

CHANGEMENT DES DATES DE DÉBOURREMENT ET DE JAUNISSEMENT DES CHÊNAIES ET DES HÊTRAIES FRANÇAISES AU COURS DU XXI^e SIÈCLE

FRANÇOIS LEBOURGEOIS – JEAN-CLAUDE PIERRAT – VINCENT PEREZ
CHRISTIAN PIEDALLU – SÉBASTIEN CECCHINI – ERWIN ULRICH

Depuis que la phénologie a émergé comme thématique de recherches en écologie, de nombreuses études ont mis en évidence les facteurs modulant les cycles de la floraison ou de la feuillaison au sein des communautés végétales et sur des vastes échelles spatiales (Garnier, 1955 ; Cointat, 1959 ; Debazac, 1965 ; Galoux *et al.*, 1967 ; Kramer *et al.*, 2000 ; Menzel *et al.*, 2006b ; Parmesan, 2007 ; van Asch *et al.*, 2007). Ainsi, les cycles de développement des plantes dépendent essentiellement des conditions thermiques (Chuine, 2000) même si les effets de la photopériode (Falusi et Calamassi, 1997 ; Heide, 1993a ; Kramer, 1995 ; Partanen *et al.*, 1998 ; Sanz-Perez *et al.*, 2009 ; Körner et Basler, 2010) et des conditions hydriques sont parfois évoqués (Penuelas *et al.*, 2004). En raison de ce fort contrôle environnemental, le réchauffement observé depuis les dernières décennies s'est déjà traduit par des changements phénologiques notables. Ainsi, dans l'hémisphère nord, l'avancement des dates de débourrement et le retard de la coloration automnale correspondent à un rallongement de la longueur de saison de végétation de 7 à 15 jours depuis les années 1960 (Chmielewski et Rötzer, 2001 ; Linderholm, 2006 ; Menzel et Fabian, 1999 ; Menzel *et al.*, 2006a ; Schwartz *et al.*, 2006 ; Thompson et Clark, 2008). Étant donné que la mise en place des feuilles et la longueur de la saison de végétation sont au cœur des processus de fonctionnement des écosystèmes végétaux terrestres, tout changement peut avoir des répercussions importantes, notamment sur le cycle annuel du carbone (Berthelot *et al.*, 2005 ; Churkina *et al.*, 2005 ; Davi *et al.*, 2006 ; Delpierre *et al.*, 2009b ; Duursma *et al.*, 2009 ; Richardson *et al.*, 2009 ; Saito *et al.*, 2009 ; Yuan *et al.*, 2008).

Les observations *in situ* sont fondamentales pour le suivi précis des cycles de développement des différentes espèces (Menzel *et al.*, 2006b). En France, pour les espèces forestières adultes, ce sont les observations réalisées depuis 1997 dans le réseau RENECOFOR qui correspondent aux séries homogènes les plus longues disponibles. Dans des articles publiés récemment, notamment dans la *Revue forestière française*, nous avons étudié la variabilité spatiale et temporelle des cycles de développement des espèces et appréhendé le déterminisme climatique et géographique des différentes phases considérées (débourrement, jaunissement et longueur de la saison de végétation) (Lebourgeois *et al.*, 2002 ; Lebourgeois *et al.*, 2006 ; Lebourgeois *et al.*, 2008 ; Lebourgeois et Ulrich, 2010). Ces données ont également été utilisées par d'autres auteurs pour valider des observations satellitales (Soudani *et al.*, 2008) ou étudier plus précisément les processus de coloration automnale (Delpierre *et al.*, 2009a).

Face au questionnement de la communauté scientifique et forestière sur les impacts à long terme des changements climatiques sur les forêts françaises (Piedallu *et al.*, 2009), nous avons entrepris une nouvelle analyse des données phénologiques dans l'objectif de quantifier l'importance des changements attendus à moyen et long terme selon huit hypothèses de changements climatiques (quatre modèles : HadCM3, CGCM2, CSIRO2 et PCM et deux scénarios A2 et B2). L'utilisation de plusieurs modèles est essentielle car elle permet de prendre en compte l'hétérogénéité des prévisions climatiques à long terme. Des études récentes fondées sur les analyses des bilans de carbone suggérant que les hausses de température pourraient affecter très différemment le Chêne et le Hêtre (Davi *et al.*, 2006), nous avons élaboré des modèles spécifiques pour ces deux genres. Ceci a été possible en raison d'un nombre suffisant de données et de peuplements pour assurer la représentativité et la validité des modèles élaborés.

Dans une première étape, les modèles bioclimatiques des dates moyennes de débourrement, de jaunissement et la longueur de la saison de végétation ont donc été élaborés sur la période 1997-2006 pour chaque essence. Dans une seconde étape, ces modèles ont été utilisés pour définir, sur la France entière à partir de données climatiques spatialisées, les dates moyennes sur la période 1991-2000 (période de référence dans la suite de l'étude) et les périodes futures (2041-2070 et 2071-2100). Une analyse régionale des tendances a été menée, l'intensité du changement climatique étant hétérogène à travers le territoire (Déqué, 2007 ; Planton *et al.*, 2008).

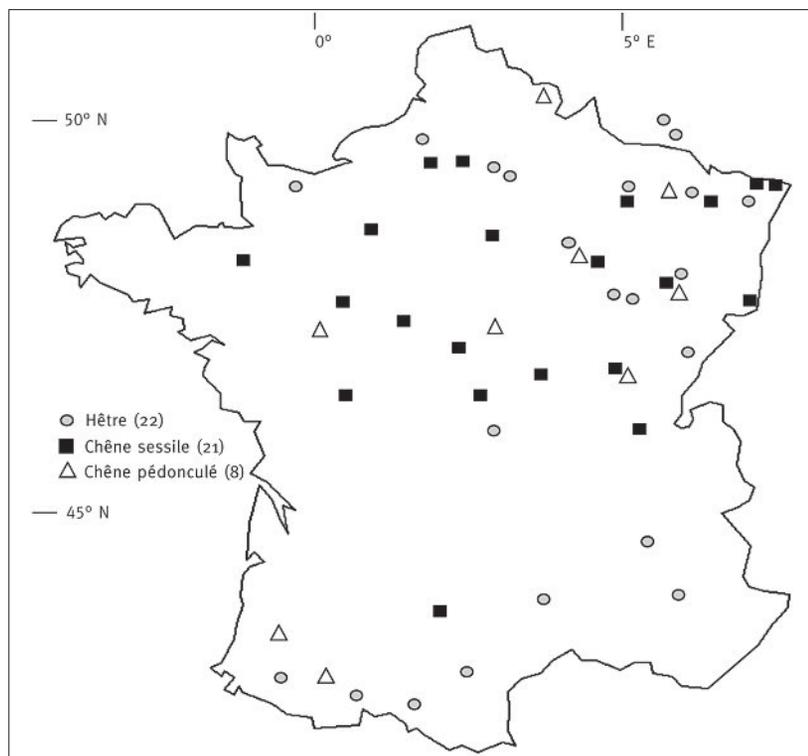
MATÉRIEL ET MÉTHODES

Données phénologiques

Les 29 peuplements de Chênes (*Quercus petraea*, 21 peuplements et *Quercus robur*, 8 peuplements) couvrent majoritairement la moitié Nord de la France avec une distribution homogène d'ouest en est (altitude de 20 à 370 m) (figure 1, ci-contre).

Les 22 peuplements de Hêtre couvrent les plaines du Nord-Est (250 à 570 m) et les montagnes dans le Sud et Sud-Est de la France (400 à 1 400 m). Les deux peuplements du Luxembourg faisant l'objet des mêmes observations ont été également intégrés. Le débourrement et le jaunissement ont été suivis annuellement sur 36 arbres par site (3 672 arbres au total) depuis 1997. Les stades phénologiques ont été observés une fois par semaine par le responsable de la placette à l'aide de jumelles (dans au moins 80 % des cas) entre mars et juin pour le débourrement (dd) et entre septembre et novembre pour le jaunissement (jj). Pour chaque stade, deux dates en jour julien sont données. Les dates pour le débourrement correspondent au jour pour lequel au moins 20 % des bourgeons sont ouverts sur 10 % (dd1) et 90 % (dd9) des 36 arbres observés. Le même principe est appliqué pour le jaunissement des feuilles (jj1 et jj9). Les travaux précédents ayant montré que les meilleurs modèles étaient obtenus avec les dates correspondant aux stades dd1, jj9 et à la longueur de saison de végétation (lsv) calculée entre ces deux dates (Lebourgeois *et al.*, 2008), seuls ces trois paramètres ont été considérés dans le présent travail. Enfin, étant donné que les observations ont été faites sur une base d'observations hebdomadaires, nous estimons une précision théorique de 7 jours et entre 3 et 4 jours en moyenne (Soudani *et al.*, 2008). Entre 1997 et 2006, 431 observations pour dd1 ont été utilisées (178 pour le Hêtre et 253 pour les Chênes) et 439 pour jj9 (179/260), soit un total de 870 dates. Les deux espèces de Chênes n'ont pas été différenciées dans l'analyse en raison de leurs réponses très similaires aux facteurs climatiques (Lebourgeois *et al.*, 2008) et au nombre trop restreint de données pour le Chêne pédonculé empêchant la réalisation d'un modèle spécifique. Ainsi, on parlera de la réponse du Chêne et du Hêtre pour la présentation des résultats.

