eau du sol	mm	1000 m
		Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à l'engorgement		
		Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture		
	Accessibilité à l'eau du sol	Indice moyen mensuel et saisonnier de déficit de la réserve utile de survie	mm	1000 m
		Indice moyen mensuel d'épuisement des réserves	mm	1000 m
Données trophiques, topographiques	Richesse chimique du sol	pH		1000 m
	Nutrition azotée	Rapport carbone sur azote		1000 m
	Prospection racinaire	Pourcentage d'argile, limon et sable	%	1000 m
	Topographie (thermique, altitudinal, pente)	Modèle numérique de terrain		50 m

Tableau 5 : Résumé des variables écologiques explicatives utilisées

En annexe 3 sont présentées les cartes des principales variables écologiques.

4.3.2. - Données calculées dans le cadre de cette étude

Nous avons calculé des indices complémentaires à ceux existant afin de caractériser au mieux l'écologie du chêne pédonculé.

4.3.2.1.- *Variables liées à la température maximale*

Pour se rapprocher de la meilleure explication écologique de l'aire de distribution des essences, des variables complémentaires ont été calculées. La littérature nous indique que le chêne pédonculé est très sensible aux stress hydriques (Bréda *et al.*, 2003) causés par les accidents climatiques notamment à cause de la cavitation provoquant une rupture de la colonne d'eau et conduisant à l'embolie (blocage de circulation de la sève). Un indice prenant en compte ces événements extrêmes serait idéal, mais les prédictions des variables climatiques actuellement disponibles sont lissés dans le temps et ne traduisent pas de tels événements. Aussi, les premiers indices calculés pour traduire l'effet de ces événements extrêmes sont la moyenne des températures maximales des cinq années les plus chaudes de la période 1901-2000 ainsi que la température maximale absolue. Ces données sont issues des modèles Tyndall (Cf. – schéma 2, bas de la page15)

4.3.2.2.- *Indices liés à la réserve utile*

Indice de fluctuation des réserves en eau du sol

Il semble *a priori* que le chêne pédonculé soit sensible aux variations de la quantité d'eau disponible dans le sol et particulièrement des alternances entre humidité et sécheresse du sol (Y. Lefèvre, 2006). Cette variation intra-annuelle entre période d'engorgement et de sécheresse peut être caractérisée par l'indice suivant moyenné sur 30 ans (période 1961-1990):

$\text{Indice de fluctuation des réserves en eau du sol (moyenné sur la période 1961-1990)} = \frac{\text{RUM} - \text{RUmin}}{\text{RUM}}$	RUM = réserve utile maximale RUmin = réserve utile minimale des moyennes mensuelles 1961-1990)
---	---

Cependant, plus on travaille sur de grandes périodes, plus ces données annuelles seront moyennées et les effets des extrêmes climatiques nivelés. Aussi ce même indice a été calculé en prenant pour valeur de réserve utile minimale, la valeur la plus faible sur la période 1947-2000 (plus longue période de données disponible).

Cette variable a été multipliée à la texture du sol, calculée à partir des bases de données du Lerfob.

Indice de déficit de la réserve utile de survie

Un autre indice est calculé (moyenne sur la période 1961-1990) pour tenter de caractériser au mieux le stress hydrique provoqué par la sécheresse estivale en quantifiant l'intensité de la sécheresse, qui se visualise en considérant l'écart entre la réserve en eau du sol et la réserve critique. La réserve critique, appelée également réserve utile de survie, est le contenu en eau du sol en dessous duquel il y a régulation stomatique (la RUS correspond à 40% de la réserve utile maximale en eau du sol (Reboul, 2008).

$\text{Indice de déficit de la RUS} = \text{Somme (RUS - réserve utile mensuelle)}$ <p style="margin-top: 5px;">pour les mois où la RUS (moyenne mensuelle de la période 1961-1990) < à la RU mensuelle moyenne sur la période 1961-1990</p>	où RUS = réserve utile de survie RUS = 40% RUM
---	---

L'indice permet de différencier les secteurs selon l'intensité et la durée de la sécheresse estivale en localisant plus précisément les zones avec une forte contrainte hydrique. Plus l'indice est important, plus le stress hydrique est important avec une eau de moins en moins mobilisable.

En résumé : au niveau des données climatiques, nous avons créé les variables qui tendent à mettre en évidence le poids des sécheresses, de l'humidité atmosphérique et du froid dans l'explication de la distribution des essences et des dépérissements. Au niveau édaphique, les variables choisies tiennent compte de critères tels que la disponibilité (alimentation - variation au cours de l'année) et l'accessibilité à l'eau du sol, la sécheresse édaphique (déficits) et les contraintes d'engorgement. Enfin au niveau trophique, on teste l'importance de la richesse chimique du sol et de la nutrition azotée.

4.3.2.3.- Extrapolation des variables dans le futur

Nous ne savons pas extrapoler l'ensemble des variables dans le futur. On considère dans le cas présent qu'il n'y aura pas au cours du siècle à venir de grandes modifications des paramètres édaphiques. Ainsi, les variables de rapport carbone sur azote, pH et texture de sol seront considérées comme stables dans le temps. Pour les indices d'engorgement (temporaire, permanent et total), qui ont été obtenues par bio-indication, leur extrapolation dans le futur n'est simplement pas possible, même si l'engorgement des sols peut varier à l'avenir.

4.3.2.4.- Description des variables spécifiques aux modèles de mortalités

Pour comprendre les conditions qui influent sur les variables de mortalité caractérisant le dépérissement, on s'appuie sur les mêmes variables écologiques que celles utilisées pour réaliser les modèles de distribution. Cependant pour tenter de limiter les biais liés à la prise de mesure et notamment décorréler les variables de dépérissements d'effets liés aux peuplements, des variables explicatives complémentaires sont calculées. Elles sont élaborées à partir des données dendrométriques relevés par l'IFN sur les placettes où ont été effectués les relevés phytosanitaires.

Variables permettant d'approcher l'état de dominance des arbres

Il n'est pas possible d'après les mesures effectuées par l'IFN sur les arbres morts, de savoir s'ils faisaient partie de la strate dominée (subissant probablement une concurrence plus forte) ou de la strate dominante. Pour tenter de distinguer davantage les arbres morts dominants et dominés, un indice affectant un poids plus fort aux arbres de gros diamètre, et donc davantage susceptibles d'appartenir à la strate dominante est créé. Cet indice de dominance est calculé en rapportant le diamètre des chênes pédonculés morts au diamètre moyen des chênes pédonculés du peuplement.

Variable permettant d'approcher l'âge du peuplement

Déterminer l'âge des arbres d'un peuplement sans les sondes à la tarière de Pressler est particulièrement difficile. Pour tenter d'approcher cette valeur, un indice de l'âge est calculé en rapportant la surface terrière des chênes pédonculés à leur nombre sur chaque placette.

Variables permettant d'approcher la gestion et l'état de concurrence des peuplements

La mortalité tant des branches que des arbres peut être influencée par l'état de concurrence auquel les arbres sont soumis. La prise en compte de la concurrence, et indirectement de l'intensité de gestion, se fait au travers de trois variables. La première d'entre elles concerne le capital sur pied du peuplement, il s'agit de la surface terrière totale du peuplement. La deuxième variable est un indicateur de dominance calculé en rapportant la hauteur moyenne des chênes pédonculés à la hauteur moyenne du peuplement.

Pour vérifier s'il n'existe pas un lien entre mortalité et type de gestion, une variable binaire distinguant forêts gérées par l'ONF et non gérées par l'ONF est testée.

Variables permettant d'approcher la structure du peuplement

Pour tenir compte de la structure des peuplements plusieurs variables ont été calculées. Les premières considèrent la proportion d'arbres dans chaque classe de diamètres : on obtient alors trois variables, une décrivant chaque classe : petit bois (< à 17,5 cm), bois moyen (de 17,5 à 37,5 cm) et gros bois (\geq à 37,5 cm).

Les données relevées par l'IFN permettent d'élaborer une autre variable caractérisant la structure des peuplements, il s'agit de la proportion des arbres issus de rejet ou de régénération naturelle. Cette variable permet de prendre en considération l'impact de la conduite des peuplements.

Variables permettant d'approcher l'accessibilité des peuplements

Pour vérifier si la mortalité des branches ou des arbres n'est pas le fruit d'une difficulté de gestion liée à l'inaccessibilité de certaines parcelles forestières, des variables sont testées. Cela se fait tout d'abord en considérant la pente moyenne du peuplement calculée par l'IFN. Puis l'accessibilité étant intimement liée au relief, une variable caractérisant la pente à partir du MNT (modèle numérique de terrain) au pas de 50 m.

L'IFN dispose d'une notation pour caractériser l'accessibilité d'un peuplement. Celle-ci tient compte de la desserte des peuplements selon trois modalités comme le montre le tableau 6.

Code	Définition
0	Site accessible
1	Création de piste nécessaire pour rendre le site accessible
2	Site inaccessible

Tableau 6 : Nomenclature de l'accessibilité selon l'IFN

Pour simplifier cette notation, on transforme cette donnée en variable binaire. Les modalités 1 et 2 sont regroupées pour définir les zones inaccessibles (Cf. tableau7).

Code étude	Définition
0	Site accessible
1	Site inaccessible

Tableau 7 : Nomenclature de l'accessibilité considérée dans cette étude

N.B. : Cette donnée ne nous permet cependant pas de savoir depuis combien de temps le site est accessible.

Variables décrivant des grandes zones géographiques

Les variables écologiques et sylvicoles dont nous disposons actuellement ne sont pas suffisantes pour comprendre la part abiotique explicative des dépérissements. Il se peut qu'il existe un effet régional d'où la création de variables selon un découpage en grandes zones géographiques (codage 0/1 par région). Les régions étant les bassins méditerranéen, parisien, aquitain, Alpes, Pyrénées, Vosges – Jura, Alsace -Lorraine et Massif central.

5. - Démarche statistique

5.1. - Cadre conceptuel, hypothèses écologiques

Pour modéliser la distribution potentielle d'une espèce ou la répartition des dépérissements, il est nécessaire de fixer des hypothèses qui vont définir le domaine d'applicabilité du modèle et ses limites. On considère dans l'étude présente que les facteurs écologiques (climatiques, édaphiques) sont déterminants pour la distribution des essences forestières et qu'il puisse y avoir un lien entre la diminution des probabilités de présence et les dépérissements. La répartition géographique des essences est ainsi le fruit de processus écologiques dynamiques. Avec les changements climatiques, les facteurs écologiques régissant alors la distribution des espèces vont évoluer plus rapidement que ce qui a été observé par le passé, entraînant des modifications dans le fonctionnement et la dynamique des peuplements forestiers.

5.2. - Principe de la sélection des variables

La régression permet de modéliser la relation entre une variable à expliquer et une ou plusieurs variables explicatives. Il s'agit de rechercher parmi l'ensemble des variables écologiques celles qui expliquent le mieux la distribution de l'espèce d'une part (en cohérence avec les connaissances sur l'autoécologie de l'essence) et les variables caractérisant la mortalité d'autre part. Chaque variable doit être significative pour entrer dans le modèle, le seuil étant fixé a priori à 0,001. Il reste alors à réaliser la validation statistique de la qualité explicative de cette variable. On recommence ensuite la manipulation en choisissant la variable la plus explicative parmi les variables restantes. On continue ainsi de suite jusqu'à obtenir un modèle avec plusieurs variables, statistiquement significatif. Le logiciel S-Plus (Statistical Sciences Inc and Lucent Technologies Inc, 2000) est utilisé pour réaliser l'ensemble des régressions.

5.3. - La régression linéaire multiple

5.3.1. - Application

La régression linéaire est utilisée lorsque la variable à expliquer est quantitative. Une macro réalisée par le Lerfob permet de rendre semi-automatique la procédure de détermination des variables explicatives.

Dans le cadre de l'étude, la régression linéaire est utilisée pour établir une partie des modèles de mortalité de houppiers et des arbres. Les modèles résultant de la régression linéaire se présentent sous la forme de l'équation suivante :

Indices de mortalité = $a + b \times (\text{variable1}) + c \times (\text{variable2}) + \dots + z \times (\text{variable } n)$

5.3.2. - Evaluation de la qualité de la régression linéaire

Pour approcher la qualité d'une régression linéaire, il faut s'appuyer sur la valeur de R^2 obtenue dans l'équation finale, puisqu'elle décrit le pourcentage de variance expliquée. La régression linéaire suppose une distribution normale des résidus avec une moyenne nulle et une variance constante (hypothèse d'homoscédasticité), qu'il faut vérifier.

5.4. - La régression logistique

Cette technique statistique est un cas particulier de la régression linéaire qui permet de traiter des variables binaires. On l'utilisera donc pour établir les modèles de distribution potentielle et les modèles de mortalité de branches basée sur des indices binaires.

Le modèle résultant de la régression logistique se présentera sous la forme de l'équation suivante :

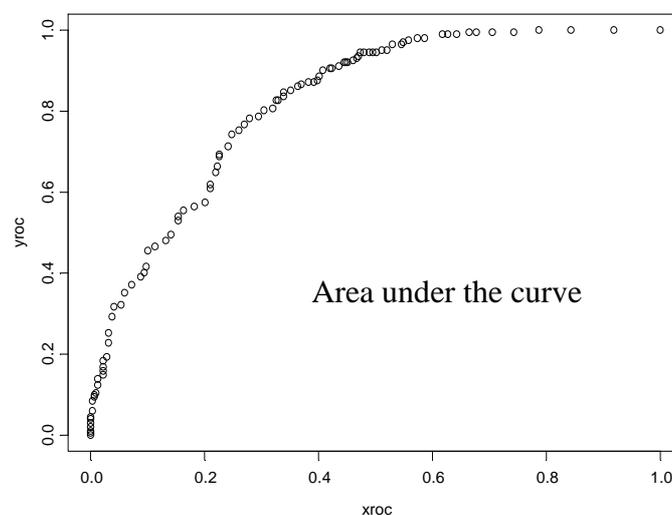
Présence/absence de l'essence = $1/(1+ \text{EXP} (-(a+b \times (\text{variable } 1)+c \times (\text{variable } 1)^2 + \dots +k \times (\text{variable } n))))$.

5.4.1. - Critères de qualité de la régression logistique

Pour apprécier la qualité d'un modèle de régression logistique, nous disposons de la matrice de confusion qui permet de croiser les présences ou absences prédites avec celles réellement observées. Son élaboration passe par la création d'une courbe ROC (*Receiver-Operating Characteristic*) qui permet de définir statistiquement un seuil permettant de distinguer les prédictions des présences et des absences et de définir la qualité globale du modèle.

Une technique récente empruntée à la médecine (Manel, Williams et Ormerod, 2001), consiste à tester toutes les valeurs possibles pour le seuil et de tracer une courbe ROC. Cette courbe permet de qualifier la qualité du modèle à partir de l'aire sous la courbe ($AUC = \text{area under the curve}$). Cette aire correspond à la probabilité que la prédiction d'une présence soit supérieure à celle d'une absence.

Il est alors possible de déterminer la valeur seuil qui permet le reclassement binaire sous forme de 0 (absence) et de 1 (présence). Elle correspond à la capacité du modèle à discriminer les présences et les absences, une discrimination parfaite ayant une AUC égale à 1. L'AUC est un estimateur de l'efficacité du modèle :



Graphique 3 : Représentation d'une courbe ROC

Valeur AUC	Signification
0,9 à 1,0	Excellent
0,8 à 0,9	Bon
0,7 à 0,8	Correct
0,6 à 0,7	Médiocre
0,5 à 0,6	Mauvais

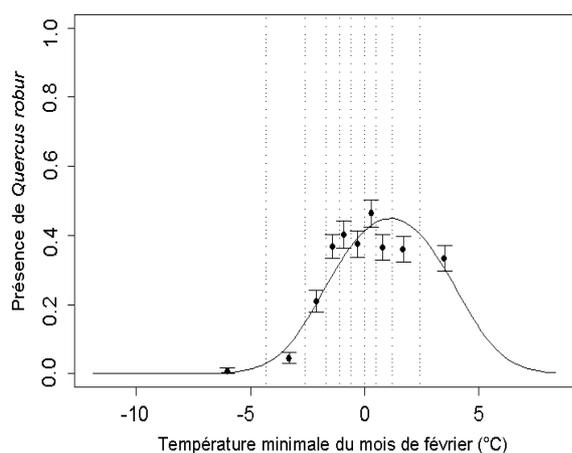
Tableau 8 : Signification statistique de la fiabilité des modèles

La matrice de confusion permet de rendre compte des valeurs correctement prédites. Plusieurs indicateurs sont alors calculés :

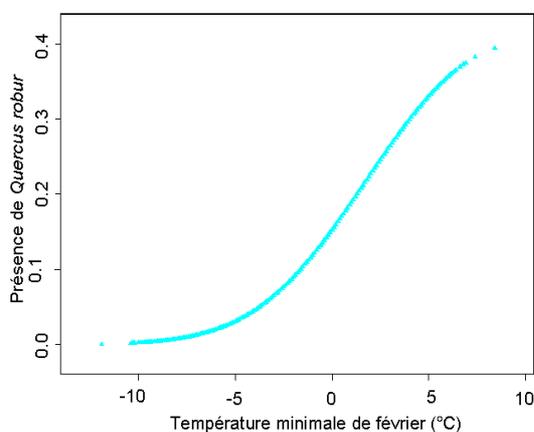
- le succès qui est le pourcentage de présences et d'absences correctement prédites
- la sensibilité décrivant le pourcentage de présences réelles correctement prédites
- la spécificité qui correspond au pourcentage d'absences réelles correctement prédites

5.5. - Outils d'interprétation

L'explication écologique des variables peut être réalisée au travers de plusieurs outils d'interprétation. Des graphiques sont réalisés, ils représentent la variable concernée en fonction de la probabilité de présence de l'essence.

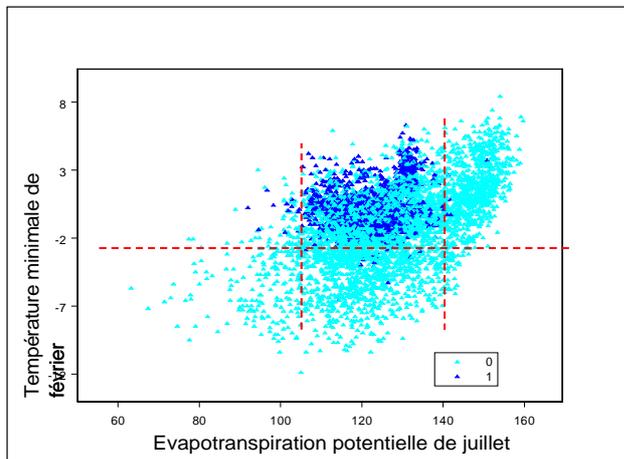


Chaque point orné de barre d'erreur figurant sur le graphe représente 10% des présences/absences observées de l'espèce. La courbe représente le meilleur ajustement statistique permettant de caractériser les probabilités de l'essence en fonction de la variable écologique. Ce graphique univarié ne permet pas de décorer les interactions avec les autres variables du modèle.

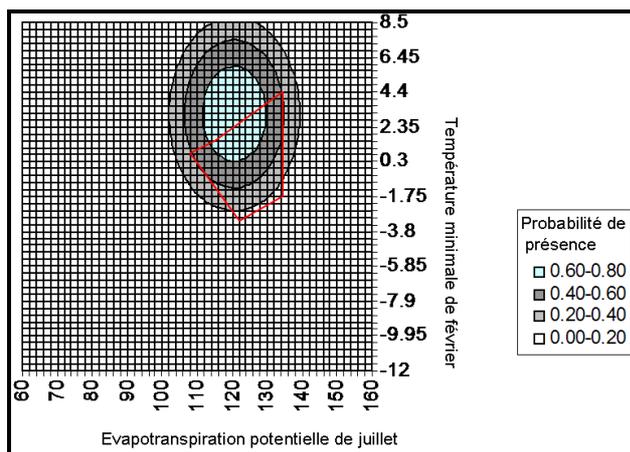


Un deuxième graphique représente la probabilité de présence de l'essence en prenant en compte l'effet des autres variables du modèle. Pour cela l'équation finale est appliquée, la variable étudiée variant entre son minimum et son maximum, les autres facteurs du modèle prenant leur valeur moyenne.

Les corrélations sont testées afin de vérifier si les nouvelles variables entrant dans le modèle apportent des informations complémentaires. Pour cela, il faut comparer les résultats fournis par deux graphiques. L'ajout de toute nouvelle variable dans le modèle doit être évalué, par corrélation avec les variables entrées précédemment. En visualisant les interactions entre les variables à l'aide de ces deux graphiques, il est possible de déterminer les variables qui apportent véritablement une information complémentaire au modèle ou si le gain explicatif est dû à des corrélations.



Le graphique représente la répartition des relevés du jeu de calibration en fonction des interactions entre les températures minimales de février et l'évapotranspiration potentielle de juillet. Les présences du chêne figurent en bleu foncé, les absences en bleu clair. On constate qu'à une température de -2°C , le chêne est absent lorsque l'ETP est supérieur à 140 mm ou inférieur à 100 mm. L'ETP apporte donc une information complémentaire.



Ce graphique d'analyse bivarié permet également d'étudier les variations de la fréquence de l'espèce en fonction de deux variables mais hors interactions avec les autres variables du modèle. L'exemple ci-contre confirme l'effet négatif des températures minimales de février sur les probabilités de présence du chêne pédonculé.

5.6. - Apport des variables aux modèles

Il est possible de déterminer la part d'explication qu'apporte chaque variable au modèle une fois les interactions prises en compte. Pour cela, on relève la part de déviance expliquée par chacune des variables constituant le modèle après l'avoir placée à la fin de l'équation.

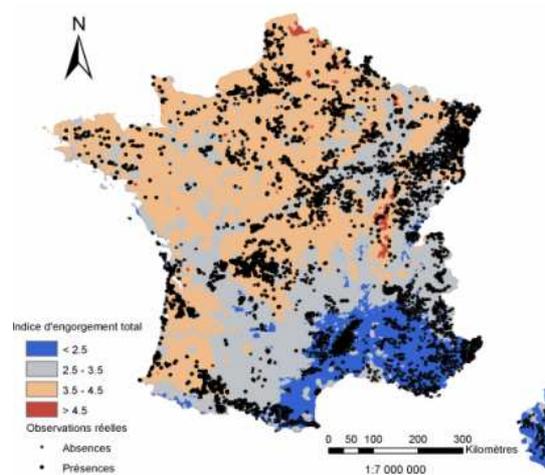
III. - MODÉLISATION DE L'AIRES POTENTIELLE DE DISTRIBUTION DU CHÊNE PÉDONCULÉ

On cherche ici à expliquer les présences et absences du jeu de calibration en utilisant les données climatiques de la période 1961 – 1990. Les variables sont présentées en fonction de leur ordre d'apparition dans le modèle.

1. - Facteurs écologiques influençant la distribution

1.1. - Première variable explicative : l'indice d'engorgement total

A cette première étape les variables d'engorgement ressortent nettement comme étant les plus explicatives de la distribution du chêne pédonculé. L'eau du sol semble être la contrainte la plus discriminante pour l'essence. L'indice d'engorgement total, ayant la valeur de déviance la plus élevée, est sélectionné.



Carte 5 : Représentation spatiale de la variable d'engorgement total.

Cet indice regroupe à la fois les engorgements temporaires et permanents. Le chêne pédonculé tolère les milieux engorgés. Il résiste bien aux contraintes d'hypoxie contrairement à de nombreuses autres essences.

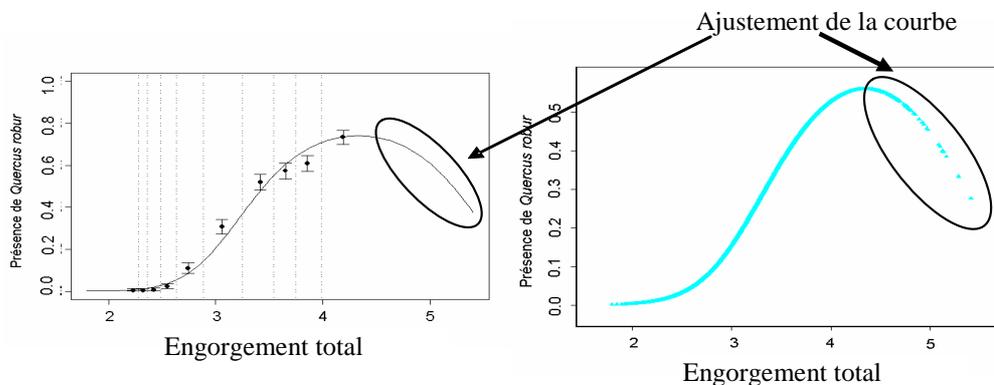


Fig 1 : Fréquence observée et modélisée de Quercus robur décorrélée suivant l'indice d'engorgement total

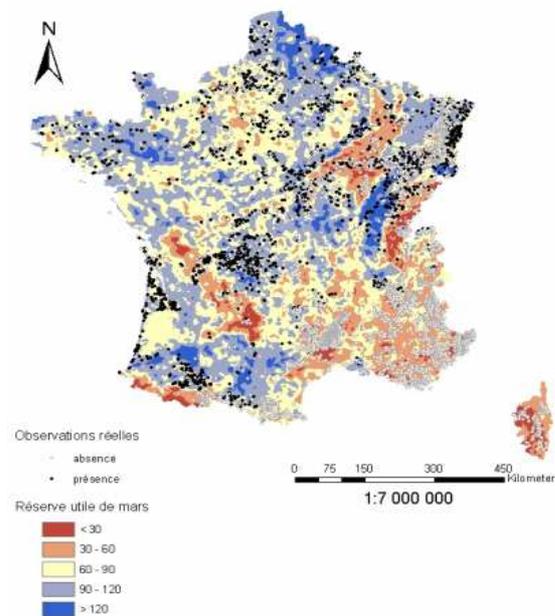
Fig 2 : Effet de l'engorgement total des autres variables du modèle sur la répartition de Quercus robur

Les deux courbes des figures 1 et 2 sont sensiblement identiques et présentent le même type de réponse, ce qui permet de valider la relation liant l'engorgement à la présence du chêne pédonculé. On peut en déduire que l'optimum écologique de *Quercus robur* se situe à un indice de 4,2 environ pour un indice ayant une valeur max de 5.

Pour de faibles valeurs de l'indice d'engorgement total (valeurs inférieures à 3), la probabilité de présence du chêne pédonculé est très faible. Cela est parfaitement cohérent avec les connaissances actuelles sur son autoécologie, l'optimum écologique du chêne pédonculé se situant sur sols alluviaux. Pour les plus fortes valeurs de l'indice d'engorgement, la probabilité de présence du chêne pédonculé diminue. On peut l'expliquer en partie par le fait qu'il y a peu de points de relevés situés sur des sols fortement engorgés (indice supérieur à 4) comme l'atteste la carte 5.

1.2. - Deuxième variable explicative : la réserve utile de mars

A cette étape, la variable sélectionnée est la réserve utile de mars moyennée sur la période 1961-1990. Là aussi, il s'agit d'une variable décrivant le caractère hydrique de l'essence.



Carte 6 : Représentation spatiale des valeurs de la réserve utile de mars moyennée sur la période 1961-1990.

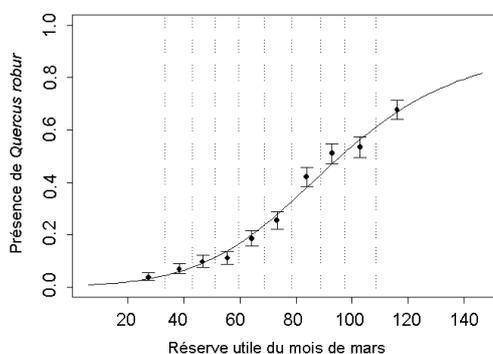


Fig 3 : Fréquence observée et modélisée de Quercus robur suivant la réserve utile de mars

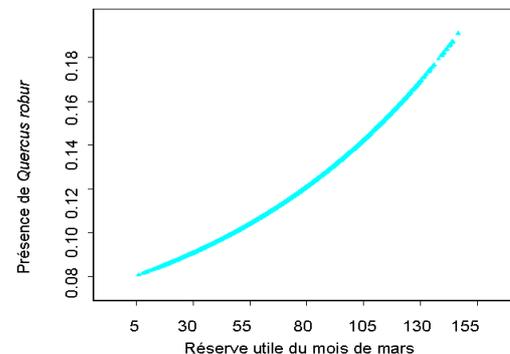
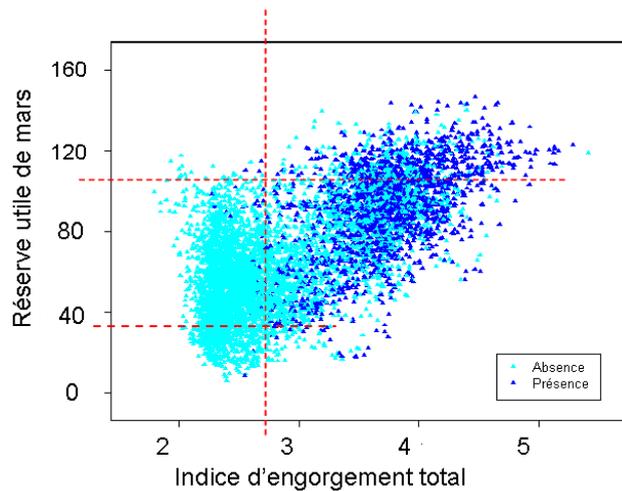


Fig 4 : Effet de la réserve utile de mars décorrélé des autres variables du modèle sur la répartition de Quercus robur

Les graphiques des figures 3 et 4 représentent les courbes de réponse en fonction de la réserve utile de mars. Sur celui de gauche la variable étudiée n'est pas décorrélée de l'effet des autres variables du modèle. Le graphique de droite est tracé en utilisant l'équation complète du modèle dans laquelle on fixe toutes les variables sauf la réserve utile de mars. Il est ainsi possible de visualiser l'effet de celle-ci sur la distribution de l'essence sans tenir compte des interactions avec les autres variables. La probabilité de présence est d'autant plus forte que la réserve utile est élevée. Ceci conforte les connaissances sur le caractère mésohygrophile de l'essence qui affectionne particulièrement les milieux humides. Le chêne pédonculé n'est pas présent dans les zones où la réserve utile est trop basse dès le début de la saison de végétation.

