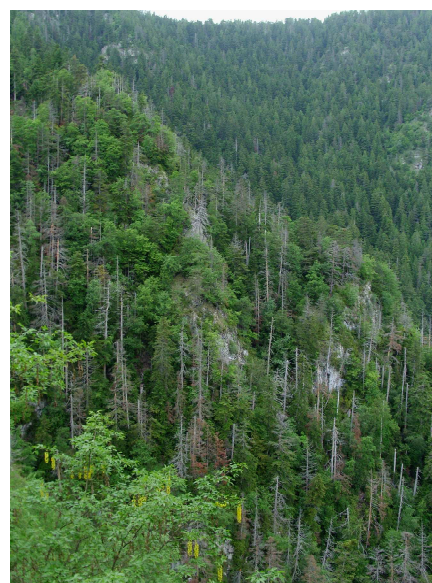


## Essai de détermination des causes de dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné à l'échelle de la France et des Alpes-Maritimes



### MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Grégoire THAUVIN

19<sup>e</sup> promotion (2008-2011)

Maîtres de stage : C. PIEDALLU (LERFoB), J. LADIER (ONF)

Août 2011

Illustrations de couverture :

À gauche, peuplement de Pin sylvestre dépérissant aux environs de Touët-sur-Var, Alpes-Maritimes, France (auteur : Jean Ladier) ; à droite, peuplement de Sapin pectiné dépérissant près de Roquebilière, Alpes-Maritimes, France (auteur : Grégoire Thauvin).

Toutes les illustrations sont de l’auteur de ce mémoire, sauf mention contraire.

# Essai de détermination des causes de dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné à l'échelle de la France et des Alpes-Maritimes

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Grégoire THAUVIN

19<sup>e</sup> promotion (2008-2011)

Maîtres de stage : C. PIEDALLU (LERFoB), J. LADIER (ONF)

Août 2011



## Fiche signalétique d'un travail d'élève à la FIF

|                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech-ENGREF</b>                                                                                       | <b>TRAVAUX D'ÉLÈVE</b>                                                                                                                                                                                                         |
| <b>TITRE :</b> Essai de détermination des causes de dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné à l'échelle de la France et des Alpes-Maritimes | <b>Mots-clés :</b> Dépérissement, modèle GAM (Generalized additive Model), mortalité de branches, mortalité d'arbres, Pin sylvestre, Sapin pectiné, changements climatiques, sécheresses, bilan hydrique, anomalie climatique. |
| <b>AUTEUR(S) :</b> Grégoire THAUVIN                                                                                                                     | <b>Promotion :</b> 19 <sup>e</sup> (2007- 2011)                                                                                                                                                                                |
| <b>Caractéristiques :</b> 1 volume ; 122 pages ; 37 figures, 20 tableaux, 18 annexes.                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                |

| CADRE DU TRAVAIL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                      |                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT :</b> Office national des forêts<br><br><b>Nom des responsables :</b> Christian PIEDALLU (LERFoB), Jean LADIER (ONF)<br><b>Fonction :</b> respectivement : <ul style="list-style-type: none"> <li>— ingénieur en écologie forestière spécialiste en géomatique,</li> <li>— chargé de recherche et développement.</li> </ul> |                                                                                                                                                                                                                      |                                       |
| <b>Nom du correspondant ENGREF (pour un stage long) :</b> Christian PIEDALLU                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                      |                                       |
| <b>Tronc commun</b> <input type="checkbox"/><br><b>Option</b> <input type="checkbox"/><br><b>D. d'approfondissement</b> <input checked="" type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                    | <b>Stage en entreprise</b> <input type="checkbox"/><br><b>Stage à l'étranger</b> <input type="checkbox"/><br><b>Stage fin d'études</b> <input checked="" type="checkbox"/><br><br><b>Date de remise :</b> 22/08/2011 | <b>Autre</b> <input type="checkbox"/> |
| <b>Contrat avec Forêt Services Nancy</b> <input type="checkbox"/> OUI <input checked="" type="checkbox"/> NON                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                      |                                       |

|                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>SUITE À DONNER (réservé au service des études)</b><br><br><input type="checkbox"/> Consultable et diffusable<br><input type="checkbox"/> Confidentiel de façon permanente<br><input type="checkbox"/> Confidentiel jusqu'au      /      /      , puis diffusable |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Résumé :

Le présent travail vise à déterminer les causes des dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné via une approche par modélisation spatiale. Deux jeux de données, différents selon l'échelle considérée, ont été retenus pour caractériser les dépérissements : la mortalité de branches relevée par l'Inventaire forestier national à l'échelle de la France et la mortalité d'arbres relevée par l'Office national des forêts à l'échelle des Alpes-Maritimes. Le lien entre ces dépérissements et les changements climatiques récents est alors principalement étudié grâce (i) à la modélisation mensuelle des variables climatiques et (ii) à l'établissement d'indices spatialisés caractérisant les évolutions du climat.

Abstract:

Based on generalized additive models, the study aims at finding spatial causes for *Pinus sylvestris* L. and *Abies alba* Mill. diebacks. Two response variables were used to assess tree dieback at two scales: the branch mortality measured by the French forest inventory (whole of France) and the tree mortality measured by the French Forestry Commission (Alpes-Maritimes, Mediterranean area). Possible link with recent climate changes was investigated by (i) modelling climate variables, (ii) calculating and mapping climate evolution indexes. Those indexes were tested with other environmental factors characterizing mean reference climate, water supply, soil nutrition, stand structure and competition, as explanatory variables.

## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement Christian Piedallu pour sa disponibilité hors pair tout au long du stage, son appui méthodologique, ses critiques et ses conseils avisés.

Merci à Vincent Perrez (LERFoB), également très à l'écoute, pour son aide précieuse en ce qui concerne la manipulation des systèmes d'informations géographiques (SIG) et la programmation informatique.

Je remercie vivement Jean Ladier (ONF à Manosque) pour son intérêt porté à l'étude malgré l'éloignement géographique ainsi que son encadrement pendant les deux premiers jours de la phase de terrain.

Je souhaite témoigner ma reconnaissance à Michel Vennetier pour l'accueil qu'il m'a réservé le temps d'une journée au CEMAGREF d'Aix-en-Provence pour discuter des résultats, ainsi que pour sa participation au jury de soutenance de stage.

Je tiens également à remercier :

Ingrid Seynaves (LERFoB) pour son aide concernant l'utilisation des données de l'IFN ainsi que Myriam Legay (ONF), Louis-Michel Nageleisen (INRA), Jean-Claude Pierrat (LERFoB), Jean-Claude Gégout (LERFoB) et Éric Lacombe (LERFoB) pour leur implication dans le sujet et les remarques constructives dont ils m'ont fait part au cours du stage.

Merci aux quatre thésards de l'équipe « écologie forestière » (LERFoB) pour leurs conseils et leur humour : Marie Charru, Gabriela Riofrio-Dillon, Pierre Mérian et spécialement Romain Bertrand pour l'autorisation d'utiliser et d'adapter ses algorithmes permettant la calibration des modèles climatiques mensuels.

Je remercie mes collègues stagiaires Jean-Baptiste Richard et Thomas Villiers pour le partage des postes informatiques et je compatis avec eux pour les « plantages » habituels.

Je souhaite aussi témoigner ma reconnaissance aux différents agents de l'agence interdépartementale Alpes-Maritimes-Var de l'ONF rencontrés pendant les deux semaines de terrain pour l'accueil qu'ils m'ont réservé : Émilie Coste-Chareyre, Samuel Lardeux, Pierre Boyer, Caroline Fehlmann et Loïq Agosti.

Enfin, merci à tous ceux qui m'ont soutenu, d'une manière ou d'une autre, dans l'accomplissement de ce travail marquant la fin de mes études d'ingénieur forestier.





## SOMMAIRE

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Remerciements .....                                                                           | 1  |
| Introduction .....                                                                            | 7  |
| 1. Contexte de l'étude .....                                                                  | 8  |
| 1.1. Une inquiétude vis-à-vis des dépérissements forestiers.....                              | 8  |
| 1.1.1. Le dépérissement : une notion bien formalisée .....                                    | 8  |
| 1.1.2. Diverses méthodes de suivi des dépérissements .....                                    | 8  |
| 1.1.3. Des incertitudes quant à l'augmentation du nombre de dépérissements.....               | 9  |
| 1.2. Aperçu des changements climatiques à l'échelle de la France .....                        | 9  |
| 1.2.1. Évolutions des températures et des précipitations.....                                 | 9  |
| 1.2.1.1. Évolutions au cours du XX <sup>e</sup> siècle (d'après Moisselin et al., 2002).....  | 9  |
| 1.2.1.2. Évolutions récentes des précipitations aux deux échelles de l'étude.....             | 10 |
| 1.2.1.3. Évolutions récentes des températures aux deux échelles de l'étude.....               | 10 |
| 1.2.1.4. Prévisions pour le XXI <sup>e</sup> siècle.....                                      | 11 |
| 1.2.2. Impacts des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers .....               | 12 |
| 1.2.2.1. Réponse des arbres aux facteurs climatiques .....                                    | 12 |
| 1.2.2.2. Impacts observés et attendus des changements climatiques sur la croissance.....      | 12 |
| 1.2.2.3. Impacts attendus des changements climatiques sur la distribution des essences...     | 12 |
| 1.2.2.4. Impacts des changements climatiques sur les agents pathogènes et les ravageurs       | 13 |
| 1.3. Le lien entre dépérissements et changements climatiques : pas si simple à démontrer..... | 13 |
| 1.4. Étude des dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné .....                      | 13 |
| 1.4.1. Autécologie des deux essences .....                                                    | 13 |
| 1.4.2. Localisation et évolution des dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné..... | 15 |
| 1.4.2.1. Localisation des principaux dépérissements.....                                      | 15 |
| 1.4.2.2. Évolution temporelle des dépérissements .....                                        | 16 |
| 1.4.3. Cas des dépérissements dans les Alpes du Sud.....                                      | 16 |
| 2. Présentation des hypothèses testées.....                                                   | 17 |
| 3. Méthodologie adoptée.....                                                                  | 18 |
| 3.1. Démarche générale de modélisation .....                                                  | 18 |
| 3.2. Choix et origine des variables à expliquer .....                                         | 18 |
| 3.2.1. Variables caractérisant les dépérissements à l'échelle de la France .....              | 20 |
| 3.2.1.1. Les données du DSF.....                                                              | 20 |

|          |                                                                                                           |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1.2. | <i>Les données de l'IFN</i> .....                                                                         | 20 |
| 3.2.1.3. | <i>Calcul de l'indice de mortalité de branches avec les données de l'IFN</i> .....                        | 21 |
| 3.2.2.   | Variables caractérisant les dépérissements à l'échelle des Alpes-Maritimes ..                             | 22 |
| 3.2.2.1. | <i>Nature des observations effectuées par l'ONF</i> .....                                                 | 22 |
| 3.2.2.2. | <i>Calcul d'un indice de mortalité d'arbres avec les données de l'ONF</i> .....                           | 22 |
| 3.3.     | Choix et origine des variables explicatives .....                                                         | 23 |
| 3.3.1.   | Variables caractérisant les peuplements.....                                                              | 23 |
| 3.3.1.1. | <i>Variables caractérisant l'accessibilité</i> .....                                                      | 24 |
| 3.3.1.2. | <i>Variables caractérisant la structure des peuplements et la compétition</i> .....                       | 24 |
| 3.3.2.   | Variables climatiques et édaphiques de référence (moyennes 1961-1990) .....                               | 24 |
| 3.3.2.1. | <i>Les variables climatiques</i> .....                                                                    | 25 |
| 3.3.2.2. | <i>Les variables édaphiques</i> .....                                                                     | 26 |
| 3.3.3.   | Autres variables écologiques disponibles au LERFoB .....                                                  | 26 |
| 3.3.3.1. | <i>Les Variables trophiques</i> .....                                                                     | 26 |
| 3.3.3.2. | <i>Les Variables hydriques et topographiques</i> .....                                                    | 27 |
| 3.3.4.   | Variables caractérisant les évolutions du climat .....                                                    | 27 |
| 3.3.4.1. | <i>Calcul des variables climatiques et édaphiques mensuelles</i> .....                                    | 27 |
| 3.3.4.2. | <i>Calcul des anomalies mensuelles simples ou relatives</i> .....                                         | 29 |
| 3.3.4.3. | <i>Calcul des indices d'évolution climatique</i> .....                                                    | 29 |
| 3.4.     | Démarche statistique de modélisation.....                                                                 | 32 |
| 3.4.1.   | Hypothèses de base .....                                                                                  | 32 |
| 3.4.2.   | La méthode du modèle additif généralisé .....                                                             | 32 |
| 3.4.3.   | Principe de sélection des variables.....                                                                  | 33 |
| 3.4.4.   | Évaluation de la qualité des modèles .....                                                                | 34 |
| 3.4.5.   | Interprétation des modèles .....                                                                          | 34 |
| 3.4.5.1. | <i>Graphiques d'interprétation</i> .....                                                                  | 34 |
| 3.4.5.2. | <i>Cartes d'interprétation</i> .....                                                                      | 34 |
| 3.5.     | Protocole de terrain complémentaire à la modélisation.....                                                | 35 |
| 4.       | Résultats .....                                                                                           | 35 |
| 4.1.     | Caractéristiques écologiques des placettes « saines » ou « dépérissantes » à l'échelle de la France ..... | 35 |
| 4.2.     | Modèles de dépérissement à l'échelle de la France .....                                                   | 36 |
| 4.2.1.   | Effet du seuil de mortalité de branches considéré.....                                                    | 36 |
| 4.2.2.   | Modèle de dépérissement du Pin sylvestre .....                                                            | 37 |
| 4.2.2.1. | <i>Variables sélectionnées</i> .....                                                                      | 37 |

|          |                                                                                                          |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.2.2. | <i>Corrélations entre les variables.....</i>                                                             | 39 |
| 4.2.2.3. | <i>Comparaison du pouvoir prédictif du climat moyen à celui de ses évolutions.....</i>                   | 39 |
| 4.2.2.4. | <i>Spatialisation du modèle.....</i>                                                                     | 40 |
| 4.2.3.   | Modèle de dépérissement du Sapin pectiné .....                                                           | 43 |
| 4.2.3.1. | <i>Variables sélectionnées.....</i>                                                                      | 43 |
| 4.2.3.2. | <i>Corrélations entre les variables.....</i>                                                             | 44 |
| 4.2.3.3. | <i>Comparaison du pouvoir prédictif du climat moyen à celui de ses évolutions.....</i>                   | 44 |
| 4.2.3.4. | <i>Spatialisation du modèle.....</i>                                                                     | 45 |
| 4.3.     | Caractéristiques écologiques des peuplements sains ou dépérissants à l'échelle des Alpes-Maritimes ..... | 48 |
| 4.4.     | Modèles de dépérissement à l'échelle des Alpes-Maritimes .....                                           | 49 |
| 4.4.1.   | Modèle de dépérissement du Pin sylvestre .....                                                           | 49 |
| 4.4.1.1. | <i>Variables sélectionnées.....</i>                                                                      | 49 |
| 4.4.1.2. | <i>Corrélations entre variables .....</i>                                                                | 52 |
| 4.4.1.3. | <i>Spatialisation du modèle.....</i>                                                                     | 52 |
| 4.4.2.   | Modèle de dépérissement du Sapin pectiné .....                                                           | 54 |
| 4.4.2.1. | <i>Variables sélectionnées.....</i>                                                                      | 54 |
| 4.4.2.2. | <i>Corrélations entre variables .....</i>                                                                | 55 |
| 4.4.2.3. | <i>Spatialisation .....</i>                                                                              | 56 |
| 4.5.     | Comparaison des modèles nationaux et locaux sur le département des Alpes-Maritimes.....                  | 56 |
| 4.5.1.   | Cas des modèles de dépérissement du Pin sylvestre .....                                                  | 58 |
| 4.5.2.   | Cas des modèles de dépérissement du Sapin pectiné .....                                                  | 59 |
| 5.       | Discussion .....                                                                                         | 61 |
| 5.1.     | Le changement climatique a-t-il un impact sur les dépérissements ? .....                                 | 61 |
| 5.2.     | Les variables « peuplement » sont-elles utiles pour modéliser les dépérissements ? .....                 | 62 |
| 5.3.     | Quel est l'intérêt d'une étude à l'échelle des Alpes-Maritimes ? .....                                   | 62 |
| 5.4.     | Les limites de l'étude .....                                                                             | 63 |
| 5.5.     | Apports des cartes élaborées .....                                                                       | 65 |
|          | Conclusion.....                                                                                          | 66 |
|          | Références bibliographiques .....                                                                        | 67 |
|          | Contacts .....                                                                                           | 71 |
|          | Table des annexes.....                                                                                   | 73 |

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Annexe 1 : La « spirale du déclin » de Manion (1981) adaptée aux conditions françaises. ....                                                                            | 75  |
| Annexe 2 : Jeux de données utilisés pour la description des évolutions de précipitations et de température. ....                                                        | 77  |
| Annexe 3 : Épisodes de dépérissement du <i>Pin sylvestre</i> et du <i>Sapin pectiné</i> constatés en Europe depuis le milieu du <sup>xx</sup> <sup>e</sup> siècle. .... | 79  |
| Annexe 4 : Validation du modèle Helios de radiations. ....                                                                                                              | 81  |
| Annexe 5 : Validation des modèles mensuels de température. ....                                                                                                         | 83  |
| Annexe 6 : Validation des modèles mensuels de précipitations. ....                                                                                                      | 85  |
| Annexe 7 : Évolution annuelle des précipitations aux deux échelles de l'étude. ....                                                                                     | 87  |
| Annexe 8 : Évolution et annuelle des températures aux deux échelles de l'étude. ....                                                                                    | 89  |
| Annexe 9 : Cartes des aires de répartition du <i>Pin sylvestre</i> et du <i>Sapin pectiné</i> à l'échelle de l'Europe.....                                              | 91  |
| Annexe 10 : Effectif et localisation des placettes IFN « dépérissantes » en fonction du seuil de mortalité de branches considéré. ....                                  | 93  |
| Annexe 11 : Cartographie des mortalités d'arbres dans le département des Alpes-Maritimes...                                                                             | 95  |
| Annexe 12 : Liste exhaustive des variables climatiques et édaphiques mensuelles spatialisées.                                                                           | 97  |
| Annexe 13 : Comparaison du pouvoir prédictif du climat moyen à celui de ses évolutions à l'échelle des Alpes-Maritimes pour les deux essences étudiées. ....            | 99  |
| Annexe 14 : Description du protocole de terrain. ....                                                                                                                   | 101 |
| Annexe 15 : Observations effectuées sur les placettes de Touët-sur-Var (Alpes-Maritimes) pour le <i>Pin sylvestre</i> . ....                                            | 107 |
| Annexe 16 : Observations effectuées sur les placettes de Roquebilière (Alpes-Maritimes) pour le <i>Sapin pectiné</i> . ....                                             | 109 |
| Annexe 17 : Comparaison du pouvoir prédictif des différents indices d'évolution du climat..                                                                             | 111 |
| Annexe 18 : Comparaison du pouvoir prédictif des variables édaphiques en fonction de leur méthode de calcul. ....                                                       | 113 |

## INTRODUCTION

À l'échelle d'un massif forestier, des ralentissements de croissance sont parfois observés pendant plusieurs années, pouvant conduire à des mortalités d'arbres, sans qu'une cause unique puisse être clairement identifiée. On parle alors de *dépérissements forestiers*. Ces trente dernières années, la littérature forestière française a régulièrement fait mention de dépérissements affectant diverses essences, aussi bien feuillues que résineuses. Le Hêtre dans le Doubs (Schaeffer, 1955), le Chêne pédonculé dans le centre de la France (Delatour, 1983) et le Sapin pectiné dans le Nord-Est (Becker, 1994) sont souvent cités. Tous ces dépérissements génèrent une inquiétude croissante chez les gestionnaires forestiers (Riou-Nivert, 2008), d'autant plus qu'un réchauffement climatique sans précédent est constaté (GIEC, 2007). Des questions se posent alors sur le lien qui pourrait exister entre les phénomènes de dépérissement observés actuellement et les évolutions du climat, mais aucune étude ne semble pour l'instant avoir démontré de liens de cause à effet.

En France, le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) et le Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) occupent une place importante dans l'économie. En 2010, d'après l'Inventaire forestier national (IFN), ces deux essences se situent respectivement aux 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> rang national en termes de production en volume de bois résineux (après l'Épicéa commun). En région méditerranéenne, le Pin sylvestre passe même au 1<sup>er</sup> rang. Pin sylvestre et Sapin pectiné jouent aussi localement des rôles écologiques et patrimoniaux non négligeables. Le Pin sylvestre, par exemple, constitue dans les Alpes du Sud d'importants boisements de protection (Sardin, 1997). De fortes inquiétudes se font ressentir au sujet de ces deux essences car de nombreux dépérissements sont observés depuis la canicule de 2003, notamment dans le Sud de la France (Pyrénées et Alpes du Sud). Afin de mieux comprendre leurs causes et leur évolution, le département des Alpes-Maritimes finance depuis 2007 un observatoire des dépérissements forestiers mis en œuvre par l'Office national des forêts (ONF). À partir des observations effectuées en 2008, une étude a déjà eu lieu afin de préciser les contextes écologiques dans lesquels les dépérissements sont majoritairement constatés (Lelou, 2010). Faute de données climatiques fines temporellement et surtout spatialement, cette étude n'a permis d'établir un lien avec d'éventuelles évolutions récentes du climat. De même, l'impact des caractéristiques des peuplements n'a pas été étudié étant donné l'absence de données suffisantes disponibles.

Depuis quelques années, des modèles spatialisés des différents facteurs écologiques sont développés par le Laboratoire d'étude de la ressource forêt-bois (LERFoB) sous forme de cartes numériques. Certains de ces modèles permettent d'estimer les variables climatiques moyennes (précipitations, températures, rayonnement solaire, évapotranspiration, bilans en eau) en tout point du territoire métropolitain à un pas de temps mensuel, annuel ou interannuel (Piedallu *et al.*, 2011 ; Bertrand *et al.*, 2011).

*Ces modèles permettent-ils d'établir un lien entre les dépérissements observés des deux essences et les évolutions du climat ? Comment caractériser ces évolutions ? Sur quel intervalle de temps ? Ont-elles finalement plus de pouvoir explicatif des dépérissements que les autres facteurs écologiques ou encore que les facteurs liés aux peuplements ?*

Grâce aux variables modélisées par le LERFoB et aux jeux de données caractérisant le dépérissement collectés par l'IFN et l'ONF, il est désormais possible de déterminer le rôle des évolutions récentes du climat par rapport à celui de la structure des peuplements et des conditions stationnelles dans les dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné. Deux échelles de travail, complémentaires, sont retenues :

- la *France métropolitaine*, seule échelle où des variables dendrométriques et liées à la gestion forestière sont disponibles à partir des données de l'IFN. Le taux de mortalité des branches (données IFN) est alors utilisé pour caractériser les dépérissements ;

- le département des *Alpes-Maritimes*, échelle plus appropriée pour faire ressortir la part des facteurs stationnels<sup>1</sup> dans les dépérissements. Le taux de mortalité des arbres (observatoire mené par l'ONF) est alors utilisé pour caractériser les dépérissements.

Avant d'aborder le cœur même de l'étude, il est fait un point sur les dépérissements et le changement climatique puis le cas spécifique des dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné est introduit. Les hypothèses testées dans l'étude sont ensuite détaillées avant de présenter les données utilisées et la méthodologie mise en œuvre. Les résultats pour chaque essence sont alors présentés aux deux échelles de l'étude puis comparés entre eux avant d'être finalement discutés.

## 1. Contexte de l'étude

### 1.1. Une inquiétude vis-à-vis des dépérissements forestiers

#### 1.1.1. Le dépérissement : une notion bien formalisée

Tous les problèmes sanitaires ne sont pas forcément des dépérissements. Le concept de *dépérissement* a en effet été formalisé progressivement ces trente dernières années et désigne aujourd'hui un processus multifactoriel de dégradation de l'état de santé d'une essence forestière qui se traduit, sur les arbres, par des symptômes tels que des réductions de la quantité et de la qualité du feuillage, des réductions de croissance voire des mortalités d'organes pérennes (Nageleisen, 2010). La mortalité de l'arbre n'est pas systématique. Un dépérissement se définit ainsi par opposition aux baisses de vitalité provoquées par une seule cause biotique ou abiotique.

Les facteurs en cause sont souvent classés en trois catégories (*cf.* annexe 1). Il y a les facteurs prédisposants, les facteurs déclenchants et les facteurs aggravants. Certains d'entre eux sont interchangeables ; ils peuvent être, par exemple, prédisposants ou déclenchants en fonction de leur intensité.

Enfin, il s'agit de phénomènes évolutifs dans l'espace et dans le temps, ce qui les rend d'autant plus complexes (Hasenauer *et al.*, 1999). Les facteurs impliqués dans un dépérissement peuvent ne pas être les mêmes à deux endroits différents. Pas étonnant alors, comme le signale Landmann (1994), que les dépérissements forestiers n'aient jamais été des sujets consensuels.

#### 1.1.2. Diverses méthodes de suivi des dépérissements

Les dépérissements sont des phénomènes qui peuvent évoluer rapidement et sur de vastes étendues. Leur suivi, spatial et temporel à la fois, s'avère difficile et coûteux. Il peut se faire par observations directes sur le terrain, par photo-interprétation ou par télédétection satellitale selon les moyens disponibles et les objectifs recherchés.

Les observations depuis le sol sont couramment faites sur des placettes. Elles nécessitent une calibration entre les différents observateurs. L'observation des symptômes liés aux dépérissements, à l'échelle de l'arbre ou du peuplement, est en effet subjective. De plus, à l'échelle de l'arbre, les symptômes varient d'une région à l'autre, d'où la nécessité de se référer localement à des arbres témoins. Ainsi, dans les Pyrénées pour le Sapin pectiné, les chloroses seraient plus fréquentes que les pertes foliaires et inversement dans les Alpes (Oliva & Colinas, 2007).

L'approche par télédétection, moins précise — bien qu'elle puisse descendre à une résolution inférieure à 20 m —, est particulièrement recommandée pour décrire l'état de la végétation à large échelle (département). Les images satellitales permettent de calculer un indice de végétation normalisé

---

<sup>1</sup> Facteurs environnementaux moyens qui déterminent les possibilités d'installation et de croissance des arbres.

(*normalized difference vegetation index*, NDVI) grâce aux radiations proches de l'infrarouge. Cet indice est fonction du taux de recouvrement végétal, de la quantité de biomasse et de l'activité photosynthétique. Il est calibré à l'échelle régionale pour une essence donnée. Par croisement avec la cartographie des peuplements existants, il permet de suivre spatialement et temporellement l'état de santé des forêts et a l'énorme avantage de laisser peu de place à la subjectivité (Vennetier *et al.*, 2008).

### 1.1.3. Des incertitudes quant à l'augmentation du nombre de dépérissements

Les travaux scientifiques s'intéressant à des dépérissements à l'échelle des régions naturelles sont de plus en plus nombreux. Plus de cent-vingt exemples ont été recensés à travers le monde par Allen (2009), montrant apparemment une augmentation de la mortalité des forêts sur tous les continents. Cependant, à l'échelle mondiale, il est difficile de savoir avec certitude si le développement rapide de la littérature sur le sujet est le signe d'un intérêt accru de la communauté scientifique vis-à-vis de ces problématiques ou d'une réelle progression des dépérissements (Allen *et al.*, 2009). Bien souvent, les conclusions concernant les tendances de mortalité des forêts sont fortement limitées ou entachées d'incertitudes du fait d'un manque d'observations homogénéisées à large échelle et sur le long terme. Une étude récente confirmerait néanmoins l'augmentation des défoliations à l'échelle de l'Europe (Carnicer *et al.*, 2010).

L'incertitude actuelle concernant l'évolution des dépérissements forestiers ravive des inquiétudes apparues il y a une trentaine d'années en Europe lors d'importants dépérissements observés sur le Sapin pectiné. L'acidification des sols liée aux dépôts azotés atmosphériques avait alors été mise en cause (Landman et Bonneau, 1994).

Aujourd'hui, la communauté scientifique s'interroge sur le lien entre les changements climatiques mis en évidence à l'échelle mondiale et les dépérissements. Dans la suite, les évolutions récentes du climat sont par conséquent décrites aux deux échelles de l'étude afin de comprendre l'ampleur de leurs impacts potentiels sur les forêts et plus spécifiquement sur les essences étudiées.

## 1.2. Aperçu des changements climatiques à l'échelle de la France

### 1.2.1. Évolutions des températures et des précipitations

#### 1.2.1.1. Évolutions au cours du *xx*<sup>e</sup> siècle (d'après Moisselin *et al.*, 2002)

Une augmentation de la température moyenne, allant de + 0,7 à + 1,1 °C selon les régions, a été observée au cours du *xx*<sup>e</sup> siècle. Elle est supérieure à la moyenne mondiale sur la même période (+ 0,7 °C). Ce réchauffement moyen est caractérisé par des températures minimales qui augmentent plus que les températures maximales. Par ailleurs, les contrastes saisonniers se sont aussi accentués : l'été s'est plus réchauffé que l'hiver.

Concernant les pluies, une hausse de la pluviométrie moyenne a été constatée, excepté pour le Sud de la France (Sud de la Lozère, Gironde, Hautes-Pyrénées et Bouches-du-Rhône) où celle-ci a diminué, mais de manière non significative. Comme pour les températures, les auteurs décrivent une augmentation des contrastes saisonniers, avec des hivers plus arrosés et des étés plus secs.

L'étude de l'évolution du climat en France par Moisselin *et al.* s'arrête en 2001. Or, les dépérissements du Pin et du Sapin observés dans le Sud de la France sont apparus à partir de 2003. Afin d'étudier le lien possible de ces dépérissements avec des évolutions du climat depuis cette date, l'évolution spatiale et temporelle des températures et des précipitations entre 1990 et 2008 est décrite aux deux échelles de l'étude à partir des postes Météo-France (*cf.* annexe 2)

### 1.2.1.2. Évolutions récentes des précipitations aux deux échelles de l'étude

Les évolutions du climat sont décrites par différence avec la moyenne sur la période de référence 1961-1990. Ces écarts sont désignés sous le terme d'*anomalies climatiques*.

La figure 1A représente les anomalies annuelles moyennes de précipitations au niveau des postes Météo-France sur l'intervalle 1990-2008. Celles-ci montrent que les précipitations ont évolué de façon différente en fonction des régions. Elles semblent avoir diminué dans le Sud-Ouest, les Pyrénées-Orientales, le Nord-Est du Massif central et le Sud-Est méditerranéen. Ailleurs, elles ont plutôt augmenté. Au niveau des Alpes-Maritimes, ce sont les postes les plus proches du littoral qui ont enregistré les plus fortes diminutions de précipitations. Les postes plus en altitude, situés dans les Alpes ont, quant à eux, enregistré une augmentation des précipitations moyennes.

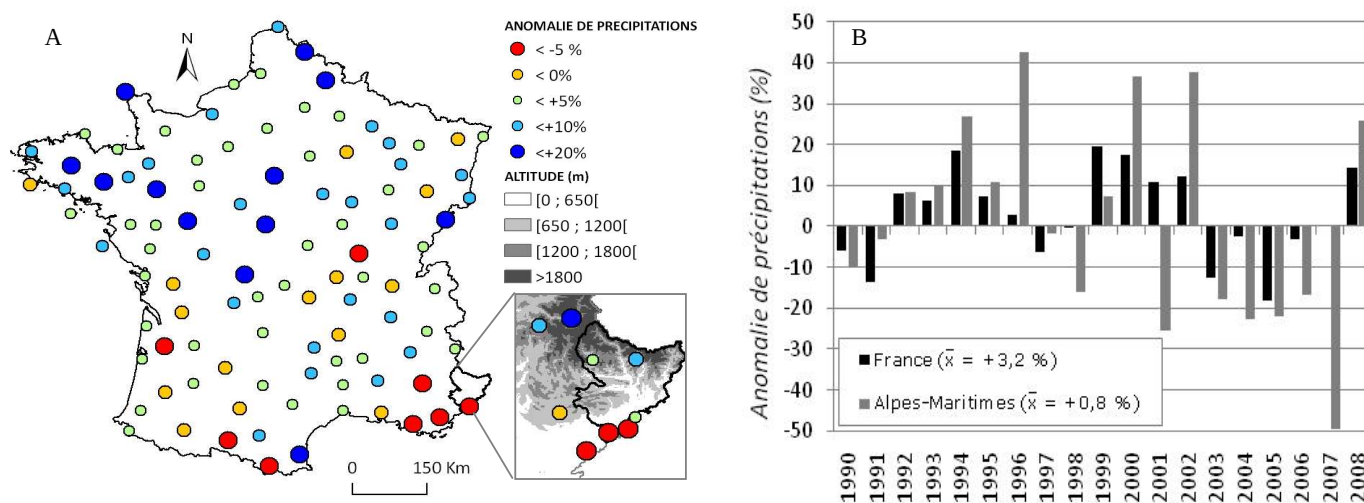


Figure 1 — Cartographie des anomalies annuelles moyennes de précipitations sur l'intervalle 1990-2008 (A) et évolution interannuelle des anomalies de précipitations sur le même intervalle de temps (B). Les anomalies sont calculées par rapport à la période de référence 1961-1990 (France : 101 postes Météo-France répartis de façon homogène ; Alpes-Maritimes : 9 postes Météo-France).

La figure 1B représente l'évolution interannuelle des anomalies de précipitations à l'échelle de la France et des Alpes-Maritimes. À l'échelle nationale, un bon équilibre entre années déficitaires et années excédentaires, en termes de précipitations, est observé, que ce soit en nombre (8 années déficitaires contre 10 années excédentaires) ou en intensité. Les précipitations moyennes annuelles sur l'intervalle 1990-2008 sont en légère hausse (+ 3,2 %). Bien que l'intervalle de temps considéré soit trop court pour en conclure un effet du changement climatique, ces résultats concordent avec les tendances décrites par Moisselin *et al.* sur le *xx*<sup>e</sup> siècle (*cf.* § 1.2.1.1). À l'échelle des Alpes-Maritimes, les années déficitaires en pluviométrie sont plus nombreuses. L'augmentation moyenne des précipitations annuelles est d'ailleurs plus faible (+ 0,8 %). Les années 1998, 2001, et 2003 à 2007 ont été en très sèches sur le département.

Pour plus de détails, les anomalies mensuelles de précipitations sur l'intervalle 1990-2007 sont présentées aux deux échelles de l'étude à l'annexe 7.

### 1.2.1.3. Évolutions récentes des températures aux deux échelles de l'étude

La figure 2A et la figure 2B représentent respectivement les anomalies moyennes de température sur l'intervalle 1990-2008 au niveau des postes Météo-France et leur évolution



interannuelle aux deux échelles de l'étude (pour plus de détails, l'évolution mensuelle est présentée à l'annexe 8). À l'échelle de la France, l'évolution des températures entre 1990 et 2008 a été assez homogène spatialement, avec un réchauffement qui semble moins fort au Sud qu'au Nord. Mais comme la température moyenne est plus élevée dans le Sud, les conséquences sur la végétation peuvent tout de même y avoir été importantes.

Les années 2003, 2006 et 2007 ont été extraordinairement chaudes partout en France, dépassant de plus de 1,2 °C la température moyenne sur la période de référence 1961-1990.

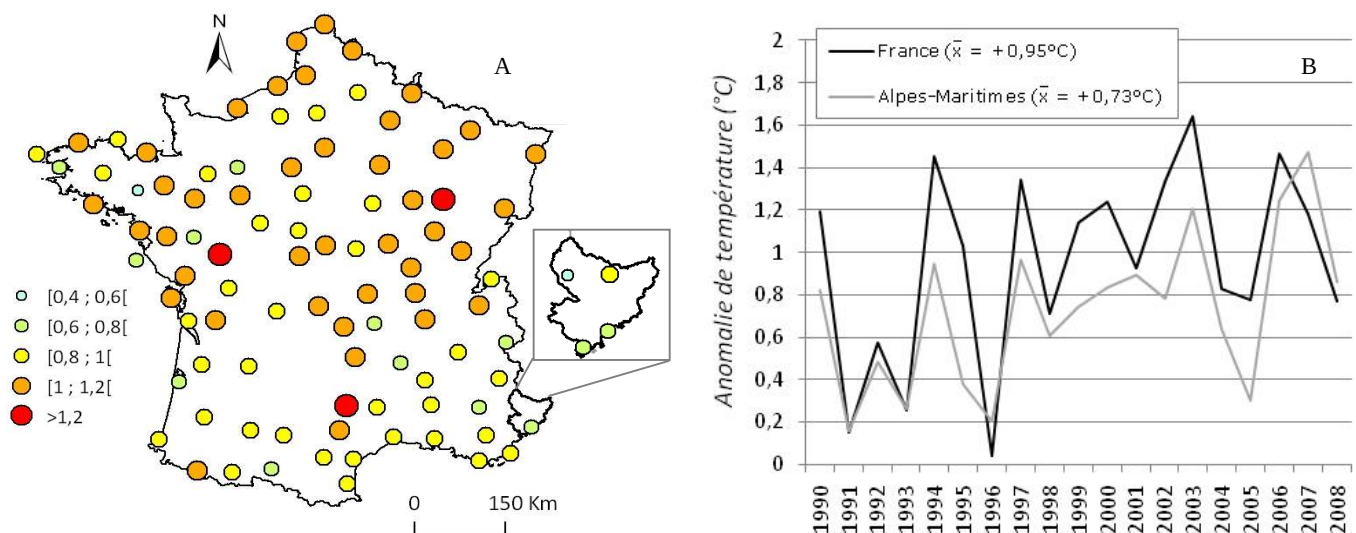


Figure 2 — Cartographie des anomalies moyennes de température sur l'intervalle 1990-2008 (A) et évolution interannuelle des anomalies de température sur le même intervalle de temps (B). Les anomalies sont calculées par rapport à la période de référence 1961-1990 (France : 96 postes Météo-France répartis de façon homogène ; Alpes-Maritimes : 6 postes Météo-France).

Ces résultats confirment les tendances de réchauffement climatique déjà observées (cf. 1.2.1.1). Globalement, l'évolution des précipitations est plus hétérogène spatialement que celle des températures. Après 1996, les anomalies de températures et de précipitations sont presque toutes défavorables pour la végétation et l'intervalle 2003-2007 est marqué par une succession d'années extraordinairement chaudes et sèches.

#### 1.2.1.4. Prévisions pour le *xxi*<sup>e</sup> siècle

Les modifications observées du climat sont probablement les prémices de changements climatiques futurs plus importants encore. En France, d'ici 2070, l'augmentation de la température moyenne annuelle pourrait être de l'ordre de + 2 à + 3,5 °C, le Sud se réchauffant plus que le Nord (Ducousso et Déqué, 2005). À cela devrait s'ajouter une augmentation de la pluviométrie hivernale et une baisse de la pluviométrie estivale. Par ailleurs, la fréquence des épisodes de sécheresse devrait augmenter (GIEC, 2007).

Les évolutions du climat observées ont déjà des conséquences visibles sur les forêts. Étant donné les prévisions du changement climatique pour le *xxi*<sup>e</sup>, des conséquences encore plus importantes sont attendues.

## 1.2.2. Impacts des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers

### 1.2.2.1. Réponse des arbres aux facteurs climatiques

La croissance des essences forestières est fortement liée à la température et aux précipitations (Nemani *et al.*, 2003 ; Bontemps *et al.*, 2010 ; Charru, 2010). La température influe par exemple sur la durée de la période de végétation en avançant le débourrement et en retardant la chute des feuilles (Menzel, 2003). Les précipitations, couplées aux températures et aux conditions édaphiques locales, déterminent le stock d'eau disponible pour les arbres, ainsi que la vitesse à laquelle ce stock s'épuise et se reconstitue (Bréda *et al.*, 2004, 2008). Or, l'eau est un des facteurs majeurs qui régule la physiologie des végétaux, et donc leur croissance. Par conséquent, l'aire de répartition des essences forestières dépend elle aussi fortement des précipitations et des températures.

### 1.2.2.2. Impacts observés et attendus des changements climatiques sur la croissance

- Impacts observés

De nombreuses études en Europe et en Amérique montrent, qu'en climat tempéré, la hausse des températures a favorisé la croissance en hauteur et en diamètre (Bontemps *et al.*, 2005 ; Allen 2009). Mais les arbres se retrouvent plus fréquemment exposés aux gelées tardives du fait d'un débourrement plus précoce (Aussenac et Guehl, 2005) et la floraison ou bien les pousses de l'année peuvent alors être compromises. L'augmentation des températures estivales et automnales pourrait aussi engendrer un retard des arbres dans leur préparation aux froids hivernaux. L'amélioration apparente des conditions de croissance s'accompagne finalement d'une vulnérabilité plus importante des arbres aux aléas climatiques.

Par ailleurs, lors des sécheresses, le flux de sève brute au sein des tissus végétaux peut s'interrompre, c'est ce qu'on appelle la cavitation (Bréda & Badeau, 2008). La transpiration diminue et ne permet plus de refroidir les feuilles et les bourgeons qui peuvent alors être endommagés par brûlure. Les arbres subissent donc des pertes foliaires et une baisse de croissance les années suivantes (Thabeet *et al.*, 2009). La diminution des précipitations dans certaines régions, cumulée à l'augmentation des températures, semble donc être la cause de certains dépérissements forestiers observés.

- Impacts attendus

Étant donné ces observations, des modèles de croissance des arbres ont été élaborés en forêt tempérée productive. Les résultats montrent que des baisses importantes de croissance pourraient avoir lieu d'ici 2100 en lien avec les évolutions climatiques prédites. Ainsi, dans des forêts californiennes de conifères, ce sont des baisses de productivité de 19 à 25 % qui sont attendues d'ici 2100 (Battles *et al.*, 2008). Baisses qui, selon ces mêmes modèles, s'accompagneraient d'une probabilité accrue de dépérissement.

### 1.2.2.3. Impacts attendus des changements climatiques sur la distribution des essences

L'évolution de la répartition des essences forestières avec le changement climatique a été modélisée et montre qu'une régression des aires de distribution potentielle des espèces septentrionales au profit des espèces thermophiles devrait avoir lieu d'ici la fin du siècle, ainsi qu'une remontée en altitude de la plupart des espèces (Badeau *et al.*, 2005 ; Thuiller *et al.*, 2008 ; Piedallu *et al.*, 2010). Logiquement, cela devrait se traduire par des mortalités importantes dans les zones de recul.

#### 1.2.2.4. Impacts des changements climatiques sur les agents pathogènes et les ravageurs

Le climat détermine fortement la dynamique des agents pathogènes et des ravageurs. Bien que celle-ci soit difficilement modélisable — car elle dépend en partie d'évènements stochastiques —, une multiplication des cycles biologiques ainsi qu'une arrivée de nouvelles espèces sont attendues avec le réchauffement climatique (Van Mantgem *et al.*, 2009). Or, ces agents pathogènes et ces ravageurs peuvent avoir des impacts majeurs en termes de dépérissement.

Le changement climatique semble donc être étroitement lié aux dépérissements à différents niveaux. La nature du lien entre changement climatique et dépérissement est donc posée, mais aucune étude n'a pour l'instant réussi à la mettre en évidence de façon formelle. Il est au mieux suggéré que le changement climatique serait à l'origine de certains dépérissements.

### 1.3. Le lien entre dépérissements et changements climatiques : pas si simple à démontrer

Il existe, en effet, de nombreuses difficultés méthodologiques pour pouvoir établir un lien de cause à effet entre les changements climatiques et les dépérissements. Le manque de suivi des dépérissements de façon homogène dans le temps et dans l'espace a été évoqué au § 1.1.3. À cela s'ajoute un manque de description spatiale et temporelle fine des évolutions climatiques moyennes et extrêmes. Il est donc souvent difficile de déterminer les séquences climatiques locales qui pourraient conduire aux dépérissements.

La dendrochronologie permet d'étudier efficacement l'impact du climat sur la croissance d'une essence. Cependant, le lien entre ralentissements de croissance et dépérissements n'est pas toujours évident. En effet, il semblerait dans certains cas, que les stations où la croissance est optimale correspondent aussi aux stations où la probabilité de dépérissement est forte (Becker *et al.*, 1994).