FIGURE 1 RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES 51 PEUPELEMENTS FEUILLUS DU RÉSEAU RENECOFOR



Données climatiques

Dans le travail présenté ici, les modèles phénologiques ont été élaborés uniquement à partir des données climatiques, c'est-à-dire sans prendre en compte les variables géographiques ou topographiques (latitude, longitude, altitude...) qui sont stables dans le temps et donc inutilisables pour une telle étude (Lebourgeois *et al.*, 2008). Nous ne présenterons donc ici que les modèles bioclimatiques. Leurs taux d'explication sont plus faibles que dans les modèles prenant également en compte les variables géographiques (de 10 à 25 % selon les cas) mais leur valeur prédictive reste néanmoins très élevée (Lebourgeois *et al.*, 2010).

Pour la calibration des modèles, nous avons utilisé les données issues de 71 stations du réseau national de Météo-France. Ces stations ont été choisies de façon à être les plus représentatives possibles des conditions locales des peuplements. La distance moyenne entre les sites et les stations de référence est de 11 km et la différence d'altitude de 112 m. Les moyennes mensuelles des températures et des précipitations ont été calculées annuellement sur la période 1997-2006. Ces données ont été complétées par des données de rayonnement solaire global (R_g) (Piedallu et Gégout, 2007) et d'évapotranspiration potentielle (calculée selon la formule de Turc) (Lebourgeois et Piedallu, 2005) de façon à quantifier un bilan hydrique « climatique » ($P-ETP$). Au total, 48 paramètres climatiques ont été considérés comme variables potentiellement explicatives des dates phénologiques.

Modélisation statistique

Comme pour les articles précédents (Lebourgeois *et al.*, 2008, 2010), nous avons utilisé la technique des forêts d'arbres aléatoires (RandomForest) pour prédire les différentes dates phénologiques. Nous renvoyons les lecteurs à ces articles pour une présentation détaillée en rappelant simplement que cette technique, de plus en plus utilisée en écologie, est une procédure non paramétrique qui ne nécessite pas la spécification d'une forme de modèle *a priori* (Breiman, 2001 ; Vayssières *et al.*, 2000). Cette technique intègre également automatiquement la possibilité d'interactions multiples entre les prédicteurs ainsi que l'existence de relations non linéaires. Du fait de l'existence de ces relations complexes, l'influence (positive ou négative) de chaque variable explicative (données climatiques mensuelles dans notre étude) ne peut cependant pas être évaluée facilement par un indicateur simple (Lebourgeois *et al.*, 2010). La procédure consiste en un calcul d'un ensemble de modèles hiérarchiques qui sont ensuite moyennés pour fournir *in fine* le meilleur modèle prédictif. La modélisation intègre également des procédures « *bootstrapped* », ce qui permet à chaque étape de tester la validité des modèles et des prédictions. L'opérateur doit choisir le nombre de modèles « intermédiaires » (10 000 dans notre cas) ainsi que le nombre de variables à tester à chaque étape de la construction de chacun des arbres hiérarchiques (4 variables ici). Le meilleur modèle est celui qui présente les taux d'explication les plus élevés ainsi que les plus faibles erreurs d'ajustement des données et de prédiction des valeurs (en nombre de jours dans notre cas). Seules les 10 meilleures variables ont été retenues dans les modèles finaux. Les équations des modèles peuvent être utilisées pour prédire la variabilité interannuelle des dates phénologiques. Cependant, l'objectif de cet article étant de quantifier les tendances phénologiques, seules les valeurs moyennes prédites sur les différentes périodes sont présentées.

Scénarios de changement climatique

Pour la période 1991-2000, nous avons utilisé les données spatialisées (températures et précipitations) issues de la base de données climatiques mensuelles européennes (grilles 10'x10' ; Climate Research Unit (CRU TS 1.2), www.cru.uea.ac.uk, New *et al.*, 2002). Pour la période 2001 à 2100, nous avons utilisé les sorties de quatre modèles de circulation atmosphérique (HadCM3, CSIRO2, CGCM2 et PCM) correspondant aux deux scénarios socioéconomiques A2 et B2 disponibles au « Tyndall Centre for Climate Change Research (TYN SC 1.0 – 10'x10') » (Mitchell et Jones, 2005). Le scénario A2 représente le schéma le plus défavorable (augmentation forte de la population sans avancée technologique majeure). L'hypothèse B2 correspond à une croissance mondiale modérée avec des mesures fortes de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le rayonnement solaire global futur a été calculé avec le programme Hélios en intégrant les variations de nébulosité prédites pour les différentes périodes (Piedallu et Gégout, 2007). Pour être en accord avec la résolution spatiale des modèles, les calculs et les cartes ont été réalisés à partir d'une grille de 15 km x 15 km (soit 2 460 prédictions pour l'ensemble du territoire français). Les prédictions au cours du XXI^e siècle ont été faites pour les deux périodes 2041-2070 et 2071-2100 et comparées à la période de référence 1991-2000.

Les deux scénarios et les quatre modèles prédisent un réchauffement important (Piedallu *et al.*, 2009). Cependant, le réchauffement est moindre avec le modèle PCM. Ainsi, à la fin du siècle, la différence entre ce modèle et les trois autres varie de 1 °C à plus de 2 °C selon le mois considéré. Pour chaque modèle climatique, le réchauffement est également moins important avec le scénario B2 qu'avec le scénario A2 (de 1 à 1,5 °C).

La figure 2 (p. 611) présente pour chaque grande division climatique française les changements prédits selon le modèle et le scénario le plus pessimiste (HadCM3-A2), pour la période 2071-2100.

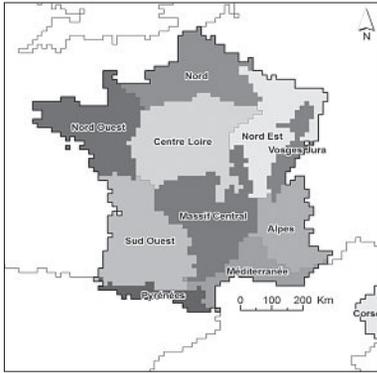


FIGURE 2 VARIATIONS DU CLIMAT OBSERVÉES À LA FIN DU SIÈCLE (PÉRIODE 2071-2100) POUR LES 11 GRANDES ZONES BIOCLIMATIQUES FRANÇAISES SELON LE SCÉNARIO A2-HadCM3 (période de référence 1991-2000)

Les paramètres climatiques présentés correspondent aux variables les plus significatives entrant dans les modèles prédictifs des dates phénologiques. Les chiffres sous les légendes correspondent aux variations moyennes absolues et relatives (en %) observées.

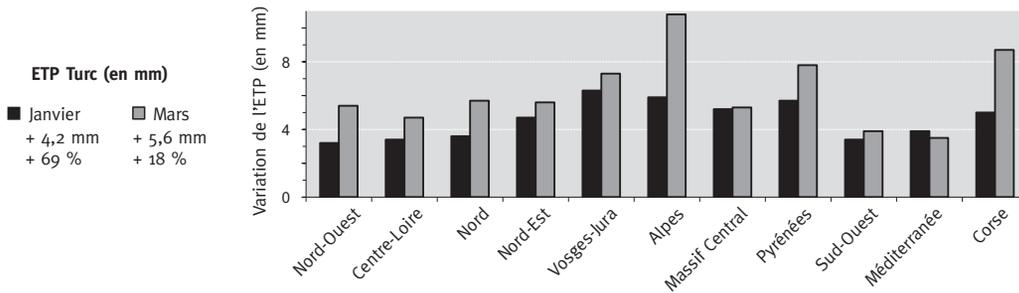
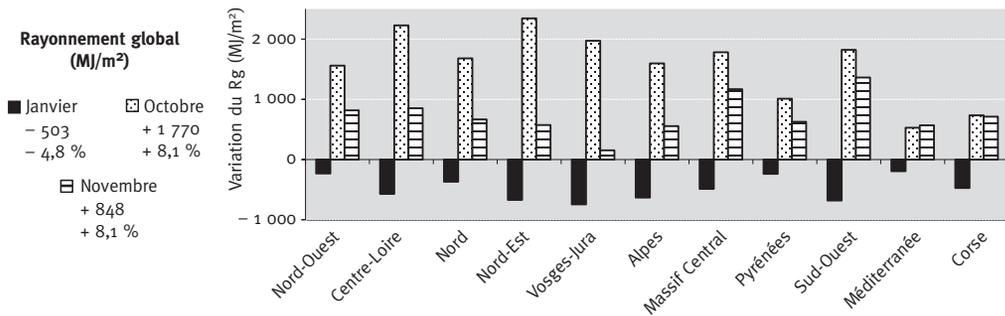
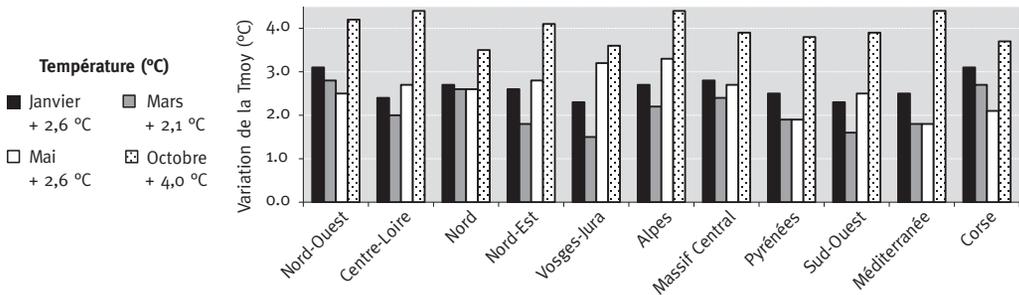
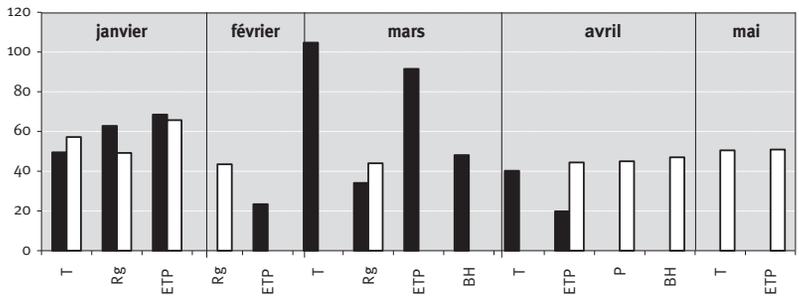


