

7 > Les effets du changement climatique sur la forêt

27 > Adaptation de la forêt au changement climatique : comment on s'y prépare ?

57 > La forêt, moteur de l'atténuation du changement climatique

83 > Risques environnementaux associés aux stratégies sylvicoles d'atténuation du changement climatique

Sciences Eaux & Territoires



**FORÊT : RELEVER LES DÉFIS
DU CHANGEMENT CLIMATIQUE
EN FRANCE MÉTROPOLITAINE**



Editorial

01 *La rédaction de la revue*

Préface

03 *Élisabeth VAN DE MAELE*

Avant-propos

05 *Christian GINISTY*

Les effets du changement climatique sur la forêt

- 08 **La croissance des forêts et les changements environnementaux**
François LEBOURGEOIS, Marie CHARRU, Jean-François DHÔTE et Jean-Daniel BONTEMPS
- 12 **Comment agir dans un contexte d'incertitude lié aux effets possibles du changement climatique sur l'état de la santé de la forêt ?**
François-Xavier SAINTONGE et Bernard BOUTTE
- 18 **Forêts et changement climatique**
Le constat en région méditerranéenne
Michel VENNETIER

Adaptation de la forêt au changement climatique : comment on s'y prépare ?

- 28 **Comment l'Office national des forêts anticipe les effets du changement climatique ?**
Myriam LEGAY, Brigitte MUSCH, Noémie POUSSE, Anne JOLLY, Jean LADIER, Vincent BOULANGER, Christine DELEUZE, Patrice MENGIN-LECREULX, Alexandre PIBOULE, Yves ROUSSELLE et Claudine RICHTER
- 36 **Focus – AFORCE, le réseau français pour l'adaptation des forêts au changement climatique**
Céline PERRIER



- 40 **Dans une perspective de relance des plantations forestières en France, les producteurs de graines et de plants sont-ils en mesure de satisfaire la demande des reboiseurs ?**
Christian GINISTY, Cécile JOYEAU, Monique GUIBERT et Gwenael PHILIPPE
- 44 **Adapter la gestion pour répondre au défi climatique : l'exemple de la forêt méditerranéenne**
Bernard PRÉVOSTO
- 50 **Prévenir les risques d'incendies de forêt dans un contexte de changement global**
Thomas CURT et Éric RIGOLOT



La forêt, moteur de l'atténuation du changement climatique

- 58 **L'inventaire forestier national pour un suivi permanent, multi-échelles et multi-thématiques de la forêt française et des ressources bois mobilisables**
Antoine COLIN et Henry CUNY
- 64 **La télédétection aéroportée pour la gestion des territoires forestiers de montagne**
Jean-Mathieu MONNET, Pierre PACCARD et Catherine RIOND
- 70 **Réchauffement du climat : est-ce que la forêt française peut apporter des solutions d'ici 2050 ?**
Aude VALADE et Valentin BELLASSEN
- 78 **Gérer les forêts pour atteindre les objectifs climatiques : des compromis à trouver**
Aude VALADE et Guillaume MARIE

Risques environnementaux associés aux stratégies sylvicoles d'atténuation du changement climatique ?

- 84 **Changement climatique : la biodiversité forestière à la croisée des enjeux de conservation et d'atténuation**
Christophe BOUGET, Marion GOSSELIN et Fabien LAROCHE



ÉDITORIAL

P

armi les nombreux services rendus par les forêts, on peut citer leur rôle majeur dans le stockage du carbone émis par les activités humaines. Ainsi aujourd'hui, en France métropolitaine, l'Office national des forêts (ONF) estime qu'environ 70 millions de tonnes de CO₂ sont captés par les 16,9 millions d'hectares de forêts, soit 15 % des émissions de gaz à effet de serre du pays ! Cependant, ces écosystèmes sont de plus en plus menacés par le changement climatique. En témoignent les récents épisodes de sécheresse qui, en fragilisant les peuplements forestiers, ont augmenté l'occurrence et l'intensité des incendies de forêts en France. La répétition des sécheresses au cours de la dernière décennie a aussi affecté l'état sanitaire des arbres. C'est le cas par exemple dans certains massifs des Vosges où des peuplements de sapins et d'épicéas ont dépéri durant l'été 2019.

De nombreuses études scientifiques ont mis en évidence les impacts directs du changement climatique sur les essences forestières. D'autres travaux menés en étroite collaboration avec les acteurs de la filière forêt-bois en France ont pour enjeu d'anticiper les effets probables du climat sur les forêts en proposant diverses solutions d'adaptation. D'autres recherches enfin cherchent à identifier les rôles joués par les forêts dans l'atténuation du changement climatique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Leur objectif est d'orienter la filière de la forêt et du bois vers plus de séquestration de carbone en forêt et dans la construction-bois et vers une utilisation accrue du bois en substitution au carbone fossile et aux matériaux dont la production consomme beaucoup d'énergie (comme le fer, le béton ou l'aluminium), tout en veillant à préserver les services écosystémiques et la biodiversité des massifs boisés.