En France, la question du lien entre changement climatique et dépérissement est posée actuellement pour un grand nombre d'essences dont le Sapin pectiné et le Pin sylvestre.

### 1.4. Étude des dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné

#### 1.4.1. Autécologie des deux essences

- Deux essences au tempérament montagnard

Pin sylvestre et Sapin pectiné ont des préférences écologiques communes. En France, tous deux sont à leur optimum écologique dans l'étage montagnard. Par conséquent, ils sont essentiellement présents dans les Pyrénées, le Massif central, les Alpes et les Vosges. Le tableau 1 présente l'autécologie de ces deux essences.

Le Sapin serait une essence d'origine méditerranéenne, qui serait remontée vers le nord avec le réchauffement du climat (Rameau *et al.*, 1989). Il est présent le plus souvent en association avec le hêtre. L'annexe 9 présente son aire de répartition à l'échelle européenne. Le Pin sylvestre, essence rustique par excellence, présente une aire naturelle très vaste qui s'étend de l'Espagne au Nord de la Russie (*cf.* annexe 9). Par conséquent, il en existe une multitude de variétés (150 décrites ; Médail, 2001), caractérisées par des ports, des rythmes et des écologies différents, notamment en limite d'aire de répartition où l'espèce semble s'être adaptée à des conditions plus défavorables (huit taxons décrits en région méditerranéenne).

Ces deux essences ont une stratégie assez similaire en termes de résistance à la sécheresse. Le Pin sylvestre ferait partie des résineux résistants à la sécheresse, probablement grâce à une fermeture

précoce des stomates (Bréda *et al.*, 2008). Bien que la fermeture des stomates intervienne plus tard chez le Sapin (ce qui le rend plus vulnérable), celui-ci semble toutefois être capable de résister à des sécheresses sévères grâce à une fermeture soudaine des stomates au-delà d'un certain seuil (Aussenac, 2002). Cette stratégie engendre un risque de brûlure des organes si de fortes chaleurs sont associées à la sécheresse car leur surface n'est plus refroidie par la transpiration. Les deux espèces étant monocycliques<sup>2</sup>, elles ne sont pas capables de compenser des dommages liés à ces brûlures par un deuxième cycle de croissance (Thabeet *et al.* 2009).

|                            | Pin sylvestre                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Sapin pectiné                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stratégie et dynamique     | <ul style="list-style-type: none"> <li>o Héliophile pionnier, ubiquiste qui colonise facilement les friches et les lisières (notamment sur les versants sud en montagne).</li> <li>o Fructification précoce (25-35 ans).</li> <li>o Croissance monocyclique.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>o Dryade, tolère bien l'ombrage pendant plusieurs années dans les stades juvéniles.</li> <li>o Croissance monocyclique.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Nutrition                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>o Peu sensible à la nature du substrat (enracinement pivotant puissant).</li> <li>o Essence frugale très peu exigeante vis-à-vis du sol.</li> <li>o Préfère les terrains siliceux drainants, accepte une forte acidité (sols podzoliques).</li> <li>o Un des seuls résineux à tolérer des engorgements importants.</li> <li>o Tolère le calcaire mais développement de chloroses (déficit en fer et manganèse) et croissance ralentie à cause d'une nutrition azotée déficiente.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>o Peu sensible à la nature du substrat (pivots puissants dans les fissures des calcaires durs).</li> <li>o À peu près indifférent à la nature du matériau parental (grès, granite, schiste, calcaire dur, roche volcanique).</li> <li>o Ne tolère pas bien l'engorgement.</li> <li>o Inadapté aux sols très carbonatés (peut induire des carences en fer, manganèse et potassium visible par une coloration anormale du feuillage).</li> <li>o Optimum sur sol frais, profond, bien drainé.</li> </ul>                        |
| Climat                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>o Supporte bien les faibles humidités atmosphériques.</li> <li>o De 0 à 2 000 mètres, indifférent à l'exposition.</li> <li>o Tolère les très fortes chaleurs aussi bien que les grands froids (résiste à - 40 voire - 50 °C).</li> <li>o Ne craint pas les gelées de printemps.</li> <li>o Sensible aux bris de neige.</li> </ul>                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>o Besoin d'une humidité atmosphérique et édaphique importante toute l'année.</li> <li>o Typique des forêts matures des étages montagnards à subalpin inférieur. En dessous, la sapinière souffre de la sécheresse et de la chaleur estivale et au-delà le froid limite sa croissance.</li> <li>o Optimum en versant nord à nord-est.</li> <li>o Peu sensible aux froids hivernaux (dégâts à partir de - 35° C), mais craint les gelées tardives.</li> <li>o Tolère la chaleur si bonne alimentation en eau du sol.</li> </ul> |
| Résistance à la sécheresse | <ul style="list-style-type: none"> <li>o Résistant à la sécheresse édaphique.</li> <li>o La fermeture des stomates intervient assez tôt, limitant ainsi la transpiration.</li> <li>o Garde cependant une certaine fragilité du xylème vis-à-vis de la cavitation.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>o Sensible à la sécheresse atmosphérique.</li> <li>o La fermeture des stomates intervient assez tardivement, la transpiration continue et le risque de cavitation est accru.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

TABLEAU 1. — Synthèse des préférences écologiques et du comportement du Sapin pectiné et du Pin sylvestre à l'échelle de la France. (Sources : Lebourgeois : Autécologie des principales essences forestières françaises, document de cours de la formation de ingénieurs forestiers, version 4, 2002 ; Ozenda, 1981 ; Médail, 2001 ; Aussenac, 2002 ; Bréda, 2004).

<sup>2</sup> Se dit d'une espèce qui ne réalise qu'un seul cycle de croissance en longueur par année.

Récemment, le caractère résistant du Pin à la sécheresse a pourtant été remis en cause (Martinez-Vilalta, 2002). Bréda (2004), par des mesures de potentiels hydriques lors de la sécheresse et canicule de 2003, signalait aussi sa sensibilité à la cavitation et proposait qu'il existe d'autres mécanismes pour expliquer sa résistance – relativement bonne – à la sécheresse. Sa réponse serait, de plus, assez homogène entre les différents individus. Cette sensibilité pourrait compromettre sa capacité à résister à une augmentation de l'aridité en zone méditerranéenne (Martinez-Vilalta, 2002).

- Des particularités en limite de leurs aires de répartition

Dans les Alpes du Sud, le sapin est en limite climatique. Il a une répartition morcelée (Delahaye Panchout, 2004) et occupe une place très réduite en versant sud où il ne s'installe bien qu'à partir de 1 500 m, alors qu'il peut occuper une grande partie des versants frais, de la base de l'étage montagnard jusqu'au subalpin (Ladier, 2004). Certains peuplements comme celui de la montagne de Lure, placés en gestion conservatoire, présentent des signes d'adaptation à la sécheresse.

Le Pin sylvestre, quant à lui, dans les Alpes du Sud, ne se situe pas à la limite la plus méridionale de son aire de répartition (située en Espagne) mais il présente néanmoins des signes d'adaptation aux contraintes du climat méditerranéen. Une variété méditerranéenne relictuelle capable de bloquer son activité cambiale lors des sécheresses estivales serait en effet présente en ubac des chaînons de basse Provence (Médail, 2001). Ailleurs, il est présent essentiellement à l'étage montagnard en accompagnement avec le hêtre et le sapin sur les stations les moins sèches. Plus bas en altitude, il côtoie en ubac le chêne pubescent mais sa hauteur à 50 ans dépasse rarement les 10 m (Sainte Baume, Sainte Victoire).

- Des changements attendus d'aire de répartition

Comme pour les autres essences forestières, on s'attend à ce que le Pin sylvestre et le Sapin pectiné voient leurs aires de répartition fortement modifiées (cf. § 1.2.2.3). À l'échelle de la France, Sous l'hypothèse d'un réchauffement climatique compris entre + 3 et + 4,2 °C d'ici 2100, l'aire de distribution potentielle du Sapin devrait régresser de 83 % par rapport à celle établie sur la période 1961-1990 (Piedallu et al., 2009). Les habitats favorables au sapin devraient régresser d'abord dans la partie méridionale de son aire de répartition (Pyrénées, Sud du Massif central, Alpes), avant de toucher les zones de moyenne montagne. Ce fort recul s'explique par la faible amplitude du Sapin pectiné vis-à-vis des facteurs climatiques.

Un travail collectif récent de modélisation de l'aire de répartition actuelle et future du Pin sylvestre (19<sup>e</sup> promotion d'élèves ingénieurs forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF, 2010) estime que son aire de distribution potentielle devrait d'abord augmenter légèrement au cours de la première moitié du siècle (étant donné la grande amplitude du Pin sylvestre vis-à-vis des facteurs climatiques), puis entamer une phase régressive au-delà. Comme pour le Sapin, une remontée en altitude de l'aire de distribution potentielle est prédite pour le Pin.

#### 1.4.2. Localisation et évolution des dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné

##### 1.4.2.1. Localisation des principaux dépérissements

Des dépérissements des deux essences étudiées ont été constatés à plusieurs endroits depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. (cf. Annexe 3 : Épisodes de dépérissement du Pin sylvestre et du Sapin pectiné constatés en Europe depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle.). Les premiers dépérissements de Pin sylvestre recensés dans la littérature scientifique datent du début du XX<sup>e</sup> siècle en Suisse (Rigling et al. 2006). Depuis, de nombreux cas ont été observés dans différents pays du Sud de l'Europe ainsi qu'en Europe centrale pour le Sapin pectiné à partir des années 1980.

En France, depuis 2003, le Sud est particulièrement touché par des dépérissements importants de Pin sylvestre (Alpes du Sud et Pyrénées). Le Sapin pectiné, quant à lui, connaît des dépérissements locaux sur toute son aire de répartition (Alpes-de-Haute-Provence, mont Ventoux, Aude, Vosges).

#### 1.4.2.2. Évolution temporelle des dépérissements

Il semblerait, au travers des nombreux cas rapportés depuis moins de trente ans à l'échelle européenne, que le dépérissement des pins sylvestres soit en recrudescence en marge de son aire de répartition (cf. annexe 3).

À l'échelle de la France, une nette recrudescence des problèmes de dépérissement est observable sur les deux essences. L'évolution du déficit foliaire moyen sur le réseau systématique du département de la santé des forêts (DSF) traduit bien la dégradation de l'état de santé des pinèdes sylvestres et des sapinières en cours dans plusieurs massifs montagneux (cf. figure 3). Cette dégradation est particulièrement marquée pour les deux essences dans les Pyrénées (déficit foliaire qui a quasiment doublé en 10 ans), les Alpes et le Massif central. La région méditerranéenne est particulièrement touchée par la dégradation de l'état de santé du Pin sylvestre (augmentation du déficit foliaire de 50 % en 10 ans). L'année 2003 semble être une année charnière pour ces évolutions. La question du lien entre ces évolutions et celles mises en évidence pour le climat (1.2.1) se pose alors logiquement.

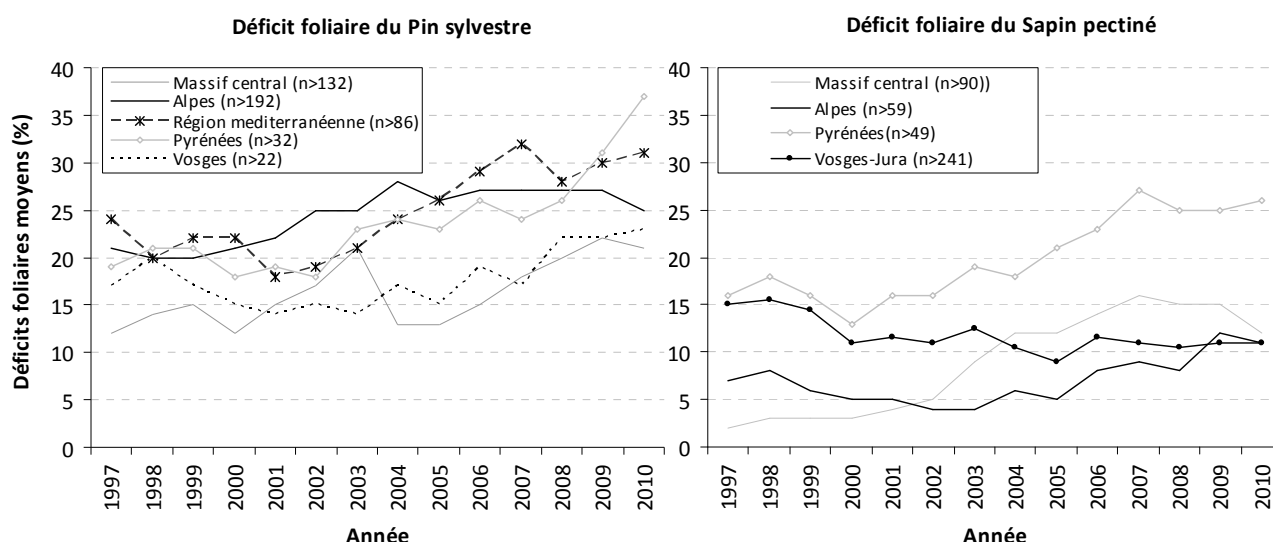


FIGURE 3 — Évolution du déficit foliaire moyen pour le Pin sylvestre et le Sapin pectiné dans les principaux massifs montagneux français mesuré sur les placettes du réseau systématique de surveillance du DSF. Les notes de déficit foliaire sont moyennées sur les arbres des placettes d'un massif. Le nombre minimum d'arbres observés pour chaque massif est indiqué entre parenthèses ; ce nombre peut varier légèrement d'une année à l'autre en fonction des mortalités et des récoltes (Source : d'après les données du DSF, 2011).

#### 1.4.3. Cas des dépérissements dans les Alpes du Sud

- Pin sylvestre (Vennetier *et al.*, 2008 ; Thabeet *et al.*, 2009 ; Lelou, 2010)

Les événements climatiques extrêmes qui ont eu lieu entre 2003 et 2008 seraient la cause des dépérissements du Pin sylvestre. La canicule de 2003 a joué le rôle de facteur déclenchant mais son impact s'est surtout déclaré à partir de 2004, bien que d'importantes pertes d'aiguilles (jusqu'à 60 %) aient eu lieu l'année même de la canicule. La croissance radiale des pins a, de plus été stoppée net au

cours du printemps (Thabeet *et al.*, 2009). Les années sèches qui ont suivi, en 2004, 2005 et 2007 (cf. § 1.2.1.2) ont encore affaibli les arbres, conduisant à une diminution de la croissance (cernes très étroits, déficits foliaire et de fructification, microphyllie, croissance en hauteur très faible) et à un dépérissement extensif, visible par imagerie satellitale.

Les dépérissements ont été particulièrement marqués sur versants sud dans les Préalpes. Dans les montagnes sud-alpines, ce sont au contraire les versants nord qui ont été les plus atteints. Pour expliquer cette dernière observation, l'hypothèse a été faite qu'il puisse s'agir d'un manque d'adaptation physiologique des peuplements de versant nord aux sécheresses intenses (des phénomènes d'adaptation génétique à l'échelle de versants semblent exclus ; Rigling *et al.*, 2006).

- Sapin pectiné

Moins de résultats concernent le dépérissement du Sapin pectiné dans les Alpes du Sud. Celui-ci a principalement été étudié dans les Pyrénées, où l'implication des sécheresses a aussi été montrée (Oliva & Colinas, 2007).

Les contextes écologiques propices aux dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné dans les Alpes du Sud ont été décrits par Lelou (2010) dans deux modèles de dépérissement basés sur des variables stationnelles (zone climatique, altitude, pente). Ces modèles ne permettent donc pas de faire ressortir le lien éventuel avec les évolutions climatiques récentes.

## 2. Présentation des hypothèses testées

Compte tenu des connaissances actuelles, cinq objectifs sont fixés dans cette étude :

- 1) évaluer la part du changement climatique dans les dépérissements du Sapin pectiné et du Pin sylvestre à l'échelle de la France et des Alpes-Maritimes par rapport aux effets des caractéristiques des peuplements et des conditions stationnelles ;
- 2) caractériser et quantifier le déterminisme des dépérissements avec des facteurs ayant une pertinence biologique au regard des connaissances actuelles ;
- 3) proposer une cartographie des zones à risque de dépérissement pour le Pin sylvestre et le Sapin pectiné à l'échelle des Alpes-Maritimes ;
- 4) évaluer les différences entre les modèles en tenant compte des effets d'échelle ;
- 5) comparer la pertinence des données relevées dans le cadre du dispositif de l'IFN et des Alpes-Maritimes ;

Le premier objectif constitue le cœur de ce travail. Pour y parvenir, une démarche originale a été adoptée et est rendue possible grâce aux travaux de modélisation développés au LERFoB. Il va en effet être question de modéliser spatialement les dépérissements et de distinguer clairement les effets du climat moyen (calculé sur période de référence 1961-1990) des effets de son évolution dans le temps (calculée sur les intervalles 1996-2007 et 2003-2007 par rapport à 1961-1990).

En plus des facteurs climatiques, le but est d'étudier l'implication des autres facteurs écologiques et, dans la mesure du possible, des facteurs liés aux peuplements. Seul le rôle des facteurs biotiques n'a pas pu être étudié, faute de disposer d'une information spatialisée suffisamment fine. Il en est de même pour les facteurs anthropiques comme la pollution atmosphérique. Le tableau 2 ci-dessous résume les causes possibles de dépérissement qui vont être étudiées.

| Hypothèses | Causes possibles de dépérissement                    |
|------------|------------------------------------------------------|
| H1         | Facteurs stationnels                                 |
| H2         | Facteurs « peuplement »                              |
| H3 :       | Facteurs climatiques :                               |
| A.....     | — Une année défavorable entre 2003 et 2007           |
| B.....     | — Un cumul d'années défavorables entre 1996 et 2007  |
| C.....     | — Un cumul d'années défavorables entre 2003 et 2007  |
| D.....     | — Une évolution moyenne du climat entre 1996 et 2007 |
| E.....     | — Une évolution moyenne du climat entre 2003 et 2007 |

TABLEAU 2. — *Hypothèses testées. Celles-ci ne sont pas exclusives entre elles.*

### 3. Méthodologie adoptée

#### 3.1. Démarche générale de modélisation

L'étude des déterminismes des dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné s'articule en quatre étapes (cf. figure 4). La première concerne le choix des bases de données à utiliser et la sélection des variables au sein de celles-ci. Au cours de la deuxième étape, sont calculées, aux deux échelles de l'étude (France entière et Alpes-Maritimes), les variables à expliquer (indices de dépérissement), ainsi que les variables explicatives. En ce qui concerne les variables climatiques (précipitations, températures et leur résultante en termes de bilan hydrique), il est notamment nécessaire de calibrer des modèles climatiques mensuels sur l'intervalle 1996-2007 afin de disposer de modèles spatialisés de ces variables pour chaque mois sur cet intervalle. À partir de ces modèles mensuels, il est alors possible de calculer différents indices d'évolution du climat pour différents intervalles. La troisième étape réside dans la modélisation des dépérissements. Pour chaque essence (Pin sylvestre et Sapin pectiné), les variables expliquant le mieux les dépérissements ont été sélectionnées pour constituer les modèles. Le pouvoir prédictif des indices caractérisant l'évolution du climat vis-à-vis des dépérissements a été évalué aux deux échelles et comparé aux autres variables explicatives. Les meilleures variables prédictives des dépérissements sont alors sélectionnées pour constituer les modèles. De cette façon, les hypothèses émises au § 2 ont pu être acceptées ou au contraire rejetées. Cette troisième étape se termine par la spatialisation des modèles. Enfin, une phase de terrain s'est déroulée à l'échelle des Alpes-Maritimes afin de découvrir concrètement les objets de l'étude, de confronter les modèles à la réalité et de réfléchir à leur pertinence au vu des variables qui ne sont pas prises en compte dans les modèles locaux (aspects « gestion » et « peuplements »). Cela a aussi été l'occasion de rencontrer les acteurs locaux et mieux comprendre comment sont perçus et gérés ces problèmes de dépérissements.

#### 3.2. Choix et origine des variables à expliquer

Bien que le département de la santé des forêts soit l'organisme en charge de la surveillance de l'état de santé des forêts, plusieurs organismes réalisent des observations qui permettent de suivre le développement des dépérissements forestiers. Selon l'organisme, l'échelle et le protocole d'observation diffèrent.



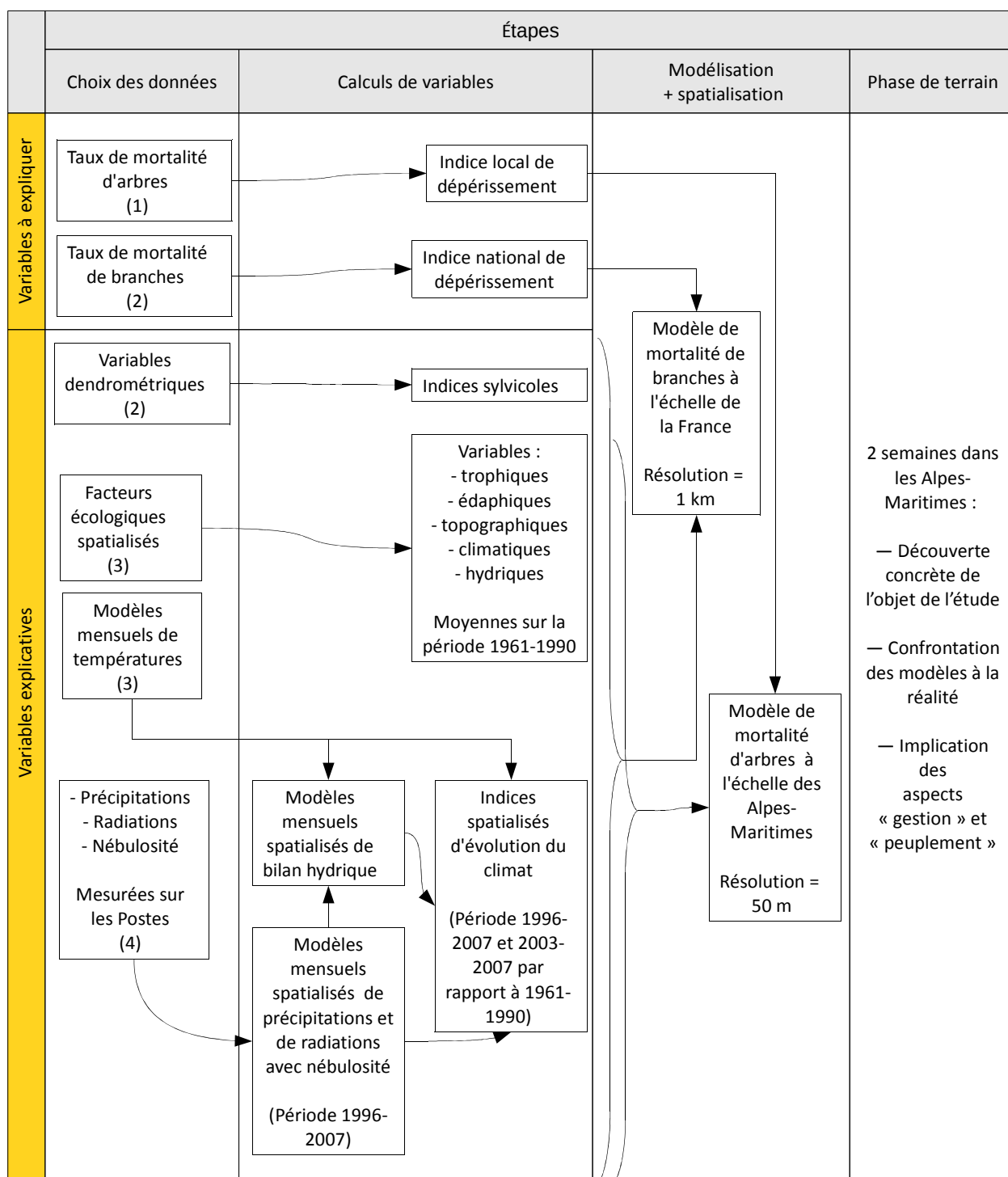


FIGURE 4. — Données utilisées et démarche générale de modélisation.

(1) = ONF, données relevées dans les Alpes-Maritimes en 2008

(2) = IFN, données des inventaires 2006 à 2009 à l'échelle de la France métropolitaine

(3) = LERFoB, données spatialisées à l'échelle nationale

(4) = Météo-France, données sur les postes météorologiques situés en France métropolitaine

### 3.2.1. Variables caractérisant les dépérissements à l'échelle de la France

#### 3.2.1.1. Les données du DSF

Les données du réseau systématique du DSF n'ont pas été retenues dans cette étude car le faible nombre de placettes observées pour une essence donnée (cf. tableau 3) ne permet ni de décrire les évolutions au-delà d'un niveau de précision régional, ni de mettre en œuvre les méthodes statistiques détaillées dans la suite. Par ailleurs, ces placettes disposent d'une bonne description des facteurs écologiques<sup>3</sup> mais aucune variable descriptive du peuplement n'a été relevée.

|               | Nombre de placettes disponibles pour l'étude<br>(nombre d'arbres) |                                            |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|               | DSF (2004-2010)                                                   | IFN (2006-2009)                            |
| Pin sylvestre | 72<br>(max. de 763 arbres observés)                               | 3 114<br>(total de 14 827 arbres observés) |
| Sapin pectiné | 50<br>(max. de 520 arbres observés)                               | 1 927<br>(total de 10 536 arbres observés) |

TABLEAU 3 — Nombre de placettes présentant au moins une occurrence de l'essence étudiée dans la strate arborée parmi les placettes du DSF et celles de l'IFN. Seules les placettes sur lesquelles les arbres ont fait l'objet d'une notation de mortalité de branches ont été comptabilisées.

DSF : placettes suivies en continu entre 2004 et 2010. Les mêmes arbres sont observés d'une année à l'autre mais leur nombre peut varier (récolte, mortalité).

IFN : placettes inventoriées entre 2006 et 2009. Des arbres différents sont observés chaque année.

Les données du DSF sont cependant bien adaptées pour un suivi temporel de l'état sanitaire moyen des forêts françaises (cf. figure 3). Le DSF dispose en effet d'un réseau systématique permanent de surveillance (maille carrée de 16 km). Sur chacune des placettes, la cime de vingt arbres de l'étage dominant est observée en détail une fois par an en été par les correspondants-observateurs. Le déficit foliaire et la coloration anormale du feuillage sont renseignés depuis 1989, le taux de mortalité de branches dans le houppier notable seulement depuis 2004. Cette dernière variable est relevée par classe d'amplitude 10 %.

#### 3.2.1.2. Les données de l'IFN

Les observations de mortalité de branches effectuées par l'IFN entre 2006 et 2009<sup>4</sup>, selon un protocole élaboré avec l'aide du DSF, ont été retenues comme indicateur de l'état de santé du Pin sylvestre et du Sapin pectiné à l'échelle nationale. Elles ont été choisies car, en agrégeant les observations de plusieurs années d'inventaire, le nombre d'observations est suffisant pour mettre en œuvre des traitements statistiques et décrire l'état sanitaire d'une essence donnée jusqu'à un niveau départemental (cf. tableau 3). D'autre part, un grand nombre de variables dendrométriques et de variables caractérisant la gestion forestière est relevé sur les placettes d'inventaire, ce qui devrait permettre d'étudier la part du peuplement et de la gestion dans les dépérissements observés.

L'IFN, établissement public dont la vocation est la description générale de la forêt française, réalise seulement depuis 2006 des observations de mortalité de branches dans le houppier notable des

<sup>3</sup> Réalisée dans le cadre d'une obligation communautaire (règlement européen 2152/2003 « Forest Focus »).

<sup>4</sup> La donnée mortalité de branches n'est relevée par l'IFN que depuis son changement de protocole d'inventaire, soit à partir de 2006.

arbres présents dans un rayon de 15 m autour du centre des placettes. Elle est relevée en 5 classes, correspondant à un intervalle de pourcentage de branches mortes (*cf.* tableau 4).

| classe | Pourcentage relatif de branches mortes dans le houppier notable (*) |
|--------|---------------------------------------------------------------------|
| 0      | [0 % ; 5 % [                                                        |
| 1      | [5 % ; 25 % [                                                       |
| 2      | [25 % ; 50 % [                                                      |
| 3      | [50 % ; 95 % [                                                      |
| 4      | ≥ 95 %                                                              |

TABLEAU 4 — Définition des classes de mortalité de branches utilisées par l'IFN.  
(\*) partie du houppier ayant accès à la lumière et située hors de la zone de concurrence avec les arbres voisins.

Les observations de l'IFN sont réalisées selon un maillage systématique renouvelé tous les ans. Environ 9 000 points d'inventaire sont effectués chaque année sur le territoire métropolitain. Il est à noter que l'absence de placettes permanentes ne permet pas un suivi temporel de l'évolution de l'état de santé des arbres. Ceci n'impacte cependant pas la présente étude qui s'intéresse uniquement aux déterminismes spatiaux des dépérissements.

Les placettes de l'IFN retenues pour l'étude présentent au moins une occurrence de l'essence étudiée dans la strate arborée avec une notation de mortalité de branches. Les effectifs sont ceux du tableau 3, colonne de droite (le nombre de placettes du DSF sélectionnées selon les mêmes critères est renseigné à titre de comparaison).

Pour la modélisation, les mortalités de branches issues des quatre années d'inventaire entre 2006 et 2009 ont été agrégées et traitées comme si elles avaient été observées en 2007, fin des périodes climatiques étudiées (1996-2007 et 2003-2007). Une autre approche aurait pu consister à étudier le lien entre les mortalités de branches observées à l'année  $n$  avec le climat des quelques années précédentes. Il se serait alors agi d'une modélisation plus complexe intégrant des jeux de données climatiques différentes selon la date de relevé, rendant plus difficile l'établissement de liens de cause à effet. Étant donné le temps imparti, le choix a été fait d'agréger les jeux de données afin d'augmenter les effectifs et de dégager les tendances principales.

### 3.2.1.3. Calcul de l'indice de mortalité de branches avec les données de l'IFN

Dans un travail précédent sur le dépérissement du Chêne pédonculé (Rodriguez, 2009), il a été montré que la modélisation du dépérissement à partir d'une variable en classes donne de bien moins bons résultats que lorsque la variable est transformée en une variable binaire, probablement car la variable en classe rend compte à la fois du stade de dépérissement et du niveau de risque (un faible taux de mortalité peut traduire un début de dépérissement dans une zone à fort risque ou bien un dépérissement faible dans une zone à faible risque). Pour cette raison, la variable mortalité de branches relevée en cinq classes a été simplifiée en une variable de « présence » ou d'« absence » de dépérissement selon un certain seuil de mortalité de branches. Afin d'éliminer l'effet du seuil choisi, trois indices, aux seuils de 5, 25 et 50 %, ont été testés.

Une placette est considérée comme dépérissante dès lors qu'un arbre présente une mortalité de branches dans son houppier notable, supérieure au seuil. De cette façon, les indices sont suffisamment sensibles pour prendre en compte les problèmes sanitaires dès leur apparition. Avec l'indice de mortalité de branches au seuil de 5 %, 505 placettes avec du Pin sont « dépérissantes » (soit près de 16 %). Pour le sapin avec le même indice, 271 placettes sont « dépérissantes » (soit environ 14 %).

À l'échelle de la France, les modèles de dépérissement ont été élaborés à partir de chacun des seuils afin d'étudier si ceux-ci ont un effet. Ensuite, le seuil le plus pertinent a été choisi pour poursuivre les analyses. Bien que cette étude ait été faite par Rodriguez sur le Chêne pédonculé, il s'est agi ici de vérifier l'effet du seuil sur les essences étudiées (Pin sylvestre et Sapin pectiné).

### 3.2.2. Variables caractérisant les dépérissements à l'échelle des Alpes-Maritimes

À une échelle plus locale, la densité des observations de l'IFN devient trop faible pour modéliser le dépérissement. Le département des Alpes-Maritimes présente la particularité de financer un observatoire des dépérissements forestiers mis en œuvre par l'ONF. Les objectifs sur le département sont les suivants :

- une cartographie périodique (tous les trois ans) des dépérissements sur l'ensemble des forêts ;
- une cartographie des zones à risque de dépérissement pour le Pin sylvestre et le Sapin pectiné, basées sur les connaissances de l'autécologie des essences, les stations forestières et les données cartographiques récoltées ;
- un suivi phytosanitaire, à partir de placettes permanentes, des principales essences.

#### 3.2.2.1. Nature des observations effectuées par l'ONF

Les observations mises à disposition par l'ONF datent de 2008. Ce sont les seules informations exploitables à l'échelle du département pour modéliser les dépérissements. Il s'agit d'une carte par essence (Pin sylvestre et Sapin pectiné) qui délimite les peuplements avec une mortalité d'arbres anormalement élevée. Un pourcentage d'arbres morts est attribué à chaque polygone ainsi délimité selon 7 classes (cf. Annexe 11 : Cartographie des mortalités d'arbres dans le département des Alpes-Maritimes.). Le contour des peuplements de Pin et de Sapin réalisé par l'IFN sert de base à cette cartographie.

Les cartes de l'ONF ont été réalisées en partie grâce à la connaissance des agents patrimoniaux de chaque unité territoriale, complétée par des observations de peuplements à partir de versants opposés (le département se prête en effet assez bien à ce type d'observations). Un écueil de taille a été le manque d'harmonisation entre les différents agents, si bien que le niveau de détail n'est pas systématiquement le même sur tout le département. Malgré des doutes sur la qualité de cette cartographie (cf. § 5.4), celle-ci est jugée comme relativement robuste par l'ONF (Ladier, communication personnelle).

En 2008, peu de peuplements étaient entièrement morts. Environ 4 % des futaies de Pin sylvestre, et environ 7 % des futaies de Sapin pectiné présentaient entre 30 et 75 % d'arbres morts (Lelou, 2010), soit plus de 1 700 ha pour le pin et quasiment 800 ha pour le sapin.

#### 3.2.2.2. Calcul d'un indice de mortalité d'arbres avec les données de l'ONF

De la même manière qu'avec le jeu de données de l'IFN, la variable mortalité d'arbres relevée en sept classes est transformée en une variable binaire : chaque polygone précédemment défini est doté de la valeur 0 (« sain ») ou 1 (« dépérissant »). Cette transformation se justifie d'autant plus que les classes supérieures de mortalité sont très peu représentées. Les peuplements « sains » sont ceux pour lesquels aucune mortalité d'arbres n'a été relevée dans les peuplements (classes « 0 » et « 0 ? », cf. Annexe 11 : Cartographie des mortalités d'arbres dans le département des Alpes-Maritimes.). Les autres sont considérés comme « dépérissants ».

Puis, l'indice caractérisant la présence ou l'absence de peuplement dépérissant a été affecté aux points d'un maillage carré de 200 m de côté pour le Pin sylvestre et de 100 m de côté pour le Sapin pectiné, afin d'obtenir deux jeux de données ayant à peu près les mêmes effectifs. Pour le Pin, le jeu de données comprend ainsi un total de 9 773 points dont 1 015 sont « dépérissants » (soit plus de 10 %). Pour le sapin, le total est de 9 121 points dont 2 161 sont « dépérissants » (soit environ 24 %).

### 3.3. Choix et origine des variables explicatives

#### 3.3.1. Variables caractérisant les peuplements

Le tableau 5 résume les variables caractérisant les peuplements disponibles à chaque échelle de l'étude (France, Alpes-Maritimes) et utilisées pour vérifier l'hypothèse H2 (cf. § 2). La plupart d'entre elles ne sont disponibles qu'à l'échelle de la France car elles ne sont présentes que dans le jeu de données IFN.

À l'échelle de la France, douze variables caractérisant les peuplements ont été testées dans les modèles. Elles ont été extraites ou calculées à partir de la base de données de l'IFN. L'une d'entre elles traduit l'accessibilité de la placette et donc l'intensité potentielle de la gestion. Les autres variables traduisent les caractéristiques dendrométriques liées à l'essence et au peuplement dans lesquels elle se trouve (dominance de l'essence au sein du peuplement, âge et densité de ce dernier, etc.). Ces variables permettent, entre autres, de définir le niveau de compétition subie par l'essence au sein du peuplement.

À l'échelle des Alpes-Maritimes, une seule variable liée aux peuplements a pu être calculée sur chaque point du maillage. Il s'agit de l'accessibilité du peuplement.

| Types de facteurs | Signification des variables                                     | Variables disponibles                                                                                                                                          | France            | Alpes-Maritimes                                  |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------|
| « peuplement »    | Accessibilité → intensité de la gestion forestière              | Indice de difficulté d'accès                                                                                                                                   | <b>X</b><br>(IFN) |                                                  |
|                   |                                                                 | Distance à la piste la plus proche                                                                                                                             |                   | <b>X</b><br>(ONF, couche de desserte forestière) |
|                   | État d'avancement du cycle sylvigénétique, intensité de gestion | — Âge<br>— Densité<br>— Surface terrière ( <b>G</b> )<br>— Hauteur dominante ( <b>H<sub>0</sub></b> )<br>— Diamètre quadratique moyen ( <b>D<sub>g</sub></b> ) | <b>X</b><br>(IFN) |                                                  |
|                   | Importance de l'essence en termes de composition                | — Proportion en nombre de tiges<br>— Proportion en surface terrière                                                                                            |                   |                                                  |
|                   | Statut social de l'essence                                      | — Hauteur moyenne de l'essence ( <b>H<sub>m</sub></b> )<br>— Indice de dominance en hauteur ( <b>H<sub>m</sub>/H<sub>0</sub></b> )                             |                   |                                                  |
|                   | Importance de l'essence en termes de structure                  | — Diamètre moyen de l'essence ( <b>D<sub>m</sub></b> )<br>— Indice de dominance en diamètre ( <b>D<sub>m</sub>/D<sub>g</sub></b> )                             |                   |                                                  |

TABEAU 5 — Récapitulatif des variables caractérisant les peuplements testées dans les modèles et de leur disponibilité aux deux échelles de l'étude.

### 3.3.1.1. Variables caractérisant l'accessibilité

La facilité d'accès au peuplement joue probablement sur l'intensité de la gestion et donc sur les caractéristiques du peuplement et la proportion de mortalité visible. C'est la seule variable « peuplement » disponible aux deux échelles, mais à partir de données différentes (cf. tableau 5).

- France :

La distance en mètres à la piste forestière la plus proche est relevée par l'IFN selon quatre classes au niveau des placettes d'inventaire (0 : < 200 m, 1 : de 200 à 500 m, 2 : de 500 à 1000 m, 3 : de 1000 à 2000 m, 4 : > 2000 m). Cette variable traduit la plus ou moins grande accessibilité des placettes et donc l'intensité potentielle de la gestion forestière.

- Alpes-Maritimes :

La distance à la piste la plus proche, en mètres, a été calculée grâce à la couche SIG de la desserte forestière fournie par l'ONF. Cette variable est utilisée telle quelle pour traduire l'accessibilité.

### 3.3.1.2. Variables caractérisant la structure des peuplements et la compétition

Les variables suivantes ont été sélectionnées ou calculées pour caractériser les peuplements et l'importance de l'essence étudiée dans ces derniers. Elles ont été calculées à l'échelle de la France sur les placettes IFN sélectionnées.

- Variables relatives au peuplement

Ces variables ont été directement extraites de la base de l'IFN. Il s'agit de descripteurs des peuplements, traduisant à la fois l'avancement du cycle sylvigénétique et l'intensité de gestion (cf. tableau 5).

- Indices relatifs à l'importance de l'essence dans les peuplements

Ces indices (cf. tableau 5) ont tous été calculés à partir de variables dendrométriques « arbres » relevées par l'IFN. Ils devraient permettre de déterminer si les dépérissements sont liés à des phénomènes de compétition au sein des peuplements.

Les proportions en nombre de tiges et en surface terrière visent à décrire l'importance de l'essence étudiée dans les peuplements en termes de composition. Elles sont respectivement égales au rapport entre le nombre de tiges de l'essence et le nombre total de tiges et au rapport entre la surface terrière occupée par l'essence et la surface terrière totale.

Le statut social de l'essence est traduit par la différence de hauteur moyenne de l'essence par rapport à la hauteur dominante du peuplement. On obtient ainsi un indice de dominance en hauteur de l'essence. Plus cet indice est proche de 1, plus l'essence étudiée est dominante.

La place de l'essence dans le peuplement en termes de structure est caractérisée *via* le diamètre moyen des tiges de celle-ci divisé par le diamètre quadratique moyen de toutes les essences situées sur la placette ; ce quotient permet de constituer un indice de dominance en structure. Plus l'indice s'approche de 1, voire le dépasse, plus l'essence étudiée représente les bois les plus gros du peuplement.

### 3.3.2. Variables climatiques et édaphiques de référence (moyennes 1961-1990)

L'hypothèse est faite que les variables climatiques et édaphiques moyennes sur la période 1961-1990 représentent les conditions qu'ont pu connaître les peuplements étudiés au moment de leur installation et de leur croissance, conditions considérées comme antérieures aux changements

climatiques. Ces variables ont été déclinées en moyennes annuelles et moyennes saisonnières annuelles. Elles seront testées dans les modèles afin de vérifier l'impact du climat moyen de référence sur l'état de santé des arbres (cf. hypothèse H1, § 2).

| Types de facteurs | Signification des variables    | Variables disponibles                                                                                                | Résolution disponible                | Source                         |
|-------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Climatiques       | Énergie thermique              | — Température moyenne (T)<br>— Radiations solaires avec nébulosité (RADN)<br>— Évapotranspiration potentielle (ETP)  | 1 km France,<br>50 m Alpes-Maritimes | Modèles LERFoB spatialisés (*) |
|                   | Humidité atmosphérique         | — Précipitations (P)<br>— Bilan hydrique climatique de Turc (BH <sub>C</sub> )                                       |                                      |                                |
| Édaphiques        | Niveau de sécheresse édaphique | — Réserve utile (RU)<br>— Déficit d'évaporation (DE)<br>— Indice d'aridité (IA)<br>— Évapotranspiration réelle (ETR) | 50 m                                 |                                |

TABLEAU 6 — Récapitulatif des variables climatiques et édaphiques moyennes sur la période de référence (1961-1990). (\*) Chaque variable est estimée via la moyenne annuelle et les moyennes saisonnières annuelles, sur la période 1961-1990. (Printemps = mars à mai, été = juin à août, automne = septembre à novembre, hiver = décembre à février). Les variables édaphiques sont calculées selon la méthode de Thornthwaite et selon la méthode de Palmer.

### 3.3.2.1. Les variables climatiques

Un grand nombre de variables climatiques interannuelles moyennes sur la période 1961-1990 est disponible au LERFoB sous forme de modèles numériques spatialisés (cf. tableau 6). Ces modèles ont été calibrés sur la France à une résolution de 50 m à partir des mesures disponibles au niveau des postes Météo-France ou à partir de calculs sur des modèles numériques de terrain (MNT). La température et les précipitations interannuelles moyennes (Piedallu *et al.*, 2011), ainsi que les radiations solaires interannuelles moyennes avec nébulosité (modèle Helios, Piedallu et Gégout, 2007, 2008) sont par conséquent accessibles en tout point du territoire. Le modèle de radiations prend en compte la pente, l'orientation du site, l'effet de masque occasionné par les reliefs environnants, la nébulosité et la latitude. Ce modèle a été validé à l'échelle de la France et présente un R<sup>2</sup> moyen de 0,78 (cf. Annexe 4 : Validation du modèle Helios de radiations.).

Deux variables climatiques synthétiques ont été calculées dans les bases de données du LERFoB à partir de ces trois variables climatiques de base (T, P, RADN). Elles visent à représenter l'effet cumulé des différents paramètres climatiques sur le métabolisme des plantes.

La première est l'évapotranspiration potentielle moyenne (ETP) qui représente la quantité d'eau libérée par un couvert végétal en l'absence de régulation stomatique (cumul de l'évaporation et de la transpiration). Cette variable, exprimée en millimètres, est fonction de la température et des radiations mensuelles moyennes (cf. formule 1). Elle représente en un lieu donné la quantité moyenne d'énergie potentiellement utilisable pour la photosynthèse. Les ETP utilisées dans cette étude ont été calculées selon la méthode de Turc. C'est en effet la meilleure formule simple qui intègre des données de rayonnement (Lebourgeois & Piedallu, 2005).

$$ETP(mm / njours) = n \times 0,013 \times (Rg + 50) \times \left( \frac{T}{T + 15} \right)$$

FORMULE 1 — Formule de l'ETP Turc pour une humidité relative supérieure à 50 % (cas général des régions tempérées). Avec  $n$  = nombre de jours par mois ( $n = 28, 29, 30$  ou  $31$ ),  $T$  = température moyenne mensuelle (°C),  $Rg$  = rayonnement global en cal/cm<sup>2</sup>/mois.