Ces zones d'où semble être exclu le chêne pédonculé sont les zones en rouge (clair et foncé) sur la carte 6. On y trouve une grande partie du bassin méditerranéen et des massifs montagneux, mais aussi les plateaux calcaires en Lorraine et du Lot à la Charente.

Ces deux premières variables décrivent l'affinité du chêne pédonculé pour l'eau du sol. Il est important de vérifier s'il n'existe pas de corrélation entre elles. Le graphique 5 réalisé ci-dessous permet de vérifier la corrélation.



Graphique 5 : Probabilité de présence du chêne pédonculé en fonction de la réserve utile de mars (en mm) et de l'indice d'engorgement total

Pour une valeur d'engorgement total de 3, la réserve utile est discriminante. Pour une réserve utile inférieure à 40 mm, le chêne pédonculé est absent même si l'engorgement total est favorable. Ainsi, même si la corrélation entre ces deux variables est de 0,7, l'ajout de cette dernière variable au modèle apporte une explication complémentaire et significative au modèle.

1.3. - Troisième variable explicative : l'évapotranspiration potentielle de juillet

Les variables les plus explicatives à ce stade sont toutes d'ordre thermique. Après l'importance de l'eau contenue dans le sol, vient l'effet de l'évapotranspiration potentielle de juillet (ETP). L'ETP est fonction du rayonnement solaire, de la température moyenne (liés à l'humidité relative de l'air, à la vitesse du vent et à l'indice foliaire).

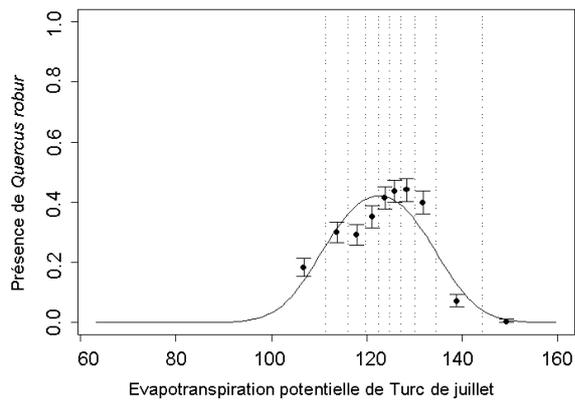


Fig 5 : Fréquence observée et modélisée de Quercus robur suivant l'évapotranspiration potentielle de juillet

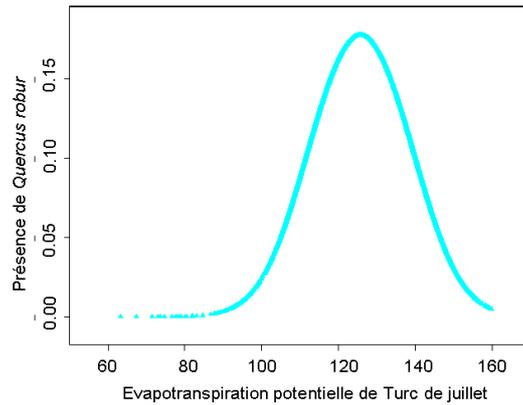
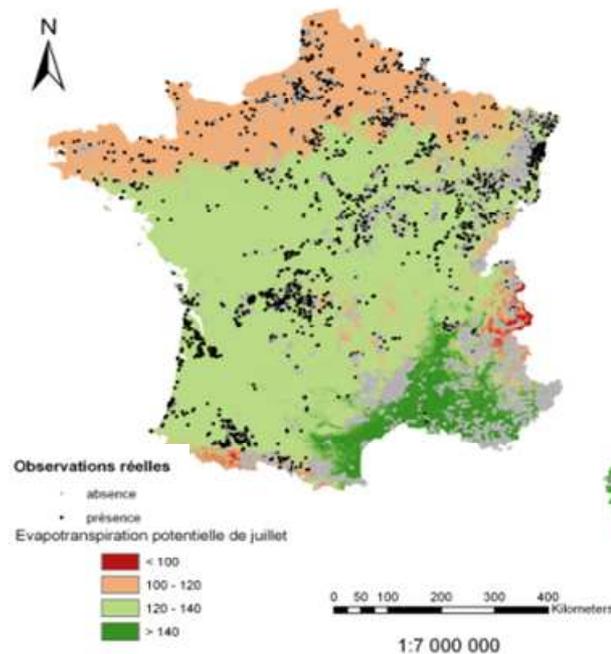


Fig 6 : Effet de l'évapotranspiration potentielle décorrélée des autres variables du modèle sur la répartition de Quercus robur de juillet

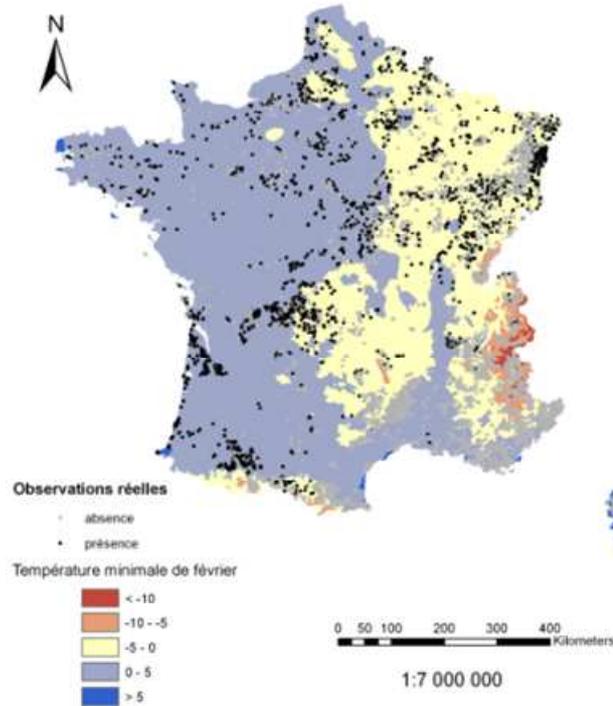
Les deux courbes des figures 5 et 6 sont comparables, elles présentent toutes deux une valeur d'évapotranspiration potentielle optimale autour de 130 mm. La probabilité de présence du chêne est faible pour les faibles valeurs d'ETP (≤ 100 mm), qui selon la carte 7 correspond aux zones d'altitude élevée où la température moyenne est plus faible (zones de montagnes). Les fortes valeurs d'ETP (> 140 mm) correspondent quant à elles aux zones méditerranéennes où les températures moyennes sont plus chaudes et les rayonnements plus forts.



Carte 7 : Représentation spatiale de l'évapotranspiration potentielle de juillet moyennée sur la période 1961-1990.

1.4. - Quatrième variable explicative : la température minimale de février

A ce stade de l'élaboration du modèle, l'effet thermique est toujours très fort. Il ressort néanmoins un effet plus prononcé des températures froides.



Carte 8 : Représentation spatiale de la température minimale de février moyennée sur la période 1961-1990

La température minimale de février moyennée sur la période 1961-1990 semble cohérente écologiquement pour expliquer la répartition des présences et absences puisque le chêne pédonculé est sensible aux froids trop rigoureux en hiver.

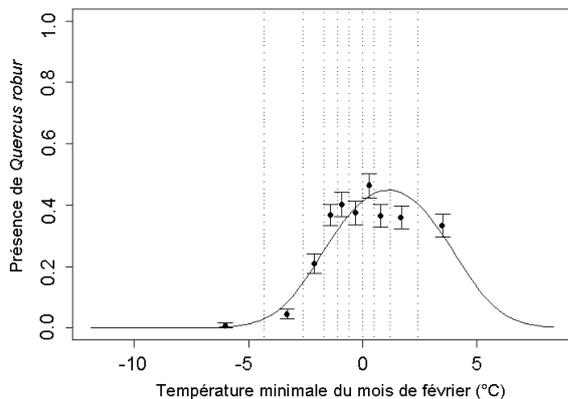


Fig 7 : Fréquence observée et modélisée de Quercus robur suivant la température minimale de février

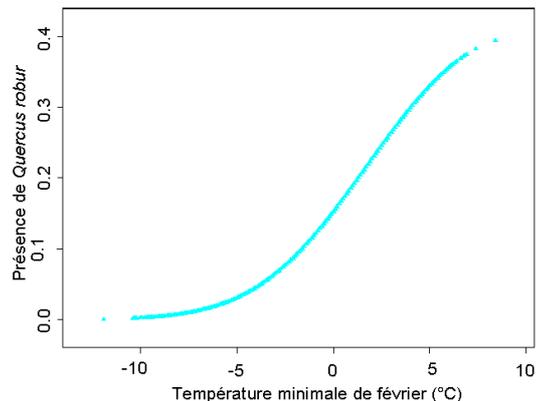
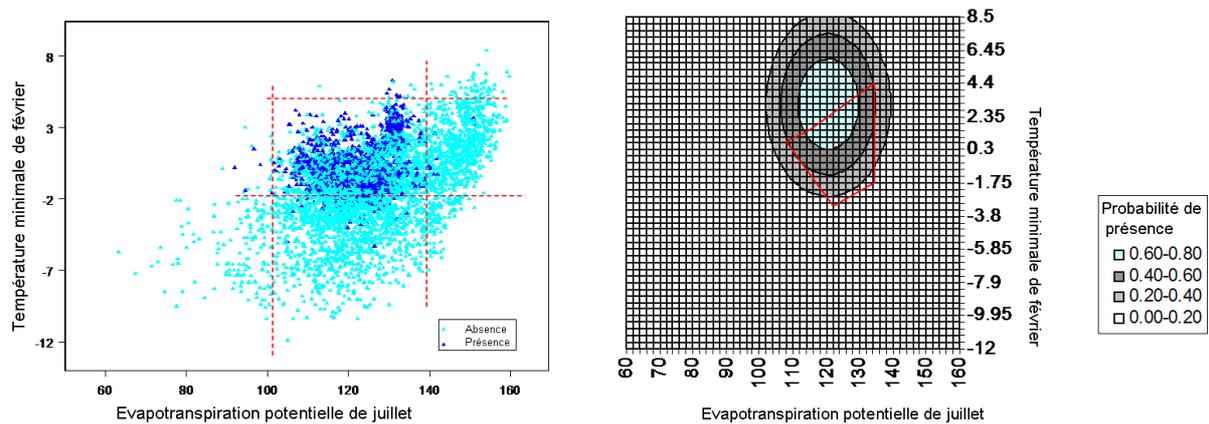


Fig 8 : Effet de la température minimale de février décorréllé des autres variables du modèle sur la répartition de Quercus robur

La comparaison des figures 7 et 8 montre une différence de réponse des probabilités de présence du chêne pédonculé en fonction de cette variable. Une interaction avec une autre variable est probable car sur la figure 8, une fois l'effet des autres variables enlevé le chêne pédonculé paraît apprécier aux températures douces en hiver, ce qui semble cohérent.

La température minimale de février est en effet corrélée à l'ETP, le R^2 est de 0,46. Les zones à températures d'hiver élevées sur le graphique de gauche sont défavorables car les ETP d'été y sont trop fortes pour que le chêne pédonculé soit présent, une fois pris en compte l'effet de l'ETP, la courbe devient croissante (courbe de droite).



Graphiques 6 et 7: Probabilité de présence du chêne pédonculé en fonction de la température minimale de février et de l'évapotranspiration de juillet

Les graphiques 6 et 7 montrent que le choix de cette variable est pertinent puisque pour une même valeur d'ETP, la température minimale de février est discriminante. Il apparaît très nettement un effet négatif des températures minimales de février sur la probabilité de présence du chêne pédonculé. Celle-ci diminue avec les températures basses, ce qui est parfaitement cohérent avec l'écologie de l'essence signalant une sensibilité aux froids rigoureux en hiver. Aussi, cette variable est sélectionnée pour établir l'équation du modèle.

1.5. - Cinquième variable explicative : l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse

La cinquième variable retenue pour l'explication du modèle est l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argileuse ou limoneuse.

Les observations actuelles sur l'évolution du climat tendent à montrer une accentuation des contrastes saisonniers au niveau pluviométrique. C'est-à-dire que l'on s'attend à avoir plus de pluie en hiver et des étés plus secs (Moisselin *et al.*, 2002). Or ces alternances entre sécheresse et engorgement sont particulièrement défavorables pour le chêne pédonculé et risquent de le devenir davantage dans un contexte de changement climatique.

Les sols compacts (alternance gonflement-rétractation des argiles, plancher argileux peu profond, texture argilo-limoneuse compacte) entraînent une contrainte d'autant plus forte rendant encore plus défavorable ces stations. L'indice choisi ici reprend justement ces deux aspects. Plus l'amplitude de fluctuation est importante, plus il y a d'argile ou de limon, plus la probabilité de présence de *Quercus robur* est faible et plus la valeur de l'indice est élevée.

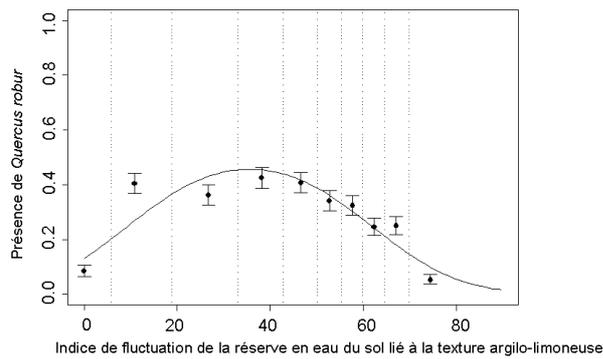


Fig 9 : Fréquence observée et modélisée de Quercus robur suivant l'indice de fluctuation Des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse

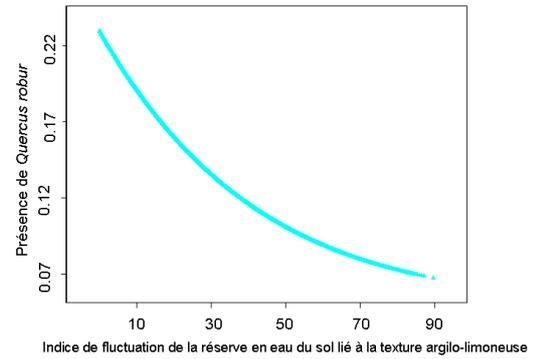
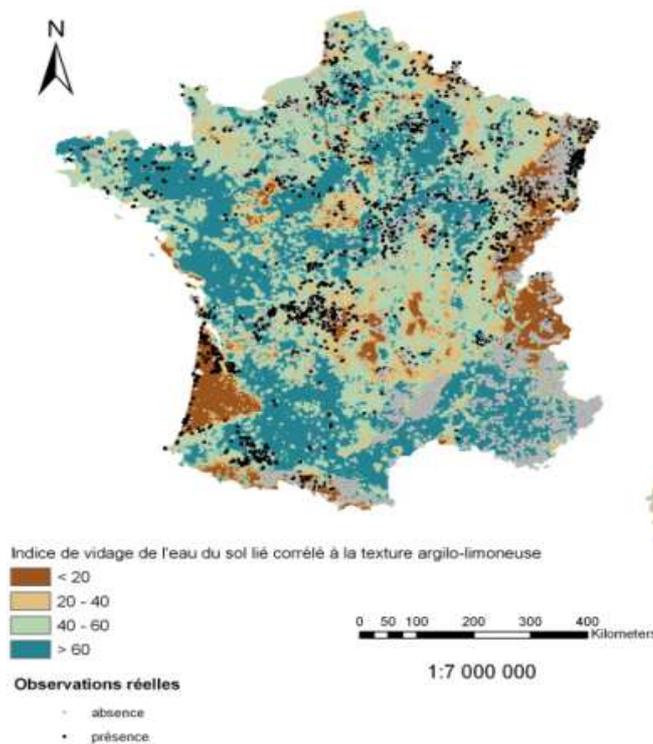


Fig 10 : Effet de l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse décorrélé des autres variables du modèle sur la répartition de Quercus robur

L'allure des deux courbes des figures 9 et 10 est différente, la variable interagit avec la réserve utile de mars. Les zones correspondant aux faibles valeurs de l'indice de fluctuation sont défavorables au chêne sur la fig 9 puisque les valeurs de réserves utiles de mars y sont déjà trop faibles.

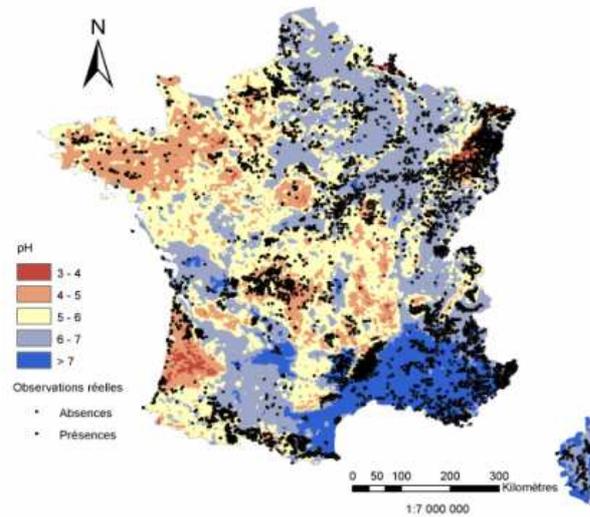
La carte 9 montre que les zones où la probabilité de présence du chêne pédonculé est plus faible et sont situées au niveau des massifs montagneux (Vosges, Jura, Alpes, Pyrénées, Massif central) et du bassin aquitain.



Carte 9 : Représentation spatiale de l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse

1.6. - Sixième variable explicative : le pH

La dernière variable explicative sélectionnée pour le modèle est le pH. En choisissant cette variable, on considère un aspect qui jusqu'alors n'a pas été pris en compte dans ce modèle. Il s'agit de la richesse chimique du sol.



Carte 10 : Représentation spatiale du pH

Le chêne pédonculé est présent sur une vaste gamme de pH (acide à basique) mais il peut être discriminant à l'échelle de la France : on voit notamment qu'il tolère moins les valeurs faibles.

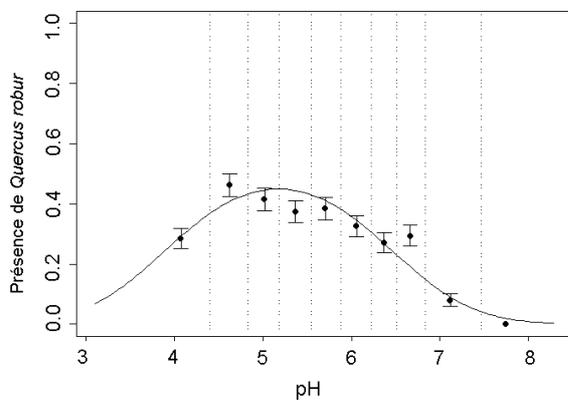


Fig 11 : Fréquence observée et modélisée de Quercus robur suivant le pH

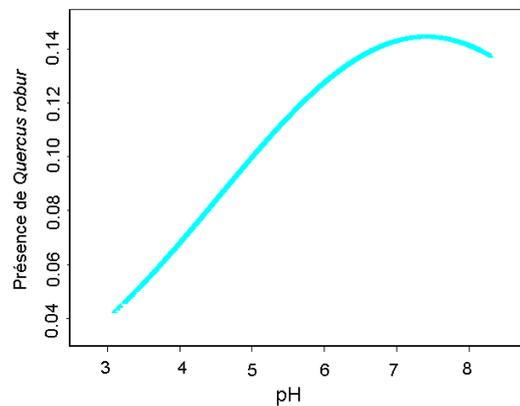
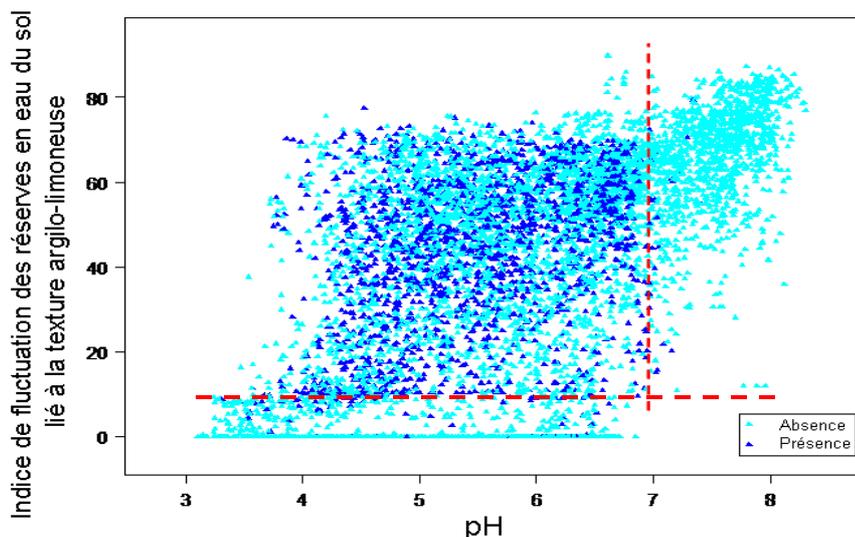


Fig 12 : Effet du pH décorrélé des autres variables du modèle sur la répartition de Quercus robur

On note que les formes des courbes de réponse des figures 11 et 12 divergent. Ainsi, le pH interagit avec une autre variable du modèle. Il s'agit de l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol couplé à la texture argilo-limoneuse. Après vérification (Cf. matrice des corrélations en annexe 5), la corrélation entre ces deux variables est de 0,54. Le pH étant corrélé à la réserve utile du sol et l'indice de fluctuation étant calculé à partir de la réserve utile maximale cette interaction paraît cohérente (les zones où les pH sont les plus élevés sont également celles où les réserves utiles sont les plus faibles : il s'agit de la région méditerranéenne).

Cependant sur le graphique 8, on constate que pour une même valeur de l'indice de fluctuation, le pH est discriminant.



Graphique 8 : Probabilité de présence du chêne pédonculé en fonction du pH et de l'indice de fluctuation des réserves lié à la texture argilo-limoneuse

Pour les milieux très acides, la probabilité de présence de *Quercus robur* est très faible. En effet, lorsque l'on se reporte à la carte ci-dessus on constate que ces zones concernent le massif vosgien, la Bretagne, l'Aquitaine. Ce sont des régions où en effet il y a peu d'observations de l'essence.

La valeur optimale de présence de l'espèce se situe sur des pH neutres à légèrement basiques, et la probabilité diminue pour les faibles valeurs de pH.

2. - Apport des variables à l'explication de la distribution

Le modèle ainsi constitué s'appuie sur plusieurs facteurs écologiques, qui ont une importance inégale.

Modèle de distribution potentielle du chêne pédonculé			Sens	Apport	
Eau du sol	Engorgement total (bio-indication)		+	64%	} 73 %
	Réserve utile de mars (moyenne période 1961-1990)		+	2%	
	Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse		-	7%	
Aspect thermique	Température minimale de février (moyenne période 1961-1990)		+	12%	} 23 %
	ETP de juillet selon Turc (moyenne période 1961-1990)		+/-	11%	
Richesse du sol	pH		+/-	4%	

Tableau 9 : Résumé du modèle de distribution potentielle du chêne pédonculé

Le modèle statistique indique que la présence du chêne pédonculé est fortement liée aux conditions édaphiques et particulièrement au contenu en eau du sol. Cet aspect est pris en compte au travers de trois variables qui expliquent 73 % des probabilités du modèle. Il s'agit de la réserve utile de mars, de l'engorgement total et de l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse.

La prise en compte de variables d'ordre thermique permet d'améliorer la qualité statistique du modèle. Cet aspect apparaît au travers de l'évapotranspiration potentielle de juillet et la température minimale de février et représente 23 % d'explication du modèle.

La richesse chimique est enfin le dernier facteur écologique permettant d'affiner les prédictions à l'échelle de la France avec 4 % d'apport.

La formule permettant de calculer la probabilité de présence du modèle est la suivante :

$$\frac{1}{1 + \exp(-(-73.66947 + (0.004868271 \times \text{Ru3}) + (1.4149^{5} \times (\text{Ru3})^2) + (9.227603 \times \text{Eng_tot}) + (-1.061924 \times (\text{Eng_tot})^2) + (0.2727146 \times \text{Tmin2}) + (-0.01431593 \times (\text{Tmin2})^2) + (0.8184097 \times \text{ETP7}) + (-0.00325633 \times (\text{ETP7})^2) + (-0.02419151 \times \text{Fluc}) + (9.3691^{5} \times (\text{Fluc})^2) + (1.065013 \times \text{pH}) + (-0.07193387 \times \text{pH}^2)))}$$

Avec : Ru3 : réserve utile de mars

Eng_tot : engorgement total

Tmin2 : température minimale de février

ETP7 : évapotranspiration potentielle de juillet

Fluc : Indice de fluctuation de la réserve en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse

La richesse chimique ou l'alimentation en eau du sol s'avèrent être des facteurs limitants pour expliquer la distribution du chêne pédonculé, ces variables déterminante pour expliquer les probabilités de présences de l'essence. Or, peu d'études portant sur la modélisation des aires potentielles de distribution d'essences ne tiennent compte de cet aspect.

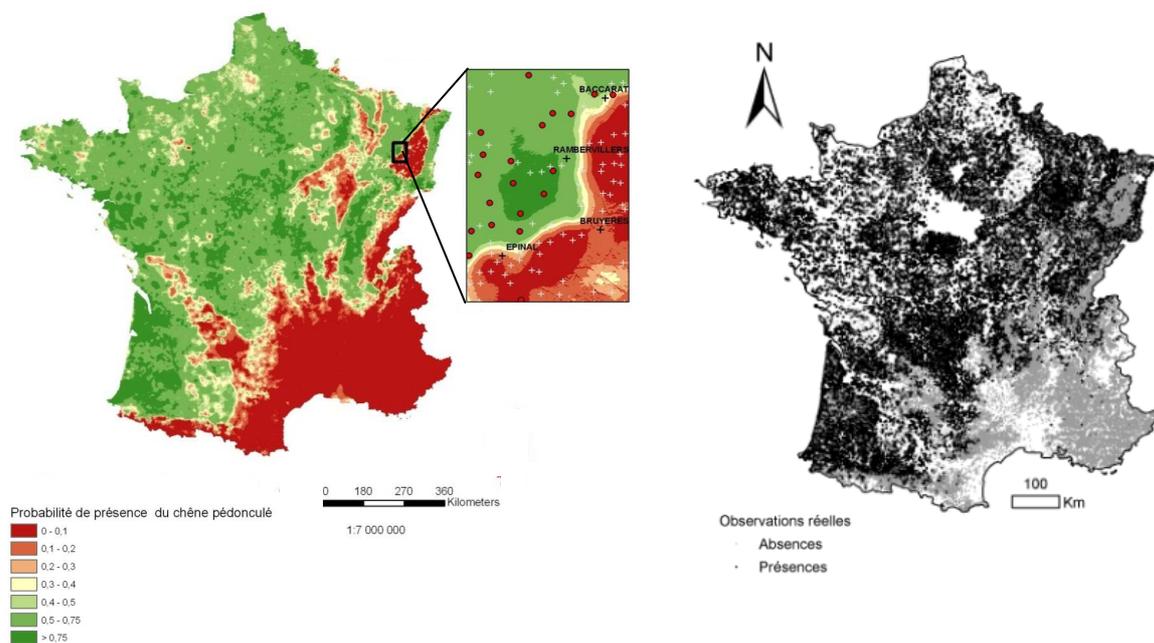
Le rapport d'analyse S+ pour ce modèle est fourni en annexe 5

3. - Cartographie du modèle

3.1. - Un modèle robuste à l'échelle de la France

Nous avons calculé le modèle de distribution à l'échelle de la France au pas de 1 kilomètre.

Les probabilités de présences sont présentées selon un dégradé de couleurs sur la carte 11. Les plus faibles figurent en rouge alors que les plus fortes sont en vert. La cartographie du modèle indique que le chêne pédonculé serait absent de la zone méditerranéenne et des régions montagneuses. La probabilité de présence est également assez faible dans les zones de plateaux calcaires en Lorraine et sur une ligne Charente-Lot.



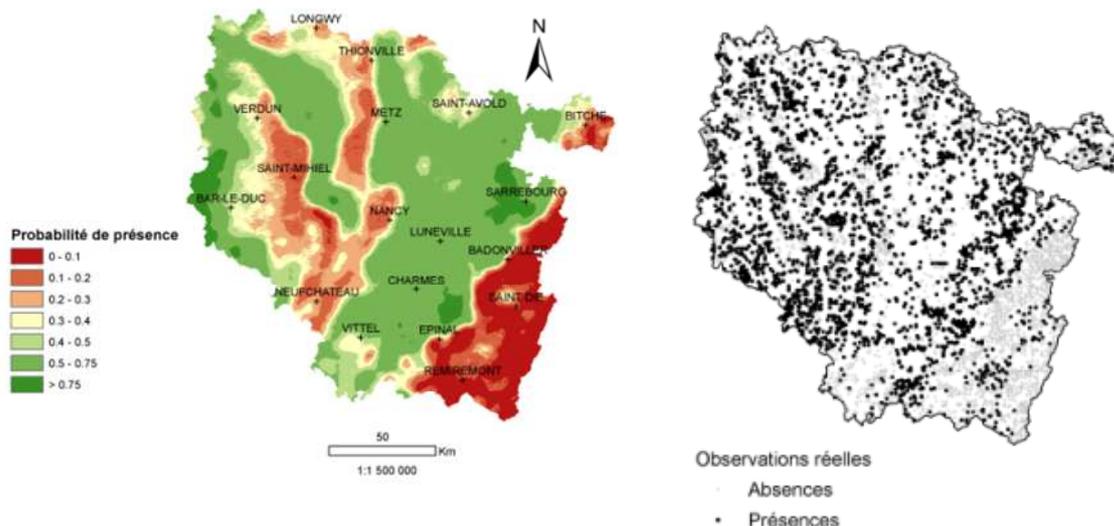
Cartes 11 : Modèle de distribution potentiel du chêne pédonculé et présences absences réellement observées

En comparant ces deux cartes, on constate que les prédictions faites sur l'ensemble du territoire correspondent bien aux présences et absences observées. Par exemple les faibles prédictions en région méditerranéenne et en montagne correspondent à des zones où l'essence n'est pas observée (Cf. Tableau 10). Ces répartitions géographiques des probabilités de présence sont également cohérentes avec les connaissances sur le tempérament de l'essence.