FIGURE 3 IMPORTANCE DES DIFFÉRENTES VARIABLES DES MODÈLES BIOCLIMATIQUES GÉNÉRÉS PAR LES ALGORITHMES DES FORÊTS ALÉATOIRES, POUR LES TROIS STADES ET LES DEUX ESPÈCES

Plus la barre de l'histogramme est grande et plus le poids de la variable dans le modèle est élevé.

Débourrement (dd1)

Poids de la variable dans le modèle

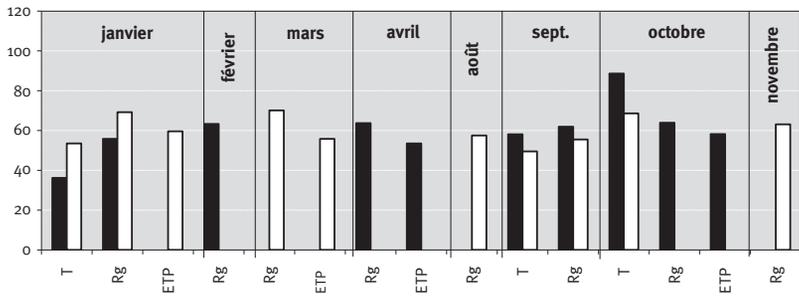


■ Chênes
□ Hêtre

T = température (°C)
P = précipitation (mm)
Rg = rayonnement global (MJ/m²)
ETP = évapotranspiration potentielle selon la formule de Turc (mm)
BH = P-ETP (mm)

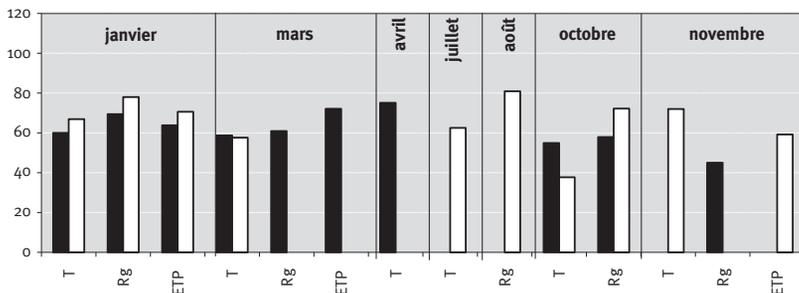
Jaunissement (jj9)

Poids de la variable dans le modèle



Longueur de la saison de végétation (lsv)

Poids de la variable dans le modèle



Erreur ajust. = précision d'ajustement du modèle
Erreur préd. = précision des prédictions des dates
% Var. = % de variance expliquée par le modèle
Chêne = Chênes sessile et pédonculé

	Débourrement		Jaunissement		Saison de végétation	
	Chêne	Hêtre	Chêne	Hêtre	Chêne	Hêtre
Erreur ajust.	3,3 jours	4,1 jours	4,3 jours	6,1 jours	5,3 jours	7,2 jours
Erreur préd.	7,8 jours	9,3 jours	10 jours	13 jours	12,4 jours	15,8 jours
% Var.	51,3 %	38,9 %	35,5 %	34,7 %	54,1 %	49 %

RÉSULTATS

Modèles bioclimatiques

Les modèles bioclimatiques prédictifs sont présentés dans la figure 3 (p. 612) et la cartographie des dates moyennes sur la France entière dans la figure 4 (p.614). Selon le stade considéré et l'espèce, les modèles expliquent entre 35 % et 54 % de la variance des dates phénologiques avec des erreurs de prédiction de 8 à 16 jours. Globalement, les modèles sont meilleurs pour le Chêne que pour le Hêtre : taux de variance expliquée plus élevée et plus faibles erreurs de prédiction.

La date de mise en place des feuilles est contrôlée par les conditions hivernales (essentiellement à travers le mois de janvier) et par celles du début de printemps (mars à mai) (figure 3, p. 612). Le mois de janvier apparaît essentiel mais le poids plus important de cette période pour le Hêtre suggère une plus grande sensibilité de cette espèce aux conditions hivernales par rapport au Chêne. Le Hêtre est ensuite très sensible aux conditions climatiques d'avril et de mai. En revanche, pour le Chêne, ce sont les conditions thermiques de mars (T et ETP) qui contrôlent fortement le débourrement. La cartographie illustre la différence globale entre le Chêne et le Hêtre et également les particularités régionales (figure 4, p. 614). Par exemple, la différence des dates de débourrement entre le Chêne et le Hêtre est de 10 à 20 jours dans l'Ouest de la France (dans le sens d'une précocité du Chêne par rapport au Hêtre) et d'une dizaine de jours dans l'Est. Pour le Chêne, les travaux précédents ont par ailleurs montré que le débourrement était retardé d'en moyenne de 2,6 jours par 100 km (gradient ouest-est) (Lebourgeois *et al.*, 2008, 2010).

Pour le jaunissement, le pourcentage de variance expliqué est moins élevé que pour le débourrement et le rayonnement global joue un rôle plus important (figure 3, p. 612). Ainsi, la température et le rayonnement global en début d'automne (principalement en octobre) sont les paramètres les plus importants pour les feuillus étudiés. Globalement, le jaunissement du Hêtre apparaît plus précoce par rapport à celui du Chêne. Au niveau spatial, la variabilité régionale apparaît moins forte pour le jaunissement que pour le débourrement et ceci pour les deux espèces (figure 4, p. 614).

Enfin, pour la saison de végétation, 6 variables sont communes aux deux espèces mais les conditions estivales (juillet et août) et de fin d'automne (novembre) jouent un rôle plus important pour les hêtraies (figure 3, p. 612). Pour les chênaies, la saison de végétation est en moyenne de 200 jours mais varie de plus de 230 jours à l'extrême Ouest et dans le Sud-Ouest de la France à moins de 190 jours dans le Nord et le Nord-Est (figure 4, p. 614). Pour les hêtraies, la saison de végétation apparaît plus courte (180 jours en moyenne) avec une variabilité spatiale plus faible.

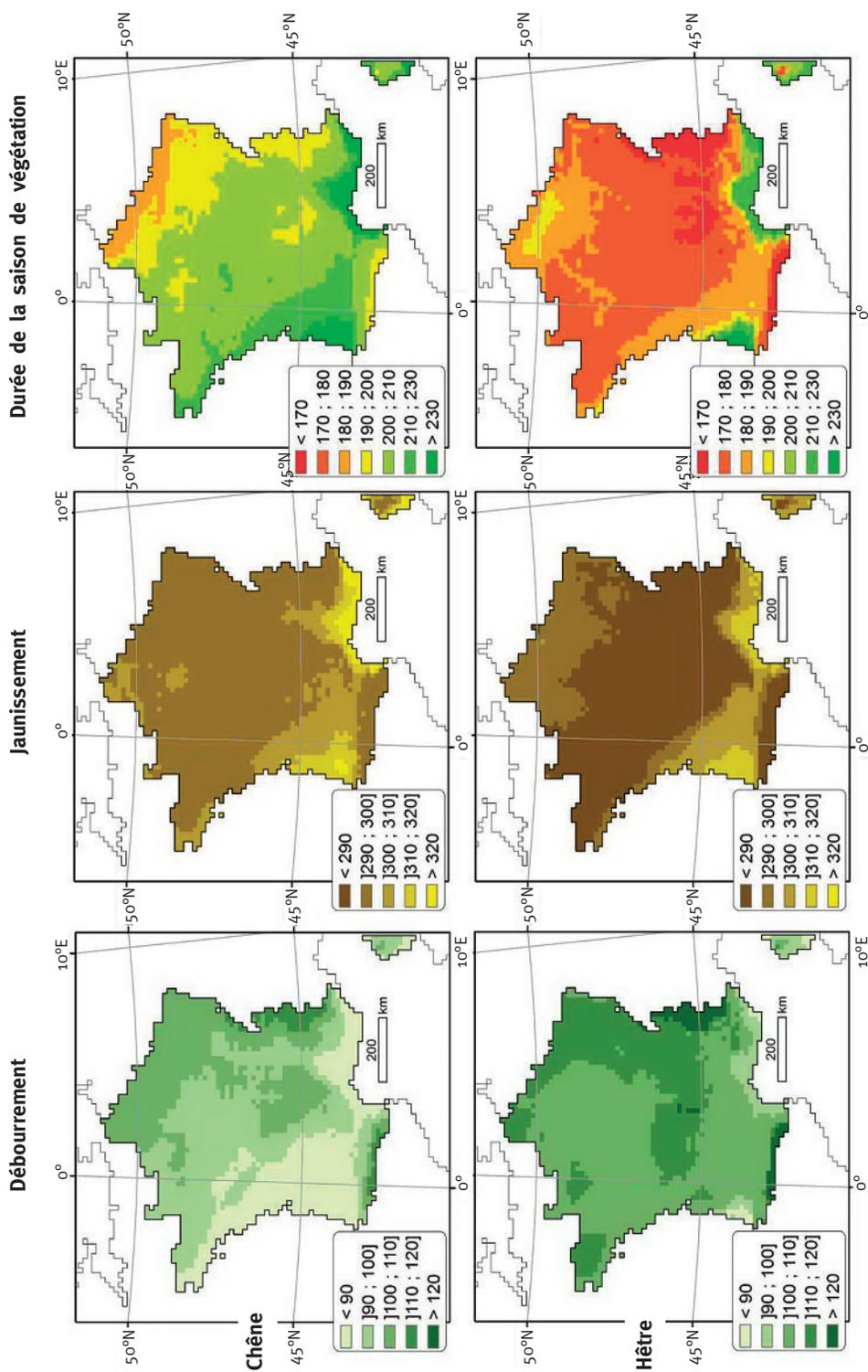
Impact potentiel des changements climatiques