La seconde variable climatique synthétique est le bilan hydrique climatique. Celui-ci, exprimé aussi en millimètres, traduit l'évolution de la quantité d'eau disponible pour la plante en fonction des apports et départs climatiques (il est égal à la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle). Cette variable représente le degré de sécheresse atmosphérique subi par les plantes. Dans le cas présent, le bilan hydrique climatique (BH<sub>C</sub>) est celui calculé avec la formule de l'ETP de Turc (Turc, 1961).

### 3.3.2.2. Les variables édaphiques

Dans cette étude, sont appelées variables édaphiques toutes les variables spatialisées représentatives du bilan hydrique édaphique. Contrairement au bilan hydrique climatique qui ne considère que l'eau atmosphérique, il s'agit ici de rendre compte des évolutions de la quantité d'eau dans le sol. Pour cela, quatre variables ont été modélisées et cartographiées par le LERFoB. Il s'agit de la réserve utile (RU), du déficit d'évaporation (DE), de l'évapotranspiration réelle (ETR) et d'un indice d'aridité (IA). Toutes ces variables sont retenues dans l'étude car ce sont les plus couramment utilisées et car elles traduisent de façon différente l'évolution de l'eau dans le sol et ses répercussions en termes de contraintes hydriques pour les plantes. Leur calcul utilise le modèle de réserve utile maximale des sols forestiers, c'est-à-dire quantité maximale d'eau qui peut être emmagasinée dans la partie du sol prospectable par les racines (Piedallu *et al.*, en préparation).

La RU est une mesure de la quantité d'eau effectivement disponible pour les arbres dans le sol. Le DE représente l'eau qui manque aux plantes pour évapotranspirer normalement. L'ETR est la quantité d'eau réellement évapotranspirée par un couvert végétal. Ces trois variables sont exprimées en millimètres. La dernière, l'IA, est égale au complément à 1 du rapport entre l'ETR et l'ETP (soit  $IA = 1 - \frac{ETR}{ETP}$ ). Elle traduit le niveau de sécheresse ressenti par les arbres et varie entre 0 (pas de sécheresse) et 1 (sécheresse très forte, les plantes n'évapotranspirent plus).

Plusieurs méthodes ont été développées pour calculer ces différentes variables, notamment celle de Thornthwaite (1948) et celle de Palmer (Clark *et al.*, 1999). Elles sont basées sur des hypothèses différentes relatives à la façon dont le « réservoir sol » se vide de son eau au cours du temps (vidange de façon exponentielle pour Thornthwaite et linéaire pour Palmer). Les variables calculées selon les deux méthodes ont été testées lors de la constitution des modèles afin de voir si une méthode est meilleure que l'autre pour prédire les dépérissements du Pin et du Sapin.

### 3.3.3. Autres variables écologiques disponibles au LERFoB

Pour vérifier si les dépérissements ne sont pas liés à des causes autres que climatiques, les facteurs trophiques, hydriques et topographiques disponibles au LERFoB (*cf.* tableau 7) sont inclus dans les variables explicatives à tester (hypothèse H1, § 2). Faute de données concernant leur évolution possible dans le temps, on suppose qu'elles n'ont pas changé entre la période de référence et aujourd'hui, cette hypothèse étant la plus plausible vu le peu de temps écoulé entre les périodes.

#### 3.3.3.1. Les variables trophiques

Le pH et le rapport carbone sur azote (C/N) sont modélisés par bio-indication à partir de la flore indicatrice des relevés de la base floristique Ecoplant (Gegout *et al.*, 2005) et de la base de l'IFN, puis spatialisés à l'échelle de la France au pas de 1 km. La première variable traduit la richesse chimique du sol qui va souvent de pair avec la présence d'une géologie ou d'alluvions calcaires. La seconde caractérise la nutrition azotée et la façon dont la matière organique est minéralisée. Un rapport C/N faible indique une bonne minéralisation de la matière organique.



### 3.3.3.2. Les variables hydriques et topographiques

Sont appelées variables hydriques, les variables relatives au stockage et à la circulation de l'eau dans le sol.

De même que pour les variables trophiques, un indice d'engorgement a été modélisé par bio-indication avec la flore et spatialisé au pas kilométrique (Gégout *et al.*, 2005). L'engorgement correspond à une stagnation d'eau plus ou moins longue au cours de l'année dans certains sols présentant un horizon imperméable. L'indice varie de 1 à 7 (1 : pas d'engorgement ; 4 : engorgement temporaire ; 7 : engorgement permanent).

La réserve utile maximale (RUM) correspond à la quantité d'eau maximale utilisable par les plantes dans le sol. Elle s'exprime en millimètres. Cette variable a été obtenue par modélisation puis a été spatialisée (Piedallu *et al.*, 2011).

L'indice hydrologique de Moore est dérivé du modèle numérique de terrain BDalti de l'IGN. Il traduit les apports et les départs latéraux en eau. Il est fonction de la taille du bassin versant intercepté par la surface du pixel et de la pente au niveau de ce même pixel. Plus le bassin versant est grand et la pente faible, plus l'apport potentiel en eau est élevé.

| Types de facteurs | Signification des variables                | Variables disponibles                      | Plus fine résolution (m) disponible | Source                              |
|-------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Trophiques        | Richesse chimique du sol                   | — pH                                       | 1 000                               | Modèles LERFoB spatialisés          |
|                   | Nutrition azotée                           | — Rapport carbone sur azote ( <b>C/N</b> ) |                                     |                                     |
| Hydriques         | Capacité maximale d'un sol à stocker l'eau | — Réserve utile maximale ( <b>RUM</b> )    | 500                                 |                                     |
|                   | Apports latéraux en eau                    | — Indice hydrologique de Moore             | 50                                  |                                     |
|                   | Contraintes d'engorgement                  | — Indice d'engorgement total               | 1 000                               |                                     |
| Topographiques    | Effets du relief                           | — confinement                              | 50                                  | Modèle numérique de terrain IGN (*) |
|                   |                                            | — altitude                                 | 50                                  |                                     |
|                   |                                            | — pente                                    |                                     |                                     |
|                   |                                            | — exposition                               |                                     |                                     |

TABLEAU 7 — Facteurs écologiques, autre que les facteurs climatiques et édaphiques, disponibles au LERFoB. (\*) = Institut géographique national.

### 3.3.4. Variables caractérisant les évolutions du climat

Pour décrire les évolutions mensuelles, saisonnières ou annuelles récentes du climat et vérifier leur éventuelle implication dans les dépérissements du Pin et du Sapin, les modèles représentant le climat moyen sur la période de référence 1961-1990 (*cf.* 3.3.2) ne suffisent plus. Il est nécessaire de disposer des modèles mensuels des différentes variables sur l'intervalle de temps 1996-2007 (soit, pour chaque variable climatique ou édaphique, un total de  $12 \times 12$  mois = 144 modèles mensuels).

#### 3.3.4.1. Calcul des variables climatiques et édaphiques mensuelles

Au départ, seules les températures moyennes étaient disponibles mois par mois, grâce aux calculs effectués par R. Bertrand, à partir des modèles élaborés par Piedallu *et al.* (2011). Celles-ci, calculées sur la période 1950-2008, ont d'ailleurs été utilisées récemment dans une étude sur l'impact

du changement climatique sur la composition des communautés floristiques des forêts de plaine. Leur calcul repose sur des techniques utilisées depuis de nombreuses années, basées sur l'utilisation de covariables topographiques et géographiques (Ninyerola *et al.*, 2000).

Pour la présente étude, il a fallu calculer les deux autres variables climatiques de base (précipitations et radiations solaires avec nébulosité) mois par mois, sur l'intervalle 1996-2007, à partir des modèles développés par Piedallu et grâce à la même méthodologie que celle utilisée par Bertrand. Les algorithmes permettant ces calculs lui ont d'ailleurs été empruntés et adaptés pour les variables et l'intervalle de temps considéré. La figure 5 résume les étapes de calcul.

Les variables mensuelles  $BH_C$ , ETP, RU, DE, ETR et IA ont ensuite été calculées à partir des variables climatiques précédentes (température, précipitations et radiations solaires avec nébulosité). Les quatre variables édaphiques (RU, DE, ETR ET IA) ont été calculées mensuellement selon les méthodes de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) et de Palmer (Clark *et al.*, 1999).

Ces modèles mensuels ont été spatialisés à l'échelle de la France au pas du kilomètre ainsi qu'à l'échelle des Alpes-Maritimes au pas de cinquante mètres. L'ensemble des modèles produits est récapitulé en annexe 12.

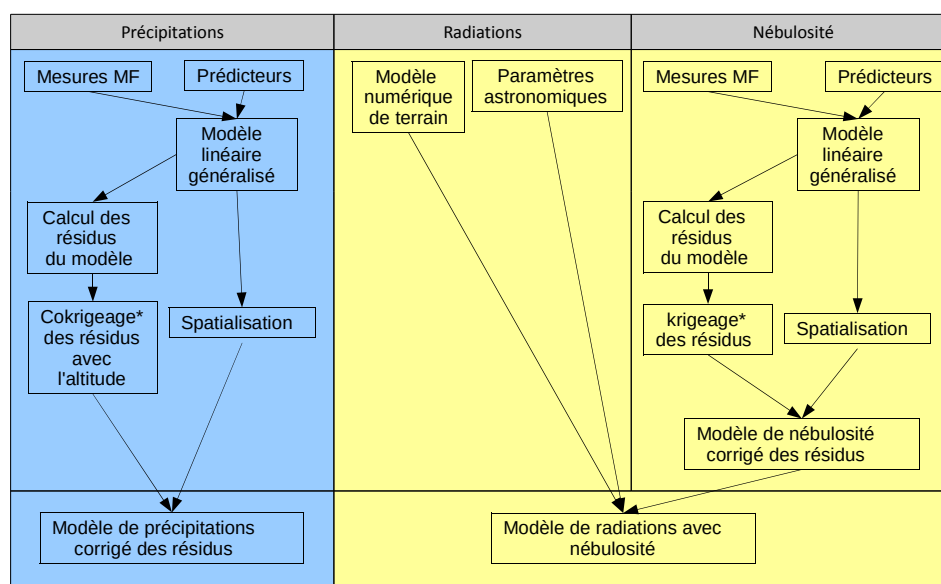


FIGURE 5 — Étapes successives aboutissant aux modèles de précipitations et de radiations avec nébulosité pour un mois donné. Mesure MF = mesure sur les postes Météo-France ; Prédicteurs = variables spatialisées explicatives des précipitations, des radiations ou de la nébulosité. Exemple : pour les précipitations, il s'agit des distances à la mer Méditerranée, la Manche et l'océan Atlantique ainsi que de variables traduisant la façon dont le relief intercepte les flux atmosphériques.

\* Le cokrigage et le krigeage sont des méthodes statistiques d'interpolation spatiale.

Les évolutions du climat sont décrites grâce aux modèles mensuels spatialisés des variables climatiques ou édaphiques listées dans le tableau 6. Pour chacune de celle-ci, trois types d'indices caractérisant leur évolution moyenne ou leur cumul sur un intervalle de temps ont été calculés afin de tester les hypothèses H3 (cf. tableau 2). La figure 6 détaille ces indices et leur principe de calcul. La première étape nécessaire pour calculer ces différents indices est la détermination des anomalies mensuelles simples ou relatives de chaque variable par rapport à la période de référence 1961-1990 (cf. figure 6). Le calcul de ces anomalies en fonction des différentes variables est détaillé par la suite (cf. § 3.3.4.2).

### 3.3.4.2. Calcul des anomalies mensuelles simples ou relatives

L'écart entre chaque mois de l'intervalle 1996-2007 (144 mois) et la période de référence 1961-1990 a été calculé pour chacune des variables climatiques ou édaphiques. Ces écarts traduisent les évolutions du climat et ses répercussions en termes de contraintes liées à la disponibilité de l'eau dans le sol mois après mois (cf. formules 2 A). On parle d'*anomalies* mensuelles de température moyenne, de précipitations, de bilan hydrique climatique, etc.

Les anomalies prises isolément (anomalies simples) ne sont pas forcément à même d'expliquer spatialement les dépérissements. L'anomalie relative à la valeur moyenne sur la période de référence pourrait être plus appropriée. Par exemple, dans le cas des précipitations, une faible variation peut avoir beaucoup plus d'impacts sur les dépérissements au niveau des sites où il pleut habituellement peu, comparativement à des sites où il pleut davantage. Les anomalies ont donc été calculées dans un second temps en les pondérant par la valeur moyenne de la variable sur la période de référence (1961-1990) dans le but d'obtenir des indices relatifs qui traduisent le dépassement d'un seuil critique pour l'espèce. Deux cas se présentent :

- Pour P, BH<sub>C</sub> et RU, une même anomalie négative devrait être d'autant plus contraignante physiologiquement que la moyenne sur la période 1961-1990 est faible. Il s'agit donc de créer un indice qui donne un poids d'autant plus fort aux anomalies que la moyenne sur la période de référence 1961-1990 est faible. Pour cela, les anomalies simples ont été divisées par la moyenne sur la période de référence (cf. formules 2 B). Pour ces trois variables, les anomalies relatives s'expriment donc en pourcentage.
- À l'inverse, pour T, ETP, DE, IA et ETR, une anomalie positive devrait être d'autant plus contraignante physiologiquement que la moyenne sur la période 1961-1990 est élevée. Il s'agit donc de créer un indice qui donne un poids d'autant plus fort aux anomalies que la moyenne sur la période de référence est élevée. Les anomalies simples ont donc été multipliées par la moyenne sur la période de référence (cf. formules 2 C).

|                                                                                                                        |                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $[A] \Delta X_{\text{année\_mois}} = X_{\text{année\_mois}} - X_{\text{mois.61}}$                                      | $[B] \Delta X \omega_{\text{année\_mois}} = \frac{X_{\text{année\_mois}} - X_{\text{mois.61}}}{ X_{\text{mois.61}} }$ |
| $[C] \Delta X \omega_{\text{année\_mois}} = (X_{\text{année\_mois}} - X_{\text{mois.61}}) \times  X_{\text{mois.61}} $ |                                                                                                                       |

FORMULES 2 A, B & C — Calcul des anomalies mensuelles simples (A) ou relatives (B & C). La formule B s'applique pour :  $X = P, BH_C, \text{ et } RU$  ; la formule C pour  $X = T, RAD, ETP, DE, IA, \text{ et } ETR$  ;  $\Delta$  = « anomalie » ;  $\omega$  = indique le caractère relatif de l'anomalie ; année = 1996 à 2007 ; mois = 1 à 12 ; mois.61 = moyenne du mois considéré sur la période de référence 1961-1990.

### 3.3.4.3. Calcul des indices d'évolution climatique

Une fois les anomalies mensuelles calculées, il est possible d'obtenir, par somme de ces dernières sur un intervalle de temps  $I$  donné (cf. figure 6), trois indices différents caractérisant l'évolution du climat ( $\Delta$  = anomalie annuelle moyenne sur l'intervalle  $I$ ) ou le cumul d'événements défavorables ( $N$  = nombre d'anomalies mensuelles défavorables sur l'intervalle  $I$  ;  $S$  = somme des anomalies mensuelles défavorables sur l'intervalle  $I$ ).

Ces indices ont été calculés pour les variables  $X = P, BH_C, RU$  (pour lesquelles les anomalies négatives sont considérées comme défavorables) et  $X = T, ETP, DE, IA \text{ et } ETR$  (les anomalies positives sont considérées comme défavorables) à partir des anomalies simples ou relatives sur les intervalles de temps  $I$  suivants :

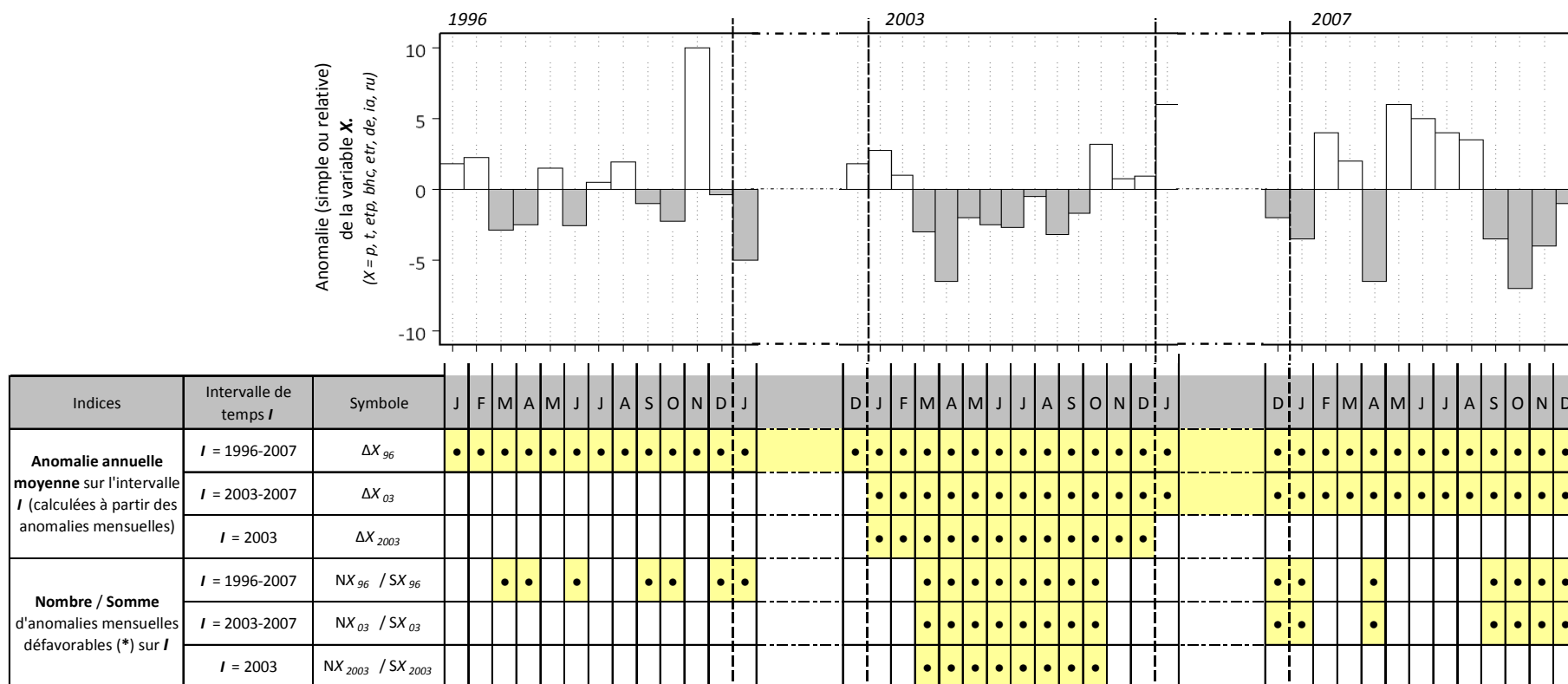


FIGURE 6 — Principe de calcul des trois types d'indices d'évolution du climat ( $\Delta$ , N et S) à partir des anomalies mensuelles simples ou relatives par rapport à la période de référence 1961-1990 pour  $X = P, T, ETP, BH_c, ETR, DE, IA, RU$ . Chaque indice est calculé sur plusieurs intervalles de temps (I). • = Anomalies prises en compte dans le calcul d'un indice.

En plus des cas illustrés ci-dessus, les indices ont été déclinés par saison sur chaque intervalle de temps (par exemple, un suffixe de type « \_sais » est alors rajouté au symbole, avec sais = pri (mars à mai pour le printemps), ete (juin à août pour l'été), aut (septembre à novembre pour l'automne) ou hiv (décembre à février pour l'hiver). Par exemple,  $\Delta P_{03\_pri}$  est l'anomalie printanière moyenne de précipitations sur l' intervalle 2003-2007).

(\*) La figure correspond au cas où,  $X = P, BH_c$  ou  $RU$  car les anomalies négatives sont considérées comme défavorables (anomalies grisées). Pour  $X = T, ETR, ETP, DE$  et  $IA$ , les anomalies positives sont considérées comme défavorables.

- 2003-2007, car il correspond à un épisode de sécheresse prolongée, notamment en région méditerranéenne ;
- 1996-2007, car l'année 1996 est la dernière année favorable en termes de précipitations surtout en région méditerranéenne ;
- chaque année comprise entre 2003 et 2007 (la figure 6 n'illustre que l'année 2003), pour voir si l'une d'entre elles a un poids suffisant pour expliquer à elle seule les dépérissements observés.

Enfin, pour chaque variable  $X$ , les trois indices sur chaque intervalle  $I$  ont été déclinés par saison (printemps = mars à mai, été = juin à août, automne = septembre à novembre, hiver = décembre à janvier). Cela représente un total de plus de 1 400 variables calculées qui rendent compte des évolutions du climat. Le tableau 8 récapitule l'ensemble de ces indices ainsi que leur nomenclature.

| Composante | Signification               | Cas                                                                 | Description                                                                                                                                                   |
|------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | Type de calcul              | $\Delta$                                                            | Anomalie = écart entre l'intervalle de temps considéré et la période de référence (1961-1990) et (cf. composante 5)                                           |
|            |                             | S                                                                   | Somme d'anomalies positives ou négatives                                                                                                                      |
|            |                             | N                                                                   | Nombre d'anomalies positives ou négatives                                                                                                                     |
| 2          | Variable $X$                | T                                                                   | Température moyenne LERFoB                                                                                                                                    |
|            |                             | P                                                                   | Précipitations moyennes LERFoB                                                                                                                                |
|            |                             | ETP, BH <sub>C</sub>                                                | Évapotranspiration potentielle (ETP), bilan hydrique climatique méthode de Turc (BH <sub>C</sub> )                                                            |
|            |                             | RU, DE, IA, ETR, "t" ou "p" (respectivement Thornthwaite ou Palmer) | Réserve utile (RU), déficit d'évaporation (DE), indice d'aridité (IA), évapotranspiration réelle (ETR), calculés selon les méthodes de Thornthwaite ou Palmer |
| 3          | Pondération                 | $\emptyset$                                                         | Pas de pondération                                                                                                                                            |
|            |                             | w                                                                   | Pondération de la variable par la valeur moyenne sur la période de référence                                                                                  |
| 4          | Intervalle de temps ( $I$ ) | année                                                               | Chaque année de 2003 à 2007                                                                                                                                   |
|            |                             | 96                                                                  | Intervalle 1996-2007                                                                                                                                          |
|            |                             | 03                                                                  | Intervalle 2003-2007                                                                                                                                          |
| 5          | Saison (_sais)              | _pri                                                                | Printemps (de mars à mai)                                                                                                                                     |
|            |                             | _ete                                                                | Été (de juin à août)                                                                                                                                          |
|            |                             | _aut                                                                | Automne (de septembre à novembre)                                                                                                                             |
|            |                             | _hiv                                                                | Hiver (de décembre à février)                                                                                                                                 |
|            |                             | $\emptyset$                                                         | Année complète                                                                                                                                                |

TABLEAU 8 — Nomenclature des différents indices d'évolution du climat. Le nom d'un indice est constitué de 5 composantes.

Exemples :  $\Delta PW_{03\_pri}$  correspond à l'anomalie pondérée de précipitations printanières sur l'intervalle 2003-2007 ;  $NT_{96\_ete}$  correspond au nombre d'anomalies positives de température estivale sur l'intervalle 1996-2007 ;  $Srutw_{2003\_pri}$  correspond à la somme des anomalies négatives pondérées de réserve utile calculée selon la méthode de Thornthwaite pour le printemps 2003.

- Variables caractérisant l'évolution annuelle moyenne de  $X$  sur l'intervalle de temps  $I$  ( $\Delta$ )

Le calcul de l'anomalie annuelle moyenne sur l'intervalle de temps  $I$  est réalisé à partir des anomalies mensuelles simples ou pondérées (somme des anomalies mensuelles sur  $I$  divisées par le nombre d'années considérées). Elle permet de caractériser une évolution moyenne du climat sur l'intervalle considéré mais masque les *extrema* (d'autant plus que l'intervalle est grand).

- Variables caractérisant un cumul sur  $I$  d'anomalies mensuelles défavorables (N et S)

Lors d'événements climatiques exceptionnels, il se peut que ce soit l'intensité ou la durée des anomalies défavorables (positives ou négatives selon la variable considérée), voire les deux à la fois, qui ait un impact sur la vitalité des arbres. Deux indices de cumul d'anomalies positives ou négatives

sont donc calculés. La figure 6 illustre ces indices dans le cas d'une variable telle que les précipitations, le bilan hydrique climatique ou la réserve utile. Le nombre d'anomalies défavorables ( $N$ ) traduit la durée cumulée des événements contraignants. La somme des anomalies défavorables ( $S$ ) intègre à la fois la notion de durée et d'intensité.

Parallèlement, les moyennes de chaque variable climatique et édaphique ont aussi été calculées sur ces différents intervalles à partir des modèles mensuels, afin de les comparer en termes de pouvoir prédictif vis-à-vis des dépérissements aux trois types d'indices d'évolution climatique.

Les indices calculés vont permettre de vérifier les hypothèses H3 formulées au § 2, selon la correspondance décrite dans le tableau 9.

| Hypothèse : | Les dépérissements sont dus à :             | Indices correspondants :                                                                                                                                            |
|-------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| H3 a        | Une année défavorable entre 2003 et 2007    | $\Delta X_{\text{année\_sais.}} / \Delta X\omega_{\text{année\_sais.}}$<br>$SX_{\text{année\_sais.}} / SX\omega_{\text{année\_sais.}}$<br>$NX_{\text{année\_sais}}$ |
| H3 b        | Un cumul d'années défavorables depuis 1996  | $SX_{96\_sais.} / SX\omega_{96\_sais.}$<br>$NX_{96\_sais}$                                                                                                          |
| H3 c        | Un cumul d'années défavorables depuis 2003  | $SX_{03\_sais.} / SX\omega_{03\_sais.}$<br>$NX_{03\_sais}$                                                                                                          |
| H3 d        | Une évolution moyenne du climat depuis 1996 | $\Delta X_{96\_sais.} / \Delta X\omega_{96\_sais.}$                                                                                                                 |
| H3 e        | Une évolution moyenne du climat depuis 2003 | $\Delta X_{03\_sais.} / \Delta X\omega_{03\_sais.}$                                                                                                                 |

TABLEAU 9 — Correspondance entre les hypothèses formulées sur le rôle du climat dans les dépérissements et les indices d'évolution du climat calculés pour les vérifier.  $\Delta$  = anomalie par rapport à la période 1961-1990,  $S$  = somme des anomalies défavorables,  $N$  = nombre d'anomalies défavorables ; année = 2003, 2004, ..., 2007 ; sais = printemps, été, automne, hiver, année entière ;  $X$  = T, P, ETP, BHC, RU, DE, IA, ETR ; 96 = intervalle 1996-2007 ; 03 = intervalle 2003-2007.

### 3.4. Démarche statistique de modélisation

#### 3.4.1. Hypothèses de base

L'état de santé d'une essence au sein de son aire de répartition potentielle peut être fonction des facteurs liés au peuplement et aux conditions écologiques. Les changements climatiques récents, plus rapides que les évolutions observées par le passé, pourraient entraîner des dépérissements voire des régressions de l'aire de répartition de certaines espèces.

#### 3.4.2. La méthode du modèle additif généralisé

Plusieurs méthodes statistiques sont adaptées pour modéliser des variables binaires. La méthode GAM (*generalized additive models*) a été retenue pour l'étude car elle offre une plus grande souplesse dans les courbes de réponse (seuils, dissymétries, optimums multiples). Or, lorsqu'on modélise les dépérissements, il est justement fréquent d'observer des effets de seuil, effets que la régression logistique, couramment utilisée en écologie, ne permet pas de modéliser.

Avec la méthode GAM, chaque point de la courbe de réponse est calculé comme le pseudo-barycentre des observations prises dans une fenêtre coulissante dont la largeur est choisie par

l'opérateur (cf. figure 7). Un modèle issu de cette méthode ne peut donc pas être traduit sous forme d'une équation. On parle de *modèles non paramétriques*.

Le calcul des pseudo-barycentres au sein de la fenêtre coulissante utilise des fonctions dites « d'ajustement » dont un des paramètres est un degré de liberté. Celui-ci est lié au nombre de points fixes au niveau desquels la courbe doit obligatoirement passer, ce qui résulte en un lissage plus ou moins important de cette courbe. Plus le degré de liberté est faible, plus le nombre de points fixes est important et plus les courbes sont lissées. Il a été choisi de travailler avec des fonctions d'ajustement *spline* dont le degré de liberté varie entre 2 et 4.

Un modèle GAM s'exprime comme une somme de fonctions qui prennent pour paramètres les variables explicatives et un certain degré de liberté (cf. formules 3 ci après).

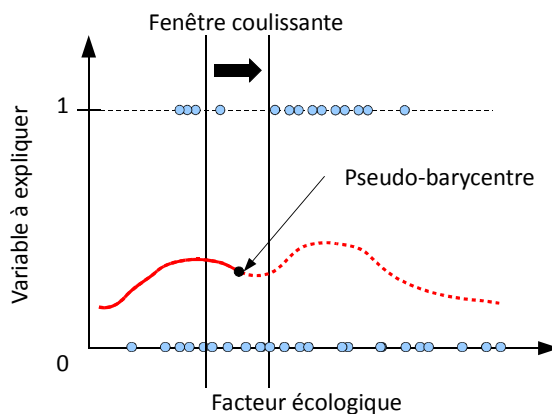


FIGURE 7 — Principe d'ajustement d'une courbe avec la méthode GAM illustré pour une variable binaire. La courbe de réponse correspond à la succession de pseudo-barycentres calculés dans une fenêtre coulissante.

$$\log\left(\frac{p(x)}{1+p(x)}\right) = f_1(x_1; n_1) + f_2(x_2; n_2)$$

FORMULES 3 — Formule d'un modèle GAM à deux variables explicatives  $x_1$  et  $x_2$  permettant de calculer la probabilité de la variable binaire  $x$ ;  $f_1$  et  $f_2$  = fonctions d'ajustement;  $n_1$  et  $n_2$  = degrés de liberté.

### 3.4.3. Principe de sélection des variables

La réduction de déviance ( $d^2$ ) est un estimateur de l'adéquation d'un modèle aux données qui servent à le calibrer. Plus elle est forte, meilleure est l'adéquation du modèle. C'est *via* ce critère statistique que les variables sont sélectionnées par étape pour constituer des modèles multivariés.

La sélection des variables est réalisée par la méthode ascendante (Droesbeke, Lejeune & Saporta, 2005). À chaque étape d'élaboration du modèle, parmi l'ensemble des variables explicatives candidates, est choisie celle qui, une fois introduite, conduira à la plus forte diminution de déviance par rapport au modèle nul. La significativité de l'apport de chaque nouvelle variable est testée au seuil de 1 % par une analyse de variance (ANOVA, *analysis of variance*).

Au-delà du critère statistique de déviance expliquée, la cohérence des variables sélectionnées par rapport à l'écologie de l'espèce est évaluée au regard de la bibliographie. Une variable conduisant à une forte diminution de déviance mais incohérente écologiquement est laissée de côté. En effet, étant donné le nombre de variables explicatives candidates, il est possible que certaines variables s'ajustent aux données par un effet de hasard statistique ou du fait de fortes corrélations avec d'autres indices plus pertinents.

Enfin, le coefficient de corrélation entre les variables sélectionnées est calculé afin de s'assurer de la non-redondance des facteurs explicatifs au sein du modèle.

L'ensemble de la démarche est implémenté sous S-Plus (Statistical Sciences Inc and Lucent Technologies Inc, 2000).

### 3.4.4. Évaluation de la qualité des modèles

La qualité statistique globale des modèles est évaluée avec le critère de l'AUC (*Area Under the Curve*), égale à l'aire sous la courbe ROC (*Receiver-Operating Characteristic*). Cette courbe, illustrée par la figure 8, est calculée pour chaque modèle.

Enfin, la capacité des modèles à prédire correctement les présences ou les absences de dépérissements est évaluée grâce au *succès* (proportion de présences et d'absences correctement prédites), à la *sensibilité* (proportion de présences réelles correctement prédites) et à la *spécificité* (proportion d'absences réelles correctement prédites).

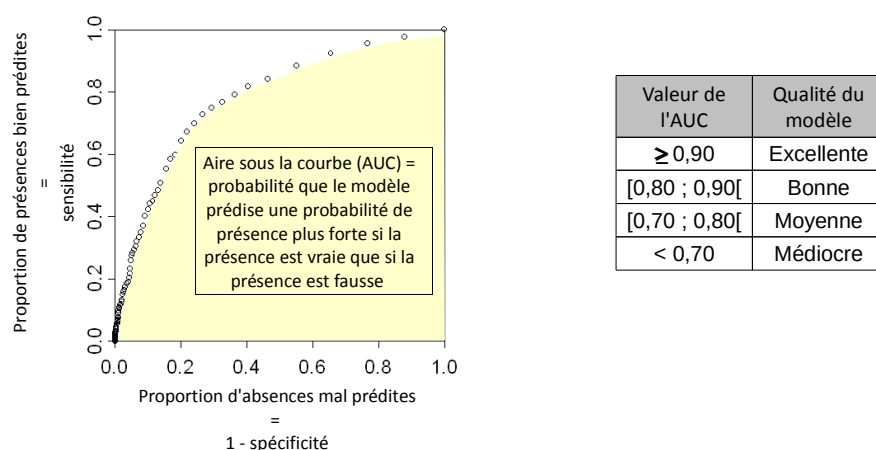


FIGURE 8 — Exemple de courbe ROC. Chaque point de la courbe correspond à une valeur de seuil de probabilité utilisable pour rendre binaire le modèle de dépérissement. La courbe permet donc de déterminer : (i) le meilleur seuil de probabilité qui permet de rendre le modèle binaire (i.e. celui qui permet le meilleur compromis entre présences bien prédites et absences mal prédites), (ii) la qualité globale du modèle grâce à l'aire sous la courbe (AUC).

### 3.4.5. Interprétation des modèles

#### 3.4.5.1. Graphiques d'interprétation

Dans la suite (cf. § 4), les variables explicatives sélectionnées sont présentées dans l'ordre de leur intégration dans les modèles. Pour chacune d'entre elles, la courbe de réponse exprimant la probabilité de mortalité (de branches ou d'arbres) est représentée en trait plein. Elle est superposée aux fréquences réellement observées. Afin de juger de l'amélioration du modèle au fur et à mesure de l'ajout des variables, l'AUC du modèle est indiqué pour chaque variable ajoutée. L'apport de chaque variable dans le modèle est évalué *via* sa contribution à la réduction de la déviance et s'exprime en pourcents. Il constitue la part du modèle expliquée par la variable.

Pour une variable, la forme de la courbe de réponse peut être influencée par les autres variables du modèle du fait de corrélations avec les autres variables explicatives. Pour connaître l'effet propre à une variable donnée, il est possible de représenter la courbe de réponse décorrélée des autres variables du modèle (dans le modèle global, la valeur des autres variables est fixée à la moyenne). Celle-ci a été rajoutée en pointillés sur les graphiques.

#### 3.4.5.2. Cartes d'interprétation

Les modèles obtenus sont spatialisés aux échelles de l'étude, au pas kilométrique pour la France et au pas de cinquante mètres pour les Alpes-Maritimes. La suite ArcGIS 9.3 (ESRI) a été utilisée pour l'ensemble des calculs spatiaux.



### 3.5. Protocole de terrain complémentaire à la modélisation

Suite à la modélisation, une phase de terrain s'est déroulée dans les Alpes-Maritimes afin d'observer la concordance des modèles avec la réalité, d'émettre des hypothèses quant aux causes qui pourraient expliquer des discordances et d'étudier brièvement l'implication possible de facteurs non pris en compte lors de la phase de modélisation (aspects biotiques, caractéristiques des peuplements, gestion forestière). Les observations ont été effectuées par binômes de placettes sur lesquelles les caractéristiques dendrométriques des peuplements ainsi que les éventuelles attaques biotiques ont été relevées. Le protocole détaillé est disponible à l'annexe 14.

## 4. Résultats

### 4.1. Caractéristiques écologiques des placettes « saines » ou « dépérissantes » à l'échelle de la France

|               | P. moy. 1961-1990<br>(mm/an)                  | T. moy. 1961-1990<br>(°C)         | pH                          | RUM (mm)                           | Altitude (m)                        |
|---------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Sapin pectiné | D 1 194<br>S 1 247<br>800 1000 1200 1400 1600 | D 7,2<br>S 7,4<br>5 6 7 8 9 10 11 | D 5,4<br>S 5,2<br>4 5 6 7 8 | D 53,2<br>S 57,8<br>30 45 60 75 90 | D 949<br>S 875<br>200 600 1000 1400 |
| Pin sylvestre | D 985<br>S 911<br>600 800 1000 1200 1400 1600 | D 8,5<br>S 9,3<br>5 6 7 8 9 10 11 | D 7,1<br>S 5,5<br>4 5 6 7 8 | D 55,2<br>S 65,4<br>30 45 60 75 90 | D 941<br>S 587<br>200 600 1000 1400 |

|               | G (m <sup>2</sup> )                | Âge (an)                         |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Sapin pectiné | D 32,6<br>S 32,5<br>10 20 30 40 50 | D 110<br>S 90<br>0 50 100 150    |
| Pin sylvestre | D 23,9<br>S 22,8<br>10 20 30 40 50 | D 75,0<br>S 65,0<br>0 50 100 150 |

TABLEAU 10 — Gamme des conditions écologiques et sylvicoles dans lesquelles sont présentes les deux essences étudiées en fonction de leur état sanitaire. Les variables climatiques et écologiques ont été calculées via les modèles du LERFoB sur les placettes de l'IFN sélectionnées pour l'étude. Les variables sylvicoles sont celles directement mesurées par l'IFN sur ces placettes. D = sur les placettes IFN avec au moins un arbre dépassant 5 % de branches mortes ( $n_{pin} = 505$  ;  $n_{sapin} = 271$ ) ; S = sur les placettes IFN classées comme saines à partir du même indice ( $n_{pin} = 2609$  ;  $n_{sapin} = 1656$ ).

■ = médiane ; ● = premier et troisième quartile

P. moy. = précipitations moyennes annuelles ; T. moy. = température moyenne annuelle ; RUM = réserve utile maximale.

Le tableau 10 présente pour le Pin et le Sapin les conditions écologiques et sylvicoles pour lesquelles les peuplements « sains » et « dépérissants » sont observés à l'échelle nationale. Au vu de ces données, les deux essences semblent dépérir majoritairement sur les sols plus superficiels (RUM plus faible), au pH élevé et en altitude, où la température moyenne annuelle est par conséquent plus faible. Les dépérissements plus importants dans l'étage montagnard semblent, à première vue,

contradictoires avec les préférences des deux espèces (cf. § 1.4.1) au tempérament montagnard. En ce qui concerne les précipitations moyennes annuelles, les écarts observés entre peuplements sains et dépérissants sont peu significatifs. Le pin semble malgré tout dépérir davantage au niveau des zones où les précipitations sont plus importantes, ce qui indiquerait encore les zones de montagne.

Cependant, la répartition des dépérissements à l'échelle de la France révèle que ceux-ci sont principalement localisés dans le Sud de la France (cf. Annexe 10 : Effectif et localisation des placettes IFN « dépérissantes » en fonction du seuil de mortalité de branches considéré.). Or, c'est dans cette région que se trouvent de nombreux massifs montagneux calcaires. Finalement, à l'échelle de la France, le pH, l'altitude et la RUM pourraient ressortir par effets de corrélations avec d'autres variables liées au contexte climatique méditerranéen : dans ces régions par exemple, des cumuls annuels élevés de précipitations masquent des sécheresses estivales qui peuvent être à l'origine de dépérissements. Par conséquent, ces résultats ne sont pas en contradiction avec l'autécologie des deux essences, ils mettent simplement en évidence un effet géographique. La même étude effectuée à une échelle plus locale (cf. § 4.3) montre que la localisation des dépérissements est cohérente avec les préférences des deux espèces.

Il se peut donc aussi que ces dépérissements soient liés aux évolutions climatiques récentes mises en évidence au § 1.2.1 en région méditerranéenne notamment. C'est ce qui va être étudié par la suite.

Enfin, d'un point de vue dendrométrie, ce sont les peuplements les plus âgés qui dépérissent le plus et la surface terrière ne semble pas avoir d'influence sur la vitalité des peuplements.

## 4.2. Modèles de dépérissement à l'échelle de la France

### 4.2.1. Effet du seuil de mortalité de branches considéré

Dans un premier temps, il est nécessaire de choisir le seuil de mortalité de branches qui sera utilisé pour calculer l'indice de dépérissement utilisé dans la suite (cf. 3.2.1.3).

| A) | Variables sélectionnées                      | Indice au seuil de mortalité de branches de : |             |             |
|----|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|-------------|
|    |                                              | 5 %                                           | 25 %        | 50 %        |
|    | ln (N pin/ha)                                | 23 %                                          | 27 %        | 32 %        |
|    | ln (âge)                                     | 27 %                                          | 39 %        | 43 %        |
|    | Anomalie de bilan hydrique estival 2003-2007 | 50 %                                          | 34 %        | 25 %        |
|    | <b>AUC du modèle</b>                         | <b>0,78</b>                                   | <b>0,81</b> | <b>0,79</b> |

| B) | Variables sélectionnées                        | Indice au seuil de mortalité de branches de : |             |             |
|----|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|-------------|
|    |                                                | 5 %                                           | 25 %        | 50 %        |
|    | Âge                                            | 36 %                                          | 29 %        | 42 %        |
|    | Proportion de sapin en surface terrière        | 32 %                                          | 24 %        | 27 %        |
|    | Anomalie de précipitations estivales 2003-2007 | 23 %                                          | 34 %        | 17 %        |
|    | Anomalie de température estivale 2003-2007     | 9 %                                           | 13 %        | 14 %        |
|    | <b>AUC du modèle</b>                           | <b>0,76</b>                                   | <b>0,77</b> | <b>0,78</b> |

TABLEAU 11 A & B — Comparaison pour le Pin sylvestre (A) et le Sapin pectiné (B) de la qualité des modèles obtenus avec les trois indices de mortalité de branches aux différents seuils. La qualité finale du modèle est estimée avec le critère de l'AUC (chiffres en gras). L'apport des différentes variables dans les modèles, en pourcentage de déviance expliquée, est indiqué en italique. Pour les deux essences, les modèles élaborés selon les trois seuils de mortalité de branches ont abouti à la sélection des mêmes variables explicatives.

Le tableau 11 présente en détail l'impact du choix du seuil de mortalité de branches utilisé sur la qualité des modèles. La capacité prédictive totale des modèles augmente globalement lorsque le seuil utilisé augmente. Mais l'augmentation de ce dernier va de pair avec une diminution des effectifs de placettes « dépérissantes » et certaines variables des modèles ne sont alors plus toujours significatives d'un point de vue statistique. C'est le cas pour les deux essences étudiées avec l'indice au seuil de 50 %. L'indice calculé avec ce seuil est donc éliminé d'office.

Quel que soit le seuil considéré pour calculer l'indice de mortalité de branches, il s'avère que les mêmes variables explicatives ont été sélectionnées parmi l'ensemble des variables candidates pour élaborer les modèles. Cela est un résultat intéressant qui confirme la robustesse des indices de dépérissement calculés à partir de la variable mortalité de branches. En effet, cela signifie que le choix du seuil n'a pas de réels impacts sur la signification de l'indice. Ces résultats confortent ceux de Rodriguez (2009), qui était arrivée aux mêmes conclusions lors de l'étude du dépérissement du Chêne pédonculé. Pour le Pin, le modèle calibré au seuil de 5 % donne une part explicative plus importante à l'évolution du climat que ne le font les modèles calibrés aux autres seuils. L'inverse est observé pour le Sapin. Il ne semble donc pas possible de tirer de conclusions générales quant à l'effet du seuil sur la part explicative des variables climatiques.