Le chêne pédonculé nécessitant une alimentation continue en eau est en effet naturellement absent de la zone méditerranéenne (effet de la réserve utile de mars et de l'engorgement total). Les températures trop rigoureuses en hiver dans les zones de montagne excluent le chêne de ces régions (effet de la température minimale de février). Les régions où les pH sont trop acides comme c'est le cas des Vosges sont également des zones où le chêne pédonculé n'est pas observé.

3.2. - Prédications à l'échelle de la Lorraine

Pour répondre aux interrogations de l'ONF concernant la Lorraine, il faut vérifier la validité du modèle à l'échelle de cette région. Dans ce but, le modèle est calculé au pas de 50 mètres afin de prendre en compte au mieux la variabilité locale.



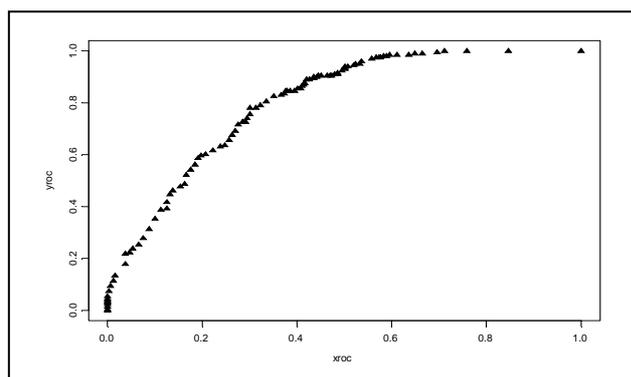
Cartes 12 : Modèle de distribution potentiel du chêne pédonculé et présences et absences réellement observées

Lorsqu'on compare les relevés de présences de chêne pédonculé de l'IFN avec les prédictions du modèle, on constate qu'au niveau du massif vosgien le modèle est cohérent et fait bien état de l'absence de l'essence. En ce qui concerne le plateau Lorrain et la Woëvre, la présence du chêne pédonculé est bien prédite.

Cependant, pour la zone des plateaux calcaires, les prédictions semblent beaucoup plus pessimistes que ce qui est réellement observé. En effet, aux environs de Neufchâteau et à l'ouest de Metz, le chêne pédonculé est présent alors que le modèle ne le prédit pas.

4. - Evaluation des prédictions du modèle

Pour évaluer la qualité du modèle, on remplace les présences et absences du jeu de calibration par celles d'un jeu de validation. Dans le cas présent, ce jeu de données est constitué de 553 placettes réparties de façon uniforme sur l'ensemble du territoire français.



Le premier indicateur de qualité est l'AUC (area under the curve). La valeur de cet indicateur est de 0,8 avec le jeu de validation issu de la base de données Sophy-Ecoplant ; cela signifie que le modèle est robuste.

Figure 13 : Courbe ROC du modèle de distribution avec le jeu de validation

On peut également évaluer les présences et absences bien prédites en comparant les prédictions avec les observations réelles des deux jeux de validation.

En %	Prédiction exacte des présences et absences	Prédiction exacte des présences	Prédiction exacte des absences
Jeu de calibration	80	90	75
Jeu de validation	73	78	70

Tableau 10 : Comparaison des prédictions du modèle pour le jeu de calibration et les jeux de validation

5. - Quelques erreurs de prédiction

Même si, à l'échelle du territoire, le modèle décrit bien la répartition de l'essence, il reste des présences du chêne pédonculé mal prédites avec le jeu de validation. Ces erreurs se situent principalement au niveau de la limite de l'aire de distribution de l'essence. On constate également un nombre important de présences mal prédites dans la région naturelle des plateaux calcaires en Lorraine (Cf. – annexe 6). Le seuil statistique fourni par le modèle et permettant de discriminer les présences des absences est de 0.285. C'est-à-dire qu'en dessous de cette valeur de probabilité, l'essence est considérée absente. En diminuant le seuil à 20 %, on constate que près moitié des présences mal prédites sont en effet situées en limites d'aire de distribution (piémont des massifs montagneux) ou dans des régions où les probabilités de présences sont plus hétérogènes (ouest du Massif central).

La répartition des relevés du jeu de données ayant permis de calibrer le modèle ne couvre pas correctement l'ensemble du territoire. On peut penser que certaines situations anecdotiques ne sont pas représentées et donc que le gradient écologique n'est pas parfaitement couvert. Cela pourrait peut-être expliquer une petite partie des présences mal prédites.

En comparant ce jeu de calibration avec les présences et absences relevées par l'IFN, on constate qu'une partie des mauvaises prédictions se situe en effet dans des régions mal renseignées. C'est le cas dans le Sud-ouest au niveau de la ligne allant du Lot à la Charente. Cependant, cela n'explique pas l'ensemble des erreurs, notamment au niveau des plateaux calcaires en Lorraine.

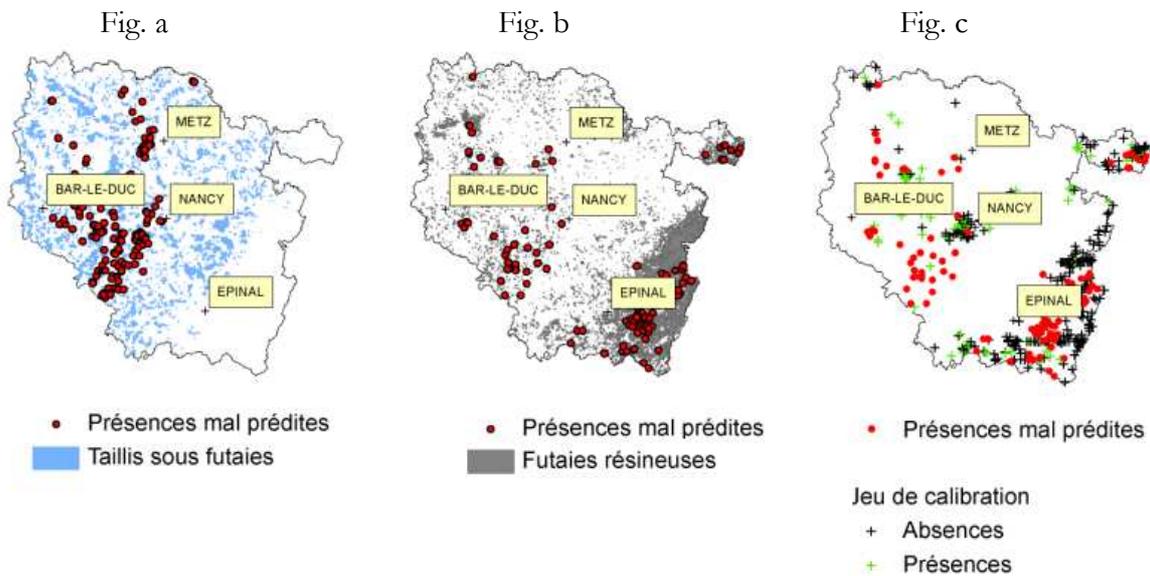
Plusieurs hypothèses ont été évoquées pour tenter d'expliquer les incohérences à l'échelle de la Lorraine (surtout sur les plateaux calcaires). Cela pourrait être dû tout d'abord à la géologie et notamment aux placages limoneux (très locaux) mal pris en compte dans le modèle. Cette variable de texture du sol est en effet au pas kilométrique. L'établissement de nouvelles cartes géologiques, à l'échelle de la Lorraine, au pas de 50 m permettra, à l'avenir, par comparaison de vérifier cette première hypothèse. (Riofrio, 2009).

Une autre hypothèse avancée est l'effet de la sylviculture et donc l'impact de l'homme sur la répartition de l'essence. Le chêne pédonculé aurait été particulièrement favorisé par le traitement en taillis sous futaie. Pour le vérifier, nous comparons les erreurs de prédictions avec une carte des types de peuplement en Lorraine.

Types de peuplement	Présences observées	Présences mal prédites
Futaie de feuillus	18%	8%
Mélange futaie/taillis	27%	34%
Futaie de résineux	32%	44%
Boisement non forestiers	23%	14%

Tableau 11 : Pourcentage de présences mal prédites par type de peuplement en Lorraine

Il en résulte qu'en effet, les erreurs de prédictions sont plus nombreuses dans des taillis sous futaie que dans les futaies de feuillus. Lorsque l'on localise les TSF (Cf. fig.a – carte 13) présentant des erreurs de prédiction, on constate qu'ils se situent majoritairement sur les plateaux calcaires. Cela renforce donc l'hypothèse de l'effet anthropique, et donc d'une gestion en faveur du chêne pédonculé dans cette région naturelle. Par ailleurs, 44 % de présences mal prédites se situent dans des futaies de résineux (Cf. fig.b – carte 13) et 65 % des futaies résineuses en Lorraine sont sur le massif vosgien. Les conditions écologiques ne sont pas favorables au chêne pédonculé dans le massif vosgien où l'acidité du sol exclue naturellement sa présence. Aussi, une partie de ces erreurs de prédiction peut s'expliquer par l'action de l'homme qui a favorisé l'essence hors station.



Carte 13 : Localisation des prédictions incorrectes de la présence du chêne pédonculé en Lorraine. Fig a : Localisation des erreurs de prédictions dans des peuplements de TSF. Fig b : Localisation des erreurs de prédictions dans des futaies résineuses. Fig c : Carte de comparaison des erreurs de prédiction et des données du jeu de calibration du modèle.

Lorsque l'on compare les erreurs de prédictions avec les relevés du jeu de calibration du modèle de distribution potentielle du chêne pédonculé (Cf. fig c- carte 13), on constate que la région naturelle des plateaux calcaire est très mal renseignée ce qui expliquerait également en partie les erreurs de prédiction.

6. - Projections du modèle dans le futur

En se basant sur le modèle établi sur la période 1961-1990, on établit les cartes d'aire potentielle de distribution dans le futur. Pour cela nous avons recalculé le modèle calibré avec les données climatiques de la période 1961-1990 pour la période 1991-2004 et pour l'année 2003 d'une part en remplaçant les valeurs par celles réellement observées de chaque période. D'autre part nous avons fait la même démarche mais pour la période 2021-2050 et pour la période 2071-2100 en substituant leurs valeurs des variables par leurs valeurs futures (estimations Tyndall). Puisque nous disposons de deux scénarios déclinés chacun selon quatre modèles, cela permet de calculer huit aires potentielles de répartitions futures. Chaque aire de répartition peut être transformée en donnée binaire de présence/absence en utilisant le seuil fourni par la commande Roc (seuil statistique discriminant au mieux les présences et absences de l'essence dans le modèle). Ceci permet de calculer une surface de présence potentielle et de classer les différents modèles climatiques et scénarios.

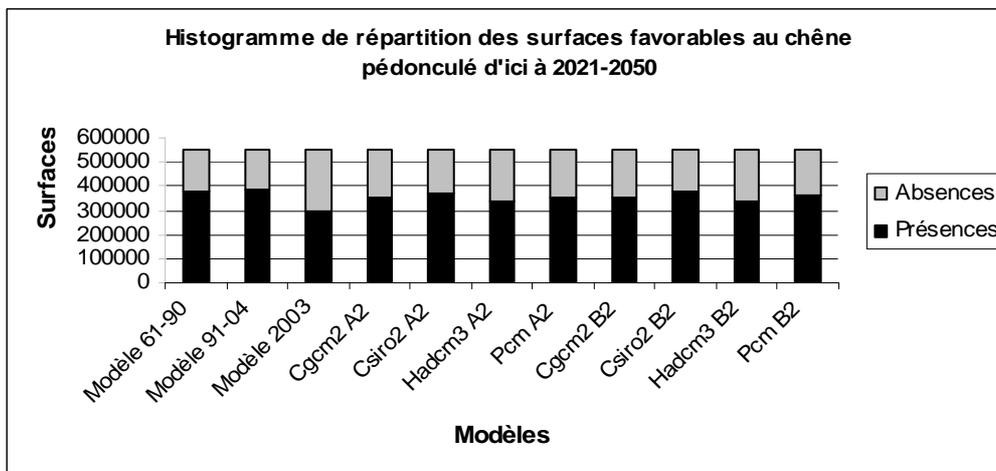


Tableau 11 : Histogramme de comparaison des surfaces de présence/absence du chêne pédonculé dans les différents modèles à la période 2021 – 2050 par rapport à la période de référence.

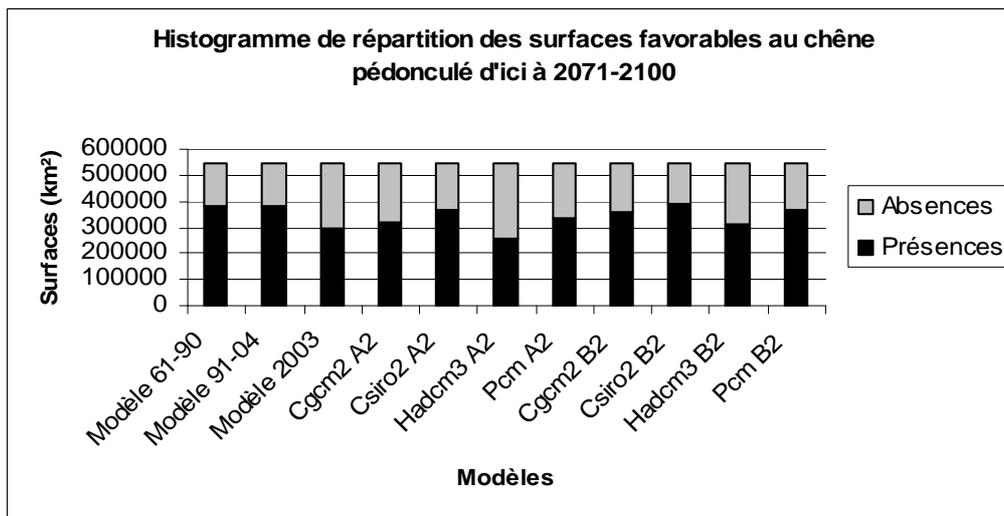


Tableau 12 : histogramme des surfaces de présence/absence du chêne pédonculé dans les différents modèles à la période 2071 – 2100.

D'après le classement suivant (Cf. tableau 11 et 12), Le modèle futur qui impact le moins la distribution potentielle du chêne pédonculé est par rapport à l'aire de distribution potentielle établi à partir de variables calculées sur la période 1961-1990 est le modèle Csiro2 avec le scénario B2. A l'inverse, celui qui la modifie le plus est le modèle Hadcm3 avec le scénario A2. Ces résultats sont valables quelle que soit la période.

Modèles	Pourcentage de présences	
	Futur proche (2021-2050)	Futur éloigné (2071-2100)
Modèle 61-90	69%	69%
Modèle 91-04	70%	70%
Modèle 2003	54%	54%
Cgcm2 A2	64%	58%
Csiro2 A2	68%	67%
Hadcm3 A2	61%	46%
Pcm A2	65%	62%
Cgcm2 B2	65%	65%
Csiro2 B2	69%	71%
Hadcm3 B2	61%	57%
Pcm B2	66%	67%

Tableau 12 : Comparaison par rapport à la période de référence de la surface de présence du chêne pédonculé sur le territoire français selon différents modèles climatiques futurs pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100.

Les tableaux 12 ci-dessus permettent de quantifier la différence qui existe entre les huit scénarios climatiques par rapport au modèle établi sur la période 1961-1990. Sur la période de référence (1961-1990), le chêne est prédit sur 69 % du territoire en utilisant le seuil de la courbe Roc. Le modèle Hadcm3 a2 (scénario et modèle pessimistes) prévoit une réduction de la surface potentielle de présence du chêne pédonculé sur le territoire français, avec 61 % et 46 % respectivement pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100. On constate également une très forte réduction des probabilités de présences du chêne pédonculé entre 1961-1990 et l'année 2003, qui confirme l'impact potentielle d'une telle sécheresse sur l'essence. Cependant, lorsque l'on compare à la période 1991-2004, les probabilités de présences sont globalement stables.

Annexe 7 : Distributions potentielles du chêne pédonculé passée et futures.

La juxtaposition des huit cartes issues des modèles projetés dans le futur selon différents modèles et scénarios climatiques permet de souligner la différence qui existe d'un modèle à l'autre. Alors que certains ne prévoient que peu de changements, d'autres prévoient que le chêne pédonculé ne serait plus en station à écologie constante sur la quasi-totalité du territoire. Il ne faut cependant pas oublier qu'il ne s'agit que de cartes potentielles qui sont basées sur la niche écologique actuelle de l'essence. Elles ne prennent en compte ni les adaptations possibles de la part de l'espèce ni les capacités effectives de migration qui seront fondamentales dans la répartition future des espèces dans le cadre des changements climatiques.

N.B. : les modèles climatiques futurs utilisés sont des modèles théoriques. Il est en effet impossible de connaître avec précision l'avenir et les comportements de la société sur lesquels les estimations futures sont basées. Aux vues des premières confrontations avec des observations climatiques réelles, la tendance actuelle est au-delà de celles prédites par le GIEC. En se basant sur ces observations, il est tentant de dire que les changements climatiques tendraient à s'accélérer davantage que ce qui a été envisagé jusqu'alors. Mais il est en fait impossible de tirer des conclusions sur l'avenir à partir des tendances actuelles. Il reste encore de nombreuses incertitudes sur l'évolution du climat. De plus, les modèles climatiques globaux utilisés ne permettent pas de tenir compte des effets régionaux.

IV. - MODELISATION DE LA MORTALITE DES HOUPPIERS ET DES ARBRES

1. - Variables constitutives des modèles de mortalité de branches

1.1. - Première approche : la régression logistique

A partir des indices de mortalité de branches créés, trois modèles sont réalisés (*Indices basés sur la mortalité des branches*). On va chercher à expliquer la présence de mortalités selon les trois seuils définis : 5 %, 25 % et 50 % de branches mortes dans la moitié supérieur du houppier. On souhaite tout d'abord vérifier si les mêmes variables explicatives ressortent pour les trois modèles. Pour cela, des régressions logistiques sont réalisées. Les données climatiques de la période 1961 – 1990 sont utilisées, elles permettent de caractériser les conditions stationnelles et de définir si certaines sont plus sensibles.

1.1.1. - Choix des variables pour la modélisation des mortalités de branches au seuil de 5 %

- A cette première étape, les variables qui apparaissent comme étant les plus explicatives de la répartition des mortalités de branches supérieures à 5 % sont toutes liées au rayonnement solaire, notamment hivernal et printanier. Cependant, il est difficile d'expliquer écologiquement le lien entre rayonnement et dégradation de l'état sanitaire des arbres. C'est pourquoi la première variable sélectionnée est l'évapotranspiration potentielle de juillet dont la performance est quasi-identique; ceci indique que le chêne pédonculé est fragilisé en période de stress hydrique. Le chêne peut mettre en place des mécanismes de défense (décurtation²), à l'origine de la réduction de son houppier actif pour faire face à un stress hydrique intense (Landmann *et al.*, 2003).

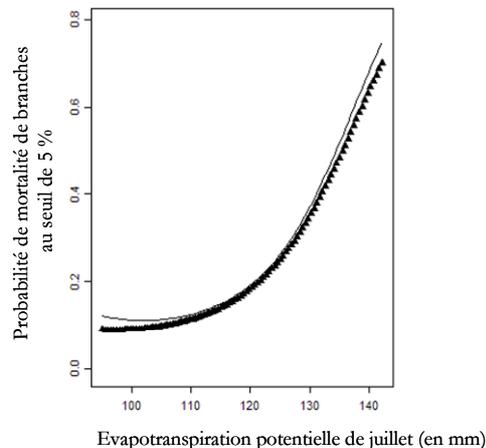
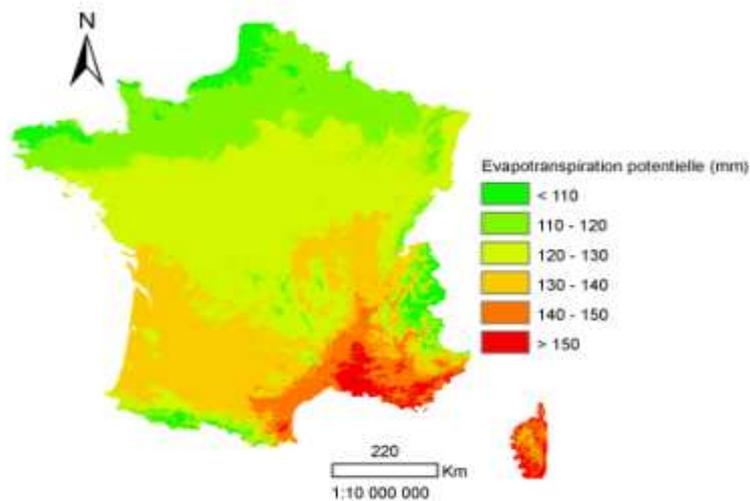


Fig. 13 : probabilités de mortalité de branches en fonction de l'ETP de juillet

NB : apparaissent sur le même graphique, les probabilités de mortalité supérieures à 5 % en fonction de la variable sélectionnée. La courbe plus épaisse représente la variable une fois toutes les interactions prises en compte, la plus fine à l'inverse, la variable isolée. Cela sera valable aussi pour les variables qui entreront aussi dans le modèle.

La courbe de réponse des probabilités de mortalité de branches en fonction de l'évapotranspiration potentielle de juillet (figure 13) confirme cette hypothèse : la probabilité de mortalité de branches est faible pour les faibles valeurs d'évapotranspiration potentielle et augmente progressivement jusqu'à atteindre un optimum pour les valeurs les plus élevées.

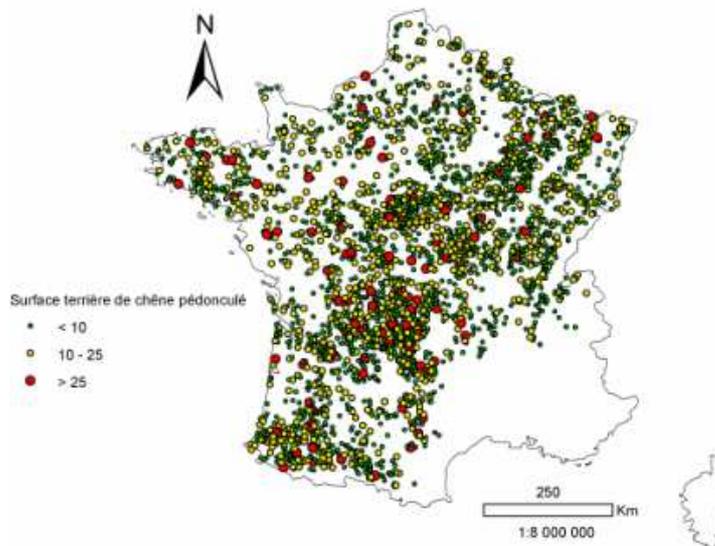
² Mécanisme d'autoprotection des arbres se traduisant par une abscission précoce des rameaux afin de lutter contre des dommages plus graves et pouvant être létaux.



Carte 14 : Représentation spatiale de l'ETP de juillet

En étudiant la carte 14, on s'aperçoit que les zones où l'évapotranspiration est la plus forte sont le pourtour méditerranéen avec la vallée du Rhône ainsi qu'un large quart Sud-ouest. Ce sont en effet les régions où les sécheresses sont les plus fréquentes et conséquentes et donc où le chêne pédonculé est susceptible de décliner. Au contraire, il y a peu de cas de mortalité dans le nord du pays (selon le jeu utilisé pour calibrer le modèle).

- La seconde variable entrant dans l'élaboration du modèle est la surface terrière en chêne pédonculé des peuplements.



Carte 15 : Localisation spatiale des valeurs de surface terrière des relevés du jeu de calibration du modèle

Cette variable *a priori* liée à la sylviculture peut avoir une double signification. Il peut s'agir d'un effet âge, comme d'un effet densité (la surface terrière augmente avec le nombre de tiges). Dans les deux cas, on s'attend à ce que la mortalité des branches (fragilité accrue des gros bois ou effet de concurrence trop élevé) soit plus importante pour les fortes valeurs de la variable.

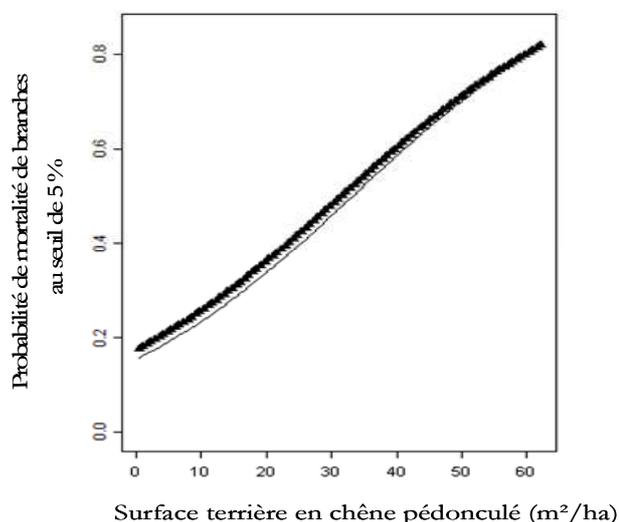


Fig 14: Courbes de réponses de la mortalité des branches au seuil de 5% pour la période de référence à la surface terrière en chêne pédonculé

NB : apparaissent sur le même graphique, les probabilités de mortalité supérieures à 5 % en fonction de la variable sélectionnée. La courbe plus épaisse représente la variable une fois toutes les interactions prises en compte, la plus fine à l'inverse, la variable isolée. Cela sera valable aussi pour les variables qui entreront aussi dans le modèle.

D'après les courbes de réponses de la figure 14, on remarque que plus la surface terrière du peuplement est élevée et plus la probabilité de mortalité est forte. Cela semble donc cohérent avec les connaissances actuelles sur l'écologie de l'essence. En effet, le chêne pédonculé est une essence héliophile sensible à une trop forte concurrence. On estime qu'au delà de 20 à 25 m²/ha, la densité des peuplements présentant du chêne pédonculé n'est pas optimale. Or de telles densités de tiges traduisent l'effet d'une gestion très prudente voire absente. C'est pourquoi, il est considéré que cette variable traduise un effet gestion, qui expliquerait en partie les mortalités observées.

En localisant les peuplements présentant une forte densité de chênes pédonculés, on remarque que ceux-ci sont globalement présents sur l'ensemble de son aire de distribution, avec néanmoins des zones où le nombre de peuplements denses est plus conséquent. Les fortes valeurs de surface terrière ne sont pas surreprésentées dans le Sud-ouest, dégageant la variable de toute possibilité de corrélation spatiale. Cependant, il se pourrait que la variable traduise un effet défoliateur. Le risque d'attaque de défoliateurs étant plus élevé en peuplement dense de chêne.

NB : Pour vérifier quel sens a la variable de surface terrière de chêne pédonculé, la corrélation entre surface terrière et âge des chênes est testée. Il en ressort qu'avec une valeur de 0,1, il n'y a pas de corrélation significative entre l'âge présumé des chênes et leur surface terrière. Par contre, la corrélation est de 0,5 avec le nombre de tiges de chêne ce qui nous laisse penser que la variable de surface terrière puisse traduire en partie un effet densité de peuplement.

- La troisième variable retenue pour l'explication de la répartition des mortalités de branches au seuil de 5 % est une variable d'ordre hydrique. Il s'agit de l'indice de fluctuation de la réserve en eau du sol multiplié à l'indice d'engorgement temporaire.

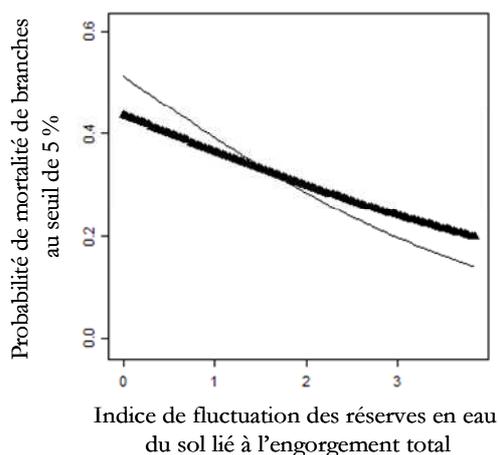
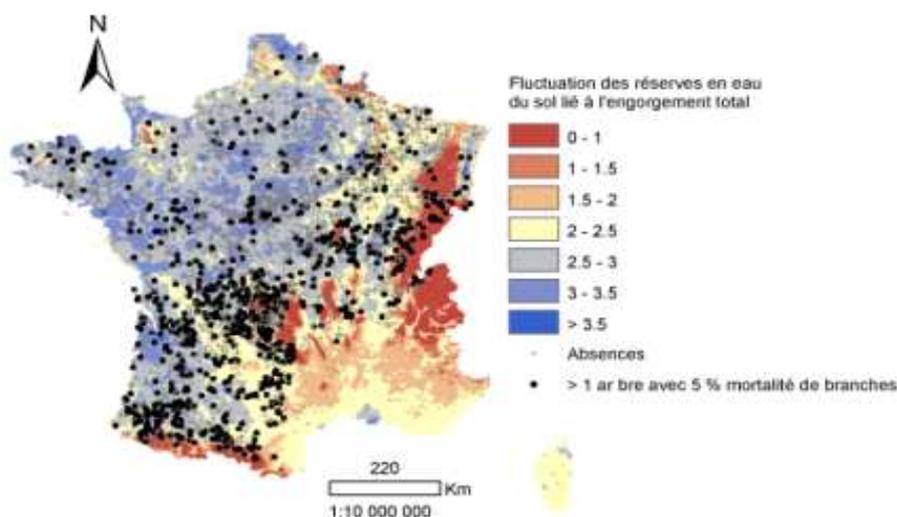


Fig15 : Probabilités de mortalité des branches (> à 5 %) en fonction de l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à l'engorgement total

La courbe de réponse de la figure 15 nous indique que les mortalités de branches se situent dans les régions pour lesquelles il n'y a pas d'engorgement et où les fluctuations des réserves en eau sont fortes.

