

**”Déterminisme climatique de la phénologie des forêts de feuillus et de résineux françaises à partir des données du réseau RENECOFOR :
Analyse rétrospective et prédiction des changements futures ”**



Mémoire de dominante d’approfondissement : Gestion Forestière

Crédit photo : Nathalie Petrel/ONF

**”Déterminisme climatique de la phénologie des forêts de feuillus et
de résineux françaises à partir des données du réseau RENECOFOR :
Analyse rétrospective et prédiction des changements futures ”**

Mémoire de dominante d’approfondissement : Gestion Forestière

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVES

AgroParisTech	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Déterminisme climatique de la phénologie des forêts de feuillus et de résineux françaises à partir des données du réseau RENECOFOR : Analyse rétrospective et prédiction des changements futures	Mots clés : phénologie, RENECOFOR, débourrement, jaunissement, changement climatique, feuillus, résineux, Météo-France, SAFRAN
AUTEUR(S) : Andy HENNEBELLE	Promotion : 2014-2015
Caractéristiques : ...1. Volumes ; 84.... Pages ; ...34. Figures ; ...7. Annexes ; ...0. Cartes ; bibliographie	

CADRE DU TRAVAIL		
ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Laboratoire d' Études des Ressources Forêt – Bois (LERFOB)		
Nom du responsable : François LEBOURGEOIS Fonction : Enseignant - Chercheur		
Nom du correspondant AgroParisTech : François LEBOURGEOIS		
☒ Spécialité : Gestion forestière	☐ Stage 2A ☒ Stage fin d'études Date de remise :	☐ Autre

SUITE À DONNER (réservé au Service des Etudes)
☐ Consultable et diffusable ☐ Confidentiel de façon permanente ☐ Confidentiel jusqu'au/...../..... , puis diffusable

Résumé

Résumé

L'objectif de cette étude était de mieux comprendre le déterminisme des 10 essences qui composent les peuplements du REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers (RENECOFOR). Dans un premier temps, il s'agissait d'extraire les principaux facteurs qui expliquent les différences observées dans les jours d'ouverture des bourgeons et de chute des feuilles sur la période 1997-2013. Ensuite, l'objectif était de relier ces phénophases, par plusieurs méthodes statistiques, à des variables géographiques et climatiques. Pour cette étude, les méthodes de régression multiples pas-à-pas, basée sur un critère de vraisemblance (AIC), et de forêt d'arbres aléatoires (Random Forest) ont été employées. La première méthode donne accès à des équations qui relient les variables à la phénophase, alors que la seconde crée des arbres qui sont ensuite moyennés et qui permettent de réaliser des prédictions du jour d'accomplissement de la phase phénologique étudiée. Des modèles ont ainsi été calibrés, validés et appliqués au jeu de données stationnel Météo-France, à un second issu d'un traitement statistique de spatialisation du premier jeu, par maille de 8 km : SAFRAN, et à un troisième issu de l'homogénéisation des données stationnelles sur plusieurs décennies. La seconde base de données présente l'avantage de fournir des données de variables climatiques sur toute la surface du territoire français. Mais des retenues existent quant à la qualité des prédictions que l'on est capable de réaliser principalement à l'échelle locale. Une grande partie de cette étude sera consacrée à la comparaison entre des prédictions réalisées avec ces deux bases de données. Avec l'aide des données spatialisées, les modèles les plus pertinents ont été utilisés pour réaliser des cartographies de variations passées du débourrement et du jaunissement sur la période 1961-2013 ; et sur plusieurs périodes futures, 2046-2065 et 2081-2100, en fonction de 3 modèles de changement climatique (CSIRO-MK3_0, MIROC 3_2 MEDRES et CNRM-CM3) en suivant le scénario de changement climatique A1B.

Abstract

The aim of this study was to have a better understanding of the determinism of the 10 species that compose the stands of the National Network for the long term recording of forest ecosystems (RENECOFOR). First of all, it was about extracting the main factors that explain the differences observed in the days of buds opening and leaves falling between 1997 and 2013. Then, the goal was to link those phenophases geographical and climatic variables by using several statistical methods. For this study, the one used are stepwise multiple regression based on AIC criterion and random forest. The first method gives equations between variables and the phenophases, while the second one gives trees which are averaged in order to be used to predict phenophases accomplishing days. Models have been fitted, validated and applied to Météo-France data base, another one which comes from a 8 km grid spatialisation statistical treatment called SAFRAN, and a third one which comes from homogeneity of decades long station data. The second data base gives access to climatic data in the whole french territory. But concerns still exist according to its ability to realise accurate predictions mostly at the local scale. A great part of this study was the comparison of models based on the first two data bases. The most judicious models were used to create maps of the evolutions and variations of leaf unfolding and fall during 1961-2013 and on future periods which are 2046-2065 and 2081-2100 using 3 climate change models (CSIRO-MK3_0, MIROC 3_2 MEDRES et CNRM-CM3) following the A1B scenario.

Remerciements

Je voudrais remercier François Lebourgeois pour m'avoir proposé ce stage qui a été pour moi l'opportunité d'appréhender le milieu de la recherche. Cela a été pour moi l'occasion de me confronter avec la démarche de réflexion, les exigences de rédaction et la manipulation d'outils statistiques et cartographiques. Merci pour ce projet qui a fait appel et a nécessité des compétences qui me seront profitables dans ma vie professionnelle. Et merci pour les nombreuses relectures qu'a demandé ce rapport.

Je remercie l'ensemble de l'équipe du LERFoB qui m'a accueilli. Pour leur sympathie et leur enthousiasme qu'ils communiquent lors de moments de partage.

Merci à Vincent Perez pour les bases de données, l'aide pour l'utilisation de logiciels de SIG et pour les conseils qu'il a pu me donner.

Table des matières

Table des matières	1
Table des figures	1
Liste des tableaux	3
1 Synthèse bibliographique	9
1.1 Sources d'informations	9
1.2 Les sources de données phénologiques	9
1.3 Connaissances acquises	11
1.4 Déterminisme environnemental de la phénologie	13
1.5 Conclusion	14
2 Matériels et méthodes	15
2.1 Observations phénologiques	15
2.2 Analyses statistiques	20
2.3 Modélisation du déterminisme environnemental	20
2.4 Représentation spatiale	21
2.5 Bilan d'utilisation des variables	22
3 Résultats	23
3.1 Sources de variabilité des phénomènes	23
3.2 Déterminisme environnemental de la phénologie	29
Bibliographie	65

Table des figures

2.1 Carte de répartition des 104 sites (à gauche les 53 placettes de feuillus, à droite les 51 placettes de résineux) du réseau RENECOFOR (liste des abréviations à la page 14).	15
2.2 Découpage du territoire français par région climatique.	16
2.3 Évolution des températures moyennes annuelles entre 1961 et 2013. Les segments représentent la tendance de l'évolution des températures annuelles entre 2046 et 2100, pour rendre compte des différents types de modèles utilisés. En rouge, MIROC-3-2-MEDRES ; en orange, CNRM-CM3 et en vert, CSIRO-MK3.0.	19

3.1	Plan factoriel 1-2 de l'ACP effectuée sur les dates de débourrement sur la période 1997-2013 des placettes du réseau RENECOFOR. Les ellipses de confiance à 5% ont été tracées pour les modalités des variables « essence » et « genre ».	23
3.2	Plan factoriel 1-2 de l'ACP menée sur les dates de jaunissement de la période 1997-2013 et mesurées sur les placettes du réseau RENECOFOR. Les ellipses de confiance à 5% ont été tracées pour les modalités de la variable « essence ». Les deux variétés de Chênes ont été regroupées sous la modalité « CH ».	24
3.3	Plan factoriel 1-2 de l'ACP menée sur les dates de débourrement de la période 1997-2013 pour les placettes du réseau RENECOFOR. Les ellipses de confiance à 5% ont été tracées pour les modalités des variables « classe d'altitude » et « région climatique ».	25
3.4	Influence de la classe d'altitude sur le débourrement (carte de gauche) et le jaunissement (carte de droite). Les valeurs des dates de réalisation des phénophases ont été centrées afin d'annihiler l'effet de l'essence. Le diamètre des cercles augmente en fonction de la classe d'altitude.	26
3.5	Évolution du débourrement (à gauche) et du jaunissement (à droite) entre 1997-2013 des essences du réseau RENECOFOR. La moyenne est représentée par le trait noir et l'écart-type par le surface colorée.	28
3.6	Régressions linéaires et graphiques des résidus de la comparaison des modèles de calibration des dates de débourrement et de jaunissement sur le réseau RENECOFOR entre 1997 et 2013 basés sur les jeux de données MF et SAFRAN.	31
3.7	Classification par importance décroissante des variables dans la détermination du débourrement et du jaunissement entre 1997 et 2013 obtenue grâce à la méthode des Random Forest en prenant en compte toutes les observations du réseau RENECOFOR et en prenant en compte toutes les variables.	32
3.8	Classement des variables climatiques qui déterminent les dates de débourrement des 10 essences du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.	32
3.9	Résultat de régression linéaire entre les dates de débourrement prédites par un modèles calibré sur des variables géographiques et climatiques (1) et un modèle calibré uniquement à l'aide de variables climatiques (3) sur la période 1997-2013.	33
3.10	Classification descendante de l'importance des variables dans la détermination du débourrement pour les Chênes et pour le Hêtre entre 1997 et 2013 obtenue grâce à la méthode des Random Forest en prenant en compte toutes les observations du réseau RENECOFOR et en prenant en compte toutes les variables.	35
3.11	Comparaison des dates de débourrement prédites par un modèles spécifique (en abscisse) et des dates prédites par un modèle global appliqué à une essence (en ordonnées). Application aux Chênes(diagramme de gauche) et aux Hêtres (diagramme de droite).	36
3.12	Comparaison des dates de jaunissement prédites par un modèles spécifique (en abscisse) et des dates prédites par un modèle global appliqué à une essence (en ordonnées). Application aux Chênes et aux Hêtres.	36
3.13	Classement des variables par importance ordre décroissant d'importance dans la détermination des jours de débourrement de deux essences résineuses du réseau RENECOFOR entre 1997 et 2013 : l'Épicéa et le Sapin.	37
3.14	Classement des variables du jeu de données SAFRAN en fonction de leur importance dans la détermination du jour de débourrement et de jaunissement des essences du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.	40
3.15	Classement des variables des modèles spécifiques SAFRAN pour la prédiction des jours de débourrement et de jaunissement des Chênes et du Hêtre sur la période 1997-2013.	41
3.16	Classement des variables des modèles spécifiques SAFRAN pour la prédiction des jours de débourrement et de jaunissement des Chênes et du Hêtre sur la période 1997-2013.	42
3.17	Comparaisons graphiques (régression linéaires et résidus) entre, à gauche, les modèles 3 et 7, et à droite, les modèles 5 et 7.	44
3.18	Comparaisons graphiques (régression linéaires et résidus) entre les modèles basés sur 10 variables et calibrés sur les jeux de données Météo-France (modèle 4) et SAFRAN (modèle 8) pour la prédiction des dates de débourrement et de jaunissement des 10 essences forestières du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.	45

3.19	Classement des variables du jeu de données SAFRAN en fonction de leur importance dans la détermination du jour de débourrement et de jaunissement des essences du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013 en suivant les modèles (9) et (10).	46
3.20	Classement des variables du jeu de données SAFRAN en fonction de leur importance dans la détermination du jour de débourrement et de jaunissement des essences du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013 en suivant les modèles (11) et (12).	47
3.21	Reconstitution de l'évolution du jour moyen de débourrement pour les 10 essences étudiées jusqu'en 2013 à l'aide des données des stations Météo-France. La ligne en pointillé correspond à l'année 1997 (début des relevés phénologiques sur le réseau RENECOFOR).	48
3.22	Reconstitution de l'évolution du jour moyen de jaunissement pour les essences décidues étudiées jusqu'en 2013 à l'aide des données des stations Météo-France. La ligne en pointillé correspond à l'année 1997 (début des relevés phénologiques sur le réseau RENECOFOR).	48
3.23	Évolution du débourrement des Chênes et du Hêtre entre 1961 et 2010, avec un pas de temps de 10 ans.	50
3.24	Évolution du jaunissement des Chênes et du Hêtre entre 1961 et 2010, avec un pas de temps de 10 ans.	51
3.25	Moyennes des prédictions des jours de débourrement des Chênes et du Hêtre entre 1961 et 2010, avec un pas de temps de 10 ans en suivant des modèles spécifiques (12).	52
3.26	Moyennes des prédictions des jours de jaunissement des Chênes et du Hêtre entre 1961 et 2010, avec un pas de temps de 10 ans en suivant des modèles spécifiques (12).	53
3.27	Reconstitution de l'évolution du jour moyen de débourrement et de jaunissement pour les Chênes (CH) et le Hêtre (HET) avec les données homogénéisées des stations du Nord de la France en suivant un gradient Ouest-Est (de la gauche vers la droite). La ligne en pointillé correspond à l'année 1997 (début des relevés phénologiques sur le réseau RENECOFOR).	55
3.28	Prédiction de l'évolution du débourrement des Chênes entre 2046-2065 et 2081-2100 en fonction de trois modèles de changement climatique en suivant le scénario A1B	57
3.29	Prédiction de l'évolution du débourrement du Hêtre entre 2046-2065 et 2081-2100 en fonction de trois modèles de changement climatique en suivant le scénario A1B	58
3.30	Prédiction de l'évolution du jaunissement des Chênes entre 2046-2065 et 2081-2100 en fonction de trois modèles de changement climatique en suivant le scénario A1B	59
3.31	Prédiction de l'évolution du jaunissement du Hêtre entre 2046-2065 et 2081-2100 en fonction de trois modèles de changement climatique en suivant le scénario A1B	60
3.32	Graphiques d'évolution du jour de débourrement en fonction des variables géographiques.	61
3.33	Bilan de comparaison de la variance expliquée des modèles créés lors de cette études. Classement en fonction du type de modèles (basé sur les variables d'entrée), de la base de données utilisée et de la phénophase prédite.	63

Liste des tableaux

2.1	Répartition des placettes dans les différentes classes d'altitude (en mètre) définies par le protocole du réseau RENECOFOR avec précision du nombre de placettes pour chaque classe.	16
2.2	Répartition par essence des données phénologiques de débourrement, de jaunissement et de longueur de sa saison de végétation disponibles sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR. . . .	17
2.3	Liste des stations qui constituent la base de données homogénéisées climatique de Météo-France. .	18
3.1	Valeurs moyennes de débourrement, jaunissement et longueur de saison de végétations exprimées en « jour-julien » pour les 10 essences du réseau RENECOFOR entre 1997 et 2013. Les données ont été triées sur la date de débourrement.	24

3.2	Moyenne par genre et par région des phénophases sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR. Pour chaque région climatique, il y a une distinction par genre (feuillus/résineux). Les moyennes de débourrement et de jaunissement sont données en jours juliens, les moyennes de longueur de saison de végétation en jours.	26
3.3	Évolution des phénophases en fonction de la classe d'altitude sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR. Les moyennes ont été calculées par genre et sont exprimées en jours juliens. . . .	27
3.4	Tableau des tendances d'évolution des phénophases pour les 10 essences du réseau RENECOFOR suivies entre 1997 et 2013.	28
3.5	Dates moyennes des phases phénologiques entre la strate supérieure (D) et le sous-étage (S), (entre parenthèses, le nombre d'observations) sur la période 1997-2013.	29
3.6	Récapitulatif des variables présentes lors de la calibration des modèles utilisés dans cette étude. La présence d'une variable dans un modèle est symbolisée par le « x ». La méthode utilisée est la régression pas-à-pas.	30
3.7	Synthèse des performances des modèles de calibration du débourrement ou du jaunissement créés à l'aide de la méthode de régression pas-à-pas sur les bases de données climatiques Météo-France (MF) et SAFRAN sur la totalité ou un sous-ensemble des placettes du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.	30
3.8	Récapitulatif des variables présentes lors de la calibration des modèles utilisés dans cette étude. La présence d'une variable dans un modèle est symbolisée par le « x ». LA méthode utilisée est le Random Forest	31
3.9	Comparaison entre modèles de prédiction des dates de débourrement et de jaunissement calibrés à l'aide de variables géographiques et climatiques (1) et entre modèles uniquement basés sur des variables climatiques (3).	33
3.10	Comparaison entre modèles de prédiction des dates de débourrement et de jaunissement calibrés à l'aide de toutes les variables climatiques (3) et entre modèles calibrés sur les 10 premières variables climatiques (4).	34
3.11	Comparaison des modèles spécifiques (2) et du modèle global (1) appliqué à une essence pour la prédiction du débourrement et du jaunissement.	35
3.12	Comparaison des modèles spécifiques (2) et du modèle global (1) appliqué à chacune des essences pour la prédiction du jaunissement entre 1997 et 2013 sur le réseau RENECOFOR.	37
3.13	Comparaison des modèles spécifiques (2) et du modèle climatique (3) appliqué à une essence pour la prédiction du débourrement et du jaunissement.	38
3.14	Comparaison des modèles spécifiques (2) et du modèle climatique (3) appliqué à chacune des essences pour la prédiction du jaunissement entre 1997 et 2013 sur le réseau RENECOFOR. . . .	38
3.15	Récapitulatif des variables présentes lors de la calibration des modèles utilisés dans cette étude. La présence d'une variable dans un modèle est symbolisée par le « x ». LA méthode utilisée est le Random Forest	39
3.16	Comparaison des dates de débourrement et de jaunissement prédites par le modèle global calibré sur les données du réseau Météo-France (1) et le modèle global calibré sur les données SAFRAN (5).	40
3.17	Comparaison des modèles spécifiques fondés sur la base de données SAFRAN (6) et Météo-France (2) pour la prédiction des jours de débourrement et de jaunissement de deux essences feuillues sur la période 1997-2013.	41
3.18	Comparaison des modèles spécifiques fondés sur la base de données SAFRAN et Météo-France pour la prédiction des jours de débourrement de deux essences résineuses sur la période 1997-2013.	42
3.19	Comparaison des dates de débourrement et de jaunissement prédites par un modèle climatique calibré sur les données SAFRAN (7) comparées aux prédictions du modèle global fondé sur les données SAFRAN (5) et le modèle global calibré sur les données Météo-France (3) tous deux fondés sur des variables climatiques.	43
3.20	Comparaisons entre le modèle global (5) fondé sur les données SAFRAN et le modèle qui ne prend en compte que les dix premières variables (8). Ce modèle est ensuite comparé avec le modèle dix variables fondé sur le jeu de données Météo-France (4).	44
3.21	Comparaison des dates de débourrement et de jaunissement prédites par le modèle climatique calibré sur les données SAFRAN (7) et le modèle calibré sur les 10 premières variables climatiques (9). . .	45

3.22	Comparaison des modèles calibrés à l'aide de l'ensemble des variables climatiques et géographiques (5) avec un modèle similaire qui comprennent la variable de pression de vapeur d'eau (9) et un modèle qui comprend en plus la variable de radiation (10).	46
3.23	Comparaison entre les modèles basés sur l'ensemble de variables climatiques (7), qui comprend les mêmes variables climatiques et le vpd (11) et un modèle qui comprend en plus la variable de rad (12).	47
3.24	Tendances d'évolution des phénophases pour les 10 essences du réseau RENECOFOR sur la période 1961-2013.	49
3.25	Tendances d'évolution des jours moyens de débourrement et de jaunissement des Chênes et du Hêtre sur la période 1961-2013 pour les 13 stations de la base de données homogénéisées	55
3.26	Comparaison entre les dates de débourrement et de jaunissement prédites à l'aide des données SAFRAN et de la base de données homogénéisées pour les Chênes et les Hêtres entre 1961 et 2013.	56
3.27	Comparaison entre les modèles calibrés (présentés entre parenthèses) sur la période 1997-2006 et les modèles calibrés sur la période 1997-2013.	62
.28	Évolution des phénophases en fonction de la région climatique sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR.	70
.29	Évolution des phénophases en fonction de la classe d'altitude sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR.	71
.30	Modèles phénologiques de débourrement et de jaunissement obtenus par méthode de régression progressive et calibrés sur l'ensemble ou des sous-ensembles de la base de données du réseau RENECOFOR de la période 1997-2013.	72
.31	Modèles phénologiques de débourrement et de jaunissement obtenus par méthode de régression progressive et calibrés sur l'ensemble ou des sous-ensembles de la base de données du réseau RENECOFOR de la période 1997-2013.	73
.32	Gamme de valeurs des variables climatiques de la base de données Météo-France relative aux stations du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.	74
.33	Gamme de valeurs des variables climatiques thermiques de la base de données Météo-France issues d'un traitement SAFRAN relative aux stations du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013. Le numéro qui suit le code de la variable correspond au mois de l'année.	75
.34	Gamme de valeurs des variables climatiques précipitationnelles de la base de données Météo-France issues d'un traitement SAFRAN relative aux stations du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013. Le numéro qui suit le code de la variable correspond au mois de l'année.	76
.35	Récapitulatif des variables présentes lors de la calibration des modèles utilisés dans cette étude. La présence d'une variable dans un modèle est symbolisée par le « x ».	77

Introduction

Chez les plantes, le cours d'une année est marqué par la succession de processus biologiques qui se traduisent par des modifications morphologiques aisément visibles comme l'ouverture des bourgeons (débourrement), l'éclosion des fleurs (floraison) ou encore le jaunissement et la chute des feuilles (sénescence). La phénologie est la discipline qui s'intéresse à la réalisation de ces phases, ou « phénophases », tant au niveau de leur initialisation, des modalités de déroulement, de la transition avec la phase suivante qu'à celui de la dépendance de ces phénomènes aux conditions environnementales ([12, 11]).

Divers facteurs environnementaux agissent, de manière positive ou négative, sur la réalisation des phénophases ou leur succession dans le temps [9]. Ces facteurs sont biotiques (insectes, pathogènes...) ou abiotiques (température, précipitations, photopériode) ([8] ; [65]).

La forte dépendance des phases aux conditions environnementales fait de la phénologie un bon indicateur de changement climatique. Au travers de ces phases, on peut étudier la réponse des organismes face aux conditions du milieu ([67]). Dans cette étude, l'évolution de la période de réalisation de phénophases telles que le retour des oiseaux migrateurs, la ponte des œufs de certaines espèces d'amphibiens et le débourrement de 13 essences forestières ont été observées sur la période 1950-2000. Les résultats montrent des variations inter-annuelles dans le jour moyen de l'accomplissement de ces phases phénologiques corrélées avec la moyenne des températures printanières. Dans le cas particulier des espèces ligneuses, une augmentation des températures se solde par une précocité du débourrement et une tardiveté de la sénescence ([35] ; [37] ; [39] ; [40] ; [50]). De sorte que la phénologie des plantes a été proposée par l'Agence Européenne pour l'Environnement et le Panel Intergouvernemental sur le Changement Climatique comme indicateur de changement climatique [24].

Malgré le nombre important de travaux qui ont déjà été réalisés depuis les années 2000, certaines interrogations persistent :

Quelles sont les conditions climatiques dont sont tributaires les phénophases ? Comment celles-ci déterminent la réalisation d'une phase et dans quelles proportions ? On est aussi en droit de se demander, dans un milieu en constante évolution et d'autant plus aujourd'hui avec le changement climatique amorcé, quelles ont été les conséquences de ces modifications sur le comportement des organismes vivants, et notamment des espèces arborées, actuels ? Comment va se traduire la poursuite de ces modifications environnementales ?

Cette étude sera construite suivant une approche phénoménologique, c'est-à-dire que les événements phénologiques seront reliés à des variables climatiques et stationnelles par des relations corrélatives. Les premières analyses traitent de l'effet de l'espèce sur le débourrement ainsi que de l'évolution de ce phénomène sur la période 1997-2013. L'utilisation d'ACP sur la base de données Météo France permettra de qualifier l'importance de la variable « essence » sur les phases phénologiques. Ensuite seront établies les premières relations entre les données géographiques relatives aux placettes du réseau RENECOFOR et les variables phénologiques de débourrement, jaunissement et de longueur de saison de végétation.

Il s'agira par la suite de quantifier ces relations grâce à des approches de modélisations statistiques dont le but est de montrer l'importance des variables géographiques et climatiques dans la détermination des jours de réalisation des phénophases. Deux types de modélisations seront utilisés, la modélisation pas-à-pas et la théorie des arbres aléatoires. Cette dernière sera retenue par la suite et sera notamment appliquée à des bases de données SAFRAN. Les résultats seront comparés à ceux obtenus grâce à la base de données Météo-France pour observer d'éventuelles dérives des modèles provoquées par les données SAFRAN. La base homogénéisée qui couvre des périodes passées variables de 13 stations vont permettre d'avoir un aperçu de l'évolution des phénophases sous l'influence climatique. Ces stations sont réparties dans la Nord de la France en suivant un gradient Ouest-Est et ne seront donc utilisées que pour l'établissement de modèles spécifiques aux Chênes et au Hêtre dont la zone de répartition est surtout concentrée dans cette zone de la France.

Ces tendances seront comparées avec les modélisations suivant les données SAFRAN qui couvrent la période 1961-2013 pour là encore observer d'éventuelles réductions des performances des modèles liées à l'utilisation de données spatialisées.

Pour évaluer les conséquences du changement climatique, les tendances observées sur la période 1997-2013 seront comparées avec les tendances prédites sur la période passée (1961-2013) et futures (2046-2065 et 2081-2100).

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

1.1 Sources d'informations

La prise d'informations s'est basée sur plusieurs supports (papier ou numérique). Les articles étaient compilés dans une base de données bibliographique numérique « EndNote » dans laquelle des recherches par mots clés ont été effectuées pour sélectionner les articles les plus pertinents. Cette base de données a ensuite été complétée et actualisée à l'aide de la ressource en ligne « Web of Knowledge » en fonction des mots clés suivants : « phénologie », « changement climatique », « déploiement des feuilles », « débourrement », « jaunissement », « sénescence », « chute des feuilles », « durée de croissance » « corrélation », « déterminisme climatique », « précocité ».

1.2 Les sources de données phénologiques

2.2.1 Données satellitales

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sont 2 satellites lancés par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) qui orbitent autour de la Terre du pôle Nord au pôle Sud en passant par l'équateur. Ils couvrent la surface de la Terre en 1 à 2 jours et réalisent des prises de données dans plusieurs bandes spectrales avec une résolution spatiale de 1 km. Les longueurs d'ondes utilisées pour étudier la biomasse photosynthétique sont comprises dans le spectre visible et l'infra-rouge [64]. Dans certaines études, une résolution du NDVI de 250 m a été utilisée [58]. L'information enregistrée est donc la lumière renvoyée par le couvert végétal ou réflectance de la végétation. D'autres satellites appelés AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) détenus par le NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) mesurent des variables similaires en ayant la même fréquence de passage que les satellites MODIS et avec une résolution spatiale de 1,1 km.

Les valeurs obtenues pour cette bande multi-spectrale sont compilées en une seule : l'indice spectral de végétation (ISV). Cet indice intervient dans le calcul du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) plus fréquemment utilisé en phénologie car il est plus sensible aux faibles variations de réflectance de la canopée ([58]) mais peut aussi être mesuré par des stations placées au sol [57]).

La présence de nuage au dessus d'un massif peut cependant rendre inexploitable les données de réflectance et ainsi introduire du « bruit » dans les résultats [58]. De plus, cette méthode étant plutôt récente, les séries de données sont donc courtes et ne permettent pas de mettre en évidence des changements sur le long-terme. Elle a néanmoins l'avantage de pouvoir fournir des données sur des zones difficilement accessibles [64].

Bien que l'utilisation de ce type de données soit de plus en plus courante, la résolution temporelle et la précision spatiale restent limitées. Elles ne permettent pas l'analyse d'un phénomène précis mais bien d'une multitude d'événements simultanés, « le bruit » est donc important [55].

2.2.2 Réseaux de suivi phénologique

2.2.2.1 International Phenology Garden (IPG)

Il a été fondé en 1957 par Schnelle et Volkert dans le but d'appliquer un même protocole d'observation phénologique à une large échelle. Il comprend, depuis 2010, 89 jardins répartis dans 19 pays européens. Ce réseau s'étend de la Scandinavie à la Macédoine (28 latitudes) et du Portugal à la Macédoine (37 longitudes). Les observations portent sur des clones de 23 espèces (arbres et arbustes) plantés dans tous les jardins du réseau. Les emplacements de ces jardins sont choisis de manière à être les plus homogènes possibles. Ainsi, le jardin se caractérise par une surface plane, entourée de prairies ou près et avec quelques arbres. Les densités de plantation sont elles aussi détaillées pour chaque espèce. Ce protocole conduit donc à des observations à grande échelle normalisées en matière d'adaptation phénologique des essences au milieu. La base de données comprend donc quelques 65 000 observations qui s'étendent de 1959 à aujourd'hui ce qui permet l'observation des effets du changement climatique ([39] ; [50]).

2.2.2.2 Royal Botanic Garden Edinburgh (RBGE)

La mise en place de ce suivi a eu lieu en 1850, il s'agissait à l'origine de noter la date de floraison de plus de 60 espèces. Depuis 2002, les observations portent sur la fréquence, la durée de floraison et les modifications de feuillage comme la coloration ou la chute et ce sur plus de 100 espèces. Au sein de ce jardin, plusieurs sites répondant aux exigences de l'IPG sont en train d'être mis en place (<http://www.rbge.org.uk/science/plants-and-climate-change/phenology-projects>).

2.2.2.3 RENECOFOR

En 1992, le Réseau National de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR) a été créé par l'Office National des Forêts (ONF) dans le but de disposer d'un « état des lieux » de la forêt française et d'étudier son évolution sur au moins 30 ans [61]. Ce réseau comprend 104 placettes (102 sur le territoire national et 2 au Luxembourg) chacune d'une surface de 0,5 ha. Des relevés phénologiques ont débuté en 1997 sur les 10 principales essences forestières de production [33]. Actuellement, c'est le seul réseau forestier couvrant toute la variabilité climatique du territoire national. Il s'étend sur 4 régions climatiques marquées par une dominante océanique sur les côtes Ouest et Nord, continentale au centre, Méditerranéenne au Sud et montagnarde au niveau des reliefs. Ce sont essentiellement des futaies régulières mono-spécifiques adultes d'âges compris entre 60 et 120 ans.

2.2.2.4 Réseaux participatifs

« Phenoclim » est un programme scientifique et pédagogique d'observation phénologique en zone de montagnes mis en place en 2004 par le CREA (Centre de Recherches sur les Écosystèmes d'Altitude). Un partenariat existe entre ce programme et l'ODS (Observatoire des Saisons) lancé en 2008 par le GDR, un Groupe de Recherche du CNRS et qui lui est spécifique aux zones de plaines. Le GDR est un réseau qui fédère 33 équipes de recherche et techniques de 21 structures différentes (<http://www.gdr2968.cnrs.fr/spip.php?rubrique2>).

L'ONF a suivi entre 1880 et 1932 le débourrement de 80 essences dans leurs conditions naturelles sur un nombre de sites compris entre 1 et 65 en fonction des essences.

Il existe également, le programme Phénoflore créé en 2000 par le Muséum National d'Histoire Naturelle qui note la date de floraison de plus de 400 espèces en plantations ornementales. Il met à disposition des données compilées sous forme d'un calendrier de floraison pour la région parisienne.

En 1880, le réseau Météo-France a débuté l'observation de la feuillaison, la floraison, la maturation et la coloration des feuilles de 180 essences dans une centaine de peuplements, et ce jusqu'en 1950 dans tous les départements. Aujourd'hui, un seul département continue de réaliser ces observations.

2.2.2.5 Individus isolés

Il est possible de trouver des séries phénologiques très longues mais sur des individus isolés. Depuis 1808 à Genève en Suisse, le jour d'éclosion de la première feuille des Marronniers communs (*Aesculus hippocastanum*) plantés sur la promenade de Treille est noté. En 1816, l'éclosion avait été observée le 23 avril alors qu'en 2002 il a été observé dès le 29 décembre [51]. A Liestal, depuis 1894, c'est la date de floraison d'un Cerisier commun (*Prunus cerasus*) qui est notée. Dans les deux cas, une tendance à la précocité de ces phénophases s'observe, à partir de 1900 pour les Marronniers et de 1990 pour le Cerisier (<http://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/actuel/phenologie-et-pollen/longues-series-d-observations-phenologiques.html>). Des données phénologiques relatives à la floraison des Cerisiers (*Prunus Jamasakura*) sont aussi relevées à Kyoto au Japon et ce depuis le IX^e siècle [2].

Depuis 1370, en Bourgogne, les dates de vendanges sont recueillies. Ces séries permettent de montrer l'influence qu'a le climat annuel sur la maturation des grappes et donc sur la date de récolte [18].