Du fait de ces résultats similaires selon les différents seuils évalués, le seuil de 5 % de branches mortes a été retenu car il permet d'avoir des effectifs de placettes « dépérissantes » supérieures à celles des autres seuils, ce qui permet d'améliorer la pertinence statistique des modèles réalisés.

#### 4.2.2. Modèle de dépérissement du Pin sylvestre

##### 4.2.2.1. Variables sélectionnées

Le modèle de mortalité de branches obtenu pour le Pin sylvestre comporte trois variables explicatives : deux variables caractérisant les peuplements et un indice d'évolution du climat (cf. figure 9). L'AUC finale du modèle est égale à 0,78. Le modèle obtenu est donc de qualité statistique moyenne, presque bonne (cf. § 3.4.4). 71 % des observations sont correctement prédites, avec une meilleure prédiction pour les présences de dépérissement (74 %) que pour les absences (71 %).

Les variables caractérisant les peuplements représentent à elles deux environ 50 % de la part explicative du modèle. Le nombre de pins par hectare constitue la première variable du modèle et est fortement corrélé à l'indice de mortalité de branches. En effet, la probabilité d'observer au moins un pin avec une mortalité de branches supérieure au seuil de 5 % augmente fortement avec le nombre de pins présents sur la placette. Autrement dit, plus il y a de pins sur la placette, plus il y a de probabilités d'en observer un qui soit dépérissant. Ce résultat trivial est directement lié à la méthode de relevé de la mortalité de branches sur les placettes IFN. En effet, cette variable n'est pas pondérée par le nombre d'individus observés. Pour tenir compte de l'effet du nombre d'individus sur la probabilité de dépérissement, il est important d'intégrer cette variable au modèle dès le début. Ainsi, l'effet des variables sélectionnées par la suite ne dépendra pas du nombre de pins sylvestres observés. Une autre façon de procéder aurait pu être de calculer une proportion d'arbres présentant un dépérissement de branches au-delà d'un certain seuil sur chaque placette. Vient ensuite l'âge du peuplement. La part explicative de l'âge est particulièrement importante (27 % de la déviance totale expliquée) ; ce résultat rejoint l'observation faite au § 4.1.

L'anomalie annuelle moyenne de bilan hydrique climatique estival sur l'intervalle 2003-2007 par rapport à la période 1961-1990 (cf. figure 9 C) représente à elle seule 50 % de la part explicative du modèle, ce qui est particulièrement conséquent pour une seule variable. En outre, l'AUC d'un modèle univarié avec pour seule variable explicative cette anomalie de bilan hydrique est égale à 0,73 (contre 0,76 avec 3 variables). Son pouvoir prédictif de la distribution spatiale des mortalités de branches observées entre 2006 et 2009 est donc très élevé. Une diminution annuelle moyenne du bilan hydrique supérieure à 10 % sur l'intervalle 2003-2007 par rapport à la normale 1961-1990 entraîne

une hausse brutale de la probabilité de mortalité de branches. Ceci met donc en évidence, à l'échelle de la France, une forte sensibilité des peuplements vis-à-vis de l'augmentation de la sécheresse climatique.

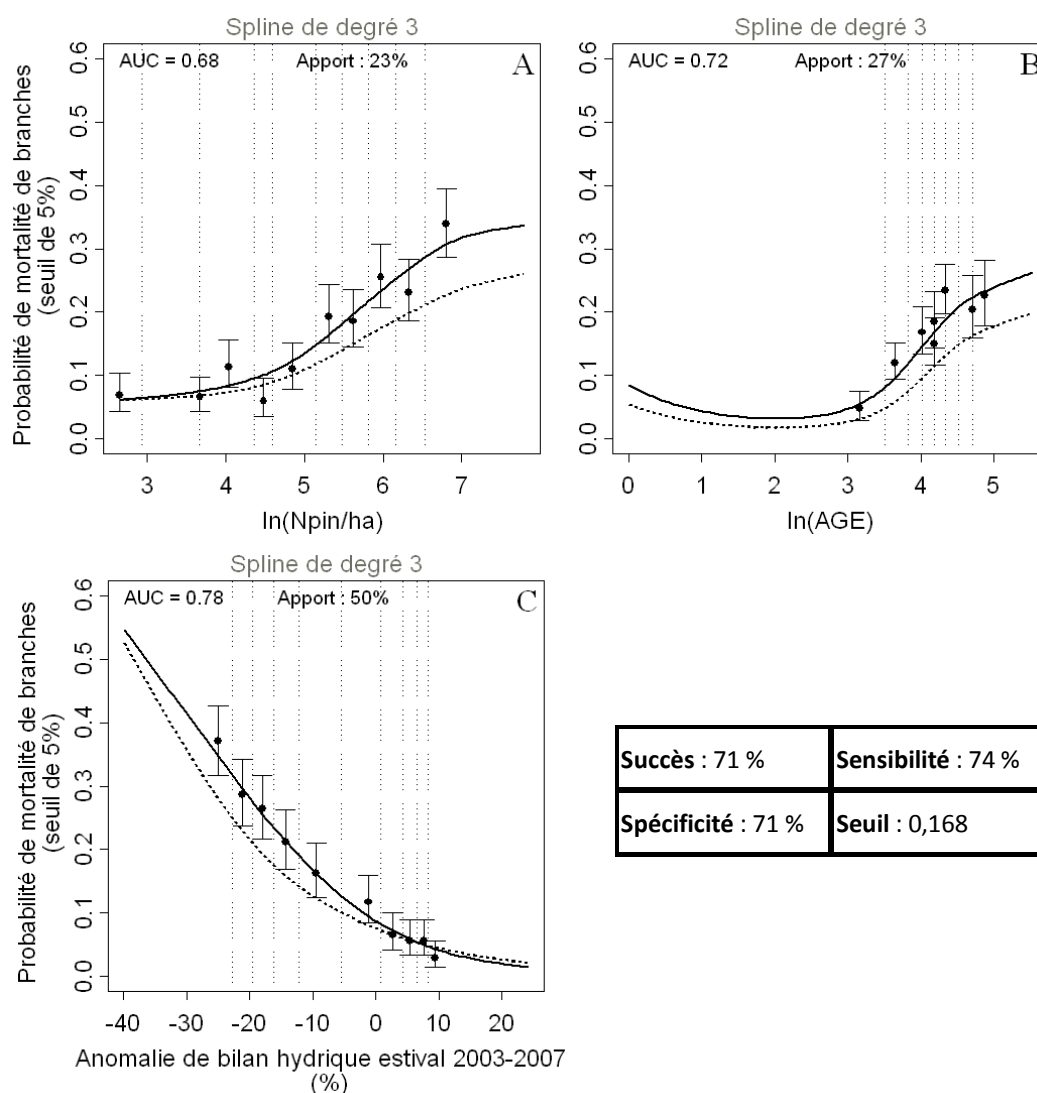


FIGURE 9 A, B, & C — Courbes de réponse pour les trois variables constitutives du modèle de mortalité de branches du Pin sylvestre : le nombre de tiges de pin par hectare (A), l'âge (B), l'anomalie annuelle moyenne de bilan hydrique estival sur l'intervalle 2003-2007 (C). Les variables sont présentées dans l'ordre de leur ajout dans le modèle. L'AUC permet de juger de l'évolution de la qualité du modèle au fur et à mesure de leur prise en compte. L'apport représente la part de réduction de déviance liée à la variable. La courbe pleine correspond à la courbe calibrée sur les observations (boîtes à moustaches) tandis que celle en pointillés correspond à la réponse de la variable décorrélée de l'effet des autres variables du modèle (succès = proportion de présences et d'absences correctement prédites ; sensibilité = proportion de présences réelles correctement prédites ; spécificité = proportion d'absences réelles correctement prédites ; seuil = seuil de probabilité à partir duquel la présence de dépérissement est significative).

Les courbes décorrélées (en pointillés sur la figure 9), qui traduisent l'effet de la variable décorrélée de celui des autres variables du modèle, sont peu différentes des courbes calibrées sur les observations. Cela traduit que les corrélations entre variables sont assez faibles (cela est confirmé au § 4.2.2.2 ci-après).

## 4.2.2.2. Corrélations entre les variables

|                              | ln (Npin) | ln (âge) | $\Delta\text{BHC}_{03\_ete}$ |
|------------------------------|-----------|----------|------------------------------|
| ln (Npin)                    |           |          |                              |
| ln (âge)                     | - 0,07    |          |                              |
| $\Delta\text{BHC}_{03\_ete}$ | - 0,31    | - 0,01   |                              |

TABLEAU 12 — Matrice des corrélations ( $r$ ) entre les variables explicatives retenues dans le modèle de mortalité de branches du Pin sylvestre ( $n = 3\,114$ ).

$N_{pin}$  = Nombre de tiges de pin par hectare ; âge = âge du peuplement relevé par l'IFN ;

$\Delta\text{BHC}_{03\_ete}$  = anomalie annuelle moyenne de bilan hydrique estival sur l'intervalle 2003-2007.

Les corrélations entre variables explicatives du modèle sont données dans le tableau 12. Pour le jeu de données étudié, les variables caractérisant les peuplements ne sont presque pas corrélées entre elles ( $r = -0,07$  entre l'âge et le nombre de pins présents sur la placette). Ces deux variables n'ont en effet pas de lien écologique. L'anomalie de bilan hydrique estival est corrélée faiblement au nombre de pins présents sur les placettes ( $r = 0,31$ ), ceci sans raisons particulières évidentes.

## 4.2.2.3. Comparaison du pouvoir prédictif du climat moyen à celui de ses évolutions

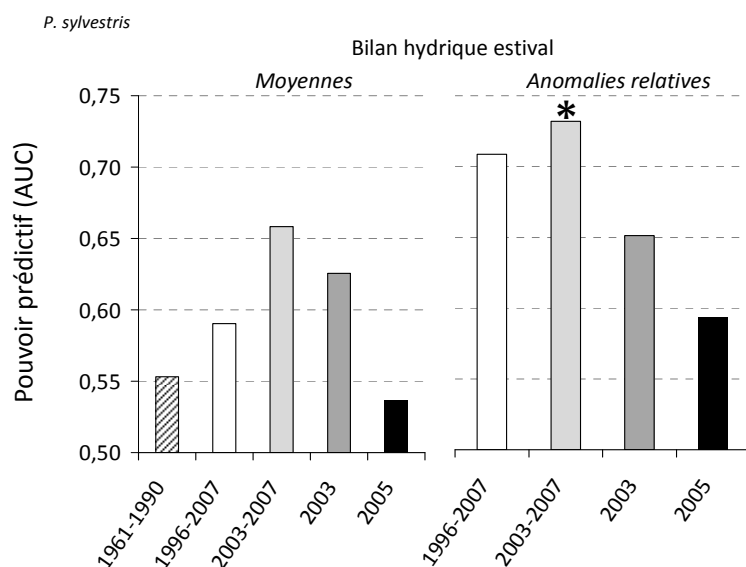


FIGURE 10 — Comparaison du pouvoir prédictif des anomalies annuelles moyennes de bilan hydrique climatique estival (1) avec celui des bilans hydriques climatiques estivaux moyens (1) sur les différents intervalles de l'étude (seules les deux années les plus extrêmes en termes de BH ont été représentées). Le pouvoir prédictif des différentes variables est mesuré grâce à l'AUC calculée d'après un modèle univarié. \* = variable finalement retenue dans le modèle de dépérissement multivarié. (1) moyenne des mois de juin, juillet et août.

Un des objectifs (cf. § 2, objectif n°1) consiste à cerner le rôle du changement climatique dans les dépérissements des deux essences étudiées. Pour cela, les anomalies climatiques sont calculées sur les intervalles de temps considérés dans l'étude (1996-2007, 2003-2007 ou les années extrêmes entre 2003 et 2007) et leur pouvoir prédictif est comparé au climat moyen sur ces mêmes intervalles. Cette comparaison est effectuée pour le bilan hydrique climatique qui est ressorti comme la variable la plus explicative des dépérissements. Un modèle univarié de dépérissement permet de calculer l'AUC pour chacune des variables testées (anomalies et moyennes calculées sur les intervalles de temps). Les résultats sont illustrés par la figure 10.

Pour un intervalle de temps considéré, l'anomalie relative de bilan hydrique estival discrimine systématiquement mieux les dépérissements que le bilan hydrique estival moyen. Cela montre de façon claire que c'est bien l'évolution relative du bilan hydrique climatique estival qui est responsable

des mortalités de branches observées et non pas le bilan hydrique estival moyen qui représente des conditions stationnelles plus ou moins favorables. Par ailleurs, parmi toutes les anomalies relatives, c'est celle calculée sur l'intervalle 2003-2007 qui ressort comme étant la plus discriminante. Le dépérissement du pin dépend dans cette étude davantage du cumul d'anomalies sur une période donnée que d'une anomalie observée sur une seule année extrême.

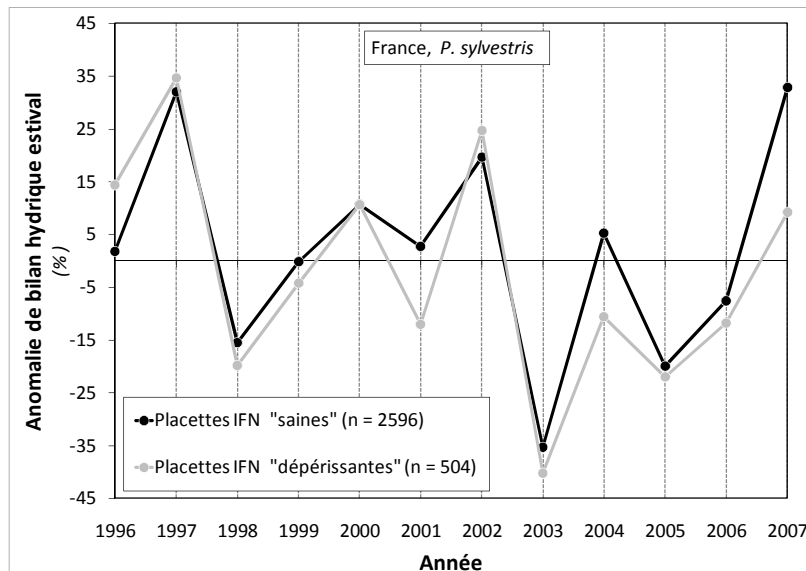


FIGURE 11 — Évolution entre 1996 et 2007 de l'anomalie moyenne de bilan hydrique estival sur les placettes IFN « saines » et « dépérissantes » inventoriées entre 2006 et 2009 (classement selon le critère de l'indice de mortalité de branches au seuil de 5 % ; placettes « dépérissantes » : au moins un arbre avec plus de 5 % de branches mortes dans son houppier notable). Les anomalies sont calculées par rapport à la période de référence 1961-1990.

La figure 11 complète les analyses précédentes en présentant « l'histoire climatique » des placettes classées comme saines ou dépérissantes. Il est intéressant de constater que toutes les années comprises entre 2003 et 2007 ont été plus défavorables en termes de sécheresse estivale sur les placettes « dépérissantes » que sur les placettes « saines ». De plus, les placettes « dépérissantes » avaient déjà subi en 1998, 1999 et 2001 des sécheresses plus importantes que les placettes « saines ». Au total, sur les placettes « dépérissantes », sept des douze années ont été de 5 à 40 % plus sèches en été que la normale, contre quatre pour les placettes « saines ».

En conclusion, les mortalités de branches observées par l'IFN entre 2006 et 2009 sur le Pin sylvestre apparaissent liées à l'aggravation des sécheresses estivales au moins entre 2003 et 2007, aggravation qui est due à un cumul d'étés anormalement secs sur cet intervalle et non à l'effet d'un seul été en particulier. Il est même possible que le pin réponde à des évolutions climatiques de plus long terme puisque les évolutions défavorables de sécheresses estivales sur les placettes « dépérissantes » ont commencé au moins cinq ans avant 2003 et que le pouvoir prédictif de l'anomalie annuelle moyenne de bilan hydrique estival sur l'intervalle 1996-2007 est lui aussi très bon (cf. figure 10).

Ces résultats mettent donc en cause le changement climatique dans le dépérissement du Pin sylvestre qui atteint le Sud de la France.

#### 4.2.2.4. Spatialisation du modèle

Intéressons-nous maintenant à la cartographie du modèle et de ses variables explicatives (cf. figure 12).

La carte représentant la probabilité de mortalité de branches au seuil de 5 % à l'échelle de la France (cf. figure 12 E) met en évidence une forte probabilité de mortalité dans le Sud du pays, notamment sur le pourtour méditerranéen (Alpes du Sud, Sud de l'Auvergne, Lozère et Pyrénées-Orientales).

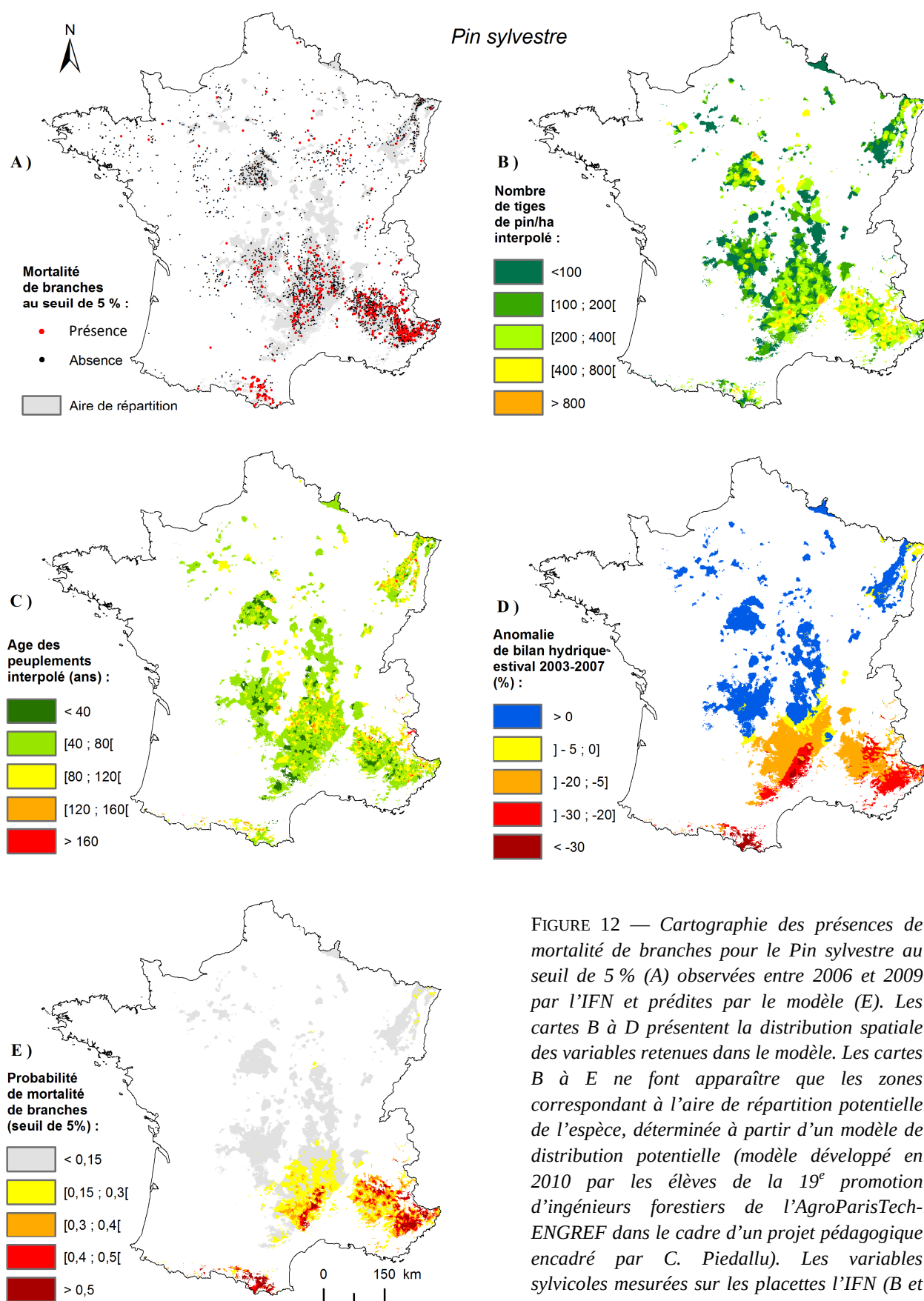


FIGURE 12 — Cartographie des présences de mortalité de branches pour le Pin sylvestre au seuil de 5 % (A) observées entre 2006 et 2009 par l'IFN et prédites par le modèle (E). Les cartes B à D présentent la distribution spatiale des variables retenues dans le modèle. Les cartes B à E ne font apparaître que les zones correspondant à l'aire de répartition potentielle de l'espèce, déterminée à partir d'un modèle de distribution potentielle (modèle développé en 2010 par les élèves de la 19<sup>e</sup> promotion d'ingénieurs forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF dans le cadre d'un projet pédagogique encadré par C. Piedallu). Les variables sylvicoles mesurées sur les placettes l'IFN (B et C) ont été interpolées (méthode de krigeage ordinaire).

Les zones de forte probabilité de mortalité de branches indiquées par le modèle concordent effectivement avec les observations de terrain (se référer aussi à la figure 13 A et B), sauf au Sud de l'Auvergne, la Lozère et l'Ardèche où celles-ci semblent surestimées. L'observation des variables explicatives permet de constater que cette surestimation possible est due à une évolution fortement négative du bilan hydrique dans cette zone. Étant donné la part explicative importante de cette variable dans le modèle (cf. 4.2.2.1), celui-ci traduit cette évolution défavorable par une probabilité élevée de mortalité de branches. Il se peut aussi que les observations de l'IFN sous-estiment la mortalité de branches réelle. En effet, dans les zones de moyenne montagne accessibles pour la gestion forestière, les récoltes de bois peuvent être importantes et masquer certains dépérissements (cf. § 5.4).

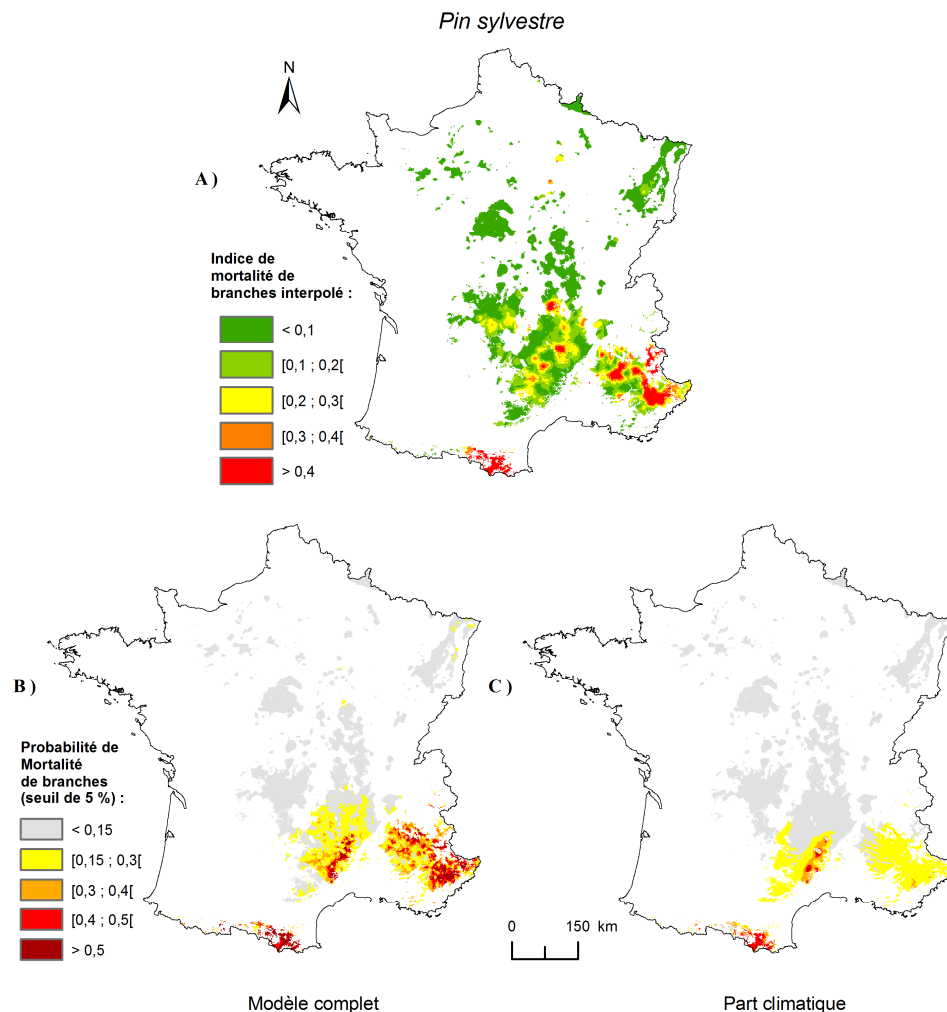


FIGURE 13 — Cartographie pour le *Pin sylvestre*, sur son aire de répartition potentielle, des présences de mortalité de branches interpolées (A) et des modèles de mortalité. Le modèle complet (B) correspond au modèle à trois variables explicatives : nombre de tiges de pin, âge et anomalie de bilan hydrique estival sur l'intervalle 2003-2007. La part climatique de ce modèle (carte C) est calculée en fixant les deux variables de peuplement égales à leur moyenne respective calculée à partir du jeu de données. Par comparaison, les deux cartes permettent de déterminer les zones où la probabilité de dépérissement liée à l'évolution du climat est accrue à cause des caractéristiques des peuplements.

La figure 13 met en évidence les différences de prédictions de mortalité de branches pour le Pin, en fonction de l'intégration ou non dans le modèle des caractéristiques des peuplements. Ces différences de prédictions sont particulièrement importantes, notamment dans les Alpes du Sud et l'Auvergne où le modèle complet fait part d'une probabilité plus élevée de dépérissement. Les



caractéristiques des peuplements seraient donc responsables de la forte probabilité de mortalité de branches dans ces régions. Les peuplements y sont en moyenne plus âgés (*cf.* figure 12 C), plus denses ou composés d'une part plus importante de pins (*cf.* figure 12 B).

### 4.2.3. Modèle de dépérissement du Sapin pectiné

#### 4.2.3.1. Variables sélectionnées

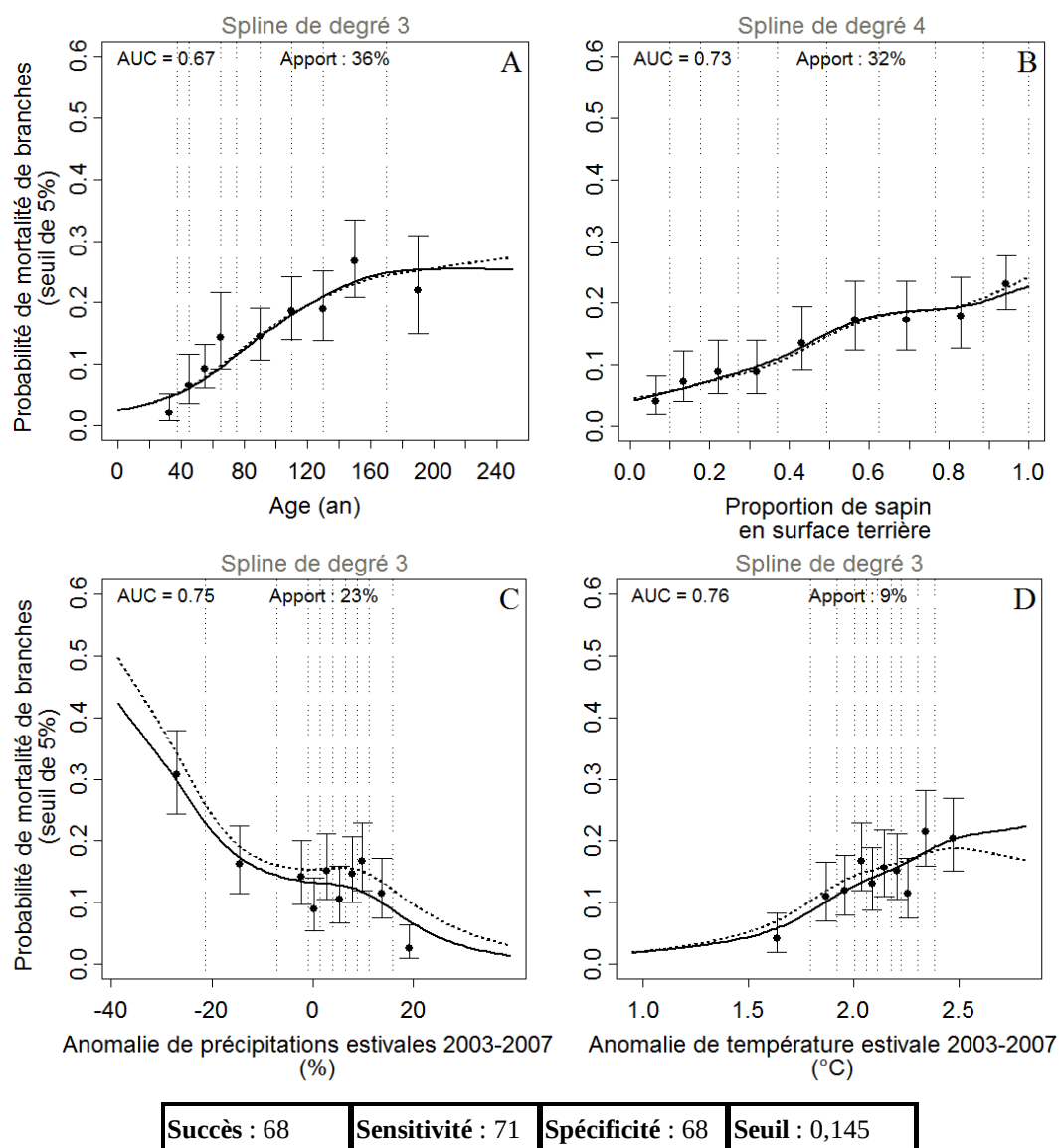


FIGURE 14 A, B, C & D — Courbes de réponse pour les quatre variables constitutives du modèle de mortalité de branches du Sapin pectiné : l'âge (A), la proportion de sapin en surface terrière (B), l'anomalie annuelle moyenne de précipitations estivales sur l'intervalle 2003-2007 (C) et celle de températures estivales sur le même intervalle (D). Les variables sont présentées dans l'ordre de leur ajout dans le modèle. L'AUC permet de juger de l'évolution de la qualité du modèle au fur et à mesure de leur prise en compte. L'apport représente la part de réduction de déviance liée à la variable. La courbe pleine correspond à la courbe calibrée sur les observations (boîtes à moustaches) tandis que celle en pointillés correspond à la réponse de la variable décorrélée de l'effet des autres variables du modèle (succès = proportion de présences et d'absences correctement prédites ; sensibilité = proportion de présences réelles correctement prédites ; spécificité = proportion d'absences réelles correctement prédites ; seuil = seuil de probabilité à partir duquel la présence de dépérissement est significative).

En ce qui concerne le Sapin pectiné, quatre variables explicatives de la mortalité des branches sont retenues : deux variables caractérisant les peuplements et deux indices d'évolution du climat (cf. figure 14). Le modèle obtenu est de qualité statistique moyenne ( $AUC = 0,76$ ). 68 % des observations sont correctement prédites, avec une meilleure prédiction pour les présences de dépérissement (71 %) que pour les absences (68 %).

Les variables caractérisant les peuplements représentent 68 % de la part explicative du modèle. Comme pour le Pin, l'âge des peuplements explique fortement les mortalités de branches (apport de 36 %). La seconde variable caractérisant le peuplement est la proportion de Sapin en surface terrière. Cet indice (cf. 3.3.1.2) est fonction du nombre de tiges de l'essence étudiée au sein du peuplement ainsi que de leur diamètre. Plus le peuplement est pur en Sapin (l'indice se rapproche de 1) plus la probabilité de dépérissement augmente. De la même manière que pour le Pin, cette variable est en fait corrélée à l'indice de mortalité de branches (car celui-ci n'est pas pondéré par le nombre d'individus observés). Pour que le choix des variables suivantes ne dépende pas du nombre de sapins présents dans les peuplements étudiés, cette variable est retenue dans le modèle de dépérissement.

L'évolution des conditions climatiques représente 32 % de la part explicative du modèle, ce qui est plus faible que pour le Pin. L'AUC d'un modèle bivarié qui prend pour variables les mêmes anomalies de précipitations et de température n'est d'ailleurs que de 0,65. Prises isolément, leur pouvoir prédictif vis-à-vis des dépérissements est donc relativement médiocre. Elles sont cependant significatives statistiquement et mettent en évidence qu'une augmentation de la température estivale moyenne et une diminution des précipitations estivales moyennes contribuent à l'augmentation de la probabilité de mortalité de branches. Comme le Pin sylvestre, le Sapin pectiné est sensible à l'augmentation de sécheresse estivale survenue entre 2003 et 2007 dans certaines régions.

Les courbes décorréelées (en pointillés sur la figure 14) sont identiques aux courbes calibrées sur les observations. Les corrélations entre variables sont donc assez faibles (ce que décrit aussi le § 4.2.3.2 ci-dessous) et chaque variable apporte une information non redondante avec celle contenue dans les autres.

#### 4.2.3.2. Corrélations entre les variables

Les corrélations entre variables explicatives du modèle (cf. tableau 13) sont très faibles. Il n'existe donc pas de lien écologique entre ces variables.

|                            | âge    | pGsapin | $\Delta P\omega_{03\_ete}$ | $\Delta T_{03\_ete}$ |
|----------------------------|--------|---------|----------------------------|----------------------|
| âge                        |        |         |                            |                      |
| pGsapin                    | - 0,01 |         |                            |                      |
| $\Delta P\omega_{03\_ete}$ | - 0,19 | 0,04    |                            |                      |
| $\Delta T_{03\_ete}$       | 0,04   | 0,06    | - 0,16                     |                      |

TABLEAU 13 — Matrice des corrélations ( $r$ ) entre les variables explicatives retenues dans le modèle de mortalité de branches du Sapin pectiné ( $n = 1\,927$ ).

âge = âge du peuplement relevé par l'IFN ; pGsapin = proportion de sapin en surface terrière ;  $\Delta P\omega_{03\_ete}$  = anomalie annuelle moyenne de précipitations estivales sur l'intervalle 2003-2007 ;  $\Delta T_{03\_ete}$  = anomalie annuelle moyenne de température estivale sur l'intervalle 2003-2007.

#### 4.2.3.3. Comparaison du pouvoir prédictif du climat moyen à celui de ses évolutions

Afin de mieux comprendre l'effet du climat sur la distribution spatiale des dépérissements, le pouvoir prédictif des anomalies climatiques calculées pour les précipitations et les températures a été comparé à celui des précipitations et températures moyennes sur les différents intervalles de temps étudiés (1996-2007, 2003-2007 et les années extrêmes : 2003, 2005 pour les précipitations et 2003, 2007 pour les températures) grâce à l'AUC issue de modèles univariés. Les résultats sont illustrés par la figure 15.

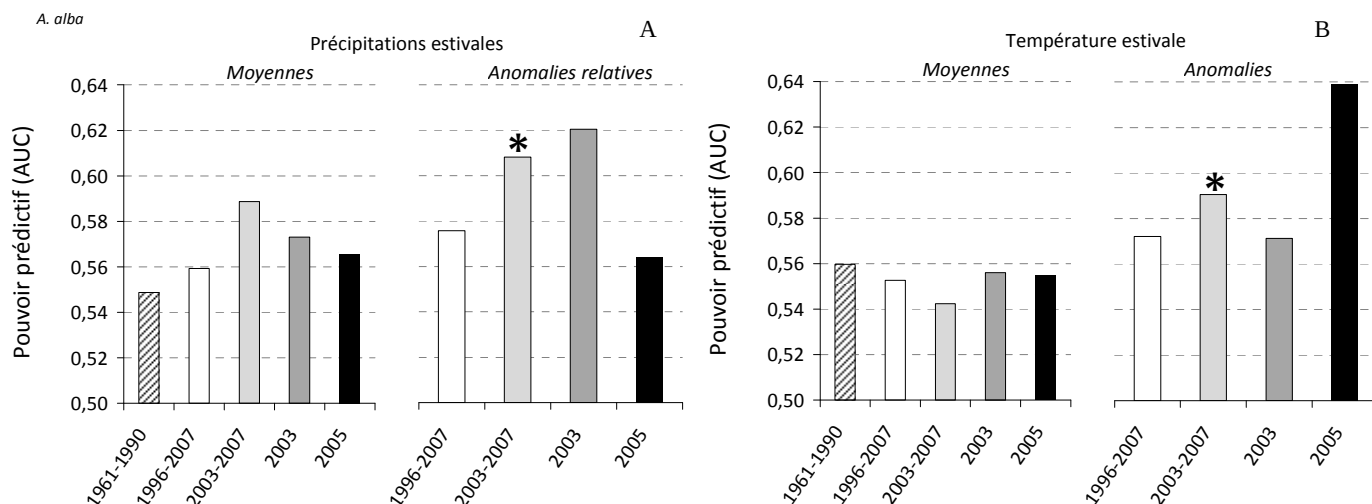


FIGURE 15 — Comparaison sur les intervalles de temps de l'étude (seules les deux années les plus extrêmes en termes de précipitations ou de température sont considérées) du pouvoir prédictif des anomalies annuelles moyennes de précipitations estivales (1) avec les précipitations estivales moyennes (A). Même comparaison entre les anomalies annuelles moyennes de température estivale (1) et la température estivale moyenne (B). Le pouvoir prédictif des différentes variables est mesuré grâce à l'AUC calculée d'après un modèle univarié. \* = variable finalement retenue dans le modèle de dépérissement multivarié. (1) moyenne des mois de juin, juillet et août.

Quel que soit l'intervalle de temps considéré, les anomalies estivales discriminent systématiquement mieux les dépérissements que la moyenne estivale. Comme pour le Pin, cela montre de façon claire que c'est bien l'évolution du climat estival qui est en partie responsable des mortalités de branches observées.

Pour les précipitations estivales, l'anomalie relative de l'année 2003 ressort comme étant fortement discriminante. C'est cependant l'anomalie relative de précipitations sur l'intervalle 2003-2007 qui a été choisie, car c'est elle qui a le meilleur pouvoir prédictif dans le modèle multivarié de dépérissement du Sapin. De même, avec un modèle univarié, c'est l'anomalie de température estivale de l'année 2007 qui discrimine le mieux les dépérissements. Cette variable n'est cependant pas significative dans le modèle de dépérissement, contrairement à l'anomalie estivale moyenne sur l'intervalle 2003-2007, qui est par conséquent retenue.

À l'inverse du Pin, le Sapin semble non seulement sensible à l'évolution moyenne des précipitations et de la température estivale, mais aussi aux extrêmes climatiques (déficit de précipitations de l'été 2003 et canicule de l'été 2007). Ainsi, les mortalités de branches observées par l'IFN entre 2006 et 2009 sur le Sapin pectiné sont, comme pour le Pin sylvestre, la conséquence de l'aggravation moyenne des sécheresses estivales entre 2003 et 2007. Le Sapin semble notamment sensible aux étés extrêmes : 2003 pour le manque de précipitations et 2007 pour les fortes températures. Ces observations vont dans le sens d'un effet du changement climatique sur la vitalité de l'essence.

#### 4.2.3.4. Spatialisation du modèle

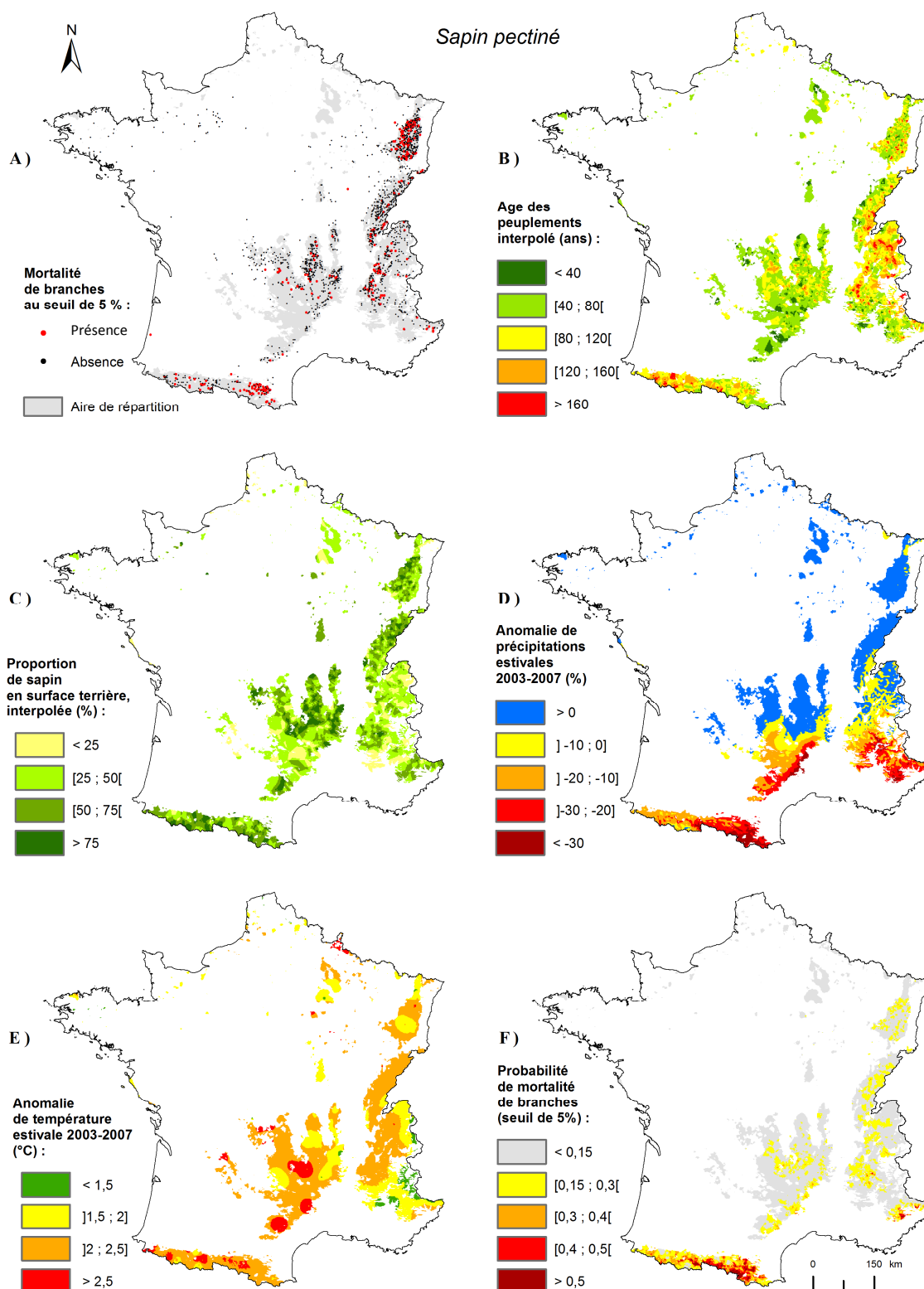


FIGURE 16 — Cartographie des présences de mortalité de branches pour le Sapin pectiné au seuil de 5 % (A) observées entre 2006 et 2009 par l'IFN et prédites par le modèle (F). Les cartes B à E présentent la distribution spatiale des variables retenues dans le modèle. Les cartes B à F ne font apparaître que les zones correspondant à l'aire de répartition potentielle de l'espèce, déterminée à partir d'un modèle de distribution potentielle (modèle LERFoB, Piedallu et al., 2010). Les variables dendrométriques mesurées sur les placettes de l'IFN (B et C) ont été interpolées (méthode de krigeage ordinaire).

La répartition de la probabilité de mortalité de branches au seuil de 5 % pour le Sapin pectiné est un peu plus diffuse que pour le Pin sylvestre (cf. figure 16 F). Bien que les fortes probabilités soient très représentées dans le Sud du pays (notamment les Pyrénées-Orientales et les Alpes-Maritimes), des probabilités de mortalité, certes plus faibles mais cependant significatives, sont présentes jusque dans les Alpes, le Jura et les Vosges. Le Massif central n'est pas non plus épargné.