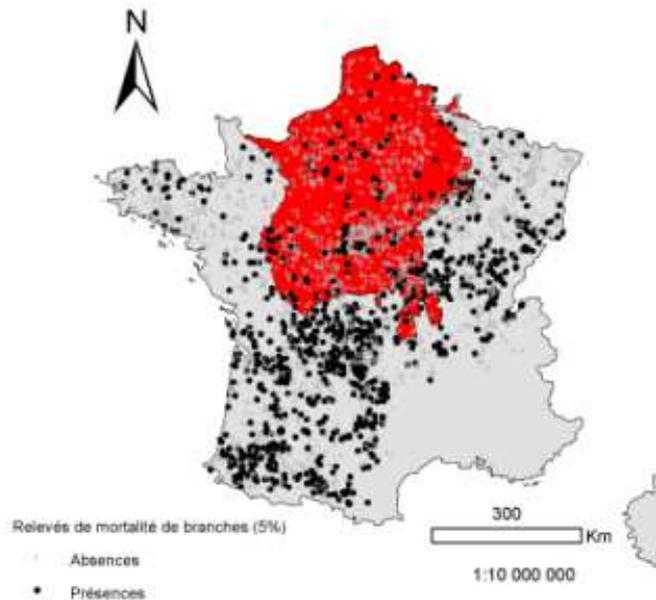
Le chêne pédonculé est une essence nécessitant une bonne alimentation en eau du sol, continue tout au long de l'année. Aussi, on s'attend à ce qu'il ait davantage de mortalité de branches dans les zones où les fluctuations des réserves sont fortes mais où il n'y a pas d'engorgement, c'est-à-dire en milieu sec. L'arbre se trouve en situation de stress hydrique, ce qui le fragilise.

Les régions concernées sont les régions est du territoire comprenant les massifs montagneux (Vosges, Jura et Alpes) ainsi que la vallée de la Saône et l'ouest du Massif central comme l'atteste la carte 16 ci-dessous.



Carte 16 : Représentation spatiale de l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à l'engorgement total

NB : Les variables qui à ce stade sont significatives pour entrer dans le modèle sont des variables régionales. En ajoutant, le Bassin parisien en 4^e variable, on améliore la qualité statistique du modèle. L'AUC passe de 0,722 à 0,731. Le sens de cette variable est négatif, c'est-à-dire que la probabilité de mortalité de branches est moins importante dans cette zone. Cela se vérifie lorsque l'on regarde la répartition des relevés servant à calibrer le modèle (carte 17).



Carte 17 : Découpage régional du bassin parisien défini dans cette étude

Le choix d'une telle variable, nous laisse penser qu'il puisse exister des effets régionaux qu'aucune des variables écologiques testées ne permet de prendre en compte.

1.1.2. - Apport des variables à l'explication des probabilités de mortalité de branches

Les probabilités de répartition des peuplements présentant au moins 5 % de mortalité de branches mortes dans la moitié supérieure de leur houppier s'expliquent à 48 % par l'évapotranspiration potentielle de juillet (aspect thermique), à 15 % par l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à l'engorgement total (aspect hydrique), soit une part de 63 % du climat.

	Modèle de mortalité de branches à 5 % (1961-1990)	Sens	Apport	AUC
Thermique	Evapotranspiration potentielle de juillet	+	48%	0,731
Gestion	Surface terrière de chêne pédonculé	+	37%	
Hydrique	Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à l'engorgement total	-	15%	

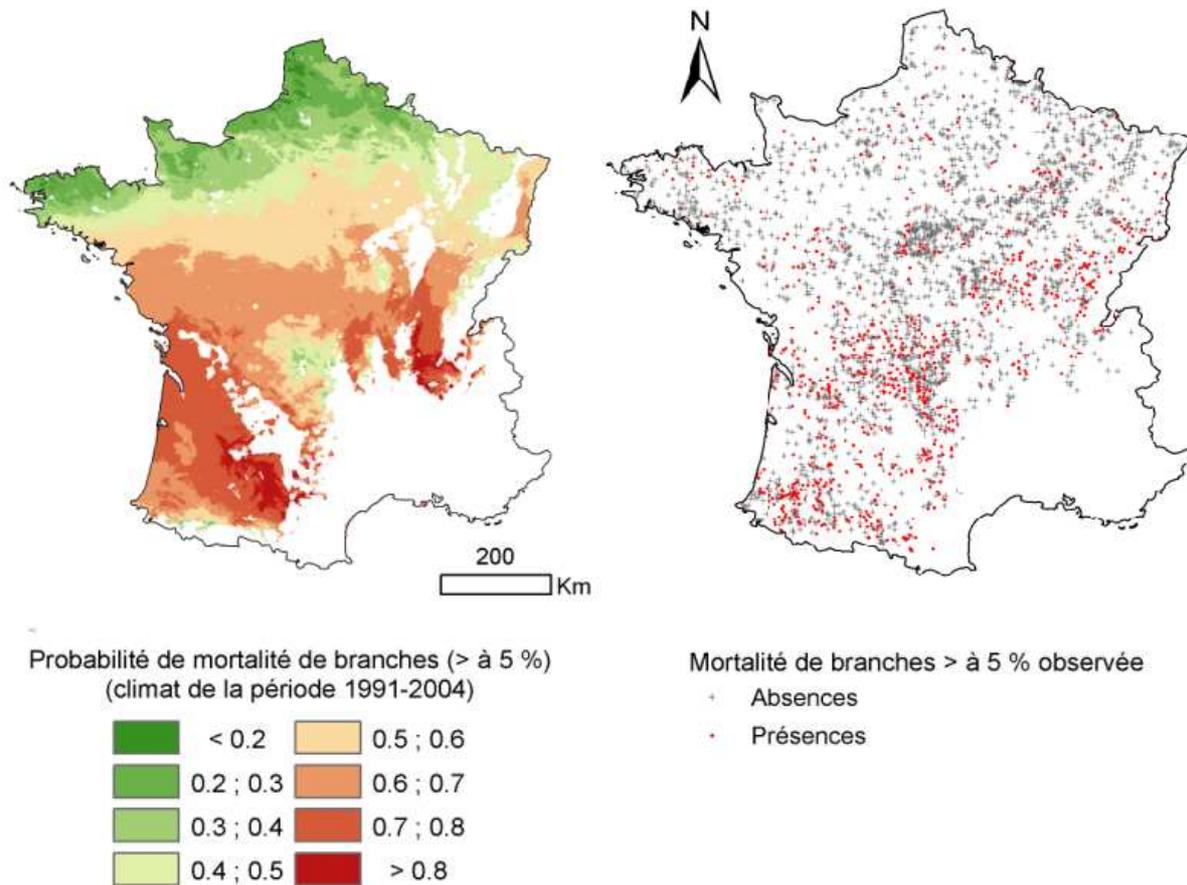
Tableau 13 : résumé de la modélisation de l'indice de mortalité de branches au seuil de 5% sur la période de référence

La prise en compte de la sylviculture au travers de la variable de surface terrière de chêne pédonculé permet d'améliorer le modèle (Cf. tableau 13). En effet, on explique ainsi 37 % des « mortalités » de houppiers observées.

Ce modèle permet de prédire correctement 70 % des présences et la valeur de son AUC (comprise entre 0.7 et 0.8) nous indique que le modèle est assez bon.

Le rapport d'analyse S+ est en annexe 8.

1.1.3. - Représentation spatiale des probabilités de mortalité de branches au seuil de 5 %



Carte 18 : Modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % établi pour la période de référence et présences réellement observées.

En comparant la carte du modèle de mortalité de branches supérieure à 5 % avec la carte de localisation des relevés de présences et absences observées du jeu de calibration, on constate que les zones présentant les plus fortes probabilités de mortalités sont bien celles où le taux de relevé est important. Il semblerait alors que le réchauffement climatique (au travers des variables d'ETP et de fluctuation des réserve en eau) est un impact sur l'état sanitaire des chênes pédonculés et particulièrement dans le Sud-ouest et au Sud du Jura. Cependant, à ce stade de l'étude le constat n'est que visuel.

1.1.4. - Elaboration des modèles de branches mortes au seuil de 25 et 50 %

Seul le modèle établi pour un seuil de mortalité de branches de 5 % est détaillé dans le rapport, les modèles élaborés aux seuils de 25 % et 50 % de mortalité étant assez proches.

Des tableaux résumant l'élaboration du modèle au seuil de 25 % se trouvent en annexe 9. Ils sont accompagnés du rapport d'analyse S+.

Des tableaux résumant l'élaboration du modèle au seuil de 50 %, agrémentés du rapport d'analyse S+, se trouvent en annexe 10.

En comparant les trois modèles établis à partir de seuils de mortalité différents, on retrouve quasiment les mêmes variables écologiques explicatives. Cela permet de confirmer une certaine robustesse du modèle qui reste identique avec des jeux de données en partie différents.

Le fait que ce soit des variables proches tendrait à démontrer que les trois seuils de mortalité traduisent le même phénomène.

Modèles	AUC	% de présences et absences bien prédites	% de présences bien prédites	% d'absences bien prédites
Mortalité de branches > à 5 %	0.731	66	70	65
Mortalité de branches > à 25 %	0.693	62	70	61
Mortalité de branches > à 50 %	0.718	68	67	68

Tableau 14 : Comparaison de la qualité statistique des modèles de mortalité de branches au seuil de 5, 25 et 50 %.

De plus, lorsque l'on compare la fiabilité de ces trois modèles (Cf. tableau 14), on constate que celui basé sur le seuil de mortalité de branches de 5 % présente une meilleure qualité statistique, avec une AUC de 0,731. Le modèle explique correctement 70 % des présences de branches mortes. J'ai donc pour la suite choisi de ne travailler qu'avec ce seuil de mortalité de branches.

Cependant, en réalisant des régressions logistiques, l'indice binaire de mortalité présente peut être des limites. En effet, il existe une corrélation entre le pourcentage de branches mortes et la quantité de chêne pédonculé. De plus, on ne tient pas compte de l'ampleur de la mortalité, c'est-à-dire que le poids est le même si un seul chêne pédonculé de la placette IFN présente une mortalité de la moitié supérieure de son houppier de 5 % que si tous les chênes du peuplement sont touchés.

1.2. - Deuxième approche : la régression linéaire

Aussi, pour tenter de palier à ces biais, on réalise des modélisations à partir de l'indice continu de mortalité des branches au seuil codé de 0 à 4 selon la gravité au seuil de 5 %. Pour cela, on utilise la régression linéaire.

	Modèle de mortalité de branches à 5 % (1961-1990)	Sens	Apport	R ²
Thermique	Evapotranspiration potentielle de juillet	- +	16%	0.0925
Eau du sol	Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à l'engorgement temporaire	- +	36%	
Sylviculture	Pourcentage de gros bois du peuplement	+	25%	
Effet régional	Bassin parisien	-	23%	

Tableau 15 : tableau récapitulatif de l'élaboration du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % réalisé par régression linéaire

En utilisant cette méthode statistique pour élaborer le modèle, les résultats ne sont pas performants (Cf. tableau 15). En effet, il est possible d'expliquer uniquement 10% de la variabilité de la répartition des chênes présentant au moins 5 % de branches mortes. Le modèle de mortalité des arbres donne des résultats semblables.

Il a été choisi de poursuivre le travail à partir de données binaires.

Le rapport d'analyse S+ se trouve en annexe 11.

En résumé : l'utilisation de la régression logistique pour établir les modèles de mortalités des branches et des arbres donne des résultats qui statistiquement sont de meilleure qualité que ceux obtenus par régression linéaire. Cependant, en travaillant de cette manière, on ne tient pas compte directement du nombre de chêne pédonculé ni de l'ampleur des dégradations de leur état de santé. Parmi les variables explicatives testées, nous disposons du nombre de chênes pédonculés ramené à l'hectare et du nombre d'arbres, toute essence confondue par hectare. Or, ces variables ne ressortent pas directement pour expliquer les risques de mortalité. Cela semble indiquer qu'il existe des stations favorables au dépérissement quel que soit le nombre et l'intensité du phénomène.

2. - Modélisation des mortalités des arbres sur la période de référence 1961-1990

2.1 - Résumé de l'élaboration du modèle de mortalité des arbres

Avant d'aborder les résultats de modélisation, il convient de préciser que les relevés de chênes pédonculés morts, à partir desquels l'indice de mortalité a été élaboré, sont à 92 % de diamètre inférieur à 25 cm. Aussi, dans ce modèle, on va chercher à comprendre les facteurs écologiques et sylvicoles qui semblent expliquer au mieux les mortalités parmi les jeunes peuplements.

	Modèle de mortalité des chênes p. (1961-1990)	Sens	Apport	AUC	% présences bien prédites
Gestion	Surface terrière de chêne pédonculé	+	70%	0.749	64%
Climat	Rayonnement moyen de juillet	+	23%		
Richesse du sol	Rapport carbone/ azote	+	7%		

Tableau 16 : tableau récapitulatif de la modélisation de l'indice de mortalité de chêne pédonculé sur la période de référence

Trois variables constituent le modèle et permettent d'expliquer 64 % des mortalités de chêne pédonculé observées. L'analyse des résultats du modèle (Cf. tableau 16) nous montre que les risques de mortalité sont plus importants dans les zones où la surface terrière des peuplements serait plus élevée, et donc où la concurrence dans les jeunes peuplements serait plus importante (Cf. figure 16). Par ailleurs, plus les valeurs de rayonnement solaire moyen de juillet sont importantes, donc plus l'exposition à un stress hydrique est importante, et plus il y aurait de risques de mortalité (Cf. figure 17). Enfin, le risque serait également plus important sur les stations où les sols sont assez pauvres, c'est-à-dire ayant des valeurs de rapport carbone sur azote entre 20 et 30 (Cf. figure 18).

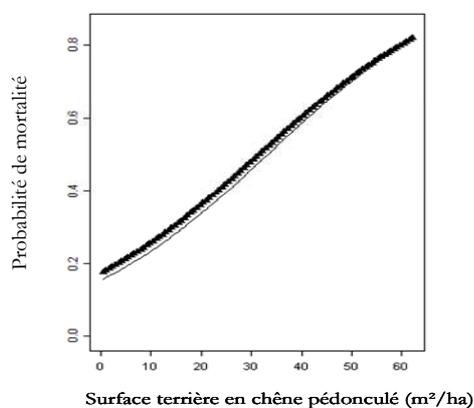


Fig. 16 : Probabilité de mortalité en fonction de la surface terrière

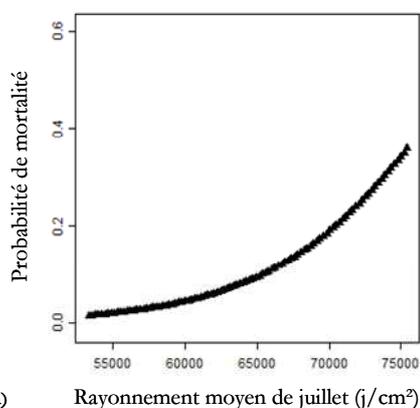


Fig. 17 : Probabilité de mortalité en fonction du rayonnement de juillet

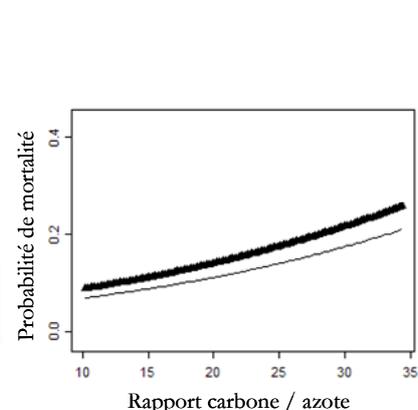


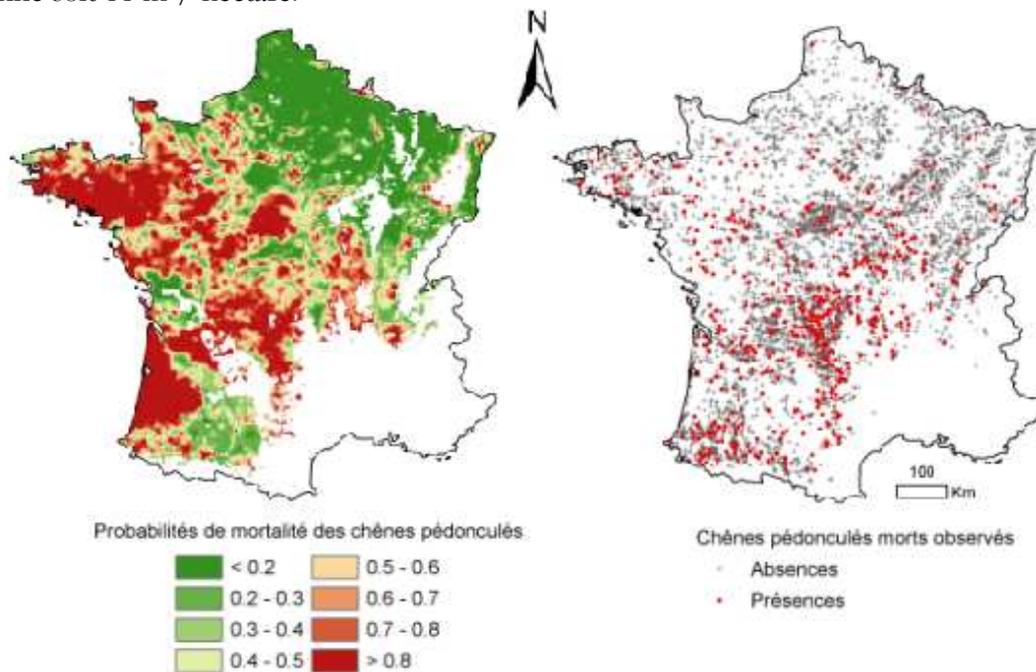
Fig. 18 : Probabilité de mortalité en fonction du C/N

L'AUC de ce modèle est de 0.75 avec une prédiction correcte des chênes pédonculés morts de 64 %.

Le rapport d'analyse S+ et les courbes de réponses figurent en annexe 12

2.2 - Représentation spatiale des prédictions de mortalité du chêne pédonculé

Pour spatialiser le modèle, la valeur retenue pour caractériser la variable de surface terrière est la moyenne soit 11 m²/ hectare.



Carte 19 : Modèle de mortalité de chênes pédonculés établi pour la période de référence et présences et absences réellement observées.

On constate que les probabilités de mortalités du chêne pédonculé sont plus importantes sur l'ouest du territoire, représentées en rouge sur la carte de gauche. Ce sont principalement les régions où les stations forestières sont les plus pauvres (Landes, Bretagne) qui sont les plus à risque. Le modèle est très pessimiste au niveau de la Bretagne mais les massifs forestiers dans cette région restent peu nombreux. Il convient de rapporter ces prévisions aux surfaces de peuplements concernés.

3. - Evolution des conditions écologiques depuis 1990

3.1. - Evolution des variables écologiques

Comme je l'ai décrit dans la partie méthodologie (3.1 – Une approche temporelle), en établissant les modèles à partir de données de la période 1961 – 1990, on utilise une approche de type « stationnelle » pour laquelle le climat est considéré par les variables 1961-1990. Cependant, les mortalités peuvent être le fruit de phénomènes plus récents.

L'annexe 13 présente une cartographie représentative de l'évolution récente de plusieurs variables écologiques.

Il est possible de visualiser l'évolution du climat en comparant les variables climatiques de la période de référence 1961-1990 avec celles de 1991-2004, de l'année 2003 et les prédictions du modèle climatique Hadcm3 (scénario A2) pour la période 2071-2100 (Cf. annexe 13). On constate alors une élévation globale des températures moyennes sur l'ensemble du territoire, qui pourrait être décrite comme une remontée progressive des températures chaudes vers le nord du pays (Cf. annexe 13). De la même manière, les gradients (nord ouest – sud est) de rayonnement solaire moyen et d'évapotranspiration potentielle se décalent vers le nord par rapport à leurs valeurs sur la période de référence (1961-1990).

En comparant les résultats obtenus pour l'évolution des valeurs de réserve utile de mars, on constate une légère baisse des valeurs pour le pourtour méditerranéen en 1991-2004 et pour les prédictions de fin de siècle par rapport à la période de référence 1961-1990, alors que pour le reste du territoire les valeurs sont constantes à légèrement plus fortes. Pour l'année 2003, des zones de sécheresse édaphique (valeur de réserve utile) apparaissent nettement, notamment sur une grande partie de la façade ouest du territoire, en zone méditerranéenne et dans les vallées du Rhône et de la Saône.

Les conditions climatiques évoluent de façon incontestable. En réalisant des modélisations des mortalités (branches et arbres) sur les périodes 1991-2004 et sur l'année 2003, il est possible d'étudier l'impact de ces changements climatiques récents sur la répartition des mortalités observées et par là-même, de tenter de comprendre leur déterminisme. Je n'ai eu que le temps de réaliser les modèles de mortalité de branches. Cependant, il conviendrait d'en faire autant avec l'indice de mortalité des arbres.

3.2. - Modélisations réalisées sur la période 1991 – 2004 et l'année 2003

Des régressions logistiques cherchant à expliciter l'indice de mortalité de branches (5 %) sont réalisées à partir de données écologiques moyennées sur la période 1991-2004 d'une part et sur l'année 2003 d'autre part.

La synthèse de la modélisation de l'indice de mortalité de branches au seuil de 5 % élaboré pour l'année 2003 est présentée en annexe 14. Celle élaborée sur la période 1991-2004 est en annexe 15.

Le résumé des variables explicatives résultant de ces modélisations est présenté dans les deux tableaux suivants.

Modèle de mortalité de branches à 5 % (1991-2004)		Sens	Apport	AUC
Thermique	Evapotranspiration potentielle de juillet	+	35%	0.746
Eau du sol	Indice d'épuisement des réserves de juin	- +	5%	
Sylviculture	Surface terrière de chêne pédonculé	+ -	49%	
Effet local	Bassin parisien	-	9%	

Tableau 17 : Résumé du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % établi sur la période 1991 - 2004

Modèle de mortalité de branches à 5 % (2003)		Sens	Apport	AUC
Thermique	Evapotranspiration potentielle de juillet	+	33%	0.738
Eau du sol	Déficit hydrique d'avril selon Turc	+ +	6%	
Sylviculture	Surface terrière de chêne pédonculé	+ -	54%	
Effet local	Bassin parisien	-	7%	

Tableau 18 : Résumé du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % établi sur l'année 2003

Quelle que soit la période, les mêmes variables sont retenues pour expliquer la répartition des mortalités de branches. L'aspect thermique est déterminant au travers de la variable d'évapotranspiration. Les mortalités sont d'autant plus nombreuses lorsque l'évapotranspiration est élevée. Le chêne pédonculé serait amené à réduire son houppier face à un stress hydrique, comme expliqué précédemment.

Comme il a été souligné à plusieurs reprises, l'alimentation en eau du sol est déterminante pour le maintien du chêne pédonculé. Il semble aussi que cet aspect soit déterminant dans l'explication de la dégradation de l'état sanitaire de l'essence. Dans les zones connaissant de forts déficits hydriques, le chêne pédonculé est touché par la mortalité de branches. En localisant ces zones sur la carte, on constate qu'il s'agit de montagnes, aux limites de l'aire de répartition de l'espèce.

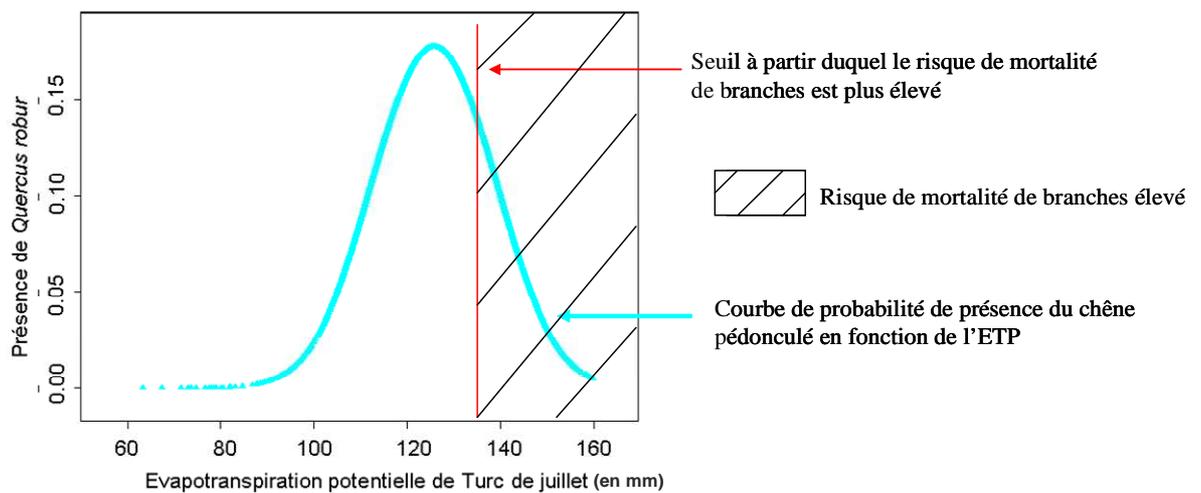
La gestion influence également l'état sanitaire des chênes. Plus précisément, la densité de tiges. Avec une mortalité élevée au-delà de 40 m²/ha, l'accès à la lumière devient un facteur limitant pour l'arbre, entraînant son déclin.

Enfin, comme pour la période 1961 – 1990, on constate que le découpage géographique de la région du Bassin parisien ressort dans le modèle. Il se peut donc qu'il y ait un aspect régional permettant d'améliorer le modèle de mortalité de branches mais que les variables testées ne permettent pas d'expliquer ou que la variable à expliquer et ce découpage soient autocorrélés spatialement. Le modèle établi pour la période 1991-2004 a une meilleure AUC que celui établi pour la période 1961-1990 tandis que celui établi pour 2003 est assez semblable. Il semblerait donc que les mortalités observées soient davantage corrélée au changement climatique récent. Et par conséquent, que les dépérissements soient le fruit d'une tendance de fond plutôt que d'un événement climatique extrême.

V. - CONFRONTATION DES RESULTATS ISSUS DES MODELES DE DISTRIBUTION POTENTIELLE ET DE MORTALITE DU CHENE PEDONCULE

L'objectif de l'approche en deux étapes de l'étude est de permettre de cibler à partir de méthodes indépendantes les zones qui seront à considérer comme potentiellement à risque en matière de dépérissement.

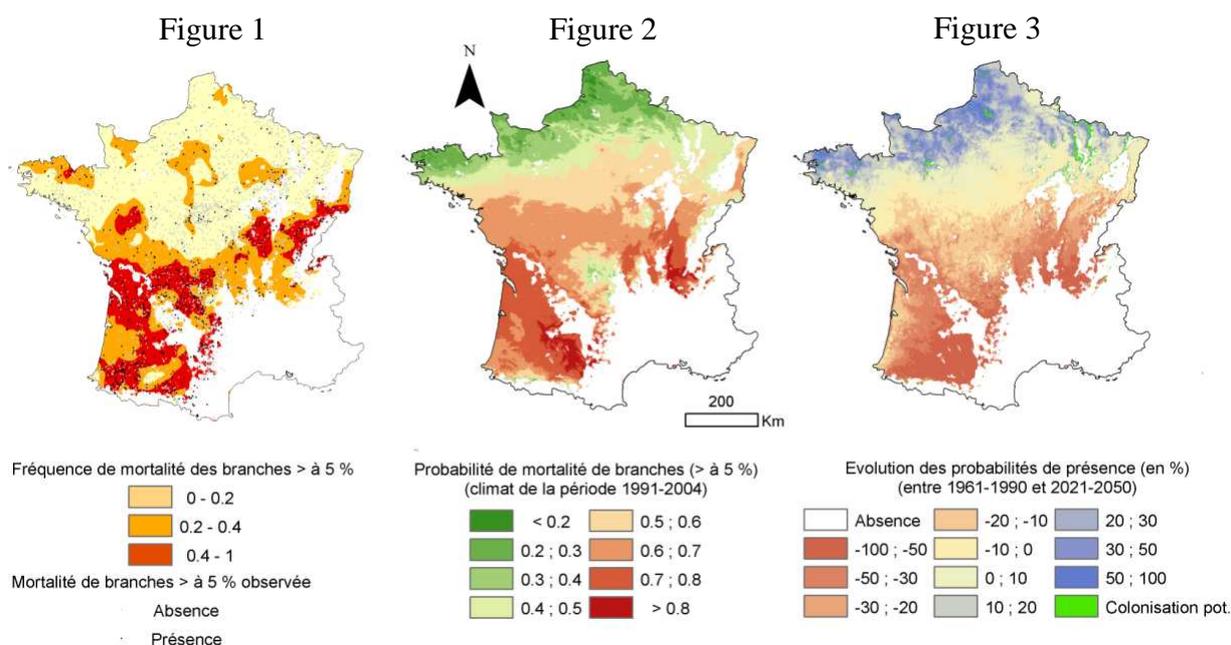
Tout d'abord, on s'intéresse aux variables constituant le modèle de distribution et les modèles de mortalité. L'ETP de juillet est une variable intervenant à la fois dans l'explication de la répartition géographique du chêne pédonculé et influençant les mortalités des branches. En comparant les courbes de réponses issues du modèle de niche à celles issues des modèles de mortalité, on constate qu'au-delà d'une ETP de 135 mm en juillet le risque de mortalité de branches (Cf. graphique 9) est élevé.



Graphique 9 : Lien entre les deux approches vis-à-vis de l'ETP de juillet

Pour se faire une idée du lien possible entre changements climatiques et dépérissements, on compare, les résultats obtenus avec les deux approches (Cf. carte 20). La figure 1 est une carte d'iso-fréquence établie par interpolation à partir des relevés de mortalité de branches supérieurs à 5 %, effectués par l'IFN de 2006 à 2007, et permettant de cerner les régions les plus touchées. La figure 2 correspond au résultat du modèle de mortalité de branches établi à partir des facteurs écologiques de la période 1991-2004 et la figure 3 représente l'évolution des probabilités de présences du chêne pédonculé entre 1961-1990 et 2021-2050.