La figure 5 (p. 615) présente les changements prédits par région, par période et par espèce des trois phases phénologiques étudiées. Les changements présentés correspondent aux différences moyennes entre les dates moyennes sur la période 1991-2000 et les dates prédites pour chaque période (2041-2070 et 2071-2100) pour la moyenne des huit scénarios. La figure 6 (p. 616) cartographie les différences moyennes entre 1991-2000 et 2071-2100 selon le scénario HadCM3-A2 (scénario le plus pessimiste).

Ainsi, les figures 5 (p. 615) et 6 (p. 616) montrent que les changements des dates phénologiques sont plus marqués :

- à la fin du siècle (2071-2100) qu'au milieu (2041-2070) ;

FIGURE 4 **CARTOGRAPHIE DES DATES MOYENNES DE DÉBOUREMENT (en jours juliens), DE JAUNISSEMENT (en jours juliens) ET DE LA LONGUEUR DE SAISON DE VÉGÉTATION (en jours) EN FRANCE POUR LA PÉRIODE 1991-2000** Chêne = Chênes sessile et pédonculé



- pour la fin de saison (jaunissement) que pour le début (débourrement) ;
- pour le Chêne que pour le Hêtre mais avec de fortes disparités régionales quant à leur réponse.

Pour les chênaies, la moyenne des huit scénarios se traduit pour la période 2041-2070 par une précocité de débourrement (dd1) de 2,6 jours, un retard de jaunissement (jj9) de 8,1 jours et un rallongement de la saison de végétation (lsv) de 7,4 jours (figure 5, ci-dessous). Pour les hêtraies, les tendances sont plus faibles avec une précocité moyenne de 3,5 jours pour dd1, un retard de 2,5 jours pour jj9 et une saison de végétation rallongée de 4,3 jours. Concernant les différents scénarios, l'effet de l'hypothèse A2 est comparable à celui de l'hypothèse B2. Pour les modèles, les tendances les plus fortes sont observées avec les modèles HadCM3 et CSIRO et les plus

FIGURE 5 VARIATIONS PHÉNOLOGIQUES MOYENNES PAR ZONE BIOCLIMATIQUE ET PAR ESPÈCE CALCULÉES POUR LES 8 HYPOTHÈSES D'ÉVOLUTION DU CLIMAT CONSIDÉRÉES

Les histogrammes blancs correspondent à la différence moyenne entre la période 1991-2000 et 2041-2070 et les histogrammes noirs à la différence 1991-2000 et 2071-2100. Les chiffres à côté des périodes correspondent aux variations moyennes pour l'ensemble de la France et les huit scénarios. Pour chaque cas, les moyennes ont été calculées quand au moins 4 des 8 scénarios présentaient un écart significatif des dates prédites par rapport à la période de référence 1991-2000 (Test Tukey; $p < 0,05$). Le trait épais horizontal correspond aux variations observées avec le scénario le plus pessimiste HadCM3-A2 pour la période 2071-2100 ; ce scénario correspondant généralement aux variations les plus fortes observées. Pour le débourrement, une valeur négative correspond à un débourrement plus précoce. Pour le jaunissement, une valeur positive correspond à un jaunissement plus tardif (plus précoce sinon).

LSV = longueur de la saison de végétation.

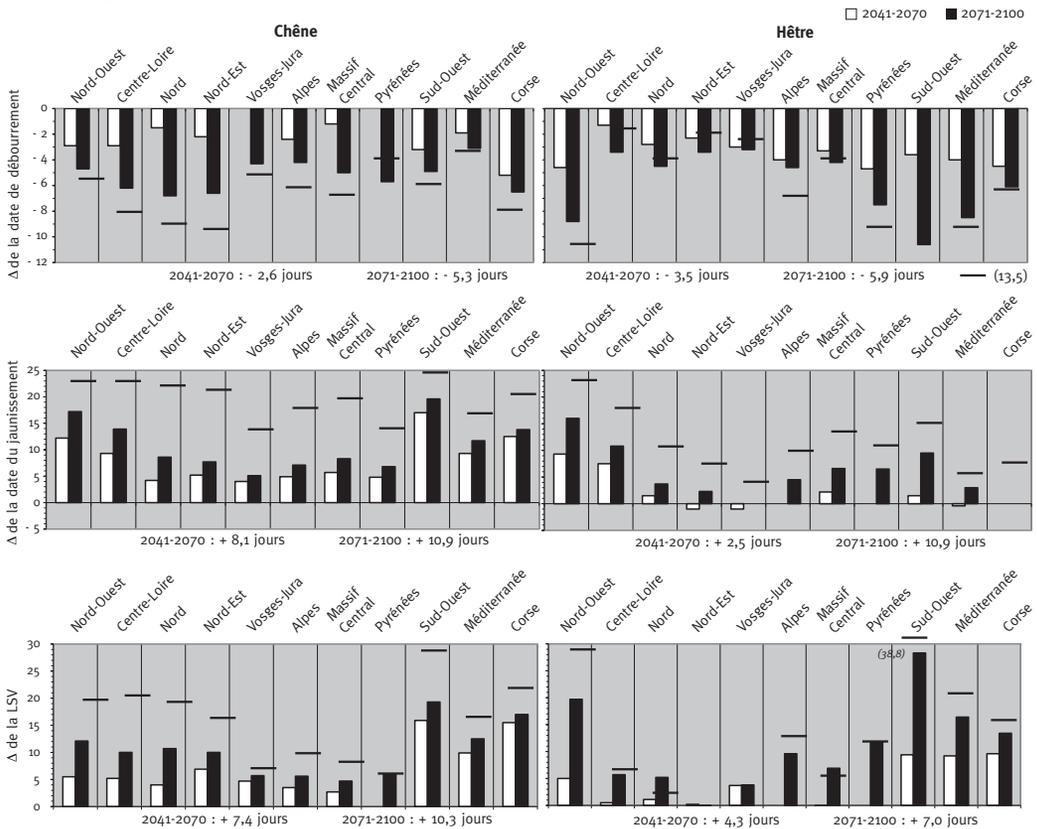
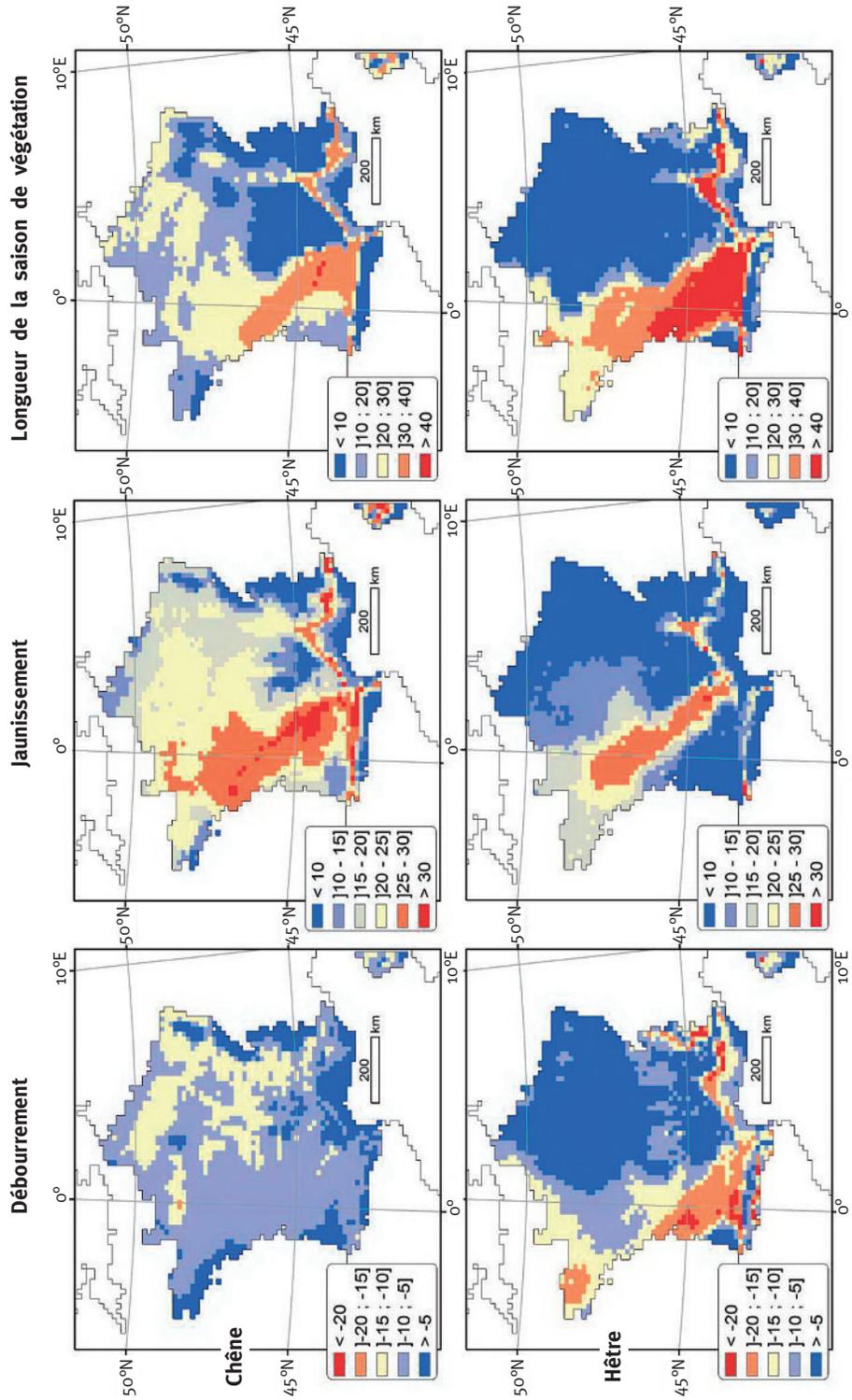