Le modèle concorde assez bien avec les observations de mortalité de branches (se référer aussi à la figure 17 A et B), sauf dans les Vosges où il semble sous-estimer légèrement les dépérissements et au Sud du Massif central où il semble, à l'inverse, les surestimer.

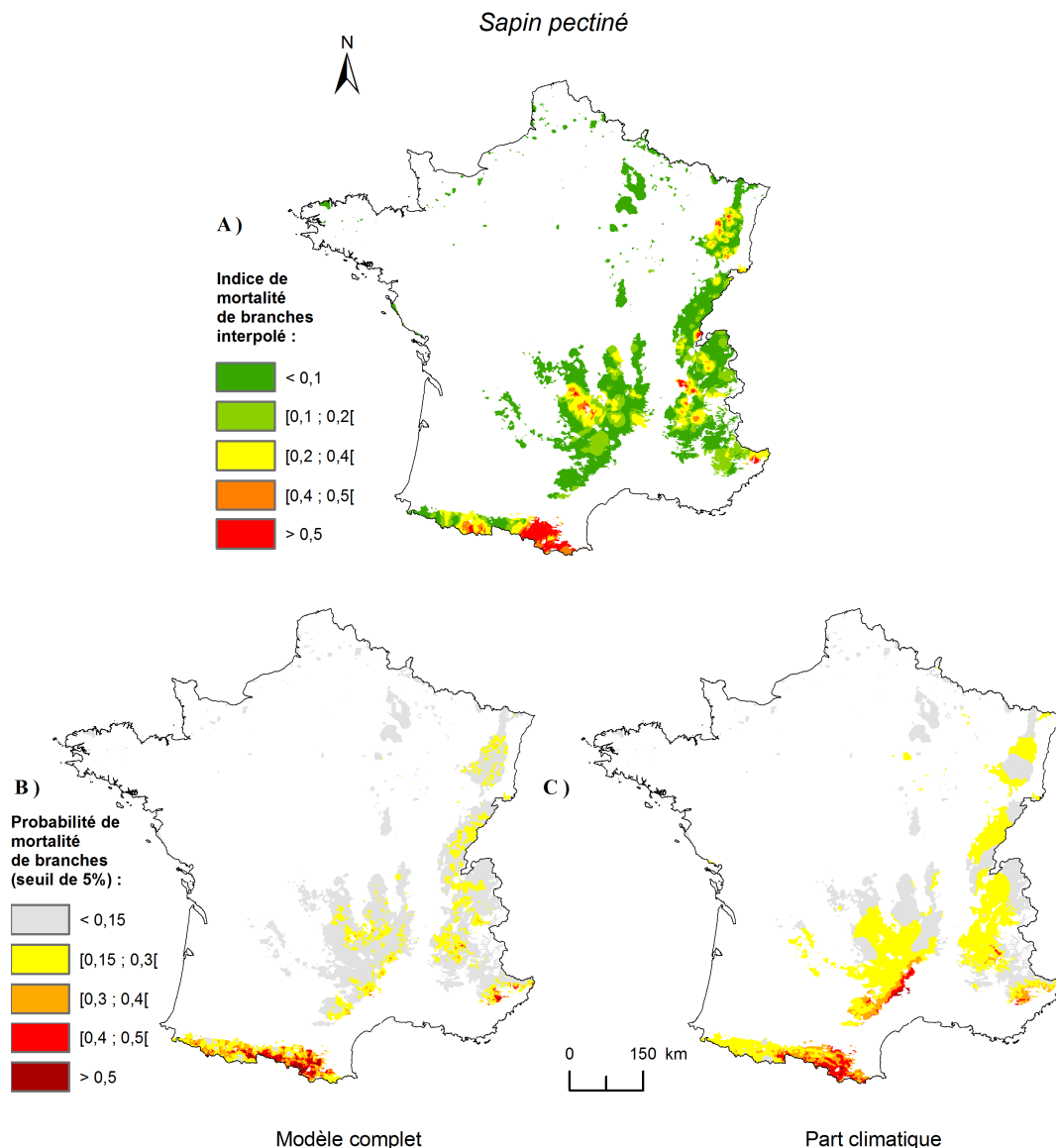


FIGURE 17 — Cartographie pour le Sapin pectiné, sur son aire de répartition potentielle, des présences de mortalité de branches interpolées (A) et des modèles de mortalité. Le modèle complet (B) correspond au modèle à quatre variables explicatives : âge, proportion de sapin en surface terrière, anomalie annuelle moyenne de précipitations estivales sur l'intervalle 2003-2007 ainsi que de température. La part climatique de ce modèle (carte C) est calculée en fixant les deux variables de peuplement égales à leur moyenne respective calculée à partir du jeu de données, de façon à faire ressortir la part explicative des anomalies climatiques. Par comparaison, les deux cartes permettent de déterminer les zones où la probabilité de dépérissement liée à l'évolution du climat est accrue à cause des caractéristiques des peuplements.

Dans les Vosges, la proportion de sapin en surface terrière est importante et l'âge des peuplements est assez hétérogène (cf. figure 16 B & C). Cette région n'a par ailleurs, en moyenne, pas subi d'évolution négative des pluies estivales sur l'intervalle 2003-2007 mais l'élévation des températures estivales est par endroit assez importante (cf. figure 16 D & E). Si on considère la part climatique du modèle (cf. figure 17 C), celle-ci fait ressortir l'effet de l'élévation de température. Les caractéristiques des peuplements, de par leur hétérogénéité (et notamment de par la présence de peuplements jeunes) tendent à faire diminuer l'étendue spatiale des probabilités de mortalité de branches. Par conséquent, si les conditions de température estivales connues entre 2003 et 2007 dans le Nord et le Sud des Vosges deviennent les conditions climatiques « habituelles », il est à craindre que les peuplements présentent à l'avenir des signes de dépérissement encore plus importants.

La surestimation apparente des mortalités de Sapin par le modèle dans cette même région est donc probablement liée à la diminution des précipitations et à l'augmentation des températures qui, ensemble, s'apparentent à une anomalie de bilan hydrique climatique. Cette observation est donc similaire à celle faite pour le Pin sylvestre dans ces régions (cf. § 4.2.2.4). Il se peut aussi que les observations de l'IFN sous-estiment les dépérissements dans cette région (cf. § 5.4).

#### 4.3. Caractéristiques écologiques des peuplements sains ou dépérissants à l'échelle des Alpes-Maritimes

Après avoir étudié le dépérissement du Pin sylvestre et du Sapin pectiné à l'échelle de la France grâce à l'indice binaire de mortalité de branches au seuil de 5 %, nous nous sommes focalisés sur le département des Alpes-Maritimes, fortement concerné par les mortalités de ces deux essences. La même méthode de modélisation est utilisée, à partir cette fois-ci d'un indice binaire de mortalité d'arbres au sein des peuplements, seule donnée disponible pour caractériser spatialement les dépérissements (cf. § 3.2.2). À la différence de l'indice de mortalité de branches, un tel indice traduit le stade ultime du dépérissement. Tout comme pour l'étude menée à l'échelle de la France, intéressons-nous d'abord aux conditions écologiques dans lesquelles les peuplements sains et dépérissants sont observés dans les Alpes-Maritimes (cf. tableau 14).

|               | P. moy. 1961-1990<br>(mm)            | T. moy. 1961-1990<br>(°C)         | pH                              | RUM (mm)                              | Altitude (m)                             |
|---------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|
| Sapin pectiné | D 1 082<br>S 1 094<br>1000 1100 1200 | D 7,6<br>S 6,6<br>5 6 7 8 9 10 11 | D 6,7<br>S 6,6<br>6 6,5 7 7,5 8 | D 41,9<br>S 45,5<br>30 35 40 45 50 55 | D 1 291<br>S 1 494<br>800 1100 1400 1700 |
| Pin sylvestre | D 1 066<br>S 1 070<br>1000 1100 1200 | D 8,8<br>S 8,3<br>5 6 7 8 9 10 11 | D 7,4<br>S 7,3<br>6 6,5 7 7,5 8 | D 39,2<br>S 40,5<br>30 35 40 45 50 55 | D 1 059<br>S 1 163<br>800 1100 1400 1700 |

TABEAU 14 — Gamme des conditions écologiques dans lesquelles sont présentes les deux essences étudiées en fonction de leur état sanitaire dans les Alpes-Maritimes. Les variables climatiques et écologiques ont été calculées via les modèles du LERFoB sur les jeux de données sélectionnés pour l'étude. D = sur les placettes où l'essence est classée comme dépérissante à partir de l'indice de mortalité d'arbres ( $n_{pin} = 1\,015$  ;  $n_{sapin} = 2\,161$ ) ; S = sur les placettes où l'essence est classée comme saine à partir du même indice ( $n_{pin} = 8\,758$  ;  $n_{sapin} = 6\,960$ ) ; ■ = médiane ; ● = premier et troisième quartile).

P. moy. = précipitations moyennes annuelles ; T. moy. = température moyenne annuelle ; RUM = réserve utile maximale.

Au vu des données du tableau 14, bien que les différences ne soient pas significatives, les deux essences semblent dépérir majoritairement à basse altitude, là où les conditions de sécheresse sont les plus défavorables (température moyenne annuelle plus élevée, précipitations moyennes annuelles plus faibles et faible réserve utile maximale). Il semble, par ailleurs, que la richesse chimique du sol (pH élevé) soit défavorable aux deux essences. Ces résultats observés à l'échelle locale des Alpes-Maritimes sont cohérents avec les connaissances sur l'autécologie des deux essences étudiées (cf. § 1.4.1), contrairement aux résultats à l'échelle nationale (§ 4.1) qui traduisent visiblement une corrélation avec les variables plus pertinentes sélectionnées dans les modèles nationaux.

#### 4.4. Modèles de dépérissement à l'échelle des Alpes-Maritimes

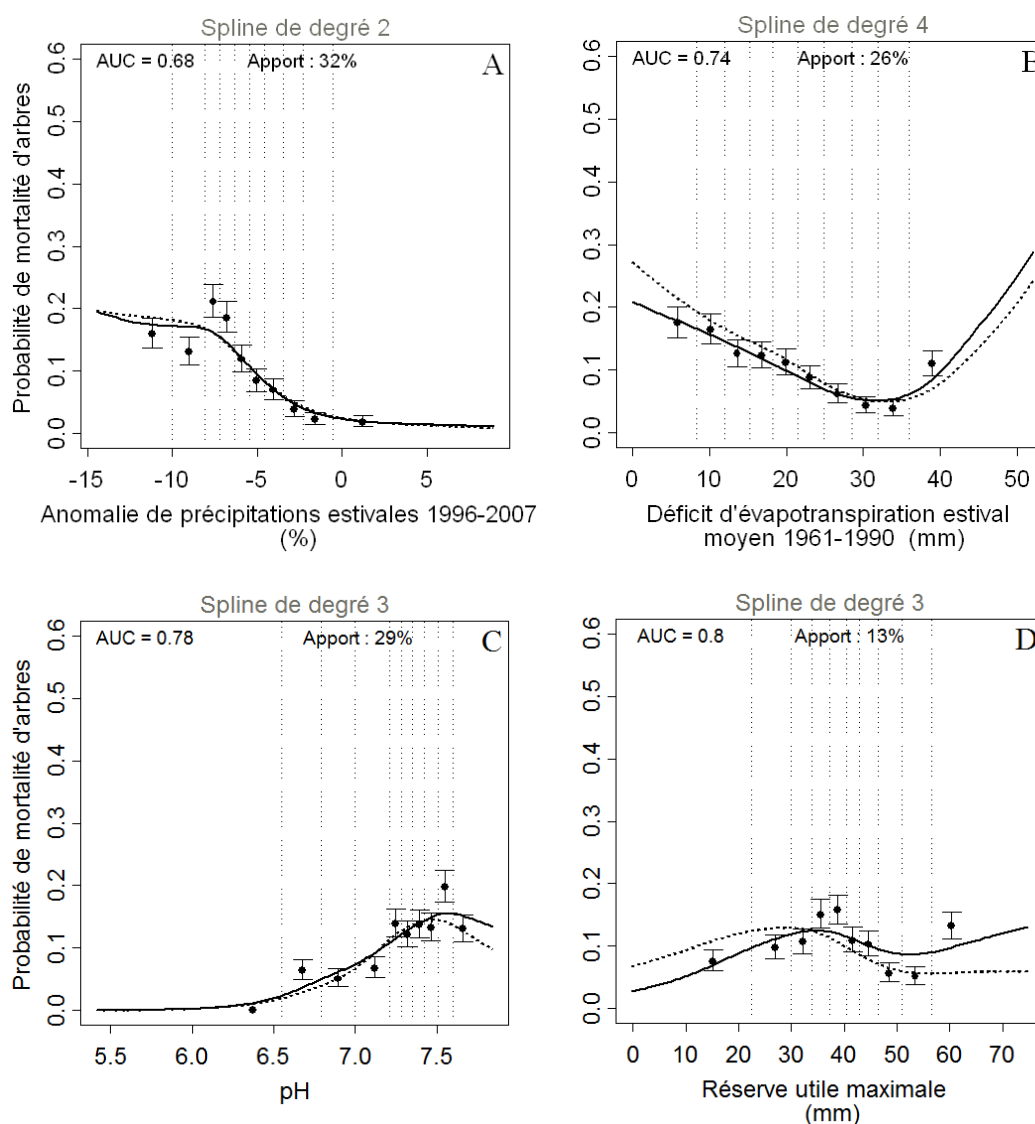
##### 4.4.1. Modèle de dépérissement du Pin sylvestre

###### 4.4.1.1. Variables sélectionnées

Pour le Pin sylvestre, quatre variables explicatives de la mortalité des arbres au sein des peuplements sont retenues : une variable d'évolution du climat, en termes d'anomalies par rapport à la période de référence, et trois variables traduisant les conditions stationnelles moyennes (cf. figure 18). Le modèle obtenu est de bonne qualité statistique (AUC = 0,80). Cependant, seulement 68 % des observations sont correctement prédites. Si la prédiction des présences de mortalités est très bonne (81 % des présences réelles sont correctement prédites), celle des absences est beaucoup moins bonne (seulement 66 % des absences réelles sont correctement prédites). À première vue, le modèle risque fortement de prédire des mortalités de façon excessive.

L'anomalie annuelle moyenne de précipitations moyennes annuelles sur l'intervalle 1996-2007 constitue à elle seule 32 % de la part explicative du modèle. L'AUC de cette variable, calculée à partir du modèle univarié, est égale à 0,68. Considéré isolément, son pouvoir prédictif des dépérissements n'est pas très fort et la courbe de réponse met en évidence un seuil d'anomalie annuelle moyenne de précipitations (environ autour de - 5 %) en-deçà duquel la probabilité de mortalité des pins augmente fortement.

Les variables traduisant les conditions écologiques moyennes représentent 68 % de la part explicative du modèle. La première des trois variables prises en compte est le déficit estival moyen d'évapotranspiration sur la période de référence. Celle-ci, exprimée en millimètres, traduit l'eau qui manque aux arbres pour évapotranspirer sur la période estivale (juin à août). La courbe de réponse pour cette variable est à première vue surprenante. La probabilité de mortalité est en effet élevée pour des déficits d'évapotranspiration faibles ou très forts. Dans la gamme intermédiaire de déficits, la probabilité de mortalité est faible (cf. figure 18 B). En d'autres termes, les mortalités apparaissent majoritairement sur les stations qui sont d'ordinaire peu ou, au contraire, très arides. Sur les stations d'aridité moyenne, les pins semblent acclimatés : ils ont résisté aux évolutions négatives de précipitations qui ont lieu depuis 1996. Cette interprétation est appuyée par la figure 19 qui représente la probabilité de mortalité du Pin en fonction des deux premières variables du modèle (anomalie annuelle moyenne de précipitations estivales sur l'intervalle 1996-2007 et déficit d'évapotranspiration estival moyen sur la période 1961-1990). Sur cette figure, deux « pôles » de dépérissements peuvent en effet être constatés. À droite du graphique, au niveau des forts déficits d'évapotranspiration, se trouvent les peuplements sur stations « critiques » (même si ces peuplements sont acclimatés, les conditions de sécheresse, déjà habituellement très contraignantes, ont été létales pour l'espèce) ; à gauche, au niveau des faibles déficit d'évapotranspiration, se trouvent les peuplements non acclimatés sur stations favorables (les arbres pourraient y être morts par manque d'adaptation à la sécheresse). Enfin, au centre, se trouvent les peuplements sur station d'aridité moyenne, suffisamment acclimatés pour résister à la sécheresse qui, dans ces zones, n'a pas dépassé le seuil léthal.



|                      |                           |                           |                      |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| <b>Succès : 68 %</b> | <b>Sensibilité : 81 %</b> | <b>Spécificité : 66 %</b> | <b>Seuil : 0,103</b> |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|

FIGURE 18 A, B, C & D — Courbes de réponse pour les quatre variables constitutives du modèle de mortalité d'arbres au sein des peuplements de Pin sylvestre des Alpes-Maritimes : l'anomalie annuelle moyenne de précipitations moyennes annuelles sur l'intervalle 1996-2007 (A), le déficit d'évapotranspiration estival moyen sur la période de référence (B), le pH (C) et la réserve utile maximale (D). Les variables sont présentées dans l'ordre de leur ajout dans le modèle. L'AUC permet de juger de l'évolution de la qualité du modèle au fur et à mesure de leur prise en compte. L'apport représente la part de réduction de déviance liée à la variable. La courbe pleine correspond à la courbe calibrée sur les observations (boîtes à moustaches) tandis que celle en pointillés correspond à la réponse de la variable décorrélée de l'effet des autres variables du modèle (succès = proportion de présences et d'absences correctement prédites ; sensibilité = proportion de présences réelles correctement prédites ; spécificité = proportion d'absences réelles correctement prédites ; seuil = seuil de probabilité à partir duquel la présence de dépérissement est significative).



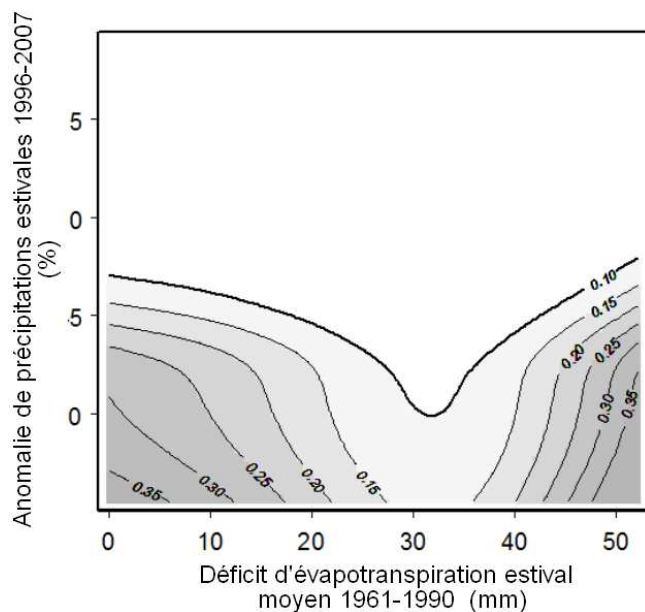


FIGURE 19 — Probabilité de mortalité du Pin sylvestre en fonction de l'anomalie annuelle moyenne de précipitations estivales sur l'intervalle 1996-2007 et du déficit d'évapotranspiration estival moyen sur la période de référence (1961-1990). Les courbes correspondent aux isoprobabilités de mortalité comprises entre 0 et 1.

La figure 19 permet de faire l'hypothèse d'une acclimatation des peuplements à la sécheresse. Cette hypothèse permettrait d'expliquer pourquoi les dépérissements du Pin sylvestre sont observables en grand nombre sur les versants nord (cf. 1.4.3), comme le met aussi en évidence la cartographie du modèle à fine échelle (cf. Annexe 15 : Observations effectuées sur les placettes de Touët-sur-Var (Alpes-Maritimes) pour le Pin sylvestre.) Cette hypothèse d'acclimatation plus ou moins grande des peuplements en fonction des conditions moyennes d'aridité auxquelles ils sont soumis, permettrait même d'expliquer la chronologie des dépérissements à l'échelle du département (Vennetier, communication personnelle). En effet, suite à la canicule de 2003, les mortalités de pins sont apparues d'abord sur les versants nord (donc les zones les moins acclimatées), puis c'est seulement avec la répétition des sécheresses jusqu'en 2007, que les dépérissements sur les versants sud sont apparus (stations où les peuplements sont acclimatés mais où le seuil léthal a fini par être franchi). Ces observations pourraient suggérer que les peuplements sur stations « critiques » sont capables de supporter une année extrême, mais pas leur répétition comme cela a été le cas sur l'intervalle 2003-2007. Les peuplements non acclimatés seraient, quant à eux, beaucoup plus tributaires de sécheresses plus courtes.

En plus des variables climatiques précédentes, le pH du sol et la RUM discriminent spatialement les mortalités. Plus le pH est élevé, plus la probabilité de dépérissement augmente. Cela est à rapprocher de la sensibilité de cette essence au calcaire actif (cf. § 1.4.1). L'effet de la RUM est déjà en partie traduit par le déficit d'évaporation, car la RUM est un des paramètres qui permet de le calculer. RUM et DE sont d'ailleurs deux variables inversement corrélées (cf. tableau 15) et leur coefficient de corrélation est le plus élevé de ceux calculés entre les variables du modèle ( $r = -0,24$ , ce qui reste cependant relativement faible). Cette variable, la RUM, est cependant retenue dans le modèle car elle précise l'effet du DE. En effet, les fortes RUM correspondent principalement aux zones de DE faible où la probabilité de mortalité est élevée. Or, une fois décorrélée du DE, la courbe de réponse de la RUM montre que la probabilité de mortalité sur RUM forte est faible. Cela signifie que les mortalités observées dans les zones de faibles DE ne sont pas liées à des sols superficiels, mais bien à un effet du climat. Ainsi, en complément des variables climatiques, la faible richesse chimique du sol liée à l'absence de calcaire et la forte capacité du sol à stocker l'eau jouent comme des facteurs qui tamponnent l'effet des autres variables vis-à-vis des dépérissements.

4.4.1.2. *Corrélations entre variables*

|                            | $\Delta P\omega_{96\_ete}$ | DE <sub>61_ete</sub> | pH   | RUM |
|----------------------------|----------------------------|----------------------|------|-----|
| $\Delta P\omega_{96\_ete}$ |                            |                      |      |     |
| DE <sub>61_ete</sub>       | - 0,03                     |                      |      |     |
| pH                         | - 0,22                     | 0,11                 |      |     |
| RUM                        | - 0,23                     | - 0,24               | 0,16 |     |

TABLEAU 15 — Matrice des corrélations ( $r$ ) entre les variables explicatives retenues dans le modèle de mortalité du Pin sylvestre ( $n = 9773$ ). $\Delta P\omega_{96\_ete}$  = anomalie annuelle moyenne de précipitations estivales sur l'intervalle 1996-2007DE<sub>61\_ete</sub> = déficit d'évapotranspiration estival moyen sur la période 1961-1990

pH = pH du sol

RUM = réserve utile maximale

Les corrélations entre variables explicatives du modèle sont données dans le tableau 15. Pour le jeu de données étudié, les variables montrent des corrélations moyennes. Il est logique que la RUM soit corrélée au DE puisque cette dernière en dépend. La corrélation entre l'anomalie de précipitations et le déficit estival moyen est très faible, l'évolution des pluies n'est en effet pas liée au climat déjà en place.

4.4.1.3. *Spatialisation du modèle*

Les Alpes-Maritimes sont un département où les altitudes s'échelonnent du niveau de la mer à plus de 3 000 m (cf. annexe 11 carte A pour la carte du relief). Cette particularité, associée à l'influence climatique méditerranéenne crée un net étagement altitudinal et latitudinal de la végétation. D'un point de vue morphologique, quatre vallées, creusées par des rivières, structurent le territoire des Alpes-Maritimes. D'ouest en est : la vallée du Var, où se situe la ville de Puget-Thénier, rejoint la vallée de la Tinée ; puis l'étroite vallée de la Vesubie conduit à Roquebilière et enfin, près de l'Italie, la vallée de la Roya se termine par la petite ville de Tende. Entre Grasse et Puget-Thénier ainsi qu'au nord de Nice, se trouvent les Préalpes calcaires. Les influences méditerranéennes y sont marquées, avec une aridité estivale importante (ce que traduisent les forts déficits d'évapotranspiration, cf. figure 20 C). Au nord de Grasse, le relief est orienté d'est en ouest. Au nord du département, la Haute-Chaîne, au climat plus arrosé, est formée pour l'essentiel par le massif cristallin du Mercantour. La différence de géologie entre ces deux grands ensembles naturels se répercute sur le pH des sols (cf. figure 20 D).

Les mortalités de pins observées sont plus nombreuses à l'ouest du département qu'au nord-est. Les Préalpes calcaires situées au nord de Grasse sont en effet notablement touchées. Cela rejoint les observations déjà faites par Lelou (2010). Le modèle de mortalité du Pin sylvestre élaboré dans la présente étude représente aussi ce gradient à l'échelle du département. En effet, une conjonction de facteurs défavorables est observable à l'ouest, à savoir une forte évolution négative des précipitations depuis 1996 (diminution des précipitations estivales supérieure à - 5 %, cf. figure 20 D) ainsi qu'un pH élevé (> 7), correspondant à la géologie calcaire. Par ailleurs, les fortes probabilités de mortalité se situent globalement dans les vallées. Il semblerait d'après les résultats obtenus que cela soit lié aux fortes anomalies annuelles moyennes de précipitations sur l'intervalle 1996-2007 dans les vallées.

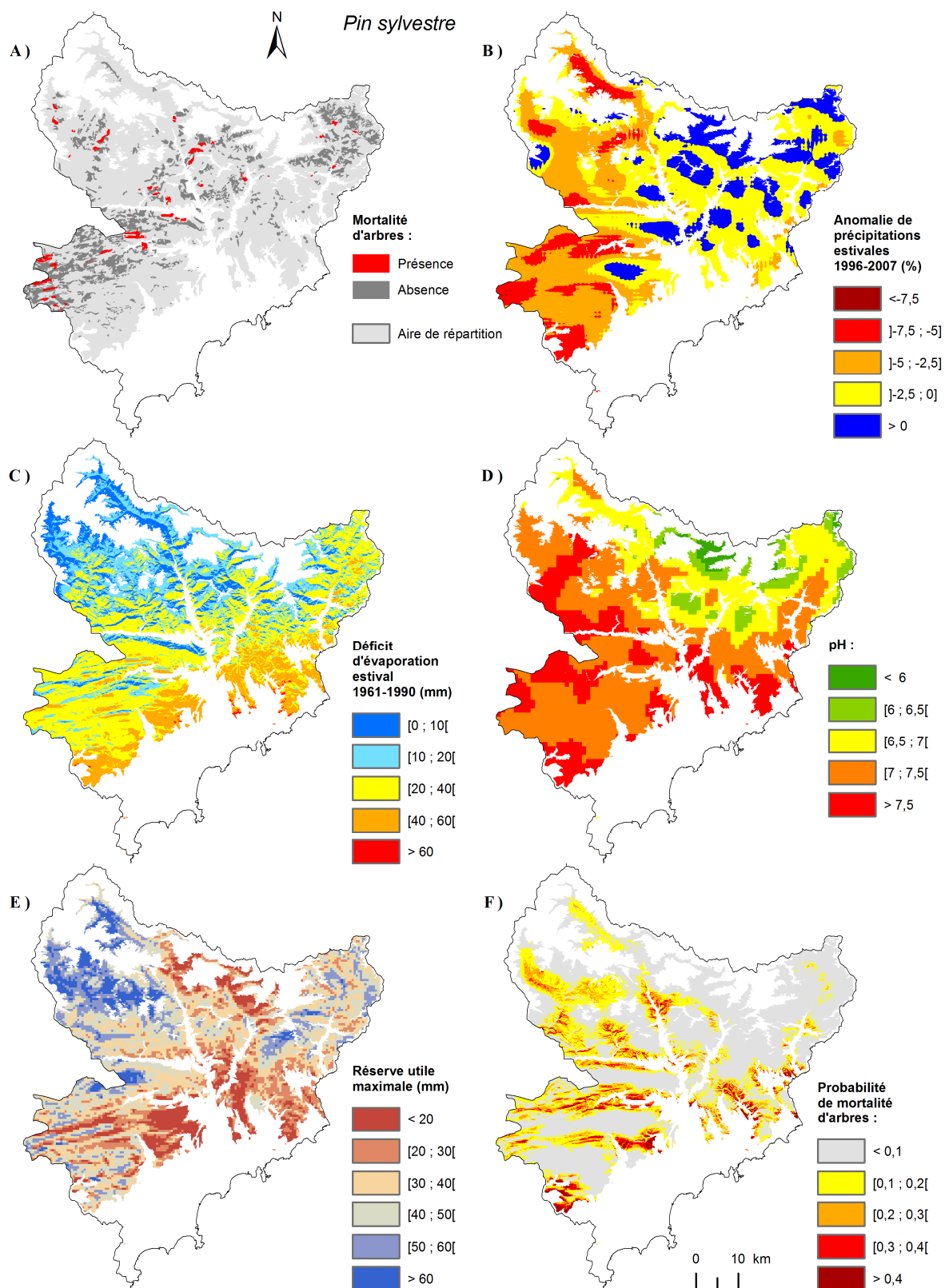


FIGURE 20 — Cartographie des mortalités d'arbres dans les peuplements de *Pin sylvestre* (A) observées en 2008 par l'ONF et prédites par le modèle (F). Les cartes B à E présentent la distribution spatiale des variables retenues dans le modèle. Seules apparaissent les zones correspondant à l'aire de répartition potentielle de l'espèce, déterminée à partir d'un modèle de distribution potentielle (modèle développé en 2010 par les élèves de la 19<sup>e</sup> promotion d'ingénieurs forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF dans le cadre d'un projet pédagogique encadré par C. Piedallu).

#### 4.4.2. Modèle de dépérissement du Sapin pectiné

##### 4.4.2.1. Variables sélectionnées

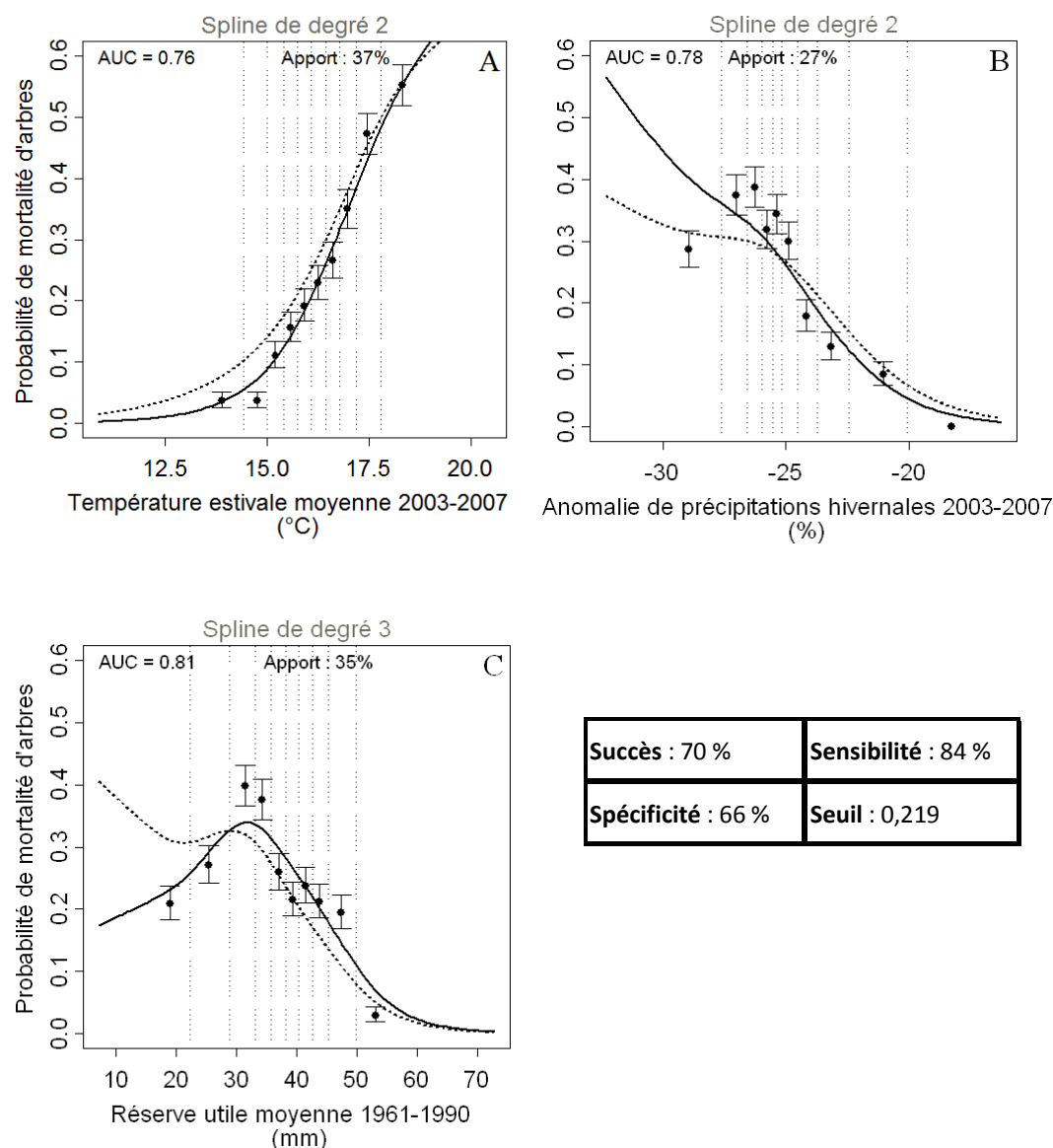


FIGURE 21 A, B & C — Courbes de réponse pour les trois variables constitutives du modèle de mortalité d'arbres au sein des peuplements de Sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes : la température estivale moyenne sur l'intervalle 2003-2007 (A), l'anomalie annuelle moyenne de précipitations hivernales (B), la réserve utile moyenne sur la période de référence 1961-1990 (C). Les variables sont présentées dans l'ordre de leur ajout dans le modèle. L'AUC permet d'apprécier l'évolution de la qualité du modèle au fur et à mesure de la prise en compte des différentes variables. L'apport représente la part de réduction de déviance liée à la variable. La courbe pleine correspond à la courbe calibrée sur les observations (boîtes à moustaches) tandis que celle en pointillés correspond à la réponse de la variable décorrélée de l'effet des autres variables du modèle (Succès = proportion de présences et d'absences correctement prédites ; sensibilité = proportion de présences réelles correctement prédites ; spécificité = proportion d'absences réelles correctement prédites ; seuil = seuil de probabilité à partir duquel la présence de dépérissement est significative).

En ce qui concerne le Sapin pectiné, trois variables explicatives de la mortalité des arbres sont retenues : la température moyenne sur l'intervalle 2003-2007, une variable traduisant l'évolution des précipitations hivernales sur le même intervalle, et enfin une variable traduisant le niveau stationnel moyen de sécheresse (cf. figure 21). Le modèle obtenu est de bonne qualité statistique ( $AUC = 0,81$ ). Comme pour le modèle de mortalité du Pin, le pourcentage global d'observations correctement prédites est assez faible (seulement 70 %). Comme pour le Pin, la prédiction des présences de mortalités est très bonne (84 % des présences réelles sont correctement prédites), mais celle des absences l'est moins (seulement 66 % des absences réelles sont correctement prédites).

La température estivale moyenne sur l'intervalle 2003-2007 représente à elle seule 37 % de la part explicative du modèle. L' $AUC$  du modèle avec cette seule variable est déjà égale à 0,76. Son pouvoir prédictif de la mortalité est donc particulièrement élevé. La courbe de réponse montre une probabilité de mortalité qui croît de façon exponentielle avec la température estivale moyenne. Cette variable est très fortement corrélée à l'altitude, de façon inverse. Elle permettrait, par conséquent, d'expliquer pourquoi les mortalités de sapins sont observées majoritairement au niveau de la marge altitudinale basse de l'aire de répartition de l'essence (cf. § annexe 16).

La seconde variable traduit une évolution des précipitations hivernales entre 2003 et 2007 par rapport à la période de référence 1961-1990. Elle représente 27 % de la part explicative du modèle, mais son  $AUC$ , calculée par le biais d'un modèle univarié, n'est pas très élevée (0,68). Il est d'abord surprenant de voir que les précipitations hivernales moyennes sur l'intervalle 2003-2007 présentent de si forts déficits. Les anomalies annuelles moyennes de précipitations hivernales sur cet intervalle sont en effet très négatives (cette tendance est confirmée par l'Annexe 7 : Évolution annuelle des précipitations aux deux échelles de l'étude.). Le sapin y semble particulièrement sensible lorsque le déficit dépasse 25 % des précipitations hivernales habituelles (moyennes sur la période de référence 1961-1990).

Enfin, la dernière variable du modèle (réserve utile moyenne sur la période de référence 1961-1990) traduit un effet assez conséquent des conditions de sécheresse stationnelle (apport égal à 35 %). En effet, celle-ci représente la quantité d'eau disponible en moyenne pour les arbres dans le sol, laquelle est fonction du climat moyen et de la capacité maximale du sol à stocker l'eau (RUM). La courbe décorrélée de l'effet des autres variables du modèle montre que plus elle est faible, plus la probabilité de mortalité du sapin est élevée. En ce qui concerne le sapin, les observations ne conduisent pas à l'hypothèse d'une acclimatation, contrairement à ce qui a été mis en évidence pour le pin.

L'augmentation des températures par rapport à la période de référence est quasiment partout la même à l'échelle du département. C'est probablement la raison pour laquelle aucune anomalie de température n'est ressortie comme explicative de la distribution spatiale des dépérissements. Cependant, le fait que la température moyenne sur l'intervalle 2003-2007 explique mieux les dépérissements que la température moyenne sur les intervalles précédents (1996-2007 voire 1961-1990) est déjà un argument qui permet de mettre en cause le réchauffement du climat dans les dépérissements, et cela d'autant plus que l'anomalie de température sur l'intervalle 2003-2007 est une variable du modèle de dépérissement du Sapin pectiné à l'échelle nationale (cf. 4.2.3.1).

#### 4.4.2.2. Corrélations entre variables

Pour le jeu de données concernant le Sapin à l'échelle locale, les corrélations entre les variables climatiques ( $T_{03\_ete}$  et  $\Delta P_{03\_hiv}$ ) et la variable stationnelle ( $RU_{61}$ ) sont faibles ( $r = 0,09$  entre celle-ci et la température estivale moyenne et  $r = -0,18$  avec l'anomalie de précipitations hivernales). Les deux variables climatiques sont en revanche fortement corrélées ( $r = -0,51$ ), de façon inverse. Cela s'explique par le fait que les précipitations semblent avoir plus diminué à basse altitude, où les températures moyennes sont plus élevées (cf. figure 22 C).

|                            | $T_{03\_ete}$ | $\Delta P\omega_{03\_hiv}$ | $RU_{61}$ |
|----------------------------|---------------|----------------------------|-----------|
| $T_{03\_ete}$              |               |                            |           |
| $\Delta P\omega_{03\_hiv}$ | - 0,51        |                            |           |
| $RU_{61}$                  | 0,09          | - 0,18                     |           |

TABLEAU 16 — Matrice des corrélations ( $r$ ) entre les variables explicatives retenues dans le modèle de mortalité du Sapin pectiné ( $n = 9\ 121$ ).

$T_{03\_ETE}$  = température moyenne des mois d'été (juin, juillet et août) sur l'intervalle 2003-2007

$\Delta P\omega_{03\_HIV}$  = anomalie annuelle moyenne de précipitations hivernale sur l'intervalle 2003-2007

$RU_{61}$  = réserve utile moyenne sur la période 1961-1990

#### 4.4.2.3. Spatialisation

Les peuplements de Sapin sont principalement présents à l'est du département, au nord de Nice, dans les Alpes niçoises. Quelques peuplements sont présents à l'extrême ouest, plus au sud du département (montagne de l'Audibergue, montagne de Bleine) au niveau des Préalpes calcaires. Dans cette zone à la limite de son aire de répartition potentielle, le Sapin arrive à croître sur les versants nord. Son état sanitaire y est cependant très médiocre et de nombreuses mortalités sont observées (cf. figure 22 A). Le modèle prédit d'ailleurs une probabilité largement significative de mortalité pour ces peuplements (probabilité comprise entre 25 et 75 %, cf. figure 22 E).

Un nombre tout aussi impressionnant de mortalités est observé dans les « Alpes niçoises » où des versants entiers sont concernés, notamment à basse altitude. Ces observations concordent avec l'influence de la température moyenne estivale mise en évidence (cette dernière augmente de façon linéairement inverse à l'altitude, cf. figure 22 B). Le modèle traduit d'ailleurs fortement cet effet au niveau des vallées les plus larges. La concordance de ce dernier avec les observations est globalement satisfaisante.

Le lien entre les mortalités et la température estivale moyenne est illustré à l'échelle d'un massif à l'Annexe 16 : Observations effectuées sur les placettes de Roquebilière (Alpes-Maritimes) pour le Sapin pectiné. Les résultats des observations de terrain complémentaires à la modélisation sont disponibles dans la même annexe.

Dans la suite, les modèles aux deux échelles de l'étude sont comparés. Il est alors possible de comparer les modèles locaux, soit avec les modèles nationaux « complets », soit uniquement avec la part climatique des modèles nationaux. Étant donné que les modèles locaux ne présentent pas de variables caractérisant les peuplements, il a d'abord été choisi de les comparer uniquement avec la part climatique des modèles nationaux.

La comparaison avec le modèle complet est faite dans un second temps pour étudier l'impact des caractéristiques des peuplements sur la concordance des modèles nationaux et locaux.

### 4.5. Comparaison des modèles nationaux et locaux sur le département des Alpes-Maritimes

Quelques adaptations des modèles nationaux et locaux sont nécessaires afin de pouvoir les comparer entre eux. Les modèles aux deux échelles de l'étude, sont d'abord rendus binaires grâce au seuil statistique calculé pour chaque modèle avec la courbe ROC (cf. § 3.4.4), afin de comparer les prédictions d'absence ou de présence de dépérissement. Par exemple, à l'échelle de la France, le Pin sera considéré comme « dépérissant » si la probabilité prédite par le modèle à un endroit donné est supérieure à 0,168 (cf. § 4.2.2.1) ; sinon il sera considéré comme « sain ».