En comparant ces trois cartes, on constate que les zones où les probabilités de dépérissement sont les plus importantes figurant en rouge (Cf. figure 2) correspondent assez bien aux régions où les risques de disparition du chêne pédonculé sont les plus fortes, en rouge également (Cf. figure 3). De même, cette comparaison s'étend à la figure 1 où les zones les plus sombres représentent les zones où les risques de mortalité sont les plus forts.



Carte 20 : Comparaison des résultats obtenus selon les deux approches

Pour tenter d'en savoir davantage sur l'existence possible d'un lien entre les dépérissements observés et les probabilités de présences du chêne pédonculé, prédites par le modèle de distribution potentielle, on réalise de nouveaux modèles. Cette fois, on cherche à savoir si les variables qualitatives de mortalité de branches (> à 5 %) et des arbres peuvent s'expliquer par l'évolution des probabilités de présence (calculées par rapport à la période de référence). Concrètement, on souhaite voir si les zones où les probabilités de présences du chêne diminuent peuvent expliquer (ne serait-ce que partiellement) les fortes probabilités de mortalité. Les résultats obtenus figurent dans le tableau 19.

Effets	Variables explicatives	Mortalité des branches		Mortalité des arbres	
		Sens	Apport	Sens	Apport
Changement climatique	Probabilité de regression du chêne p. entre 1961-1990 et 2021-2050	-	39%	-	19%
Sylviculture	Surface terrière de chêne pédonculé	+	45%	+	68%
	Pourcentage de gros bois			-	13%
Effet régional	Bassin parisien	-	16%		

Tableau 19 : Tableau récapitulatif des modèles liant changement climatique et dépérissements

L'analyse des résultats révèle que respectivement 39 % des mortalités de branches et 19 % des mortalités de chênes pédonculés s'expliquent par la régression des probabilités de présence du chêne pédonculé, cette variable se substituant à l'ensemble des variables écologiques. Il semblerait donc qu'il existe bien un lien entre changement climatique et dépérissements. D'autre part, il semblerait que la sylviculture puisse également expliquer une part des mortalités observées ce paraîtrait traduire les variables de surface terrière de chêne pédonculé et le pourcentage de gros bois.

Un tableau résumant l'élaboration du modèle de mortalité de branches (> à 5 %) se trouvent en annexe 16. Il est accompagné du rapport d'analyse S+.

Un tableau résumant l'élaboration du modèle de mortalité des chênes pédonculés se trouvent en annexe 17. Il est accompagné du rapport d'analyse S+.

N.B. : Dans cette analyse on cherche à savoir si les mortalités observées peuvent s'expliquer par l'évolution de probabilités de présences entre 1961-1990 et 2021-2050 ou entre 1961-1990 et 2071-2100. Il serait nécessaire pour la suite de l'étude de tenir compte de l'évolution de ces probabilités entre la période de référence par rapport à l'année 2003 puis par rapport à la période 1991-2004, intervalles de temps pour lesquelles nous disposons de mesures réelles.

Discussion

La réalisation de cette étude a nécessité de travailler avec plusieurs bases de données conséquentes. La qualité des modèles élaborés dépend en grande partie de la qualité de celles-ci. Les 6920 relevés de présences et absences du chêne pédonculé que l'on cherche à modéliser ne sont pas répartis uniformément sur l'ensemble du territoire français (Cf. Carte 2 – Fig.a, p. 10). Même si le risque de ne pas couvrir l'ensemble du gradient écologique semble limité, une collaboration avec l'IFN, disposant de données selon un maillage kilométriques, pourrait être envisagée afin d'y palier.

Une autre voie d'amélioration des prédictions consisterait à utiliser des variables décrivant plus finement les facteurs écologiques afin rendre compte d'effets locaux. Par exemple, l'indice d'engorgement total qui entre dans la composition du modèle de distribution potentielle du chêne pédonculé est actuellement au pas kilométrique.

Concernant les indices de mortalité, les relevés de mortalité de branches dans la moitié supérieure du houppier ne se font que depuis 2006. Le dépérissement étant souvent décrit comme un phénomène très local, il y a davantage de risque de ne pas couvrir l'ensemble des situations pour lesquels l'état sanitaire des chênes se dégrade. Toujours concernant cet indicateur de vitalité, les estimations des pourcentages de branches mortes restent des notations qui peuvent être subjectives. Il se peut donc qu'il y ait un effet notateur difficile à estimer.

Par ailleurs, les arbres morts sont également relevés par l'IFN comme indicateur permettant de caractériser l'état sanitaire des essences forestières. Mais le risque d'erreurs de reconnaissance des arbres morts est accru, puisqu'il ne reste souvent plus que l'écorce pour déterminer l'essence.

Globalement, l'utilisation des relevés IFN présente des limites, puisqu'ils sont effectués toute l'année, avec un plus fort risque d'erreurs de reconnaissance en hiver ou lorsque l'on se situe dans des régions où sont présents dans les mêmes peuplements les chênes pédonculés, sessiles et pubescents. Les possibilités d'erreurs sont également plus fortes lorsque l'une de ces essences est largement dominante dans un peuplement. Mais ces relevés sont effectués de façon systématique et objective et constituent la plus grande base de données spatialisées disponible à l'heure actuelle.

Ainsi, une grande partie du travail relatif à l'élaboration des modèles de dépérissements potentiels reposent sur ces deux indices de mortalités relevés par l'IFN. Cependant, les relevés ne tiennent pas compte de la gestion et il se peut que les notations sous-estiment l'ampleur des dépérissements. Il est en effet impossible d'après les relevés effectués de savoir si les peuplements ont ou non fait l'objet de coupes sanitaires.

Il serait néanmoins envisageable de recouper ces relevés avec ceux effectués par le DSF. En effet, le DSF réalise des relevés dès que du dépérissement est signalé donc avant toute intervention sylvicole. Bien sûr, il ne s'agit pas d'un inventaire exhaustif, et la représentativité des données dépend de l'implication des gestionnaires et propriétaires qui signalent les dépérissements aux correspondants observateurs, mais elles permettraient certainement de mieux cerner le phénomène de dépérissement et d'améliorer la compréhension des modèles actuels (Cf. annexe 18)

Aussi, pour modéliser les dépérissements, il serait intéressant de disposer d'un recueil systématique du volume de bois martelé pour cause de dépérissement, par essence et par parcelle. Et que ces relevés soient étendus à la forêt privée et homogénéisé sur l'ensemble du territoire. Sans en arriver jusque là, un réseau de placettes permanentes se développent à l'ONF, ce serait alors l'occasion de standardiser des relevés de l'état sanitaire des arbres. En travaillant avec des sources de données différentes, on pourrait alors cerner davantage la dynamique des dépérissements.

Dans cette étude, l'approche utilisée pour réaliser les modélisations des dépérissements est à la fois une approche spatiale et temporelle. Du point de vue temporel, il serait intéressant de travailler avec les données du DSF issues du réseau européen 16 * 16 km. Il s'agit de relevés annuels effectués sur des placettes permanentes selon un maillage de 16 km. Cependant, le nombre de placette est réduit d'autant plus que le dépérissement est un phénomène local (Cf. annexe 18).

Il existe aussi certaines limites liées au choix des variables écologiques explicatives. Tout d'abord, on cherche à expliquer la répartition d'une essence à partir de données écologiques moyennes sur une période de référence (1961-1990) en considérant que cette période est représentative des conditions ayant conduit à la distribution de l'essence observée aujourd'hui. Or, la distribution des essences forestières est le fruit de processus écologiques dynamiques beaucoup plus anciens. Cependant, à défaut de disposer de relevés climatiques sur de plus longues périodes, on utilise la période 1961-1990.

De plus, la résolution de certaines variables existant au pas kilométriques comme celles issues du modèle Aurelhy, ne permet pas de rendre compte avec suffisamment de finesse d'effets très locaux.

On cherche dans cette étude à expliquer comment les conditions écologiques influent sur le dépérissement. Cependant, on ne tient pas compte de la dynamique naturelle de colonisation du chêne pédonculé, ni de l'impact anthropique et encore moins de l'effet de facteurs biotiques. Cependant, il a été démontré que des champignons (entre autres pathogènes) jouent un rôle sur l'état de santé des essences forestières. C'est le cas par exemple pour l'oïdium ou encore de la collybie à pied en fuseau. Avec le concours de Benoit Marçais, il est possible de créer deux variables explicatives complémentaires traduisant l'effet de ces deux champignons et ainsi de tester en partie l'aspect biotique dans les modèles de mortalité. Les cartes figurant en annexe 19 représentent les prédictions d'impact de l'oïdium et de la collybie (Marçais *et al.*, soumis). Alors que pour la collybie, les zones d'impacts sont très différentes de celles où les probabilités de dépérissements sont les plus importantes, on constate au contraire que les probabilités élevées de mortalité et d'impact de l'oïdium sont localisées principalement dans le Sud Ouest de la France. Aussi, il se pourrait qu'il y ait un lien entre les deux phénomènes. Cependant, cela pourrait également vouloir dire que le déterminisme des deux est similaire.

Il nous est également impossible de prédire les possibilités d'adaptation des essences face aux changements climatiques. Les probabilités de présence fournies par les périodes futures et calculées à l'aide de modèles climatiques ne permettent donc que d'isoler les zones où, à écologie constante, les conditions de milieu deviendront peu favorables à cette espèce. L'assemblage de ces modèles avec les modèles de dépérissements permettrait de mieux comprendre ce qui pourrait se passer dans ces zones.

Hormis ces travaux concernant l'élaboration des modèles, il faudrait également pouvoir améliorer l'aspect de leur validation. Pour pouvoir confirmer les prédictions issues des modèles, les résultats obtenus devraient être recoupés avec des mesures effectuées sur le terrain. Il serait question de vérifier à la fois si les présences et absences de l'essence et si les zones de dépérissement modélisées traduisent convenablement ce qui est observable sur de terrain. Pour cela, des séries de transects seraient à réaliser dans les zones où les modèles prédisent de grandes variabilités.

Il serait également enrichissant de pouvoir s'entretenir avec des agents de terrains en poste depuis longtemps, pour connaître leur ressenti par rapport aux résultats des modélisations. Au vu de leur connaissance des massifs forestiers, on pourrait vérifier si la mise en cause de certains facteurs climatiques pour expliquer les dépérissements est cohérente. Il s'agirait alors de rechercher plus finement des liens entre stations forestières et dépérissements et à l'échelle d'une région de mieux comprendre les facteurs influençant l'état sanitaire des arbres.

Enfin, le but ultime d'une telle étude serait de proposer des solutions en matière de sylviculture aux gestionnaires forestiers. Cependant, à ce stade il est impossible de répondre d'autant plus que cela nécessiterait d'étudier les perspectives d'autres essences forestières. En ce sens, et de la même manière que pour le chêne pédonculé, un modèle de distribution potentielle du chêne sessile a été réalisé. Les résultats de ce modèle sont détaillés en annexe 20. Ce modèle est moins abouti que le modèle du chêne pédonculé qui a plus longuement été étudié. Mais si les prédictions d'évolution de l'aire de distribution se confirment, les théories de substitution progressives du chêne pédonculé par le sessile devront être remises en causes. A ce stade, néanmoins, ce ne reste que des spéculations. D'autant plus qu'il n'est pas possible de savoir comment les facteurs biotiques risquent d'intervenir et d'impacter les différentes essences forestières.

Conclusion

Les études visant à comprendre l'impact des changements climatiques sur le devenir des essences forestières sont assez récentes, et les résultats des modélisations actuelles présentent encore des incertitudes. Au travers de cette étude, nous avons cherché à identifier les zones à risque de dépérissement pour le chêne pédonculé par deux approches distinctes.

La première partie du travail a consisté à réaliser un modèle de distribution potentielle du chêne pédonculé à partir de variables écologiques pour une période de référence 1961-1990. Ce travail se distingue des travaux antérieurs menés sur ce thème par l'utilisation de variables édaphiques jusqu'ici jamais testés. L'enjeu de cette démarche est primordial, puisque les connaissances actuelles sur le chêne pédonculé nous indiquent que l'alimentation en eau du sol est un facteur essentiel pour l'essence. A l'issue de l'élaboration du modèle, cela se vérifie puisque des deux tiers du pouvoir explicatif du modèle sont apportés par des variables liées au contenu en eau du sol. Les prédictions faites par le modèle sont très largement cohérentes avec les observations de l'essence à l'échelle de la France. Cependant, il apparaît de légères erreurs de prédictions lorsque l'on se place à l'échelle régionale. La projection du modèle de distribution dans le futur a été réalisée selon quatre modèles climatiques et deux scénarios. Cela a permis à la fois de tester différentes des hypothèses d'évolution du climat, ce qui est rarement réalisé par ailleurs. L'ensemble des modèles amène vers une même tendance, à savoir une réduction plus ou moins rapide de l'aire de distribution potentielle du chêne pédonculé même avec les scénarios les plus optimistes.

La deuxième phase de l'étude s'articulait sur la réalisation de modèles de dépérissement (en se basant sur les relevés des campagnes d'inventaire de l'IFN de 2005 à 2007). Cette partie du travail est assez innovante puisqu'il n'existe pas *a priori* de travaux similaires à ma connaissance ayant porté sur le traitement de ces données. Quel que soit l'indice de mortalité utilisé (branches ou arbres morts), quel que soit la manière de modéliser le phénomène (présences/absences, utilisation de seuils à 5, 25 et 50 %), les variables explicatives ressortent proches ou ayant une signification proche.

Les résultats obtenus avec les deux approches ont été comparés. Là encore, les facteurs écologiques expliquant la distribution de l'espèce et ceux conditionnant sa mortalité sont relativement similaires, confortant ainsi la double approche utilisée. C'est le cas par exemple pour l'évapotranspiration potentielle de juillet. Des modèles visant à expliquer les indices de mortalité à partir des prédictions d'évolution de l'aire de distribution ont été réalisés. Il semblerait qu'il soit possible de faire un lien entre l'évolution des aires de distributions potentielles et les probabilités de mortalités des houppiers et des arbres. Les analyses n'ont pu être achevées pour la période 1990-2004 et l'année 2003. Il semble cependant que la première variable expliquant le dépérissement soit la projection dans le futur (période 2021-2050) du modèle de distribution et donc qu'il y ait un lien entre changements climatiques et dépérissements. Ceci est renforcé par le fait que ce soit les mêmes variables.

Aux vues des enjeux liés aux changements climatiques, il serait impératif de poursuivre cette étude, notamment en l'élargissant à d'autres essences, pour à terme pouvoir fournir des réponses en matière de gestion.

Bibliographie

- AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) et IFN. 2008 - Guide d'utilisation de la carte des pH de surface des sols forestiers français, *accord AgroParisTech (UMR LERFoB) et IFN n° 2007-CPA-2-072* - version 1, 28 p.
- Aussenac (G.) et Guehl (J.-M). 2005 - Variations climatiques et physiologie des arbres - *Forêt-entreprise*, n° 162, p. 20-24.
- Aussenac (G.) et Guehl (J.-M.). 2000 - Impacts sur la forêt et la sylviculture. Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle - *Paris : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'environnement*, p.81-87.
- Aussenac (G.) et Guehl (J.M.). 1994 - Dépérissement et accidents climatiques- *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 5, p. 458-470.
- Badeau (V), Dupouey (J.-L.), Cluzeau (C.), Drapier (J.). 2005 - Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. - *Forêt-Entreprise*, n° 162, p. 25-29.
- Becker (M.) et Lévy (G.). 1983 - Le dépérissement du chêne. Les causes écologiques. Exemple de la forêt de Tronçais et premières conclusions - *Revue forestière française*, vol. 35, n° 5, p. 341-356.
- Benichou (P.) et Le Breton (O.). 1987 - Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques : la méthode AURELHY - *La météorologie*, 7^{ème} série, n°19, p 23-34.
- Bonneau (M.). 1994 - Les dépérissements à causes multiples : caractéristiques générales - *Revue Forestière Française* - vol.46 - p.472-473.
- Bréda (N.) et al. 2003 - Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? - *Revue forestière française*, n°4, p. 299-308.
- Bréda (N.), Granier (A.), Aussenac (G.). 2004 - La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers - *Revue Forestière Française* – vol. LVI - n°2 - p109-131
- Breda (N.), Huc (R.), Granier (A.) and Dreyer (E.). 2006 - Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term conséquences - *Annals of Forest Sciences* - vol 63 - no. 6. - p.625-644
- Delatour (C.). 1983 - Les dépérissements des Chênes en Europe - *Revue Forestière Française* - vol 35 - n°4 - p265-282.
- Delatour (C.). 1990 - Dépérissement des chênes et pathogènes – *Revue Forestière Française* – vol 42 – n°2, p. 182-185.
- Ducouso (A.) et Déqué (M.). 2005 - Augmentation de l'effet de serre: constatations et prévisions - *Forêt-entreprise* -n°162 - p15-19.

- Gégout (J.C.), Coudun (C.), Bailly (G.), Jabiol (B.), 2005 - EcoPlant : a forest site database linking floristic data with soil and climate variables - *Journal of Vegetation Science* – vol 16 - n°2 - p257-260.
- GIEC. 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 – *GIEC*, 103 p.
- Hargreaves (G.H.). 1994 - Defining and using reference evapotranspiration - *Journal of irrigation and drainage engineering* - vol. 120, n° 6, p. 1132-1139.
- Cavalheri (E.). 2009 - Modélisation à haute résolution spatiale des températures moyennes annuelles en France métropolitaine - *Mémoire de fin d'études - ENGREF*. 40p.
- Landmann (G.). 1994 - Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers - *Revue forestière française*, vol.46, n° 5, p. 405-415.
- Lebourgeois (F.) et Piedallu (C). 2005 - Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques - *Revue Forestière Française*, vol. LVII, p. 331-355.
- Lebourgeois (F.). 2000 - Autoécologie de quelques essences feuillues - Cours d'écosystèmes forestiers et dynamique du paysage - FIF 1.
- Lefèvre (Y.) et al. 2006 - Comportement des essences forestières sur sol à nappe temporaire - *Revue forestière française*, vol. LVIII, n° 4, p. 295-304.
- Legay (M.) et Mortier (F.). 2006 - La forêt face au changement climatique, adapter la gestion forestière - *ONF - Les dossiers forestiers* - n°16 - 39 p.
- Legay (M.), Cordonnier (T.), et Dhôte (J.-F.). Séminaire- Mélanges d'espèces et changement climatique – Champenoux.
- Manel (S.), Williams (H.C.) et Ormerod (S.J.). 2001 - Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence - *Journal of Applied Ecology*, vol. 38, n° 5, p.921-931.
- Manion (P. D.). 1981 - Tree disease concepts - *Edition Prentice-Hall*, 324 p.
- Marçais (B.) et al. (soumis) - Testing the potential and limits of the Level I Network to account for regional and inter-annual variability in damage by pathogens, 18p.
- Moisselin *et al.*. 2002 - Les changements climatiques en France au 20e siècle. Etudes de longues séries homogénéisées de données de températures et de précipitations - *La Météorologie*, n° 38
- Morin (X.) et Chuine (I.). 2007 - Réponse des essences ligneuses au changement climatique. Modification de la phénologie, des risques de gel et de la répartition des essences ligneuses nord américaines - *Rendez-vous techniques - ONF*, hors série n°3, p. 15-20.
- Nageleisen (L.-M.). 1994 - Dépérissement actuel des chênes – *numéro spécial Revue Forestière Française*, vol 46, n°5, p. 504-511.
- Peyron (J.-L.). 2005 - Changements de nature, changement de culture. - *Forêt-entreprise*, n°162, p. 13.
- Piedallu (C.), Gégout (J.-C). 2007 - Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling - *Annals of Forest Science*, vol. 64, p. 899-909

- Piedallu (C.), Lebourgeois (F.), Gégout (J.-C.), Seynave (I.), Vepierre (R.). 2007 - Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques - *Convention de recherche ENGREF-IFN-INRA*, 85 p.
- Piedallu, (C.), Gégout (J.-C.). 2008. Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models - *Agricultural and forest meteorology*, p. 1696-1706.
- Piedallu *et al.*, 2007. Conventions 2005-18 et 2005.19 Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques - *ENGREF-IFN-INRA*, p.85
- Planton (S.). 2004 - Changements climatiques futurs en France - Changements climatiques, quel impact en France? - *Paris : Greenpeace*, 139 p.
- Rameau (J.C.), Mansion (D.), et Dumé (G.). 1989 - Flore forestière française. Guide écologique illustré. Plaines et collines - *Paris : Editions IDF*, 1785 p.
- Reboul (J.-B.). 2008 - Le bilan hydrique permet-il d'évaluer la sensibilité au changement climatique des stations forestières du massif vosgien? - *Rapport ASTEC - Domaine d'approfondissement : Gestion des milieux naturel - ENGREF*, 43p.
- Riofrio (G.). 2009 – Cartographie prédictive à fine résolution des pH de Lorraine. *Mémoire de fin d'études – Université catholique du Chili- Santiago*, 50p.
- Riou- Nivert (P.). 2005 - Les temps changent, la forêt doit s'adapter. - *Forêt-entreprise*, n°162, p. 12.
- Riou- Nivert (P.). 2008 - Changements climatiques : les interrogations des sylviculteurs – *Forêt-entreprise*, n° 180, p. 14-15.
- Seguin (B.). 2007 - Les changements climatiques et les impacts observés sur les écosystèmes terrestres. *Rendez-vous techniques - ONF*, hors série n°3, p.3-8.
- Sinclair (W.A.). 1967 - Decline of hardwoods : possible causes - *International Shade Tree Conference Proceedings*, vol. 42, p.17-32.
- Sinclair (W.A.). 1964 - Comparison of recent declines of white ash, oak, and sugar maple in northeastern woodlands - *Cornell Plant.*, vol. 20, p.62-67.
- Sardin (T.). 2008 - Guide des sylvicultures : Chênaies continentales. - *Office National des Forêts*, 455 p.
- Thornthwaite (C.W.) et Mather (J.R.). 1957 - Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance - *Publications in climatolog*, n° 10, p. 183-311.
- Turc (L.). 1955 - Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement - *Annales Agronomiques* - vol. 6, n° 1, p. 1-131.

Liste des contacts

Office National des Forêts

- Olivier Lanter

Responsable du pôle sylviculture-Développement territorial
Direction territoriale Lorraine - Direction Forêt
Bât. 802 - Les Merises - Parc de Haye
54 840 Velaine-en-Haye
Tel. : 03.83.23.45.04
Olivier.lanter@onf.fr

- Dominique Messant

Responsable du service patrimonial
Direction territoriale Lorraine
5 rue Girardet - CS 65219
54 052 Nancy CEDEX
Tel. : 03.83.17.81.43
Dominique.messant@onf.fr

- Myriam Legay

Interface Inra/ONF « changement climatique »
Unité Ecologie, écophysiologie forestière
Equipe Phytoécologie
Centre Inra de Nancy
54280 Champenoux
Tel : 03.83.39.40.51
legay@nancy.inra.fr

- Jean-François Dhôte

Chef du Département Recherche
Office National des Forêts - Direction Technique et Commerciale Bois
Boulevard de Constance - 77300 Fontainebleau
Tél : 01.60.74.92.26 - Fax : 01.64.22.49.73
jean-francois.dhote@onf.fr

- Pierre Vionnet Fuasset

Agence ONF de Sarrebourg
24 route de Phalsbourg - BP 30155
57403 Sarrebourg Cedex
Tél. : 03.87.25.72.20 - Fax : 03.87.25.72.39
pierre.vionnet-fuasset@onf.fr

- Joël Guillaud

Direction territoriale Lorraine
5 rue Girardet - CS 65219
54 052 Nancy CEDEX
Tel : 03.83.17.74.54
joel.guillaud@onf.fr

Agroparistech-ENGREF

- Christian Piedallu

Ingénieur en écologie forestière spécialiste en géomatique

AgroParisTech - ENGREF

14, rue Girardet - CS 4216

54042 Nancy Cedex - France

Tel. : 03.83.39.68.77 - Fax : 03.83.32.73.81

christian.piedallu@engref.agroparistech.fr

- Eric Lacombe

Enseignant en sylviculture

Agroparistech-ENGREF

4, rue Girardet - CS 4216

54042 Nancy Cedex

Tel. : 03.83.39.68.70

eric.lacombe@engref.agroparistech.fr

- François Lebourgeois

Maitre de conférence

Bioclimatologie et comportement des essences

AgroParisTech - ENGREF

14, rue Girardet - CS 4216

54042 Nancy Cedex - France

Tel. : 03.83.39.68.74 - Fax. : 03.83.32.73.81

francois.lebourgeois@engref.agroparistech.fr

- Ingrid Seynaves

Lerfob – Equipe d'Ecologie forestière

AgroParisTech - ENGREF

14, rue Girardet - CS 4216

54042 Nancy Cedex – France

ingrid.seynaves@engref.agroparistech.fr

- Jean-Claude Gégout

Professeur en écologie forestière, HDR.

AgroParisTech ENGREF

14, rue Girardet – CS 14216

54042 Nancy Cedex

Tel : 03.83.39.68.84

Fax : 03.83.30.22.54

jean-claude.gegout@agroparistech.fr

- Jean-Daniel Bontemps

UMR 1092 INRA-ENGREF "LERFoB"

AgroParisTech-ENGREF, Nancy

Equipe Ecologie forestière

14 rue Girardet CS 4216

54042 Nancy Cedex

Tel. : 03.83.39.68.75
jdbontemps.engref@gmail.com

- Jean-Claude Pierrat
Ingénieur de recherche
Lerfob – Equipe d'Ecologie forestière
AgroParisTech - ENGREF
14, rue Girardet - CS 4216
54042 Nancy Cedex – France

Institut Forestier National

- François Morneau
Château des Barres
45290 Nogent-sur-Vernisson
Tél. : 02.38.28.38.34
Fax : 02.38.28.02.95
francois.morneau@ifn.fr

- Jean-Luc Flot
Chef du département de la santé des forêts
Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche
Direction générale de l'alimentation
Sous-Direction de la qualité et de la protection des végétaux
251 rue de Vaugirard
75732 Paris cedex 15
Tel : 01.49.55.51.95
Fax : 01.49.55.59.49
jean-luc.flot@agriculture.gouv.fr

Département de Santé des Forêts

- Louis-Michel Nageleisen
Ingénieur (Divisionnaire des travaux des Eaux et Forêts)
Responsable de l'antenne spécialisée du DSF
INRA Centre de Nancy
54280 CHAMPENOUX
Tel : 03.83.39.40.72
Fax : 03.83.31.71.60
nageleisen.dsf@wanadoo.fr

Centre Régional de la Propriété Forestière

- Anne Madesclaire
Ingénieur au CRPF
41 avenue du Général de Gaulle
57050 Le Ban Saint Martin
Tel : 03.87.31.18.42
Fax : 03.87.30.66.36
anne.madesclaire@crpf.fr

Institut National de Recherche Agronomique

- Benoît Marçais
Chargé de recherche
Unité de Pathologie Forestière
INRA Centre de Nancy
54280 CHAMPENOUX
Tel. : 03.83.39.41.49
marcais@nancy.inra.fr

Annexes

- Annexe 1** : Illustrations de différents symptômes de dépérissement du chêne pédonculé
- Annexe 2** : Graphiques de comparaison des données de nébulosité provenant des postes Météo France et du modèle Tyndall - Cartes de localisation des postes sélectionnés
- Annexe 3** : Représentation spatiale des principales variables écologiques
- Annexe 4** : Rapport d'analyse S⁺ du modèle de distribution potentiel du chêne pédonculé
- Annexe 5** : Matrice des corrélations entre variables constitutives du modèle de distribution du chêne pédonculé
- Annexe 6** : Cartes de localisation des incohérences de prédiction du chêne pédonculé
- Annexe 7** : Distributions potentielles du chêne pédonculé passée et futures à refaire
- Annexe 8** : Rapport d'analyse S⁺ et tableau récapitulatif du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % élaboré par régression logistique sur la période 1961-1990
- Annexe 9** : Rapport d'analyse S⁺ et tableaux récapitulatifs du modèle de mortalité de branches au seuil de 25 % élaboré par régression logistique sur la période 1961 – 1990
- Annexe 10** : Rapport d'analyse S⁺ et tableaux récapitulatifs du modèle de mortalité de branches au seuil de 50 % élaboré par régression logistique sur la période 1961 – 1990
- Annexe 11** : Rapport d'analyse S⁺ et tableau récapitulatif du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % élaboré par régression linéaire sur la période 1961 - 1990
- Annexe 12** : Rapport d'analyse S⁺ du modèle de mortalité du chêne pédonculé élaboré par régression logistique sur la période 1961-1990
- Annexe 13** : Cartographie de l'évolution récente de plusieurs variables écologiques
- Annexe 14** : Rapport d'analyse S⁺ et tableau récapitulatif du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % élaboré par régression logistique sur l'année 2003
- Annexe 15** : Rapport d'analyse S⁺ et tableau récapitulatif du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % élaboré par régression logistique sur la période 1990-2004
- Annexe 16** : Tableau résumant l'élaboration du modèle de mortalité de branches (> à 5 %) confrontant les deux approches et rapport d'analyse S⁺
- Annexe 17** : Tableau résumant l'élaboration du modèle de mortalité des chênes pédonculés confrontant les deux approches et rapport d'analyse S⁺
- Annexe 18** : Cartes de localisation des relevés de présences et absences de mortalité de branches effectués par l'IFN (Fig. 1) et les correspondants observateurs du DSF (Fig. 2)
- Annexe 19** : Cartes d'impacts de l'oïdium et de la collybie en pied de fuseau
- Annexe 20** : Modélisation de l'aire de distribution potentielle du chêne sessile

Annexe 1
Illustrations de différents symptômes de
dépérissement du chêne pédonculé