Entre 1736 et 1947 les membres de la famille Marsham ont relevé 27 événements phénologiques liés au printemps sur 20 espèces de plantes et d'animaux dans le comté du Norfolk en Angleterre [59]. Des observations de floraison de près de 200 espèces en plantation ornementale ont été réalisées dans les parcs Saint-Maur (1875-1947) et de Versailles (1884-1950).

1.3 Connaissances acquises

2.3.1 Variabilité spatiale et spécifique

En 2008, Soudani a utilisé des données issues des peuplements de Chênes sessiles, pédonculés et mixtes du réseau RENECOFOR entre 2000 et 2004 en parallèle de données satellitales de NDVI à une résolution de 250 m dans l'objectif de suivre l'évolution du NDVI au cours du temps. Cette évolution est de type sigmoïde, la phase de transition montre une diminution de la réflectance du couvert dans le rouge et infrarouge proche. Ceci témoigne du verdissement de la canopée. Les résultats montrent, après ajustement du NDVI, une erreur de prédiction de 11,5 jours pour l'atteinte du seuil de 10% et de 8,5 jours avec le seuil de 90%. Les observations menées sur le terrain présentent une erreur de 8,5 jours avec un biais de 3,5 jours. De cette manière, la zone d'inflexion de la courbe de NDVI est un bon indicateur de verdissement des peuplements décidus [58].

À plus grande échelle, ce même indice permet de visualiser la reprise de l'activité photosynthétique [45]. En effet, dans les zones tempérées, partie du globe située au delà de la latitude 32° Nord où le cycle annuel de plantes (alternance entre feuillaison et chute des feuilles) est marqué, la variation de cet indice est prononcée. Dans cette étude, un parallèle est fait entre une augmentation de température entre 1961 et 1990, et un accroissement en pourcentage du NDVI sur les zones au Nord de la latitude 50° traduisant une augmentation de l'activité photosynthétique sur la période 1982-1990. Ceci laisse supposer que dans les zones où le front de neige se retire plus tôt, la reprise de l'activité végétative est plus précoce.

En analysant les données issues du réseau IPG sur la période 1961-1998, [50] a mis en évidence l'effet de plusieurs variables géographiques sur le déclenchement des phases phénologiques de printemps telles que le débourrement et des phases d'automne comme par exemple pour le jaunissement. Le début de la phase de feuillaison est considéré comme étant la moyenne du jour de débourrement de 4 essences. De la même manière, la fin de saison de végétation est obtenue en moyennant le jour de chute des feuilles des 4 essences donc 3 sont communes avec le calcul précédent. La différence entre les deux valeurs définit la longueur de saison de végétation. Pour le débourrement, il a été observé un décalage longitudinal d'Ouest en Est de 0,5 jour par 100 km, et de 0,2 jour d'Est en Ouest pour la chute des feuilles soit un allongement de la saison de végétation de 0,7 jour d'Ouest en Est. En moyenne, le débourrement suit une progression de 2,3 jours par 100 km du Sud vers le Nord, alors que la chute des feuilles débute au Nord et s'achève dans les régions plus au Sud à raison de 0,1 jour par 100 km soit un gradient de longueur de saison de végétation de 2,4 jours par tranche de 100 km allant du Sud vers le Nord. Ces travaux ont aussi mis en évidence un effet de l'altitude à raison d'un retard de 3,1 jours par tranche de 100 m sur l'initialisation des phénophases, et d'une avancée de 1 jour suivant une élévation similaire pour la chute des feuilles. De cette manière, la longueur de saison de végétation diminue de 4,1 tous les 100 m d'altitude. Globalement, les phases d'automne ne présentent qu'une légère dépendance aux variables géographiques (latitude, longitude, altitude), montrant ainsi l'influence d'autres facteurs.

A plus petite échelle comme en Slovénie, en complétant les analyses de données satellitales par des relevés au sol portant sur quelques arbres, Vilhar a mis en évidence une précocité du débourrement et une tardiveté de la sénescence menant à un allongement de saisons de végétation sur la période 2004-2011 [64].

En France, les analyses des données du réseau RENECOFOR prises entre 1997 et 2006 ont permis de révéler plusieurs faits. Sur l'ensemble du réseau, le débourrement s'est échelonné entre le 12 mars et le 30 juin. La variabilité relative est importante du fait de la diversité des essences prise en compte. L'observation des feuillus a montré un allongement de saison végétative de 12 jours pour une augmentation de 1,2°C [15].

Pour les chênaies, le débourrement commence en moyenne vers la mi-avril et dure environ 12 jours. Des différences s'observent au sein de cette essence, le débourrement et le jaunissement du Chêne Sessile sont plus précoces que chez le Chêne Pédonculé [14].

Le jaunissement du Hêtre s'est déroulé en moyenne 8 jours plus tôt que pour le Chêne [13]. Ces essences présentent respectivement un retard de 3,3 et 2,2 jours par degré d'accroissement de température. Pour les hêtraies, autre peuplement majoritaire de réseau, le débourrement débute aux alentours de la 3^e semaine d'avril et s'étend sur 9 jours. Le débourrement des résineux s'amorce début mai et dure en moyenne 10 jours. Les chênaies présentent une répartition longitudinale suffisante pour mettre en évidence un décalage de 2 jours par degré de longitude. L'altitude des placettes de conifères est très variable ce qui entraîne un décalage dans le débourrement. Celui-ci est retardé d'environ 1,5 jour par 100 m. Malgré cela, les variabilités entre années, les écarts au sein d'un peuplement et la durée du débourrement sont comparables quelque soit le genre considéré. Sur le réseau, l'initialisation du jaunissement pour le Hêtre et le Chêne a lieu lors de la seconde moitié du mois d'octobre et présente une variabilité inter-annuelle moyenne de 15 jours et varie également selon la localisation géographique. Par conséquent, la longueur de la saison de végétation est plus courte à l'Est (< 200 jours) [36].

2.3.2 Tendances actuelles et passées

Schwartz a étudié des relevés phénologiques sur 193 stations réparties sur le territoire Nord Est des États-Unis, sur la période 1961-1994. Les essences sélectionnées sont naturellement présentes dans ces régions et comprennent notamment 3 variétés de Chênes (*Quercus velutina* Lam., *Quercus macrocarpa* Michx., *Quercus alba* L.). Ainsi des modèles de réponse basés sur l'accumulation de froid ou « chilling » ont été élaborés à l'aide de ces données phénologiques et de données climatiques de températures (minimum, maximum), de précipitation, de chutes de neige et de quantité de neige au sol [56]. Il a pu reconstituer les changements dans le phénomène de verdissement de la partie Est des États-Unis sur la période 1900-1995. Il a mis en évidence une connexion entre les données satellitales avec celles issues du réseau de suivi phénologique. Les analyses satellitales montrent, sur la période 1981-1991, une précocité de débourrement de 8 ± 3 jours alors que les données issues du réseau de suivi phénologique montrent sur la période 1980-1990 une précocité de 10 jours [55].

Au sein de l'IPG, les analyses des données remontant jusqu'au début des années 1960 montrent une avancée moyenne de 0,20 jour par an soit 6 jours tous les 30 ans du débourrement, et un recul de la fin de saison de végétation de 0,16 jour par an soit 4,8 jours tous les 30 ans. Au final, s'observe un allongement de la saison de végétation de 10,8 jours sur une période de 30 ans issu pour une part plus importante d'une précocité de débourrement que d'un retard de sénescence foliaire [7]. La variabilité inter-annuelle du débourrement est due à 70% aux températures journalières. Cette sensibilité se traduit par une précocité d'ouverture des bourgeons de 6 jours par degré d'accroissement de la température en hiver.[39].

2.3.3 Projections

Sur le réseau RENECOFOR, les prédictions établies suivant 2 scénarii (A2 et B2) et 4 modèles de circulation atmosphérique (HadCM3, CSIRO2, CGCM2 et PCM) suggèrent un débourrement plus précoce de 2,6 jours et 3,5 jours respectivement pour les chênaies et les hêtraies françaises à l'horizon de la période 2041-2070. De la même manière, les chênaies jauniraient 8,1 jours plus tard que pour la période actuelle ; et les hêtraies, 2,5 jours. Par conséquent, s'observerait un allongement de la saison de végétation de respectivement 7,4 et 4,3 jours. Ainsi, il semblerait que les modifications des dates phénologiques concerneraient surtout le jaunissement. Ces conclusions se basent sur les résultats obtenus avec le scénario HadCM3-A2 qui s'avère être le plus pessimiste [37].

Les résultats présentent une forte variabilité régionale. Les chênaies qui se trouvent dans la partie Nord-Ouest

de la France auront tendance à débourrer de manière plus précoce et à jaunir plus tardivement qu'à l'Est, menant à une augmentation moyenne de la saison de végétation de 20 jours. Dans la partie Sud de la France, ce rallongement atteint 30 jours et est essentiellement dû à une tardiveté du jaunissement. Pour les hêtraies, les deux phases participent à un allongement de la saison végétative à hauteur de 20 à 40 jours avec là encore des modifications plus importantes pour les peuplements les plus au Sud.

A l'aide du modèle ARPEGE, les travaux de Delpierre ont prédit un retard de coloration des feuilles de 1,4 jours par décennie pour le Hêtre et de 1,7 jours pour le Chêne sur la période 1951-2099 et relie ce phénomène à une plus forte sensibilité des essences aux températures automnales [13].

Une étude de données satellitales fournies par le NOAA sur plusieurs années a, quant à elle, permis d'évaluer les différences de débourrement observables entre les années plus chaudes et plus froides. Les résultats de projections montrent que, dans le futur, le débourrement de certaines essences va être de plus en plus précoce alors que pour d'autres, l'effet de températures plus chaudes va se réduire du fait de besoins en froid non remplis [46, 43].

1.4 Déterminisme environnemental de la phénologie

2.4.1 Approche phénoménologique

Les modèles de phénologie corrélative vont quantifier le degré d'implication d'un facteur environnemental dans l'accomplissement d'une phénophase, si celui-ci est moteur ou s'il ralentit sa réalisation et l'évolution de cette implication au cours des cycles. Avec un r^2 de 0,11 pour le Hêtre et de 0,43 pour les Chênes les travaux de Lebourgeois sur le réseau RENECOFOR ont établi une relation positive entre le jour de débourrement et la longitude. L'ouverture des bourgeons a tendance à être retardée suivant un gradient de continentalité Ouest-Est. Grâce aux peuplements de résineux, il a pu être montré que le débourrement est retardé quand l'altitude augmente [37].

Les modélisations phénologiques de la coloration des feuilles sont, quant à elles plus rares, mais existent tout de même. Ainsi, le jaunissement est sous une double influence de la photopériode et des températures froides avec une bonne corrélation annuelle (r^2 d'environ 0,45 pour les Chênes et Hêtres). Le seuil de température sous lequel la sénescence s'amorce est de 26,5°C pour le Chêne et de 25°C pour le Hêtre avec une réponse de type proportionnelle. Lorsque ce seuil est franchi et les jours pour lesquels la photopériode est suffisante, le taux de sénescence des feuilles de Hêtre sera accentué [13].

2.4.2 Approche processus

Les processus qui déterminent la mise en place de feuilles ou des fleurs sont essentiellement sous la dépendance des températures sous forme d'accumulation de « degré-jour » [11]. Les températures ne sont cependant effectives qu'au delà d'un certain seuil, appelé « seuil de végétation » qui est spécifique à chaque espèce [9]. Pour comprendre leurs actions, il est essentiel de bien préciser la notion de dormance. A l'heure actuelle, il existe une certaine divergence des points de vue quant à sa définition. L'une d'entre elle établie que la dormance peut être considérée comme l'arrêt temporaire de croissance visible de toute structure de la plante contenant un méristème ([31] ; [39] ; [10]).

À partir de cette définition, on peut distinguer trois types de dormances [66]. La *paradormance*, correspond à une inhibition de croissance provoquée par un autre organe de la plante, distinct et éloigné du tissu dormant (exemple : inhibition des bourgeons axillaires par le méristème apical). L'*endodormance* (dormance au sens strict, « rest ») est une inhibition de croissance liée à des facteurs endogènes au tissu dormant. Pendant ce stade, la croissance est impossible même si les conditions extérieures sont favorables (fin d'automne début d'hiver) ([53] ; [21] ; [16]). Cette adaptation s'avère être favorable en cas de gelées même tardives qui peuvent être létales à partir d'une certaine intensité et persistant durant une période suffisamment longue ([4] ; [43]). Généralement, la levée de l'*endodormance* nécessite une accumulation suffisante de températures froides (« Chilling Units », « Chilling requirements », « Chilling temperatures », etc). L'*éctodormance* ou quiescence est une inhibition imposée par les contraintes du milieu. À ce stade, la croissance est possible mais il faut pour cela des conditions favorables notamment des températures suffisamment élevées pour permettre le développement ontogénique

(i.e morphologique) des bourgeons (accumulation de températures chaudes ou « Forcing Units », « Forcing temperatures »).

Les modèles fondés sur des processus permettent de mettre en évidence le rôle des facteurs environnementaux sur la réalisation et la succession dans le temps des étapes d'un cycle. Celle-ci peut suivre une progression *parallèle* ([30] ; [22] ; [28] ; [20]), c'est-à-dire que les températures de « forcing » et de « chilling » sont importantes en même temps ; *séquentielle* [48] ; [53] ; [28] ; [20]), les températures de « forcing » ne sont actives qu'après les besoins en « chilling » comblés ; *alternating* ce qui traduit une transition entre les deux types de températures suivant une exponentielle négative ([6] ; [44] ; [28]) ; le *Deepening Rest model* [26] ; est le modèle à quatre phases qui divise la dormance en trois phases qui sont le pré-repos, le vrai repos et le post-repos ([62] ; [20]).

D'autres modèles de prédiction du débourrement se fondent uniquement sur l'action des températures de forcing, ce sont des *Thermal Time Model* [6] ou encore *Spring Warming Models* [23]. Sous nos latitudes les phases de feuillaison et floraison sont surtout sous une influence thermique, ce qui justifie la modélisation basée sur cette variable [7].

À la fin de la saison de végétation, le phénomène de sénescence des feuilles témoigne du passage dans la « saison froide » pour toutes les essences feuillues et quelques essences résineuses comme le Mélèze. Ce phénomène se traduit par le jaunissement des feuilles ou aiguilles puis par leur chute. Il est sous l'influence de plusieurs facteurs climatiques comme la diminution de la photopériode ou encore une réduction des températures moyennes journalières ([54] ; [66]). Cette sénescence foliaire représente elle aussi un avantage pour se prémunir contre des aléas comme le gel.

Il est couramment admis de ne pas prendre en compte la photopériode dans la modélisation en phénologie car celle-ci ne varie pas d'une année à l'autre. Or, dans le cas du Hêtre, des expérimentations ont été menées afin d'évaluer l'importance de la photopériode sur le débourrement. Pour cela, des semis de Hêtre ont été soumis à des conditions hivernales afin de combler les besoins en « chilling » et ainsi permettre la transition de l'état de dormance à l'état de quiescence du bourgeon. D'autres semis n'ont pas été soumis à ces conditions et ont passé l'hiver dans des conditions plus douces. Ensuite, et pour chacun de ces deux groupes, des individus ont été placés sous des conditions photopériodiques de 9 et 13h afin d'évaluer le poids de la photopériode dans le débourrement. Les résultats montrent que quelles que soient les conditions d'ensoleillement, le débourrement est plus long chez les plants pour qui les besoins en « chilling » n'ont pas été comblés. L'effet de la photopériode s'observe dans la durée du débourrement. Ce dernier est plus rapide chez les plants soumis à une photopériode 13h que chez ceux soumis à une photopériode de 9h. La durée du jour agit plus comme un catalyseur du phénomène que comme un initiateur. Néanmoins, il existe une légère interaction entre « chilling » et photopériode pour ce qui est de l'initiation du débourrement([28] ; [17]).

1.5 Conclusion

Aujourd'hui, nous savons que la phénologie est un bon indicateur du changement climatique. Le contrôle, même partiel, par les conditions climatiques des phénophases n'est plus à prouver. Avec l'engouement que cela suscite, plusieurs stratégies sont nées afin de comprendre et représenter au mieux la réalité. La création de modèles trouve son intérêt dans la représentation de la réalité actuelle, la compréhension des changements qui ont déjà pu affecter les populations en place. Les modèles sont également importants pour prévoir les conséquences des changements à venir.

Les questions posées plus haut ont des réponses mais leur véracité peut-être mise à mal pour plusieurs raisons.

Chapitre 2

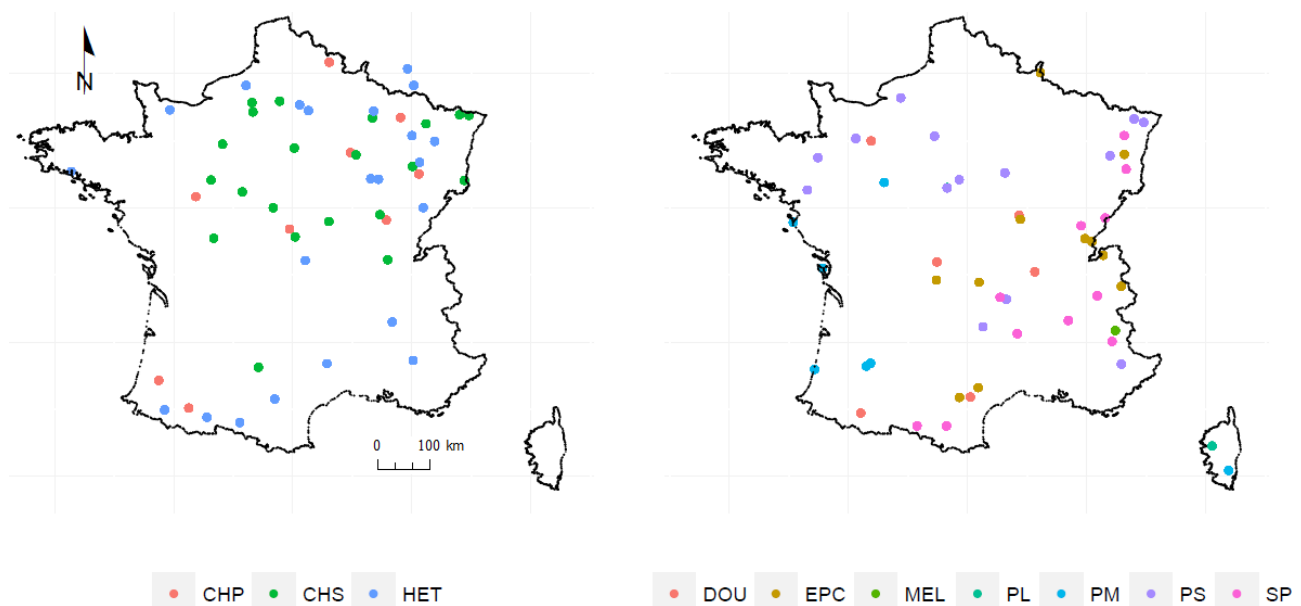
Matériels et méthodes

2.1 Observations phénologiques

3.1.1 Localisation des sites

Le Réseau National de suivi à long terme des écosystèmes forestiers RENECOFOR comprend 104 placettes réparties sur toute la France pour 102 d'entre-elles et au Luxembourg pour les 2 restantes [61] (voir Figure 2.1). Ce dispositif a été créé en 1992 et les relevés phénologiques sur les 10 essences forestières ont débuté en 1997.

Figure 2.1 – Carte de répartition des 104 sites (à gauche les 53 placettes de feuillus, à droite les 51 placettes de résineux) du réseau RENECOFOR (liste des abréviations à la page 14).



Les peuplements suivis sont adultes, monospécifiques, gérés en futaie régulière ou en taillis-sous-futaie ([32] ; [5]). Une placette a une surface de 0,5 ha dans laquelle 36 arbres sont référencés. Ces 36 arbres correspondent à l'échantillon de la population sur lequel porte toutes les observations (mesures de croissance, observations de l'état sanitaire, de la phénologie) [61] ; [33] ; [35] ; [37]). Pour toutes les placettes, des observations sur la principale essence du sous-étage sont également disponibles (très souvent un sous-étage de Charme (*Carpinus betulus*)).

3.1.2 Données stationnelles

Chaque placette est caractérisée par ses coordonnées géographiques (latitude et longitude), son appartenance à une région climatique et par son altitude (gamme observée 200 à 1400 mètres). La composition spécifique de

chaque classe d'altitude est visible dans le tableau .29 à la page 71.

Figure 2.2 – Découpage du territoire français par région climatique.

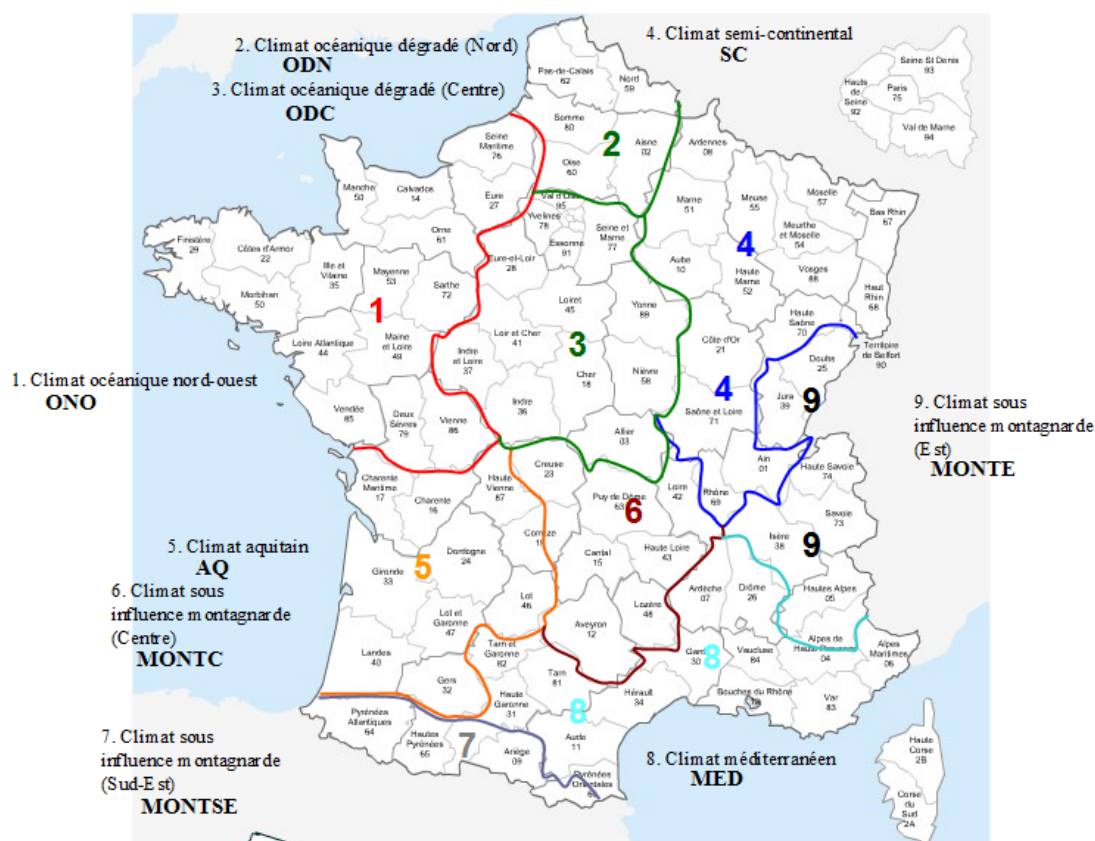


Tableau 2.1 – Répartition des placettes dans les différentes classes d'altitude (en mètre) définies par le protocole du réseau RENECOFOR avec précision du nombre de placettes pour chaque classe.

Classe d'altitude	Intervalle défini (en m)	Altitude moyenne	Nombre de placettes
A	≤ 200	113	35
B	200-400	308	26
C	400-600	512	10
D	600-800	675	8
E	800-1000	924	8
F	1000-1200	1101	7
G	> 1200	1436	10

3.1.3 Données phénologiques

Les observations sont menées chaque année entre mars et juin pour le débourrement et entre septembre et novembre pour le jaunissement. Afin de limiter la variabilité liée à des différences d'appréciation ou de notation, l'opérateur qui réalise de manière hebdomadaire toutes les observations sur une placette donnée est unique. Des campagnes de calibration sont également organisées régulièrement entre les opérateurs du réseau de façon à s'assurer de l'homogénéité des notations entre les peuplements. Les différentes observations sont réalisées à l'aide de jumelles. Les dates des phénophases sont exprimées en jour julien c'est-à-dire en nombre de jours

qui se sont écoulés depuis le 1^{er} janvier. Pour chaque placette, c'est la date à partir de laquelle une certaine proportion d'arbres a atteint un stade donné qui est relevée menant ainsi à une notation peuplement et non individuelle. Depuis 3 à 4 ans des notations individuelles sont cependant réalisées sur les 36 arbres échantillons mais ne seront pas utilisées dans le cadre de ce travail.

Tableau 2.2 – Répartition par essence des données phénologiques de débourrement, de jaunissement et de longueur de sa saison de végétation disponibles sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR.

Essence	Nom	Nombre de placettes (nombre d'arbres)	Nombre d'observations de débourrement	Nombre d'observations de jaunissement	Nombre d'observations de durée de végétation
CHP	Chêne Pédonculé	9(324)	127	122	117
CHS	Chêne Sessile	21(759)	317	301	285
HET	Hêtre	22(792)	290	277	267
DOU	Douglas	6(216)	82		
EPC	Epicéa	11(396)	147		
MEL	Mélèze	1(36)	15	15	15
PL	Pin Laricio	2(72)	24		
PM	Pin Maritime	7(252)	86		
PS	Pin Sylvestre	14(504)	167		
SP	Sapin Pectiné	11(396)	168		
total		104	1423	715	684

3.1.3.1 Notation du débourrement

La première date correspond au jour pour lequel 10% des arbres présentent des bourgeons ouverts sur au moins 20 à 50% de leur houppier, il est noté dd1. Cette date marque le début de la saison de végétation. La seconde date est notée dd9 et correspond au jour à partir duquel 90% des arbres présentent 20 à 50% de leur houppier avec des bourgeons ouverts. Pour les essences feuillues, un bourgeon est dit ouvert s'il est épanoui et que la première feuille commence à se déplier. Concernant les résineux, le bourgeon est ouvert quand les premières aiguilles sont visibles.

3.1.3.2 Notation du jaunissement

Ce phénomène ne s'observe que sur les essences caduques et ne concerne donc, dans le cadre du réseau, que les essences feuillues ainsi que le Mélèze. Cette évaluation se base sur l'observation de la décoloration des feuilles, encore appelée « jaunissement » et est notée jj1 et jj9. La détermination des dates de jaunissement repose sur le même schéma que pour dd1 et dd9.

3.1.3.3 Longueur de saison de végétation

Ce facteur correspond à l'écart temporel qu'il y a entre l'ouverture des bourgeons et le jaunissement des feuilles. En utilisant les données du réseau, il est possible de calculer 4 variables distinctes qui traduisent une longueur de saison de végétation (sv) : sv11 correspond à la différence entre jj1 et dd1 ; sv19 à la différence entre jj9 et dd1 ; sv91 à celle entre jj1 et dd9 et enfin sv99 à celle entre jj9 et dd9.

Dans la suite de l'étude, le terme de débourrement fera référence à la variable « dd1 », le terme de jaunissement à « jj9 » et la longueur de saison de végétation représentera la variable « sv19 ». Les deux premières variables seront exprimées en jours juliens et la dernière en nombre de jours.

3.1.4 Données climatiques

Pour analyser le déterminisme climatique des différentes phénophases, calibrer les modèles et faire les prédictions, 3 sources de données ont été utilisées : stations avec des données ponctuelles du réseau Météo-France, stations avec des données ponctuelles homogénéisées et données spatialisées issues du modèle SAFRAN. Dans un premier temps, les stations pluviothermiques du réseau Météo-France les plus proches possibles des sites et disposant de données mensuelles sur la période 1997-2013 ont été utilisées pour construire et calibrer les modèles phénologiques climatiques. Au total, les valeurs moyennes mensuelles de 99 stations pluviométriques et 85 stations thermiques ont été utilisées. En moyenne, une station se trouve à 11 km de la placette qu'elle renseigne. Pour les données manquantes, une estimation est réalisée à partir de corrélations entre plusieurs facteurs.

À partir de ces données pluviothermiques, des calculs d'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la formule de Turc et de bilan hydrique climatique ont été effectués [35]. L'ETP rend compte de la quantité d'eau maximale que peut échanger un couvert végétal avec l'atmosphère lors de la réalisation de ses activités physiologiques dans des conditions hydriques non limitantes. Le bilan hydrique climatique correspond à la différence entre les précipitations et cette valeur d'ETP. Dans la formule de calcul d'ETP de Turc, une variable de rayonnement intervient. Celle-ci sera utilisée à plusieurs reprises dans cette étude pour évaluer son rôle dans le déterminisme des phénophases. Cette variable, rend compte du rayonnement global reçu à un endroit donné et modulé par la couverture nuageuse. Elle dépend donc à la fois de la latitude, de la période de l'année et de la nébulosité mesurée au niveau des stations de relevés Météo-France. ([34] ;[37]).

Depuis quelques années, Météo-France a développé des séries de données homogénéisées retraçant les variations temporelles du climat depuis les dernières décennies (jusqu'au début du XX^e siècle) pour différentes stations représentatives des climats régionaux [42]. Dans ce travail, une partie de ces données a été utilisée pour reconstruire les dates passées des différentes phénophases (périodes variables voir 2.3) à partir des modèles calibrés sur la période récente (1997-2013). Nous avons sélectionné les 13 longues séries disponibles dans la moitié Nord de la France de façon à couvrir un large gradient Ouest-Est.

Tableau 2.3 – Liste des stations qui constituent la base de données homogénéisées climatique de Météo-France.

Station	Altitude	Latitude	Longitude	Période
ABBEVILLE	69	50.136	1.834	1921-2010
BEAUVAIS-TILLE	89	49.446	2.127	1887-2002
ALENCON	143	48.445	0.11	1955-2000
LE MANS	48	47.94	0.189	1878-2011
NANCY	212	48.687	6.221	1879-2013
NANTES-BOUGUENAI	26	47.15	-1.608	1881-2010
ORLEANS	123	47.99	1.778	1881-2009
TOURS	108	47.444	0.727	1953-2011
CHARTRES	155	48.46	1.501	1878-2009
AUXERRE	152	47.824	3.549	1954-2009
REIMS-COURCY	95	49.209	4.155	1878-2010
ST-DIZIER	139	48.631	4.903	1959-2010
DIJON-LONGVIC	219	47.267	5.088	1883-2009
STRASBOURG-ENTZHEIM	150	48.549	7.64	1921-2010

Les dernières données utilisées sont des données spatialisées issues du modèle SAFRAN (<http://www.cnrm.meteo.fr>) de Météo-France [19, 47]. Les données spatialisées SAFRAN sont de plus en plus utilisées en écologie et en hydrologie (notamment pour caractériser la sécheresse) car elles permettent d'avoir des données climatiques en tout point du territoire [1, 63].

SAFRAN est un système d'analyse à mésoéchelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire des paramètres horaires. Ces paramètres (température minimale, maximale et moyenne, humidité, vent, précipitations

solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident) sont analysés par pas de 300 m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une maille de 8 km de côté. À partir de ces données, la pression de vapeur d'eau (« vpd ») a été calculée. Le VPD mesure l'écart entre la quantité d'eau contenue dans l'air à un moment donné et la quantité d'eau qui peut être contenue par ce même air à saturation. Ce VPD est fortement corrélé aux flux de transpiration du système plante-atmosphère [60].

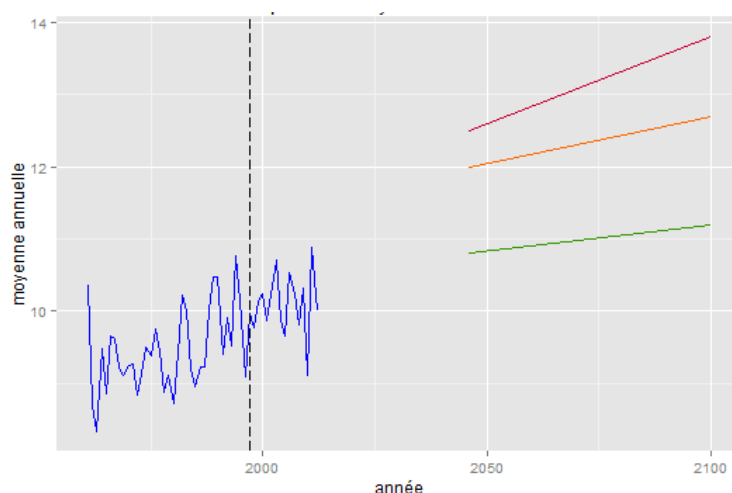
Les données SAFRAN ont été utilisées dans le cadre de ce travail pour tester leur intérêt dans la calibration de modèles phénologiques. En effet, si les données ponctuelles issues des stations météorologiques ont été sélectionnées pour être les plus proches des placettes RENECOFOR et donc représentatives le plus possible des conditions climatiques supportées par les arbres, les données spatialisées donnent un climat moyen sur une emprise importante de 64 km². Par rapport aux conditions réelles, on peut émettre l'hypothèse que le modèle SAFRAN « dégrade » l'information locale (au profit d'une amélioration de la représentativité spatiale). Pour tester cela, des modèles phénologiques ont été calibrés avec les deux sources de données et les résultats comparés. Des données climatiques spatialisées sur la période 1961-2013 seront utilisées pour réaliser des prédictions de débourrement et de jaunissement sur cette période pour ensuite évaluer les conséquences du changement climatique jusqu'à aujourd'hui.