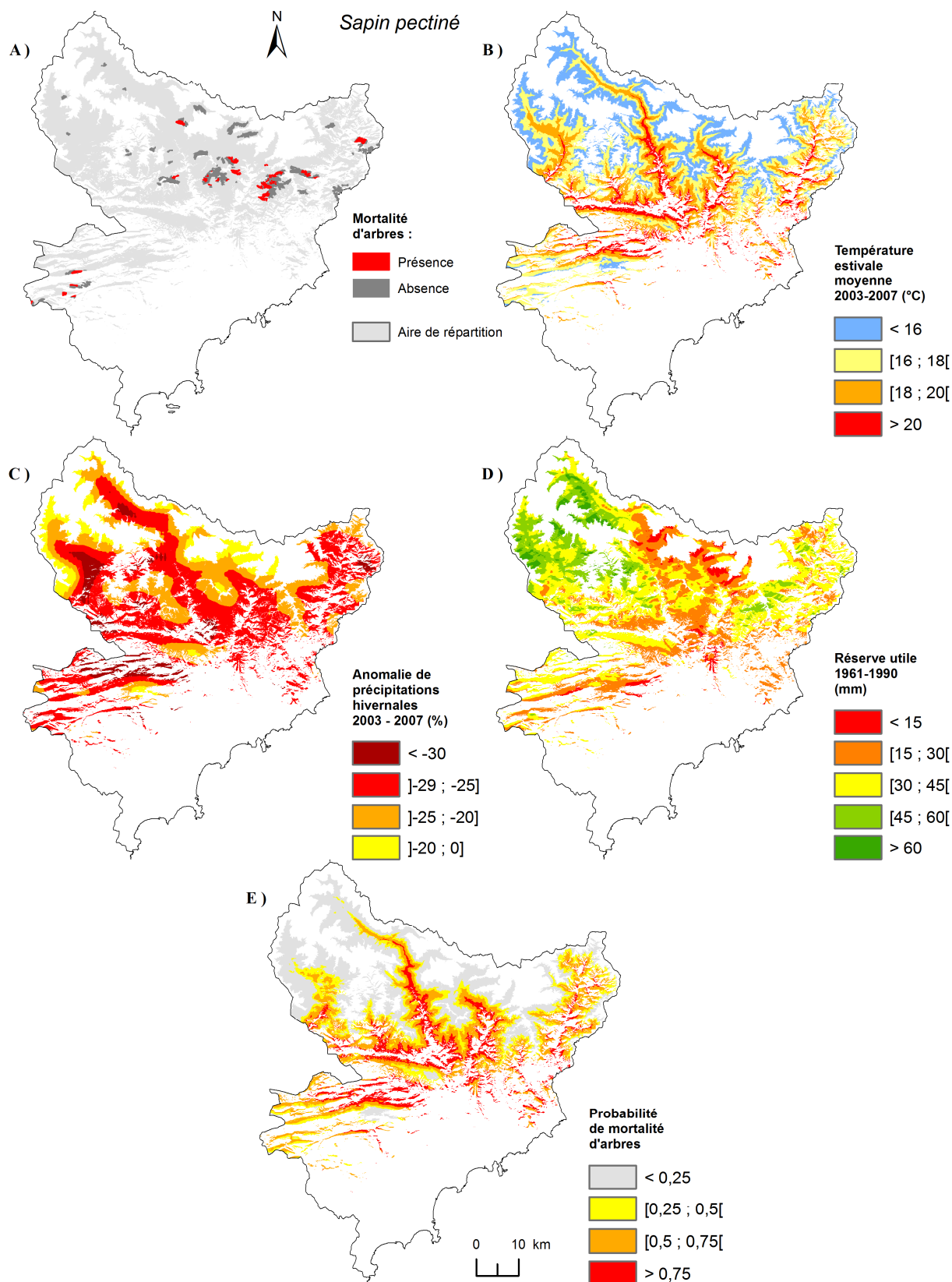


FIGURE 22 — Cartographie des mortalités dans les peuplements de *Sapin pectiné* observées en 2008 par l'ONF (A) et prédites par le modèle (E). Les cartes B à D présentent la distribution spatiale des variables retenues dans le modèle. Seules apparaissent les zones correspondant à l'aire de répartition potentielle de l'espèce, déterminée à partir d'un modèle de distribution potentielle (modèle LERFoB, Piedallu et al., 2010).

Ensuite, les modèles spatialisés qui ont été calibrés sur le département des Alpes-Maritimes et calculés au pas de 50 m sont agrégés afin d'obtenir des modèles spatialisés au même pas que celui des modèles nationaux (1 kilomètre).

Une fois ces adaptations effectuées, les modèles nationaux de dépérissement (considérant la mortalité de branches au seuil de 5 %) et locaux (considérant la mortalité des arbres) sont comparés « pixel par pixel ». Quatre cas, énumérés ci-dessous, se présentent alors.

- Aucun des modèles ne prédit de dépérissements : ni mortalité de branches, ni mortalité d'arbres. Ce cas favorable à l'essence est représenté en vert sur les figures ci-après.
- Les deux modèles prédisent des dépérissements : mortalité de branches et mortalité d'arbres. Ce cas défavorable à l'essence est représenté en rouge sur les figures qui suivent.
- Seules des mortalités de branches sont prédites, aucune mortalité d'arbres. Ce cas est partiellement défavorable à l'essence étudiée, les conditions sont propices au dépérissement sans pour autant compromettre la survie de l'essence. Il est représenté en gris foncé sur les figures ci-après et est désigné comme une « surprédiction du modèle national par rapport au modèle local ». Cette surprédiction n'est pas incohérente écologiquement : il est logique que les mortalités de branches précèdent celles des arbres.
- Seules des mortalités d'arbres sont prédites, aucune mortalité de branches. Ce cas correspond à une aberration ; il est représenté en gris clair sur les figures suivantes et est désigné comme une « sous-prédiction du modèle national par rapport au modèle local ». En effet, si les arbres ont une forte probabilité de mourir, la probabilité de mortalité de branches devrait elle aussi être élevée. La prédiction de l'un des deux modèles au moins est fausse, mais il n'est pas possible de savoir laquelle.

#### 4.5.1. Cas des modèles de dépérissement du Pin sylvestre

- Comparaison du modèle local avec la part climatique du modèle national (cf. figure 23 A)

Le modèle établi localement pour le Pin sylvestre présente une bonne cohérence avec le modèle national. Ces deux modèles sont en accord sur 44 % de l'aire de répartition du pin dans les Alpes-Maritimes, soit pour prédire une absence de dépérissement (vert), soit une présence (rouge). Les différences entre les modèles proviennent en fait exclusivement d'une prédiction supérieure de la mortalité de branches. Par conséquent, il ne s'agit pas d'une aberration : ces zones présentent un risque de mortalité de branches (d'après le modèle national) mais pas de risque de mortalité d'arbres (d'après le modèle local).

- Comparaison du modèle local avec le modèle national complet (cf. figure 23 B)

La prise en compte des variables caractérisant le peuplement à l'échelle nationale engendre une légère dégradation du taux de concordance (désormais égal à 41 % de l'aire de répartition potentielle du Pin dans les Alpes-Maritimes) : la surface totale sur laquelle le modèle national complet prédit des dépérissements augmente. Ainsi, l'âge, seule variable explicative du modèle caractérisant les peuplements, est de nature à augmenter la probabilité de mortalité de branches. Le taux de surprédiction du modèle national reste de 100 %. Cela signifie que la totalité des différences entre les modèles provient toujours d'une prédiction supérieure de la mortalité de branches. Comme précédemment, il ne s'agit donc pas d'une aberration : ces zones présentent un risque de mortalité de branches mais pas de risque de mortalité d'arbres. Cette fois-ci, la carte de risque qui pourrait être produite à partir de la combinaison des deux modèles serait plus alarmiste que celle combinant le modèle local avec la part climatique du modèle national.



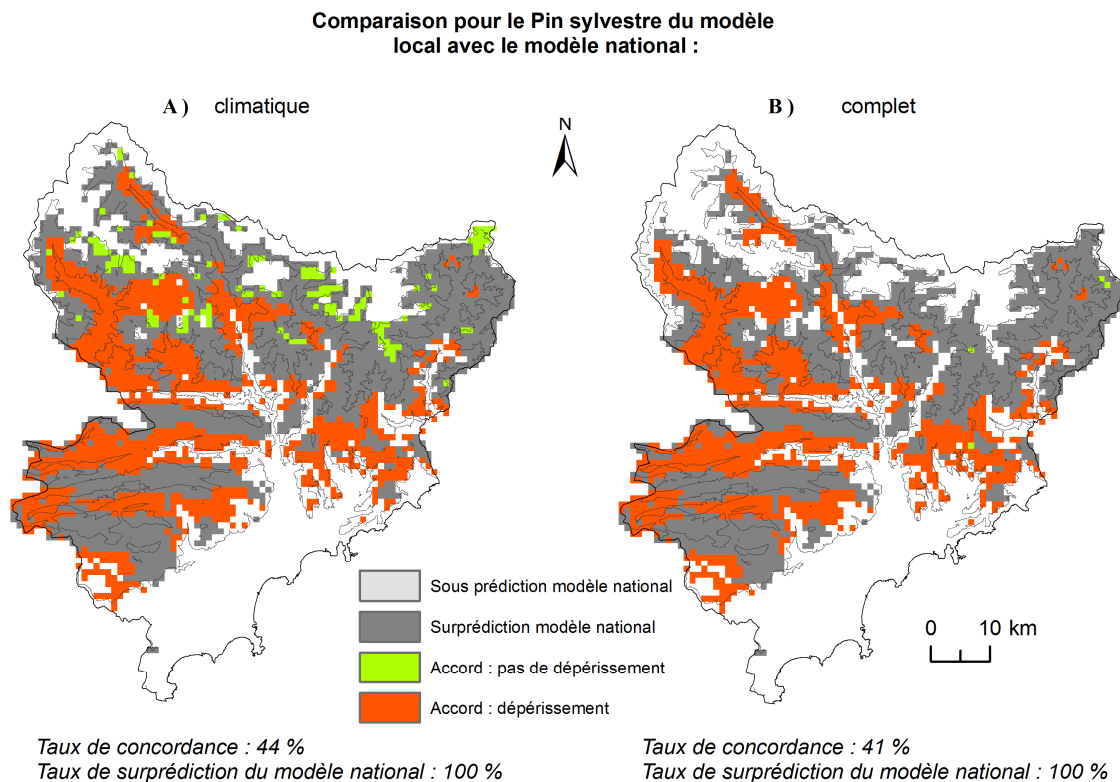


FIGURE 23 — Cartographie des zones discordantes (grises) et des zones concordantes (rouges et vertes) entre le modèle local de dépérissement et :

- la part climatique du modèle national de dépérissement (A)
- le modèle national complet de dépérissement (B), c'est-à-dire celui prenant en compte les variables caractérisant les peuplements.

Seules apparaissent les zones correspondant à l'aire de répartition potentielle de l'espèce, déterminée à partir d'un modèle de distribution potentielle (modèle développé en 2010 par les élèves de la 19<sup>e</sup> promotion d'ingénieurs forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF dans le cadre d'un projet pédagogique encadré par C. Piedallu).

#### 4.5.2. Cas des modèles de dépérissement du Sapin pectiné

- Comparaison du modèle local avec la part climatique du modèle national (cf. figure 24 A)

Le modèle local de mortalité affiche une très bonne concordance avec la part climatique du modèle national (74 % de l'aire de répartition du sapin dans les Alpes-Maritimes bénéficie de prédictions identiques de la part des deux modèles).

En revanche, dans les zones de discordances entre les deux modèles, des aberrations apparaissent. Le modèle local prédit, en effet, des mortalités d'arbres là où la part climatique du modèle national ne prédit même pas de mortalités de branches. Ces aberrations apparaissent sur 8 % de la surface totale des zones discordantes (en gris clair sur la carte), ce qui reste tout de même assez faible.

- Comparaison du modèle local avec le modèle national complet (cf. figure 24 B)

L'intégration des variables « peuplement » dégrade considérablement la concordance entre les deux modèles (national et local). Cela n'est pas spécialement visible sur le taux de concordance qui ne

diminue en effet que de 3 %. En revanche, les aberrations liées à une prédiction de mortalité d'arbres supérieure à une mortalité de branches constituent 48 % de la surface des zones discordantes. L'âge et la proportion de sapin en surface terrière, seules variables du modèle national caractérisant les peuplements, sont apparemment plutôt favorables et entraînent une diminution des surfaces propices aux mortalités de branches.

Quelle que soit l'essence considérée, l'intégration des variables caractérisant les peuplements conduit à de plus fortes discordances entre les modèles. Ce résultat est logique puisque les modèles locaux sont principalement de type climatique. Pour une essence donnée, la combinaison des modèles aux deux échelles de l'étude pourrait permettre de constituer une carte de « risque de dépérissement » à trois niveaux : aucun risque (ni mortalité de branches, ni mortalité d'arbres), risque faible (mortalité de branches) et risque fort (mortalité de branches et d'arbres). La meilleure carte de risques de mortalité qui pourrait être produite pour chacune des essences serait à baser sur la combinaison des modèles locaux avec la part climatique des modèles nationaux.

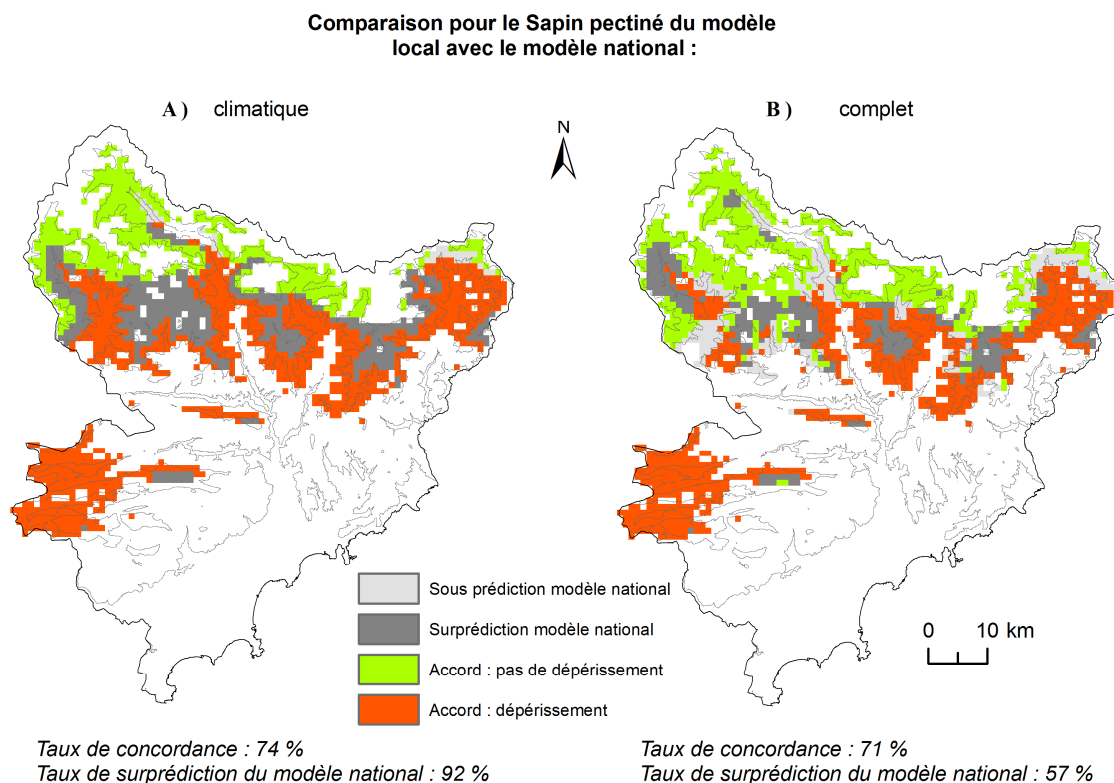


FIGURE 24 — Cartographie des zones discordantes (grises) et des zones concordantes (rouges et vertes) entre le modèle local de dépérissement et :

- o la part climatique du modèle national de dépérissement (A)
- o le modèle national complet de dépérissement (B), c'est-à-dire celui considérant les caractéristiques des peuplements.

Seules apparaissent les zones correspondant à l'aire de répartition potentielle de l'espèce, déterminée à partir d'un modèle de distribution potentielle (modèle LERFoB, Piedallu et al., 2010).

## 5. Discussion

Le suivi des mesures de températures met en évidence un réchauffement marqué au moins depuis les années 1985-90 à l'échelle de la France. Les précipitations, quant à elles, régressent fortement depuis 1996, en région méditerranéenne notamment. Ces tendances sont en accord avec les évolutions du climat annoncées pour le XXI<sup>e</sup> siècle. La modélisation des dépérissements forestiers à différentes échelles, *via* des indices d'évolution du climat et des facteurs caractérisant les conditions « stationnelles », est un moyen d'évaluer si ceux-ci sont une des conséquences du changement climatique. Des épisodes de dépérissements sont observés depuis au moins la fin du XIX<sup>e</sup> siècle mais l'augmentation de leur nombre dans certaines régions inquiète la communauté forestière.

Le travail réalisé sur deux essences (Pin sylvestre et Sapin pectiné) permet de discuter leur sensibilité aux changements climatiques en fonction de l'échelle considérée (France ou Alpes-Maritimes) et de cartographier les zones actuellement vulnérables.

### 5.1. Le changement climatique a-t-il un impact sur les dépérissements ?

| Anomalie annuelle moyenne de : |            | Intervalles de temps |           |
|--------------------------------|------------|----------------------|-----------|
|                                |            | 2003-2007            | 1996-2007 |
| Précipitations moyennes        | estivales  | ■ ●                  | □         |
|                                | hivernales | ○                    |           |
| Température moyenne estivale   |            | ■ ●                  |           |

TABLEAU 17 — Anomalies climatiques sélectionnées dans les modèles de dépérissement du Pin sylvestre et du Sapin pectiné aux deux échelles de l'étude.

France : ■ = Modèle de mortalité de branches du Pin sylvestre ; ● = *idem* pour le Sapin pectiné.

Alpes-Maritimes : □ = Modèle de mortalité d'arbres pour le Pin sylvestre ; ○ = *idem* pour le Sapin pectiné.

Dans tous les modèles, l'évolution récente du climat est un facteur explicatif des dépérissements (*cf.* tableau 17). L'impact de la diminution des précipitations est systématiquement mis en évidence. De plus, un effet de l'augmentation moyenne de la température estivale apparaît à l'échelle nationale. Trois modèles sur quatre montrent que ce sont les évolutions climatiques sur l'intervalle 2003-2007 qui ont été les plus impactantes en termes de dépérissement. Seul le modèle de mortalité d'arbres pour le Pin sylvestre à l'échelle locale fait ressortir l'impact d'une diminution des précipitations à plus long terme. Majoritairement, les deux essences semblent avoir répondu aux évolutions estivales de précipitations et de température. Seul le Sapin pectiné montre à l'échelle locale une sensibilité à la diminution hivernale des précipitations.

À l'échelle nationale, les résultats sont particulièrement bien concordants entre les deux essences, alors que des différences existent entre les deux échelles de l'étude.

Globalement, à l'échelle des Alpes-Maritimes, les variables climatiques moyennes sur les différents intervalles de temps semblent meilleures pour prédire les dépérissements que les différents indices d'évolution du climat calculés (*cf.* annexe 13). L'échelle locale semble donc moins bien adaptée pour mettre en évidence un effet du changement climatique. En effet, à cette échelle, les évolutions des températures, par exemple, sont homogènes, contrairement à l'échelle nationale.

La réponse des dépérissements aux changements climatiques semble meilleure à l'échelle de la France. Cela est confirmé par le fait qu'à l'échelle nationale, les indices d'évolutions du climat ont un meilleur pouvoir prédictif que les variables climatiques moyennes sur les différents intervalles de l'étude (*cf.* annexe 13).

En considérant les résultats des modèles nationaux, visiblement meilleurs pour montrer un effet du changement climatique, il est donc possible d'affirmer que les dépérissements des deux essences sont liés à l'aggravation de la sécheresse estivale entre 2003 et 2007 principalement dans le Sud de la France. Cela est essentiellement dû à une importante diminution des précipitations, aggravée par l'augmentation des températures. Ces évolutions sont vraisemblablement l'expression des changements climatiques en cours.

Ces résultats sont cohérents avec les connaissances des déterminismes des dépérissements du Pin sylvestre en région méditerranéenne et ailleurs. Ainsi, Thabeet (2009) attribue les dépérissements du Pin sylvestre aux sécheresses répétées qui ont eu lieu entre 2003 et 2008 en région méditerranéenne, tout comme Dobbartin (2005) dans la vallée du Rhône en Suisse. D'après les résultats des modèles élaborés dans la présente étude, il semble que les mêmes causes soient responsables des dépérissements du Sapin pectiné, ce qui confirmerait les études réalisées dans d'autres régions concernant le rôle des sécheresses dans les mortalités de cette essence (Macias *et al.*, 2006). À la différence des études précédentes, le travail réalisé permet de quantifier le risque de dépérissement en fonction des évolutions observées du climat.

## **5.2. Les variables « peuplement » sont-elles utiles pour modéliser les dépérissements ?**

À l'échelle nationale, outre les évolutions du climat, les caractéristiques des peuplements (notamment l'âge et la densité de tiges) expliquent en grande partie la mortalité des branches et permettent d'améliorer fortement la prédiction des dépérissements. Cela est cohérent avec les résultats d'autres études qui montrent que la réponse d'une essence aux conditions climatiques, aussi bien en termes de croissance que de dépérissements, est étroitement liée aux caractéristiques des peuplements (Lines *et al.*, 2010). Ainsi, la densité des peuplements favorise les mortalités lors des sécheresses ; cela est probablement lié à une compétition accrue pour les ressources (Battles *et al.*, 2008 ; Morel, 2008).

Cependant, à l'échelle des Alpes-Maritimes, l'absence des caractéristiques des peuplements dans les modèles ne semble pas diminuer la capacité à prédire les mortalités d'arbres (l'AUC des modèles locaux est meilleure que celle des modèles nationaux). Les caractéristiques stationnelles moyennes sont mieux décrites (plus haute résolution) et semblent donc plus importantes pour expliquer les dépérissements que les caractéristiques des peuplements. Ces dernières n'apparaissent pas comme essentielles dans les modèles locaux mais il est fort probable qu'elles contribueraient à les améliorer.

Les modèles réalisés à l'échelle nationale permettent de quantifier le poids des facteurs « peuplement » dans les dépérissements relativement à celui des évolutions climatiques et montrent ainsi qu'il existe un potentiel d'adaptation aux changements climatiques *via* la gestion des peuplements en place. Dans les zones les moins vulnérables actuellement, une gestion adaptée est probablement suffisante, dans un premier temps, pour maintenir des peuplements sains. En revanche, dans les zones à plus fort risque, il est nécessaire de s'interroger sur le bien fondé économique, écologique et social des substitutions d'essences.

## **5.3. Quel est l'intérêt d'une étude à l'échelle des Alpes-Maritimes ?**

Les modèles à l'échelle départementale révèlent que les conditions locales de croissance des peuplements jouent un rôle important dans les dépérissements en tamponnant ou, au contraire, en aggravant l'effet des sécheresses. L'introduction de variables édaphiques ayant une action physiologique sur les plantes, à une résolution plus fine (50 m) qu'à l'échelle nationale (1 km), contribue à ce que les modèles traduisent mieux le comportement des arbres et permet de proposer une explication pour les fortes mortalités observées sur versants nord pour le Pin sylvestre.

En effet, les résultats mettent en évidence une probabilité accrue de mortalité dans les zones où le déficit d'évapotranspiration estival moyen est réduit (c'est-à-dire où les sécheresses estivales sont habituellement faibles). Cette probabilité accrue de dépérissement qui est alors majoritairement observée sur versants nord, traduirait un défaut d'acclimatation des peuplements de pin aux sécheresses estivales extrêmes survenues depuis 2003. L'hypothèse d'une adaptation physiologique différentielle des peuplements à la sécheresse, en fonction des conditions climatiques dans lesquelles ils se sont développés, a déjà été suggérée par divers auteurs (Vennetier *et al.*, 2008 ; Thabeet *et al.* 2009 ; Lelou, 2010) sans pour autant avoir été démontrée à l'échelle de versants proches les uns des autres.

Cet effet d'adaptation n'est pas visible à l'échelle nationale : cela pourrait s'expliquer par une moins bonne description des variables édaphiques (résolution kilométrique des modèles spatialisés à l'échelle nationale) ou une plus grande variété de conditions écologiques.

Les observations de terrain menées dans les Alpes-Maritimes, dont le but était d'identifier d'éventuelles causes non étudiées à cette échelle (facteurs sylvicoles ou biotiques essentiellement) ne permettent pas de faire ressortir de tendances concernant le rôle des facteurs sylvicoles dans les mortalités observées.

Quelques attaques d'Hylésines (*Tomicus destruens*) par taches et des occurrences disséminées de *Sphaeropsis sapinea* ont été constatées sur le Pin sylvestre mais celles-ci restent faibles. Le parasitisme par le Gui (*Viscum Album* L.) est très fréquent sur les stations les plus sèches et s'observe sur les deux essences. La transpiration élevée ainsi que les sucres et minéraux prélevés à l'hôte augmentent fortement la vulnérabilité des arbres (Galiano *et al.*, 2010 ; Morel, 2008) mais le Gui ne jouerait cependant qu'un rôle aggravant dans les dépérissements (Oliva et Colinas, 2010). Dans le cas présent, l'absence de variables biotiques ne semble donc pas avoir de conséquences importantes sur la qualité des modèles proposés.

L'effet de la pollution atmosphérique n'a pas été étudié. Bien que la pollution par l'ozone soit parfois évoquée, celle-ci ne semble pas induire un stress majeur pour les arbres (Matyssek *et al.*, 1997).

#### 5.4. Les limites de l'étude

- Limites liées aux jeux de données

Certaines limites inhérentes aux jeux de données utilisés ont un impact sur la qualité des modèles.

En ce qui concerne les données de l'IFN, le floutage des coordonnées des placettes d'inventaire ne permet pas de connaître leur localisation précise (écart aléatoire de 500 m). Le croisement des placettes avec les cartes numériques des différents facteurs écologiques ne permet donc pas d'obtenir les valeurs modélisées correspondant à la position réelle des observations.

Concernant les données de l'ONF, un manque d'information est à regretter concernant le protocole de terrain utilisé en 2008 et, de plus, plusieurs sources d'imprécisions sont listées ci-dessous.

- o Les données sont probablement biaisées car l'absence de mortalité a été renseignée par défaut d'observation dans de nombreux peuplements (Lelou, 2010).
- o Les observations sous-estiment les dépérissements dans certaines conditions écologiques. La cartographie s'appuie sur les connaissances des agents de terrain, lesquelles sont meilleures dans les zones présentant des enjeux de production. Certains agents rencontrés au cours de la phase de terrain ont d'ailleurs confirmé ne s'être limités qu'à la notation des peuplements productifs.
- o La précision de la délimitation des peuplements dépérissants est variable au sein du département. Un manque d'homogénéisation des observations par les différents agents en est probablement à l'origine.

Il est aujourd'hui difficile de vérifier la validité des observations effectuées en 2008, car l'apparence des peuplements a fortement changé depuis cette date. En plus des coupes sanitaires, de fortes chutes de neige ainsi que de forts épisodes venteux ont en effet provoqué la chute d'arbres morts (Vennetier, communication personnelle).

Les données de l'ONF présentent donc un certain nombre de limites. L'usage de la photo-interprétation pourrait être approprié pour améliorer le suivi des dépérissements à l'échelle départementale. La télédétection satellitale serait même un meilleur outil mais elle s'avère coûteuse. Des travaux réalisés au Sud du Massif central (Chéret *et al.*, 2008) montrent que cette dernière est très bien adaptée pour suivre annuellement les dépérissements à l'échelle d'un département.

- Limites liées aux variables SIG

Parmi les indices d'évolution du climat, ce sont les anomalies moyennes de températures, de précipitations et de bilan hydrique climatiques qui ont montré les pouvoirs prédictifs les plus importants vis-à-vis des dépérissements. Les anomalies moyennes des variables édaphiques (DE, IA, RU, ETR) ne sont pas ressorties comme de bons prédicteurs des dépérissements. Or, les variables édaphiques sont de bons prédicteurs de la croissance des arbres, notamment en région méditerranéenne où le facteur limitant est la sécheresse édaphique (Ripert & Vennetier, 2002). Il aurait été logique de trouver également une bonne capacité prédictive de ces variables vis-à-vis des dépérissements, au moins à l'échelle des Alpes-Maritimes. Il est possible, que la résolution du modèle de RUM (500 m) utilisé pour calculer les variables édaphiques ne soit pas suffisamment fine. Cela aurait pour conséquence de lisser de manière exagérée les variables édaphiques, notamment dans les régions où le relief est accidenté, et donc dans les Alpes-Maritimes. La qualité des variables édaphiques est encore limitée par la disponibilité des cartes à haute résolution des facteurs écologiques permettant leur calcul (surtout la RUM). Il est à noter que des travaux sont en cours à ce sujet au LERFoB mais à l'heure actuelle, seules quelques zones géographiques restreintes sont couvertes par ces cartes.

- Limites liées à la méthodologie

Le fait de grouper les données de mortalité de branches de plusieurs années d'inventaire de l'IFN (*cf.* § 3.2.1.2) peut biaiser légèrement la variable permettant de caractériser les dépérissements à l'échelle de la France. Cette méthode est bien adaptée pour mettre en évidence les déterminismes spatiaux des dépérissements mais ne convient pas pour étudier temporellement les dépérissements et notamment l'effet d'une année extrême. Cela pourrait expliquer en partie pourquoi les années extrêmes sont ressorties presque toujours comme ayant un pouvoir prédictif plus faible vis-à-vis des dépérissements. Une autre approche, plus complexe, consisterait à étudier le lien entre les dépérissements observés à l'année  $n$  et le climat des quelques années précédentes.

Par ailleurs, le seuil de mortalité de 5 %, utilisé pour calculer un indice binaire de mortalité, n'influe pas sur les facteurs identifiés, modifie peu la qualité des modèles obtenus et ne semble pas surestimer les dépérissements. En effet, la localisation des placettes « dépérissantes » aux différents seuils (*cf.* annexe 10) est cohérente : quel que soit le seuil, les dépérissements sont observés au niveau des mêmes zones, lesquelles concordent avec les références bibliographiques.

L'indice de mortalité de branches présente néanmoins l'inconvénient de dépendre du nombre d'individus de l'essence étudiée, recensés sur la placette dans la mesure où dès qu'un arbre présente plus de 5 % de branches mortes, la placette est classée « dépérissante ». Cela implique de sélectionner, parmi les premières variables des modèles nationaux, une variable représentative du nombre de tiges de l'essence étudiée afin d'enlever l'effet du nombre de tiges sur le choix des variables suivantes. Cependant, cette variable peut également traduire un autre effet, telle la densité. Pour distinguer cet effet, il serait plus logique d'utiliser un indice prenant directement en compte le nombre d'individus observés, soit par exemple, en utilisant la proportion d'arbres « dépérissants » sur la placette supérieure à un certain seuil pour classer la placette « dépérissante ».

Il est à noter que les variables édaphiques calculées selon la méthode de Palmer sont légèrement moins bonnes pour prédire les dépérissements que les variables édaphiques calculées selon la méthode de Thornthwaite (cf. annexe 18 : comparaison du pouvoir prédictif des variables édaphiques en fonction de leur méthode de calcul.). Cela rejoint les observations de Richard (2011) qui trouve une meilleure capacité prédictive des bilans hydriques édaphiques calculés selon la méthode de Thornthwaite vis-à-vis des potentialités forestières.

Les meilleurs indices d'évolution du climat, pour prédire les dépérissements, sont ceux qui traduisent l'anomalie annuelle moyenne sur un intervalle de temps  $I$  (indices  $\Delta$ ). Les autres indices ( $N$  = nombre d'anomalies mensuelles défavorables sur  $I$ ,  $S$  = somme des anomalies défavorables sur  $I$ ) ont montré des pouvoirs prédictifs plus faibles (cf. annexe 17 : comparaison du pouvoir prédictif des différents indices d'évolution du climat.). D'autres indices d'évolution du climat pourraient être testés pour expliquer les dépérissements, comme par exemple un indice caractérisant la répétitivité des anomalies défavorables sur  $I$ .

## 5.5. Apports des cartes élaborées

Les modèles de dépérissement réalisés permettent de cartographier la vulnérabilité climatique de chaque essence avec une précision variable en fonction de l'échelle considérée : résolution kilométrique à l'échelle de la France, résolution de 50 m à celle des Alpes-Maritimes. Tous les modèles ont une AUC supérieure à 0,70. Ils sont donc jugés satisfaisants (Marmion *et al.*, 2009). Les modèles les plus performants s'avèrent être ceux réalisés à l'échelle locale. De plus, tous les modèles réalisés intègrent simultanément, et pour la première fois, des évolutions climatiques observées avec des caractéristiques dendrométriques propres aux peuplements (France), ou des facteurs édaphiques, hydriques et trophiques à l'échelle des Alpes-Maritimes. La combinaison des modèles obtenus aux deux échelles de l'étude permet, pour une essence donnée, de déterminer différents niveaux de sensibilité climatique grâce aux différents jeux de données utilisés (mortalité de branches ou mortalité d'arbres).

Cependant, quelle que soit l'échelle ou l'essence considérée, les zones de vulnérabilité indiquées par les cartes (zones de fortes probabilité de mortalité de branches ou d'arbres) sont plus importantes que celles indiquées par les jeux de données utilisés pour calibrer les modèles. Deux explications possibles ont été identifiées :

- Les conditions peuvent être défavorables à l'espèce sans pour autant que celle-ci dépérisse immédiatement. Un délai variable de réponse des peuplements en fonction des situations a été mis en évidence (Bigler *et al.*, 2006). Les arbres ont, en effet, une certaine capacité d'adaptation en réallouant leurs réserves carbonées et en changeant leur architecture hydraulique (Martinez-Vilalta *et al.*, 2002)
- L'exploitation forestière masque certains dépérissements. Dans de nombreux départements, les dépérissements ont conduit à des coupes sanitaires anticipées. Ceci est particulièrement vrai pour le Sapin dans le Jura, ainsi que pour les deux essences étudiées dans le Sud du Massif central (Nageleisen, communication personnelle ; Chéret *et al.*, 2008). C'est aussi le cas dans les Alpes-Maritimes (constat effectué au cours de la phase de terrain).

Malgré tout, une bonne cohérence spatiale entre les modèles et les observations a été observée lors de la phase de terrain menée dans le cadre de cette étude dans le département des Alpes-Maritimes. La validation de ces cartes est cependant rendue difficile par le caractère évolutif des dépérissements. Aucun résultat chiffré concernant la validité des modèles ne peut donc être fourni suite à cette phase de terrain.

Il est important de rappeler que les cartes réalisées identifient les zones de vulnérabilité du Pin sylvestre et du Sapin pectiné sur la base des anomalies climatiques moyennes, constatées sur à peine une décennie, par rapport à la période de référence 1961-1990. Néanmoins, si on fait l'hypothèse que les évolutions observées préfigurent spatialement les évolutions futures du climat, alors ces cartes représentent les zones de vulnérabilité des deux essences à court, voire à moyen terme. Ces cartes peuvent donc servir respectivement d'outils de réflexion à l'échelle nationale pour adapter les forêts françaises au changement climatique, ainsi que, localement, d'aide à la décision pour le gestionnaire (choix d'essences notamment).

## CONCLUSION

Les forts dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné observés depuis 2003, notamment dans le Sud de la France (Pyrénées et Alpes-Maritimes), pourraient faire partie des premières conséquences de grande ampleur du changement climatique.

C'est ce qu'indiquent, pour les deux essences étudiées, les modèles de dépérissement établis à l'échelle de la France (à partir de la mortalité de branches relevée par l'IFN) et ceux établis à l'échelle des Alpes-Maritimes (grâce à la mortalité des arbres relevée par l'ONF). Ces modèles intègrent un grand nombre de facteurs écologiques dont, pour la première fois, des indices d'évolution du climat. Ils montrent ainsi que les dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné sont liés au niveau moyen de sécheresse atteint entre 2003 et 2007, notamment en région méditerranéenne. La réaction des peuplements a cependant fortement varié localement en fonction de leur âge et de leur densité, ainsi que des conditions écologiques locales (richesse chimique et caractéristiques hydriques des sols). À l'échelle des Alpes-Maritimes, la possibilité d'une acclimatation des peuplements de Pin sylvestre aux sécheresses a été mise en évidence et semble être en mesure d'expliquer les nombreux dépérissements observés sur les versants nord moins bien acclimatés. Des études écophysiologiques mériteraient d'être menées pour préciser ce processus d'acclimatation.

En plus de l'amélioration des connaissances de la vulnérabilité du Pin et du Sapin au changement climatique, l'étude propose finalement deux cartographies par essence qui traduisent la vulnérabilité des essences ; une carte nationale (résolution kilométrique) représente la probabilité de mortalité de branches, tandis qu'une carte départementale (résolution de 50 m) représente la probabilité de mortalité d'arbres.

Ces cartes ont été confrontées à des observations de terrain dans les Alpes-Maritimes et semblent globalement cohérentes sur ce département. Des améliorations possibles sont cependant envisageables au niveau du suivi et de la compréhension des dépérissements à l'échelle locale, grâce, par exemple, à la télédétection satellitale ou la photo-interprétation.

Le rapprochement des deux cartographies permet de distinguer trois niveaux de « risques de dépérissement » à l'échelle départementale : aucun risque, risque faible (mortalité de branches) et risque fort (mortalité d'arbres).

Enfin, si on fait l'hypothèse que les anomalies climatiques, sur lesquelles sont basées les modèles, préfigurent les évolutions climatiques futures, alors ces modèles peuvent permettre d'anticiper les zones potentiellement vulnérables au changement climatique, à court, voire à moyen terme. Pour prédire les dépérissements potentiels à plus long terme, un travail de projection des modèles dans le futur serait nécessaire. Cela permettrait, en outre, de comparer les prévisions de dépérissement avec celles de régression des aires de distribution potentielle des deux essences d'ici la fin du siècle.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Affolter P.**, U. Buntgen, J. Esper, A. Rigling, P. Weber, J. Luterbacher, D. Frank (2010). Inner Alpine conifer response to 20th century drought swings. *European Journal of Forest Research*, n°129, p. 289-298.
- Alexandrian, D.** (1992). *Guide technique du forestier méditerranéen français*. In Essences forestières, CEMAGREF.
- Allen, C. D.** (2009). le dépérissement des forêts dû au climat : un phénomène planétaire croissant ? *Unasylva*, n°60, p. 43-49.
- Allen, C. D.**, A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D.D. Breshears, E.H. Hogg, P. Gonzalez, R. Fensham, Z. Zhang, J. Castro, N. Demidova, J. Lim, G. Allard, S.W. Running, A. Semerci, N. Cobb. (2009). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. In *Adaptation of forests and forest management to changing climate with emphasis on forest health: a review of science, policies and practices*, p. 660-684. Umea, Sweden: Elsevier Ltd.
- Aussenac, G.** (2002). Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranea firs in the context of climate change. *Annals of Forest Science*, n°59, p. 823-832.
- Aussenac, G.**, J.-M. Guehl (2005). Variations climatiques et physiologie des arbres. *Forêt entreprise*, n° 162, p. 20-24.
- Badeau, V.**, J.L. Dupouey, C. Cluzeau, J. Drapier (2005). Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Forêt-Entreprise*, n°162, p. 25-29.
- Battles, J.J.**, T. Robards, A. Das, K. Waring, J.K. Gilles, G. Biging & F. Schurr (2008). Climate change impacts on forest growth and tree mortality: a data-driven modeling study in the mixed-conifer forest of the Sierra Nevada, California. *Climatic Change*, n°87, p. 193-213.
- Becker, M.**, D. Bert, J. Bouchon, J.F. Picard & E. Ulrich (1994). Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du Nord-Est de la France depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. *Revue Forestière Française*, n°46, p. 335-341.
- Bertrand R.**, Piedallu C., Perez V, Lebourgeois F., (sous presse). Cartes numériques interannuelles des températures pour la France entière, période 1950-2008.
- Bontemps, J.D.**, J.C. Herve, J.F. Dhôte (2010). Dominant radial and height growth reveal comparable historical variations for common beech in north-eastern France. *Forest Ecology and Management*, n°259, p. 1455-1463.
- Bontemps J.D.**, Vallet P., Hervé J.C., Rittié D., Dupouey J.L., Dhôte J.F. (2005). Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité. *Revue forestière française*, vol. LII, n° 2, 2005, p. 123-142.
- Bigler C.**, Bräker O.U., Bugmann H., Dobbertin M., Rigling A. (2006). Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems*, vol. 9, n°3, p. 330-343
- Bréda, N.**, A. Granier & G. Aussenac (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysologique et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, n°51, p. 109-131.
- Bréda, N.**, V. Badeau (2008) Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *Comptes Rendus Geoscience*, n°340, p. 651-662.
- Carnicer, J.**, Coll, M., Ninyerola, M., Pons, X., Sanchez, G., Penuelas, J., (2011). Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, n°108, p. 1474-1478.
- Charru, M.**, I. Seynave, F. Morneau & J. D. Bontemps (2010). Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management*, n°260, p. 864-874.

- Clark, D.B.**, Palmer, M.W. and Clark, D.A., (1999). Edaphic factors and the landscape-scale distributions of tropical rain forest trees. *Ecology*, 80(8), p. 2662-2675.
- Delahaye Panchout M.** (2004). *La sapinière à la reconquête de son territoire*. Office national des forêts, « les carnets du forestiers – Alpes du Sud », 40 pages.
- Delatour, C.**, (1983). Les Dépérissements de chênes en Europe. *Revue forestière française*, vol. XXXV, n° 4, p. 265-282.
- Dobbertin, M.**, P. Mayer, T. Wohlgemuth, E. Feldmeyer-Christe, U. Graf, N. E. Zimmermann & A. Rigling (2005). The decline of *Pinus sylvestris* L. forests in the swiss Rhone Valley - a result of drought stress? *Phyton-Annales Rei Botanicae*, n°45, p. 153-156.
- Droesbeke J-J.**, M. Lejeune, G. Saporta, (2005). *Modèles statistiques pour données qualitatives*, éditions Technip, 291 pages.
- Ducousso, A.**, M. Déqué (2005). Augmentation de l'effet de serre : constatations et prévisions. *Forêt-Entreprise*, n°162, p. 15-19.
- Galiano, L.**, J. Martinez-Vilalta, F. Lloret (2010). Drought-induced multifactor decline of Scots pine in the Pyrenees and potential vegetation change by the expansion of co-occurring oak species. *Ecosystems*, n°13, p. 978-991.
- GIEC** (2007). Bilan des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat — GIEC, 103 p.
- 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*, n°16, p. 257-260.
- Hasenauer, H.**, R.R. Nemani, K. Schadauer, S.W. Running (1999). Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *Forest Ecology and Management*, n°122, p. 209-219.
- Ladier J.**, (2004). *Les stations forestières des Préalpes sèches : définition, répartition, dynamique, fertilité*. Office national des forêts - Direction territoriale Méditerranée, 124 pages.
- Landmann G.**, Bonneau M. (1994). Le dépérissement du Sapin pectiné et de l'Épicéa commun dans les montagnes françaises dans les années 1980. *Revue Forestière Française*, vol. 46 (5), p. 522-537.
- Lebourgeois F.** (2002). *Cours de bioclimatologie de 1<sup>ère</sup> année de la formation des ingénieurs forestiers*. Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois, Nancy.
- Lebourgeois F.**, C. Piedallu (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. 57, (4), p. 331-356.
- Lebourgeois F.**, C.B.K. Rathgeber, E. Ulrich (2010). Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science*, n°21, p. 364-376.
- Lelou D.** (2010) *Les dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes après la canicule de 2003 : une approche spatiale de leur déterminisme*. Mémoire de fin d'études, Formation des Ingénieurs Forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF.
- Lines E.R.**, D.A. Coomes & D. W. Purves (2010). Influences of forest structure, climate and species composition on tree mortality across the eastern US. *PLoS ONE*, e13212.
- Macias, M.**, L. Andreu, O. Bosch, J.J. Camarero & E. Gutierrez (2006). Increasing aridity is enhancing silver fir (*Abies alba* Mill.) water stress in its south-western distribution limit. *Climatic Change*, n°79, p. 289-313.
- Marmion M.**, Parviainen M., Luoto M., Heikkinen R.K., Thuiller W. (2009). Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions*, vol. 15, n° 1, p. 59-69.
- Martínez-Vilalta J.**, Pinol J. (2002). Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. *Forest Ecology Management*, n°161, p. 247-256.
- Matyssek, R.**, W. M. Havranek, G. Wieser & J. L. Innes (1997). Ozone and the forests in Austria and Switzerland. *Ecological Studies*, vol. 127, p. 95-134.