Figure 1 : Mortalité de branches



Figure 2 : Descente de cime



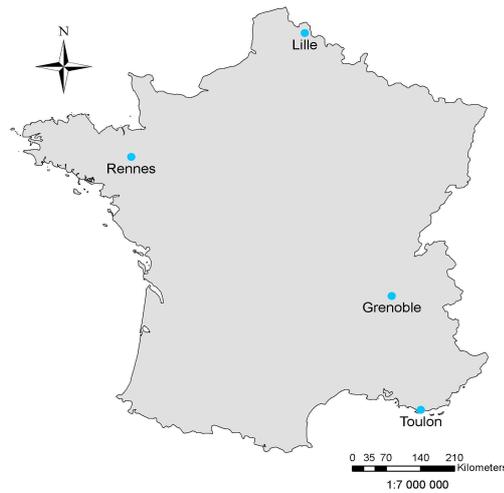
Figure 3 : Rameaux en fouet



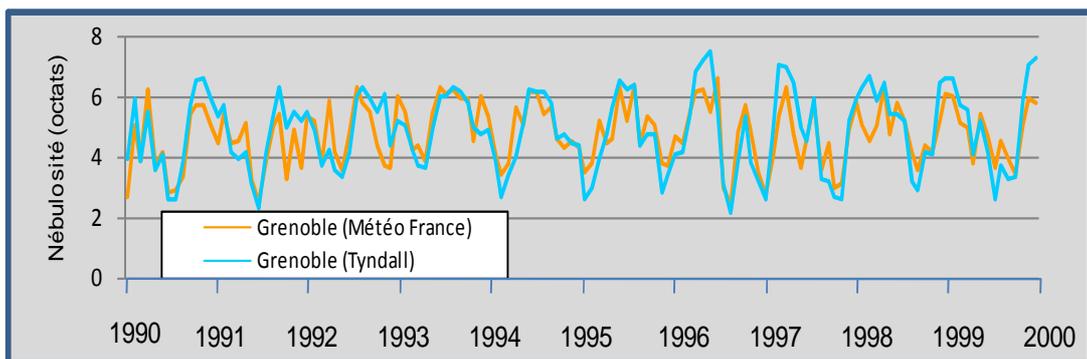
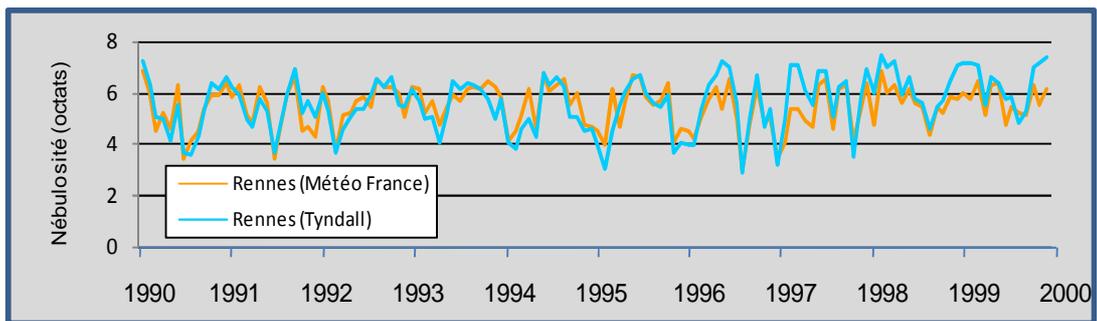
Figure 4 : Suintements noirâtres

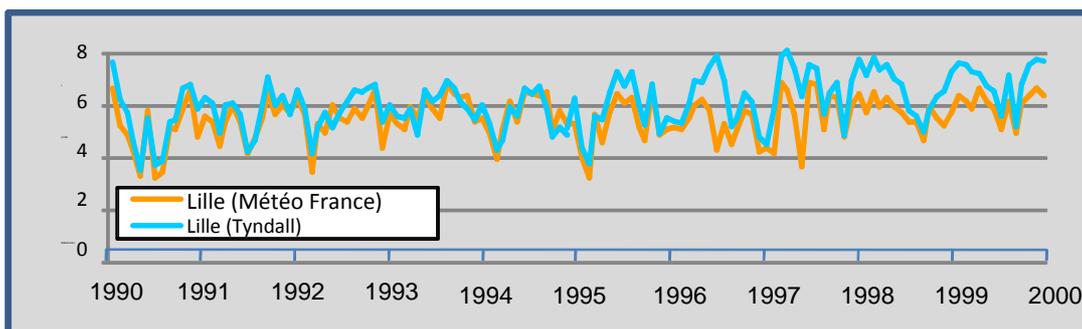
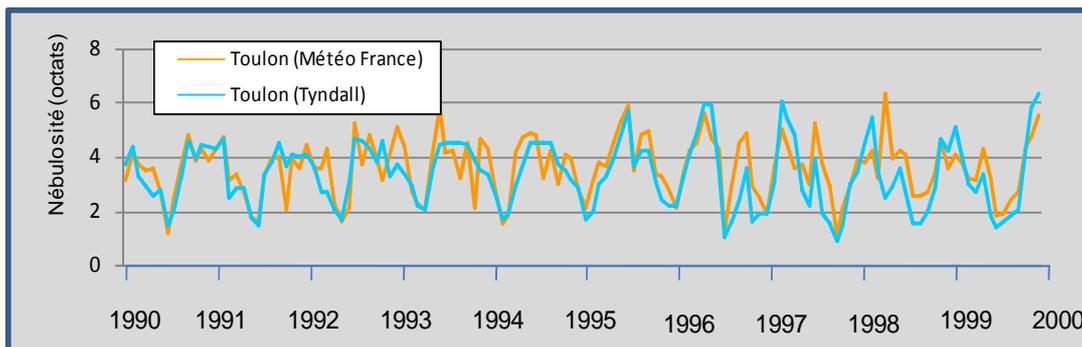
Annexe 2

Graphiques de comparaison des données de nébulosité provenant des postes Météo France et du modèle Tyndall - Cartes de localisation des postes sélectionnés



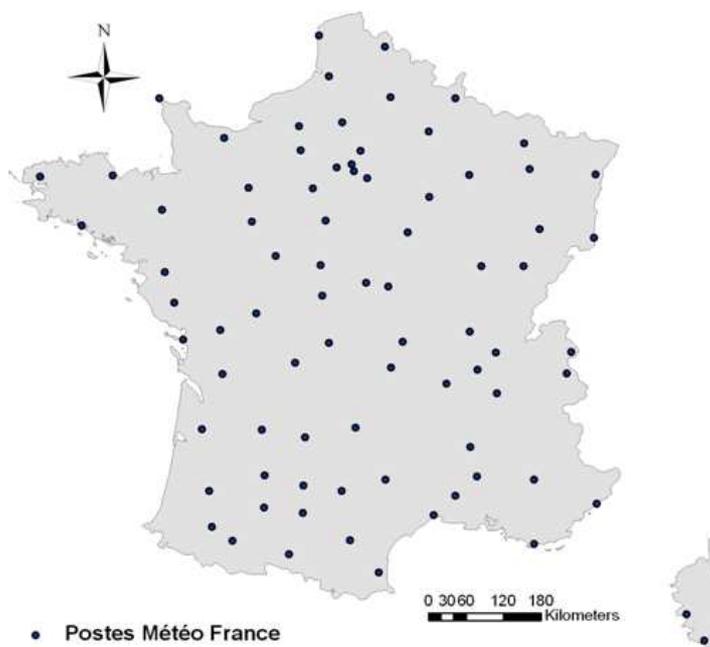
Carte de localisation des postes sélectionnés pour la comparaison





Graphiques de comparaison des données de nébulosité (en octats) par poste.

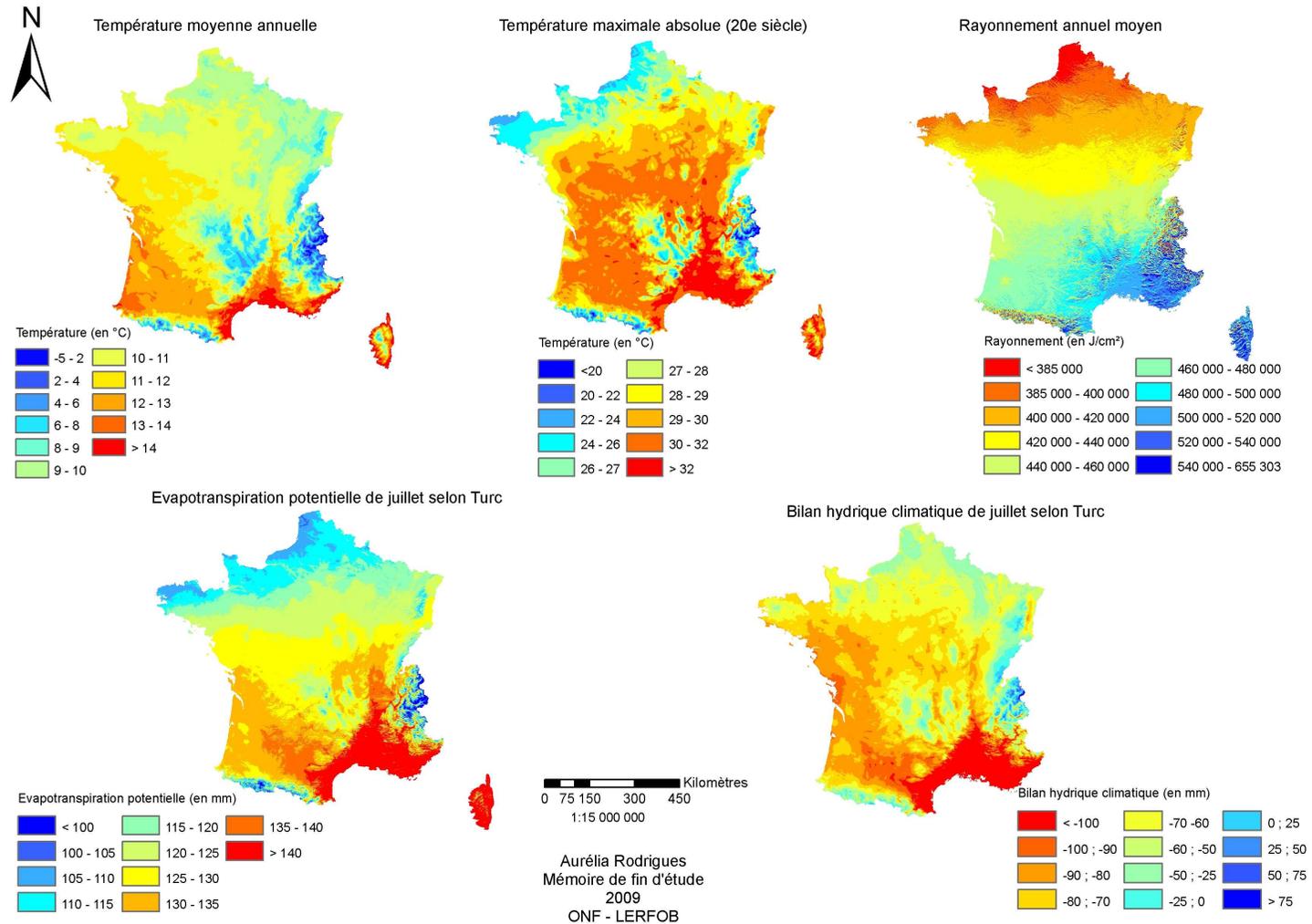
On constate que les deux sources de données sont très proches. Il semblerait néanmoins que les valeurs fournies par le modèle Tyndall soient légèrement plus grandes que ce qui est réellement observé surtout à Lille. La courbe bleue étant légèrement au dessus de celle en orange.



Carte de localisation des 84 postes Météo France retenus pour spatialiser les variables de rayonnement moyen

Annexe 3 : Représentation spatiale des principales variables écologiques

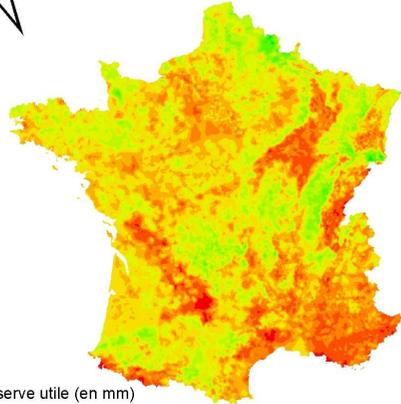
Variables climatiques



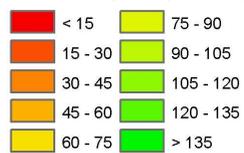
Variables hydriques - édaphiques



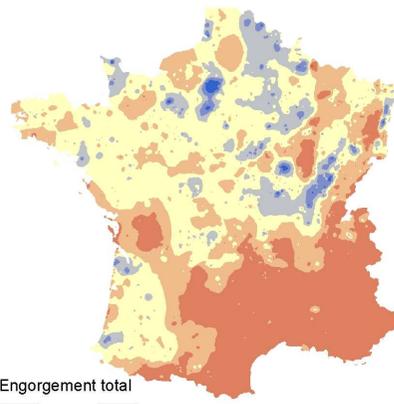
Réserve utile annuelle moyenne (en mm)



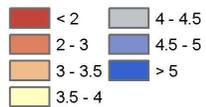
Réserve utile (en mm)



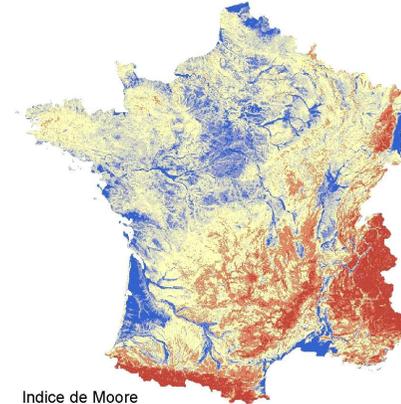
Indice d'engorgement total



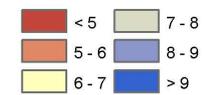
Engorgement total



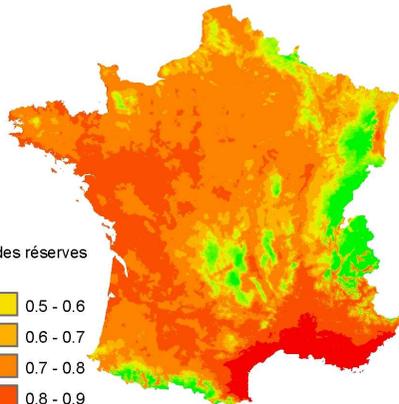
Indice de Moore



Indice de Moore



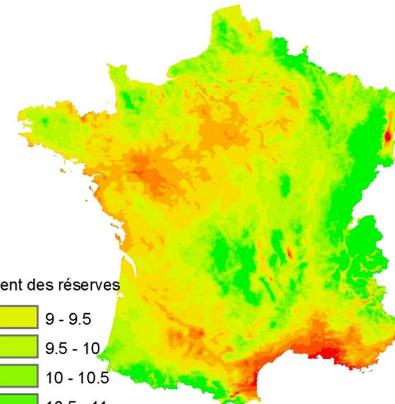
Indice de fluctuation des réserves en eau du sol



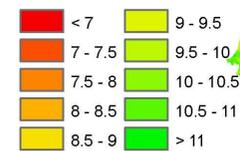
Indice de fluctuation des réserves en eau du sol



Indice d'épuisement des réserves



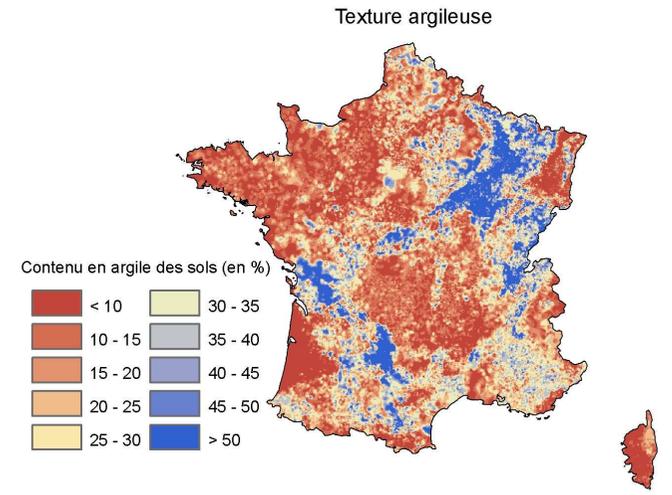
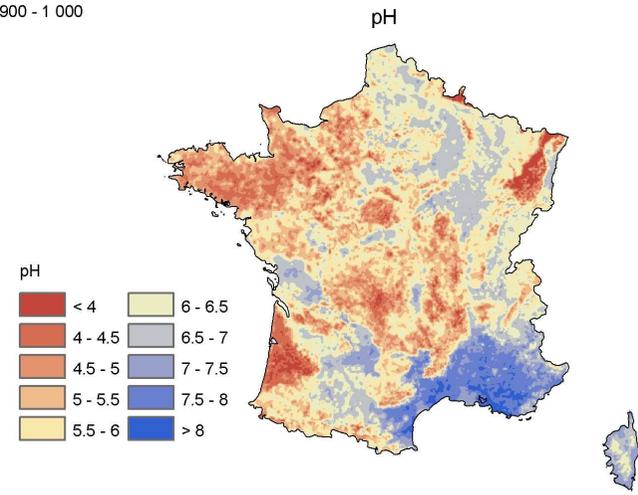
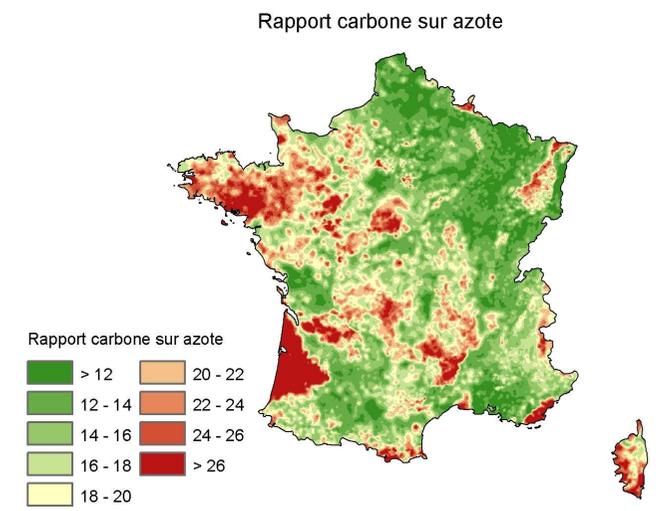
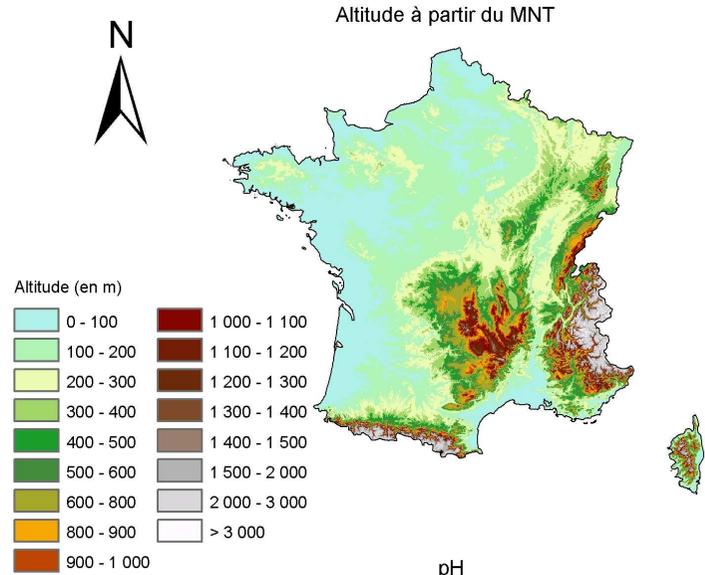
Indice d'épuisement des réserves



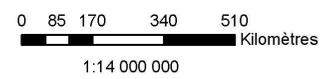
1:14 000 000

Aurélia Rodrigues
Mémoire de fin d'étude
2009
LERFOB-ONF

Autres variables



Aurélia Rodrigues
Mémoire de fin d'étude
2009
ONF - LERFOB



Annexe 4

Matrice des corrélations entre variables constituant le modèle de distribution potentielle du chêne pédonculé

	ru3	epet	etptu7	tmin6190.2	varese.aglim
ru3	1.00000000	0.6964893	-0.1477119	0.223901243	-0.06961791
epet	0.69648933	1.00000000	-0.3030528	0.229980965	-0.10822210
etptu7	-0.14771185	-0.3030528	1.00000000	0.455727773	0.47924800
tmin6190.2	0.22390124	0.2299810	0.4557278	1.000000000	0.35901672
varese.aglim	-0.06961791	-0.1082221	0.4792480	0.359016722	1.00000000
ph	-0.41052381	-0.3921020	0.3783056	0.002027379	0.54151053
ph					
ru3	-0.410523808				
epet	-0.392102014				
etptu7	0.378305641				
tmin6190.2	0.002027379				
varese.aglim	0.541510530				
ph	1.000000000				

Annexe 5

Rapport d'analyse S+ du modèle de distribution potentiel du chêne pédonculé

```
> glm06 <- glm(PA.ROBUR ~ ru3 + I(ru3^2) + v2 + I(v2^2) + v3 + I(v3^2) + v4 + I(v4^2)
+ v5 + I(v5^2) + v6 + I(v6^2), family = binomial, na.action = na.exclude)
> glm06
Call:
glm(formula = PA.ROBUR ~ ru3 + I(ru3^2) + v2 + I(v2^2) + v3 + I(v3^2) + v4 + I(v4^2)
+ v5 + I(v5^2) + v6 + I(v6^2), family = binomial, na.action = na.exclude)

Coefficients:
(Intercept)          ru3          I(ru3^2)          v2          I(v2^2)          v3
-73.66947  0.004868271  0.00001414885  9.227603 -1.061924  0.2727146
          I(v3^2)          v4          I(v4^2)          v5          I(v5^2)          v6
-0.01431593  0.8184097 -0.00325633 -0.02419151  0.00009369146  1.065013
          I(v6^2)
-0.07193387

Degrees of Freedom: 6822 Total; 6809 Residual
98 observations deleted due to missing values
Residual Deviance: 4912.238
> anova(glm06, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

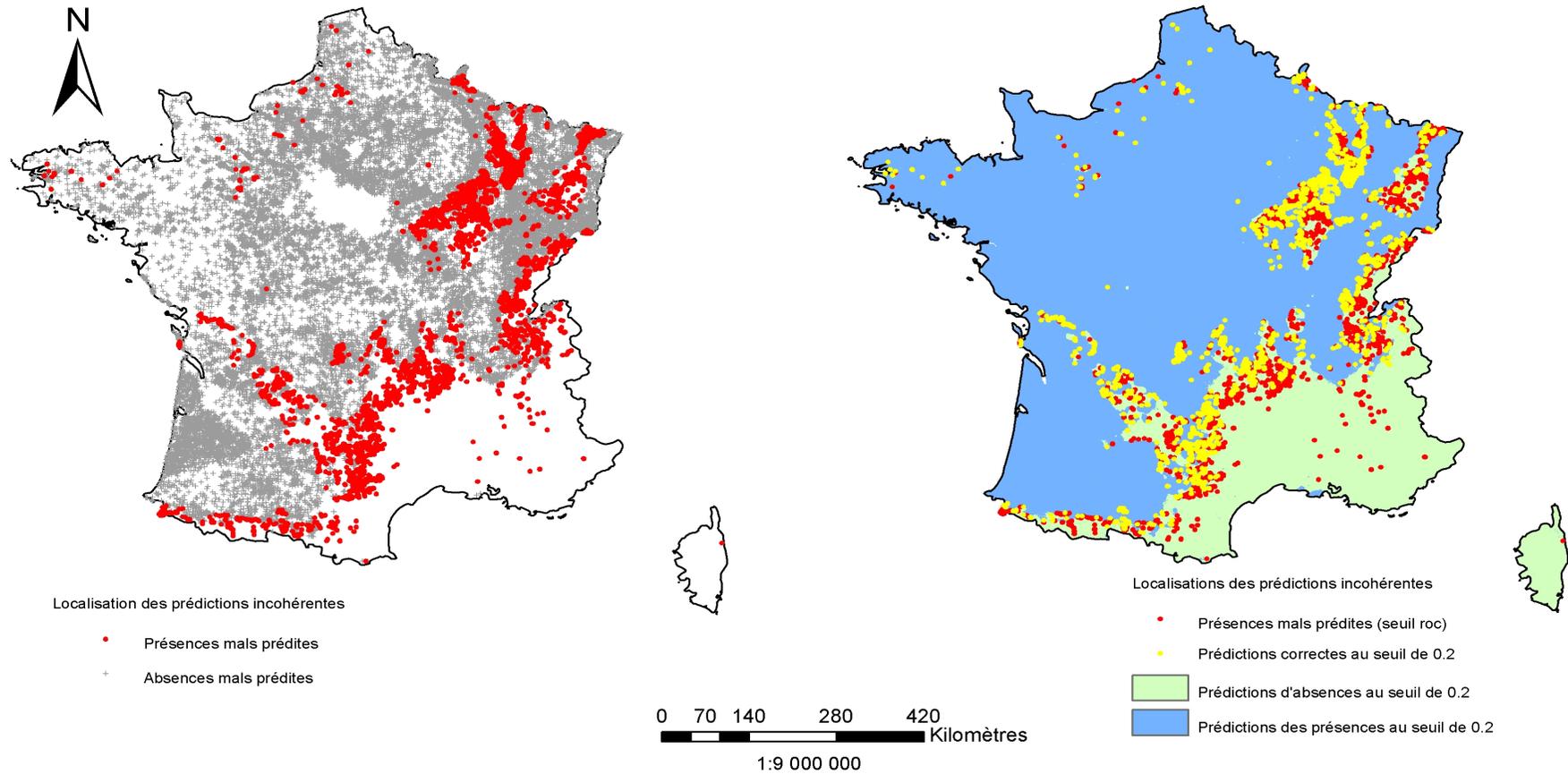
Binomial model

Response: PA.ROBUR

Terms added sequentially (first to last)
      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev   Pr(Chi)
NULL                                6821   8206.103
  ru3    1  1618.208    6820   6587.895 0.0000000
I(ru3^2) 1    13.818    6819   6574.077 0.0002014
   v2    1  1229.761    6818   5344.316 0.0000000
I(v2^2)  1   190.839    6817   5153.478 0.0000000
   v3    1    65.734    6816   5087.744 0.0000000
I(v3^2)  1     1.038    6815   5086.706 0.3082491
   v4    1    23.756    6814   5062.950 0.0000011
I(v4^2)  1    77.376    6813   4985.573 0.0000000
   v5    1    35.663    6812   4949.910 0.0000000
I(v5^2)  1     0.008    6811   4949.902 0.9285410
   v6    1    35.106    6810   4914.796 0.0000000
I(v6^2)  1     2.558    6809   4912.238 0.1097071
> d2simple <- (glm06$null.deviance - glm06$deviance)/glm06$null.deviance
> d2simple
[1] 0.4013921
```

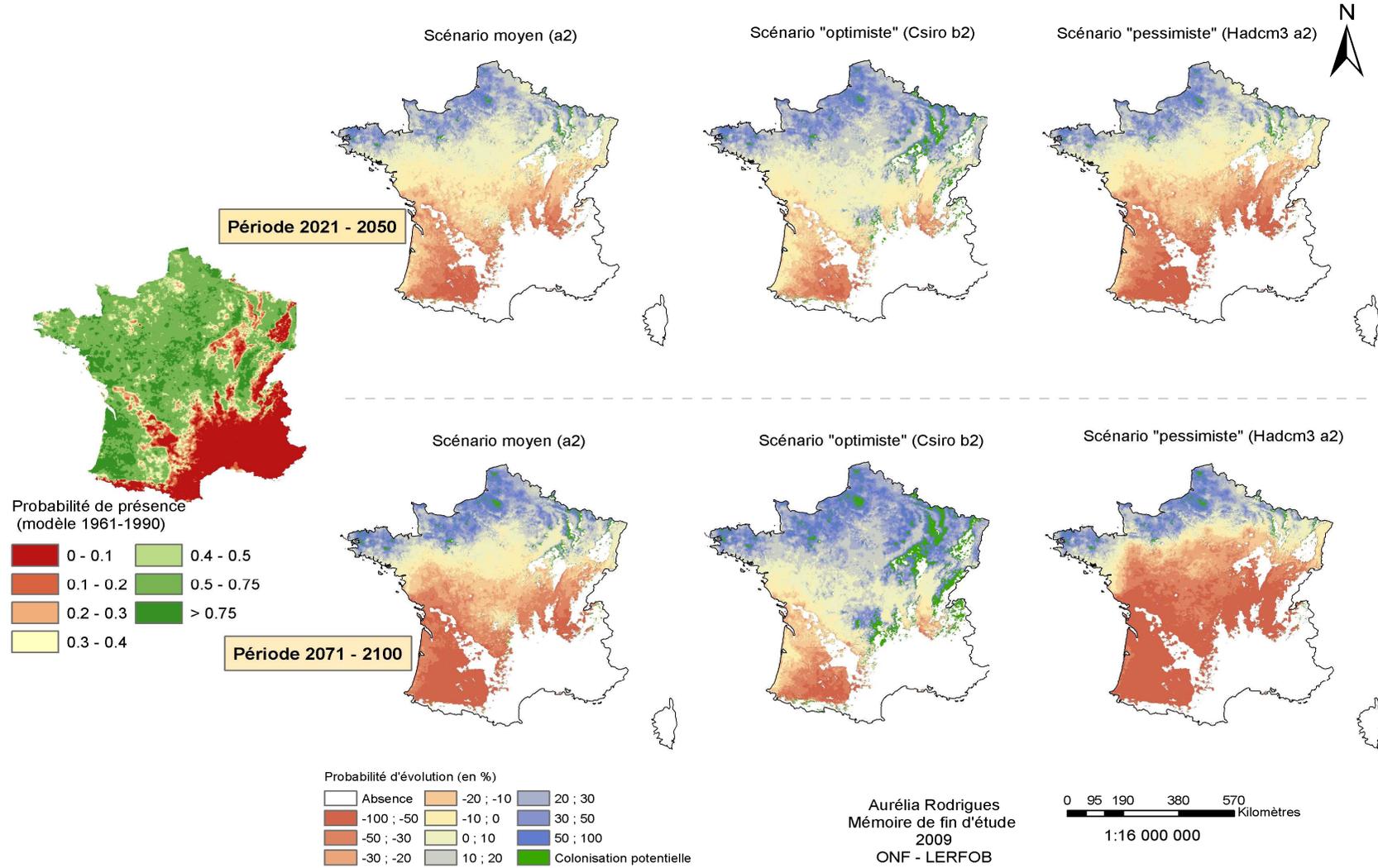
Annexe 6

Carte de localisation des incohérences de prédiction du modèle de distribution potentielle du chêne pédonculé