FIGURE 6 VARIATIONS PRÉDITES (en jours) À LA FIN DU XXI^e SIÈCLE (2071-2100) DES DATES DE DÉBOURREMENT (ddd), DE JAUNISSEMENT (jjj) ET DE LA DURÉE DE LA SAISON DE VÉGÉTATION (lsv).

Chaque carte correspond à la différence entre la date moyenne observée sur la période 1991-2000 et celle prédite selon l'hypothèse A2-HadCM3 pour la période 2071-2100. Pour ddd, une valeur négative correspond à une date plus précoce. Pour jjj et lsv, des valeurs positives correspondent respectivement à un retard du jaunissement et à un allongement de la saison de végétation.



faibles avec PCM (Lebourgeois *et al.*, 2010). Ainsi, pour les chênaies et le scénario HadCM3-A2, les évolutions moyennes sont respectivement de $- 3,6$ jours pour dd_1 , $+ 11,9$ jours pour jj_9 et $+ 9,9$ jours pour lsv .

Pour la période 2071-2100, l'effet du scénario A2 est plus fort que celui du scénario B2 et ceci pour tous les modèles. La différence varie de 2 à 5 jours selon l'espèce et le stade phénologique pris en compte. Pour les deux espèces, les variations phénologiques sont plus fortes que pour la période précédente et ceci pour les trois phases considérées (figure 5, p. 615). Par exemple, la saison de végétation augmente d'en moyenne 11 jours pour chacune des deux espèces. Ce rallongement est davantage la conséquence d'un jaunissement plus tardif que celui d'un débourrement plus précoce. Pour cette période, c'est également le scénario HadCM3-A2 qui entraîne les changements les plus forts. Ainsi, en moyenne, le débourrement est avancé pour les chênaies et les hêtraies de, respectivement, 7,2 et 7,1 jours, le jaunissement retardé de 18 et 9,2 jours et la saison de végétation rallongée de 15,8 et 14,5 jours.

Ces tendances globales cachent de très fortes disparités avec des réponses très différentes entre les deux espèces au sein des régions (figure 5, p. 615). Pour les chênaies dans le Nord de la France, on observe une réponse différentielle entre l'ouest et l'est. Ainsi, la précocité du débourrement augmente d'ouest en est alors que, pour le jaunissement, la tendance inverse est observée avec un retard du jaunissement plus fort à l'ouest. Globalement, la saison de végétation augmente donc fortement (20 jours en moyenne avec le scénario HadCM3-A2) (figure 6, p. 616) mais l'origine de ce rallongement apparaît différent le long du gradient longitudinal. Des fortes variations sont également prédites dans le Sud de la France et notamment dans le Sud-Ouest avec un rallongement de la saison de végétation de plus de 30 jours (figure 6, p. 616) essentiellement lié à un jaunissement plus tardif des chênaies.

Pour les hêtraies, les tendances les plus fortes sont observées dans le grand quart nord-ouest de la France avec un rallongement de la saison de végétation de 20 à 40 jours (figures 5 et 6, p. 615 et 616) lié à la fois à un débourrement plus précoce et un jaunissement plus tardif. Là encore, les évolutions en fin de saison sont nettement plus fortes que celles observées pour la phase printanière. Pour le Nord-Est de la France, les prédictions des variations sont nettement plus faibles avec des changements le plus souvent inférieurs à 10 jours. Comme pour les chênaies, la phénologie des hêtraies du Sud et du Sud-Ouest devrait être fortement modifiée mais essentiellement à travers la phase printanière (figures 5, p. 615 et 6, p. 616).

DISCUSSION

Dans cette étude, nous avons présenté les premières cartes des dates simulées de débourrement, de jaunissement et de la longueur de la saison de végétation des chênaies et des hêtraies françaises. Dans nos modèles bioclimatiques, les dates de débourrement et de jaunissement sont fortement corrélées aux conditions hivernales, printanières et automnales ; les périodes clés étant centrées sur janvier, mars-avril et octobre-novembre. Comme attendu, la phénologie du Chêne et du Hêtre est essentiellement sous la dépendance de la température, ce qui est cohérent avec les travaux menés sur les écosystèmes tempérés européens (Rötzer et Chmielewski, 2001). Les effets des conditions thermiques automnales et printanières sont également en accord avec des approches plus physiologiques fondées sur des modèles d'accumulation de degrés-jours (Chuine, 2000 ; Kramer, 1995). La plus grande sensibilité du Hêtre aux températures hivernales par rapport aux Chênes est cohérente avec les modèles physiologiques de Kramer (1995) et avec des études expérimentales comparatives (Falusi et Calamassi, 1997 ; Murray *et al.*, 1989). Ainsi, dans son étude, Kramer (1995) montre que la variance expliquée par un modèle linéaire simple

entre la date de débourrement et la température hivernale est de moins de 10 % pour le Chêne pédonculé et de 30 à 40 % pour le Hêtre ; des températures plus élevées stimulant la précocité de la feuillaison. Dans notre étude, une hausse de 3 °C des températures de janvier sans variation des autres facteurs climatiques se traduit par une avance moyenne de la feuillaison de 1,1 jour pour le Chêne et de 2,7 jours pour le Hêtre (Lebourgeois *et al.*, 2010).

Dans nos modèles, le rayonnement solaire (Rg) joue également un rôle important et particulièrement pour la phase automnale (figure 3, p. 612). Étant donné que les relations entre le rayonnement et la température sont faibles (Lebourgeois *et al.*, 2010), l'effet de ce facteur climatique ne peut pas s'expliquer par un simple effet corrélatif. Le rayonnement solaire est corrélé à l'intensité de la lumière et à la durée du jour et donc à la photopériode (Piedallu et Gégout, 2007 ; Vitasse *et al.*, 2009) ; paramètre dont plusieurs travaux ont montré l'importance non seulement sur la mise en place des feuilles (Falusi et Calamassi, 1997 ; Heide, 1993b) mais également sur les phases automnales (Estrella et Menzel, 2006 ; Vitasse *et al.*, 2009). On sait qu'il existe des interactions complexes entre les besoins en froid en hiver (« *chilling requirements* ») et la longueur du jour. Différents travaux suggèrent que des jours longs peuvent diminuer les besoins en froid en hiver et donc favoriser un débourrement plus précoce (Sanz-Perez *et al.*, 2009). Nos modèles bioclimatiques sont donc cohérents avec ces approches plus fonctionnelles même si les mécanismes physiologiques précis du double contrôle « température-photopériode » des phases phénologiques sont encore largement méconnus.

À l'échelle nationale, les gradients phénologiques les plus forts sont observés du Sud-Ouest au Nord-Est. Ils correspondent à un retard de la feuillaison, une avancée du jaunissement et donc à un raccourcissement de la longueur de la saison de végétation. Par exemple, pour le Chêne, la saison de végétation dure entre 170 et 190 jours dans le Nord et l'Est et plus de 210 jours dans le Sud-Ouest (figure 4, p. 614). Ces gradients géographiques sont très cohérents avec les cartes européennes établies pour la période 1961-1998 (Rötzer et Chmielewski, 2001).