- Médail F.**, (2001). Biogéographie, écologie et valeur patrimoniale des forêts de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) en région méditerranéenne. *Forêt méditerranéenne*, vol. XXII, n°1, p. 5-22.
- Menzel, A.** (2003). Plant phenological "fingerprints" detection of climate change impacts. Schwartz (ed.), *Phenology : an integrative environmental science*, p. 319-329.
- Moisselin, J. M.**, M. Schneider, C. Canellas & O. Mestre (2002). *Les changements climatiques en France au XXème siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations*. In La Météorologie, p. 45-56.
- Morel, A.** (2008). *Étude du dépérissement et de la présence du gui sur les sapinières du Livradois Forez*. Mémoire de fin d'études, Formation des Ingénieurs Forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF.
- Nageleisen L.-M.**, F.X. Saintonge, D. Piou, P. Riou-Nivert (2010). *La santé des forêts - Maladies, insectes, accidents climatiques... Diagnostic et prévention*. IDF, 608 pages.
- Nemani, R.R.**, C. D. Keeling, H. Hashimoto, W. M. Jolly, S. C. Piper, C. J. Tucker, R. B. Myneni & S. W. Running (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, n°300, p. 1560-1563.
- Oliva, J.** & C. Colinas (2010). Epidemiology of *Heterobasidion abietinum* and *Viscum album* on silver fir (*Abies alba*) stands of the Pyrenees. *Forest Pathology*, n°40, p. 19-32.
- Ozenda P.** (1981). *Végétation des Alpes sud-occidentales, Notice détaillée des feuilles 60, 61, 67, 68 et 75*. Éditions du CNRS.
- Piedallu, C.**, V. Perez, J. C. Gégout, F. Lebourgeois & R. Bertrand (2009). Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française*, n°6.
- Piedallu, C.**, Gégout, J.C., Bruand, A., Seynave, I., (2011). Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma*, n°160, p. 355-366.
- Piedallu, C.**, Perez V, Lebourgeois F. (en préparation). Cartes numérique des températures et des précipitations pour la France entière pour les périodes 1961-1990 et 1997-2008.
- Piedallu, C.**, Gégout, J.C., Perez, V., Lebourgeois, F. (en préparation). Soil water balance improves the determination of hygrophilous and xerophilous tree species distribution patterns.
- Rameau, J.C.**, Mansion D., Dumé G., (1989). *Flore forestière française, guide écologique illustré*. Tome I - Plaines et collines. IDF.
- Richard, J.B.** (2011). *Caractérisation de la contrainte hydrique des sols à l'aide de cartes numériques pour prendre en compte les effets potentiels du changement climatique dans les catalogues de stations forestières — Applications aux plateaux calcaires de Lorraine et de Bourgogne*. Mémoire de fin d'études, Formation des Ingénieurs Forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF.
- Rigling, A.**, Dobbertin, M., Bürgi, M., Gimmi, U., Graf Pannatier, E., Gugerli, F., Heiniger, U. (2006). Les chênes pubescents chassent-ils les Pins sylvestres valaisans? *Notice pour le praticien*, n°41, Institut fédéral de recherches WSL CH-8903 Birmensdorf.
- Riou-Nivert, P.** (2008). Changements climatiques : les interrogations des sylviculteurs. *Forêt-Entreprise*, vol. 180, p. 14-27.
- Ripert C.**, Vennetier M., (2002). *Evaluation des potentialités forestières. Guide technique du forestier méditerranéen français*. CEMAGREF, 61 pages.
- Roman-Amat, B.** (2007). *Préparer les forêts françaises au changement climatique : Rapport à MM. les Ministres de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables*. 124 pages.
- Rodriguez, A.** (2009). *Le chêne pédonculé face aux changements climatiques*. Mémoire de fin d'études, Formation des Ingénieurs Forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF.
- Sardin, T.** (1997). La sylviculture des boisements de protection, la problématique de leur renouvellement. *Forêt méditerranéenne*, vol. XVIII, n°3.

- Schaeffer, A.** (1955). Le Dépérissement du Hêtre dans le département du Doubs. *Bulletin de la Société forestière de Franche-Comté et des Provinces de l'Est*, vol. XXVIII, n° 6, p. 290-291.
- Thabeet, A., M. Vennetier, C. Gadbin-Henry, N. Denelle, M. Roux, Y. Caraglio & B. Vila** (2009). Response of *Pinus sylvestris* L. to recent climatic events in the French Mediterranean region. *Trees: Structure and Function*, n°23, p. 843-853.
- Thornthwaite, C.W.** (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, vol. 38, n° 1948, p. 55-94.
- Thuiller, W., C. Albert, M. B. Araujo, P. M. Berry, M. Cabeza, A. Guisan, T. Hickler, G. F. Midgely, J. Paterson, F. M. Schurr, M. T. Sykes & N. E. Zimmermann** (2008) Predicting global change impacts on plant species distributions: Future challenges. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, n°9, p. 137-152.
- Turc, L.** (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation et évaporation potentielle. *Annales Agronomiques*, n°12, p. 13-49.
- Van Mantgem, P.J., N. L. Stephenson, J. C. Byrne, L. D. Daniels, J. F. Franklin, P. Z. Fule, M. E. Harmon, A. J. Larson, J. M. Smith, A. H. Taylor & T. T. Veblen** (2009). Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States. *Science*, n° 323, p. 521-524.
- Vennetier, M., B. Vila, E.Y. Liang, F. Guibal, C. Ripert, O. Chandioux** (2007). Impact du changement climatique et de la canicule de 2003 sur la productivité et l'aire de répartition du pin sylvestre et du pin d'Alep en région méditerranéenne. *Rendez-vous techniques*, hors-série n°3, p. 67-73, Office national des forêts.
- Vennetier M., Borgniet L., Thabeet A., Gadbin-Henry C., Ripert C., Vila B., Prevosto B., Esteve R., Martin W., N'Diaye A.,** (2008). *Impact de la canicule de 2003 sur les peuplements résineux de la région PACA*. Rapport de synthèse pour le Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur. Cemagref – Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie, 22 pages.

## CONTACTS

### Office national des forêts

- Jean Ladier  
Département Recherche-Développement  
jean.ladier@onf.fr  
04 92 70 48 04
- Myriam Legay  
Responsable du Pôle R&D de Nancy  
myriam.legay@onf.fr  
03 83 23 45 05
- Samuel Lardeux  
Agence interdépartementale Alpes-Maritimes/Var  
Responsable Grandes collectivités  
samuel.lardeux@onf.fr  
04 93 18 51 47
- Émilie Coste-Chareyre  
Agence interdépartementale Alpes-Maritimes/Var  
Responsable pôle SAM  
emilie.coste-chareyre@onf.fr  
04 93 18 51 43

### AgroParisTech-ENGREF, Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois (LERFoB) et Institut national de la recherche agronomique (INRA)

- Christian Piedallu  
Ingénieur en écologie forestière, spécialiste en géomatique  
christian.piedallu@engref.agroparistech.fr  
03 83 39 68 77
- Vincent Perrez  
Géomaticien  
vincent.perez@engref.agroparistech.fr  
03.83.39.68.49
- Ingrid Seynave  
Équipe écologie forestière  
ingrid.seynave@engref.agroparistech.fr  
03 83 39 68 00
- Jean-Daniel Bontemps  
Équipe écologie forestière  
jdbontemps.agroparistech@gmail.com  
03 83 39 68 75
- Jean-Claude Pierrat  
Ingénieur de recherche spécialisé en statistiques  
jean-claude.pierrat@engref.agroparistech.fr  
03 83 39 00 00
- Éric Lacombe  
Enseignant en sylviculture  
eric.lacombe@engref.agroparistech.fr  
03 83 39 68 70

- Jean-Claude Gegout  
Professeur en écologie forestière  
jean-claude.gegout@agroparistech.fr  
03 83 39 68 84

#### Inventaire forestier national

- Fabienne Benest  
Déléguée interrégionale adjointe (échelon de Bordeaux)  
Responsable de l'unité Ecologie  
fabienne.benest@ifn.fr  
05 57 87 29 49

#### Département de la santé des forêts

- Jean-Luc Flot  
Chef du département de la santé des forêts  
Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire  
Sous-direction de la qualité et de la protection des végétaux  
jean-luc.flot@agriculture.gouv.fr  
01 49 55 51 95
- Louis-Michel Nageleisen  
Expert référent national "entomologie forestière et dépérissement"  
Ministère de l'alimentation, de l'agriculture, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire  
louis.michel.nageleisen@gmail.com  
06 70 72 68 91

#### Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement (Cemagref)

- Michel Vennetier  
Chercheur en écologie forestière (Aix-en-Provence)  
michel.vennetier@cemagref.fr  
04 42 66 99 22

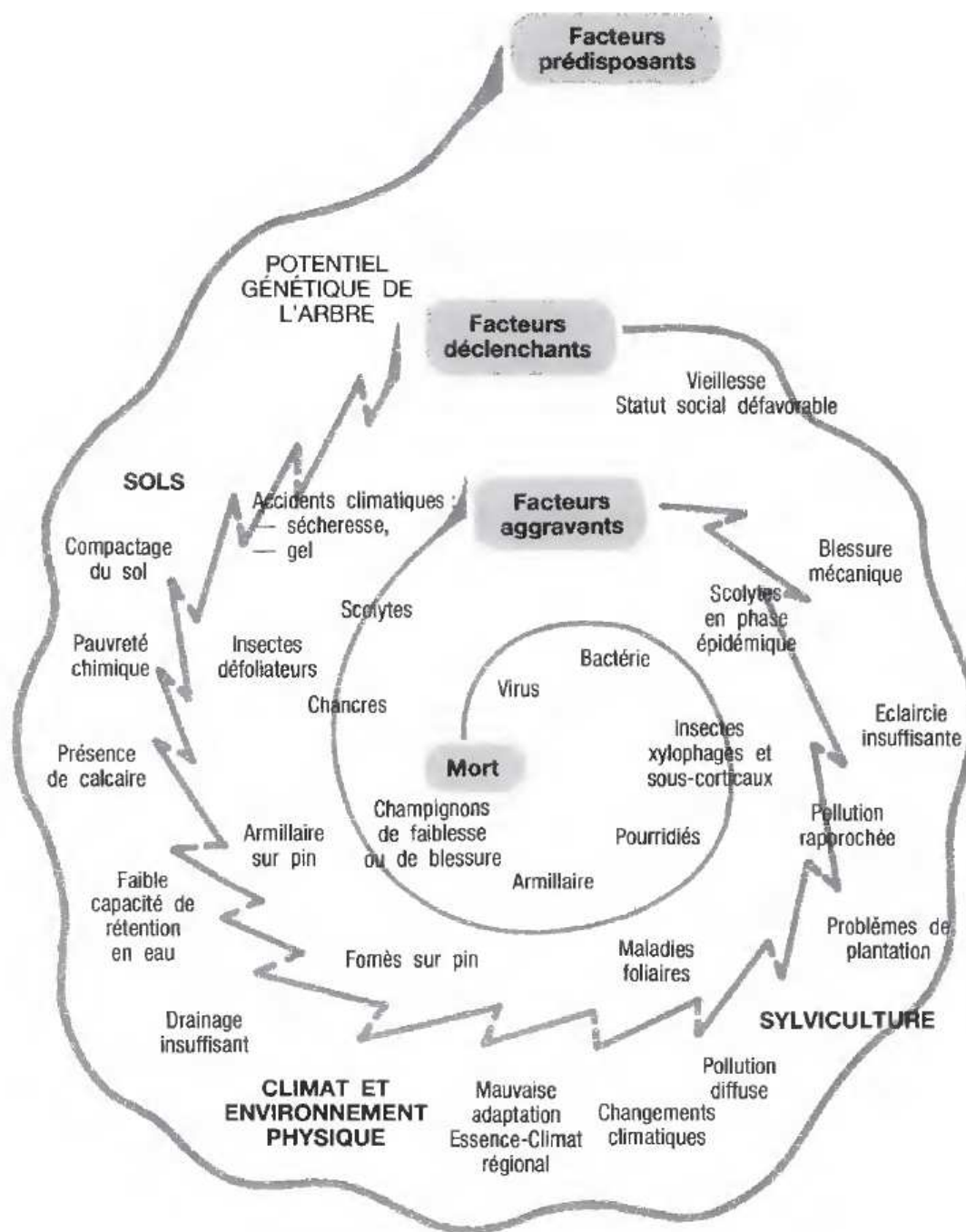
## TABLE DES ANNEXES

- Annexe 1 : La « spirale du déclin » de Manion (1981) adaptée aux conditions françaises.
- Annexe 2 : Jeux de données utilisés pour la description des évolutions de précipitations et de température.
- Annexe 3 : Épisodes de dépérissement du Pin sylvestre et du Sapin pectiné constatés en Europe depuis le milieu du xx<sup>e</sup> siècle.
- Annexe 4 : Validation du modèle Helios de radiations.
- Annexe 5 : Validation des modèles mensuels de température.
- Annexe 6 : Validation des modèles mensuels de précipitations.
- Annexe 7 : Évolution annuelle des précipitations aux deux échelles de l'étude.
- Annexe 8 : Évolution et annuelle des températures aux deux échelles de l'étude.
- Annexe 9 : Cartes des aires de répartition du Pin sylvestre et du Sapin pectiné à l'échelle de l'Europe.
- Annexe 10 : Effectif et localisation des placettes IFN « dépérissantes » en fonction du seuil de mortalité de branches considéré.
- Annexe 11 : Cartographie des mortalités d'arbres dans le département des Alpes-Maritimes.
- Annexe 12 : Liste exhaustive des variables climatiques et édaphiques mensuelles spatialisées.
- Annexe 13 : Comparaison du pouvoir prédictif du climat moyen à celui de ses évolutions à l'échelle des Alpes-Maritimes pour les deux essences étudiées.
- Annexe 14 : Description du protocole de terrain.
- Annexe 15 : Observations effectuées sur les placettes de Touët-sur-Var (Alpes-Maritimes) pour le Pin sylvestre.
- Annexe 16 : Observations effectuées sur les placettes de Roquebilière (Alpes-Maritimes) pour le Sapin pectiné.
- Annexe 17 : Comparaison du pouvoir prédictif des différents indices d'évolution du climat.
- Annexe 18 : Comparaison du pouvoir prédictif des variables édaphiques en fonction de leur méthode de calcul.





Annexe 1 : La « spirale du déclin » de Manion (1981) adaptée aux conditions françaises.



(Source : Landmann, 1994)



## Annexe 2 : Jeux de données utilisés pour la description des évolutions de précipitations et de température.

La température moyenne et les précipitations sont les variables de base utilisées dans cette étude pour décrire le climat. Leurs évolutions temporelles depuis 1990 ont été décrites à l'échelle de la France et des Alpes-Maritimes à partir des postes Météo-France. Pour cela, deux jeux de postes météorologiques ont été sélectionnés à chaque échelle : l'un pour les températures moyennes, l'autre pour les précipitations (*cf.* tableau 18 ci-dessous). Chaque jeu comporte des postes distribués de façon homogène sur la zone d'étude (France ou Alpes-Maritimes). Ces postes présentent des observations continues sur la période 1960-2008. Lors de la constitution de ces jeux de données, la priorité a été donnée aux séries homogénéisées (séries ayant subi des corrections statistiques), la cohérence des autres séries de données ayant été soigneusement vérifiée.

| Échelle         | Variable            | Nombre total de postes                      |
|-----------------|---------------------|---------------------------------------------|
| France          | Précipitations      | 105<br><i>(dont 44 postes homogénéisés)</i> |
|                 | Température moyenne | 96<br><i>(dont 53 postes homogénéisés)</i>  |
| Alpes-Maritimes | Précipitations      | 9<br><i>(dont 0 postes homogénéisés)</i>    |
|                 | Température moyenne | 4<br><i>(dont 0 postes homogénéisés)</i>    |

TABEAU 18. — Nombre de postes Météo-France sélectionnés pour la description de l'évolution du climat sur la période 1990-2008 aux deux échelles de l'étude.



### Annexe 3 : Épisodes de dépérissement du Pin sylvestre et du Sapin pectiné constatés en Europe depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle.

| LIEU                              | PÉRIODE    | ESSENCE                       | CAUSE(S) PRÉPONDERANTE(S)                                             |
|-----------------------------------|------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Suisse (Valais)                   | 1960-1976  | Pin sylvestre                 | Sécheresse de plusieurs années                                        |
| Europe centrale                   | 1970-1985  | Sapins et pins                | Sécheresse de plusieurs années + scolytes                             |
| Grèce                             | 1987-1989  | Sapin pectiné                 | Sécheresse de plusieurs années                                        |
| Italie (sud Tyrol)                | 1992       | Pin sylvestre                 | Sécheresse de plusieurs années                                        |
| Sud de l'Autriche                 | 1990-1996  | Pin sylvestre                 | Sécheresse saisonnière                                                |
| Autriche (Tyrol)                  | 1991-1997  | Pin sylvestre                 | Sécheresse saisonnière                                                |
| Italie (Aoste)                    | 1985-1998  | Pin sylvestre                 | Sécheresse de plusieurs années                                        |
| Espagne (Nord-Est, Centre et Sud) | 1994, 1998 | Pin sylvestre                 | Sécheresse de plusieurs années                                        |
| Autriche (Tyrol)                  | 2001       | Pin sylvestre                 | Sécheresse saisonnière                                                |
| Suisse (Valais)                   | 1996-2004  | Pin sylvestre                 | Sécheresse de plusieurs années + fortes chaleurs estivales + scolytes |
| Espagne                           | 2004-2006  | Pin sylvestre                 | Sécheresse de plusieurs années                                        |
| Suisse (Grisons)                  | 2003-2007  | Pin sylvestre                 | Sécheresse + fortes chaleurs                                          |
| France (Provence, Alpes du Sud)   | 2003-2008  | Sapin pectiné + Pin sylvestre | Sécheresse de plusieurs années + fortes chaleurs estivales + scolytes |
| France (Est des Pyrénées)         | 2003-2008  | Sapin pectiné                 | Sécheresses répétées + fortes chaleurs + scolytes                     |

Source : Allen *et al.*, 2009.



## Annexe 4 : Validation du modèle Helios de radiations.

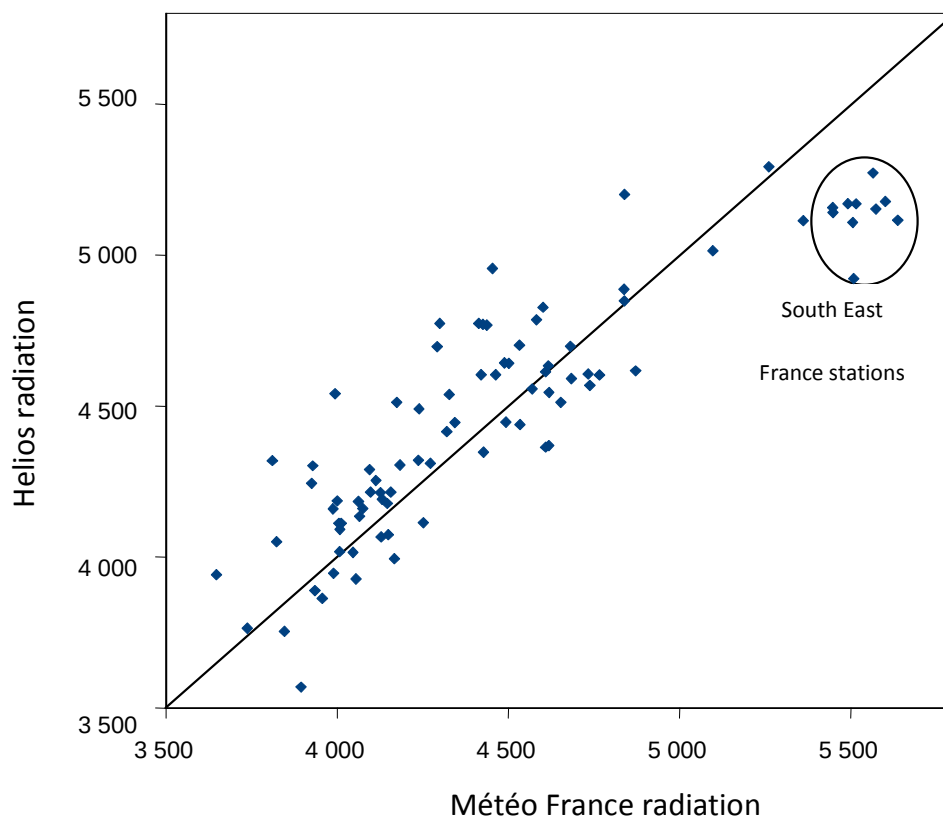


FIGURE 25 — Relation entre les radiations solaires moyennes annuelles mesurées au niveau des postes Météo-France ( $n = 88$ ) et les radiations calculées avec le modèle Hélios ( $\text{MJ/m}^2$ ).  
Source : Piedallu, 2011.





## Annexe 5 : Validation des modèles mensuels de température.

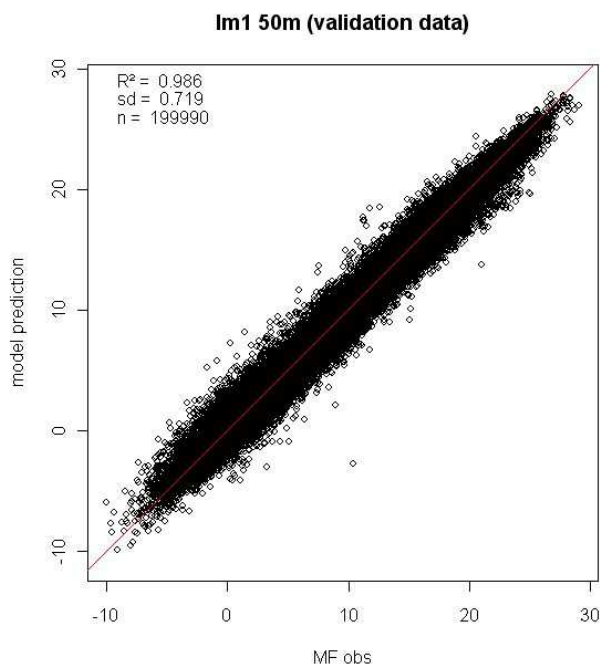


FIGURE 26 — Relation entre les températures moyennes mensuelles mesurées au niveau des postes Météo-France (MF obs) et les températures calculées sur ces mêmes postes à partir des modèles mensuels au pas de 50 m (°C). Le jeu de postes utilisé est indépendant de celui utilisé pour calibrer les modèles. Source : Bertrand, 2011.

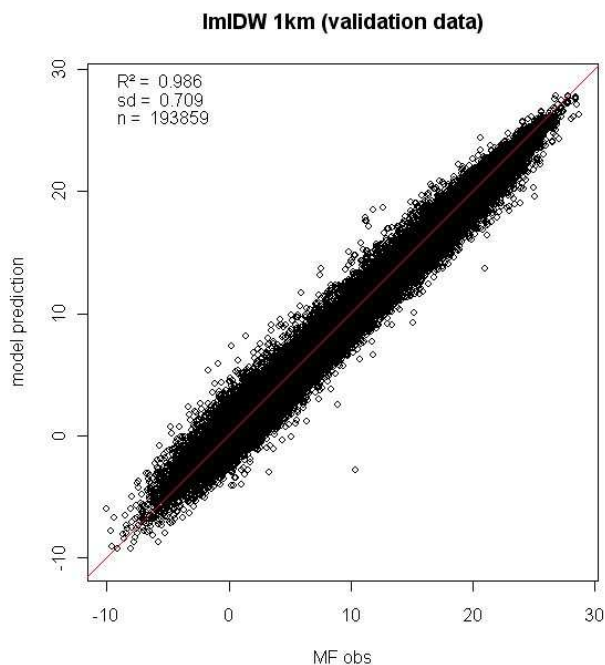


FIGURE 27 — Relation entre les températures moyennes mensuelles mesurées au niveau des postes Météo-France (MF obs) et les températures calculées sur ces mêmes postes à partir des modèles mensuels au pas de 1 000 m (°C). Le jeu de postes utilisé est indépendant de celui utilisé pour calibrer les modèles. Source : R. Bertrand.



## Annexe 6 : Validation des modèles mensuels de précipitations.

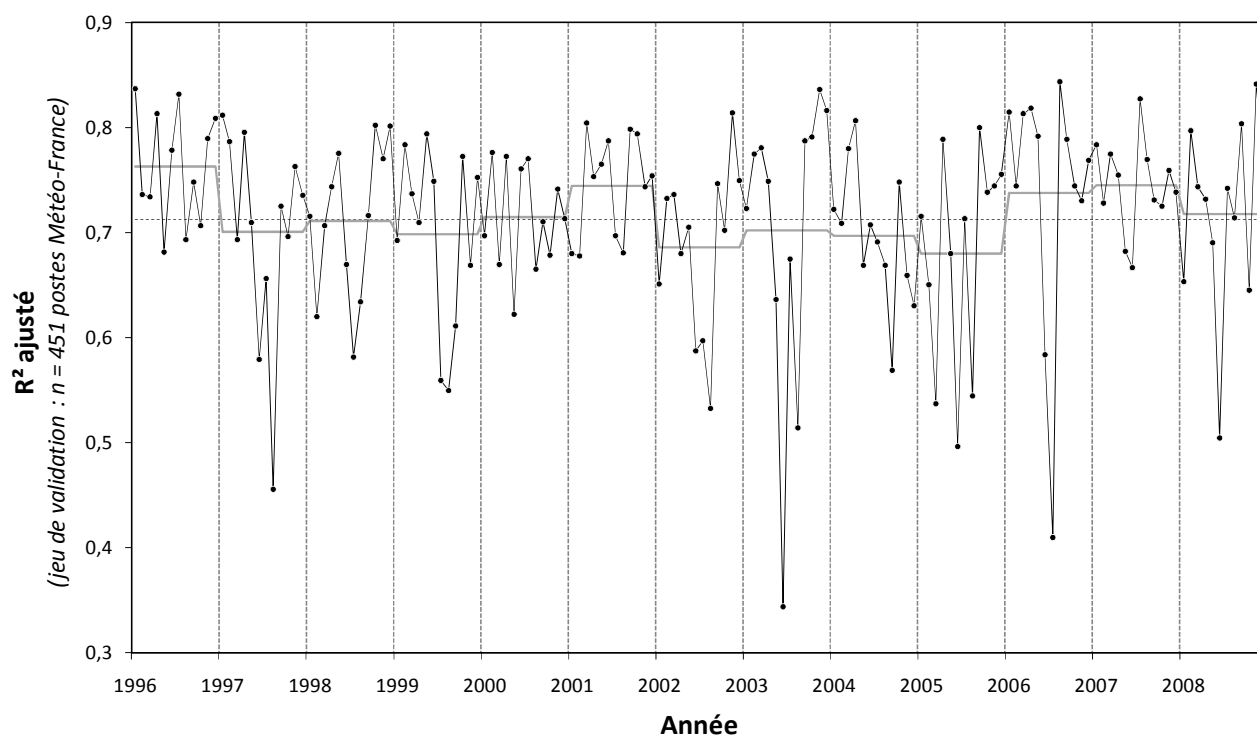


FIGURE 28 — Évolution du  $R^2$  calculé sur un jeu de validation (451 postes Météo-France) pour les modèles de précipitations mensuels (courbe avec points) et annuels (courbe lisse) calibrés pour les besoins de l'étude à l'échelle de la France.

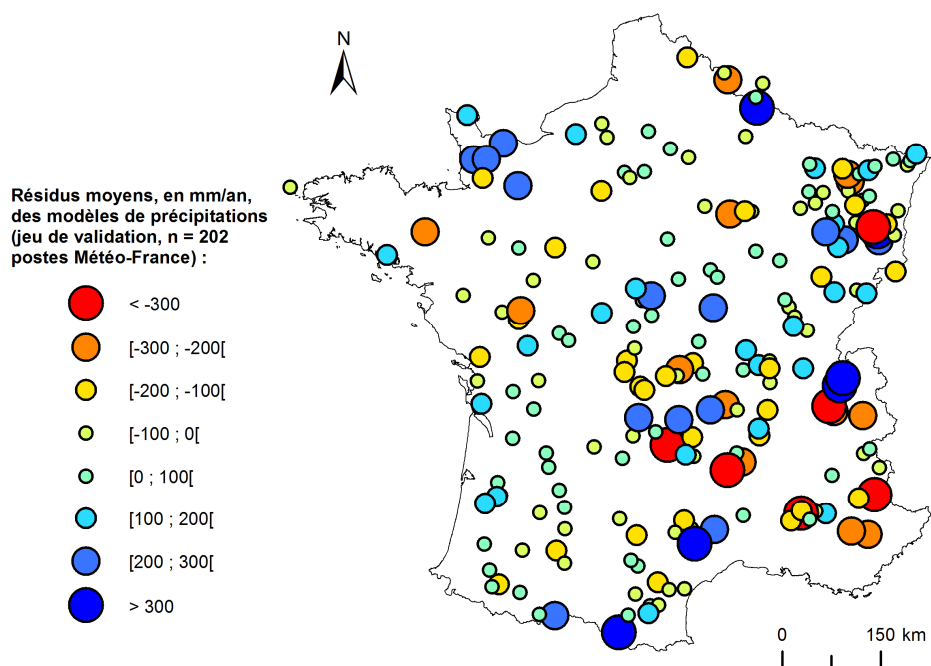


FIGURE 29 — Résidus moyens sur l'intervalle 1996-2007 des modèles mensuels de précipitations au niveau des postes Météo-France présentant des séries complètes sur cet intervalle de temps ( $n = 202$ ).



## Annexe 7 : Évolution annuelle des précipitations aux deux échelles de l'étude.

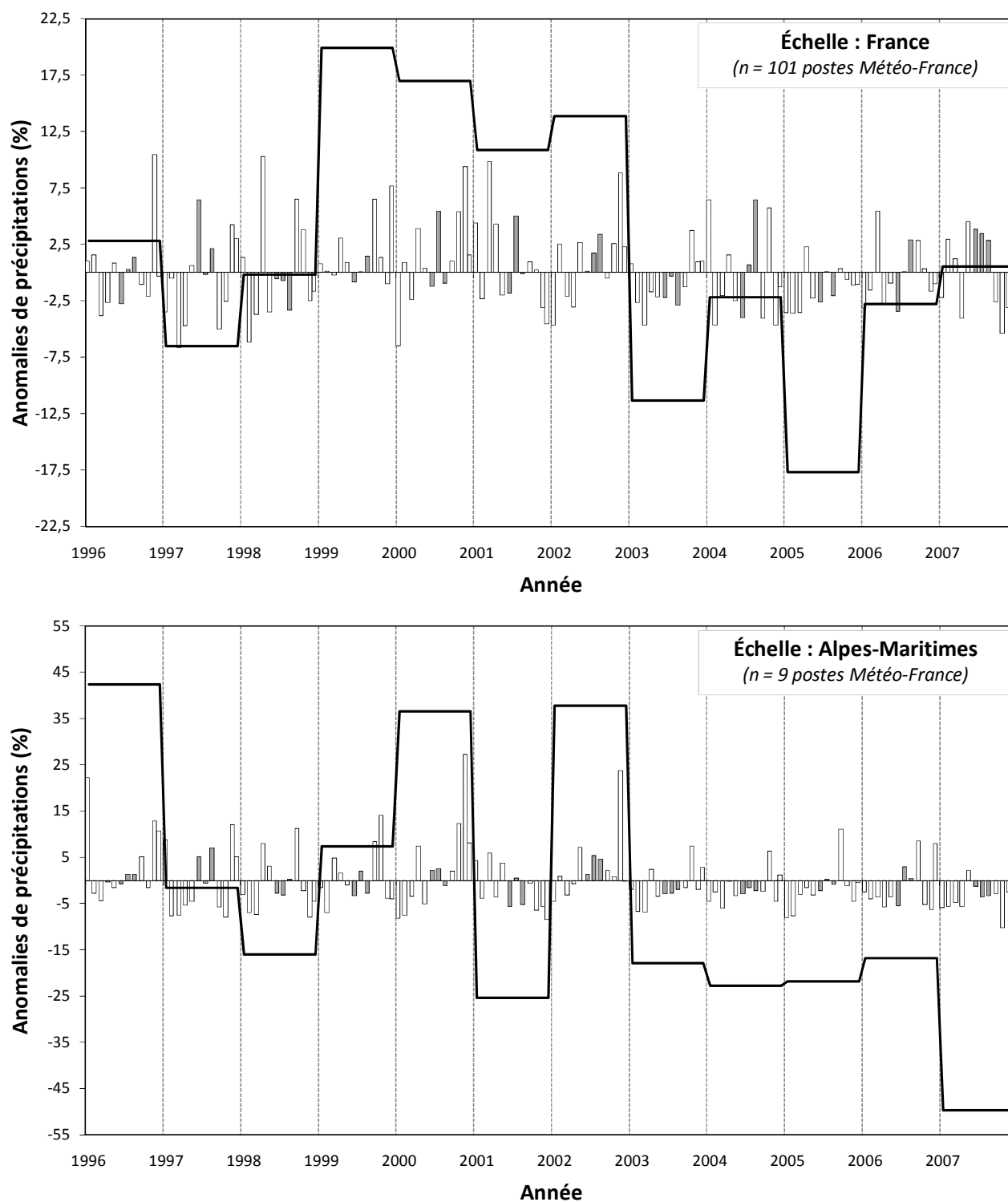


FIGURE 30 — évolution annuelle des précipitations aux deux échelles de l'étude sur l'intervalle 1996-2007. Les mois grisés correspondent à juin, juillet et août. La courbe lisse montre l'évolution de la moyenne annuelle. (France : 101 postes Météo-France répartis de façon homogène ; Alpes-Maritimes : 9 postes Météo-France).



## Annexe 8 : Évolution et annuelle des températures aux deux échelles de l'étude.

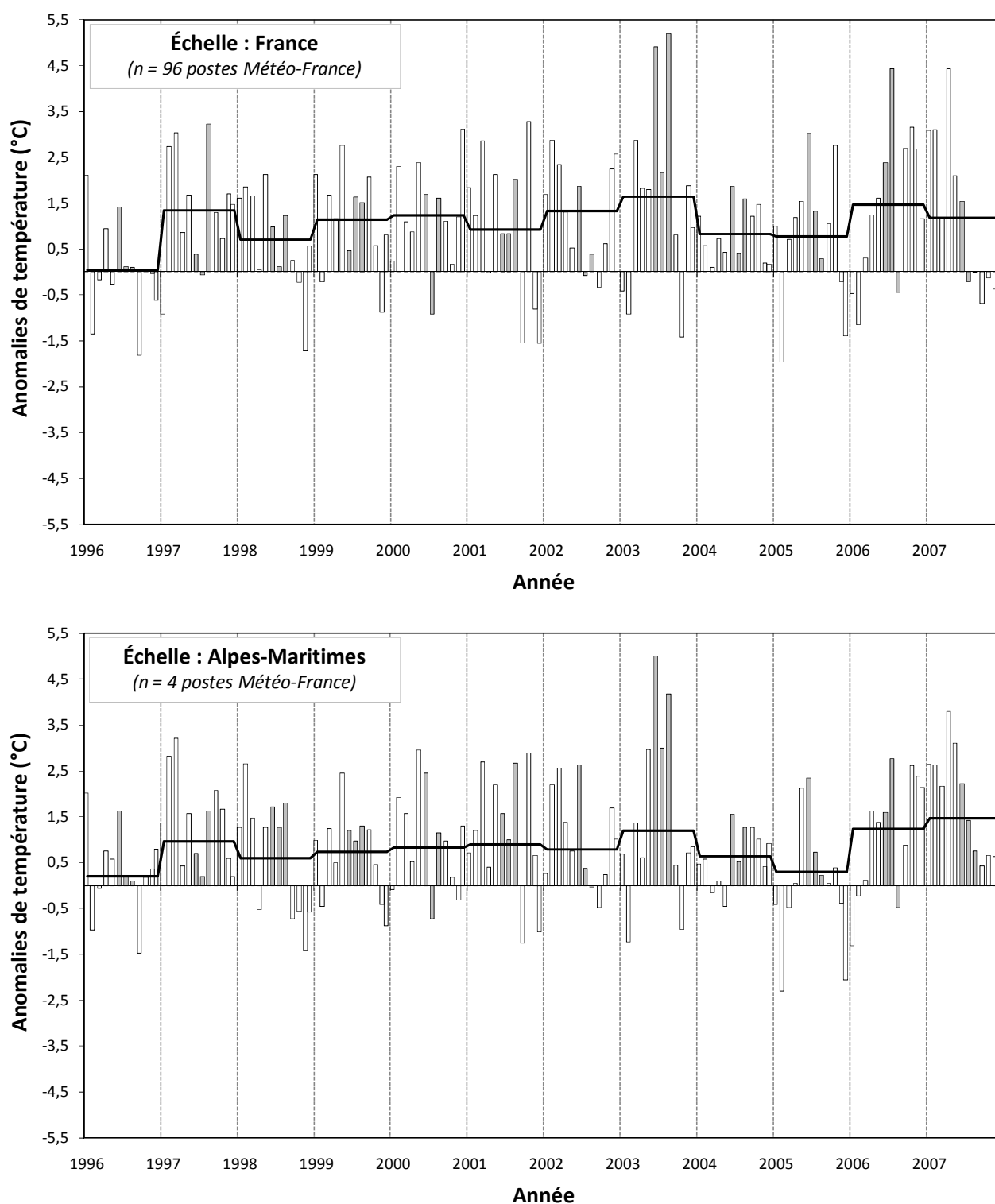
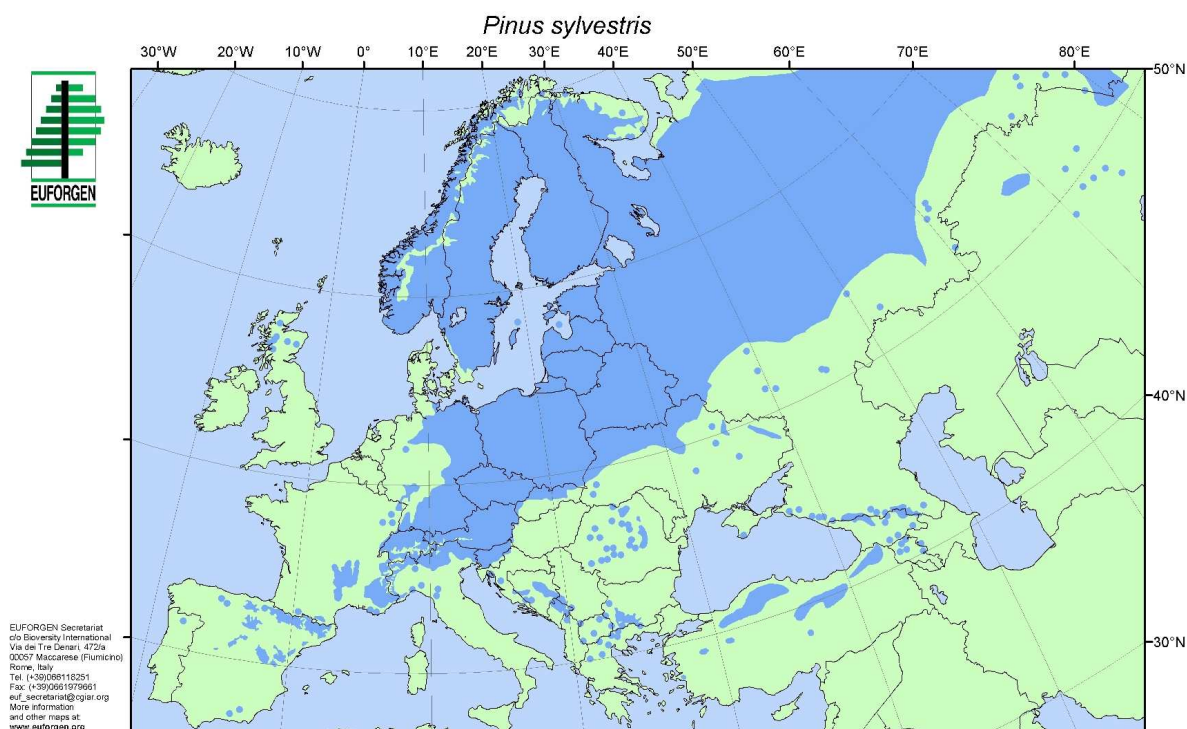


FIGURE 31 — évolution annuelle des températures aux deux échelles de l'étude sur l'intervalle 1996-2007. Les mois grisés correspondent à juin, juillet et août. La courbe lisse montre l'évolution de la moyenne annuelle. (France : 96 postes Météo-France répartis de façon homogène ; Alpes-Maritimes : 4 postes Météo-France).





## Annexe 9 : Cartes des aires de répartition du Pin sylvestre et du Sapin pectiné à l'échelle de l'Europe.



This distribution map, showing the natural distribution area of *Abies alba* was compiled by members of the EUFORGEN Networks.

Citation: Distribution map of Silver fir (*Abies alba*) EUFORGEN 2009, [www.euforgen.org](http://www.euforgen.org).