Aurélia Rodrigues
Mémoire de fin d'étude
2009
ONF - LERFOB

Annexe 7 : Distributions potentielles du chêne pédonculé passée et futures



Annexe8

Rapport d'analyse S+ et tableau récapitulatif du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % élaboré par régression logistique sur la période 1961-1990

Rapport d'analyse du modèle

```
> glm03ts <- glm(PA.bm5 ~ v1 + v2 + v3, family = binomial, na.action =
  na.exclude)
> glm03ts
Call:
glm(formula = PA.bm5 ~ v1 + v2 + v3, family = binomial, na.action = na.exclude
)

Coefficients:
(Intercept)          v1          v2          v3
-12.27626  0.09430605  0.05538192 -0.4867001

Degrees of Freedom: 3164 Total; 3160 Residual
Residual Deviance: 3328.102
> anova(glm03ts, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

Binomial model

Response: PA.bm5

Terms added sequentially (first to last)
      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev      Pr(Chi)
NULL                                3163    3713.956
v1    1  183.5737    3162    3530.383 0.000000e+000
v2    1  138.8509    3161    3391.532 0.000000e+000
v3    1   63.4294    3160    3328.102 1.665335e-015
> d2 <- (glm03ts$null.deviance - glm03ts$deviance)/glm03ts$null.deviance

> d2
[1] 0.103893
```

Annexe 9

Rapport d'analyse S+ et tableaux récapitulatifs du modèle de mortalité de branches au seuil de 25 % élaboré par régression logistique sur la période 1961 - 1990

1 – Tableau résumant de l'élaboration du modèle de mortalité de branches au seuil de 25 %

Modélisation de la répartition des relevés de mortalité de branches au seuil de 25 %									
Variables explicatives	d ² modèle	signe modèle	d ² variable	signe variable	Pvalue	AUC	% de présences et absences bien prédites	% de présences bien prédites	% d'absences bien prédites
Surface terrière en chêne pédonculé	0.0366	+ -	0.0366	+ -	0	0.548	72	33	77
Evapotranspiration potentielle de juillet	0.0575	+ -	0.0223	+ -	0	0.672	62	64	62
Indice de fluctuation des réserve en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse	0.0676	- +	0.0060	- +	0	0.684	64	63	64
Bassin parisien	0.0705	-	0.0195	-	0	0.705	59	74	58

2 – Rapport d'analyse du modèle de répartition des mortalités de branches au seuil de 25 %

```

> glm04 <- glm(brmortes25 ~ v1 + I(v1^2) + v2 + v2^2 + v3 + I(v3^2) + v4, family
  = binomial, na.action = na.exclude)
> devmodele <- (glm04$null.deviance - glm04$deviance)/glm04$null.deviance
> glm04
Call:
glm(formula = brmortes25 ~ v1 + I(v1^2) + v2 + v2^2 + v3 + I(v3^2) + v4,
    family = binomial, na.action = na.exclude)

Coefficients:
(Intercept)          v1          I(v1^2)          v2          I(v2^2)          v3
-28.18219  0.08972056 -0.001016541  0.3660098 -0.001260601 -0.05142723
          I(v3^2)          v4
 0.0005221534 -0.3346793

Degrees of Freedom: 3172 Total; 3164 Residual
6 observations deleted due to missing values
Residual Deviance: 1908.792
> anova(glm04, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

Binomial model

Response: brmortes25

Terms added sequentially (first to last)
      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev   Pr(Chi)
NULL              3171    2065.840
v1      1  68.25959    3170    1997.580 0.0000000
I(v1^2) 1   6.44566    3169    1991.134 0.0111223
v2      1  43.46983    3168    1947.665 0.0000000
I(v2^2) 1   0.34865    3167    1947.316 0.5548793
v3      1  11.33972    3166    1935.976 0.0007587
I(v3^2) 1   9.79640    3165    1926.180 0.0017485
v4      1  17.38750    3164    1908.792 0.0000305

> devmodele
[1] 0.07602108

```

3 – Tableau récapitulatif du modèle

	Modèle de mortalité de branches à 25 % (1961-1990)	Sens	Apport	AUC
Thermique	Evapotranspiration potentielle de juillet	+	20%	0.705
Eau du sol	Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse	- +	12%	
Sylviculture	Surface terrière de chêne pédonculé	+	56%	
Effet régional	Bassin parisien	-	12%	

Annexe 10

Rapport d'analyse S+ et tableaux récapitulatifs du modèle de mortalité de branches au seuil de 50 % élaboré par régression logistique sur la période 1961 - 1990

1 – Tableau résumant de l'élaboration du modèle de mortalité de branches au seuil de 50 %

Modélisation de la répartition des relevés de mortalité de branches au seuil de 50 %									
Variables explicatives	d ² modèle	signe modèle	d ² variable	signe variable	Pvalue	AUC	% de présences et absences bien prédites	% de présences bien prédites	% d'absences bien prédites
Surface terrière en chêne pédonculé	0.0433	+ -	0.0433	+ -	0	0.526	82	24	85
Evapotranspiration potentielle de juillet	0.0635	+	0.0212	+	0	0.682	62	67	62
Indice de fluctuation des réserve en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse	0.0724	- +	0.0052	- +	0.04	0.71	73	59	74
Pourcentage de gros bois du peuplement	0.0768	- +	0.0037	- +	0.05	0.718	68	67	68

2 – Rapport d'analyse du modèle de répartition des mortalités de branches au seuil de 50 %

```

> glm04 <- glm(brmortes50 ~ v1 + I(v1^2) + v2 + v3 + I(v3^2) + v4 + I(v4^2),
  family = binomial, na.action = na.exclude)
> devmodele <- (glm04$null.deviance - glm04$deviance)/glm04$null.deviance
> glm04
Call:
glm(formula = brmortes50 ~ v1 + I(v1^2) + v2 + v3 + I(v3^2) + v4 + I(v4^2),
    family = binomial, na.action = na.exclude)

Coefficients:
(Intercept)          v1          I(v1^2)          v2          v3          I(v3^2)
-11.8203  0.1213224 -0.001591043  0.07014848 -0.0581082  0.0005823856
          v4 I(v4^2)
-2.162547  2.66968

Degrees of Freedom: 3172 Total; 3164 Residual
6 observations deleted due to missing values
Residual Deviance: 960.7406
> anova(glm04, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

Binomial model

Response: brmortes50

Terms added sequentially (first to last)
      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev  Pr(Chi)
NULL              3171    1040.651
 v1     1  37.74973     3170    1002.901 0.0000000
I(v1^2) 1   7.24121     3169     995.660 0.0071249
 v2     1  20.77208     3168     974.888 0.0000052
 v3     1   4.35460     3167     970.534 0.0369092
I(v3^2) 1   5.25171     3166     965.282 0.0219252
 v4     1   0.16104     3165     965.121 0.6881992
I(v4^2) 1   4.38021     3164     960.741 0.0363585

> devmodele
[1] 0.07678902

```

3 – Tableau récapitulatif du modèle

	Modèle de mortalité de branches à 50 % (1961-1990)	Sens	Apport	AUC
Thermique	Evapotranspiration potentielle de juillet	+	26%	0.718
Eau du sol	Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse	- +	12%	
Sylviculture	Surface terrière de chêne pédonculé	+ -	57%	
	Pourcentage de gros bois du peuplement	- +	5%	

Annexe 11

Rapport d'analyse S+ et tableau récapitulatif du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % élaboré par régression linéaire sur la période 1961 - 1990

1 - Bilan de la modélisation et fiabilité

	Modèle de mortalité de branches à 5 % (1961-1990)	Sens	Apport	R ²
Thermique	Evapotranspiration potentielle de juillet	- +	16%	0.0925
Eau du sol	Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à l'engorgement temporaire	- +	36%	
Sylviculture	Pourcentage de gros bois du peuplement	+	25%	
Effet régional	Bassin parisien	-	23%	

2 - Rapport d'analyse S+ de la modélisation

```

> lm04data <- lm(G.bm5.gtot ~ I(v1) + I(v1^2) + I(v2) + I(v2^2) + I(v3) + I(v4),
  na.action = na.exclude)
> summary(lm04data)

Call: lm(formula = G.bm5.gtot ~ I(v1) + I(v1^2) + I(v2) + I(v2^2) + I(v3) + I(v4),
  na.action = na.exclude)
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.4243 -0.1717 -0.08867  0.0163  1.041

Coefficients:
              Value Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.3282   1.2850    1.8119  0.0701
          I(v1) -0.0413   0.0209   -1.9752  0.0483
          I(v1^2)  0.0002   0.0001    2.3889  0.0170
          I(v2) -0.2636   0.0479   -5.5043  0.0000
          I(v2^2)  0.0810   0.0188    4.3132  0.0000
          I(v3)  0.1344   0.0198    6.7815  0.0000
          I(v4) -0.0870   0.0139   -6.2721  0.0000

Residual standard error: 0.2883 on 3165 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.09252
F-statistic: 53.78 on 6 and 3165 degrees of freedom, the p-value is 0
6 observations deleted due to missing values

Correlation of Coefficients:
      (Intercept)   I(v1) I(v1^2)   I(v2) I(v2^2)   I(v3)
I(v1) -0.9990
I(v1^2)  0.9968   -0.9992
I(v2) -0.1286    0.1115  -0.1153
I(v2^2)  0.1390   -0.1225  0.1240 -0.9636
I(v3) -0.0367    0.0319 -0.0298 -0.0218  0.0239
I(v4)  0.0669   -0.0822  0.0957  0.1481 -0.2788 -0.0787

```

Annexe 12

Tableau récapitulatif et rapport d'analyse S+ du modèle de mortalité du chêne pédonculé élaboré par régression logistique sur la période 1961-1990

1 - Tableau récapitulatif de l'élaboration du modèle

Modèle de mortalité du chêne pédonculé établi pour la période 1961-1990									
Variables explicatives	D ² modèle	Signe modèle	D ² variable	Signe variable	Pvalue	AUC	% présences et absences bien prédites	% présences bien prédites	% absences bien prédites
Surface terrière de chêne pédonculé	0,099	+	0,080	+	0	0,727	68	67	68
Rayonnement moyen de juillet	0,108	+	0,0264	+	0	0,739	75	60	77
Rapport carbone / azote	0,1207	+	0,0095	+	0	0,749	73	64	75

2 - Rapport d'analyse du modèle

```

> glm03ts <- glm(amort ~ v1 + v2 + v3, family = binomial, na.action = na.exclude
)
> glm03ts
Call:
glm(formula = amort ~ v1 + v2 + v3, family = binomial, na.action = na.exclude)

Coefficients:
(Intercept)          v1          v2          v3
-15.39309  0.07285402  0.0001730738  0.0512337

Degrees of Freedom: 4953 Total; 4949 Residual
3 observations deleted due to missing values
Residual Deviance: 3433.526
> anova(glm03ts, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

Binomial model

Response: amort

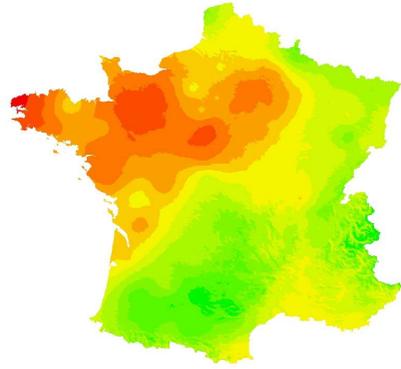
Terms added sequentially (first to last)
      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev    Pr(Chi)
NULL                4952    3880.839
v1  1  309.0253      4951    3571.813 0.000000e+000
v2  1  108.7189      4950    3463.094 0.000000e+000
v3  1   29.5679      4949    3433.526 5.399229e-008

```

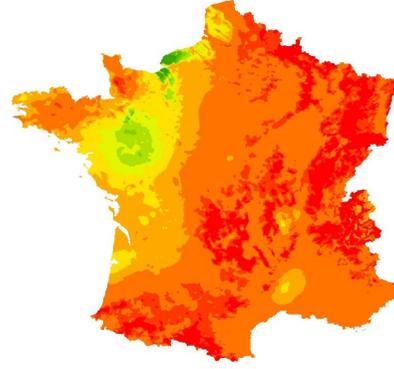
Annexe 13

Evolution constatée des variables écologiques par rapport à 1961-1990

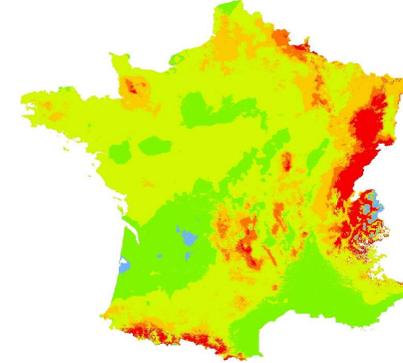
Evolution de l'évapotranspiration entre 2003 et 1960-1990



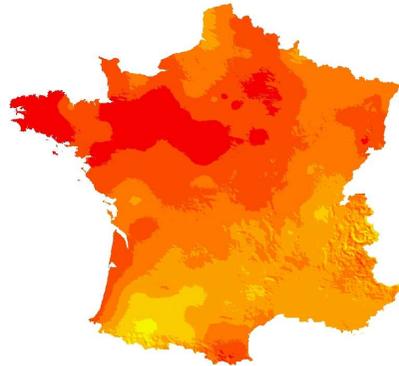
Evolution de la réserve utile entre 2003 et 1960-1990



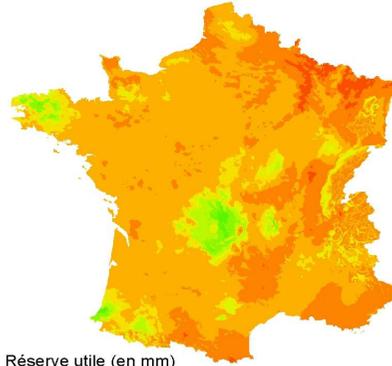
Evolution des fluctuations des réserves en eau du sol entre 2003 et 1960-1990



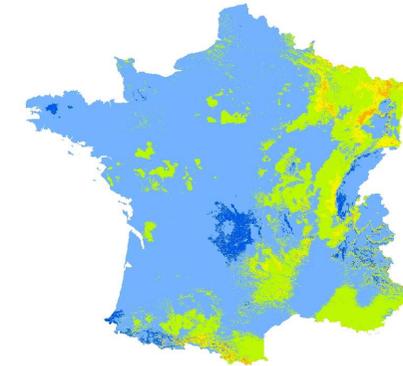
Evolution de l'évapotranspiration entre 1991-2004 et 1960-1990



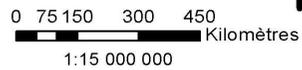
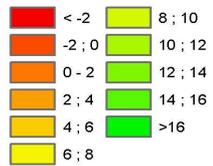
Evolution de la réserve utile entre 1991-2004 et 1960-1990



Evolution des fluctuations des réserves en eau du sol entre 1991-2004 et 1960-1990



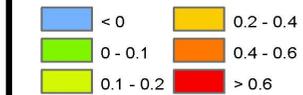
ETP (en mm)



Réserve utile (en mm)

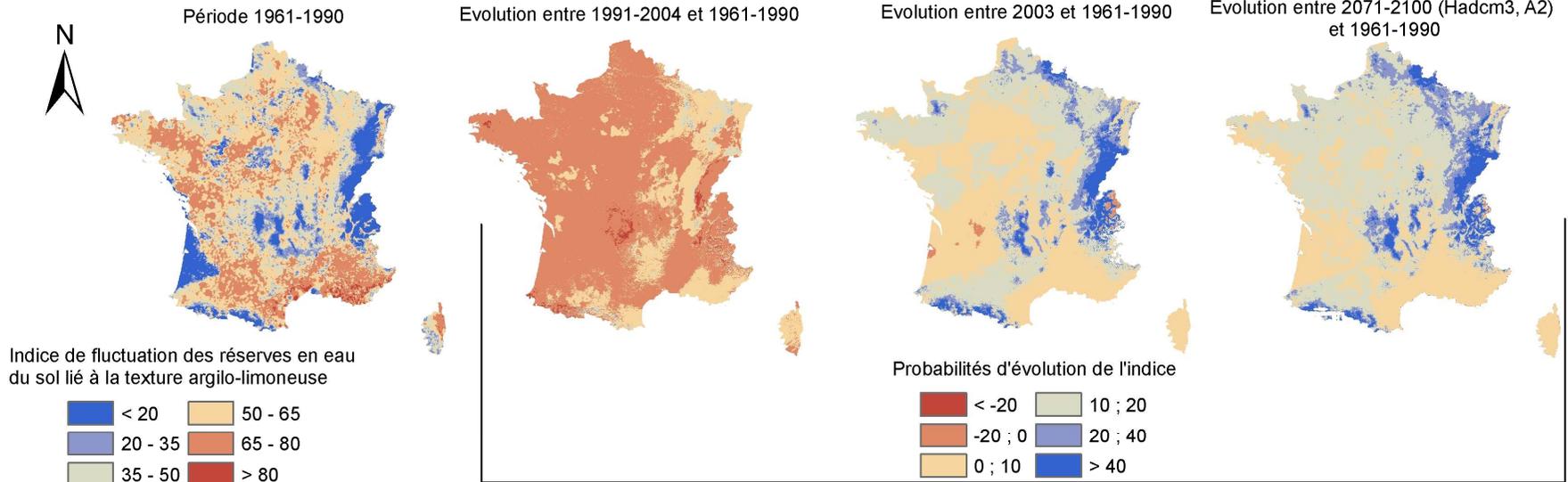


Fluctuation de la réserve utile (en mm)

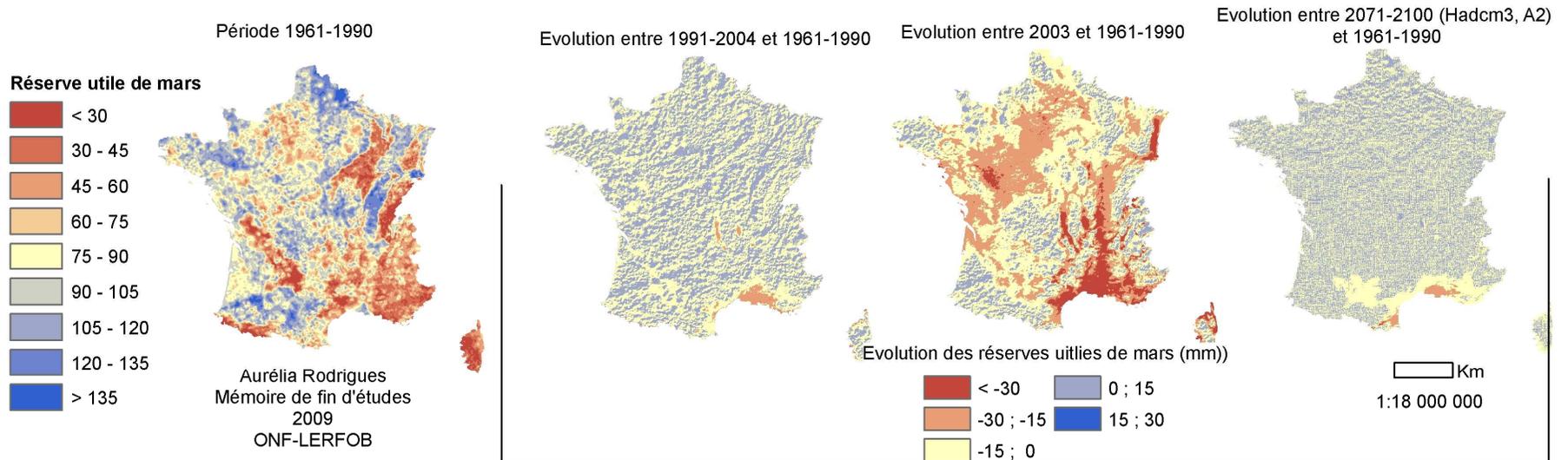


Aurélia Rodrigues
Mémoire de fin d'étude
2009
ONF - LERFOB

Comparaison des valeurs de l'indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse observées et prédites



Comparaison des valeurs de réserves utiles de mars observées et prédites



Annexe 14 :

Rapport d'analyse S+ et tableau récapitulatif du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % élaboré par régression logistique sur l'année 2003

1 – Tableau résumant l'élaboration du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % (2003)

Modélisation de la répartition des relevés de mortalité de branches au seuil de 5 % (2003)									
Variables explicatives	d ² modèle	signe modèle	d ² variable	signe variable	Pvalue	AUC	% de présences et absences bien prédites	% de présences bien prédites	% d'absences bien prédites
Evapotranspiration potentielle de juillet	0.0686	+	0.0686	+	0	0.687	63	74	59
Surface terrière de chêne pédonculé	0.1150	+ -	0.0444	+ -	0	0.726	71	57	77
Déficit hydrique climatique d'avril	0.1245	++	0.0193	++	0	0.728	69	61	72
Bassin parisien	0.1311	-	0.0442	-	0	0.738	69	64	71

2 – Rapport d'analyse du modèle

```

> glm04ts <- glm(PA.bm5 ~ v1 + v1^2 + v2 + I(v2^2) + v3 + v3^2 + v4, family =
  binomial, na.action = na.exclude)
> glm04ts
Call:
glm(formula = PA.bm5 ~ v1 + v1^2 + v2 + I(v2^2) + v3 + v3^2 + v4, family =
  binomial, na.action = na.exclude)

Coefficients:
(Intercept)          v1          I(v1^2)          v2          I(v2^2)          v3
-3.839095 -0.0273614 0.0003208512 0.1190473 -0.00172047 0.03926365
          I(v3^2)          v4
0.000655565 -0.302402

Degrees of Freedom: 3173 Total; 3165 Residual
5 observations deleted due to missing values
Residual Deviance: 3231.638
> anova(glm04ts, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

Binomial model

Response: PA.bm5

Terms added sequentially (first to last)
      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev    Pr(>Chi)
NULL                                3172    3719.703
v1    1  255.1991    3171    3464.504 0.0000000
I(v1^2) 1    0.0005    3170    3464.503 0.9821923
v2    1  145.2573    3169    3319.246 0.0000000
I(v2^2) 1   27.3107    3168    3291.935 0.0000002
v3    1    7.9155    3167    3284.020 0.0049013
I(v3^2) 1   28.2881    3166    3255.732 0.0000001
v4    1   24.0939    3165    3231.638 0.0000009
> d2 <- (glm04ts$null.deviance - glm04ts$deviance)/glm04ts$null.deviance

> d2
[1] 0.1312108

```

Annexe 15 :

Rapport d'analyse S+ et tableau récapitulatif du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % élaboré par régression logistique sur la période 1991 - 2004

1 – Tableau résumant l'élaboration du modèle de mortalité de branches au seuil de 5 % (1991–2004)

Modélisation de la répartition des relevés de mortalité de branches au seuil de 5 % (1991 - 2004)									
Variables explicatives	d ² modèle	signe modèle	d ² variable	signe variable	Pvalue	AUC	% de présences et absences bien prédites	% de présences bien prédites	% d'absences bien prédites
Evapotranspiration potentielle de juillet	0.0658	+	0.0658	+	0	0.684	64	70	62
Surface terrière de chêne pédonculé	0.1121	+ -	0.0444	+ -	0	0.723	71	55	78
Bassin parisien	0.127	-	0.0442	-	0	0.738	67	68	66
Indice d'épuisement des réserves de juin	0.1342	- +	0.0178	- +	0	0.746	69	68	69

2 – Rapport d'analyse du modèle

```

glm04tc <- glm(PA.bm5 ~ v2 + I(v2^2) + v3 + v4 + I(v4^2) + v1, family =
  binomial, na.action = na.exclude)
> glm04tc
Call:
glm(formula = PA.bm5 ~ v2 + I(v2^2) + v3 + v4 + I(v4^2) + v1, family =
  binomial, na.action = na.exclude)

Coefficients:
(Intercept)          v2      I(v2^2)          v3          v4      I(v4^2)          v1
-10.82306  0.1180259 -0.001679834 -0.3496578 -3.222682  3.315835  0.07332696

Degrees of Freedom: 3173 Total; 3166 Residual
5 observations deleted due to missing values
Residual Deviance: 3220.673
> anova(glm04tc, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

Binomial model

Response: PA.bm5

Terms added sequentially (first to last)
      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev    Pr(>Chi)
NULL                                3172    3719.703
v2    1  140.6656    3171    3579.037 0.000000000
I(v2^2) 1   23.6976    3170    3555.340 0.000001127
v3     1  178.5854    3169    3376.754 0.000000000
v4     1   13.7712    3168    3362.983 0.000206477
I(v4^2) 1    8.2133    3167    3354.770 0.004158390
v1     1  134.0966    3166    3220.673 0.000000000
> d2 <- (glm04tc$null.deviance - glm04tc$deviance)/glm04tc$null.deviance
> d2
[1] 0.1341585

```

Annexe 16

Tableau résumant l'élaboration du modèle de mortalité de branches (> à 5 %) confrontant les deux approches et rapport d'analyse S+

1 - Tableau récapitulatif de l'élaboration du modèle

Lien entre probabilité de présence du chêne pédonculé et probabilité de mortalité de branches supérieure à 5 %									
Variables explicatives	D ² modèle	Signe modèle	D ² variable	Signe variable	Pvalue	AUC	% présences et absences bien prédites	% présences bien prédites	% absences bien prédites
Probabilité de régression du chêne p. entre 1961-1990 et 2021-2050	0,0627	-	0,0624	-	0	0,686	64	74	60
Surface terrière de chêne pédonculé	0,1099	+	0,0376	+	0	0,72	66	69	64
Bassin parisien	0,1179	-	0,0425	-	0	0,732	66	71	64

2 - Rapport d'analyse S +

```

> glm03ts <- glm(PA.bm5 ~ v1 + v2 + v3, family = binomial, na.action =
  na.exclude)
> glm03ts
Call:
glm(formula = PA.bm5 ~ v1 + v2 + v3, family = binomial, na.action =
  na.exclude
)

Coefficients:
(Intercept)          v1          v2          v3
-2.147399 -1.765797 0.05411777 -0.4101334

Degrees of Freedom: 3166 Total; 3162 Residual
6 observations deleted due to missing values
Residual Deviance: 3277.25
> anova(glm03ts, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

Binomial model

Response: PA.bm5

Terms added sequentially (first to last)
   Df Deviance Resid. Df Resid. Dev    Pr(>Chi)
NULL              3165    3715.235
v1  1  231.9651     3164    3483.270 0.000000e+000
v2  1  150.5353     3163    3332.735 0.000000e+000
v3  1   55.4845     3162    3277.250 9.414691e-014

```

Annexe 17

Tableau résumant l'élaboration du modèle de mortalité des chênes pédonculés confrontant les deux approches et rapport d'analyse S+

1 - Tableau récapitulatif de l'élaboration du modèle

Lien entre probabilité de présence du chêne pédonculé et probabilité de mortalité de l'essence									
Variables explicatives	D ² modèle	Signe modèle	D ² variable	Signe variable	Pvalue	AUC	% présences et absences bien prédites	% présences bien prédites	% absences bien prédites
Surface terrière de chêne pédonculé	0,099	+	0,0797	+	0	0,727	68	67	68
Probabilité de régression du chêne p. entre 1961-1990 et 2021-2050	0,1103	-	0,029	-	0	0,748	69	68	70
Pourcentage de gros bois par hectare	0,1235	-	0,0095	-	0	0,762	71	69	71

2 - Rapport d'analyse S +

```

> glm03ts <- glm(amort ~ v1 + v2 + v3, family = binomial, na.action =
  na.exclude
)
> glm03ts
Call:
glm(formula = amort ~ v1 + v2 + v3, family = binomial, na.action = na.exclude)

Coefficients:
(Intercept)          v1          v2          v3
-2.883554  0.07881615 -1.524858 -0.01718637

Degrees of Freedom: 4941 Total; 4937 Residual
15 observations deleted due to missing values
Residual Deviance: 3382.89
> anova(glm03ts, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

Binomial model

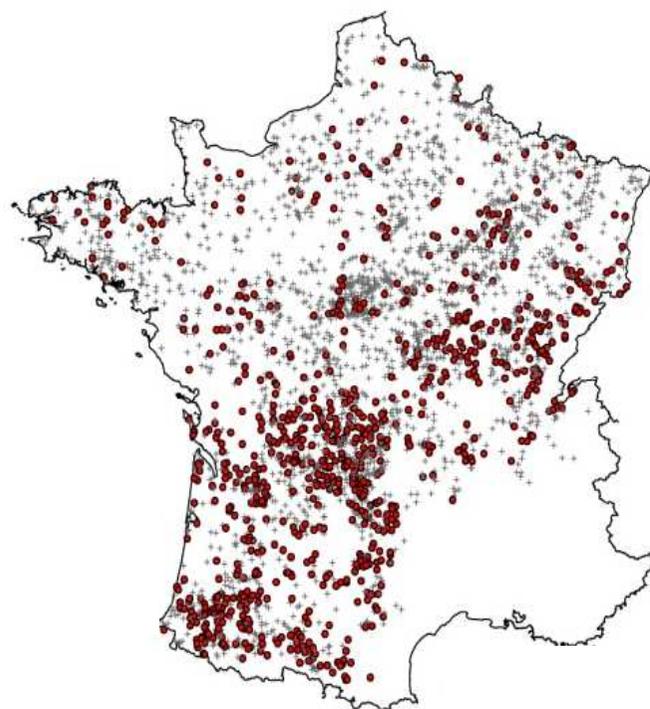
Response: amort

Terms added sequentially (first to last)
Df Deviance Resid. Df Resid. Dev    Pr(>Chi)
NULL                4940    3877.413
v1  1  308.6140      4939    3568.799 0.000000e+000
v2  1  116.8846      4938    3451.914 0.000000e+000
v3  1   69.0245      4937    3382.890 1.110223e-016

```

Annexe 18

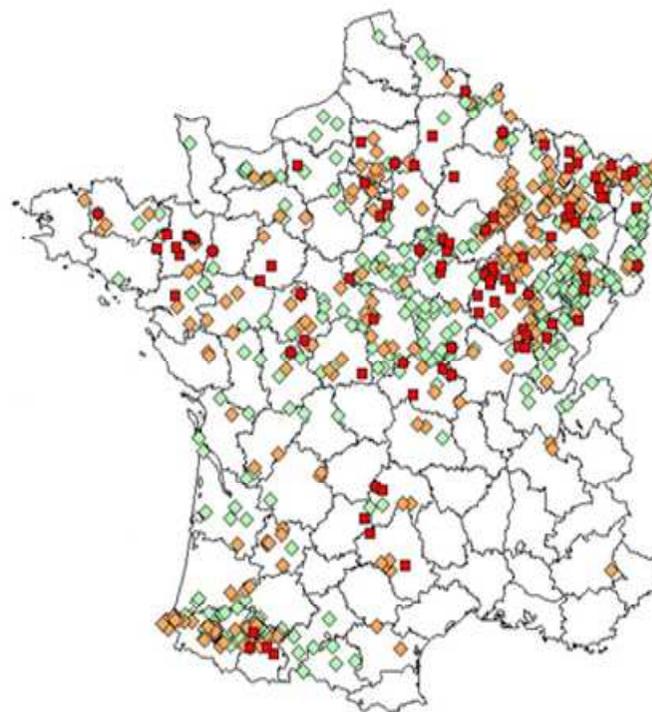
Cartes de localisation des relevés de présences et absences de mortalité de branches effectués par l'IFN (Fig. 1), les correspondants observateurs du DSF (Fig. 2).