Il est aussi possible, grâce à ces données, de réaliser des prédictions sur les périodes 2046-2065 et 2081-2100. Pour ce faire, le scénario A1B de changement climatique et 3 modèles de circulation ont été choisis. Le scénario comprend une hypothèse de croissance économique rapide, une croissance de la population mondiale jusqu'au XXI^e siècle puis une légère décroissance. De plus, il suppose une évolution technologique énergétique efficace qui mélange de manière simultanée l'utilisation des combustibles fossiles et non fossiles et se positionne de cette manière comme un scénario intermédiaire [24].

Le modèle de circulation CNRM-CM3 créé par le CERFACS et actualisé par le CNRM comprend une composante de circulation atmosphérique modélisée par ARPEGE-Climat qui prend en compte des forçages externes comme les aérosols, les gaz à effets de serre et l'insolation. Ce modèle comprend une composante de circulation océanique nommée NEMO, GELATO pour la circulation de la glace de mer et TRIP pour le transport de l'eau douce des fleuves vers les océans. La composante continentale est issue du modèle SURFEX lui-même composé d'un bilan d'énergie à la surface utilisant la température de surface (ISBAN) et un modèle d'échange océan-atmosphère. L'ensemble de ces constituants sont ensuite compilés pour permettre des prédictions à l'échelle globale et sur des périodes allant du mois au siècle [52].

Les autres modèles, CSIRO-MK3.0 et MIROC-3-2-MEDRES se basent sur un certain nombre de composantes atmosphérique, océanique, surfacique. La distinction entre modèles provient de la compilation de ces données qui pondèrent plus ou moins certaines variables ce qui aboutit à des résultats de projection différents.

Figure 2.3 – Évolution des températures moyennes annuelles entre 1961 et 2013. Les segments représentent la tendance de l'évolution des températures annuelles entre 2046 et 2100, pour rendre compte des différents types de modèles utilisés. En rouge, MIROC-3-2-MEDRES ; en orange, CNRM-CM3 et en vert, CSIRO-MK3.0.



En bleu est représentée la courbe de l'évolution de la température moyenne annuelle entre 1961 et 2013. En pointillés est marquée l'année 1997, début des relevés phénologiques sur le réseau RENECOFOR. Les segments représentent les tendances moyennes prédites entre la période 2046-2065 et 2081-2100 pour les 3 modèles

de changement climatique. En vert, les prédictions du modèle CSIRO-MK3.0 plus « optimiste » ; en orange, CNRM-CM3 modèle intermédiaire ; et en rouge, le modèle MIROC-3-2-MEDRES avec des prédictions plus « pessimistes »).

2.2 Analyses statistiques

3.2.1 Analyses de la variabilité spécifique et spatiale

La première étape est fondée sur des représentations graphiques de l'évolution du débourrement, du jaunissement et de la longueur de saison de végétation en moyennant les données suivant plusieurs paramètres qualitatifs comme l'essence, la situation géographique ou l'altitude.

3.2.2 Analyse en composante principale

Afin de mettre en évidence la structuration des données phénologiques et de relier celles-ci aux variables quantitatives et qualitatives disponibles, une analyse en composante principale normée (ACP) a été réalisée à l'aide du package « FactomineR » [27]. La matrice initiale comprend les 104 sites en lignes et les dates des phénophases en colonne ainsi que trois variables qualitatives (espèce, altitude, région climatique). Pour l'ACP, les ellipses de confiance à 95% mettant en évidence les regroupements potentiels selon les variables quantitatives (considérées comme variables supplémentaires) ont été calculées. Des ellipses disjointes montrent des modalités de variable qualitative qui ont des rôles significativement distincts sur le phénomène étudié.

3.2.3 Analyse de variance

L'ANOVA permet de savoir si une variable numérique a des valeurs significativement différentes selon plusieurs catégories (donc suivant les valeurs d'un facteur). L'hypothèse que l'on teste est l'hypothèse nulle c'est-à-dire que pour une variable à plus de 2 catégories, le test regarde si pour au moins 2 d'entre-elles les moyennes de variance sont significativement différentes : c'est une généralisation du test de Student à des variables à plus de 2 paramètres. Si une différence significative s'observe, il faut réaliser un test de Tukey pour savoir entre quels facteurs la différence est effectivement significative à condition qu'il y ait un même nombre d'observations dans chaque catégories.

2.3 Modélisation du déterminisme environnemental

3.3.1 Méthode de régression multiple pas-à-pas

Cette méthode vise à chercher un modèle qui minimise le Critère d'Information d'Akaike (AIC). L'AIC rend compte de la vraisemblance d'un modèle lorsqu'on ajoute des variables. Il est basé sur la théorie de l'information, c'est-à-dire qu'il évalue la perte d'information induite par l'utilisation de ce modèle pour la prédiction de données explicatives d'un phénomène. Pour calibrer le modèle, plusieurs stratégies existent, soit le programme prend en compte toutes les variables, les retire une à une et analyse si elles participent fortement à l'augmentation de l'erreur. Soit il initialise avec une variable, les ajoute progressivement et évalue celles qui minimisent l'augmentation de l'erreur. Il est aussi possible d'utiliser une technique qui regroupe ces deux stratégies, on parle de technique mixte. Si une variable participe à une diminution de la vraisemblance, elle ne sera pas retenue dans le modèle, l'idée étant de sélectionner le modèle qui a le plus petit AIC possible. Or, obtenir un AIC faible va de paire avec un nombre relativement important de paramètre, au risque d'avoir un sur-ajustement de ce même modèle à l'échantillon utilisé lors de la calibration, ce qui le rend trop spécifique. Un des paramètres de l'AIC est de pénaliser les modèles sur le nombre de variable qui le constitue. Cela va permettre de ne retenir que les plus parcimonieux d'entre eux. Il y a donc une forme de compromis qui est pris entre la qualité de prédiction d'un modèle et sa complexité. Afin d'évaluer leur validité, les modèles retenus ont été utilisés pour calculer des dd1 théoriques ensuite comparés avec les dd1 observés. Leur pertinence a été jugée à l'aide de l'erreur quadratique moyenne (RMSE ou Root Mean Square Error) qui permet de quantifier le décalage moyen, exprimé ici en jour, entre les valeurs calculées et mesurées. Cette méthode ne prend pas en compte les interactions entre les variables puisque le calcul de cette interaction n'était pas réalisable dans le

cadre de la validation du modèle.

Enfin, même si ces modèles montrent un bon ajustement avec les données, ils sont néanmoins peu stables, car ils sont appliqués à des données internes au modèle c'est-à-dire qui interviennent dans sa calibration. Pour valider le modèle, il faudrait avoir un jeu de données externe ou partitionner la base de données initiale en deux de manière à avoir une partie qui interviendrait dans la calibration du modèle et l'autre pour la validation. Dans ce cas, se pose la question de la méthode de partitionnement ainsi que le problème d'un nombre de données qui peut s'avérer être insuffisant dans la cas soit de la calibration, soit de la validation.

3.3.2 Théorie de la forêt d'arbres aléatoires

Les méthodes des forêts d'arbres aléatoires sont de plus en plus utilisées en écologie prédictive car elles sont capables de prendre en compte les interactions multiples entre tous les régresseurs, aussi bien qualitatifs que quantitatifs, et les relations non linéaires entre ceux-ci. Ces techniques ne nécessitent pas l'hypothèse de normalité des régresseurs et peuvent être utilisées même quand leur nombre est très supérieur à celui des observations sans que le modèle soit « surparamétré » [29]. Le but est de partager un échantillon de données X de façon progressive en q classes, q n'étant pas fixé a priori, à l'aide de règles binaires et de visualiser les résultats à l'aide d'un arbre. La première classe (=nœud) correspond au régresseur qui discrimine le plus la variabilité des observations initiales. Les deux branches de chaque nœud définissent le seuil ou la nature de discrimination du niveau hiérarchique. La procédure s'arrête quand le nombre de données devient trop faible pour définir des nœuds ou que toute l'hétérogénéité des données initiales a été prise en compte dans les différents niveaux hiérarchiques.

Pour calculer ces niveaux hiérarchiques, on utilise des fonctions d'hétérogénéité dérivées de l'entropie de Shannon et de l'indice d'inégalité de Gini [3]. Dans ses travaux, Breiman a montré qu'une légère modification de l'échantillon initial X (appelé aussi échantillon d'apprentissage) pouvait modifier fortement l'arbre. Ainsi, la procédure finale consiste à stabiliser les résultats par agrégation d'arbres élémentaires construits sur « n tree » échantillons tirés au hasard dans le pool des données initiales (n tree échantillons « bootstrap » ou de calibration). On parle alors de « forêts d'arbres aléatoires ». Dans cette étude, n tree a été fixé à 500 ce qui est suffisant pour assurer une très bonne stabilité des résultats [38].

On peut également fixer le nombre maximum de régresseurs à prendre en compte pour discriminer chaque niveau « m try » [25]. Ce paramètre peut être ajusté progressivement de façon à obtenir les meilleures prédictions. Ici, une dizaine de variables environnementales étant apparues comme particulièrement explicatives, m try a été fixé à 4. La procédure utilisée permet également de réaliser une validation croisée des prédictions. En effet, pour chaque arbre, on peut prédire les données qui n'ont pas été prises en compte dans l'échantillon de calibration en utilisant l'arbre construit sur ces données de calibration. On obtient alors un jeu de données de vérification (« Out-of-bag » data) ainsi que les prédictions du facteur étudié (OOB predictions). L'importance de chacun des régresseurs est également testée en regardant comment l'erreur de prédiction du facteur étudié augmente quand la valeur du régresseur obtenue sur les données de vérification est permutée aléatoirement alors que tous les autres régresseurs restent inchangés. Plus le régresseur a du poids, plus une permutation aléatoire dans le jeu de données doit entraîner des erreurs de prédiction fortes.

In fine, différents paramètres statistiques permettent de juger de la qualité des résultats. La qualité de l'ajustement du modèle (RMSE) et des prédictions (RMSE oob), la variance prédite (% Var) et le poids de chaque régresseur (% IncMSE).

Cette méthode sera utilisée dans l'analyse pour connaître les variables qui déterminent le plus la réalisation des phénophases et créer des modèles à partir de celles-ci. Après calibration, ces modèles seront appliqués à plusieurs bases de données pour réaliser des comparaisons entre modèles et des prédictions de dates de réalisation de phénophases sur les périodes passée (1961-2013) et futures (2046-2065 et 2081-2100).

2.4 Représentation spatiale

L'objectif de cette étape est de replacer géographiquement les valeurs calculées. Il y a plusieurs types de représentations spatiales, la projection de données ponctuelles et la spatialisation. Le premier type interviendra dans la visualisation des résultats obtenus lors d'analyses sur la base de données du réseau Météo-France sur une carte mise à disposition.

La spatialisation se déroule en deux temps. Le modèle est appliqué aux données spatialisées (sous forme de raster) par maille de 64 km² et projetées suivant le système de projection adéquat (lambert II étendu). Les cartes ont ensuite été importées sous un logiciel de traitement de données SIG (ArcGIS/QGIS) pour être mises en forme

2.5 Bilan d'utilisation des variables

Voir dans le chapitre Annexe la figure .35 à la page 77.

Chapitre 3

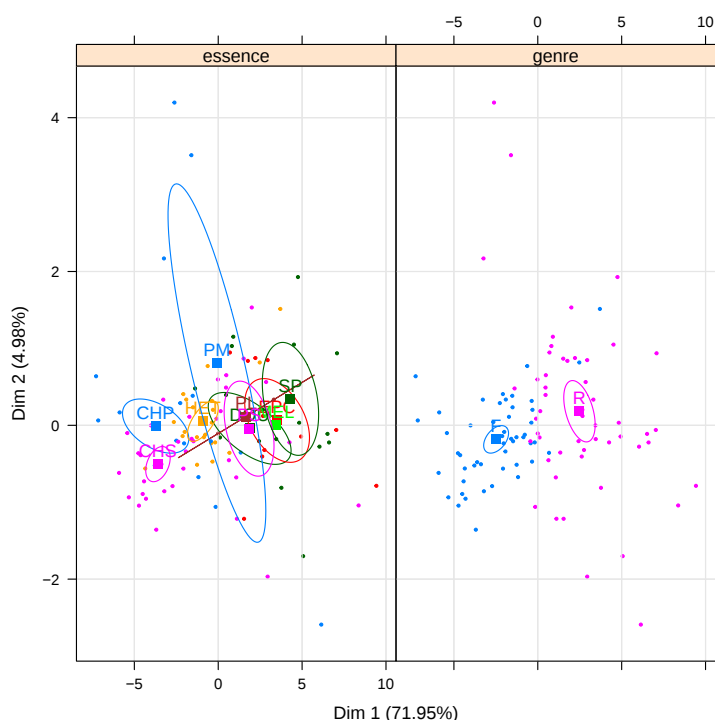
Résultats

3.1 Sources de variabilité des phénomènes

4.1.1. Variabilité inter-spécifique

Une ACP normée a été effectuée sur les phénophases des 104 peuplements entre 1997 et 2013. Sur la figure 3.1, le premier axe porte 71,9% de la variance et rend compte de l'effet de l'essence sur le jour de débourrement des essences. Le second axe qui porte 5% de la variance illustre l'effet des variables géographiques sur les phénophases.

Figure 3.1 – Plan factoriel 1-2 de l'ACP effectuée sur les dates de débourrement sur la période 1997-2013 des placettes du réseau RENECOFOR. Les ellipses de confiance à 5% ont été tracées pour les modalités des variables « essence » et « genre ».



Il y a une opposition entre le comportement des Chênes et des autres essences car les ellipses « CHP » et « CHS » sont disjointes des autres. Le Hêtre, quant à lui, se trouve à la limite entre les Chênes et les résineux. Hormis les cas des Pins Laricio (PL) et Maritime (PM), tous les résineux sont effectivement positionnés à l'opposé des feuillus. L'observation des ellipses des deux genres confirme un comportement significativement différent entre les feuillus et les résineux. Dans le cas de la variable de jaunissement, l'ACP explique 60,5% de la variance (voir figure 3.2). L'axe 1 en porte 47,6% de la variance et représente l'effet de l'essence sur le jaunissement. La distinction entre les Chênes et le Hêtre est moins nette que pour le débourrement. De plus,

la mesure du jaunissement du Mélèze sur un seul site rend l'analyse des ellipses plus complexe. Il semblerait néanmoins que l'effet de l'essence soit moins prononcé ici que pour le débourrement.

Figure 3.2 – Plan factoriel 1-2 de l'ACP menée sur les dates de jaunissement de la période 1997-2013 et mesurées sur les placettes du réseau RENECOFOR. Les ellipses de confiance à 5% ont été tracées pour les modalités de la variable « essence ». Les deux variétés de Chênes ont été regroupées sous la modalité « CH ».

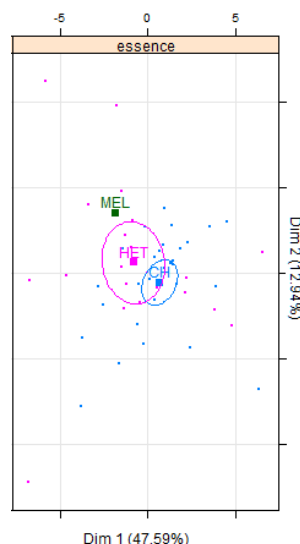


Tableau 3.1 – Valeurs moyennes de débourrement, jaunissement et longueur de saison de végétations exprimées en « jour-julien » pour les 10 essences du réseau RENECOFOR entre 1997 et 2013. Les données ont été triées sur la date de débourrement.

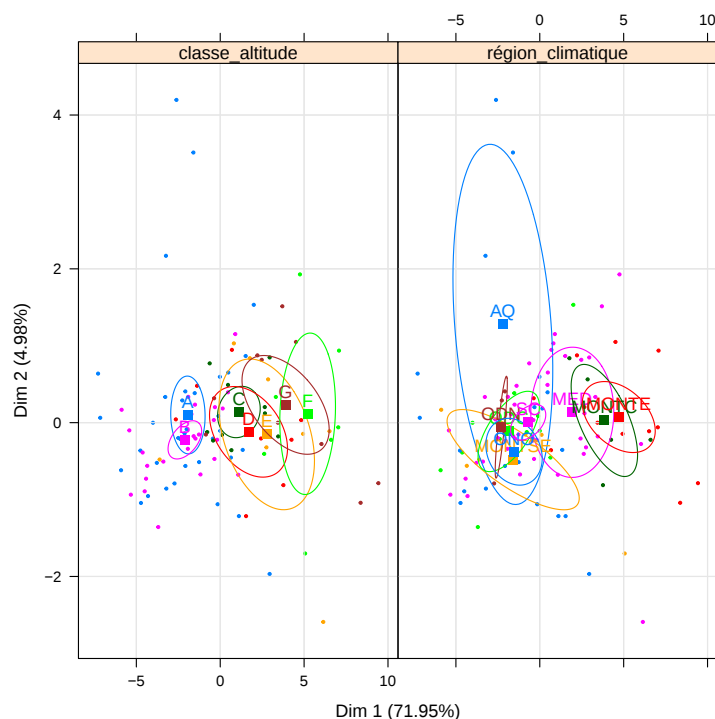
Code	Essence	<i>Débourrement</i>		<i>Jaunissement</i>		<i>Longueur de saison de végétation</i>	
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
CHP	Chêne Pédonculé	99,8	12,2	297,2	13,8	197,6	23,3
CHS	Chêne Sessile	101,2	9,8	299,1	12,3	197,7	16,4
HET	Hêtre	111,9	11,3	292,9	16,2	180,6	21,4
PM	Pin Maritime	116,3	19,8				
PL	Pin Laricio	124,9	15,3				
MEL	Mélèze	131,1	8,4	290,7	6,8	159,6	9,6
DOU	Douglas	125,3	12,5				
PS	Pin Sylvestre	126,2	13,8				
EPC	Epicéa	133,6	12,5				
SP	Sapin Pectiné	134,7	12,9				

Le tableau 3.1 présente les moyennes par essence pour la période 1997-2013. Le classement des essences en fonction de leur date de débourrement révèle que les feuillus débourrent plus précocement que les résineux. En moyenne, il y a une différence de 35 à 45 jours entre le débourrement de l'essence la plus précoce et de la plus tardive. Dans le genre des feuillus, l'ouverture des bourgeons du Hêtre a lieu environ 10 jours après celle des Chênes. Entre les deux variétés de cette dernière essence s'observe un décalage de 1 à 4 jours. Le jaunissement dure en moyenne 10 jours. La différence entre les essences est, pour cette phénophase, plus réduite. Il existe un décalage d'environ 1 mois entre le débourrement de l'essence décidue la plus précoce et la plus tardive. Ceci se traduit, in fine, par une longueur de saison de végétation comprise entre 160 et 200 jours. Cependant, le tableau ci-dessus ne montre que l'effet de l'essence sur la réalisation des phénophases. Or, il existe une composante climatique qui explique la précocité ou tardiveté du débourrement et du jaunissement.

4.1.2. Variabilité spatiale

La figure 3.3 permet d'évaluer les effets des modalités des variables « classe d'altitude » et « région climatique » en reprenant les résultats de l'ACP précédente. La localisation et la signification des régions climatiques est visible sur la carte de la figure 2.2 à la page 16.

Figure 3.3 – Plan factoriel 1-2 de l'ACP menée sur les dates de débourrement de la période 1997-2013 pour les placettes du réseau RENECOFOR. Les ellipses de confiance à 5% ont été tracées pour les modalités des variables « classe d'altitude » et « région climatique ».



Le graphique des modalités de la variable « région climatique » de la figure 3.3 présente un gradient orienté Sud-Nord le long de l'axe horizontal avec une individualisation des zones « MONTE » et « MONTC ». La zone « MED » semble, quant à elle, avoir une position plus intermédiaire. L'effet de ces variables sur le jaunissement n'a pas montré de réelle distinction entre les modalités. Néanmoins, un gradient de latitude s'observe le long de l'axe horizontal, orienté du Nord vers le Sud.

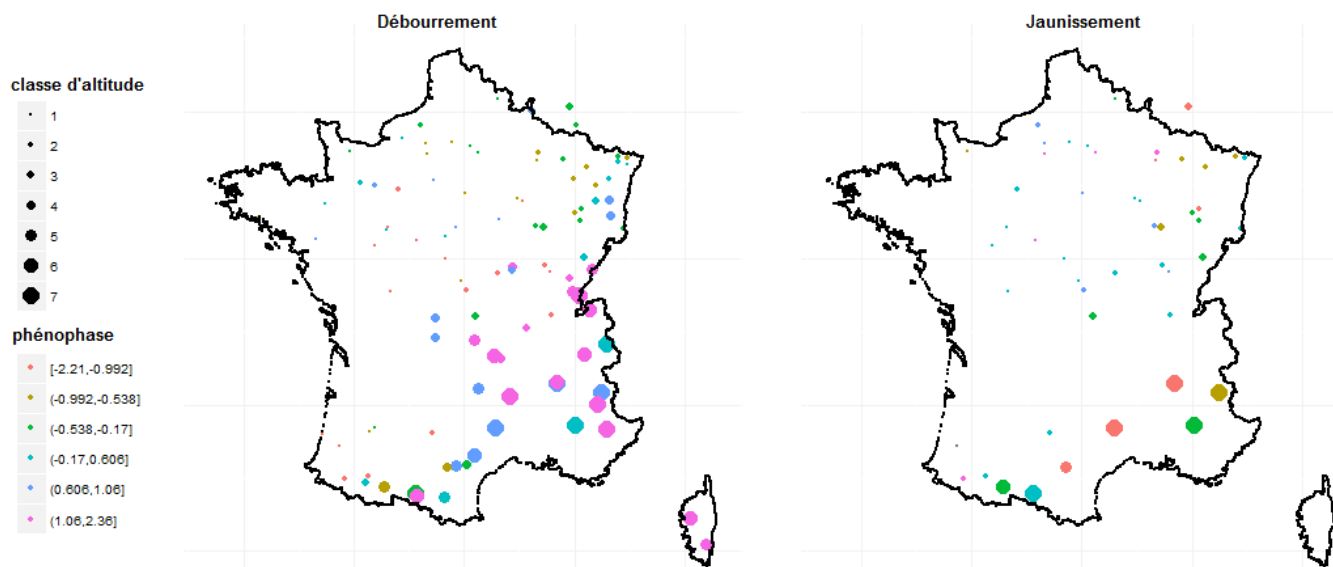
Le tableau 3.2 page 26 reprend en partie les résultats de l'ACP de la figure 3.3. En effet, ce tableau montre que les arbres des zones « MONTE », « MONTC » et « MED » débourrent plus tardivement et jaunissent plus prématurément ; et la distinction entre les autres zones est moins marquée. Le tableau .28 page 70 présente la diversité spécifique au sein de chaque région climatique. Les dates de débourrement et de jaunissement varient en fonction des essences. Ainsi, même s'il existe un effet de la région climatique sur le déclenchement des phénophases, il n'explique pas à lui seul l'ensemble des variations.

Tableau 3.2 – Moyenne par genre et par région des phénophases sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR. Pour chaque région climatique, il y a une distinction par genre (feuillus/résineux). Les moyennes de débourrement et de jaunissement sont données en jours juliens, les moyennes de longueur de saison de végétation en jours.

Classe d'altitude	Genre de débourrement	Moyenne de jaunissement	Moyenne de longueur de saison de végétation	Moyenne
ODN	F	101,1	298,2	194,9
ODC	F	100	303	202,7
	R	114,3		
ONO	F	99,4	301,3	202,2
	R	118,5		
SC	F	101,9	292,7	190,1
	R	122,9		
AQ	F	82,5	322,1	244,5
	R	112,6		
MONTSE	F	102,5	303,1	199,6
	R	126,7		
MED	F	113,4	285	175
	R	127,6		
MONTC	R	130,2		
MONTE	F	115,4	290,9	174,8
	R	139,8	290,7	159,6

Sur la figure 3.3, il y a une distinction entre les classes d'altitude « A » et « B », qui comprennent les altitudes inférieures à 400 m, et les classes qui caractérisent des altitudes de 400 à 1200 m (voir le tableau 2.1 qui décrit les classes d'altitudes).

Figure 3.4 – Influence de la classe d'altitude sur le débourrement (carte de gauche) et le jaunissement (carte de droite). Les valeurs des dates de réalisation des phénophases ont été centrées afin d'annihiler l'effet de l'essence. Le diamètre des cercles augmente en fonction de la classe d'altitude.



La carte de la figure 3.4 représente l'effet de l'altitude sur les dates de débourrement et de jaunissement. Plus le diamètre du disque est important, plus l'altitude est élevée. La couleur du disque rend compte de la tardiveté de la réalisation de la phénophases. Ainsi, la carte montre que plus un peuplement est à une altitude élevée, plus le débourrement sera tardif et plus le jaunissement sera précoce.

Tableau 3.3 – Évolution des phénophases en fonction de la classe d'altitude sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR. Les moyennes ont été calculées par genre et sont exprimées en jours juliens.

Classe d'altitude	Genre	Moyenne de débourrement	Moyenne de jaunissement (en jours)	Moyenne de longueur de saison végétative
A (≤ 200)	F	101,1	300,7	199,3
	R	117,1		
B (200-400)	F	104,3	296,9	192,4
	R	121,5		
C (400-600)	F	114,5	286,8	171,4
	R	126,8		
D (600-800)	F	101,8	284,8	182
	R	127,4		
E (800-1000)	F	102,5	292	189,9
	R	132,8		
F (1000-1200)	R	137,7	285,2	163,2
	F	121,7		
G (> 1200)	F	121,7	290,7	159,6
	R	138,5		

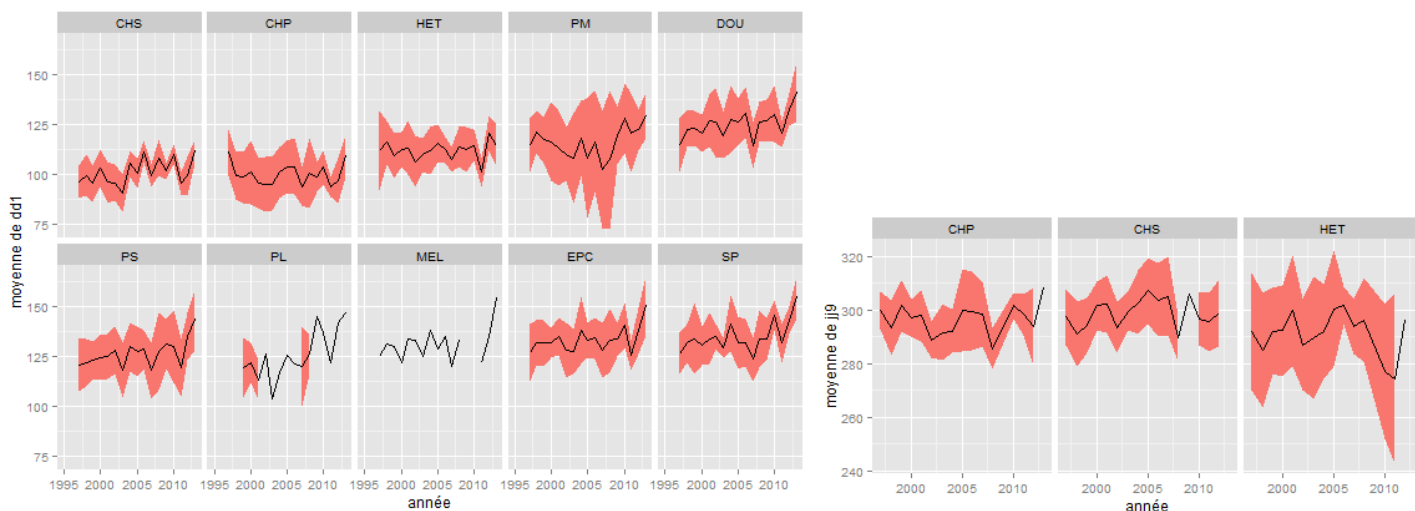
Le tableau 3.3 met en évidence une précocité de débourrement d'environ 20 jours des classes d'altitude A et B par rapport aux autres. Le jaunissement a lieu en moyenne 10 jours plus tard dans les classes d'altitude supérieures à B. Néanmoins, comme le montre le tableau de répartition des essences dans les classes d'altitude (voir tableau .29 à la page 71), les classes A et B concentrent tous les Chênes et la moitié des placettes de Hêtre, les effets essence et altitude sont donc confondus.

La variabilité spatiale s'exprime donc de plusieurs manières, l'altitude a tendance à retarder le débourrement et à hâter le jaunissement. Un effet similaire est visible au niveau régional en suivant un gradient Sud-Nord. Cependant, la répartition des essences n'est pas uniforme sur le territoire, les effets des variables spatiales sont donc à relativiser en fonction de la composition des peuplements.

4.1.3 Variabilité temporelle

La figure 3.5 page 28 représente l'évolution des jours de débourrement et de jaunissement des essences entre 1997 et 2013. Au cours d'une année, il y a un décalage temporel dans la réalisation des phénophases étudiées dû à la variabilité inter-spécifique du débourrement et du jaunissement. La zone colorée, quant à elle, illustre les réponses des différents peuplements à leur environnement.

Figure 3.5 – Évolution du débourrement (à gauche) et du jaunissement (à droite) entre 1997-2013 des essences du réseau RENECOFOR. La moyenne est représentée par le trait noir et l'écart-type par la surface colorée.



Lors d'années particulières comme 2007 et 2011, qui ont été exceptionnellement chaudes, la figure 3.5 affiche une réduction sensible de la variabilité inter-spécifique du débourrement, représentée par la zone colorée. En effet, lors de ces années, la zone se réduit, ce qui traduit une réduction des différences entre les dates de débourrement mesurées sur l'ensemble du réseau. Ceci pourrait être interprété comme une synchronisation des essences. Ce phénomène est moins marqué mais néanmoins visible pour le jaunissement.

Les résultats sont cependant à relativiser dans la mesure où les tendances sont majoritairement portées par les premiers et derniers points.

Tableau 3.4 – Tableau des tendances d'évolution des phénophases pour les 10 essences du réseau RENECOFOR suivies entre 1997 et 2013.

Variable phénologique	Essence	Équation de la régression		Performances du modèle	Tendance sur 17 ans (en jours)
		a	b		
Débourrement	CHS	-1078	0,59	0,225	10,03
	CHP	173	-0,036	0,0133	-0,612
	HET	-25	0,068	0,0622	1,156
	PM	-913	0,51	0,124	8,67
	DOU	-1376	0,75	0,326	12,75
	PS	-1344	0,73	0,322	12,41
	PL	-1319	0,72	0,0602	12,24
	MEL	-1158	0,64	0,152	10,88
	EPC	-1080	0,61	0,251	10,37
	SP	-1562	0,85	0,317	14,45
Jaunissement	CH	557	-0,13	0,0219	-2,21
	HET	-333	0,31	0,174	5,27
	MEL	-1705	1	0,555	17

Les équations des tendances obtenues par régression linéaire simple sont compilées dans le tableau 3.4. Sur les 17 années d'observation, les résultats montrent une tardiveté moyenne de débourrement. Les essences décidues présentent un recul de $5,4 \pm 5,1$ jours et une avancée de jaunissement de $6,7 \pm 6,9$ jours soit une réduction de saison de végétation de $1,4 \pm 2,5$ jours.

4.1.4 Comparaison des phénophases selon la strate

Lors des campagnes de mesure, des observations sont aussi menées sur les arbres de sous étage. Il est donc possible de se rendre compte de l'importance de l'effet de la strate sur la date de réalisation de ces phénophases.

La priorité a été donnée aux stations où le sous étage et l'étage dominant sont de la même essence, ou ont un comportement proche. Ainsi, nous n'avons pas comparé la canopée de CHS avec le sous étage de CHS car ce sous étage n'est présent que sous une strate dominante de Pin Sylvestre. Les conditions environnementales et climatiques sont donc bien trop distinctes pour pouvoir réaliser une analyse statistiquement correcte. De même ont été écartées toutes les essences de sous étage présentant un faible nombre d'observations.