Les erreurs de prédiction de nos modèles sont comparables avec celles obtenues à partir d'observations satellitales (Soudani *et al.*, 2008) ou avec les modèles physiologiques fondés sur les sommes de températures journalières (Chuine, 2000 ; Kramer *et al.*, 2000 ; Rötzer *et al.*, 2004 ; Schaber et Badeck, 2003 ; Thompson et Clark, 2008). Il est important de rappeler que, compte tenu de la périodicité des observations, il est impossible d'obtenir des modèles avec une capacité de prédiction supérieure à 3-4 jours. Pour le Hêtre, la distribution spatiale plus limitée des peuplements pris en compte pourrait en partie expliquer la moindre qualité de nos modèles. Bien évidemment les cartes présentées ici sont des cartes « potentielles », c'est-à-dire que les prédictions des différentes dates (sur les périodes actuelles et futures) ont été faites sur l'ensemble de la France sans tenir compte des fréquences de présence des espèces. Par exemple, nos modèles donnent des dates pour le Chêne et le Hêtre dans les Alpes internes où ces espèces sont très peu présentes.

Bien que les résultats diffèrent entre les modèles et les scénarios (voir Lebourgeois *et al.*, 2010 pour une analyse détaillée), nos analyses suggèrent des variations notables de la phénologie du Chêne et du Hêtre à la fin du XXI^e siècle. Dans la plupart des régions, les modèles suggèrent un débourrement plus précoce et un jaunissement plus tardif aboutissant à un rallongement de la saison de végétation. Ainsi, les changements climatiques pourraient se traduire par un rallongement d'au moins 10 jours de la période active dans de nombreuses régions. Cependant, avec le scénario le plus défavorable HadCM3-A2, des rallongements de 20 à plus de 40 jours pourraient être observés sur une grande partie de la façade océanique (figure 6, p. 616). Nos prédictions suggèrent également des modifications plus importantes de la phase automnale (retard de jaunissement). Une telle différence était attendue car les différents modèles climatiques prédisent des changements plus forts pour la période automnale par rapport aux autres saisons (figure 2, p. 611).

Dans notre étude, les prédictions quant à l'avancée des dates de débourrement sont en moyenne de 6 jours dans 100 ans et moitié moins au milieu du siècle. Ces évolutions sont faibles en comparaison des changements déjà estimés en Europe de 1,5 à 2,5 jours par décennie au cours des dernières décennies (depuis les années 1960 généralement) (Menzel *et al.*, 2006a). De tels niveaux de changements sont également prévus dans le futur par un certain nombre d'auteurs aboutissant à des précocités de débourrement nettement supérieures à nos estimations (Davi *et al.*, 2006). Une des explications pourrait être liée à nos méthodes de modélisation qui prennent en compte les interactions multiples (effets positifs ou négatifs) et les relations non linéaires (avec des effets de seuils) entre tous les facteurs. Ainsi, un effet positif d'une augmentation des températures au printemps peut être fortement limité par une variation simultanée de l'évapotranspiration potentielle ou du rayonnement (Lebourgeois *et al.*, 2010). Dans la majorité des études publiées, les auteurs utilisent des simples relations linéaires entre la température printanière et les dates de débourrement pour prédire les dates futures. Ces travaux émettent donc l'hypothèse que les relations sont stables dans le temps (Menzel *et al.*, 2005) et que les interactions avec les autres facteurs climatiques sont « négligeables ». Si nous établissons de telles relations avec le jeu de données du réseau Renecofor, nous observons des tendances nettement plus fortes et cohérentes avec les valeurs déjà publiées. Par exemple, pour le Chêne, la simple relation linéaire entre dd_1 et la température de mars est $dd_1 = -4,7006 \times T_{mars} + 137,01$ (Lebourgeois *et al.*, 2008). Selon cette relation, une augmentation de 3 °C (valeur possible à la fin du siècle) se traduit par une avancée de la date de débourrement d'environ 14 jours par rapport aux conditions actuelles soit une variation de 1,4 jour par décennie.

Même si les conséquences à long terme restent largement inconnues, les variations des cycles phénologiques devraient affecter le fonctionnement des écosystèmes terrestres à travers les modifications des flux de carbone (Piao *et al.*, 2009 ; Richardson *et al.*, 2009). Une étude récente menée en France sur des chênaies et des hêtraies suggère qu'un rallongement de 38 jours de la durée de la saison de végétation (et donc de la période photosynthétiquement active) devrait se traduire pour une augmentation de la productivité nette de l'écosystème de 150 à 220 gC m²/an pour la période 1960-2000, soit 1,5 à 2,2 tC/ha/an (Davi *et al.*, 2006). Ces auteurs suggèrent également que cette productivité nette devrait augmenter davantage pour les chênaies que pour les hêtraies en réponse à des modifications plus importantes de la phénologie des chênaies. Même si nos estimations des changements sont moindres, on peut donc s'attendre à des effets notables sur la croissance des peuplements forestiers. Étant donné que nous observons des évolutions régionales très différentes (figure 6, p. 616), nous pouvons également émettre l'hypothèse d'une affectation différente des flux de carbone entre les régions et entre les espèces ; les peuplements de l'Ouest de la France étant globalement davantage affectés que les forêts de l'Est. Cependant, des travaux récents estiment également qu'un fort réchauffement automnal pourrait entraîner une perte de carbone par les écosystèmes terrestres en conséquence d'une plus forte stimulation de la respiration par rapport à la photosynthèse (Piao *et al.*, 2008). Ces auteurs émettent donc l'hypothèse que, si le réchauffement automnal est plus intense que celui du printemps, la capacité des écosystèmes à séquestrer le carbone pourrait être nettement inférieure à ce qui est souvent envisagé. Le débat reste donc largement ouvert et des travaux complémentaires à des échelles régionales devraient être entrepris pour mieux appréhender les conséquences sur la croissance forestière.

Une limitation des modèles présentés ici est qu'ils ne sont pas fondés sur des processus physiologiques avec des relations de causalité « fonctionnelle ». Ainsi, même si nos travaux montrent des changements significatifs, plusieurs études fondées sur modèles journaliers à effets de seuils suggèrent que des températures hivernales trop élevées pourraient entraîner des retards de débourrement en modifiant les rapports entre les besoins en « froid » et les besoins en « chaud » pour la levée de dormance (Morin *et al.*, 2009 ; Thompson et Clark, 2008). Ainsi, une étape ulté-

rière de notre étude serait de développer une approche journalière des processus phénologiques en utilisant, par exemple, les données issues du modèle ARPEGE-SAFRAN (données journalières spatialisées à une échelle de 8 km).

Dans notre étude, même si nous prenons en compte les multiples interactions entre les facteurs explicatifs, nous émettons également l'hypothèse que ces interactions sont transposables dans le temps. Il est cependant tout à fait envisageable que le réchauffement climatique modifie le contrôle des cycles de développement dans le sens d'un effet de plus en plus important de la sécheresse par rapport à la température (Penuelas *et al.*, 2004). Ainsi, en France, la durée des épisodes secs devrait augmenter de 50 % à la fin du siècle et le nombre de jours de canicule devrait être multiplié par 10 (Déqué, 2007). Des interactions encore plus complexes entre le réchauffement, la nutrition et le taux de dioxyde de carbone ont également été étudiées par certains auteurs (Murray *et al.*, 1994). Nous prédisons également des changements des dates de débourrement et de sénescence sans tenir compte de la variabilité génétique intraspécifique et de l'adaptation locale des arbres qui peut permettre un ajustement de la réponse au réchauffement (Chuine *et al.*, 2000 ; Kramer, 1995 ; Kramer *et al.*, 2000). Bien que de très nombreuses questions restent en suspens, nous pouvons émettre l'hypothèse que les relations de compétition entre les espèces pourraient être modifiées, ce qui pourrait affecter particulièrement les peuplements mélangés sur le long terme (Kramer *et al.*, 2000 ; Rötzer *et al.*, 2004) et avoir des répercussions sur l'aménagement forestier et la sylviculture. Typiquement, le débourrement plus précoce du Chêne par rapport au Hêtre dans de nombreuses régions pourrait entraîner une pression de compétition plus forte pour le Hêtre.

François LEBOURGEOIS – Jean-Claude PIERRAT

Vincent PEREZ – Christian PIEDALLU

UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt Bois (LERFoB)

AgroParisTech ENGREF

14 rue Girardet, CS 14216

F-54042 NANCY Cedex

(francois.lebourgeois@agroparistech.fr) (pierrat@nancy-engref.inra.fr)

(vincent.perez@agroparistech.fr) (christian.piedallu@agroparistech.fr)

Sébastien CECCHINI – Erwin ULRICH

Département des Recherches Techniques

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS

Boulevard de Constance

F-77000 FONTAINEBLEAU

(sebastien.cecchini@onf.fr)

(erwin.ulrich@onf.fr)