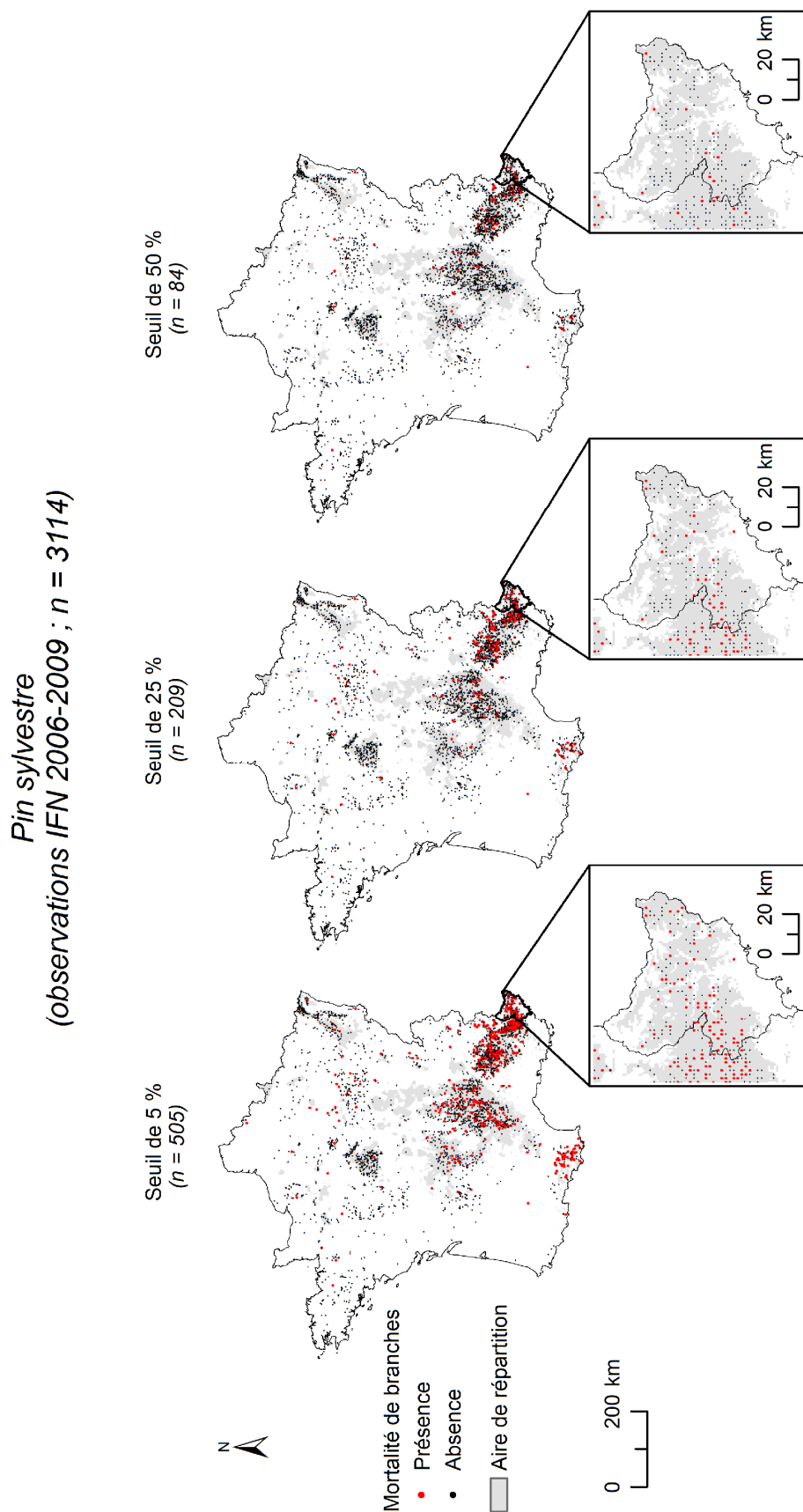
First published online in 2003 - Updated on 29 July 2008

0 250 500 1,000 Km

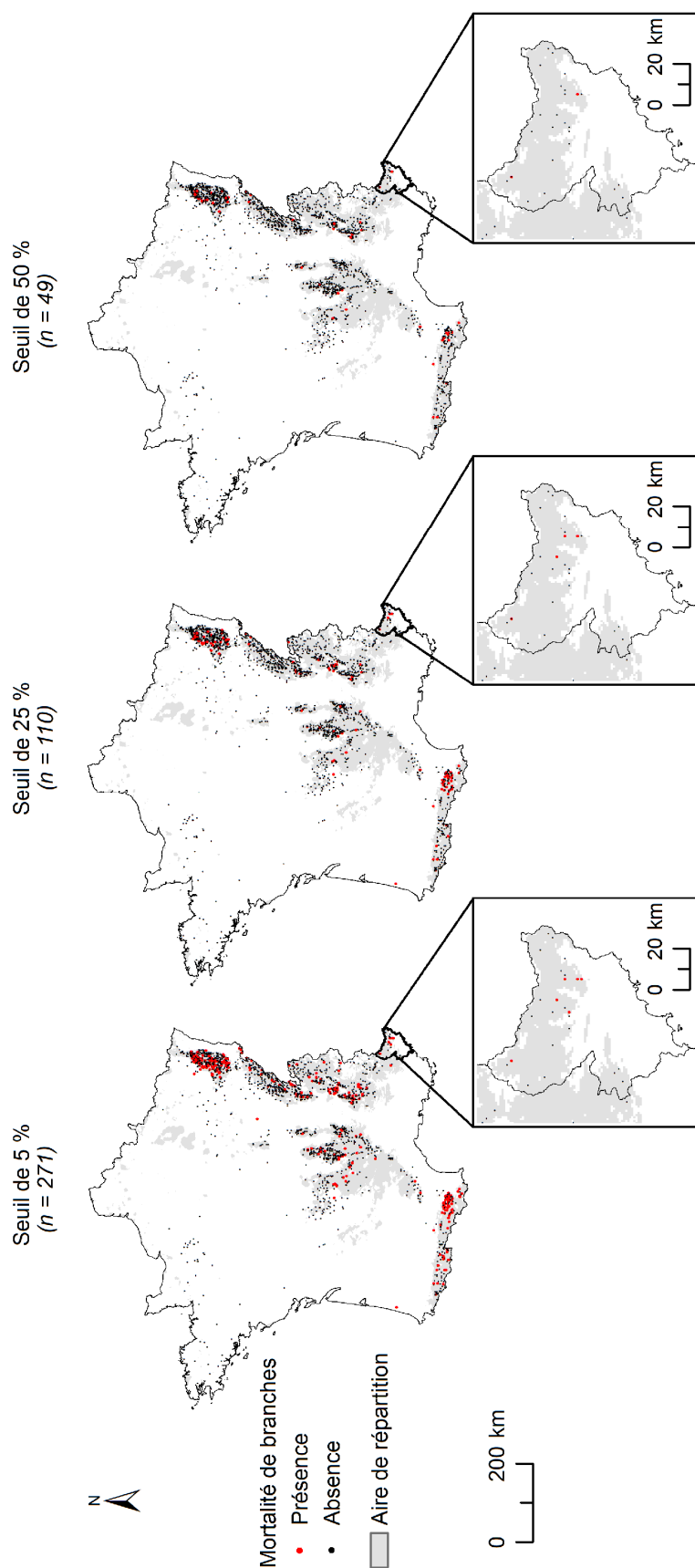
(Source : [http://www.euforgen.org/distribution\\_maps.html](http://www.euforgen.org/distribution_maps.html), dernière consultation le 18/08/2011)



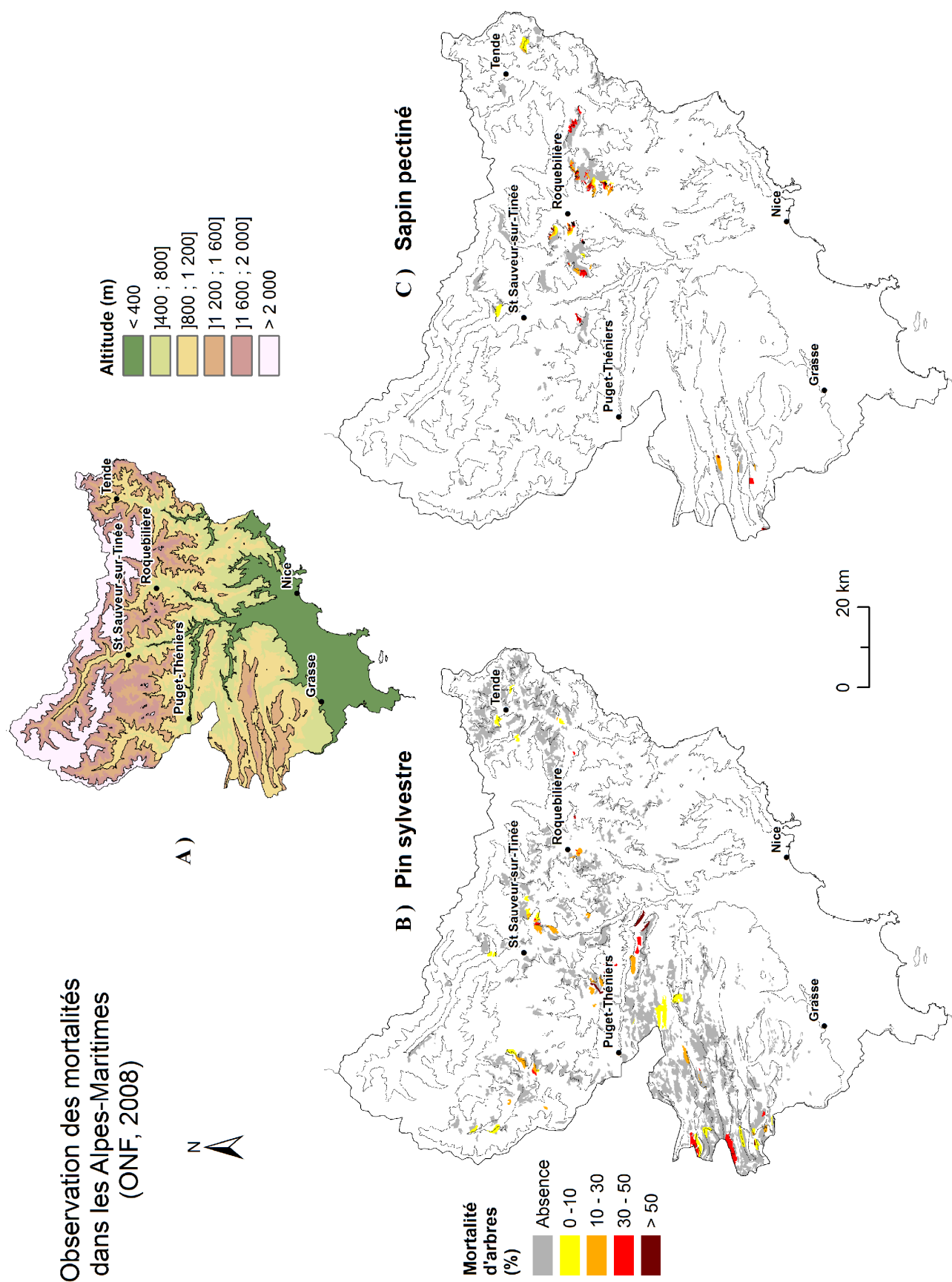
Annexe 10 : Effectif et localisation des placettes IFN « dépérissantes » en fonction du seuil de mortalité de branches considéré.



*Sapin pectiné*  
(observations IFN 2006-2009 ;  $n = 1927$ )



## Annexe 11 : Cartographie des mortalités d'arbres dans le département des Alpes-Maritimes.





## Annexe 12 : Liste exhaustive des variables climatiques et édaphiques mensuelles spatialisées.

*En grisé : modèles calculés dans le cadre de la présente étude.*

| Type de données | Signification physiologique                                                               | Modèles mensuels spatialisés                                                                         | Couverture      | Plus fine résolution | Méthode de calcul /unité                                                                                     | Auteurs                      |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Climatiques     | Conditions thermiques favorables ou défavorables à la croissance des arbres               | Température moyenne :<br>$T_{i\_j}$<br>(avec i = 1996 à 2007 ; j = 1 à 13)                           | France entière  | 1 km                 | Modèles LERFoB<br>—<br>(°C)                                                                                  | C. Piedallu &<br>R. Bertrand |
|                 |                                                                                           |                                                                                                      | Alpes-Maritimes | 50 m                 |                                                                                                              |                              |
|                 |                                                                                           | Rayonnement solaire moyen avec nébulosité :<br>$RADN_{i\_j}$<br>(avec i = 1996 à 2007 et j = 1 à 13) | France entière  | 1 km                 | Modèles hélios de radiation, corrigé de la nébulosité mesurée sur les postes Météo-France<br>—<br>joules/cm² | C. Piedallu &<br>G. Thauvin. |
|                 |                                                                                           |                                                                                                      | Alpes-Maritimes | 50 m                 |                                                                                                              |                              |
|                 |                                                                                           | Évapotranspiration potentielle moyenne :<br>$ETP_{i\_j}$<br>(avec i = 1996 à 2007 et j = 1 à 13)     | France entière  | 1 km                 | Méthode de Turc<br>—<br>(mm)                                                                                 |                              |
|                 |                                                                                           |                                                                                                      | Alpes-Maritimes | 50 m                 |                                                                                                              |                              |
|                 | Conditions d’humidité atmosphérique favorables ou défavorables à la croissance des arbres | Précipitations moyennes :<br>$P_{i\_j}$<br>(avec i = 1996 à 2007 ; j = 1 à 13)                       | France entière  | 1 km                 | Modèles LERFoB<br>—<br>(mm)                                                                                  |                              |
|                 |                                                                                           |                                                                                                      | Alpes-Maritimes | 50 m                 |                                                                                                              |                              |
|                 |                                                                                           | Bilan hydrique mensuel moyen :<br>$BHc_{i\_j}$<br>(avec i = 1996 à 2007 et j = 1 à 13)               | France entière  | 1 km                 | Méthode de Turc<br>—<br>(mm)                                                                                 |                              |
|                 |                                                                                           |                                                                                                      | Alpes-Maritimes | 50 m                 |                                                                                                              |                              |
| Édaphiques      | Niveau de sécheresse édaphique                                                            | Teneur moyenne en eau du sol :<br>$RU_{i\_j}$<br>(avec i = 1996 à 2007 ; j = 1 à 13)                 | France entière  | 1 km                 | — Méthode de Thornthwaite<br>— Méthode de Palmer<br>—<br>(mm)                                                |                              |
|                 |                                                                                           |                                                                                                      | Alpes-Maritimes | 50 m                 |                                                                                                              |                              |
|                 |                                                                                           | Déficit moyen d’évaporation :<br>$DE_{i\_j}$<br>(avec i = 1996 à 2007 ; j = 1 à 13)                  | France entière  | 1 km                 |                                                                                                              |                              |
|                 |                                                                                           |                                                                                                      | Alpes-Maritimes | 50 m                 |                                                                                                              |                              |
|                 |                                                                                           | Indice d’aridité moyen :<br>$IA_{i\_j}$<br>(avec i = 1996 à 2007 ; j = 1 à 13)                       | France entière  | 1 km                 |                                                                                                              |                              |
|                 |                                                                                           |                                                                                                      | Alpes-Maritimes | 50 m                 |                                                                                                              |                              |
|                 |                                                                                           | Évapotranspiration réelle moyenne :<br>$ETR_{i\_j}$<br>(avec i = 1996 à 2007 et j = 1 à 13)          | France entière  | 1 km                 |                                                                                                              |                              |
|                 |                                                                                           |                                                                                                      | Alpes-Maritimes | 50 m                 |                                                                                                              |                              |





### Annexe 13 : Comparaison du pouvoir prédictif du climat moyen à celui de ses évolutions à l'échelle des Alpes-Maritimes pour les deux essences étudiées.

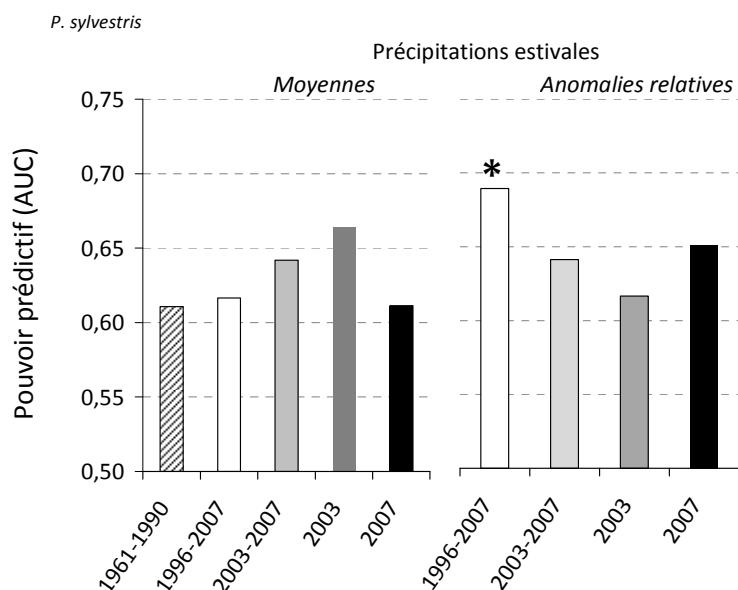


FIGURE 32 — Comparaison du pouvoir prédictif des anomalies annuelles moyennes de précipitations estivales (1) avec les précipitations estivales (1) moyennes sur les différents intervalles de l'étude (seules les deux années les plus extrêmes 2003 et 2007 ont été représentées). Le pouvoir prédictif des différentes variables vis-à-vis du dépérissement du Pin sylvestre est mesuré grâce à l'AUC calculée d'après un modèle univarié. \* = variable finalement retenue dans le modèle de dépérissement multivarié.

(1) moyenne des mois de juin, juillet et août.

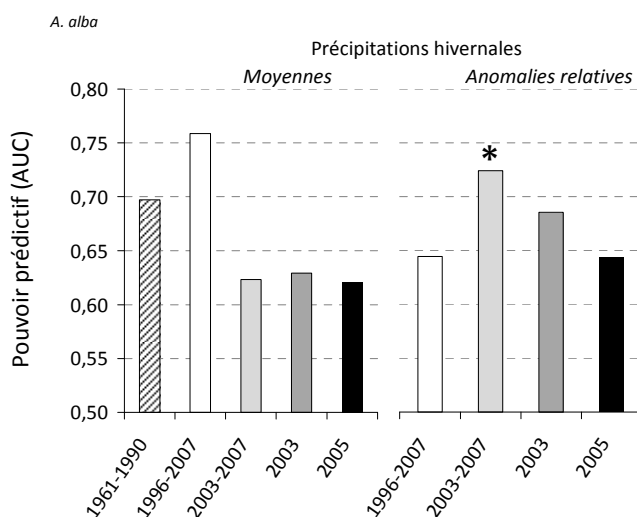


FIGURE 33 — Comparaison du pouvoir prédictif des anomalies annuelles moyennes de précipitations estivales (1) avec les précipitations estivales (1) moyennes sur les différents intervalles de l'étude (seules les deux années les plus extrêmes 2003 et 2007 ont été représentées). Le pouvoir prédictif des différentes variables vis-à-vis du dépérissement du Sapin pectiné est mesuré grâce à l'AUC calculée d'après un modèle univarié. \* = variable finalement retenue dans le modèle de dépérissement multivarié.

(1) moyenne des mois de juin, juillet et août.



## Annexe 14 : Description du protocole de terrain.

### Constat :

Bien que les prédictions des modèles et les observations de mortalité concordent dans 65 % des cas pour le Pin sylvestre et 70 % des cas pour le Sapin pectiné, certaines différences sont observées. La phase de terrain doit permettre d'avancer dans la compréhension de ces discordances.

*Deux cas de discordance modèle-observation.*

|              |                           | Modélisation                   |                                |
|--------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|              |                           | PROBA <sub>mortalité</sub> = 0 | PROBA <sub>mortalité</sub> > 0 |
| Observations | Pas de mortalités en 2008 | Concordance                    | « <b>Sur-prédiction</b> »      |
|              | Mortalité en 2008         | « <b>Sous-prédiction</b> »     | Concordance                    |



Pourquoi observe-t-on des mortalités alors que le modèle n'en prédit pas ?



Pourquoi n'observe-t-on pas de mortalité alors que le modèle prédit une probabilité forte ?

### Objectifs :

Pour chaque essence (Pin sylvestre et Sapin pectiné) :

- Identifier d'éventuelles variables impactant la santé des arbres et qui n'auraient pas été intégrées dans les modèles :
  - variables peuplement / gestion
  - variables biotiques (gui, scolyte...)
  - autres...
- vérifier si ces discordances sont liées aux imprécisions des variables explicatives modélisées (notamment pour la réserve utile maximale) ou à celles des observations.

### Méthodologie :

**Comparaison de peuplements proches** aux **conditions écologiques quasi-identiques** et où les prédictions de mortalités et les observations ne concordent pas.

**Conditions écologiques fixées pour chaque binôme : altitude, géologie, exposition, RUM.**

Pour chaque essence :

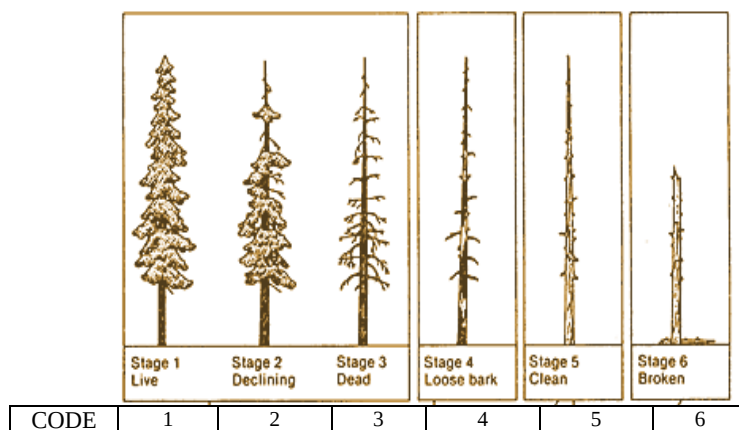
- 1) Présélection au bureau de 6 paires de peuplements homogènes remplissant les critères ci-dessus (dont 2 paires de secours). Détermination d'un point d'entrée dans chaque peuplement.
- 2) Cheminement dans les peuplements sélectionnés, un arrêt dans une zone représentative (dépérissante si le peuplement est signalé comme dépérissant, non dépérissante sinon), réalisation des mesures selon le protocole ci-dessous.

- Relevé de variables écologiques :
  - a. Relevé des coordonnées GPS
  - b. Altitude, pente, exposition, position topographique, présence de sources/résurgences
  - c. Affleurements rocheux (indique le recouvrement moyen sur la placette des blocs de taille supérieure à 20 cm, et des affleurements de roche dure en place, visible en surface. Valeur estimée exprimée en dixièmes)
  - d. Substrat géologique
- Description de l'humus pour se faire une idée du pH, en 12 classes d'humus : eumull, mésomull, oligomull, dysmull, amphi-mull, hémimoder, eumoder, dysmoder, mor, hydromull, hydromoder, hydromor.
- Mesure de la profondeur de sol prospectable : au niveau d'une zone homogène non perturbée. L'emplacement constituera le centre de la placette.  
 Les 50 premiers centimètres seront, si possible, creusés à la pioche. Au-delà le sondage sera continué à la tarière (seulement si 2 personnes). En cas de difficulté pour creuser à plus de 20 cm de profondeur, 2 essais supplémentaires seront réalisés dans un rayon de 2 m. La profondeur atteinte sera notée ainsi que la charge moyenne en éléments grossiers (EG) par horizon. La valeur est estimée en dixièmes du volume total du profil du sol, par horizon.

| CODE | Charge en EG (%) |
|------|------------------|
| 0    | [0 ; 5[          |
| 1    | [5 ; 15[         |
| 2    | [15 ; 25[        |
| 3    | [25 ; 35[        |
| 4    | [35 ; 45[        |
| 5    | [45 ; 55[        |
| 6    | [55 ; 65[        |
| 7    | [65 ; 75[        |
| 8    | [75 ; 85[        |
| 9    | [85 ; 95[        |
| 10   | [95 ; 100[       |

*Nomenclature de la charge en éléments grossiers et de l'indice d'affleurement rocheux*

- Relevé de variables relatives au peuplement et de variables dendrométriques
  - a. Type de peuplement (futaie = arbre issu de graine ; taillis = arbre issu de cépées ; accrus), traces d'agriculture/pâturage, traces d'incendies, traces d'attaques biotiques.
  - b. Sur la placette, la hauteur dominante du peuplement (en m) est estimée à partir de la hauteur de l'arbre dominant le plus proche du centre, quelle que soit son espèce.
  - c. Un tour relascopique (facteur 1) permettra de se faire une idée de la composition, de la surface terrière (G) et du nombre de tiges (N) total par hectare. Pour chaque arbre comptabilisé sera noté : l'essence, le statut (**D**=dominant, **coD**=codominant, **d**=dominé), l'état de l'arbre (classe de 1 à 6) et éventuellement la cause (scolyte, etc.), la colonisation ou non par le gui.



*Nomenclature de l'état d'un arbre.*

- d. Sur 4 arbres de l'essence étudiée, vivants, dominants, les plus proches du centre de la placette : mesure du diamètre à 1,30 m. en centimètres, de la hauteur en mètres (permettra d'approcher l'âge du peuplement) ; en plus des variables précédentes, la coloration du feuillage (jaune, vert...), le nombre d'années d'aiguilles, la transparence du houppier et la mortalité de branches seront notés en observant le houppier notable (partie non soumise à la concurrence des arbres voisins). Ces deux dernières variables sont renseignées en classes.

| CODE | Classes (%) |
|------|-------------|
| 0    | <           |
| 1    | [5 ; 25[    |
| 2    | [25 ; 50[   |
| 3    | [50 ; 75[   |
| 4    | [75 ; 95[   |
| 5    | > 95        |

*Nomenclature de la transparence du houppier et de la mortalité de branches dans le houppier notable.*





## OBSERVATIONS DEPERISSEMENTS :

| Arbre n° | Dist. (m) | C <sub>1.30</sub> (cm) | H (m) | Nombre d'années d'aiguille | Transparence du houppier* | Mortalité de branches* (% du houppier notable) |
|----------|-----------|------------------------|-------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|
| 1        |           |                        |       |                            |                           |                                                |
| 2        |           |                        |       |                            |                           |                                                |
| 3        |           |                        |       |                            |                           |                                                |
| 4        |           |                        |       |                            |                           |                                                |

## RAPPEL :

| CODE | Charge en EG (%) |
|------|------------------|
| 0    | [0 ; 5[          |
| 1    | [5 ; 15[         |
| 2    | [15 ; 25[        |
| 3    | [25 ; 35[        |
| 4    | [35 ; 45[        |

|    |            |
|----|------------|
| 5  | [45 ; 55[  |
| 6  | [55 ; 65[  |
| 7  | [65 ; 75[  |
| 8  | [75 ; 85[  |
| 9  | [85 ; 95[  |
| 10 | [95 ; 100[ |

| CODE | Classes (%) |
|------|-------------|
| 0    | <           |
| 1    | [5 ; 25[    |
| 2    | [25 ; 50[   |
| 3    | [50 ; 75[   |
| 4    | [75 ; 95[   |
| 5    | >95         |



### Annexe 15 : Observations effectuées sur les placettes de Touët-sur-Var (Alpes-Maritimes) pour le *Pin sylvestre*.

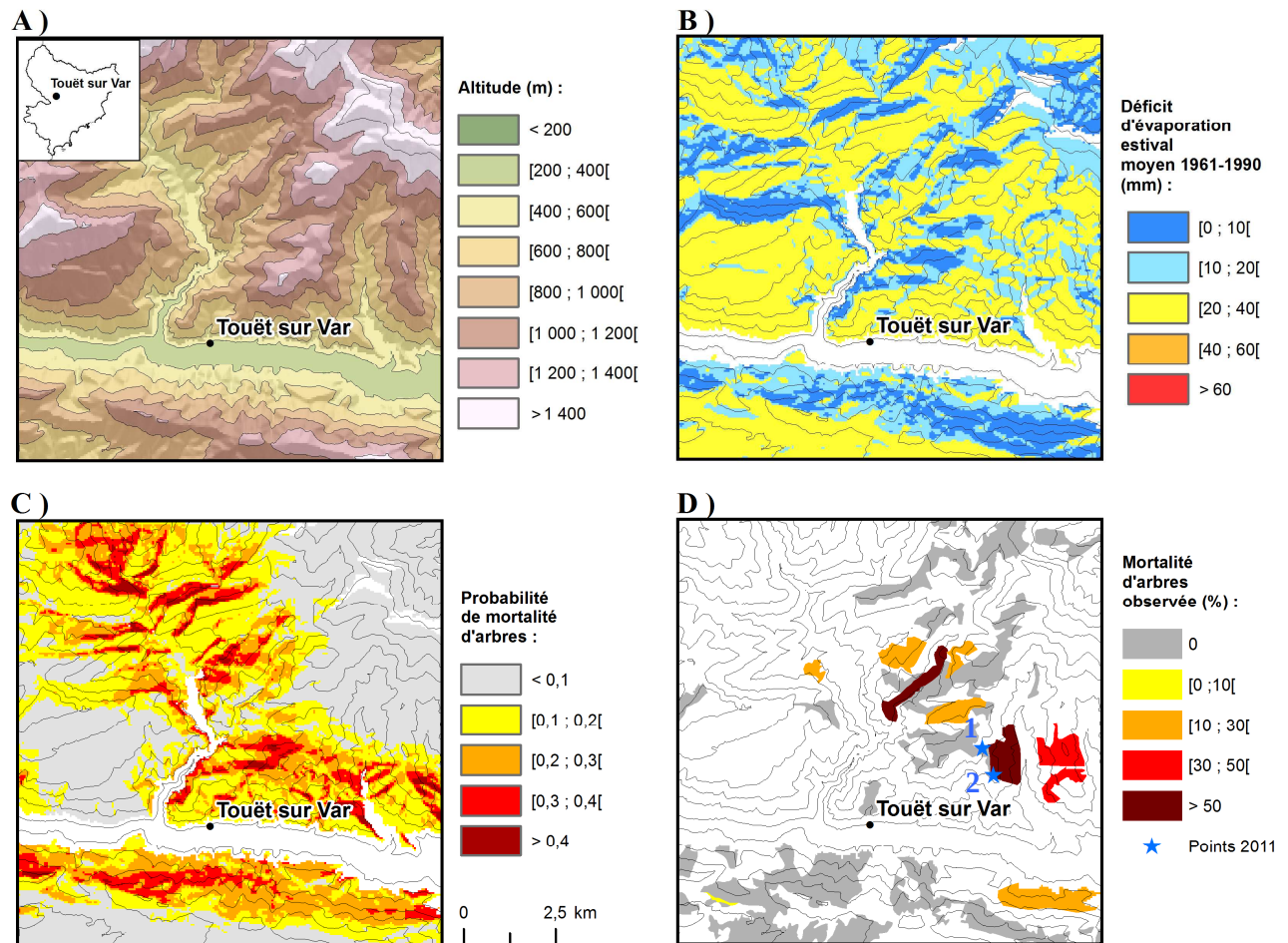


FIGURE 34 — Cartographie des taux de mortalité de *Pin sylvestre* observés en 2008 par l'ONF (D) au niveau des massifs à proximité de Touët-sur-Var (A). Le modèle de mortalité d'arbres (carte C) est comparé au déficit d'évapotranspiration estival moyen (carte B) sur la période de référence 1961-1990. Seules apparaissent les zones correspondant à l'aire de répartition potentielle de l'espèce, déterminée à partir d'un modèle de distribution potentielle (modèle LERFoB, Piedallu et al., 2009).

Des observations ont été conduites dans le département des Alpes-Maritimes à la suite du travail de modélisation (cf. § 3.5). L'objectif est de préciser l'effet de certains facteurs non disponibles à l'échelle départementale et qui constituent des variables explicatives des modèles de dépérissement à l'échelle nationale (variables caractérisant les peuplements principalement). L'exemple des observations effectuées aux environs de Touët-sur-Var concernant le *Pin sylvestre* est illustré par la figure 34.

Un premier constat est que le modèle de mortalité du *Pin sylvestre* attribue aux versants nord des probabilités élevées de dépérissement (cf. figure 34 C). Or, sur ces versants nord, les déficits d'évapotranspiration sont habituellement faibles (cf. figure 34 B). Par conséquent, ces peuplements ne sont vraisemblablement pas acclimatés à des sécheresses estivales telles que celles survenues entre 2003 et 2007 (cf. § 4.4.1.1).

À cette échelle très locale, le modèle de mortalité d'arbres ne concorde pas toujours avec la carte des observations effectuées en 2008 (*cf.* figure 34 D). La plupart du temps, les peuplements présentant des mortalités d'arbres sont effectivement situés dans des zones où la probabilité de mortalité est significative. En revanche, de nombreux peuplements sains sont dans des zones où la probabilité de mortalité est élevée.

Pour formuler des hypothèses permettant d'expliquer un meilleur état de santé réel que celui prédit, deux peuplements proches, l'un sain et l'autre dépérissant, tous deux situés dans une zone de forte probabilité de mortalité, sont comparés. La localisation de ces peuplements est indiquée sur la carte D de la figure 34, tandis que les mesures effectuées sont disponibles dans le tableau 19 ci-dessous.

Les caractéristiques dendrométriques des deux peuplements observés près de Touët-sur-Var sont quasiment identiques et tous deux présentent des symptômes faibles de dépérissement.

La forte distinction faite entre ces peuplements en 2008 par l'ONF (50 % d'arbres morts dans le peuplement dépérissant contre 0 dans le peuplement sain) n'a pas été vérifiée en 2011 lors de la phase de terrain.

Globalement, il est cependant possible d'affirmer, à la suite des observations de terrain, que les zones de forte probabilité de mortalité d'arbres correspondent à des situations où le pin présente des symptômes de dépérissement. Ces symptômes ne conduisent pas toujours à la mort des arbres. Le modèle local semble donc fiable pour indiquer les zones de vulnérabilité de l'essence à fine échelle.

| Signification                                                                                   | Variables                                                  | Identifiant du relevé |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|
|                                                                                                 |                                                            | 1                     | 2                 |
| Dépérissement<br>(Moyenne sur les 4 arbres dominants les plus proches du centre de la placette) | Nombre d'arbres morts                                      | 1                     | 0                 |
|                                                                                                 | Nombre moyen d'années d'aiguilles                          | 2,75                  | 2,5               |
|                                                                                                 | Mortalité de branches dans le houppier notable (%)         | < 5                   | < 5               |
| Station                                                                                         | Altitude (m)                                               | 1011                  | 1178              |
|                                                                                                 | Exposition (°)                                             | 45                    | 45                |
|                                                                                                 | Pente (%)                                                  | 25                    | 20                |
|                                                                                                 | RUM calculée (fosse pédologique)<br>Méthode d'Almajou (mm) | 31                    | 22,7              |
|                                                                                                 | Géologie                                                   | Calcaire argileux     | Calcaire argileux |
| Dendrométries                                                                                   | Surface terrière totale (m <sup>2</sup> )                  | 30                    | 27                |
|                                                                                                 | Hauteur moyenne (m)                                        | 14,5                  | 13,1              |
|                                                                                                 | Diamètre moyen (cm)                                        | 32,2                  | 24,6              |
| Biotique                                                                                        | Gui                                                        |                       |                   |
| Gestion                                                                                         | Pastoralisme ou agriculture passé                          | non                   | oui               |
|                                                                                                 | Gestion (souches, etc)                                     | non                   | non               |
|                                                                                                 | Distance à la piste la plus proche (m)                     | 300                   | 1000              |

TABLEAU 19 — Principales mesures dendrométriques et écologiques effectuées sur les placettes de Touët-sur-Var (Pin sylvestre).

### Annexe 16 : Observations effectuées sur les placettes de Roquebilière (Alpes-Maritimes) pour le Sapin pectiné.

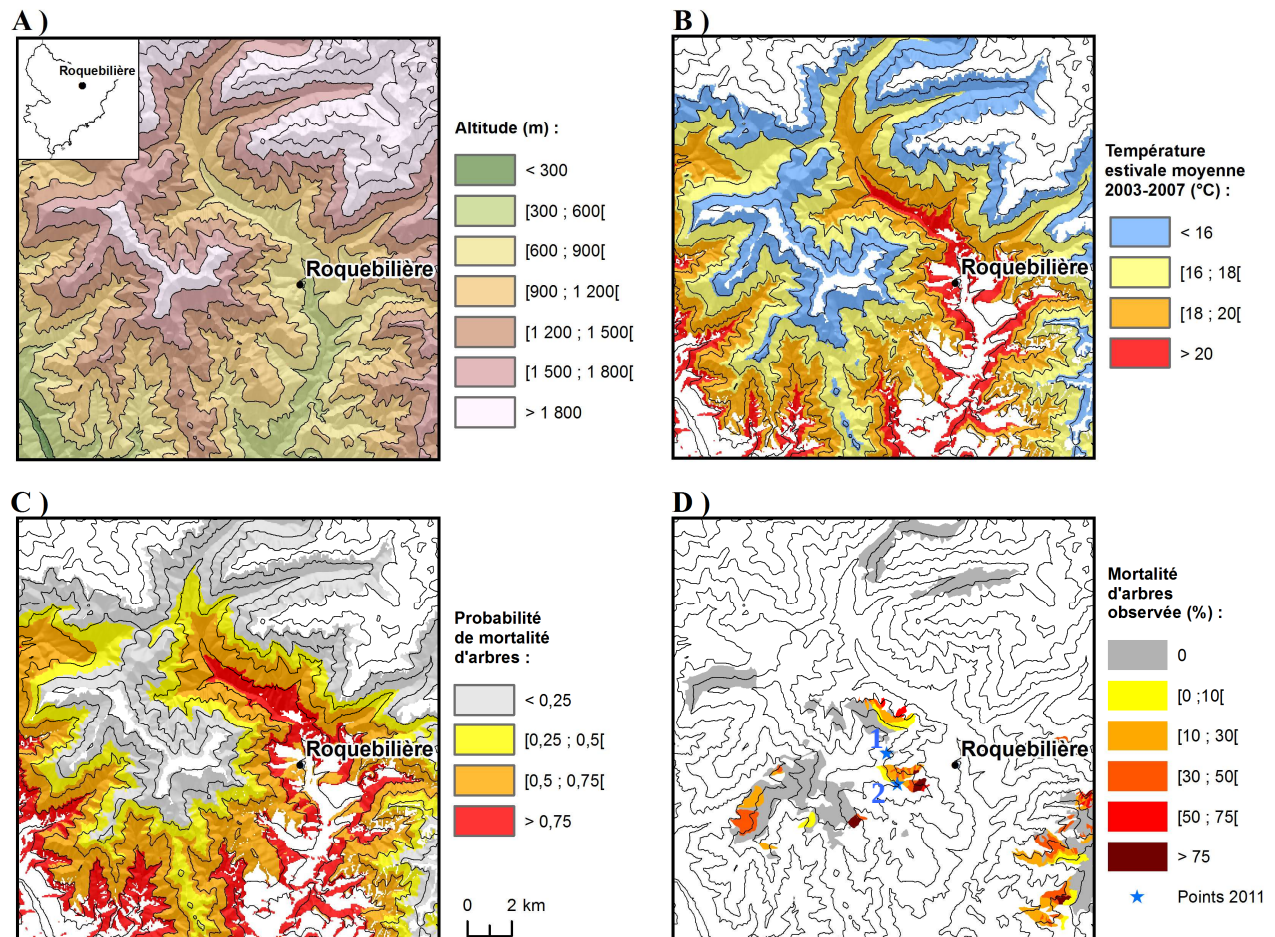


FIGURE 35 — Cartographie des taux de mortalité de Sapin pectiné observés en 2008 par l'ONF (D) au niveau des massifs à proximité de Roquebilière (A). Le modèle de mortalité (carte C) est comparé à la température estivale moyenne sur l'intervalle 2003-2007 (carte B). Seules apparaissent les zones correspondant à l'aire de répartition potentielle de l'espèce, déterminée à partir d'un modèle de distribution potentielle (modèle LERFoB, Piedallu et al., 2009).

Comme pour le Pin sylvestre, la concordance entre le modèle et les observations n'est pas parfaite. Pour formuler des hypothèses relatives à ce qui pourrait expliquer un meilleur état de santé réel que celui prédit, le même protocole que pour le pin est appliqué : deux peuplements proches, l'un sain et l'autre dépérissant, tous deux situés dans une zone de forte probabilité de mortalité sont comparés. La localisation de ces peuplements est indiquée sur la carte D de la figure 35, tandis que les mesures effectuées sont disponibles dans le tableau 20.

Les fortes probabilités de dépérissement apparaissent dans les zones de plus basse altitude où la température moyenne est la plus élevée. Les dépérissements observés concordent bien avec ces fortes probabilités, sauf dans certains cas pour lesquels il n'a pas été possible de formuler des hypothèses.

Les observations effectuées aux alentours de Roquebilière concordent bien avec le modèle de mortalité d'arbre établi. Imprécisions locales mais bonne concordance générale.

| Signification                                                                                   | Variables                                               | Identifiant du relevé |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|
|                                                                                                 |                                                         | 1                     | 2                |
| Dépérissement<br>(Observation des 4 arbres dominants les plus proches du centre de la placette) | Nombre d'arbres morts                                   | 1                     | 0                |
|                                                                                                 | Nombre moyen d'années d'aiguilles                       | 6,25                  | 5,75             |
|                                                                                                 | Mortalité de branches dans le houppier notable (%)      | 0,5                   | 0,75             |
| Station                                                                                         | Altitude (m)                                            | 1582                  | 1500             |
|                                                                                                 | Exposition (°)                                          | 0                     | 10               |
|                                                                                                 | Pente (%)                                               | 65                    | 60               |
|                                                                                                 | RUM calculée (fosse pédologique) Méthode d'Almajou (mm) | 27                    | 31               |
|                                                                                                 | Géologie                                                | Calcaire dur          | Calcaire marneux |
| Dendrométries                                                                                   | Surface terrière totale (m <sup>2</sup> )               | 34                    | 15               |
|                                                                                                 | Hauteur moyenne (m)                                     | 30,7                  | 28,9             |
|                                                                                                 | Diamètre moyen (cm)                                     | 49,9                  | 48,4             |
| Biotique                                                                                        | Gui                                                     |                       |                  |
| Gestion                                                                                         | Pastoralisme ou agriculture passé                       | non                   | non              |
|                                                                                                 | Gestion (souches, etc)                                  | non                   | oui              |
|                                                                                                 | Distance à la piste la plus proche (m)                  | 800                   | 40               |

TABLEAU 20 — Principales mesures dendrométriques et écologiques effectuées sur les placettes de Roquebilière (Sapin pectiné).

## Annexe 17 : Comparaison du pouvoir prédictif des différents indices d'évolution du climat.

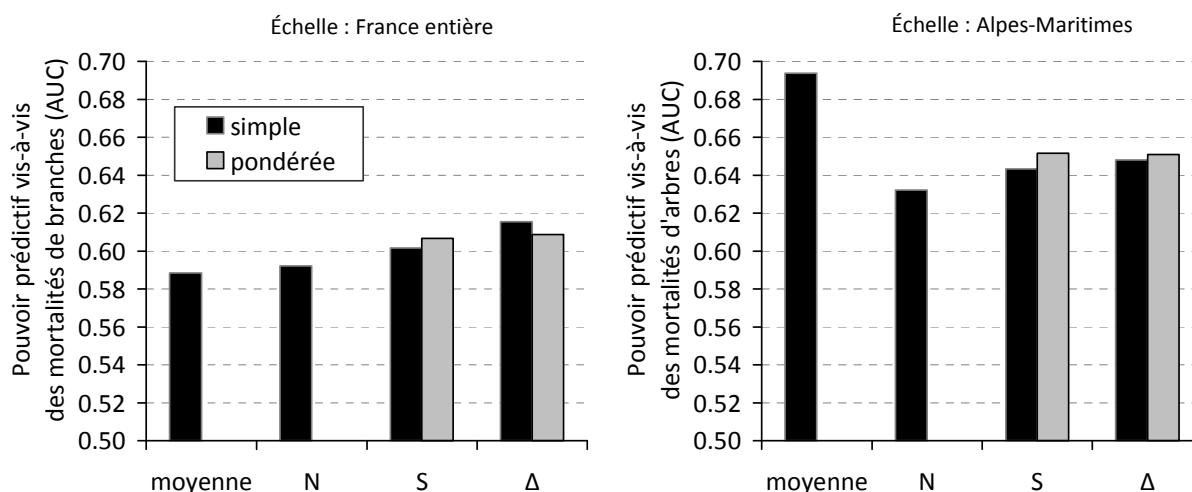


FIGURE 36 — Comparaison aux deux échelles de l'étude du pouvoir prédictif moyen (\*) des différents types d'indices d'évolution climatiques (moyenne = variables climatiques moyennes, N = nombre d'anomalies défavorables, S = somme des anomalies défavorables, Δ = anomalie moyenne annuelle).

(\*) moyenne sur les différents intervalles de l'étude (1996-2007, 2003-2007 et chaque année entre 2003 et 2007) à partir des variables climatiques (P, T, et BHC) pour les deux essences confondues.



## Annexe 18 : Comparaison du pouvoir prédictif des variables édaphiques en fonction de leur méthode de calcul.

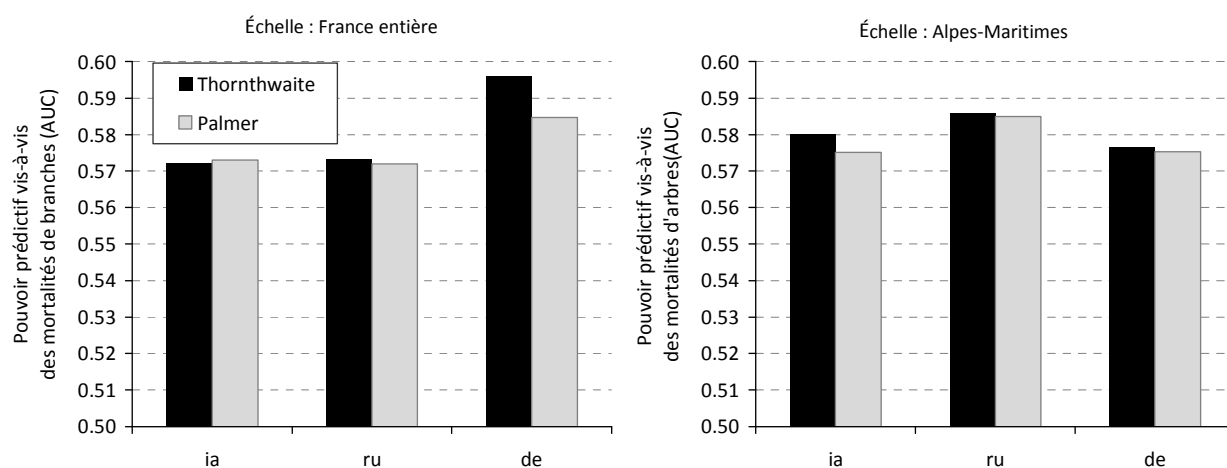


FIGURE 37 — Comparaison aux deux échelles de l'étude du pouvoir prédictif moyen (\*) des différentes variables édaphiques en fonction de la méthode de calcul (ia = indice d'aridité, ru = réserve utile, de = déficit d'évapotranspiration).

(\*) moyenne sur les différents intervalles de l'étude (1996-2007, 2003-2007 et chaque année entre 2003 et 2007) pour les deux essence confondues.







Résumé :

Le présent travail vise à déterminer les causes des dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné *via* une approche par modélisation spatiale. Deux jeux de données, différents selon l'échelle considérée, ont été retenus pour caractériser les dépérissements : la mortalité de branches relevée par l'Inventaire forestier national à l'échelle de la France et la mortalité d'arbres relevée par l'Office national des forêts à l'échelle des Alpes-Maritimes. Le lien entre ces dépérissements et les changements climatiques récents est alors principalement étudié grâce (i) à la modélisation mensuelle des variables climatiques et (ii) à l'établissement d'indices spatialisés caractérisant les évolutions du climat. Ils montrent ainsi que les dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné sont liés aux fortes sécheresses estivales survenues entre 2003 et 2007, notamment en région méditerranéenne. La réaction des peuplements a cependant fortement varié localement en fonction de l'âge et de la densité des peuplements, ainsi que des conditions écologiques locales. Enfin, ces modèles permettent de cartographier les zones à « risque de dépérissement » selon le critère de mortalité de branches à l'échelle de la France ou selon le critère de mortalité d'arbres à l'échelle des Alpes-Maritimes.