Tableau 3.5 – Dates moyennes des phases phénologiques entre la strate supérieure (D) et le sous-étage (S), (entre parenthèses, le nombre d'observations) sur la période 1997-2013.

Essence	Strate	<i>Débourrement</i>		<i>Jaunissement</i>		<i>Longueur de saison de végétation</i>	
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
CHP	D	99,8	12,2	297,2	13,8	197,6	23,3
CHS	D	101,2	9,8	299,1	12,3	197,7	16,4
CHAR	S	90,2 (213)	10,7	292,1 (207)	11,8	201,9 (192)	14,1
<i>différence</i>		-10,3 ± 1		-6 ± 1		4,3	
HET	D	111,9	11,3	292,9	16,2	180,6	21,4
HET	S	106,7 (331)	10,5	298,5 (304)	14,9	199,3 (152)	15,3
<i>différence</i>		-5,2		5,6		18,7	

Le tableau 3.5, montre qu'en moyenne, le débourrement du sous étage est plus précoce que pour l'étage dominant. Malgré un jaunissement légèrement plus précoce du Charme, la saison de végétation du sous étage est plus longue que pour l'étage dominant. Néanmoins, la comparaison entre le Chêne et le Charme introduit un effet « essence » dans les résultats.

3.2 Déterminisme environnemental de la phénologie

4.2.1 Régression progressive

Les modèles présentés dans le tableau .30 à la page 72 sont ceux qui maximisent le critère de vraisemblance (AIC). L'échantillon et les variables d'entrée sont précisés dans le tableau .35. Une étude comparative a été menée entre les modèles fondés sur les jeux de données Météo-France et SAFRAN.

Tableau 3.6 – Récapitulatif des variables présentes lors de la calibration des modèles utilisés dans cette étude. La présence d'une variable dans un modèle est symbolisée par le « x ». La méthode utilisée est la régression pas-à-pas.

Numéro de modèle	Échantillon	Variables spécifiques	Variables géographiques	Variables climatiques					
				12P	12T	12ETP	12Bhc	rad	vpd
1	MF	toutes les essences	x	x	x	x	x		
2	MF	feuillus (CH/HET)	x	x	x	x	x		
3	MF	résineux	x	x	x	x	x		
4	MF	EPC/SP	x	x	x	x	x		
5	SAF	toutes les essences	x		tmoy	x	x		
6	SAF	feuillus (CH/HET)			tmoy	x	x		
7	SAF	résineux	x		tmoy	x	x		
8	SAF	EPC/SP	x		tmoy	x	x		x

Quelque soit le groupe d'essences considéré, les coefficients attribués aux variables révèlent que l'altitude tout comme une progression vers les latitudes plus élevées (vers le Nord) ont un effet positif sur le débourrement et négatif sur le jaunissement, ce qui se traduit par une tardiveté de l'ouverture des bourgeons et une précocité de la chute des feuilles à mesure que l'on progresse vers le Nord de la France. La totalité des échantillons de la base de données initiale semble réagir de la même manière face aux variables climatiques. À l'échelle mensuelle, les coefficients associés aux variables climatiques changent de signe au cours des mois qui correspondent au débourrement et au jaunissement. La distinction entre les genres ou entre les essences se situe au niveau de l'intensité de la réponse à un facteur environnemental donné.

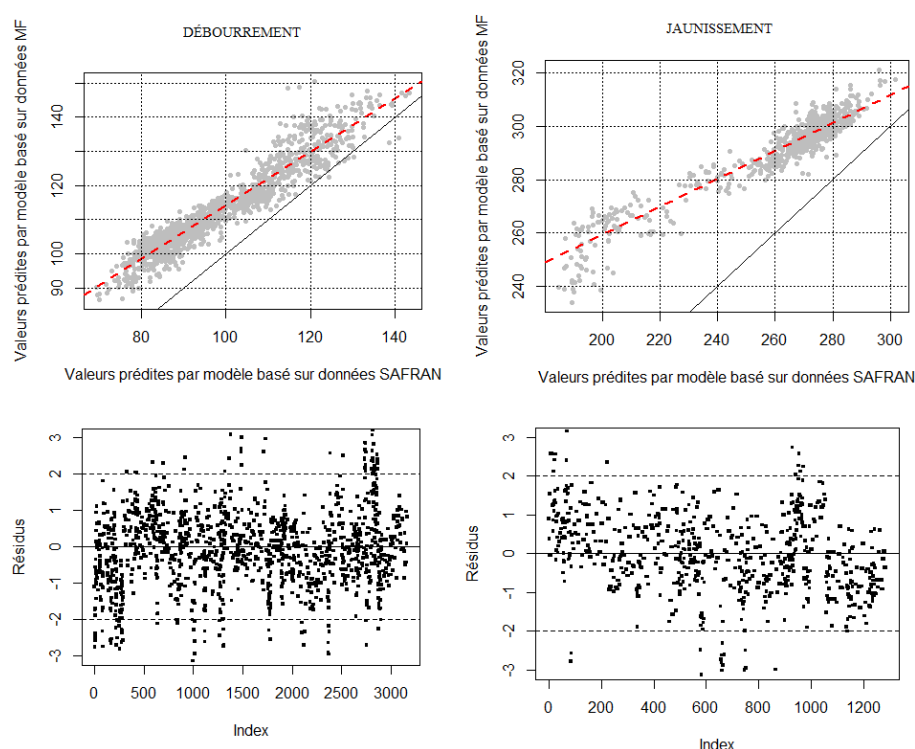
Tableau 3.7 – Synthèse des performances des modèles de calibration du débourrement ou du jaunissement créés à l'aide de la méthode de régression pas-à-pas sur les bases de données climatiques Météo-France (MF) et SAFRAN sur la totalité ou un sous-ensemble des placettes du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.

Variable	Base de données	Échantillon	Nombre de variables	r^2	AIC	Erreur de prédiction (en jours)
Débourrement	MF	Toutes les essences	11	0,42	10993	14,1
		Feuillus(CH/HET)	8	0,52	4305	8,4
		Résineux	9	0,43	4026	14
		EPC/SP	8	0,25	1610	11,1
	SAFRAN	Toutes les essences	14	0,45	10070	13,4
		Feuillus	7	0,4	1706	8,1
		Résineux	8	0,34	4369	11,9
		EPC/SP	10	0,29	1567	10,1
Jaunissement	MF	CH/HET	5	0,24	4666	11,9
	SAFRAN	CH/HET	8	0,29	4356	10,7

Dans le cas du débourrement, le r^2 est de 0,42 pour le modèle calibré sur toutes les essences avec les données climatiques de la base de données Météo-France et est de 0,45 pour la base de données SAFRAN. Pour le jaunissement le r^2 n'est plus que de 0,24 pour le premier jeu de données et de 0,29 dans le second cas.

La comparaison entre les modèles globaux Météo-France et SAFRAN de la figure 3.6 montre une corrélation de 0,92 avec une erreur de prédiction de 3,2 jours. Sur l'ensemble des variables qui interviennent dans la calibration des ces deux modèles (voir tableau .30 page 72), respectivement 11 et 14 variables, 9 sont communes. Pour le jaunissement, la comparaison de ces deux modèles présente une corrélation de 0,89 avec un écart de

Figure 3.6 – Régressions linéaires et graphiques des résidus de la comparaison des modèles de calibration des dates de débourrement et de jaunissement sur le réseau RENECOFOR entre 1997 et 2013 basés sur les jeux de données MF et SAFRAN .



prédiction de 4,5 jours avec 7 variables communes (voir tableau .31 page 73).

4.2.2 Calibration de modèles par la méthode des Random Forest

4.2.2.1 Données ponctuelles climatiques du réseau Météo-France

Le tableau 3.8 reprend les modalités des différents modèles qui seront utilisés pour l'étude de cette base de données.

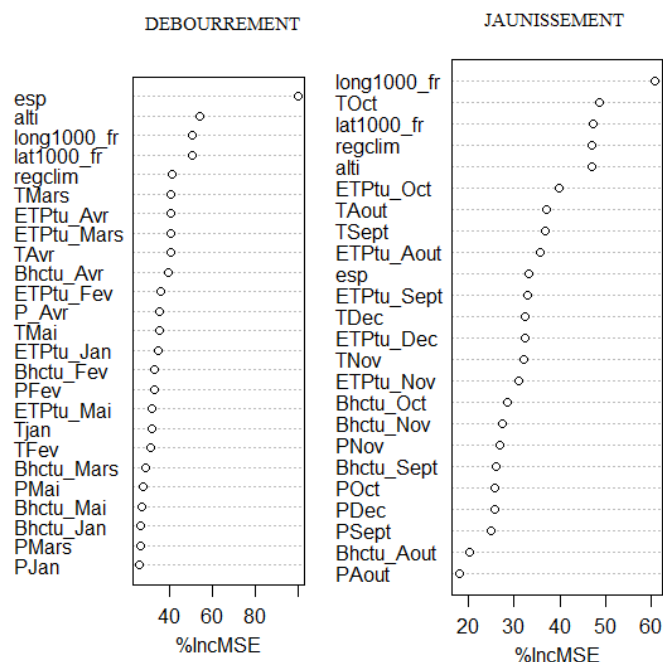
Tableau 3.8 – Récapitulatif des variables présentes lors de la calibration des modèles utilisés dans cette étude. La présence d'une variable dans un modèle est symbolisée par le « x ». LA méthode utilisée est le Random Forest

Numéro de modèle	Échantillon	Variables spécifiques	Variables géographiques	Variables climatiques				
				12P	12T	12ETP	12Bhc	rad vpd
1	MF	x	x	x	x	x	x	
2	MF	essence	x	x	x	x	x	
3	MF	x		x	x	x	x	
4	10 variables MF	x	x	x	x	x	x	

4.2.2.1.1 Comparaison des modèles « géo-climatique » (1) et uniquement climatique (3).

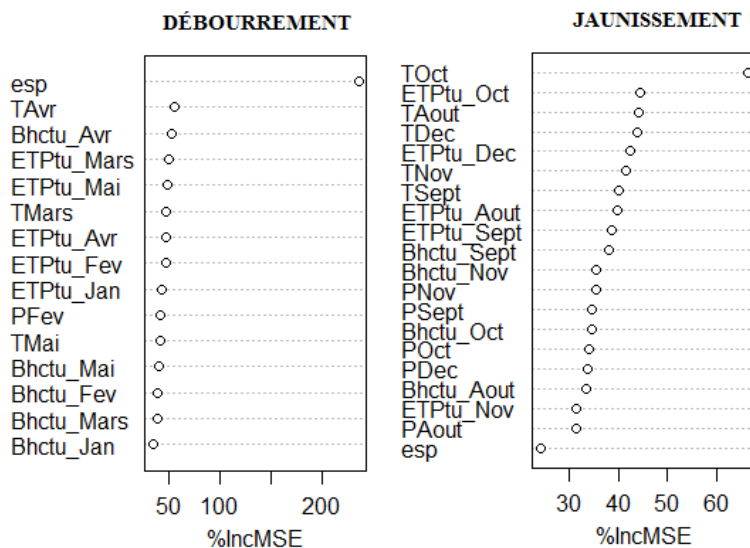
Le modèle géo-climatique pour le débourrement explique 77% de la variance avec une erreur moyenne de prédiction de 8,6 jours et un écart moyen de prédiction de 4,7 jours. Comme précisé dans le tableau .35 à la page 77, ce modèle est référencé sous le nom de modèle (1).

Figure 3.7 – Classification par importance décroissante des variables dans la détermination du débourrement et du jaunissement entre 1997 et 2013 obtenue grâce à la méthode des Random Forest en prenant en compte toutes les observations du réseau RENECOFOR et en prenant en compte toutes les variables.



Le graphique de classification des variables 3.7 illustre l'importance que représente les variables relatives à l'essence et à la situation géographique de la placette dans la détermination des phénomènes de débourrement et de jaunissement. Néanmoins, dans le cas du jaunissement, la variable « essence » a une plus faible influence sur la phénophase que pour le débourrement. Ceci est probablement dû à la composition de l'échantillon de calibration. En effet, celui-ci comprend uniquement les Chênes et les Hêtres qui sont des essences au comportement très proche. Les précipitations semblent, quant à elles, avoir un rôle moins important dans le déterminisme des phases phénologiques. Pour le jaunissement, ce sont les variables qui concentrent le moins de vraisemblance. Ce constat est aussi valable pour le débourrement même si les précipitations d'avril sont en 12^e position.

Figure 3.8 – Classement des variables climatiques qui déterminent les dates de débourrement des 10 essences du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.



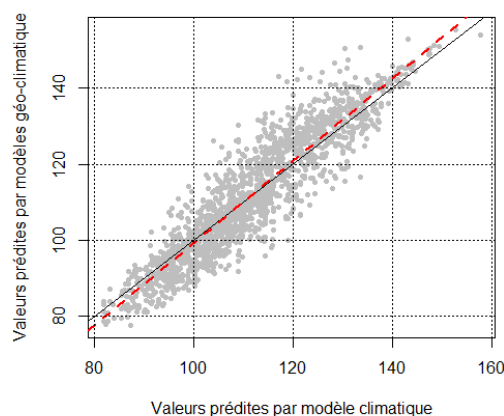
Les répartitions des variables de prédiction du débourrement et du jaunissement pour le modèle (3) illustré par la figure 3.8 sont similaires aux classements du modèle global de la figure 3.7 à la page 32.

Tableau 3.9 – Comparaison entre modèles de prédiction des dates de débourrement et de jaunissement calibrés à l'aide de variables géographiques et climatiques (1) et entre modèles uniquement basés sur des variables climatiques (3).

Variable	Performances	Modèle 1	Modèle 3
Débourrement	Variance expliquée (en %)	77	73
	Nombre de prédictions	1949	1949
	Erreur de prédiction (Écart)	8,6 (4,7)	8,4 (4,9)
Comparaison	r^2	0,85	
	Écart de prédiction	5,9	
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	44,6	32,8
	Nombre de prédictions	1200	1200
	Erreur de prédiction (Écart)	10,7 (5,9)	11,7 (4,5)
Comparaison	r^2	0,96	
	Écart de prédiction	2,1	

Les comparaisons entre ces modèles, résumées dans le tableau 3.9, montrent une corrélation de 0,85 pour le débourrement et de 0,96 pour le jaunissement. Ceci reprend des résultats d'analyses précédentes qui montraient une plus importante dépendance géographique du débourrement que du jaunissement. Ici, cela se traduit par des performances moindres pour le modèle de prédiction (3) qui ne prend pas en compte les variables géographiques. Il y a un écart de presque 6 jours entre les modèles (1) et (3) pour le débourrement et de 2,1 pour le jaunissement.

Figure 3.9 – Résultat de régression linéaire entre les dates de débourrement prédites par un modèles calibré sur des variables géographiques et climatiques (1) et un modèle calibré uniquement à l'aide de variables climatiques (3) sur la période 1997-2013.



La restriction aux variables climatiques pour la calibration de modèles de prédiction de jours de débourrement ou de jaunissement n'engendre pas de perte significative de performance.

4.2.2.1.2 Comparaison entre des modèles climatiques (3) et des modèles calibrés sur les 10 premières variables climatiques (4).

Pour calibrer les modèles, de nombreuses variables géographiques et climatiques sont à disposition. Comme pour la réalisation de modèles suivant la démarche pas à pas, il faut prendre en compte des critères de vraisemblance et de parcimonie. Plusieurs modèles ont donc été créés avec toutes les observations disponibles mais en prenant en entrée un nombre prédéfini de variables explicatives.

Tableau 3.10 – Comparaison entre modèles de prédiction des dates de débourrement et de jaunissement calibrés à l'aide de toutes les variables climatiques (3) et entre modèles calibrés sur les 10 premières variables climatiques (4).

Variable	Performances	Modèle 3	Modèle 4
Débourrement	Variance expliquée (en %)	73	73
	Nombre de prédictions	1949	1949
	Erreur de prédiction (Écart)	8,4 (4,9)	9,4 (4,9)
Comparaison	r^2	0,96	
	Écart de prédiction	2,1	
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	48	32,8
	Nombre de prédictions	1200	1200
	Erreur de prédiction (Écart)	11,7 (4,5)	11,7 (4,5)
Comparaison	r^2	0,96	
	Écart de prédiction	2,1	

Des comparaisons ont été effectuées avec des modèles calibrés sur les 10 premières variables, par ordre d'importance, lors de la calibration du modèle global (voir figure 3.10 à la page 34). La comparaison entre les deux types de modèles étudiés révèle que le taux de correspondance entre les modèles globaux et les modèles réduits à 10 variables d'entrée est de 96%.

La restriction des modèles climatiques aux 10 premières variables par ordre d'importance n'introduit pas d'erreur significative dans les prédictions.

4.2.2.1.3 Comparaison entre le modèle global (1) et des modèles spécifiques (2)

Des modèles globaux calibrés à l'aide de l'ensemble des observations et des facteurs ont été utilisés pour prédire les dates de débourrement et de jaunissement de quatre essences : le Chêne et le Hêtre pour les feuillus ; le Sapin et l'Épicéa pour les résineux. Ces résultats ont été comparés aux prédictions obtenues avec des modèles calibrés sur chacune des essences précédentes.

La figure 3.10 présente le classement des variables pour des modèles spécifiques. La situation géographique des placettes joue, là encore, un rôle prépondérant dans le déterminisme des phénophases. Pour les deux essences étudiées, le nombre de variables explicatives en commun avec les modèles globaux de prédiction des jours de débourrement et de jaunissement est important. L'échantillon des feuillus est presque exclusivement composé des Chênes et des Hêtres, ce qui pourrait expliquer ces fortes similitudes dans les classements de variables.

Figure 3.10 – Classification descendante de l'importance des variables dans la détermination du débourrement pour les Chênes et pour le Hêtre entre 1997 et 2013 obtenue grâce à la méthode des Random Forest en prenant en compte toutes les observations du réseau RENECOFOR et en prenant en compte toutes les variables.

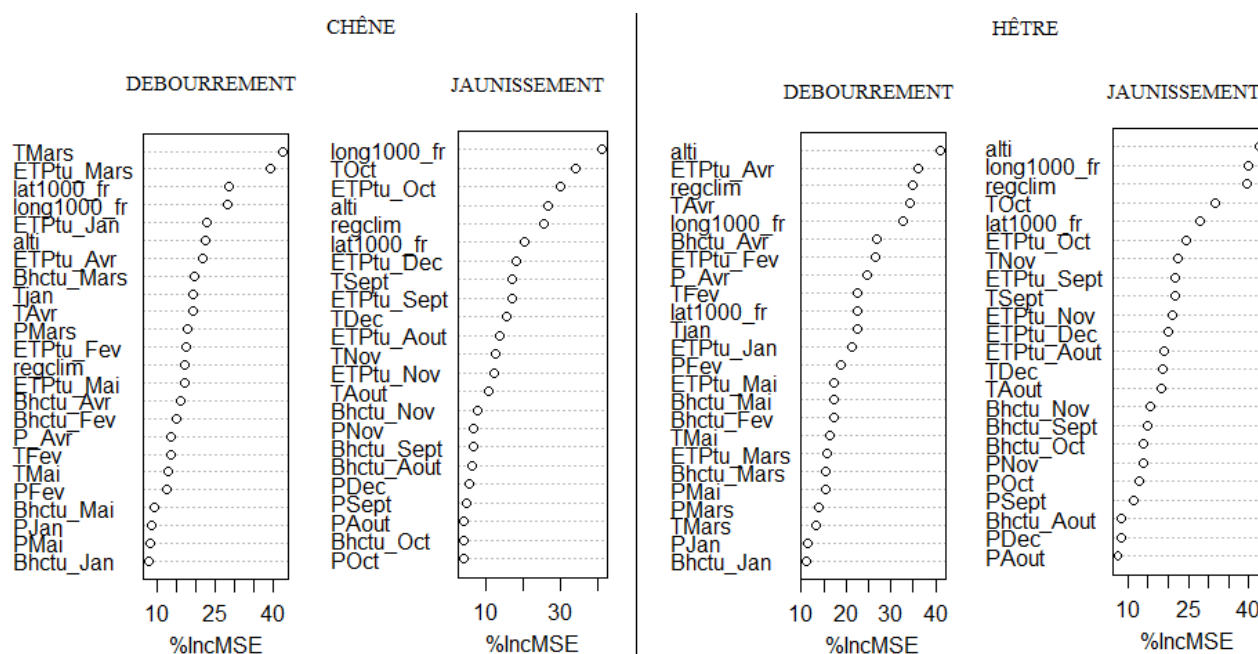
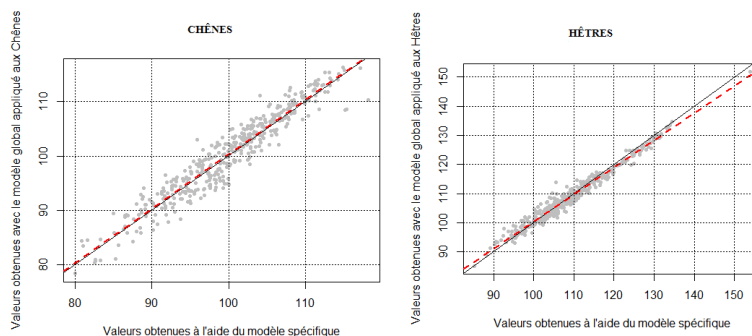


Tableau 3.11 – Comparaison des modèles spécifiques (2) et du modèle global (1) appliqué à une essence pour la prédiction du débourrement et du jaunissement.

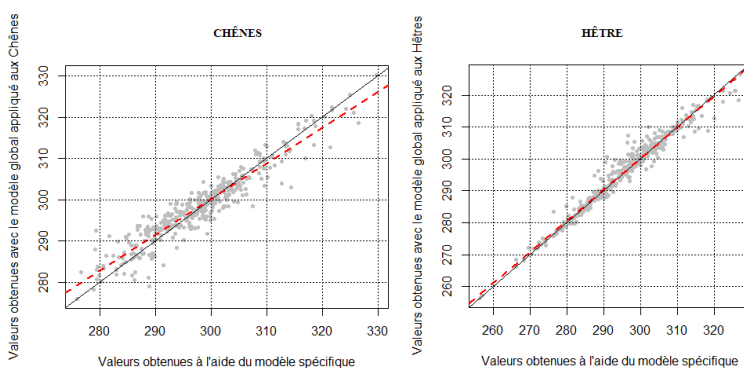
Variable	Performances	Chêne		Hêtre	
		Global (1)	Spécifique (2)	Global (1)	Spécifique (2)
Débourrement	Variance expliquée	77	45,9	77	53,5
	Nombre de prédiction	422	422	572	572
	Écart de prédiction(erreur)	4,7 (3,5)	7,7 (2,6)	4,7 (4,3)	7,7 (3)
	r^2	0,91		0,97	
Comparaison	Écart de prédiction	2,3		1,5	
	Nombre de variables communes	7		7	
	(sur les 10 premières variables)				
Variable	Performances	Chêne		Hêtre	
		Global (1)	Spécifique (2)	Global (1)	Spécifique (2)
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	44,6	32,8	44,6	41,5
	Nombre de prédictions	399	399	531	531
	Écart de prédiction (en jours)	10,7 (5,3)	10,3 (4,5)	10,7 (6,5)	12,1 (6,6)
	r^2	0,89		0,97	
Comparaison	Écart de prédiction	2,8		2	
	Nombre de variables communes	6		7	
	(sur les 10 premières variables)				

Figure 3.11 – Comparaison des dates de débourrement prédites par un modèles spécifique (en abscisse) et des dates prédites par un modèle global appliqué à une essence (en ordonnées). Application aux Chênes(diagramme de gauche) et aux Hêtres (diagramme de droite).



Les régressions linéaires de la figure 3.11 illustrent la similarité importante qui existe entre les prédictions globales et spécifiques. Pour le débourrement, les résultats du tableau 3.11 montrent un correspondance de 91% entre le modèle global appliqué aux Chênes et le modèle spécifique pour une erreur de prédiction légèrement supérieure à 2 jours. Cette correspondance atteint 97% chez le Hêtre avec une erreur de 1,5 jours.

Figure 3.12 – Comparaison des dates de jaunissement prédites par un modèles spécifique (en abscisse) et des dates prédites par un modèle global appliqué à une essence (en ordonnées). Application aux Chênes et aux Hêtres.



Pour le jaunissement, le modèle global (1) permet d'expliquer 44,6% de la variance totale observée sur les observations et prédit les dates de jaunissement avec une erreur moyenne de prédiction de 10,7 jours et un écart de 5,9 jours pour un r^2 de 0,83. Les résultats de la comparaison entre le modèle (1) et les modèles spécifiques (2) répertoriés dans ce même tableau et visibles sur le graphique 3.12 page 36 montrent une correspondance de 89% pour le Chêne et 97% pour le Hêtre et un nombre de variables communes de 6 pour les Chênes et 7 pour le Hêtre.

Le classement des variables pour les résineux de la figure 3.13 montre une plus faible importance de la région climatique ainsi que des variables relatives à la latitude et la longitude pour l'Épicéa que pour le Sapin. Les variables climatiques mensuelles sont sensiblement les mêmes que pour les essences feuillues. Il semble donc, avec l'appui du classement des variables de la figure 3.13, que l'Épicéa est plus sensible aux variables climatiques que le Sapin.

Figure 3.13 – Classement des variables par importance ordre décroissant d'importance dans la détermination des jours de débourrement de deux essences résineuses du réseau RENECOFOR entre 1997 et 2013 : l'Épicéa et le Sapin.

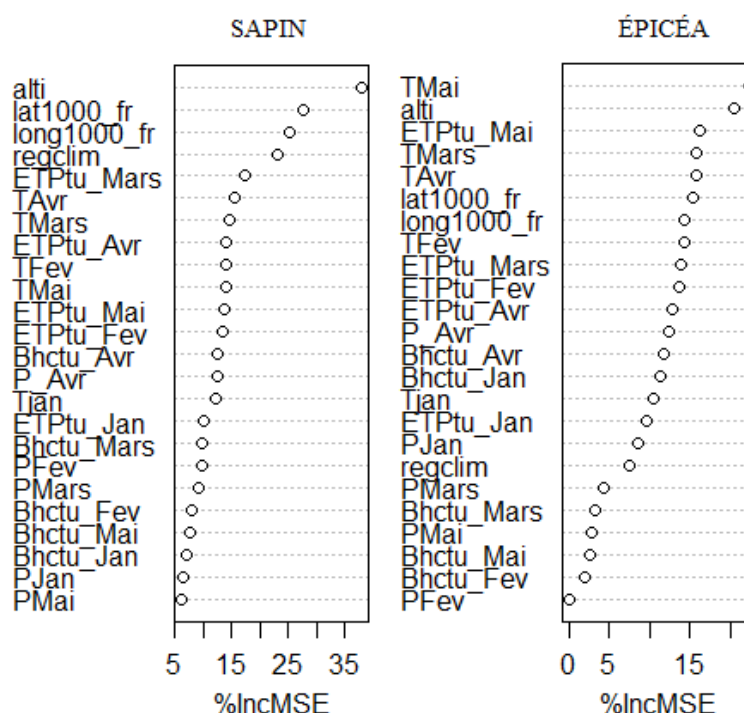


Tableau 3.12 – Comparaison des modèles spécifiques (2) et du modèle global (1) appliqué à chacune des essences pour la prédiction du jaunissement entre 1997 et 2013 sur le réseau RENECOFOR.

Variable	Performances	Sapin		Épicéa	
		Global (1)	Spécifique (2)	Global (1)	Spécifique (2)
Débourrement	Variance expliquée	77	35,2	77	44,3
	Nombre de prédiction	201	201	137	137
	Écart de prédiction(erreur)	4,7 (4,4)	9,8 (4,6)	4,7 (4,4)	8,8 (4,1)
	r^2		0,97		0,96
Comparaison	Écart de prédiction		1,5		1,7
	Nombre de variables communes		6		8
	(sur les 10 premières variables)				

Comme le montre le tableau 3.12, pour ces deux essences résineuses, il existe une forte similitude entre les modèles globaux (1) et les modèles spécifiques (2) de 97% pour le Sapin et 96% pour l'Épicéa avec des erreurs de prédictions inférieures à 2 jours. Pour le Sapin, l'écart entre les modèles global et spécifique est de 2,8 jours, alors qu'il n'est que de 1,1 jours pour l'Épicéa. Entre les modèles spécifiques géo-climatiques et uniquement climatiques il y a, en moyenne, un écart de prédiction de 2 jours.

Par conséquent, il est possible, comme pour les feuillus, d'utiliser un modèle calibré avec l'ensemble des observations pour effectuer des prédictions à l'échelle spécifique.

L'évolution des phénophases à l'échelle spécifique peut être étudiée à l'aide d'un modèle fondé sur l'ensemble des observations et ensuite appliqué à une essence en particulier.

4.2.2.1.4 Comparaison entre le modèle climatique (3) et des modèles spécifiques climatiques (2)

Sans prendre en compte les variables géographiques, le classement des variables est très similaire à celui de la figure 3.10 à la page 35 pour les feuillus et de la figure 3.13 de la page 37 pour les résineux.

Tableau 3.13 – Comparaison des modèles spécifiques (2) et du modèle climatique (3) appliqué à une essence pour la prédiction du débourrement et du jaunissement.

Variable	Performances	Chêne		Hêtre	
		Global (3)	Spécifique (2)	Global (3)	Spécifique (2)
Débourrement	Variance expliquée	73	38	73	45
	Nombre de prédiction	422	422	572	572
	Écart de prédiction(erreur)	8,4 (3,5)	8,3 (3,8)	8,4 (6,2)	8,4 (4)
Comparaison	r^2		0,92		0,78
	Écart de prédiction		1,9		5,1
	Nombre de variables communes (sur les 10 premières variables)		7		6

Variable	Performances	Chêne		Hêtre	
		Global (3)	Spécifique (2)	Global (3)	Spécifique (2)
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	32,8	13	32,8	25
	Nombre de prédictions	399	399	531	531
	Écart de prédiction (en jours)	11,7 (5,6)	11,7 (4,9)	11,7 (6,8)	13,7 (6,8)
Comparaison	r^2		0,85		0,96
	Écart de prédiction		3,4		2,2
	Nombre de variables communes (sur les 10 premières variables)		8		8

Tableau 3.14 – Comparaison des modèles spécifiques (2) et du modèle climatique (3) appliqué à chacune des essences pour la prédiction du jaunissement entre 1997 et 2013 sur le réseau RENECOFOR.

Variable	Performances	Sapin		Épicéa	
		Global (3)	Spécifique (2)	Global (3)	Spécifique (2)
Débourrement	Variance expliquée	73	38	73	45
	Nombre de prédiction	201	201	137	137
	Écart de prédiction(erreur)	8,4(4,9)	11,2 (4,8)	8,4(5,9)	9,5 (4,6)
Comparaison	r^2		0,96		0,87
	Écart de prédiction		1,5		4,1
	Nombre de variables communes (sur les 10 premières variables)		6		7

Les tableaux 3.13 et 3.14 présentent les résultats des comparaisons entre des modèles calibrés sur l'ensemble des observations et appliqués à une essence en particulier et des modèles calibrés sur une seule essence. Chez les feuillus, les modèles de prédictions des jours de débourrement et de jaunissement des Chênes semblent relativement performants avec une bonne corrélation entre les deux types de modèles et des écarts de prédictions faibles. Pour le Hêtre, les modèles de prédiction du débourrement ont un écart de 5 jours avec un nombre de variables communes de 6. Malgré cela, les deux modèles étudiés séparément ont des écarts et erreurs de

prédictions équivalents.

Dans le cas des résineux, le modèle spécifique à l'Épicéa présente un écart de 4 jours avec le modèle global appliqué à l'essence alors qu'il n'est que de 1,5 jours pour le Sapin.

L'étude du déterminisme des phases phénologiques à l'échelle de l'essence peut être menée à l'aide de modèles fondés exclusivement sur des variables climatiques.