OBSERVATIONS IFN
(2006–2007)

+ absences
• présences

Fig. 1



DEPERIS CHENE PEDONCULE
BASE DSF

■ 2000 / 2006 (363)
■ 1989 / 1999 (575)
● 2007/2009

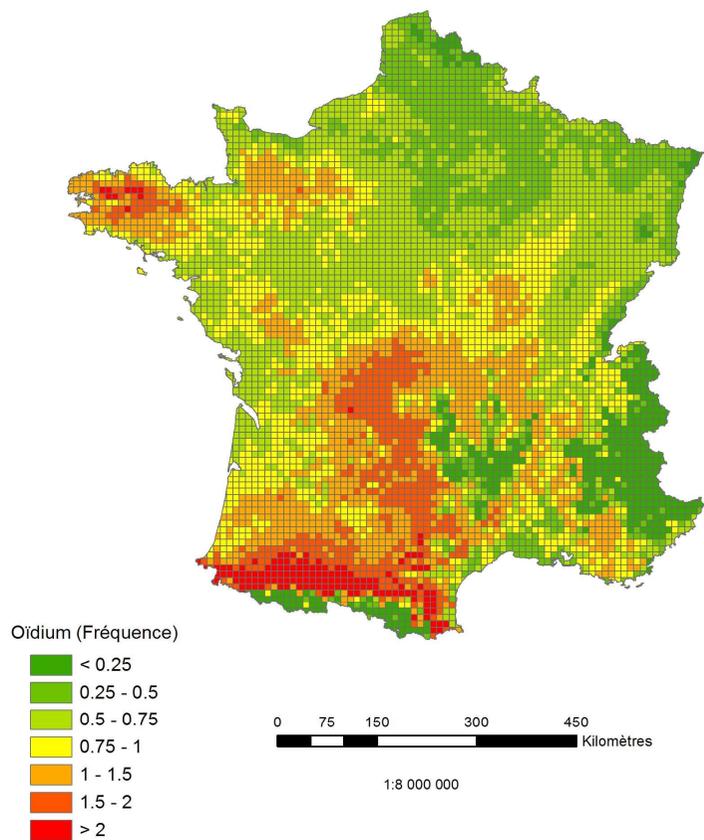
Source : L.-M. : Nageleisen

Fig. 2

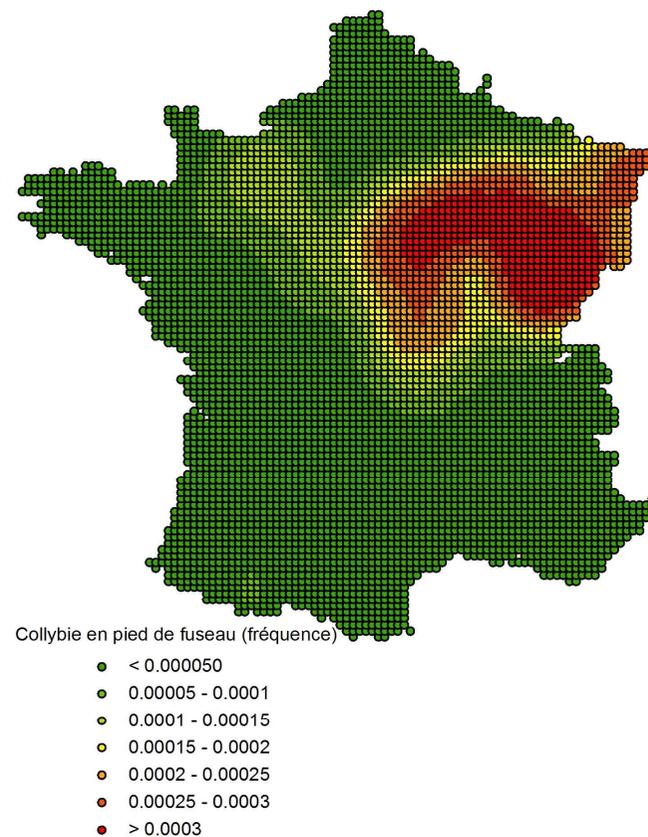
Annexe 19

Cartes d'impact de l'oïdium et de la collybie en pied de fuseau

Carte d'impact de l'oïdium



Carte d'impact de la collybie en pied de fuseau



Aurélia Rodrigues
Mémoire de fin d'étude
2009
ONF - LERFOB

Données fournies par B. Marçais
INRA - Laboratoire de pathologie forestière

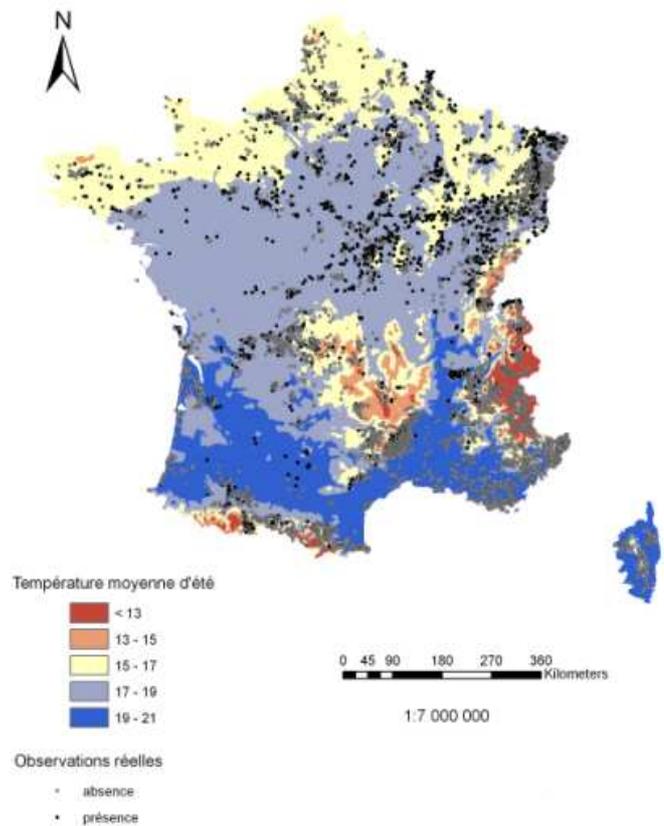
Annexe 20

Etablissement du modèle de distribution potentielle du chêne sessile pour la période de référence 1961-1990

1. - La température d'été (mois de juin juillet et août) moyenné sur la période 1961-1990 (en °C)

Parmi les premières variables les plus explicatives de la présence / absence du chêne sessile, celles caractérisant l'aspect thermique d'été ont de loin le plus fort pouvoir explicatif. La température moyenne d'été présentant le plus fort D^2 est donc retenue.

Variabes explicatives	D^2
Température moyenne d'été	0.1435
Indice d'engorgement temporaire	0.1424
Température moyenne d'août	0.1422
Température moyenne de juillet	0.1414
Température moyenne de juin	0.1364



Carte 19 : Représentation spatiale de la température moyenne d'été (°C)

Le chêne sessile est une essence à tendance thermophile qui a besoin de chaleur relativement élevée durant la saison de végétation. Et même s'il tolère relativement bien la sécheresse, passé une certaine température, la régulation stomatique se fait mal éliminant le chêne sessile des zones présentant de telles conditions répétées.

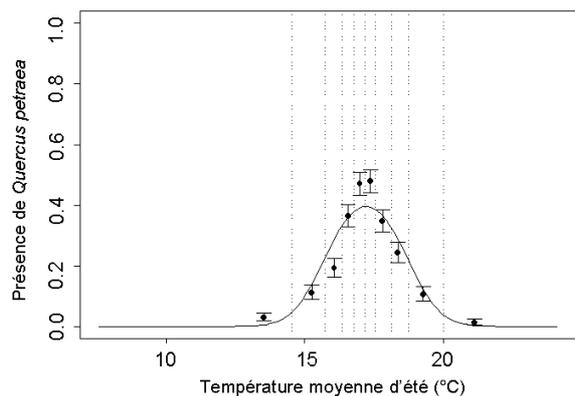


Fig 16 : Fréquence observée et modélisée de Quercus petraea suivant la température moyenne d'été

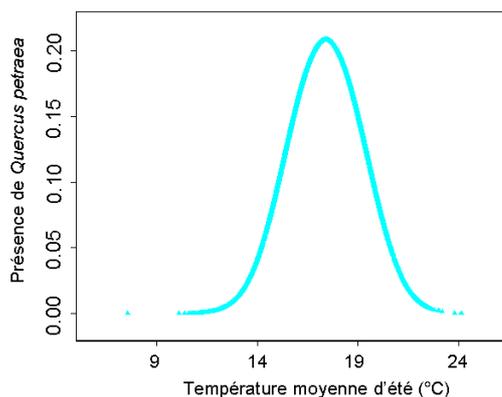


Fig 17 : Effet de la température moyenne d'été décorrélé des autres variables sur la répartition de Quercus petraea

Les deux courbes issues des graphes ont la même allure. La valeur optimale de température moyenne d'été pour laquelle la probabilité de présence du chêne sessile est optimale se situe autour de 18 °C, ce qui reste assez cohérent avec la préférence du chêne sessile pour des chaleurs relativement élevées en été. On observe également que la probabilité de présence diminue fortement pour des températures inférieures à 14 °C et pour des températures supérieures à 23 °C.

2. - Le pH

Parmi les variables les plus explicatives à ce stade on retrouve des variables mettent en évidence un effet thermique chaud important (température de mai, juin et juillet) dans l'explication de la répartition du chêne sessile. Mais cela a déjà été pris en compte dans le modèle au travers de la température moyenne d'été. La part la plus importante de la distribution semble s'expliquer par l'eau contenue dans le sol. La valeur de D^2 des variables décrivant l'engorgement est grande et il est préféré de ne pas les intégrer de suite dans le modèle pour ne pas masquer l'effet d'autres variables

Variables explicatives	D^2
Indice d'engorgement total	0.2008
Indice d'engorgement temporaire	0.1893
Température moyenne de juin	0.1765
Température moyenne de mai	0.1750
Indice de moore	0.1720
Température moyenne de juillet	0.1713
Déficit hydrique climatique de juillet	0.1663
pH	0.1660

La sélection porte alors sur l'importance de la richesse chimique du sol au travers du pH dont la valeur de D^2 est de 0.1660.

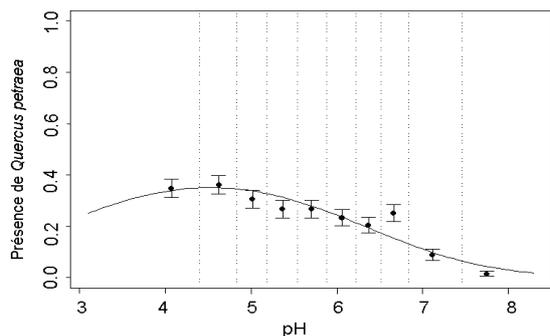


Fig 18 : Fréquence observée et modélisée de Quercus petraea suivant le pH du sol

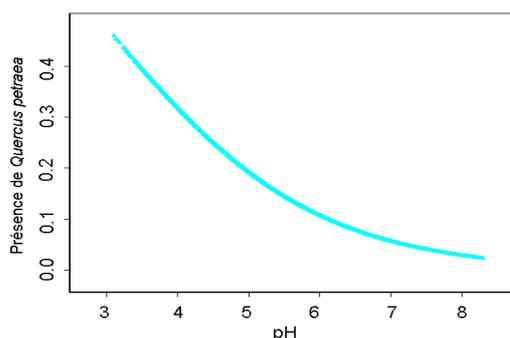


Fig 19 : Effet du pH décorrélié des autres variables sur la répartition de Quercus petraea

Les deux graphes présentent des formes de courbes de réponses ne sont guère différentes. Selon la réponse de la variable isolée, plus le pH est acide et plus la probabilité de présence de l'essence est élevée. La bibliographie indique que le chêne sessile occupe une assez large gamme de pH, il est en effet présent sur des sols très acides à calcaires. Cependant il trouve des conditions optimales sur les sols acides à peu acides (4.5 à 6.5).

3. - Le rapport carbone sur azote

Le rapport C/N traduit la vitesse de minéralisation des éléments minéraux qui retournent au sol. C'est une variable qui décrit la nutrition azotée, le principal nutriment des végétaux et qui représente une notion de richesse du sol, comme le pH, mais de nature différente. Plus les valeurs du rapport sont faibles et meilleure est la minéralisation, plus le sol est fertile. On s'attend à ce que plus les valeurs du rapport C/N sont élevées et plus la probabilité de présence du chêne sessile est faible.

Variables explicatives	D ²
Indice d'engorgement total	0.2054
Rapport carbone sur azote	0.196
Indice d'engorgement temporaire	0.1917

Les variables de pH et du rapport carbone/azote sont fortement corrélées, mais après vérification, le rapport carbone sur azote est significatif statistiquement.

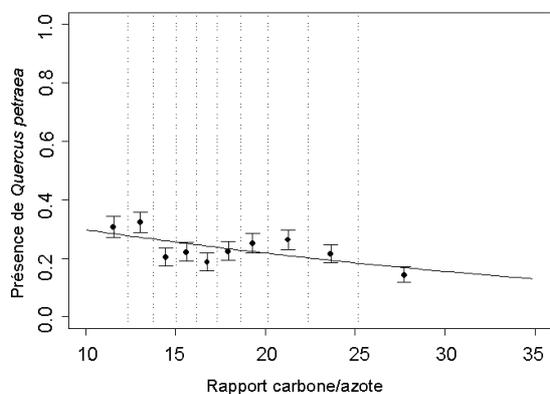


Fig 20 : Fréquence observée et modélisée de Quercus petraea suivant le rapport carbone/azote

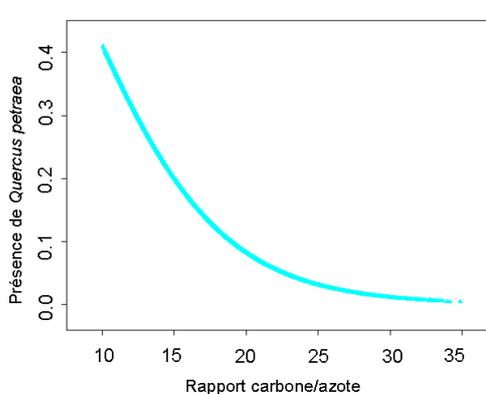


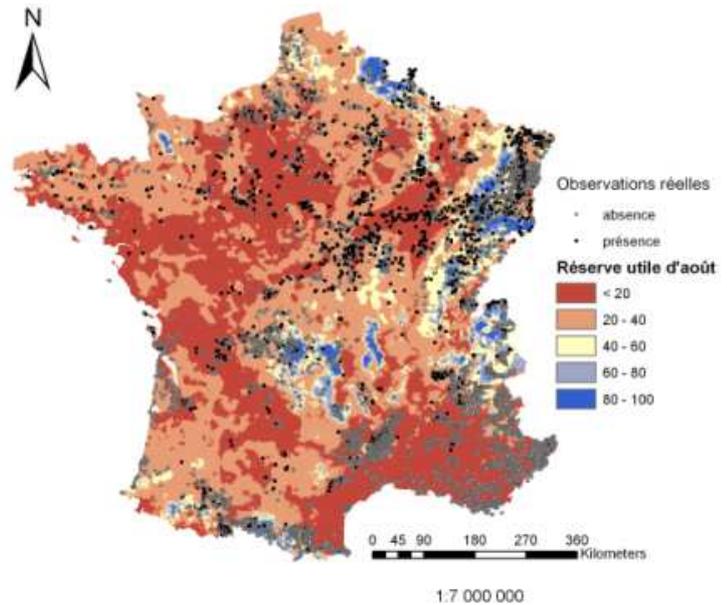
Fig 21 : Effet du rapport carbone/azote décorrélié des autres variables du modèle sur la répartition de Quercus petraea

Les deux courbes de réponses ont le même sens, plus les valeurs prises par le rapport sont faibles et plus les probabilités de présence du chêne sessile sont élevées se qui correspond bien aux connaissances disponibles concernant son écologie. En effet, le chêne sessile est exclu des sols très pauvres.

4. - La réserve utile du mois d'août

Pour les raisons déjà décrites précédemment, les variables liées à l'engorgement sont pour l'instant laissées de côté. Puis apparaît une variable de texture du sol, il s'agit de la proportion d'argile mais l'explication écologique du modèle avec cette variable n'est pas satisfaisante, le choix est alors fait de sélectionner la réserve utile du mois d'août.

Variables explicatives	D ²
Indice d'engorgement permanent	0.2264
Indice d'engorgement total	0.2251
Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à la texture argilo-limoneuse	0.2135
Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à l'engorgement permanent	0.2132
Texture argileuse du sol	0.2093
Indice de Moore	0.2086
Réserve utile du mois d'août	0.2083



Carte 20 : Représentation spatiale de la réserve utile d'août

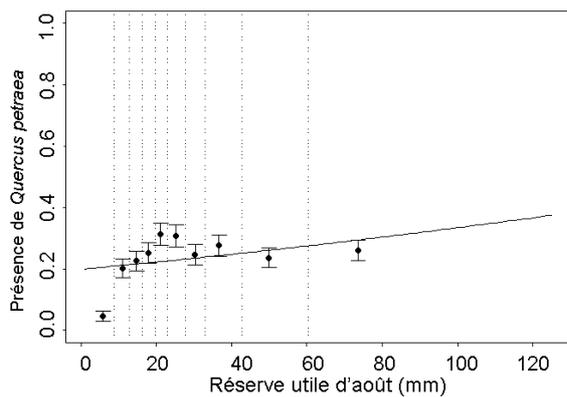


Fig 22 : Fréquence observée et modélisée de *Quercus petraea* suivant la réserve utile du mois d'août

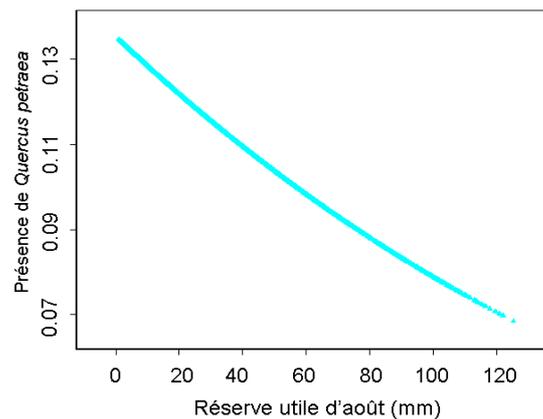


Fig 23 : Effet de la réserve utile du mois d'août décorrélé des autres variables sur la répartition de *Quercus petraea*

Les courbes de réponses n'ont pas le même sens, ce qui signifie que la réserve utile du mois d'août est en corrélation avec une autre variable. Lorsque l'on considère la variable isolée, on remarque que plus la réserve utile en eau du sol est faible (inférieure à 100 mm) et plus la probabilité de présence du chêne diminue. Le chêne sessile résiste relativement bien à la sécheresse et supporte mal l'engorgement.

5. - L'indice d'engorgement permanent

A ce stade de la réalisation du modèle on choisit de sélectionner les variables liées à l'engorgement. Le choix est donc fait de conserver l'indice d'engorgement permanent plutôt que de sélectionner l'indice d'engorgement total. En effet, un essai réalisé précédemment et comparant les courbes de réponses pour les trois variables montre que les variables engorgement permanent et temporaire présentent des courbes de réponses différentes et donc des parts explicatives différentes au modèle de distribution.

Variables explicatives	D ²
Indice d'engorgement total	0.2302
Indice d'engorgement permanent	0.2293
Indice de fluctuation des réserves en eau du sol lié à l'engorgement permanent	0.2225

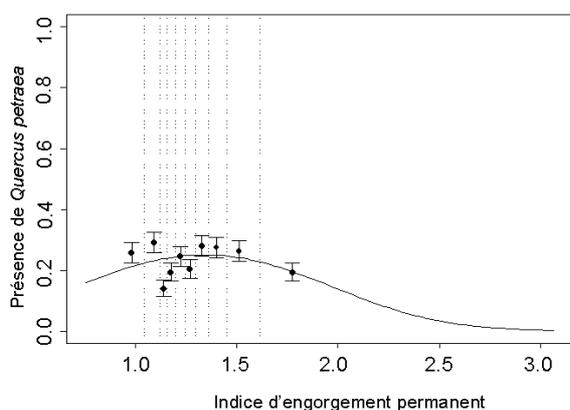


Fig 24 : Fréquence observée et modélisée de *Quercus petraea* suivant l'indice d'engorgement permanent

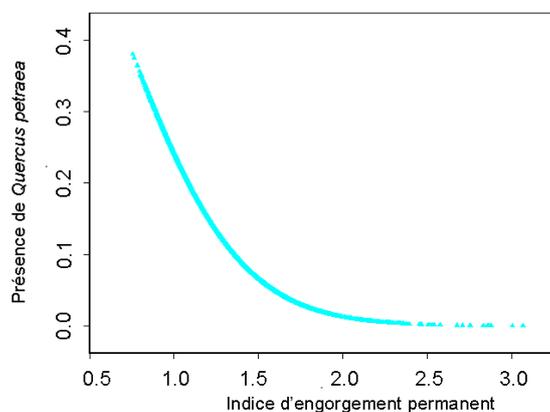


Fig 25 : Effet de l'indice d'engorgement permanent décorrélé des autres variables sur la répartition de *Quercus petraea*

Le chêne sessile ne supportant pas l'engorgement permanent (anoxie racinaire et pas de régénération naturelle), on s'attend à ce que plus l'indice d'engorgement permanent est important et plus la probabilité de présence de *Quercus petraea* est faible. Ceci est parfaitement traduit par la courbe de réponse de la variable isolée.

6. - L'indice d'engorgement temporaire

On choisit l'engorgement temporaire en dernière variable explicative du modèle car cette variable est très largement significative et présente le D² le plus élevé. En effet, d'après son autoécologie, le chêne sessile ne tolère que très peu l'engorgement temporaire.

Variables explicatives	D ²
Indice d'engorgement temporaire	0.2583
Indice d'engorgement total	0.2558
Température moyenne de mai	0.2498
Température moyenne de juin	0.2483

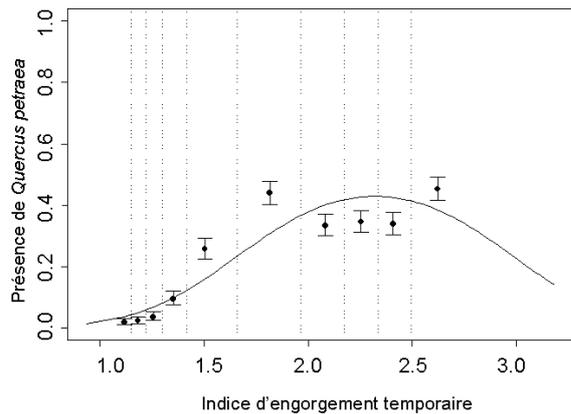


Fig 26 : Fréquence observée et modélisée de *Quercus petraea* suivant l'indice d'engorgement temporaire

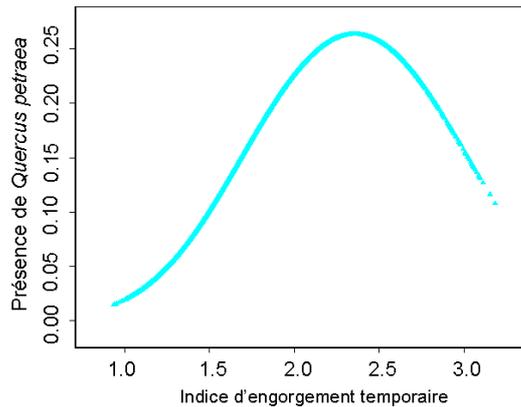


Fig 27 : Effet de l'indice d'engorgement temporaire décorrélé des autres variables sur la répartition de *Quercus petraea*

Le tableau ci-dessus montre que sur la première partie croissante de la courbe, la probabilité de présence du chêne sessile augmente avec l'engorgement. Cela n'a à priori pas d'explication autoécologique puisque le manque d'engorgement temporaire n'est pas une contrainte pour le chêne sessile. On cherche donc à savoir pourquoi *Quercus petraea* est absent des zones à faible engorgement temporaire.

Variables explicatives	Apport explicative de chaque variable au modèle
Température moyenne d'été	9%
pH	7%
Rapport carbone/azote	19%
Réserve utile du mois d'août	19%
Indice d'engorgement permanent	28%
Indice d'engorgement temporaire	18%

Tableau a : Bilan des apports explicatifs individuels de chaque variable au modèle

Les variables d'engorgement et de réserve utile expliquent à elles deux 65 % des probabilités de présences du chêne sessile. Le contenu en eau du sol représente également une part importante dans l'explication de la distribution potentielle de l'essence. L'aspect thermique entre aussi dans le modèle au travers de la variable de température d'été et permet d'expliquer 9 % du modèle. Enfin comme pour le modèle du chêne pédonculé, la richesse du sol est également prise en compte dans le modèle. Dans le cas présent, c'est au travers des variables de pH et du rapport carbone sur azote.

Nous avons vue précédemment que les courbes de réponses des variables sélectionnées étaient différentes selon que la variable soit isolée où tenait compte des interactions avec les autres variables du modèle. La matrice des corrélations ci-dessous résume les corrélations existantes entre les variables.

	Température moyenne d'été	pH	C\N	Réserve utile d'août	Engorgement permanent	Engorgement temporaire
Température moyenne d'été	1.00	0.28	0.03	-0.36	-0.08	0.03
pH	0.28	1.00	-0.52	-0.46	0.03	-0.52
C\N	0.03	-0.52	1.00	0.00	-0.40	-0.02
Réserve utile d'août	-0.36	-0.46	0.00	1.00	0.24	0.27
Engorgement permanent	-0.08	0.03	-0.40	0.24	1.00	0.45
Engorgement temporaire	0.03	-0.52	-0.02	0.27	0.45	1.00

Tableau b : Matrice des corrélations

De la même manière qu'avec le chêne pédonculé, un jeu de validation indépendant a été créé. Il comporte également 533 placettes mais le chêne sessile est présent sur 164 d'entre elles. Celui-ci va permettre de juger de la qualité du modèle. Le tableau suivant synthétise les valeurs prises par les indicateurs de fiabilité pour le jeu de calibration et celui de validation.

	AUC	% de présences et absences bien prédites	% de présences bien prédites	% d'absences bien prédites
Jeu de calibration	0.83	72	78	71
Jeu de validation	0.77	66	83	69

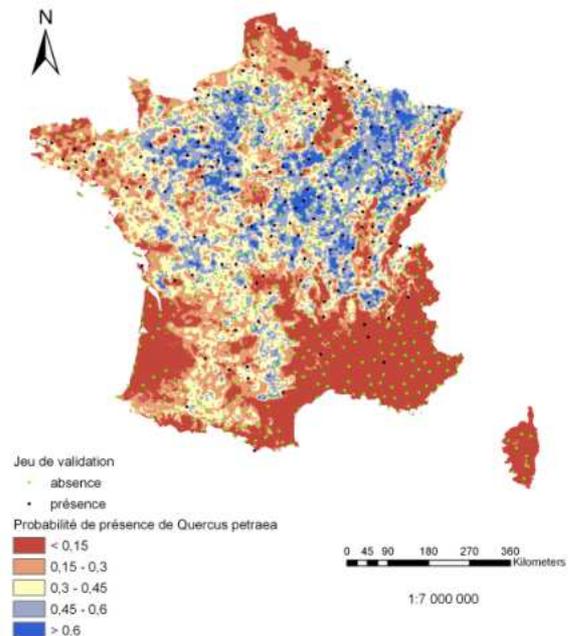
Tableau c : Bilan sur la fiabilité du modèle de distribution potentiel du chêne sessile

La représentation spatiale des probabilités de présences du chêne sessile selon le modèle est présentée ci-dessous. On remarque que les présences et absences de l'essence sont beaucoup plus hétérogènes sur le territoire que ne l'étaient celles du chêne pédonculé. Les présences et absences du jeu de validation figure sur la carte.

L'équation du modèle est la suivante :

$$= 1 / (1 + \exp(-(-45.01377 + 5.392088 * T_{mété} - 0.1548496 * (T_{mété})^2 - 0.6321079 * [pH] - 0.004634847 * (pH)^2 - 0.2049416 * C/N - 0.006039017 * Ru8 - 1.901756 * E_p - 0.4409519 * (E_p)^2 + 7.434883 * E_t - 1.578501 * (E_t)^2)))$$

- Avec : - $T_{mété}$: Température moyenne d'été (en °C)
- C/N : Rapport carbone sur azote
- Ru8 : Réserve utile d'août
- E_p : Indice d'engorgement permanent
- E_t : Indice d'engorgement temporaire



Carte 21 : Modèle de distribution potentielle du chêne sessile