Remerciements

Nous remercions très sincèrement l'ensemble des forestiers et observateurs du réseau RENECOFOR qui collectent les données phénologiques utilisées dans cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- BERTHELOT (M.), FRIEDLINGSTEIN (P.), CIAIS (P.), DUFRESNE (J.-L.), MONFRAY (P.). — How uncertainties in future climate change predictions translate into future terrestrial carbon fluxes. — *Global Change Biology*, vol. 11, n° 6, 2005, pp. 959-970.
- BREIMAN (L.). — RandomForests. — *Machine Learning*, vol. 45, 2001, pp. 5-32.
- CHMIELEWSKI (F.M.), RÖTZER (T.). — Response of tree phenology to climate change across Europe. — *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 108, n° 2, 2001, pp. 101-112.
- CHUINE (I.). — A unified model for budburst of trees. — *Journal of Theoretical Biology*, vol. 207, n° 3, 2000, pp. 337-347.
- CHUINE (I.), BELMONTE (J.), MIGNOT (A.). — A modelling analysis of the genetic variation of phenology between tree populations. — *Journal of Ecology*, vol. 88, n° 4, 2000, pp. 561-570.
- CHURKINA (G.), SCHIMMEL (D.), BRASWELL (B.H.), XIAO (X.). — Spatial analysis of growing season length control over net ecosystem exchange. — *Global Change Biology*, vol. 11, 2005, pp. 1777-1787.
- COINTAT (M.). — Observations sur la foliaison du Hêtre. — *Revue forestière française*, vol. 11, n° 3, 1959, pp. 214-217.
- DAVI (H.), DUFRÈNE (E.), FRANÇOIS (C.), LE MAIRE (G.), LOUSTAU (D.), BOSCH (A.), RAMBAL (S.), GRANIER (A.), MOORS (E.). — Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. — *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 141, n° 1, 2006, pp. 35-56.
- DEBAZAC (E.-F.). — Observations sur le débournement et la croissance en longueur de quelques espèces de sapins. — *Revue forestière française*, vol. 17, n° 2, 1965, pp. 120-130.
- DELPIERRE (N.), DUFRÈNE (E.), SOUDANI (K.), ULRICH (E.), CECCHINI (S.), BOE (J.), FRANCOIS (C.). — Modelling interannual and spatial variability of leaf senescence for three deciduous tree species in France. — *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 149, n° 6-7, 2009a, pp. 938-948.
- DELPIERRE (N.), SOUDANI (K.), FRANCOIS (C.), KOSTNER (B.), PONTAILLER (J.-Y.), NIKINMAA (E.), MISSON (L.), AUBINET (M.), BERNHOFER (C.), GRANIER (A.), GRUNWALD (T.), HEINESCH (B.), LONGDOZ (B.), OURCIVAL (J.-M.), RAMBAL (S.), VESALA (T.), DUFRENE (E.). — Exceptional carbon uptake in European forests during the warm spring of 2007: a data-model analysis. — *Global Change Biology*, vol. 15, n° 6, 2009b, pp. 1455-1474.
- DÉQUÉ (M.). — Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. — *Global and Planetary Change*, vol. 57, n° 1-2, 2007, pp. 16-26.
- DUURSMA (R.A.), KOLARI (P.), PERAMAKI (M.), PULKKINEN (M.), MAKELA (A.), NIKINMAA (E.), HARI (P.), AURELA (M.), BERBIGIER (P.), BERNHOFER (C.), GRUNWALD (T.), LOUSTAU (D.), MOLDER (M.), VERBEECK (H.), VESALA (T.). — Contributions of climate, leaf area index and leaf physiology to variation in gross primary production of six coniferous forests across Europe: a model-based analysis. — *Tree Physiology*, vol. 29, n° 5, 2009, pp. 621-639.
- ESTRELLA (N.), MENZEL (A.). — Responses of leaf colouring in four deciduous tree species to climate and weather in Germany. — *Climate Research*, vol. 32, n° 3, 2006, pp. 253-267.
- FALUSI (M.), CALAMASSI (R.). — Bud dormancy in *Fagus sylvatica* L. I. Chilling and photoperiod as factors determining budbreak. — *Plant Biosystems*, vol. 131, n° 1, 1997, pp. 67-72.
- GALOUX (A.), SCHNOCK (G.), GRULOUS (J.). — La Variabilité phénologique et les conditions climatiques. — *Bulletin de la Société royale de Botanique de Belgique*, vol. 100, 1967, pp. 309-314.
- GARNIER (M.). — Contribution de la phénologie à l'étude des variations climatiques. — *La Météorologie*, vol. 4, n° 40, 1955, pp. 291-300.
- HEIDE (O.M.). — Daylength and thermal time responses of budburst during dormancy release in some northern deciduous trees. — *Physiologia Plantarum*, vol. 88, n° 4, 1993a, pp. 531-540.
- HEIDE (O.M.). — Dormancy release in beech buds (*Fagus sylvatica*) requires both chilling and long days. — *Physiologia Plantarum*, vol. 89, n° 1, 1993b, pp. 187-191.
- KÖRNER (C.), BASLER (D.). — Phenology under global warming. — *Science*, vol. 327, n° 5972, 2010, pp. 1461-1462.
- KRAMER (K.). — Phenotypic plasticity of the phenology of seven European tree species in relation to climatic warming. — *Plant, Cell and Environment*, vol. 18, n° 2, 1995, pp. 93-104.

- KRAMER (K.), LEINONEN (I.), LOUSTAU (D.). — The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview. — *International Journal of Biometeorology*, vol. 44, n° 2, 2000, pp. 67-75.
- LEBOURGEOIS (F.), CECCHINI (S.), GODFROY (P.), LANIER (M.), PIERRAT (J.-C.), ULRICH (E.). — Phénologie des peuplements du RENECOFOR : variabilité entre espèces et dans l'espace, et déterminisme climatique. — *Rendez-Vous Techniques*, vol. 13, 2006, pp. 23-26.
- LEBOURGEOIS (F.), DIFFERT (J.), GRANIER (A.), BRÉDA (N.), ULRICH (E.). — Premières observations phénologiques des peuplements du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR). — *Revue forestière française*, vol. LIV, n° 5, 2002, pp. 407-418.
- LEBOURGEOIS (F.), PIEDALLU (C.). — Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière. Notions d'indices bioclimatiques. — *Revue forestière française*, vol. LVII, n° 3, 2005, pp. 331-356.
- LEBOURGEOIS (F.), PIERRAT (J.-C.), PEREZ (V.), PIEDALLU (C.), CECCHINI (S.), ULRICH (E.). — Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées françaises : étude sur les peuplements du RENECOFOR. — *Revue forestière française*, vol. LX, n° 3, 2008, pp. 323-343.
- LEBOURGEOIS (F.), PIERRAT (J.-C.), PEREZ (V.), PIEDALLU (C.), CECCHINI (S.), ULRICH (E.). — Simulating phenological shifts in French temperate forests under two climatic change scenarios and four driving GCMs. — *International Journal of Biometeorology*, vol. 54, n° 5, 2010, pp. 563-581.
- LEBOURGEOIS (F.), ULRICH (E.). — Forest trees phenology in the French Permanent Plot Network (Renecofor, ICP forest network). In : "Forests, Carbon Cycle and Climate Change". Chapter 8, pp. 158-171/ edited by Denis Loustau. — Versailles : Édition Quae, 2010 (Collection UpDate Sciences and Technologies).
- LINDERHOLM (H.W.). — Growing season changes in the last century. — *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 137, n° 1-2, 2006, pp. 1-14.
- MENZEL (A.), FABIAN (P.). — Growing season extended in Europe. — *Nature*, vol. 397, 1999, p. 695.
- MENZEL (A.), ESTRELLA (N.), TESTKA (A.). — Temperature response rates from long-term phenological records. — *Climate Research*, vol. 30, n° 1, 2005, pp. 21-28.
- MENZEL (A.), SPARKS (T.H.), ESTRELLA (N.), ROY (D.B.). — Altered geographic and temporal variability in phenology in response to climate change. — *Global Ecology and Biogeography*, vol. 15, n° 5, 2006a, pp. 498-504.
- MENZEL (A.), SPARKS (T.H.), ESTRELLA (N.), KOCH (E.), AASA (A.), AHA (R.), ALM-KUBLER (K.), BISSOLLI (P.), BRASLAVSKA (O.), BRIEDE (A.), CHMIELEWSKI (F.M.), CREPINSEK (Z.), CURNEL (Y.), DAHL (A.), DEFILA (C.), DONNELLY (A.), FILELLA (Y.), JATCZA (K.), MAGE (F.), MESTRE (A.), NORDLI (O.), PENUELAS (J.), PIRINEN (P.), REMISOVA (V.), SCHEIFINGER (H.), STRIZ (M.), SUSNIK (A.), VAN VLIET (A.J.H.), WIELGOLASKI (F.E.), ZACH (S.), ZUST (A.). — European phenological response to climate change matches the warming pattern. — *Global Change Biology*, vol. 12, n° 10, 2006b, pp. 1969-1976.
- MITCHELL (T.D.), JONES (P.D.). — An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. — *International Journal of Climatology*, vol. 25, n° 6, 2005, pp. 693-712.
- MORIN (X.), LECHOWICZ (M.J.), AUGSPURGER (C.O.), KEEFE (J.), VINER (D.), CHUINE (I.). — Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century. — *Global Change Biology*, vol. 15, n° 4, 2009, pp. 961-975.
- MURRAY (M.B.), CANNELL (G.R.), SMITH (I.). — Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming. — *Journal of Applied Ecology*, vol. 26, 1989, pp. 693-700.
- MURRAY (M.B.), SMITH (R.I.), LEITH (I.D.), FOWLER (D.), LEE (H.S.J.), FRIEND (A.D.), JARVIS (P.G.). — Effects of elevated CO₂, nutrition and climatic warming on bud phenology in Sitka spruce (*Picea sitchensis*) and their impact on the risk of frost damage. — *Tree Physiology*, vol. 14, 1994, pp. 691-706.
- NEW (M.), LISTER (D.), HULME (M.), MAKIN (I.). — A high-resolution data set of surface climate over global land areas. — *Climate Research*, vol. 21, n° 1, 2002, pp. 1-25.
- PARMESAN (C.). — Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. — *Global Change Biology*, vol. 13, n° 9, 2007, pp. 1860-1872.
- PARTANEN (J.), KOKSI (V.), HÄNNINEN (H.). — Effects of photoperiod and temperature on the timing of bud burst in Norway spruce (*Picea abies*). — *Tree Physiology*, vol. 18, 1998, pp. 811-816.
- PENUELAS (J.), FILELLA (I.), ZHANG (X.Y.), LLORENS (L.), OGAYA (R.), LLORET (F.), COMAS (P.), ESTIARTE (M.), TERRADAS (J.). — Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. — *New Phytologist*, vol. 161, n° 3, 2004, pp. 837-846.