4.2.2.2 Données spatialisées issues du traitement SAFRAN sur la période 1997-2013

Comme décrit dans la partie « Matériels et Méthodes », les données SAFRAN sont des données spatialisées par maille de 8 km de côté. L'avantage de ces données est qu'elles couvrent l'ensemble du territoire et que des traitements statistiques permettent de réaliser des cartographies. Il s'agit donc ici de comparer les modèles basés sur les données spatialisées avec les modèles issus de bases de données ponctuelles du réseau et des données climatiques des stations Météo-France à proximité des placettes sur la période 1997-2013. L'ensemble des modèles qui seront utilisés par la suite sont précisés dans le tableau 3.15

Tableau 3.15 – Récapitulatif des variables présentes lors de la calibration des modèles utilisés dans cette étude. La présence d'une variable dans un modèle est symbolisée par le « x ». LA méthode utilisée est le Random Forest

Numéro de modèle	Échantillon	Variables spécifiques	Variables géographiques	Variables climatiques					
				12P	12T	12ETP	12Bhc	rad	vpd
5	SAF	x	x		tmoy	x	x		
6	SAF	essence	x		tmoy	x	x		
7	SAF	x			tmoy	x	x		
8	10 variables SAF	x	x		tmoy	x	x		
9	10 variables SAF				tmoy	x	x		
10	SAF	x	x		tmoy	x	x		x
11	SAF	x	x		tmoy	x	x	x	x
12	SAF	x			tmoy	x	x		x
13	SAF	x			tmoy	x	x	x	x

4.2.2.2.1 Comparaison entre les modèles globaux basés sur le jeu de données Météo-France (1) et les modèles fondés sur la base de données SAFRAN (5).

Le modèle (5) a été généré à l'aide des données SAFRAN, le classement des variables est donné par la figure 3.14 page 40. Il illustre, tout comme dans le cas des données Météo-France(3.7 page 32), une importance marquée de l'essence et des variables géographiques. En effet, dans le cas présent, l'essence est la variable qui concentre le plus de vraisemblance, suivie des coordonnées géographiques des placettes et de variables de mars ou avril. Pour le débourrement, les dix premières variables des deux modèles sont identiques. Pour le jaunissement, seules 2 des dix premières variables ne sont pas communes.

Figure 3.14 – Classement des variables du jeu de données SAFRAN en fonction de leur importance dans la détermination du jour de débourrement et de jaunissement des essences du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.

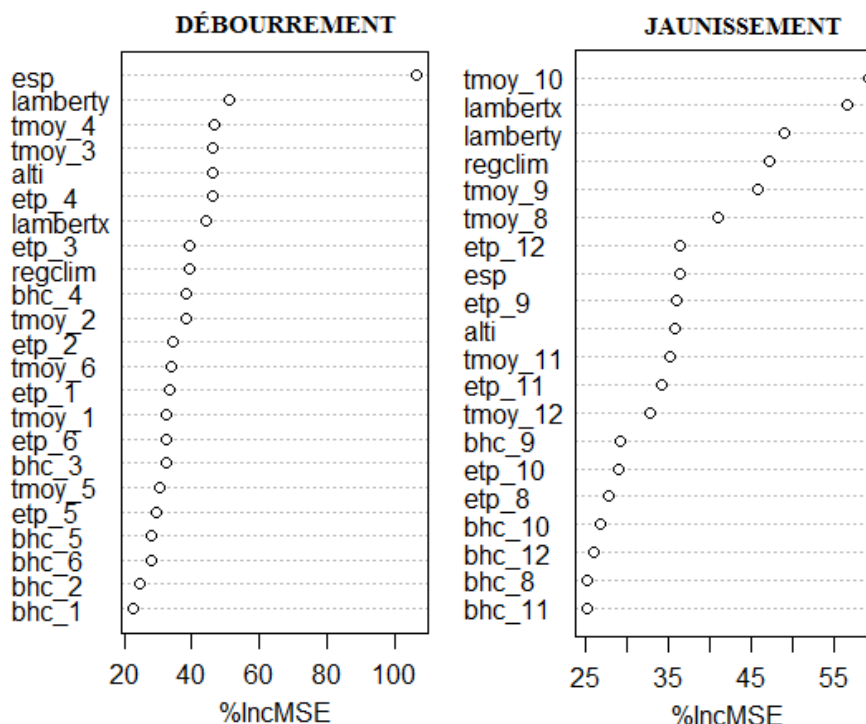


Tableau 3.16 – Comparaison des dates de débourrement et de jaunissement prédites par le modèle global calibré sur les données du réseau Météo-France (1) et le modèle global calibré sur les données SAFRAN (5).

Variable	Performances	Modèle 1	Modèle 5
Débourrement	Variance expliquée (en %)	77	77,4
	Nombre de prédictions	1949	1935
	Erreur de prédiction (Écart)	8,6 (4,7)	8,6 (4,5)
Comparaison	r^2	0,90	
	Écart de prédiction	4,8	
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	44,6	43,8
	Nombre de prédictions	1200	1133
	Erreur de prédiction (Écart)	10,7 (5,9)	10,7 (5,8)
Comparaison	r^2	0,97	
	Écart de prédiction	1,7	

Le tableau 3.16 reprend les résultats des comparaisons et met en évidence que les prédictions des modèles (1) et (6) sont similaires à 90% pour le débourrement et à 97% pour le jaunissement avec des erreurs et écarts de prédictions équivalents.

À l'échelle du réseau RENECOFOR et sur la période 1997-2013, l'utilisation de données spatialisées issues du traitement statistique SAFRAN n'affecte pas de manière significative les performances des modèles globaux de prédiction des jours de débourrement et de jaunissement.

4.2.2.2.2 Comparaison entre les modèles spécifiques fondés sur le jeu de données SAFRAN (6) et Météo-France (2).

Ce modèle global (6) a été appliqué à des essences feuillues (Hêtre et Chênes) et résineuses (Sapin et Épicéa) afin de les comparer avec le modèle global calibré sur les données SAFRAN et les modèles spécifiques calibrés

sur le jeu de données Météo-France (2).

Figure 3.15 – Classement des variables des modèles spécifiques SAFRAN pour la prédiction des jours de débourrement et de jaunissement des Chênes et du Hêtre sur la période 1997-2013.

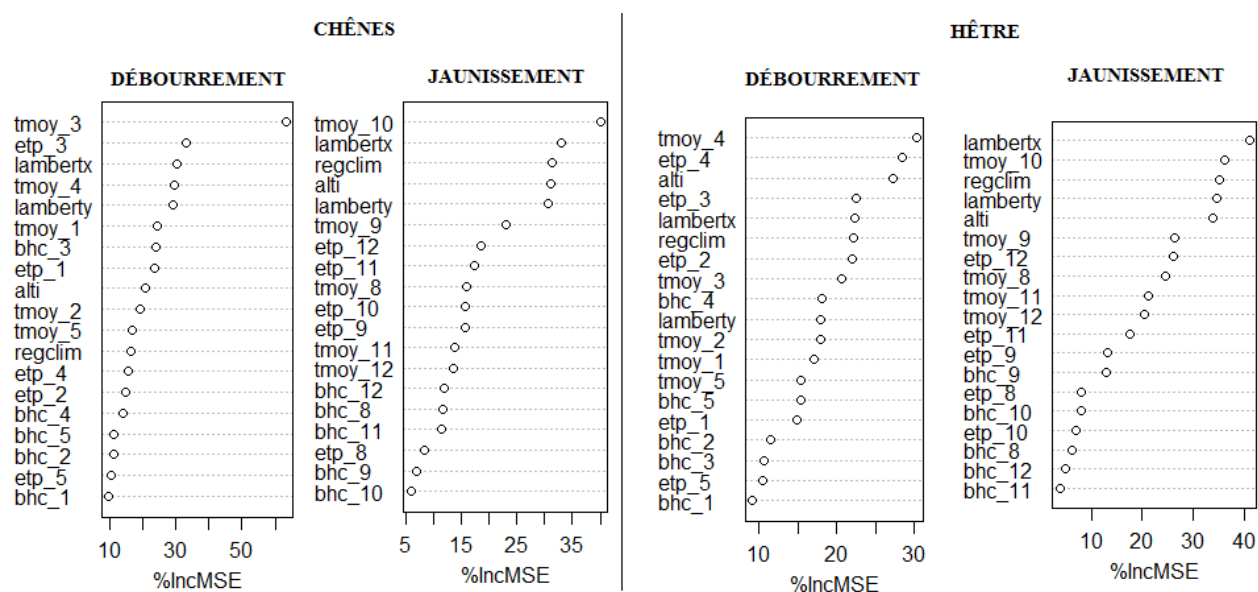


Tableau 3.17 – Comparaison des modèles spécifiques fondés sur la base de données SAFRAN (6) et Météo-France (2) pour la prédiction des jours de débourrement et de jaunissement de deux essences feuillues sur la période 1997-2013.

Variable	Performances	Chênes		Hêtre	
		SAFRAN (6)	MF (2)	SAFRAN (6)	MF (2)
Débourrement	Variance expliquée	49,4	45,9	53,2	53,5
	Nombre de prédiction	422	422	572	572
	Écart de prédiction(erreur)	7,4 (3,4)	7,7 (2,6)	7,8 (3,8)	7,7 (3)
Comparaison	r^2	0,95		0,98	
	Écart de prédiction	1,7		1,3	
	Nombre de variables communes (sur les 10 premières variables)	9		8	
Variable	Performances	Chênes		Hêtre	
		SAFRAN (6)	MF (2)	SAFRAN (6)	MF (2)
Jaunissement	Variance expliquée	35,5	32,8	41,7	41,5
	Nombre de prédiction	399	399	531	531
	Écart de prédiction(erreur)	10,1 (4,3)	10,3 (4,5)	11,8 (6,6)	12,1 (6,6)
Comparaison	r^2	0,96		0,98	
	Écart de prédiction	1,7		1,6	
	Nombre de variables communes (sur les 10 premières variables)	8		7	

Les résultats des comparaisons entre les modèles spécifiques de prédiction du débourrement et du jaunissement des Chênes et du Hêtre sont synthétisés dans le tableau 3.17. Pour les Chênes, il y a une similitude de 95% (pour le débourrement) et 96% (pour le jaunissement) entre les modèles SAFRAN (5) et Météo-France (2) avec dans les deux cas un écart de prédiction de 1,7 jours. Pour les deux essences, les modèles (2) et (6) de prédiction des jours de débourrement et de jaunissement présentent des performances équivalentes.

Figure 3.16 – Classement des variables des modèles spécifiques SAFRAN pour la prédiction des jours de débourrement et de jaunissement des Chênes et du Hêtre sur la période 1997-2013.

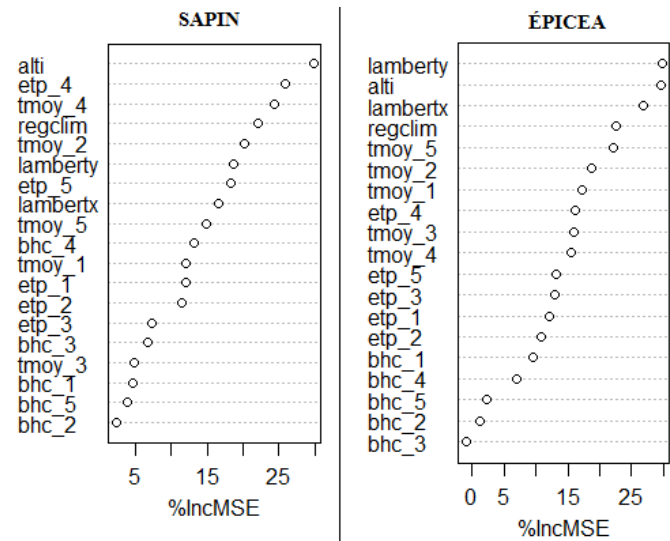


Tableau 3.18 – Comparaison des modèles spécifiques fondés sur la base de données SAFRAN et Météo-France pour la prédiction des jours de débourrement de deux essences résineuses sur la période 1997-2013.

Variable	Performances	Sapin		Épicéa	
		SAFRAN (6)	MF (2)	SAFRAN (6)	MF (2)
Débourrement	Variance expliquée	51,7	44,3	47,3	35,2
	Nombre de prédiction	201	201	137	137
	Écart de prédiction(erreur)	8,1 (3,8)	8,8 (4,1)	8,8 (4,3)	9,8 (4,6)
Comparaison	r^2	0,96		0,96	
	Écart de prédiction	1,7		1,6	
	Nombre de variables communes (sur les 10 premières variables)	7		7	

Le tableau 3.18 illustre la forte similarité qui existe entre les modèles (2) et (6) pour la prédiction des jours de débourrement du Sapin et de l'Épicéa. En effet, pour ces deux essences, le taux de correspondance est de 96% avec un écart de prédiction inférieur à 2 jours. Les performances des modèles montrent, cependant, des variances expliquées plus variables. Le modèle calibré sur les données SAFRAN semble expliquer une proportion plus importante de la variance observée sur le débourrement que le modèle Météo-France (7% supplémentaires pour le Sapin et 12% pour l'Épicéa). De même, les écarts et erreurs de prédictions sont légèrement inférieurs pour le modèle SAFRAN.

Les modèles spécifiques fondés sur les jeux de données Météo-France et SAFRAN sont fortement corrélés. Pour étudier les phénophases d'une essence, il est possible, tout comme pour la base de données Météo-France, d'utiliser le modèle calibré sur l'ensemble des observations et de l'appliquer à une essence particulière.

4.2.2.2.3 Comparaison entre les modèles basés sur l'ensemble des variables (5) et les modèles fondés uniquement sur les variables climatiques (7).

Il s'agit maintenant de comparer les modèles géo-climatiques et climatiques calibrés avec les variables du réseau Météo-France et du traitement statistique SAFRAN. Les variables d'entrée utilisées pour chacun des modèles sont précisées dans le tableau .35 à la page 77.

Tableau 3.19 – Comparaison des dates de débourrement et de jaunissement prédites par un modèle climatique calibré sur les données SAFRAN (7) comparées aux prédictions du modèle global fondé sur les données SAFRAN (5) et le modèle global calibré sur les données Météo-France (3) tous deux fondés sur des variables climatiques.

Variable	Performances	Modèle 3	Modèle 7	Modèle 5
Débourrement	Variance expliquée (en %)	73	73,8	77,4
	Nombre de prédictions	1949	1935	1935
	Erreur de prédiction (Écart)	8,4 (4,9)	9,3(4,8)	8,6 (4,5)
Comparaison	r^2	0,90		0,99
	Écart de prédiction	4,8		1,5
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	32,9	36,5	43,8
	Nombre de prédictions	1200	1133	1133
	Erreur de prédiction (Écart)	11,7 (4,5)	11,3 (5,9)	10,7 (5,8)
Comparaison	r^2	0,94		0,98
	Écart de prédiction	2,4		1,4

Le tableau récapitulatif 3.19 montre une très forte corrélation entre les modèles de débourrement et de jaunissement de type géo-climatique (5) et climatique (7), avec des écarts de prédiction faibles. La comparaison entre les modèles climatiques calibrés sur les jeux de données Météo-France et SAFRAN montre 90% de similitude pour le débourrement et 94% pour le jaunissement, avec des écarts de prédictions de respectivement 4,8 et 2,4 jours. Ces écarts sont équivalents à ceux qui ont été trouvés entre les modèles de prédictions géo-climatique et climatique fondés sur la base de données Météo-France(modèles (1) et (3) voir tableau 3.9 page 33).

La figure 3.17 montre une absence de biais entre les modèles. De plus, il y a une forte correspondance entre les modèles SAFRAN globaux et restreints aux variables climatiques. Ainsi, le fait de ne travailler qu'avec des données climatiques n'engendre pas d'erreur significative sur le résultat des prédictions.

La restriction de la calibration des modèles aux variables climatiques n'engendre pas d'erreur de prédiction significative par rapport au modèle géo-climatique.

La suite de l'étude va porter sur la comparaison entre le modèle SAFRAN calibré sur toutes les variables (5) et le modèle SAFRAN (8) calibré sur les 10 premières variables de ce modèle. Il s'agit ici de vérifier la maintien de la stabilité des modèles lorsque l'on influe sur le critère de parcimonie.

Figure 3.17 – Comparaisons graphiques (régression linéaires et résidus) entre, à gauche, les modèles 3 et 7, et à droite, les modèles 5 et 7.

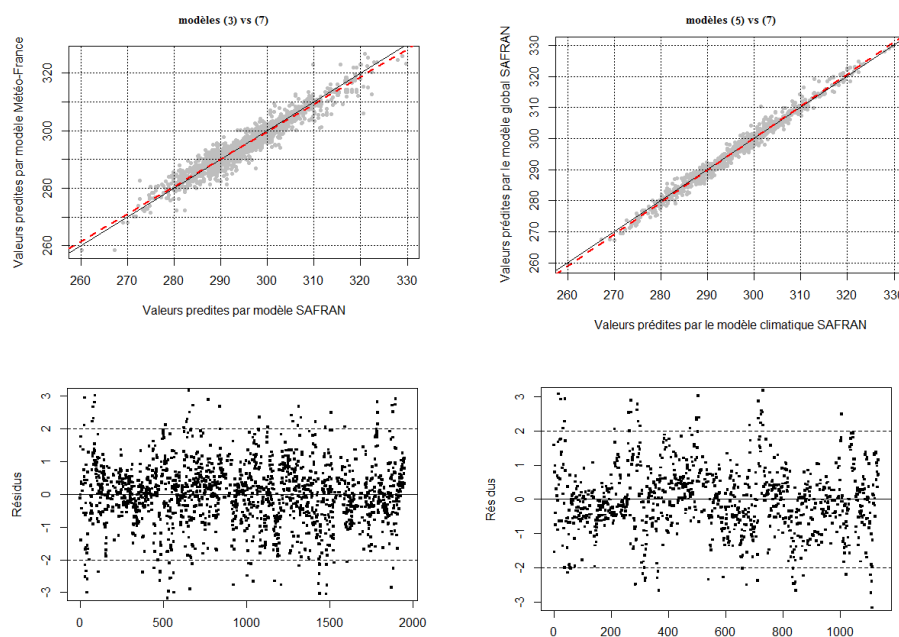


Tableau 3.20 – Comparaisons entre le modèle global (5) fondé sur les données SAFRAN et le modèle qui ne prend en compte que les dix premières variables (8). Ce modèle est ensuite comparé avec le modèle dix variables fondé sur le jeu de données Météo-France (4).

Variable	Performances	Modèle 4	Modèle 8	Modèle 5
Débourrement	Variance expliquée (en %)	73	79	77,4
	Nombre de prédictions	1949	1935	1935
	Erreur de prédiction (Écart)	9,4 (4,9)	8,3 (4,7)	8,6 (4,5)
Comparaison	r^2	0,83		0,99
	Écart de prédiction	6,5		1,6
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	32,8	46,5	43,8
	Nombre de prédictions	1200	1133	1133
	Erreur de prédiction (Écart)	11,3 (4,5)	10,4 (5,9)	10,7 (5,8)
Comparaison	r^2	0,94		0,98
	Écart de prédiction	2,5		1,3

Le tableau 3.20 montre que les correspondances entre les modèles géo-climatiques et les modèles ne se basant que sur les 10 premières variables sont de 99% pour le débourrement et de 98% pour le jaunissement.

Comme le montrent les résultats des régressions linéaires et les graphiques des résidus de la figure 3.18, il n'y a pas de dérive des modèles et les performances sont très proches. Même si l'utilisation de données spatialisées engendre une perte d'information locale, les modèles créés sur la base de ces données spatialisées restent stables.

La calibration de modèles sur les 10 premières variables n'entraîne pas de différence notable dans les performances en comparaison avec le modèle global.

L'analyse suivante porte sur la comparaison entre le modèle climatique (7) et le modèle basé sur les 10 variables qui concentrent le plus de vraisemblance.

Figure 3.18 – Comparaisons graphiques (régression linéaires et résidus) entre les modèles basés sur 10 variables et calibrés sur les jeux de données Météo-France (modèle 4) et SAFRAN (modèle 8) pour la prédiction des dates de débourrement et de jaunissement des 10 essences forestières du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.

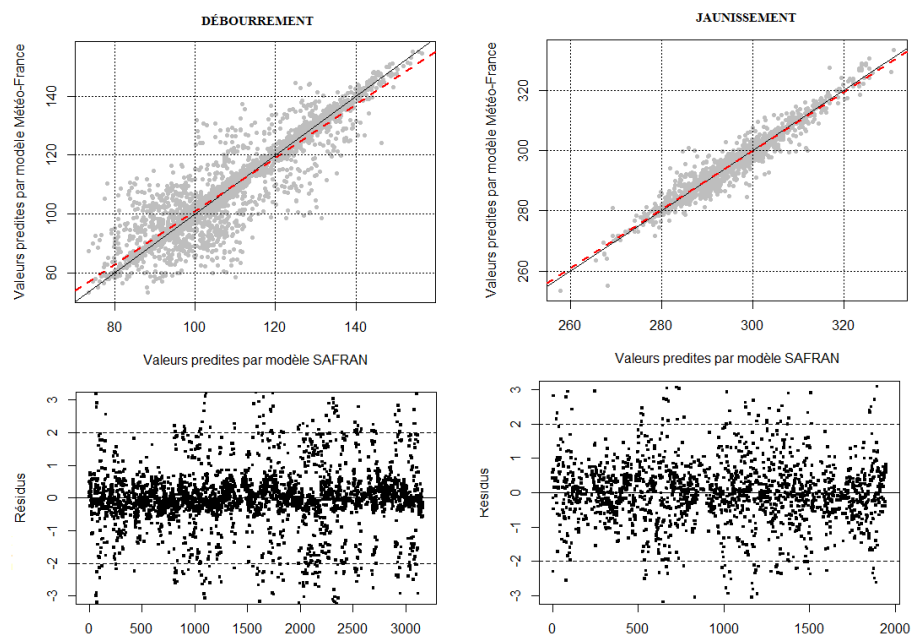


Tableau 3.21 – Comparaison des dates de débourrement et de jaunissement prédites par le modèle climatique calibré sur les données SAFRAN (7) et le modèle calibré sur les 10 premières variables climatiques (9).

Variable	Performances	Modèle 7	Modèle 9
Débourrement	Variance expliquée (en %)	73,8	74
	Nombre de prédictions	1935	1935
	Erreur de prédiction (Écart)	9,3 (4,8)	9,3 (4,8)
Comparaison	r^2	0,99	
	Écart de prédiction	1	
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	36,5	36
	Nombre de prédictions	1133	1133
	Erreur de prédiction (Écart)	11,3 (5,9)	11,4 (6)
Comparaison	r^2	0,99	
	Écart de prédiction	0,9	

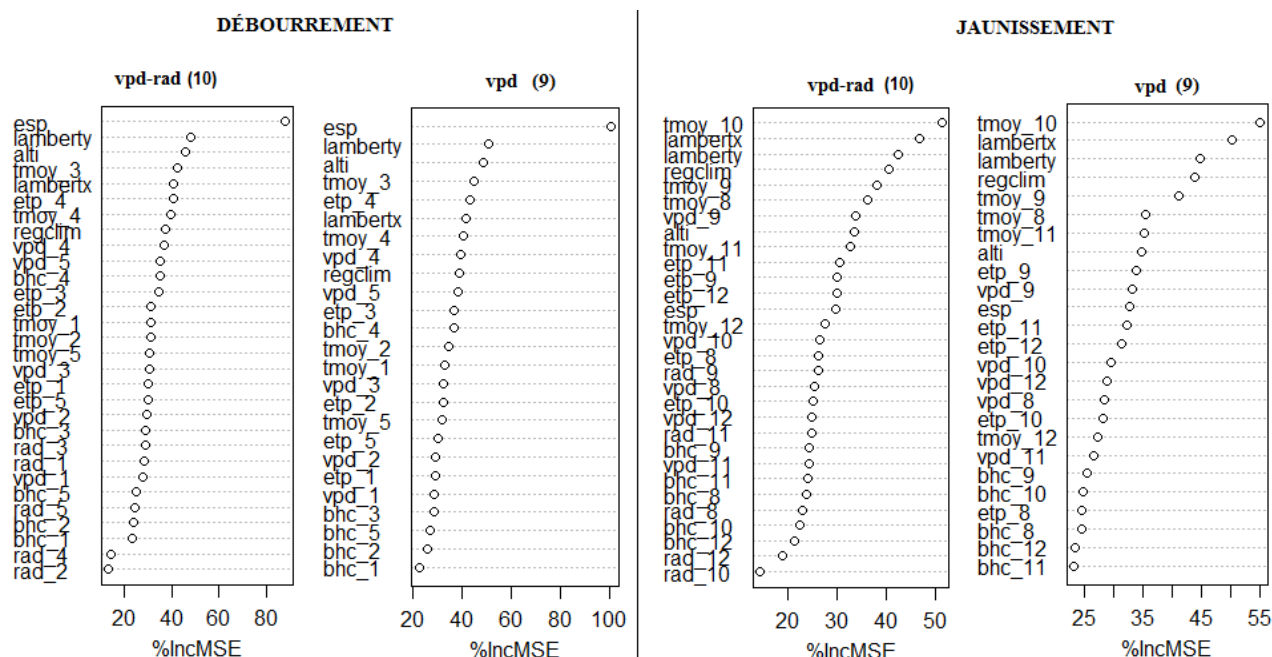
Le tableau 3.21 met en évidence la très importante corrélation qui existe entre les modèles climatiques (7) et les modèles basés sur les 10 premières variables. En effet, les performances sont identiques et les écarts de prédictions entre les modèles sont de l'ordre de 1 jour. Ceci montre que la vraisemblance des modèles est portée par un faible nombre de variables et que, notamment pour le débourrement, l'essence a un rôle primordial dans le déterminisme de cette phénophase.

La calibration de modèles sur les 10 premières variables climatiques n'entraîne pas de différence notable dans les performances en comparaison avec le modèle calibré uniquement sur des variables climatiques.

4.2.2.2.4 Introduction dans les modèles des variables de pression de vapeur d'eau (9) et de radiation (10).

Le jeu de données SAFRAN comprend des variables mensuelles relatives à la pression de vapeur d'eau et au rayonnement. L'analyse suivante se propose d'évaluer les apports de telles variables dans les performances des modèles de prédiction.

Figure 3.19 – Classement des variables du jeu de données SAFRAN en fonction de leur importance dans la détermination du jour de débourrement et de jaunissement des essences du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013 en suivant les modèles (9) et (10).



Les classements de variables de la figure 3.19 révèlent que certaines variables mensuelles de pression de vapeur d'eau se classent parmi les 10 qui concentrent le plus de vraisemblance pour la détermination du débourrement et du jaunissement, ce qui n'est pas le cas pour les radiations.

Tableau 3.22 – Comparaison des modèles calibrés à l'aide de l'ensemble des variables climatiques et géographiques (5) avec un modèle similaire qui comprennent la variable de pression de vapeur d'eau (9) et un modèle qui comprend en plus la variable de radiation (10).

Variable	Performances	Modèle 10	Modèle 9	Modèle 5
Débourrement	Variance expliquée (en %)	75,7	76,9	77,4
	Nombre de prédictions	1935	1935	1935
	Erreur de prédiction (Écart)	9 (4,6)	8,7 (4,5)	8,6 (4,5)
Comparaison	r^2	0,99		0,99
	Écart de prédiction	0,6		0,5
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	42	42,7	43,8
	Nombre de prédictions	1133	1133	1133
	Erreur de prédiction (Écart)	10,8 (5,8)	10,8 (5,8)	10,7 (5,8)
Comparaison	r^2	0,99		0,99
	Écart de prédiction	0,4		0,4

Les analyses synthétisées dans le tableau 3.22 ne montrent pas d'amélioration notable des modèles avec l'introduction de la variable « vpd » (9). Pour les deux phases phénologiques s'observe une faible diminution du pourcentage de variance expliquée, passant de 77 à 76% pour le débourrement et de 44 à 43% et des écarts de prédictions inférieurs à 1 jour. L'introduction de la variable qui rend compte de la quantité de lumière reçue, le « rad », dans un modèle qui comprend déjà la variable de pression de vapeur d'eau ne participe à l'augmentation des performances de ce modèle. Dans le cas de modèles purement climatiques, le classement des variables est donné par la figure 3.20

Avec l'absence de variables géographiques dans ce type de modèle, la vraisemblance détenue par les variables mensuelles de pression de vapeur d'eau et de radiation augmente.

Figure 3.20 – Classement des variables du jeu de données SAFRAN en fonction de leur importance dans la détermination du jour de débourrement et de jaunissement des essences du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013 en suivant les modèles (11) et (12).

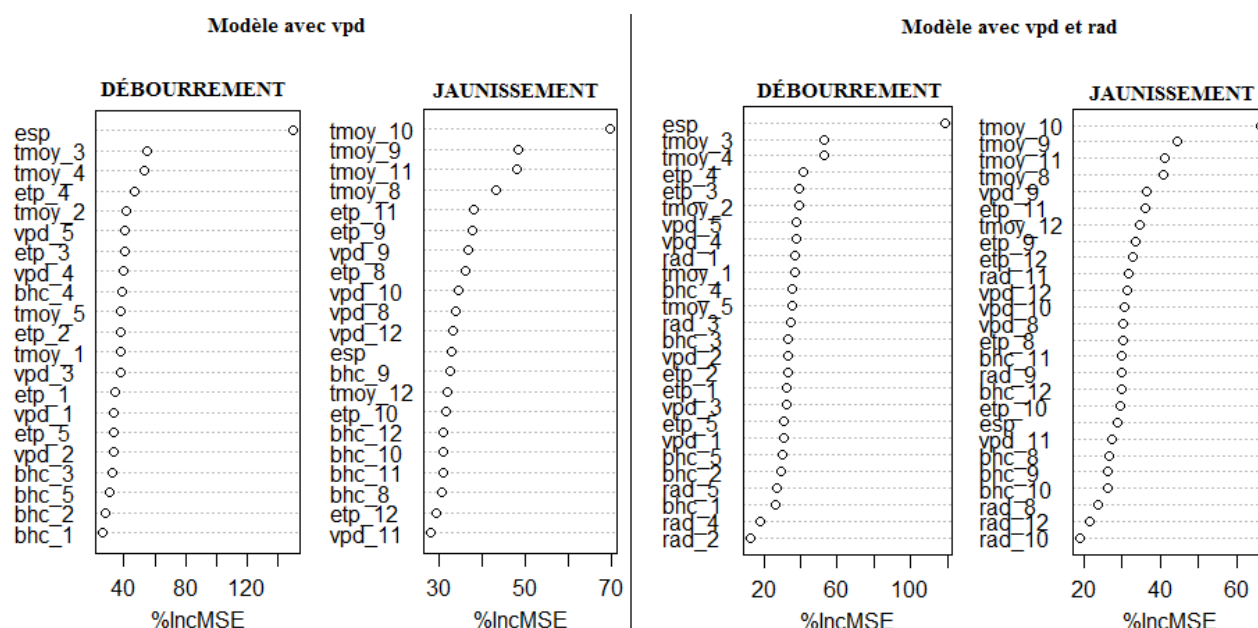


Tableau 3.23 – Comparaison entre les modèles basés sur l'ensemble de variables climatiques (7), qui comprend les mêmes variables climatiques et le vpd (11) et un modèle qui comprend en plus la variable de rad (12).

Variable	Performances	Modèle 11	Modèle 12	Modèle 7
Débourrement	Variance expliquée (en %)	73,4	72,5	73,8
	Nombre de prédictions	1935	1935	1935
	Erreur de prédiction (Écart)	9,4 (4,7)	9,5 (4,7)	9,3 (4,8)
Comparaison	r^2	0,99		0,99
	Écart de prédiction	0,6		1,1
Jaunissement	Variance expliquée (en %)	36,5	37,1	36,5
	Nombre de prédictions	1133	1133	1133
	Erreur de prédiction (Écart)	11,3 (5,9)	11,3 (5,8)	11,3 (5,9)
Comparaison	r^2	0,99		0,99
	Écart de prédiction	0,5		0,8

Les résultats compilés dans le tableau 3.23 montrent que pour les prédictions des jours de débourrement et de jaunissement, l'introduction des variables de radiation et de pression de vapeur d'eau engendre des modèles très semblables aux modèles climatiques (7). Le gain en performance est faible. Cependant, il semblerait que pour le débourrement il soit préférable de conserver un modèle climatique qui comprend la variable de pression de vapeur d'eau seule (11).

Pour le jaunissement, le modèle prenant en compte à la fois le vpd et les radiations présente des performances très légèrement supérieures au modèle de référence (7). La création d'un modèle climatique qui se base en plus sur les variables de radiation ne présente pas de performances améliorées par rapport aux modèles (11) et (12).

L'utilisation des variables de pression de vapeur d'eau et de radiation est justifiée pour des modèles climatiques. Le « vpd » permet une amélioration des modèles de prédiction du débourrement ; et cette variable combinée au « rad » augmente les performances des modèles de prédiction du jaunissement.

4.2.3 Modélisations rétrospectives

4.2.3.1 Reconstitution de l'évolution des phénophases sur la période 1961-2013 à l'aide des données SAFRAN

Le modèle (13) a été appliqué aux données climatiques SAFRAN pour la période 1961-2013 afin de reconstituer les dates de débourrement et de jaunissement pour chaque essence.

Figure 3.21 – Reconstitution de l'évolution du jour moyen de débourrement pour les 10 essences étudiées jusqu'en 2013 à l'aide des données des stations Météo-France. La ligne en pointillé correspond à l'année 1997 (début des relevés phénologiques sur le réseau RENECOFOR).

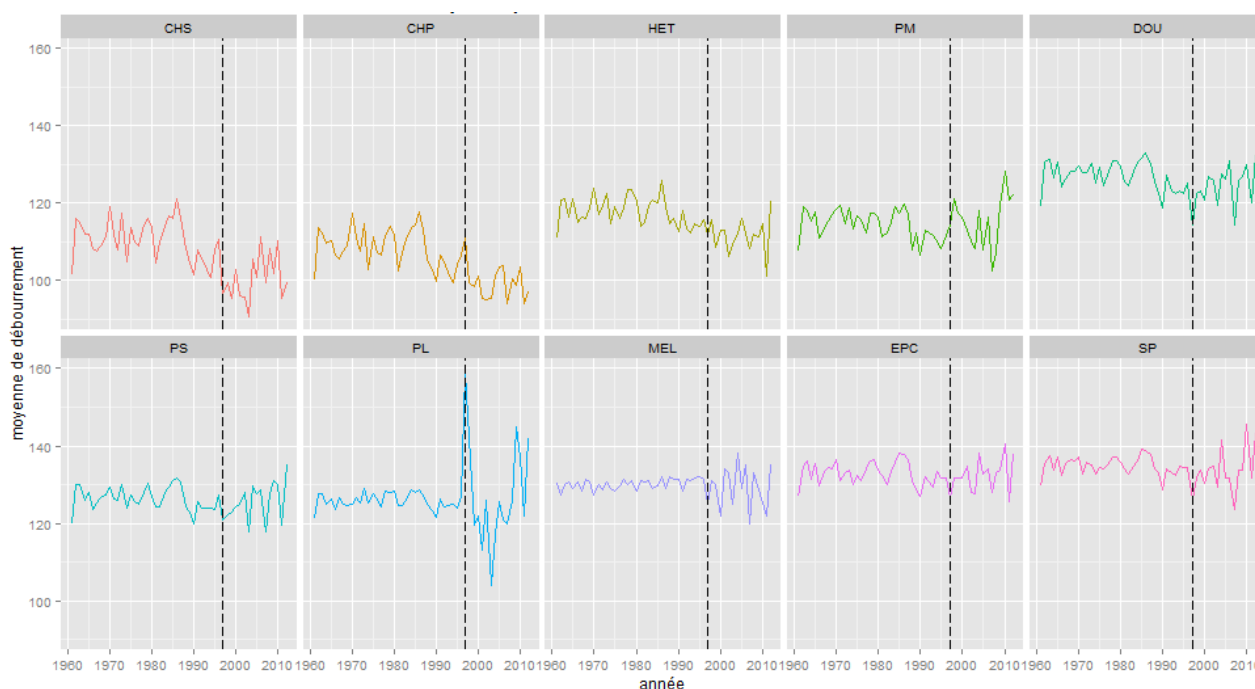
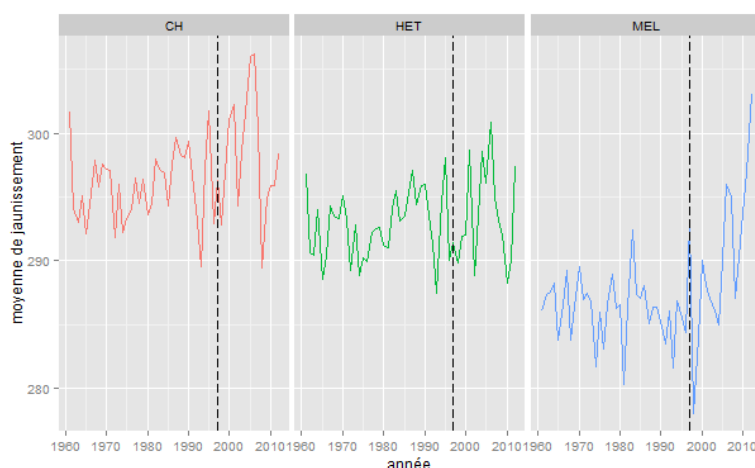


Figure 3.22 – Reconstitution de l'évolution du jour moyen de jaunissement pour les essences décidées étudiées jusqu'en 2013 à l'aide des données des stations Météo-France. La ligne en pointillé correspond à l'année 1997 (début des relevés phénologiques sur le réseau RENECOFOR).



La figure 3.21 met en évidence, pour la majorité des essences, une précocité du débourrement autour des années 1985 et qui semble s'inscrire dans une tendance qui affecte encore aujourd'hui les individus. Un phénomène de décrochement s'observe vers 1985, or on considère que c'est depuis ces années là qu'une forte hausse des températures s'opère.

Pour le jaunissement, la figure 3.22 ne révèle pas de tendance quant au déclenchement de cette phase. Il apparaît, néanmoins, que les fluctuations inter-annuelles soient plus importantes depuis 1985.

Tableau 3.24 – Tendances d'évolution des phénophases pour les 10 essences du réseau RENECOFOR sur la période 1961-2013.

Variable phénologique	Essence	<i>Équation de la régression</i>		<i>Performances du modèle</i>	Tendance sur 53 ans (en jours)
		a	b	r ²	
Débourrement	CHS	725	-0,31	0,46	-16,43
	CHP	717	-0,31	0,548	-16,43
	HET	569	-0,23	0,426	-12,19
	PM	438	-0,17	0,352	-9,01
	DOU	381	-0,13	0,184	-6,89
	PS	120	-0,00062	0,000007	0
	PL	7,4	0,058	0,0224	3,074
	MEL	9,8	0,061	0,152	3,233
	EPC	106	0,012	0,0327	0,636
	SP	72	0,03	0,0214	1,59
Jaunissement	CH	161	0,068	0,0847	3,604
	HET	213	0,04	0,0414	2,12
	MEL	91	0,099	0,119	5,247

Le tableau 3.24 montre que, en moyenne, le débourrement des feuillus se déroule 15 jours plus tôt et le jaunissement 3 jours plus tard qu'il y a 50 ans, aboutissant à un allongement de la saison de végétation de 18 jours. Pour les résineux, le débourrement a lieu 1 jour plus tôt. Pour les essences décidues, comprenant les feuillus et le Mélèze, le débourrement est hâté de 10,5 jours et le jaunissement retardé de 3,7 jours. La longueur de la saison de végétation a donc progressé de 15 jours depuis 50 ans.

4.2.3.2 Cartographie de l'évolution passée des événements phénologiques à l'aide des données spatialisées SAFRAN

Figure 3.23 – Évolution du débourrement des Chênes et du Hêtre entre 1961 et 2010, avec un pas de temps de 10 ans.

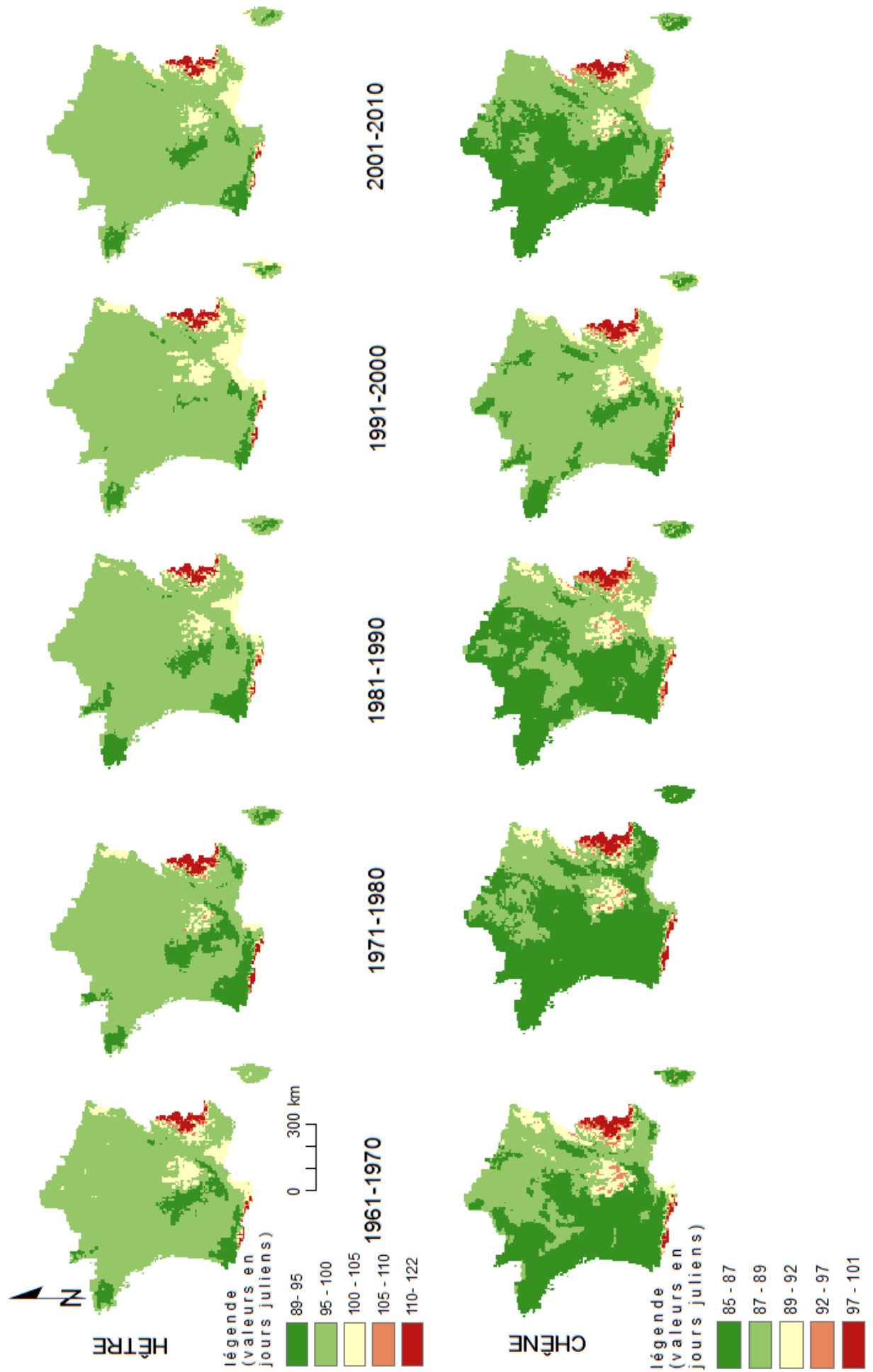


Figure 3.24 – Évolution du jaunissement des Chênes et du Hêtre entre 1961 et 2010, avec un pas de temps de 10 ans.

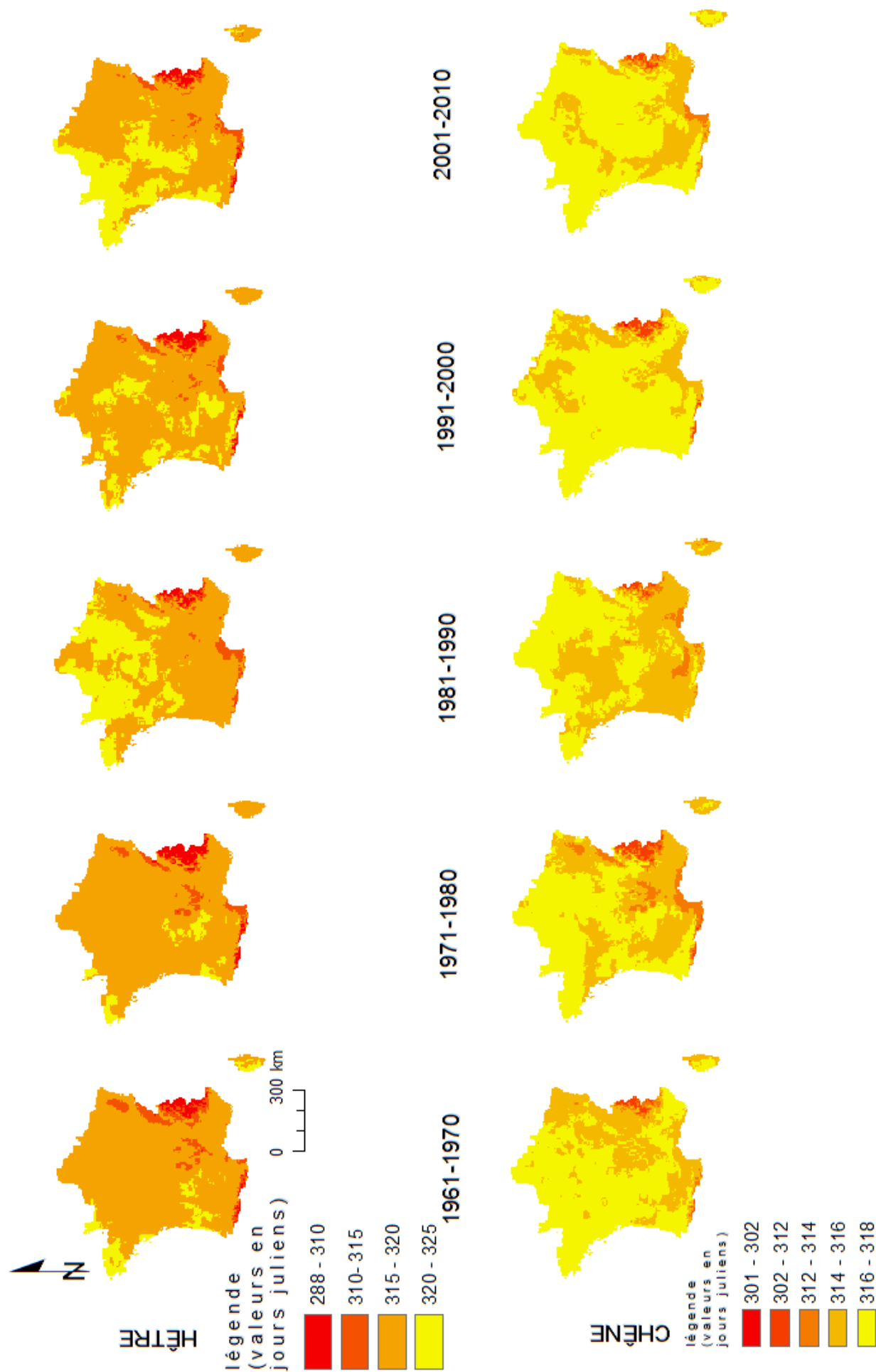


Figure 3.25 – Moyennes des prédictions des jours de débourrement des Chênes et du Hêtre entre 1961 et 2010, avec un pas de temps de 10 ans en suivant des modèles spécifiques (12).

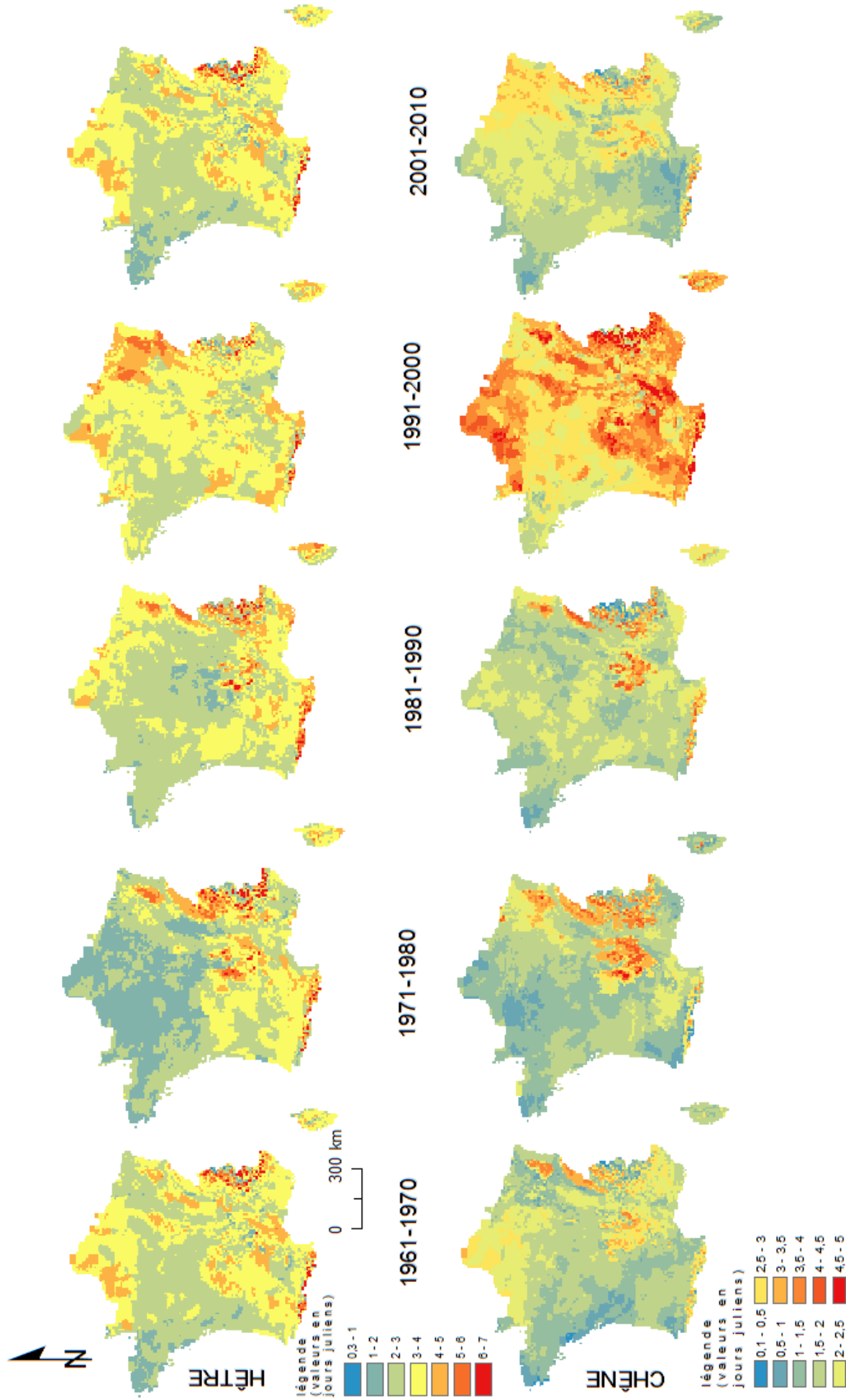
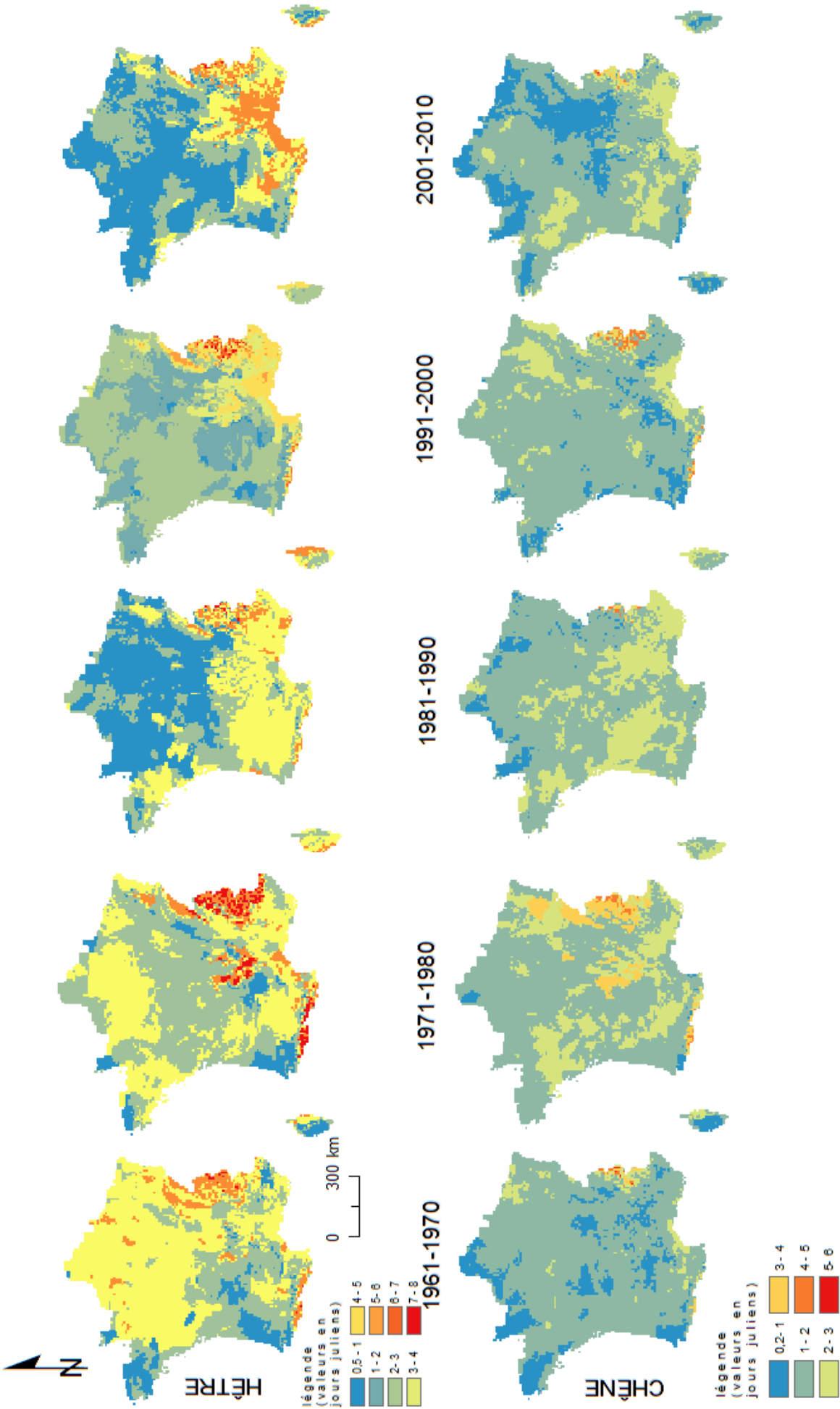


Figure 3.26 – Moyennes des prédictions des jours de jaunissement des Chênes et du Hêtre entre 1961 et 2010, avec un pas de temps de 10 ans en suivant des modèles spécifiques (12).



Sur les cartes de reconstitution des jours de débourrement des essences entre 1961 et 2010, il y a peu d'évolution pour le Hêtre sur la partie Nord de la France. Le débourrement se déroule entre les jours juliens 95 et 100 avec une légère précocité en Bretagne, et une tardiveté vers les Vosges et le Jura. Pour les Chênes, il y a une progression de la zone qui symbolise un débourrement compris entre les jours juliens 85 et 87 qui suit un gradient de continentalité, ce qui correspond à une précocité de 1 à 2 jours. La décennie 1991-2000 semble particulière dans la mesure où il y a un retard de 1 à 2 jours du débourrement sur une grande partie du territoire. Il y a cependant une similitude entre ces essences et sur toute la période 1961-2010, des zones correspondant aux massifs montagneux (Alpes, Pyrénées) présentent un retard de presque 1 mois par rapport aux plaines. Cet effet s'observe également pour les massifs moins élevés comme les Vosges, le Jura et le Massif Central mais a une amplitude moins importante.

Cette similarité est également notable sur les cartes qui représentent l'évolution du jaunissement sur la figure 3.24. Il est moins marqué que pour le débourrement et traduit cette fois-ci une précocité du jaunissement. Ainsi, dans ces zones, la longueur de saison de végétation est plus réduite que sur le reste du territoire. En effet, elle est d'environ 180 jours pour le Hêtre en altitude et est supérieure à 200 jours en plaine. Dans la partie Nord de la France, le jaunissement du Hêtre se déroule entre les jours juliens 315 et 320 avec une tendance à la tardiveté entre 1981 et 2010 marquée par un gradient de continentalité. Chez les Chênes, dans cette même zone, le jaunissement est compris entre les jours juliens 314 et 318 sans qu'il y ait de tendance observable.

Les variations sur les jours de débourrement montrent que les essences présentent des réponses à leur environnement relativement proches. En effet, les cartes de la figure 3.25 présentent de nombreux points communs notamment au niveau de la délimitation des zones de variations du jours de débourrement. Cependant, il semblerait que, quelque soit la décennie, les variations de débourrement sont plus importantes chez le Hêtre que chez les Chênes. Entre 1991 et 2000, les dates de débourrement présentent des variations importantes comprises entre 2 et 5 jours sur la totalité du territoire pour les Chênes et de 3 à 7 jours pour le Hêtre. Globalement, comme le montre la figure 3.26, les variations observées pour cette phénophase sont moins importantes que pour le débourrement. Pour les Chênes, il y a une évolution progressive de 1 à 3 jours par décennies sur toute la France. Chez le Hêtre, entre 1961 et 1980, les variations de jaunissement sont de 3 à 5 jours dans la partie Nord de la France, pour ensuite être inférieures à 3 jours entre 1981 et 2010.

4.2.3.2 Utilisation des données homogénéisées pour des prédictions rétrospectives sur la partie Nord de la France

Cette analyse repose sur un modèle spécifique et ne comprend pas les variables géographiques. L'échantillon de calibration sera restreint aux Chênes et aux Hêtres dont les placettes se situent dans les régions climatiques « ODN », « ONO », « ODC », et « SC ». Les prédictions seront effectuées en se basant sur les données climatiques de la base de données homogénéisées pour reconstituer l'évolution du jour moyen de débourrement et de jaunissement sur plusieurs décennies.

Figure 3.27 – Reconstitution de l'évolution du jour moyen de débourrement et de jaunissement pour les Chênes (CH) et le Hêtre (HET) avec les données homogénéisées des stations du Nord de la France en suivant un gradient Ouest-Est (de la gauche vers la droite). La ligne en pointillé correspond à l'année 1997 (début des relevés phénologiques sur le réseau RENECOFOR).

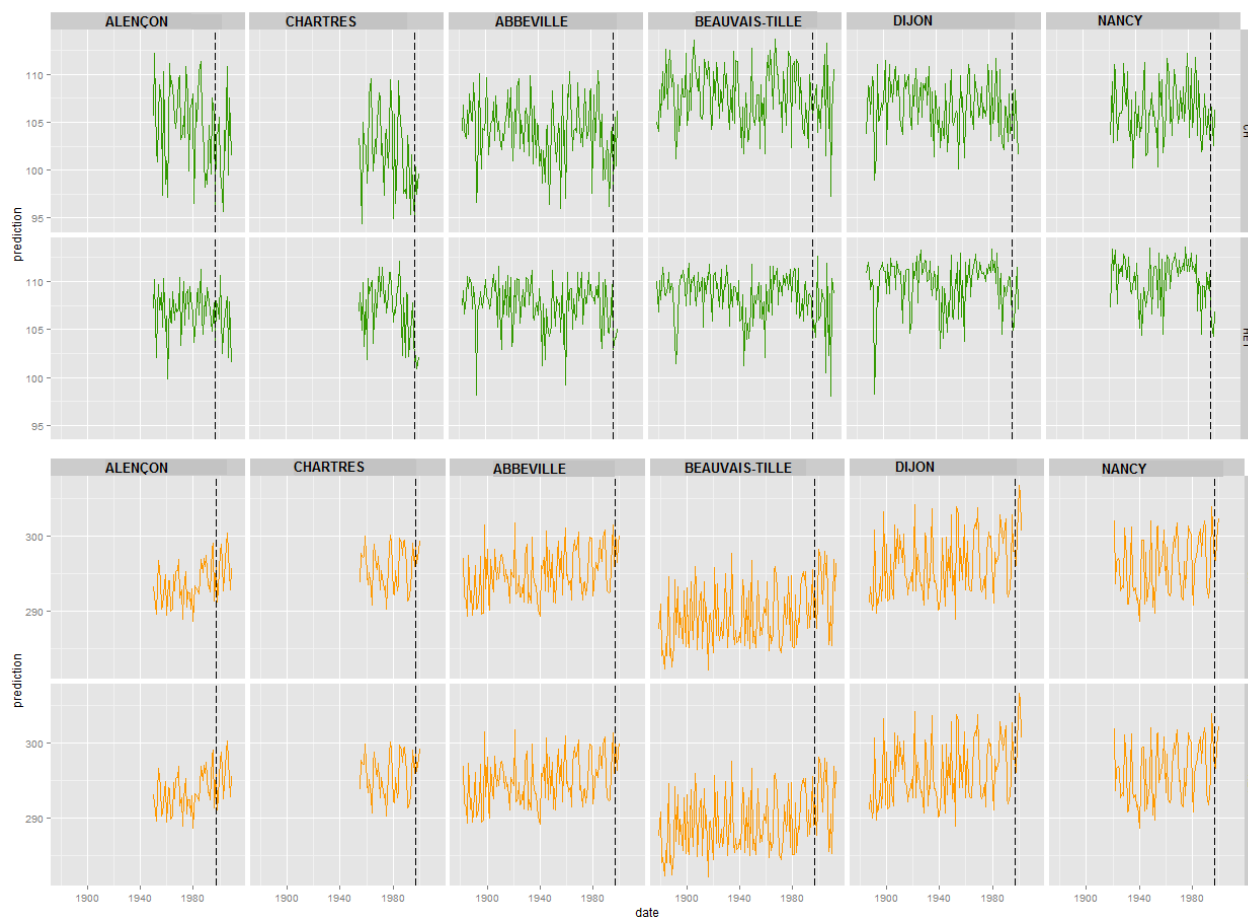


Tableau 3.25 – Tendances d'évolution des jours moyens de débourrement et de jaunissement des Chênes et du Hêtre sur la période 1961-2013 pour les 13 stations de la base de données homogénéisées

Station	Essence	Moyenne de débourrement	Ecart-type	Moyenne de jaunissement	Ecart-type
ALENÇON	CH	102	4	296	3
	HET	107	3	300	3
CHARTRES	CH	104	3	295	3
	HET	107	3	300	3
ABBEVILLE	CH	106	3	296	4
	HET	110	2	302	3
BEAUVAIS-TILLE	CH	107	3	296	4
	HET	110	3	301	3
DIJON-LONGVIC	CH	104	4	294	3
	HET	107	2	296	3
NANCY	CH	108	3	290	4
	HET	108	3	296	3

Le tableau 3.25 montre un gradient longitudinal de débourrement orienté Ouest-Est. Le décalage entre Alençon et Nancy est de 6 jours pour les Chênes alors que pour le Hêtre, il est de 1 à 3 jours. Pour le jaunissement, c'est un gradient Est-Ouest qui s'observe pour les deux essences. Le retard est de 6 jours pour les Chênes et de 4 jours pour le Hêtre. Ainsi, la période de végétation est plus courte à l'Est qu'à l'Ouest.

Tableau 3.26 – Comparaison entre les dates de débourrement et de jaunissement prédites à l’aide des données SAFRAN et de la base de données homogénéisées pour les Chênes et les Hêtres entre 1961 et 2013.

Variable	Performances	Chênes	Hêtre
Débourrement	r^2	0,36	0,47
	p-value	4.10^{-6}	2.10^{-8}
	Écart de prédiction	5,1	4,2
Jaunissement	r^2	0,22	0,22
	p-value	3.10^{-4}	3.10^{-4}
	Écart de prédiction	3,1	4,2

Le tableau 3.26 montre que les écarts de prédictions entre les bases de données SAFRAN et homogénéisées sont compris entre 3,1 et 5,1 sans présence de biais systématique. Les p-values sont très faibles, ce qui montre que les prédictions réalisées en fonction de ces deux jeux de données sont proches.

4.2.4 Projections des dates de débourrement et de jaunissement sur les période 2046-2065 et 2081-2100 en fonction de 3 modèles de changement climatique

La figure 3.28 présente les prédictions de débourrement pour les Chênes. Celles-ci sont très proches pour les modèles CNRM-CM3 et MIROC3_2-MEDRES et pour les deux périodes.

Le modèle CSIRO-MK3_0 prévoit un retard de débourrement qui peut atteindre 5 jours pour la moitié Nord de la France. Pour les deux autres modèles, le même constat est réalisable à la seule différence que cette zone est réduite au Nord-Est de la France.

Entre les périodes 2045-2065 et 2081-2100, il y a une progression de la zone qui prévoit un retard de débourrement.

Pour le Hêtre, voir la figure 3.29, une partie croissante de la zone Est entre les modèles MIROC3_2-MEDRES, CNRM-CM3, CSIRO-MK3_0 où est prévue une précocité du débourrement au maximum de 8 jours. Les 3 modèles prévoient un retard allant jusqu’à 4 jours dans tout le Nord de la France.

Entre les deux périodes, il y a une progression des zones orange et verte sur la zone jaune. En plaine, le retard de débourrement tend à s’accroître. Alors que sur l’Est et en altitude, le débourrement est de plus en plus précoce.

Les cartes de la figure 3.30 présentent les prédictions d’évolution du jour de jaunissement des Chênes. Il y a un gradient dont le centre se situe dans le bassin Parisien et où est prévu un débourrement plus précoce de 2 jours. En s’éloignant, le débourrement devient plus tardif de 2 puis 4 jours.