- PIAO (S.L.), CIAIS (P.), FRIEDLINGSTEIN (P.), DE NOBLET-DUCOUDRE (N.), CADULE (P.), VIOVY (N.), WANG (T.). — Spatiotemporal patterns of terrestrial carbon cycle during the 20th century. — *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 23, 2009, article n° GB4026. DOI: 10.1029/2008GB003339.
- PIAO (S.L.), CIAIS (P.), FRIEDLINGSTEIN (P.), PEYLIN (P.), REICHSTEIN (M.), LUYSSAERT (S.), MARGOLIS (H.), FANG (J.Y.), BARR (A.), CHEN (A.P.), GRELLÉ (A.), HOLLINGER (D.Y.), LAURILA (T.), LINDROTH (A.), RICHARDSON (A.D.), VESALA (T.). — Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. — *Nature*, vol. 451, 2008, pp. 49-52.
- PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J.-C.). — Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modeling. — *Annals of Forest Science*, vol. 64, n° 8, 2007, pp. 899-909.
- PIEDALLU (C.), PEREZ (V.), GÉGOUT (J.-C.), LÉBOURGEOIS (F.), BERTRAND (R.). — Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. — *Revue forestière française*, vol. LXI, n° 6, 2009, pp. 567-593.
- PLANTON (S.), DÉQUÉ (M.), CHAUVIN (F.), TERRAY (L.). — Expected impacts of climate change on extreme climate events. — *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 340, n° 9-10, 2008, pp. 564-574.
- RICHARDSON (A.D.), HOLLINGER (D.Y.), DAIL (D.B.), LEE (J.T.), MUNGER (J.W.), O'KEEFE (J.). — Influence of spring phenology on seasonal and annual carbon balance in two contrasting New England forests. — *Tree Physiology*, vol. 29, n° 3, 2009, pp. 321-331.
- RÖTZER (T.), CHMIELEWSKI (F.M.). — Phenological maps of Europe. — *Climate Research*, vol. 18, 2001, pp. 248-257.
- RÖTZER (T.), GROTE (R.), PRETZSCH (H.). — The timing of bud burst and its effect on tree growth. — *International Journal of Biometeorology*, vol. 48, 2004, pp. 109-118.
- SAITO (M.), MAKSYUTOV (S.), HIRATA (R.), RICHARDSON (A.D.). — An empirical model simulating diurnal and seasonal CO₂ flux for diverse vegetation types and climate conditions. — *Biogeosciences*, vol. 6, n° 4, 2009, pp. 585-599.
- SANZ-PEREZ (V.), CASTRO-DIEZ (P.), VALLADARES (F.). — Differential and interactive effects of temperature and photoperiod on budburst and carbon reserves in two co-occurring Mediterranean oaks. — *Plant Biology*, vol. 11, n° 2, 2009, pp. 142-151.
- SCHABER (J.), BADECK (F.W.). — Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. — *International Journal of Biometeorology*, vol. 47, n° 4, 2003, pp. 193-201.
- SCHWARTZ (M.D.), AHAS (R.), AASA (A.). — Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. — *Global Change Biology*, vol. 12, n° 2, 2006, pp. 343-351.
- SOUDANI (K.), LE MAIRE (G.), DUFRÊNE (E.), FRANÇOIS (C.), DELPIERRE (N.), ULRICH (E.), CECCHINI (S.). — Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. — *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, n° 5, 2008, pp. 2643-2655.
- THOMPSON (R.), CLARK (R.M.). — Is spring starting earlier?. — *Holocene*, vol. 18, n° 1, 2008, pp. 95-104.
- VAN ASCH (M.), TIENDEREN (P.H.), HOLLEMAN (L.J.M.), VISSER (M.E.). — Predicting adaptation of phenology in response to climate change, an insect herbivore example. — *Global Change Biology*, vol. 13, n° 8, 2007, pp. 1596-1604.
- VAYSSIÈRES (M.P.), PLANT (R.E.), ALLEN-DIAZ (B.H.). — Classification trees: An alternative non-parametric approach for predicting species distributions. — *Journal of Vegetation Science*, vol. 11, n° 5, 2000, pp. 679-694.
- VITASSE (Y.), PORTE (A.J.), KREMER (A.), MICHALET (R.), DELZON (S.). — Responses of canopy duration to temperature changes in four temperate tree species: relative contributions of spring and autumn leaf phenology. — *Oecologia*, vol. 161, n° 1, 2009, pp. 187-198.
- YUAN (F.M.), ARAIN (M.A.), BARR (A.G.), BLACK (T.A.), BOURQUE (C.P.A.), COURSOLE (C.), MARGOLIS (H.A.), MCCAUGHEY (J.H.), WOFSEY (S.C.). — Modeling analysis of primary controls on net ecosystem productivity of seven boreal and temperate coniferous forests across a continental transect. — *Global Change Biology*, vol. 14, n° 8, 2008, pp. 1765-1784.

CHANGEMENT DES DATES DE DÉBOURREMENT ET DE JAUNISSEMENT DES CHÊNAIES ET DES HÊTRAIES FRANÇAISES AU COURS DU XXI^e SIÈCLE (Résumé)

Nous avons étudié l'évolution au XXI^e siècle des dates de débourrement, de jaunissement et la longueur de la saison de végétation des chênaies et des hêtraies françaises. Pour cela, nous avons utilisé les observations effectuées entre 1997 et 2006 sur 21 chênaies sessiliflores, 8 chênaies pédonculées et 22 hêtraies du réseau RENECOFOR. Les modèles bioclimatiques prédictifs ont été réalisés à partir de la méthode statistique des forêts d'arbres aléatoires (RandomForest). Les scénarios climatiques utilisés pour le XXI^e siècle correspondent à deux scénarios de développement économique (A2 et B2) et quatre modèles de circulation atmosphérique (HadCM3, CGCM2, CSIRO2 et PCM). Les modèles bioclimatiques ont été utilisés pour cartographier les dates moyennes pour la période récente 1991-2000 et sur les périodes futures 2041-2070 et 2071-2100. Les dates moyennes actuelles et futures ont été comparées pour mettre en évidence les dérives globales mais également les spécificités régionales de chaque espèce. Actuellement, le débourrement des Chênes précède celui du Hêtre. Pour les deux espèces, la durée de la saison de végétation varie de 170 à 180 jours dans le quart Nord-Est de la France à plus de 210 jours dans le Sud-Ouest. Les cycles annuels de développement sont fortement liés aux conditions climatiques des mois de janvier, mars-avril et octobre-novembre à travers la température, le rayonnement solaire global et l'évapotranspiration potentielle. À la fin du XXI^e siècle, nos modèles prédisent par rapport aux moyennes 1991-2000 une avance moyenne de la date de débourrement de 5,3 et 5,9 jours respectivement pour les Chênes et le Hêtre (moyenne pour les 8 scénarios), un retard de jaunissement de 10,9 et 7 jours et un rallongement de la saison de végétation de 10,3 et 10,9 jours. Les changements sont plus importants selon le scénario le plus pessimiste HadCM3-A2 et varient également très fortement selon la région considérée et, pour une même région, entre les deux espèces.

CHANGES IN BUDBURST AND LEAF COLOURING DATES IN FRENCH OAK AND BEECH STANDS IN THE 21st CENTURY (Abstract)

After modelling the large-scale climate response patterns of leaf unfolding, leaf colouring and growing season length of oak and beech trees, we predicted the effects of eight future climate scenarios on phenological events. We used the ground observations on 29 oak stands (21 sessile oak stands and 9 pedunculate oak stands) and 22 beech stands from the French Renecofor Network for the period 1997-2006. We applied RandomForest algorithms to predict phenological events from climatic variables. With the resulting models, we drew maps of phenological events throughout France under present climate and under two climatic change scenarios (A2, B2) and four general circulation models (HadCM3, CGCM2, CSIRO2 and PCM). We compared current observations and predicted values for the periods 2041-2070 and 2071-2100. On average, spring development of oaks precedes that of beech. Growing season length ranges from 170-180 days in northeastern areas to more than 210 days in southwestern regions. Annual cycles in budburst and leaf colouring are highly correlated with January, March-April and October-November weather conditions through temperature, overall sun radiation or potential evapotranspiration depending on species. At the end of the 21st century, earlier budburst (mean for the eight scenarios and both genera: 5.6 days), later leaf colouring (mean: 8.6 days) and an increase in the growing season (10.6 days are anticipated). The changes are greater with the more pessimistic A2-HadCM3 hypothesis and considerably different climatic response patterns were observed at a regional scale and between species.