Entre les périodes, il y a une croissance importante des zones qui prévoient une précocité de débourrement de 2 jours pour les modèles CNRM-CM3 et MIROC3_2-MEDRES, menant à des prédictions presque identiques entre ces deux modèles pour la période 2081-2100. Pour le modèle CSIRO-MK3_0, le débourrement serait plus précoce de 2 jours sur les côtes de l’Ouest et sur une partie de l’Est.

La figure 3.31 reprend les prédictions d’évolution du jour de jaunissement pour le Hêtre. Sur la partie Nord de la France, est prévu un recul du jaunissement compris entre 0 et 5 jours, qui peut atteindre 5 à 10 jours sur l’extrême Est.

Figure 3.28 – Prédiction de l'évolution du débourrement des Chênes entre 2046-2065 et 2081-2100 en fonction de trois modèles de changement climatique en suivant le scénario A1B

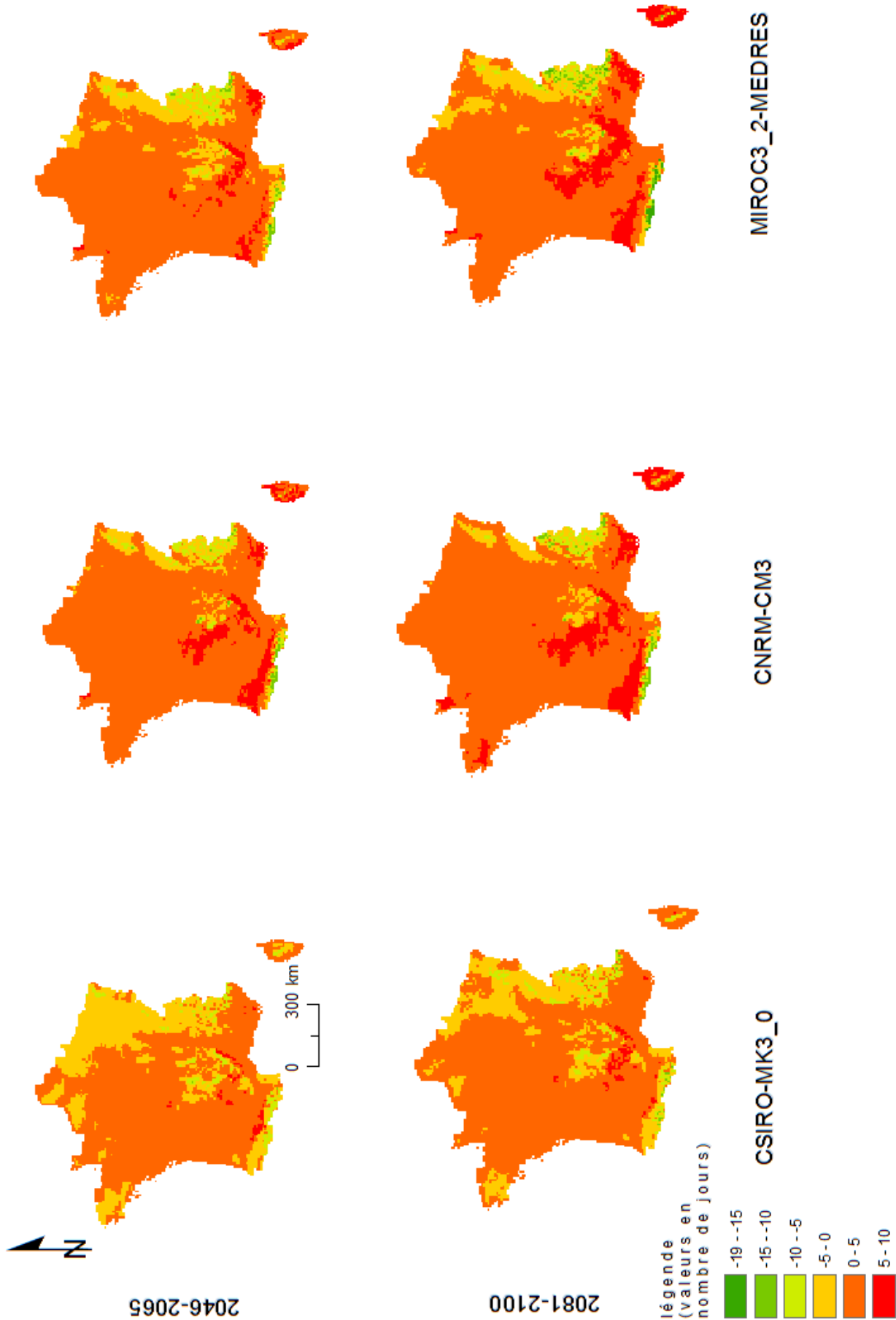


Figure 3.29 – Prédiction de l'évolution du débournement du Hêtre entre 2046-2065 et 2081-2100 en fonction de trois modèles de changement climatique en suivant le scénario A1B

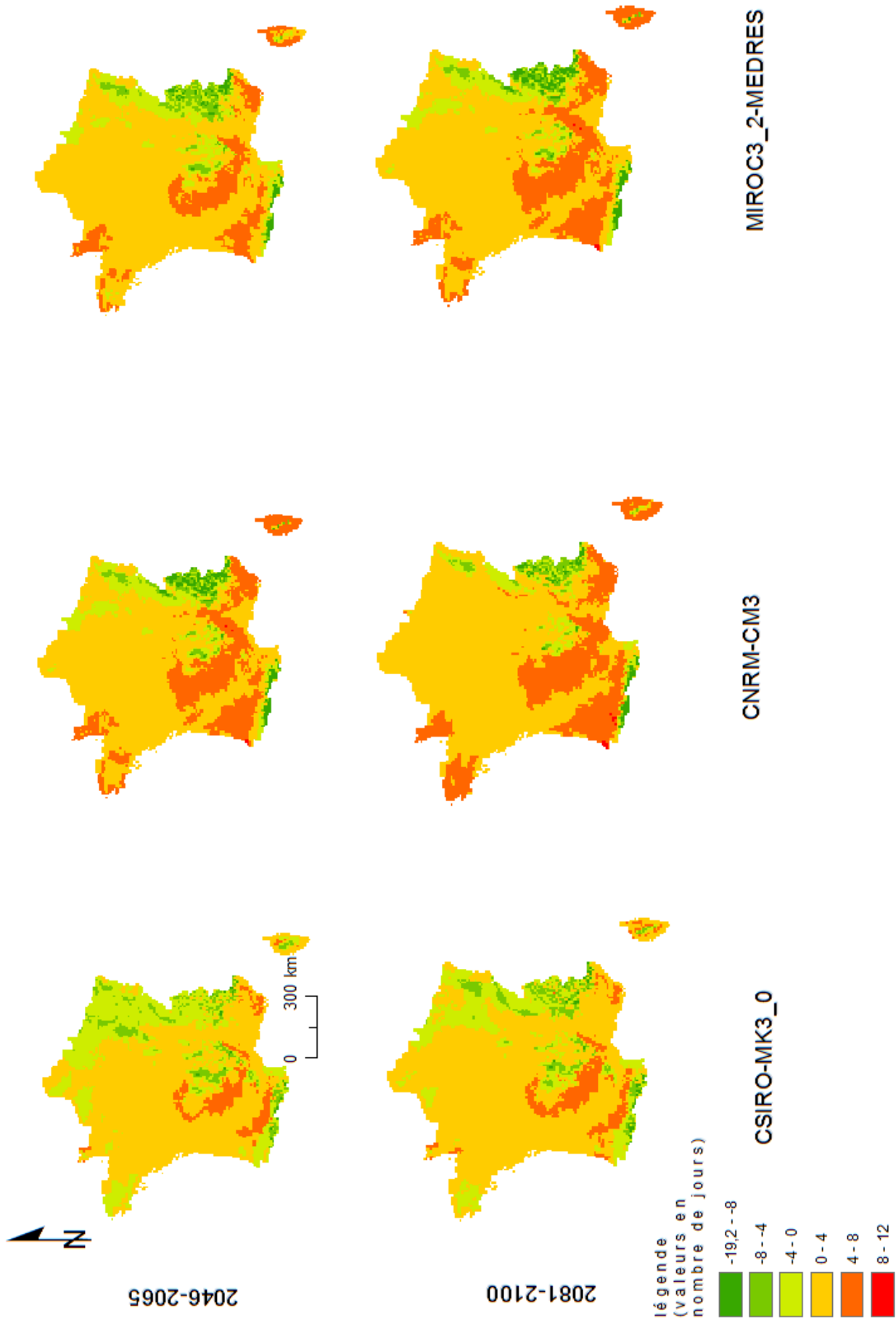


Figure 3.30 – Prédiction de l'évolution du jaunissement des Chênes entre 2046-2065 et 2081-2100 en fonction de trois modèles de changement climatique en suivant le scénario A1B

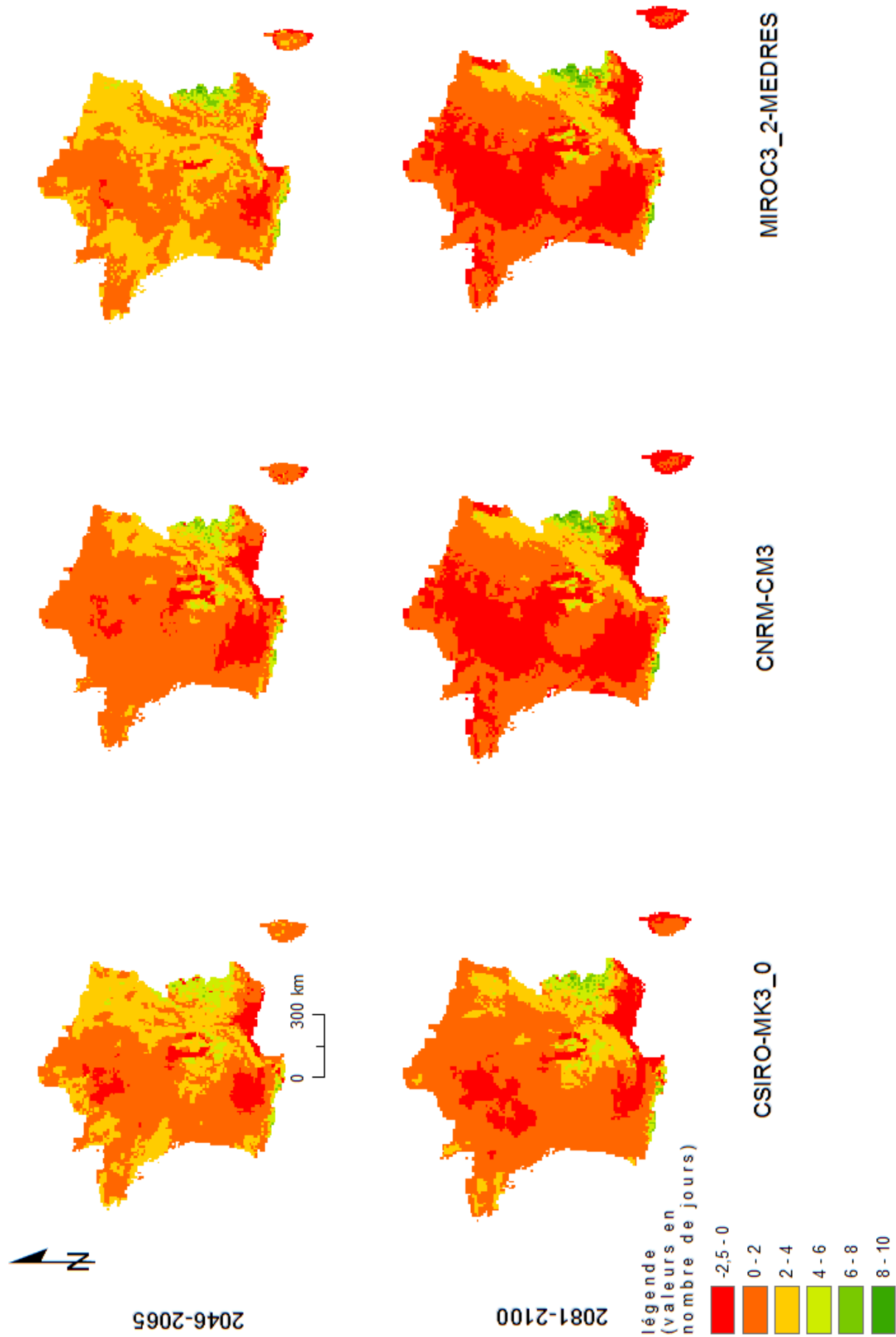
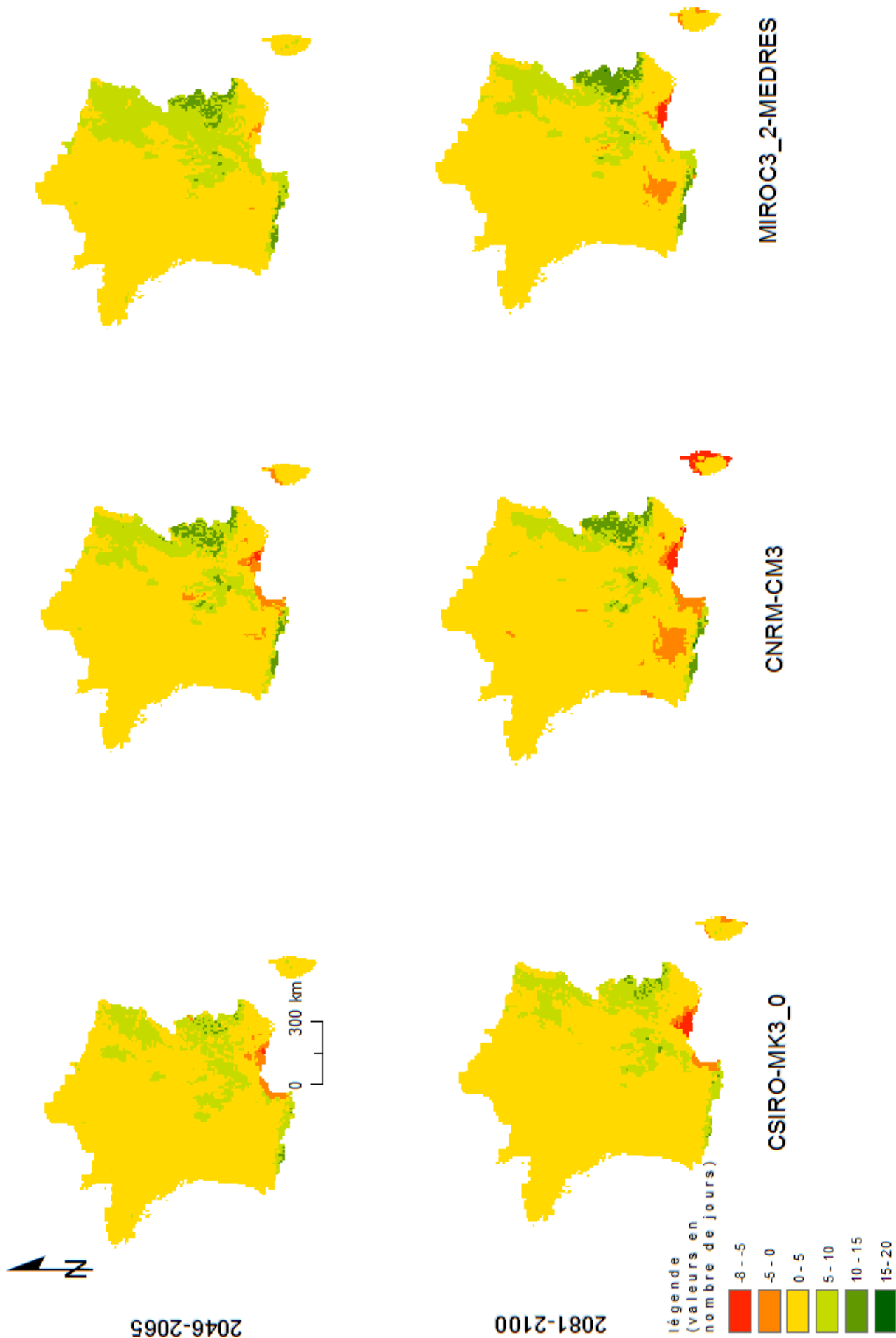


Figure 3.31 – Prédiction de l'évolution du jaunissement du Hêtre entre 2046-2065 et 2081-2100 en fonction de trois modèles de changement climatique en suivant le scénario A1B



Conclusion-Discussion

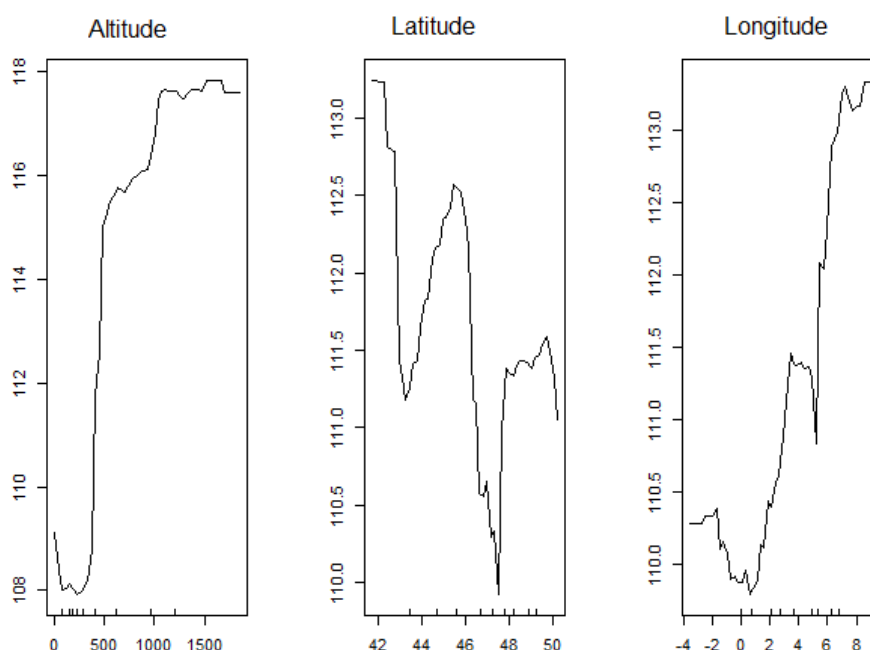
Entre 1997 et 2013, le débourrement a eu lieu entre le 10 avril et le 15 mai. Le jaunissement entre le 20 et le 30 octobre. La saison de végétation a duré 184 jours. Les résultats révèlent que le principal facteur qui détermine le débourrement et le jaunissement est l'essence. En effet, l'ensemble des observations réalisées sur le réseau RENECOFOR entre 1997 et 2013, 70% de la variance observée sur le débourrement et 45% sur le jaunissement s'explique par des différences spécifiques. Ces résultats font écho à des travaux, effectués sur ce même réseau, et qui ont fait l'objet de publications [33, 35].

Le suivi de deux variétés de Chêne, sessile et pédonculé, a permis de montrer que des différences existent au sein de cette essence. En effet, il y a un décalage de 1 à 4 jours pour le débourrement et le jaunissement avec, pour ces deux phases, une précocité du Chêne pédonculé sur le Chêne sessile. Les travaux de Differt [14] avaient montré une telle relation entre ces deux variétés, mais avec une précocité du Chêne sessile sur le Chêne pédonculé.

Au sein des feuillus, des disparités sont également marquées. Les peuplements de Hêtre débourrent en moyenne 9 à 11 jours après et jaunissement 5 à 7 jours avant les peuplements de Chêne. Les résultats pour le jaunissement rejoignent d'autres déjà existants [13]. Plus généralement, le comportement des feuillus se distingue de celui des résineux. Les deux essences résineuses sur lesquelles ont porté les analyses sont l'Épicéa et le Sapin pectiné. Ce sont les essences qui débourrent le plus tardivement, vers le 10 mai sur la période 1997-2013, soit un mois après l'initialisation du débourrement chez les feuillus.

Les événements phénologiques montrent une forte dépendance à la situation géographique de la placette.

Figure 3.32 – Graphiques d'évolution du jour de débourrement en fonction des variables géographiques.



Les graphiques de la figure 3.32 montrent l'influence des trois principales variables géographiques sur le déclenchement du débourrement. La croissance en latitude, qui correspond à une progression d'Ouest en Est, entraîne une augmentation du jour de débourrement moyen des peuplement. Le contraire est observable pour le jaunissement, ce qui aboutit à une longueur de saison de végétation plus courte à l'Est qu'à l'Ouest.

Ces résultats ont pu être confirmés avec l'utilisation de données stationnelles homogénéisées. Pour les chênaies du Nord de la France, il existe un décalage moyen de débourrement de 6 jours entre l'Ouest et l'Est et de 6 jours entre l'Est et l'Ouest pour le jaunissement. Pour les hêtraies, le décalage de débourrement est compris entre 1 et 3 jours et est de 4 jours pour le jaunissement.

En 2008, les travaux de Lebourgeois et al [35] montraient un retard de débourrement de 2,6 jours par 100 km. Du fait d'une coloration des feuilles plus précoce, la saison de végétations des peuplements les plus à l'Est est inférieure à 200 jours [37].

Le graphique de figure 3.32 qui montre l'effet de la variable de latitude sur le débourrement révèle que plus un peuplement se situe dans le Nord, plus son débourrement sera retardé. Des graphiques similaires ont été réalisés pour le jaunissement, et mettent en évidence une précocité de jaunissement pour les peuplements plus au Nord. De cette manière, la saison de végétation est plus longue dans le Sud. Les travaux de Rötzer et Chmielewski [50] ont mis en évidence une progression du débourrement de 2,3 jours par 100km du Sud vers le Nord, et de 0,1 par 100km du Nord vers le Sud pour le jaunissement.

Les analyses ont aussi montré que les peuplements situés au delà de 200 m d'altitude présentent un retard de débourrement de 20 jours et une précocité de jaunissement de 10 jours. Cependant, même si le réseau RENECOFOR offre une couverture importante du territoire français, certains phénomènes mis en évidence portent le biais de l'essence. L'effet de l'altitude sur les phénophases ne peut être observé que sur le Hêtre car c'est la seule essence qui couvre l'ensemble du gradient altitudinal. La totalité des peuplements de Chênes se trouve, quant à elle, exclusivement à des altitudes inférieures à 200 m.

La modélisation pas-à-pas a permis une première caractérisation du déterminisme des essences étudiées. La température est la variable climatique qui détermine le plus les deux phénophases étudiées. Pour le débourrement, ce sont ensuite les variables d'ETP_{tu} puis de Bh_{ctu} qui agissent sur l'initialisation du phénomène, et l'ordre inverse pour le jaunissement.

Les variables mensuelles qui influencent le plus les phases sont comprises entre janvier et mai pour le débourrement ; août et novembre pour le jaunissement.

De manière générale, il ressort que les précipitations ne participent pas à l'amélioration des modèles et sont systématiquement exclues des équations finales. Les classements de variables issus des forêts d'arbres aléatoires les classent parmi les variables qui concentrent le moins de vraisemblance et ce pour toutes les essences et quelque soit la phénophase étudiée.

La méthode Random Forest a été utilisée pour créer plusieurs modèles avec des variables d'entrée et des échantillons de calibration différents.

Dans un premier temps, les modèles ont été calibrés à l'aide du jeu de données Météo-France et appliqués à l'ensemble des observations phénologiques du réseau RENECOFOR. Ces modèles comprennent des variables géographiques qui renseignent de l'environnement dans lequel se trouve la placette et l'ensemble des variables climatiques de précipitation, d'Evapo-Transpiration potentielle, de température et de Bilan Hydrique. Les performances obtenues sont les plus importantes avec, pour le débourrement, une variance expliquée de 77%, une erreur de prédiction de 8,6 jours et un écart de 4,7 jours.

Tableau 3.27 – Comparaison entre les modèles calibrés (présentés entre parenthèses) sur la période 1997-2006 et les modèles calibrés sur la période 1997-2013.

Variable	Échantillon	Erreur d'ajustement (en %)	Écart de prédiction (en jours)	Variance expliquée (en jours)
Débourrement	Chênes	(3,3) 3,8	(7,8) 8,3	(51,3) 38
	Hêtre	(4,1) 6,2	(9,3) 8,4	(38,9) 45
Jaunissement	Chênes	(4,3) 4,9	(10) 11,7	(35,5) 13
	Hêtre	(6,1) 6,8	(13) 13,7	(34,7) 25

En 2010, des modèles similaires avaient été calibrés en ne conservant que leurs 10 premières variables.

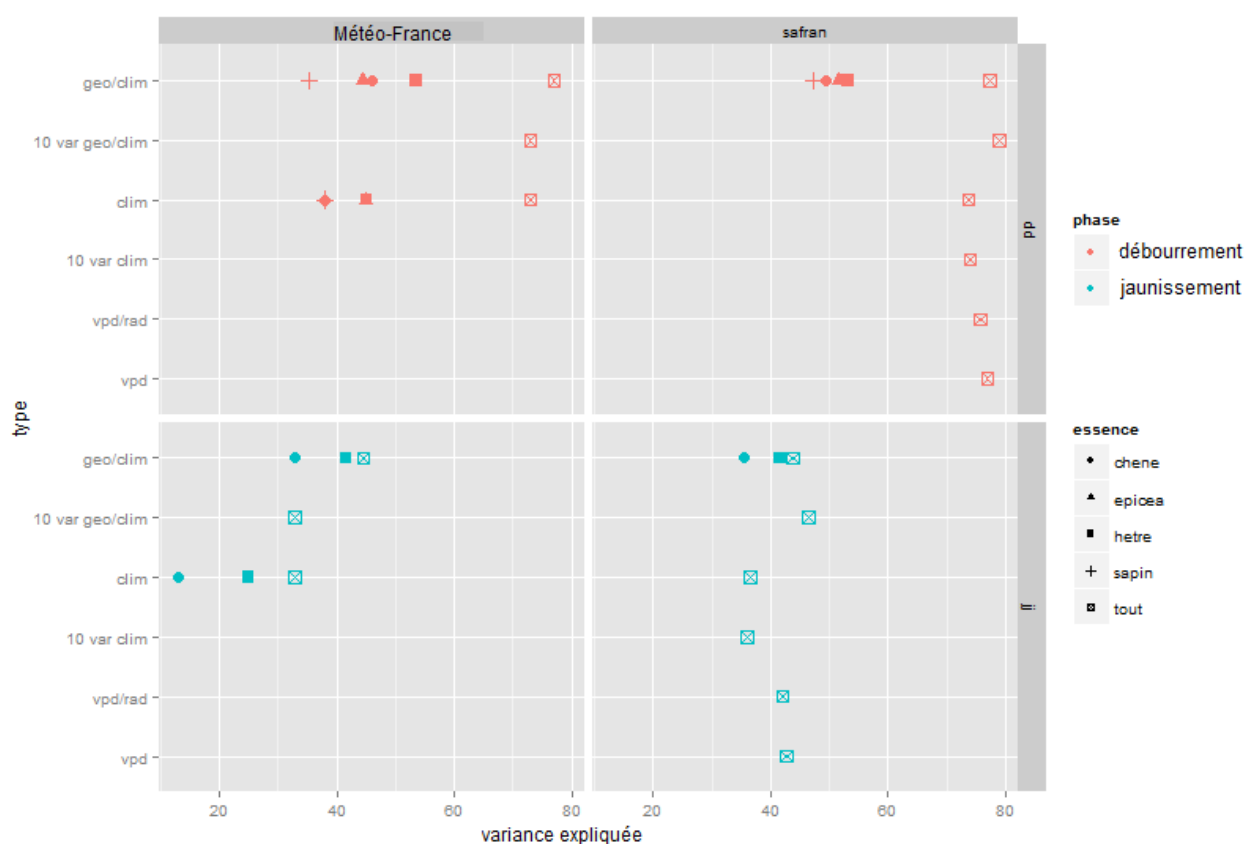
Ceux-ci permettaient d'expliquer 76,8% de la variance avec une erreur de 8,3 jours et un écart de prédiction de 3,7 jours pour un échantillon qui comprenait des données sur une période allant de 1997 à 2006 [35]. Pour le jaunissement, le modèle le plus performant explique 44,6% de la variance observée, avec une erreur de prédiction de 10,7 jours et un écart de 5,9 jours pour la période 1997-2013. Le modèle calibré sur la période 1997-2006 explique 53,3% de la variance, pour une erreur de 10 jours et un écart de 4,4 jours.

Il semblerait donc que les modèles perdent quelque peu en performances, mais cela est à relativiser car certaines variables utilisées pour les modèles plus anciens ne l'ont pas été dans les plus récents, comme par exemple la distance à l'océan ou la distance à la Méditerranée qui possédaient des indices de vraisemblance relativement importants mais qui étaient difficiles à interpréter [35]. Hormis pour le modèle de débourrement du Hêtre, les écarts de prédiction et les erreurs d'ajustement sont très proches. Les pourcentages de variance expliquée sont très différents. Cela provient probablement des échantillons initiaux et des variables de calibration.

La comparaison entre des modèles géo-climatiques et uniquement climatiques montre une réduction du pourcentage de variance expliquée de 4% pour le modèle de débourrement et un écart de 6 jours entre les deux modèles ; une baisse de 12% de la variance expliquée pour le jaunissement, et un écart de prédiction de 2 jours. Ce constat avait déjà été réalisé dans une étude précédente [35], et cette restriction aux variables climatiques est nécessaire dans le cadre de prédictions, dans le passé et dans le future, des dates de phénophases.

Il apparaît que les modèles géo-climatiques sont plus performants que les modèles uniquement climatiques chez les feuillus. Chez les résineux, il n'y a pas de différence notable entre les deux types de modèles. Ces derniers semblent donc être moins sensibles aux variables géographiques que les feuillus.

Figure 3.33 – Bilan de comparaison de la variance expliquée des modèles créés lors de cette études. Classement en fonction du type de modèles (basé sur les variables d'entrée), de la base de données utilisée et de la phénophase prédite.



Cette figure a pour but de faire le bilan sur les performances des modèles générés lors de cette étude. De manière globale, il semble que les deux phénophases étudiées ici n'ont pas la même dépendance au climat. Les modèles qui prédisent les jours de débourrement ont de meilleures performances que pour les prédictions des

jours de jaunissement. Un constat similaire avait déjà été réalisé pour des modèles calibrés sur le jeu de données du réseau RENECOFOR pour la période 1997-2006 [37].

Un autre objectif de cette étude était de comparer les données ponctuelles du réseau Météo-France avec les données spatialisées issues du traitement SAFRAN. Les analyses montrent que, malgré une perte d'information locale due au format des données (grille de 8 km de côté), l'utilisation de données spatialisées n'entraîne pas de dégradation dans les prédictions. Ce résultat justifie l'emploi, de plus en plus répandu aujourd'hui, des données spatialisées notamment en écologie.

Il semble que, quelque soit le jeu de données utilisé ou la phénophase prédite, et pour tous les types de modèles confondus, les prédictions qui se basent sur toutes les essences sont plus proches des données d'observation que les modèles spécifiques. De plus, l'utilisation de modèles calibrés sur l'ensemble des essences pour prédire les dates de débourrement et de jaunissement à l'échelle spécifique ne représente pas une perte de vraisemblance dans les prédictions par rapport aux modèles spécifiques.

La comparaison des modèles géo-climatiques avec les modèles climatiques ne montre pas, là encore, de différence significative. Ce qui a permis de réaliser des prédictions dans le passé et le futur. En effet, les modèles prédictifs ne prennent pas en compte les variables géographiques.

Par la suite, des modèles plus parcimonieux ont été créés afin d'observer les variations de performances des modèles restreints aux 10 variables les plus explicatives. Les résultats montrent de fortes correspondances pour les prédictions des deux phénophases avec entre les modèles globaux et ceux restreints à 10 variables, un écart de 2,1 jours.

Comme il a été montré précédemment, l'essence est le facteur qui a le plus d'influence sur la réalisation des phases phénologiques. Des modèles ont donc été calibrés avec des observations d'une seule essence puis comparés à des modèles calibrés sur toutes les essences et appliqués à une seule, afin d'évaluer les différences entre les prédictions. Il y a, entre les deux types de modèles, une forte baisse de la variance expliquée qui provient de l'échantillon de départ. L'ensemble des essences concentre plus de variance qu'une seule. Les comparaisons entre les modèles globaux et spécifiques montrent des taux de correspondance très élevés et des écarts inférieurs à 2 jours.

Dans les données spatialisées, étaient à disposition des variables de pression de vapeur d'eau et de rayonnement. Leur utilisation dans les modèles, permet un gain en performances pour le jaunissement. En effet, le rayonnement semble beaucoup influencer le phénomène de coloration des feuilles, comme ont pu le montrer les travaux de Delpierre [13]. En revanche, cette variance n'a que peu d'influence sur les performances des modèles de prédiction du débourrement. Ainsi, dans ce cas, il est préférable d'ajouter au modèle climatique la variable de pression de vapeur d'eau seule.

Les prédictions rétrospectives ont mis en évidence le changement climatique qui a affecté les peuplements du réseau et qui agit encore aujourd'hui sur la détermination des phénophases. Il a été montré que vers 1985, une élévation conséquente de la température, qui s'est maintenue depuis, entraîne un débourrement plus précoce et un jaunissement plus tardif. Les traitements sur les données ponctuelles homogénéisées qui concernent les Chênes et le Hêtre pris dans la partie Nord de la France concordent pour dire que depuis 1985, le débourrement est significativement plus précoce. De même, le jaunissement est plus tardif, ce qui mène à une augmentation de la saison de végétation. En 50 ans, sur l'ensemble des essences du réseau, le débourrement a progressé de 5,2 jours et le jaunissement a reculé de 3,7 jours. La saison de végétation s'est donc allongée de presque 9 jours. Sur le réseau IPG, des études similaires avaient été menées sur une durée de 30 ans avec pour point de départ l'année 1960 [7]. Les résultats montraient une avancée du débourrement de 6 jours et un recul du jaunissement de 4,8 jours, soit un allongement de la saison de végétation de 10,8 jours.

Les modèles de changement climatique prévoient, pour le débourrement des Chênes, un retard qui peut atteindre 5 jours dans une grande partie de la France. Pour le Hêtre, un retard pouvant atteindre 4 jours est prévu et, en fonction du modèle de changement climatique. À l'horizon 2046, il semblerait donc que le débourrement des Chênes et du Hêtre devienne plus tardif par rapport à la période 1961-1980. Une des hypothèses qui pourrait expliquer ce phénomène a été formulée dans les travaux de Polgar puis plus tard dans les travaux de Morin, qui serait que les besoins en froid ou « chilling » ne sont pas remplis [43, 46]. Au niveau du réseau, les peuplements de Chênes et de Hêtres sont principalement concentrés dans la partie Nord de la France. Une carte de présence effective des essences sur le territoire pourrait permettre d'améliorer la pertinence des prédictions.

Bibliographie

- [1] M. Adamovic. Interactive comment on “does the simple dynamical systems approach provide useful information about catchment hydrological functioning in a mediterranean context ? application to the ardèche catchment (france).
- [2] Y. Aono and K. Kazui. Phenological data series of cherry tree flowering in kyoto, japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. *International Journal of Climatology*, 28(7) :905–914, 2008. Aono, Yasuyuki Kazui, Keiko.
- [3] Ghattas B. Prévision par arbres de classification.
- [4] J. Bennie, E. Kubin, A. Wiltshire, B. Huntley, and R. Baxter. Predicting spatial and temporal patterns of bud-burst and spring frost risk in north-west europe : the implications of local adaptation to climate. *Global Change Biology*, 16(5) :1503–1514, 2010.
- [5] M. Lanier F. Garnier C. Cluzeau, E. Ulrich. *RENECOFOR - Interprétation des mesures dendrométriques de 1991 à 1995 des 102 peuplements du réseau*.
- [6] M.G.R. Cannell and R.I. Smith. Thermal time, chill days and prediction of budburst in picea sitchensis. *Journal of Applied Ecology*, 20 :951–963, 1983.
- [7] F. M. Chmielewski and T. Rötzer. Response of tree phenology to climate change across europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(2) :101–112, 2001.
- [8] F. M. Chmielewski and T. Rötzer. Annual and spatial variability of the beginning of growing season in europe in relation to air temperature changes. *Climate Research*, 19(3) :257–264, 2002.
- [9] I. Chuine. A unified model for budburst of trees. *Journal of Theoretical Biology*, 207(3) :337–347, 2000.
- [10] I. Chuine. Why does phenology drive species distribution ? *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 365(1555) :3149–3160, 2010.
- [11] I. Chuine, I. Garcia de Cortazar Atauri, K. Kramer, and H. Hänninen. Plant development models. *In : Phenology : An Integrative Environmental Science (ed. Schwarz MD). Springer, Dordrecht, Netherlands*, pages 275–293, 2013.
- [12] I. M. X. Chuine. The response of woody species to climatic change - phenological modifications, frost risks and the distribution of north american woody species. *RenDez-Vous Techniques*, (hors-serie 3) :15–20, 2007. Times Cited : 0 Legay, M.
- [13] N. Delpierre, E. Dufrene, K. Soudani, E. Ulrich, S. Cecchini, J. Boe, and C. Francois. Modelling interannual and spatial variability of leaf senescence for three deciduous tree species in france. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6-7) :938–948, 2009. Times Cited : 39.
- [14] J. Differt. Phénologie des espèces arborées. synthèse bibliographique. analyse des données du renecofor. *Rapport de stage*, pages 97 pages + annexes, 2001.
- [15] Lebourgeois F. Les chênes sessile et pédonculé (quercus petraea liebl. et quercus robur l.) dans le réseau renecofor : rythme de croissance radiale, anatomie du bois, de l’aubier et de l’écorce.

- [16] M. Falusi and R. Calamassi. Bud dormancy in beech (*fagus sylvatica* l.). effect of chilling and photoperiod on dormancy release of beech seedlings. *Tree Physiology*, 6 :429–438, 1990.
- [17] M. Falusi and R. Calamassi. Bud dormancy in *fagus sylvatica* l. i. chilling and photoperiod as factors determining budbreak. *Plant Biosystems*, 131(1) :67–72, 1997.
- [18] B. Ganichot. Evolution de la date des vendanges dans les côtes du Rhône méridionales. *CR des VI^{ème} rencontres rhodaniennes, Institut Rhodanien, Orange*, pages 38–41, 2002.
- [19] J.L Champeaux P. Etchevers L. Franchistéguy E. Leblois E. Ledoux P. Le Moigne E. Martin S. Morel J. Noilhan P. Quintana Segui F. Rousset-Regimbeau P. Viennot Habets F., A. Boone. The safran-isba-modcou hydrometeorological model applied over France.
- [20] Heikki Hanninen, Michelle Slaney, and Sune Linder. Dormancy release of Norway spruce under climatic warming : testing ecophysiological models of bud burst with a whole-tree chamber experiment. *Tree Physiology*, 27(2) :291–300, 2007. Times Cited : 32.
- [21] H. Hänninen. Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. *Acta Forestalia Fennica*, 213 :1–47, 1990.
- [22] H. Hänninen and R. Backman. Rest break in Norway spruce seedlings : test of a dynamic temperature response hypothesis. *Canadian Journal of Forest Research*, 24 :558–563, 1994.
- [23] A.F. Hunter and M.J. Lechowicz. Predicting the timing of budburst in temperate trees. *Journal of Applied Ecology*, 29 :597–604, 1992.
- [24] S.D. Qin M.M. Chen Z.M.-Marquis K.B. Averyt M.T. Miller H.L. (Eds.) IPCC, 2007. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In : Solomon. Climate change 2007 : The physical science basis.
- [25] Bernard De Baets Niko E.C. Verhoest Roeland Samson Sven Degroove Piet De Becker Willy Huybrechts Jan Peters. Random forests as a tool for ecohydrological distribution modelling.
- [26] K. D. Kobayashi and L. H. Fuchigami. Modeling temperature effects in breaking rest in red-osier dogwood (*Cornus sericea* l.). *Annals of Botany*, 52(2) :205–215, 1983. Times Cited : 15.
- [27] Bécue-Bertaut M. Husson F. Kostov, B. Multiple factor analysis for contingency tables in factominer.
- [28] K. Kramer. Selecting a model to predict the onset of growth of *fagus sylvatica*. *Journal of Applied Ecology*, 31 :172–181, 1994.
- [29] Breiman L. Random forest, 45,5-32.
- [30] J.J. Landsberg. Apple fruit bud development and growth ; analysis and an empirical model. *Annals of Botany*, 38, 1974.
- [31] G.A. Lang. Dormancy : A new universal terminology.
- [32] F. Lebourgeois. *RENECOFOR - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau*.
- [33] F. Lebourgeois, J. Differt, A. Granier, N. Breda, and E. Ulrich. Initial phenological observations on the stands in the national long term monitoring network of forest ecosystems (renecofor). *Revue Forestière Française*, 54(5) :407–418, 2002. Times Cited : 7.
- [34] F. Lebourgeois and P. Godfroy. Analyse de la variabilité spatiale et temporelle et du déterminisme climatique de la phénologie des peuplements du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (renecofor). *Rapport Scientifique Final, UMR LERBOB, ENGREF, Septembre 2005, 43 pages.*, 2005.
- [35] F. Lebourgeois, J. C. Pierrat, P. Godfroy, S. Cecchini, L. Lanier, and E. Ulrich. Relation entre les stades phénologiques et les variables climatiques. *Rendez-Vous Techniques*, 4 :127–130, 2008.

- [36] F. Lebourgeois, J. C. Pierrat, V. Perez, C. Piedallu, S. Cecchini, and E. Ulrich. Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées françaises : Etude sur les peuplements du renecofor. *Revue Forestière Française*, 60(3) :323–343, 2008.
- [37] F. Lebourgeois and E. Ulrich. Forest trees phenology in the french permanent plot network renecofor, icp forest network. In " *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*" Edited by Denis Loustau Edition Quae, Collection UpDate Sciences and Technologies, 311 pages., Chapter 8 :158–171, 2010.
- [38] Matthew Liaw, Andy Wiener. Classification and regression by randomforest. 2/3 :p. 18.
- [39] A. Menzel and P. Fabian. Growing season extended in europe. *Nature*, 397 :695, 1999.
- [40] A. Menzel, T. H. Sparks, N. Estrella, E. Koch, A. Aasa, R. Aha, K. Alm-Kubler, P. Bissolli, O. Braslavska, A. Briede, F. M. Chmielewski, Z. Crepinsek, Y. Curnel, A. Dahl, C. Defila, A. Donnelly, Y. Filella, K. Jatcza, F. Mage, A. Mestre, O. Nordli, J. Penuelas, P. Pirinen, V. Remisova, H. Scheifinger, M. Striz, A. Susnik, A. J. H. Van Vliet, F. E. Wielgolaski, S. Zach, and A. Züst. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12(10) :1969–1976, 2006.
- [41] K-1 model developers (2004) : K-1 coupled model (MIROC) description. Center for climate system research, university of tokyo, 34pp.
- [42] J. M. Moisselin and M. Schneider. Homogenization of french rainfall long term data series. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*, (6-7) :126–130, 2002. Times Cited : 0.
- [43] X. Morin and I. Chuine. Will tree species experience increased frost damage due to climate change because of changes in leaf phenology ? *Canadian Journal of Forest Research*, 44(12) :1555–1565, 2014. Morin, Xavier Chuine, Isabelle.
- [44] M.B. Murray, G.R. Cannell, and I. Smith. Date of budburst of fifteen tree species in britain following climatic warming. *Journal of Applied Ecology*, 26 :693–700, 1989.
- [45] R. B. Myneni, C. D. Keeling, C. J. Tucker, G. Asrar, and R. R. Nemani. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386(6626) :698–702, 1997.
- [46] C. A. Polgar and R. B. Primack. Leaf-out phenology of temperate woody plants : from trees to ecosystems. *New Phytologist*, 191(4) :926–941, 2011. ISI Document Delivery No. : 806FT Times Cited : 1 Cited Reference Count : 136 Polgar, Caroline A. Primack, Richard B. Boston University ; National Science Foundation Funding for this work came from Boston University and the National Science Foundation. We thank Pam Templer, Nathan Phillips, Libby Ellwood, Andy Reinmann, Chris Perriello, Jenica Allen, and Elizabeth Platt for their comments on earlier drafts of this paper. We also thank the two anonymous reviewers for their helpful comments. Wiley-blackwell Malden.
- [47] Martin E. Habets-F. Quintana Seguí, P. and J. Noilhan. Improvement, calibration and validation of a distributed hydrological model over france.
- [48] E.A. Richardson, S.D. Seeley, D.R. Walker, J.L. Anderson, and G.L. Ashcroft. Pheno-climatography of spring peach bud development. *Hortscience*, 10(3) :236–237, 1975.
- [49] S. J. Jeffrey-M. A. Collier S. M. Dravitzki A. C. Hirst J. I. Syktus Rotstayn, L. D. and K. K. Wong (2012). Aerosol- and greenhouse gas-induced changes in summer rainfall and circulation in the australasian region : a study using single-forcing climate simulations,.
- [50] T. Rötzer and F.M. Chmielewski. Phenological maps of europe. *Climate Research*, 18 :248–257, 2001.
- [51] T. Rutishauser, C. Schleip, T. H. Sparks, O. Nordli, A. Menzel, H. Wanner, F. Jeanneret, and J. Luterbacher. Temperature sensitivity of swiss and british plant phenology from 1753 to 1958. *Climate Research*, 39(3) :179–190, 2009. Sp. Iss. 19.
- [52] F. Chauvin M. Déqué H. Douville J.F. Gueremy P. Marquet S. Planton J.F. Royer Salas-Mélia, D. and S. Tyteca. Description and validation of the cnrm-cm3 global coupled model.

- [53] R. Sarvas. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. ii. autumn dormancy and winter dormancy. *Comm Inst For Fenn*, 84, 1974.
- [54] B. Schieber, R. Janik, and Z. Snopkova. Phenology of four broad-leaved forest trees in a submountain beech forest. *Journal of Forest Science*, 55(1) :15–22, 2009.
- [55] M. D. Schwartz. Green-wave phenology. *Nature*, 394(6696) :839–840, 1998.
- [56] M.D. Schwartz. *Phenology of Seasonal Climates (eds Lieth, H. and Schwartz, M.D.)* 23-38.
- [57] K. Soudani, G. Hmimina, N. Delpierre, J. Y. Pontailler, M. Aubinet, D. Bonal, B. Caquet, A. de Grandcourt, B. Burban, C. Flechard, D. Guyon, A. Granier, P. Gross, B. Heinesh, B. Longdoz, D. Loustau, C. Moureaux, J. M. Ourcival, S. Rambal, L. Saint Andre, and E. Dufrene. Ground-based network of ndvi measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. *Remote Sensing of Environment*, 123 :234–245, 2012. Times Cited : 32.
- [58] K. Soudani, G. Le Maire, E. Dufrêne, C. François, N. Delpierre, E. Ulrich, and S. Cecchini. Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (modis) data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5) :2643–2655, 2008.
- [59] T. H. Sparks and P. D. Carey. The responses of species to climate over 2 centuries - an analysis of the marsham phenological record, 1736-1947. *Journal of Ecology*, 83(2) :321–329, 1995. Times Cited : 227.
- [60] SEYNAVE I. COLLET C. LEBOURGEOIS F. TROUVE R., BONTEMPS J.D. Stand density, tree social status and water stress influence allocation in height and diameter growth of quercus petraea (liebl.).
- [61] E. Ulrich. Le réseau renecofor : objectifs et réalisation. *Revue Forestière Française*, 47(2) :107–124, 1995.
- [62] A. Vegis. Dormancy in higher plants. *Annual Review of Plants Physiology*, 15 :185–224, 1964.
- [63] Martin E. Franchistéguy L. Habets F. Soubeyroux J.-M. Blanchard M. Vidal, J.-P. and M. Baillon. Multilevel and multiscale drought reanalysis over france with the safran-isba-modcou hydrometeorological suite.
- [64] U. Vilhar, E. Beuker, T. Mizunuma, M. Skudnik, F. Lebourgeois, K. Soudani, and M. Wilkinson. Tree phenology. *Development in Environmental Science*, 12 :169–182, 2013.
- [65] Y. Vitasse and D. Basler. What role for photoperiod in the bud burst phenology of european beech. *European Journal of Forest Research*, 10.1007/s10342-012-0661-2, 2012.
- [66] Y. Vitasse, S. Delzon, C. C. Bresson, R. Michalet, and A. Kremer. Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(7) :1259–1269, 2009.
- [67] G.R. Walther. Weakening of climatic constraints with global warming and its consequences for evergreen broad-leaved species. *Folia Geobotanica*, 37 :129–139, 2002. Times Cited : 37 43rd Symposium of the International-Association-for-Vegetation-Science Jul 23-28, 2000 Nagano, japan Int Assoc Vegetat Sci.

Annexes

Tableau .28 – Évolution des phénophases en fonction de la région climatique sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR.

Code région climatique	Essence	Effectif	<i>Débourrement</i>		<i>Jaunissement</i>		<i>Longueur de de végétation</i>	
			Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
AQ	CH	1	82,5	7,6	322,1	10,9	244,5	13
	EPC	1	127,8	6,9				
	PM	4	107,8	17,2				
MED	CH	1	95,4	8,1	301,5	10,1	210	10,9
	HET	3	122,2	6,1	280,4	11,9	157,4	18,7
	DOU	1	111,2	6,5				
	EPC	2	126,7	11,9				
	PL	1	133,3	13,1				
	PM	1	139,2	13,1				
	SP	3	133,7	13,6				
MONTC	DOU	1	130,6	10,7				
	EPC	1	139,5	12,9				
	PS	2	129,9	11,1				
	SP	1	136,5	8,8				
MONTE	HET	2	117	6,1	292	4,4	174,8	8
	MEL	1	131,1	8,4	290,7	6,8	159,6	9,6
	EPC	4	139,2	13				
	PS	1	149,4	12,8				
	SP	4	139,5	10,2				
MONTSE	CH	1	93,3	4,9	295,2	11,2	202,5	12,4
	HET	3	104,2	12	301,3	14,6	198	21,1
	DOU	1	117,1	9,4				
	SP	1	136,3	14,1				
ODC	CH	6	99,5	10,6	303,7	9	204,5	14,6
	HET	1	111,4	7,4	292,7	14	178,5	15,4
	PL	1	115	11,5				
	PS	3	122,2	14,1				
ODN	CH	2	106,6	9,7	297,3	13,4	190,6	19,2
	HET	2	108,6	6,7	304,2	10,1	195,1	10,3
ONO	CH	6	100,2	9,6	302,7	11,9	202	13,2
	HET	3	109,5	7,7	295,9	13,2	185,8	13,1
	DOU	1	129,5	0,7				
	PM	2	119,9	12,2				
	PS	4	121,6	11,7				
SC	CH	13	104,1	8,8	293,7	12,2	188,9	15,9
	HET	8	111	7,5	290	19,8	178,5	20,7
	DOU	2	133,7	7,9				
	EPC	2	129,5	8,6				
	PS	4	121,7	8,5				
	SP	2	121,1	10,9				

Tableau .29 – Évolution des phénophases en fonction de la classe d’altitude sur la période 1997-2013 sur le réseau RENECOFOR.

Code classe d’altitude	Essence	Effectif	<i>Débourrement</i>		<i>Jaunissement</i>		<i>Longueur de de végétation</i>	
			Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
A	CH	15	98,7	11,16	301	14,2	202,3	20,7
	HET	4	104,8	8,2	303,1	12,8	198,2	15,4
	PL	1	115	11,5				
	PM	6	110,6	16,9				
	PS	9	122,3	12,2				
B	CH	12	103,2	10,1	294,1	10,4	190,8	15,8
	HET	6	106,5	9,7	298,8	17	191,4	20,4
	DOU	1	129,5	0,7				
	PS	9	120,6	7,4				
	SP	1	121,4	12,2				
C	HET	4	114,5	6,7	286,8	13,3	171,4	13,7
	DOU	2	124,3	11,2				
	EPC	2	129,4	8,9				
	PS	1	118,5	7,4				
	SP	1	124,9	14,8				
D	HET	1	101,8	10,3	284,8	16,1	182	13,6
	DOU	3	125,8	13,4				
	EPC	2	128,5	6,7				
	PS	1	132,6	10,6				
	SP	1	126,4	6				
E	HET	1	108,2	10,6	296,3	11	190	11,2
	EPC	3	132,6	12,1				
	PM	1	139,2	13,1				
	PS	1	127,3	11,1				
	SP	2	133,3	15,9				
F	EPC	2	135,4	13,8				
	PL	1	133,3	13,1				
	SP	3	140,1	10,9				
G	HET	4	120,1	11,7	285,3	9,5	163,2	18,7
	MEL	1	131,1	8,4	290,7	6,8	159,6	9,6
	EPC	2	138,4	15,4				
	PS	1	149,4	12,8				
	SP	2	136	9,5				

Tableau .30 – Modèles phénologiques de débournement et de jaunissement obtenus par méthode de régression progressive et calibrés sur l'ensemble ou des sous-ensembles de la base de données du réseau RENECOFOR de la période 1997-2013.

Variable	Échantillon	Intersept	Paramètres climatiques														
			Températures					ETPtu					Bhctu				
			Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai
MF	Toutes les essences	92,81	0,83		-2,6	-2,56	2,92	-0,16	0,44	0,63	-1,01						0,02
	Feuillus (CH/HET)	-52,11		-0,26	-3,87			0,65	-0,17			0,01		0,02	3,48		
	Résineux	99,88			-2,71	-3,01	3,61	0,46	0,69	-1,15		0,02		0,02	1,05		
	EPC/SP	169,02		-0,59		-3,89	3,61		1,15	-1,37		0,05		0,01			
SAFRAN	Toutes les essences	89,22	0,64		-2,85	-0,78		-0,28	-0,1	0,33		0,1	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
	Feuillus(CH/HET)	121,8		-1,44	-3,76	-0,99			2,82				0,038				
	Résineux	94,8						-0,21	-0,21			0,12			0,03	0,03	0,03
	EPC/SP	101,9			2,25			-0,73	-0,19	-0,35	0,17				0,065	0,029	0,029

Paramètres géographiques	
Altitude	Latitude
0,03	1,01
0,02	
0,01	
0,014	

Tableau .31 – Modèles phénologiques de débournement et de jaunissement obtenus par méthode de régression progressive et calibrés sur l'ensemble ou des sous-ensembles de la base de données du réseau RENECOFOR de la période 1997-2013.

Variable	Échantillon	Intercept	Paramètres climatiques										Paramètres géographiques		
			Température			ETPtu			Bhctu			Altitude	Latitude		
			Août	Sept	Oct	Nov	Sept	Oct	Nov	Oct	Nov	Déc			
MF	Feuillus (CH/HET)	250	-0,62	-1,2	1,47		0,56		0,17	-2,1	-0,013				
SAFRAN	Feuillus (CH/HET)	262	1,04	1,16	1,83	-1,32		0,2		-0,015	-0,018	-0,006			

Note : ETPtu = Evapo-Transpiration Potentielle calculé avec le formule de turc ; BHctu = Bilan Hydrique climatique calculé avec la formule de turc

Tableau .32 – Gamme de valeurs des variables climatiques de la base de données Météo-France relative aux stations du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013.

Variable	Code	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Précipitations (en mm)	PJan	82,5	64,9	0	1075
	PFev	69,5	54,2	0	480
	PMars	70,8	59,2	0	516,5
	PAvr	77,9	59,4	0	359,4
	PMai	88,3	54,4	0,8	498
	PJuin	67,2	42,8	0,6	318
	PJuil	73,1	43,9	0	320,3
	PAout	73	46,7	0	394,6
	PSept	73,7	52,4	1,2	500,6
	POct	92,8	61,9	1,9	544
	PNov	103,6	80,3	1,2	811,3
	PDec	99,4	66	0,8	550
Températures (en °C)	Tjan	3,5	2,5	−4,8	10,2
	TFev	4,2	3	−6,5	11,1
	TMars	7,2	2,3	−1,4	15,4
	TAvr	10,2	2,2	0,9	16,7
	TMai	14,1	2,1	3,8	19
	TJuin	17,4	2,1	9,3	26
	TJuil	19,2	2,2	10,7	26,3
	TAout	19,3	2,2	10,2	26,8
	TSept	15,7	2,2	6,8	21,4
	TOct	12,3	2,3	4,1	18,8
	TNov	6,9	2,4	−0,9	13,6
	TDec	3,9	2,5	−4,2	13,1
Évapotranspiration potentielle (en mm)	ETPt _u ,Jan	10,8	7	0	31,7
	ETPt _u ,Fev	16,6	9,5	0	42,1
	ETPt _u ,Mars	39,6	11,7	0	76,1
	ETPt _u ,Avr	64,8	10,1	10	95,1
	ETPt _u ,Mai	95,1	9,5	42,4	121,1
	ETPt _u ,Juin	114,4	9,7	87,8	152,3
	ETPt _u ,Juil	122,9	11,4	89,1	160
	ETPt _u ,Aout	108,8	9,5	79,9	150
	ETPt _u ,Sept	74,3	9,3	51	99,6
	ETPt _u ,Oct	42,5	7,5	23,1	66,9
	ETPt _u ,Nov	20	6,6	0	40,6
	ETPt _u ,Dec	10,4	6,1	0	29,8
Bilan hydrique climatique (en mm)	BHct _u ,Jan	71,7	64,7	−14,7	172,7
	BHct _u ,Fev	52,9	54,8	−26,7	480
	BHct _u ,Mars	31,2	61,9	−63,3	505,3
	BHct _u ,Avr	13,1	62,4	−83,5	340
	BHct _u ,Mai	−6,8	56,3	−102,2	424,8
	BHct _u ,Juin	−47,2	45,1	−150	195,3
	BHct _u ,Juil	−49,8	48,1	−158,1	218,7
	BHct _u ,Aout	−35,9	49,6	−137,7	307,8
	BHct _u ,Sept	−0,6	53	−88,2	428,4
	BHct _u ,Oct	50,3	62,6	−62,1	509,8
	BHct _u ,Nov	83,6	79,5	−21,5	792,1
	BHct _u ,Dec	89	66	−11,3	536

Tableau .33 – Gamme de valeurs des variables climatiques thermiques de la base de données Météo-France issues d’un traitement SAFRAN relative aux stations du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013. Le numéro qui suit le code de la variable correspond au mois de l’année.

Variable	Code	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Températures minimales (en °C)	tmin_1	−0,3	2,8	−9,7	6,4
	tmin_2	−0,1	3,1	−12,6	7,8
	tmin_3	2,2	2,2	−6,6	9,2
	tmin_4	4,8	2,1	−4,2	10,8
	tmin_5	9,2	2	1	14,1
	tmin_6	12,3	2	4,4	18,8
	tmin_7	13,7	2,1	5,1	20,3
	tmin_8	13,6	2,1	4,4	21,1
	tmin_9	10,1	2,1	1,2	16,8
	tmin_10	7,2	2,3	−1,5	14,4
	tmin_11	2,9	2,6	−7,1	10,3
	tmin_12	0,4	2,8	−8,5	7,8
Températures maximales (en °C)	tmax_1	5,2	2,8	−4,7	13,3
	tmax_2	6,7	3,3	−6,3	16,2
	tmax_3	10,7	2,9	−0,6	18,5
	tmax_4	13,6	3,2	1,7	22,2
	tmax_5	17,7	2,5	5,8	24,1
	tmax_6	21	2,6	11,2	29,5
	tmax_7	22,5	2,7	12	30,1
	tmax_8	23,1	2,9	10,9	32,9
	tmax_9	19,7	2,7	7,3	26,3
	tmax_10	15	2,6	5,3	23,3
	tmax_11	8,9	2,8	−1,6	17
	tmax_12	5,6	2,7	−3,6	13,5
Températures moyennes (en °C)	tmoy_1	2,5	2,7	−7	9
	tmoy_2	3	3,1	−9,7	10
	tmoy_3	6,2	2,4	−3,4	12,9
	tmoy_4	9	2,5	−1,1	15,5
	tmoy_5	13,4	2,1	3,3	18,3
	tmoy_6	16,7	2,1	7,9	23,9
	tmoy_7	18,1	2,2	8,8	24,8
	tmoy_8	18,1	2,3	7,5	25,7
	tmoy_9	14,4	2,2	4,1	20,6
	tmoy_10	10,7	2,3	1,7	18,1
	tmoy_11	5,9	2,6	−4,4	13,3
	tmoy_12	3	2,6	−6,1	10,3

Tableau .34 – Gamme de valeurs des variables climatiques précipitationnelles de la base de données Météo-France issues d'un traitement SAFRAN relative aux stations du réseau RENECOFOR sur la période 1997-2013. Le numéro qui suit le code de la variable correspond au mois de l'année.

Variable	Code	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Évapotranspiration potentielle (en mm)	etp_1	8,9	6,6	0	24,7
	etp_2	13,9	9,3	0	39,9
	etp_3	37,2	12,4	0	74,8
	etp_4	62,1	17	0	118,1
	etp_5	92,9	12,7	31,7	131,9
	etp_6	115,9	16,8	63,4	168,3
	etp_7	118,1	17	68,2	170,2
	etp_8	103,6	15,3	56,6	160,9
	etp_9	72,8	10,2	30,1	102,7
	etp_10	41	7,8	11,4	69
	etp_11	18,1	6,5	0	38,9
	etp_12	8,7	5,5	0	24,7
Bilan hydrique climatique (en mm)	bhc_1	76,9	53,3	-8,8	435,6
	bhc_2	54,2	50,6	-21,8	400,4
	bhc_3	39,3	65,9	-64,5	480,9
	bhc_4	23,5	70,6	-115,2	247,7
	bhc_5	-5,3	55,1	-116,9	207,2
	bhc_6	-41,3	54,3	-156,4	191,7
	bhc_7	-41,4	53	-167,6	168,6
	bhc_8	-24,9	57,7	-158,7	300,8
	bhc_9	3,4	53,1	-87,1	282,9
	bhc_10	60,4	61,3	-39,5	422,2
	bhc_11	86,4	70,9	-22,1	502
	bhc_12	100,2	64,2	-0,3	466,2
Rayonnement incident (en cal/cm ²)	rad_1	40734,8	11472,8	18943	77610
	rad_2	501861039	294895665	0	996093750
	rad_3	58863,5	14734,1	26624	103278
	rad_4	514534815	289762891	0	996093750
	rad_5	101495,3	19259,3	39010	163171
	rad_6	499907914	289397474	0	992187500
	rad_7	129069,3	23930,6	65749	203460
	rad_8	488100048	293770509	0	992187500
	rad_9	160854,7	20081,7	105076	218308
	rad_10	489888308	290217902	0	992187500
	rad_11	175136,5	24778	101215	245006
	rad_12	492811312	291864605	0	984375000
Vapor pressure deficit (en hPa)	vpd_1	0,9	0,5	-0,1	2,8
	vpd_2	1,3	0,6	-0,1	4,1
	vpd_3	2,2	0,8	0,4	5,7
	vpd_4	3	1	0,9	7,5
	vpd_5	3,9	1	1,4	10,2
	vpd_6	5,2	1,5	2	13,5
	vpd_7	6	1,9	1,5	14,7
	vpd_8	5,8	2,2	2	17,6
	vpd_9	3,7	1,1	1	9,4
	vpd_10	2,2	0,8	0,5	6,6
	vpd_11	1,2	0,6	0,1	3,9
	vpd_12	0,9	0,5	-0,04	2,8

Tableau .35 – Récapitulatif des variables présentes lors de la calibration des modèles utilisés dans cette étude. La présence d’une variable dans un modèle est symbolisée par le « x ».

Méthode statistique	Numéro de modèle	Échantillon	Variables spécifiques	Variables géographiques			Variables climatiques				
				longitude	latitude	altitude	12P	12T	12ETP	12Bhc	rad
Régression pas à pas	1	MF	toutes les essences	x	x	x	x	x	x	x	
	2	MF	feuillus	x	x	x	x	x	x	x	
	3	MF	CH/HET	x	x	x	x	x	x	x	
	4	MF	résineux	x	x	x	x	x	x	x	
	5	MF	EPC/SP	x	x	x	x	x	x	x	
	6	SAF	x	x	x	x	x	tmoy	x	x	
	7	SAF	feuillus				x	tmoy	x	x	
	8	SAF	CH/HET	x	x	x	x	tmoy	x	x	
	9	SAF	résineux	x	x	x	x	tmoy	x	x	x
	10	SAF	EPC/SP	x	x	x	x	tmoy	x	x	x
Random Forest	1	MF	x	x	x	x	x	x	x	x	
	2	MF	essence	x	x	x	x	x	x	x	
	3	MF	x				x	x	x	x	
	4	10 variables MF	x	x	x	x	x	x	x	x	
	5	SAF	x	x	x	x		tmoy	x	x	
	6	SAF	essence	x	x	x		tmoy	x	x	
	7	SAF	x	x				tmoy	x	x	
	8	10 variables SAF	x	x	x	x		tmoy	x	x	
	9	10 variables SAF						tmoy	x	x	
	10	SAF	x	x	x	x		tmoy	x	x	x
	11	SAF	x	x	x	x		tmoy	x	x	x
	12	SAF	x	x	x	x		tmoy	x	x	x
	13	SAF	x					tmoy	x	x	x