Ce nouveau numéro de la revue *Sciences Eaux & Territoires* intitulé « Forêts – Relever les défis du changement climatique en France métropolitaine » et piloté par INRAE, expert scientifique dans le domaine de la gestion durable des forêts en France, vous propose des synthèses et des résultats de travaux d'auteurs reconnus sur le sujet.

Bonne lecture.

La rédaction.



Forêts et changement climatique : quels défis à relever ?

PRÉFACE



Le changement climatique est un défi pour l'ensemble des écosystèmes. Il bouscule nos certitudes et nous invite à adapter la façon de gérer et de protéger les milieux naturels pour assurer leur pérennité. Les conséquences du changement climatique sur l'état de santé des forêts poussent à définir des stratégies d'adaptation. Cette adaptation est essentielle au maintien du rôle d'atténuation des forêts.

Nous avons la responsabilité collective de préparer les forêts à résister aux perturbations et variations climatiques. La diversité des forêts françaises est le premier facteur de résilience.

Les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) alertent sur les conséquences possibles du réchauffement planétaire selon différents scénarios. Force est de constater que certaines forêts françaises et européennes, véritables témoins des changements en cours, sont aujourd'hui fortement touchées par des crises sanitaires et climatiques. La succession de sécheresses affaiblit les arbres et les rend plus vulnérables aux attaques d'insectes dont les cycles de reproduction sont par ailleurs accélérés par les conditions de chaleur. La résilience des écosystèmes est compromise, notamment celles des pessières de l'Est de la France.

La crise actuelle nécessite des actions curatives et préventives : les forestiers doivent renouveler les peuplements dépérissants et adapter les forêts françaises en tenant compte des risques futurs. Dans un contexte d'incertitude, les questions posées par le renouvellement et l'amélioration de la résilience des forêts sont nombreuses et complexes. Les réponses sont dans certains cas émergentes. Quelles essences, quelles structures de peuplements, quels itinéraires sylvicoles privilégier ?

Les solutions dépendront des contextes locaux ; les choix ne se feront pas sans risque. L'incertitude sur les scénarios climatiques impose d'identifier des stratégies « sans regret ». Pour cela, l'acquisition de connaissances et le transfert vers les gestionnaires des résultats acquis lors des travaux de recherche deviennent prioritaires.

Ainsi, les travaux et réflexions présentés dans ce numéro spécial de la revue *Sciences Eaux & Territoires* adressent des questions majeures pour les forêts dans le contexte du changement climatique et les résultats de ces travaux alimenteront les futures orientations de gestion. Face aux fortes incertitudes soulevées par les changements globaux en cours, l'interface entre le monde scientifique et celui des politiques publiques doit être consolidée et les interactions, régulières : tous les éclairages sont à prendre en considération.

Le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, en charge des forêts, consacre, depuis des années, un budget annuel de près d'un million d'euros aux programmes de recherche et développement sur l'adaptation au changement climatique des forêts (modalités de renouvellement des peuplements forestiers, adaptation au changement climatique, ressources génétiques forestières, suivi de la dynamique et du fonctionnement des écosystèmes forestiers).

Relever le défi de l'adaptation des forêts au changement climatique constitue l'une des orientations stratégiques du Programme national de la forêt et du bois (PNFB 2016-2026). Conscient de l'amplification du phénomène de dépérissement des essences feuillues et résineuses en France, le ministre en charge de la forêt, Didier Guillaume, a demandé aux acteurs de la filière forêt-bois, lors du Conseil supérieur de la forêt et du bois du 8 octobre 2019, une feuille de route pour l'adaptation des forêts au changement climatique, d'ici mars 2020.

Lors du Conseil de défense écologique du 7 novembre 2019, il a été décidé de nommer un parlementaire en mission sur ce sujet.

Les défis à relever sont tels que seule une mobilisation large des parties prenantes permettra de trouver les solutions à court, moyen et long terme. La recherche fondamentale et la recherche appliquée sont indispensables pour éclairer les décisions et orienter les futures politiques publiques en matière de gestion des forêts et d'utilisation du bois.

Élisabeth VAN DE MAELE

*chefe du bureau de la gestion durable de la forêt et du bois,
Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, DGPE/SDFE/SDFCB.*



Changement climatique : quels risques pèsent sur les écosystèmes forestiers ? Comment ont-ils évolué ? Comment peut-on adapter la forêt pour la rendre moins sensible ? Quels rôles peut jouer le secteur forêt-bois dans l'atténuation du changement climatique ?

AVANT-PROPOS



onstruire un numéro spécial de la revue *Sciences Eaux & Territoires* sur « la forêt et le changement climatique » a été l'occasion de solliciter différents acteurs du monde de la recherche ou de la gestion et permet d'exprimer différents points de vue sur les nombreuses questions que soulève ce thème.

Quels risques pèsent sur les écosystèmes forestiers ? Comment ont-ils évolué ?

Comment peut-on adapter la forêt pour la rendre moins sensible ? Ou, à un autre niveau,

quels rôles peut jouer le secteur forêt-bois dans l'atténuation du changement climatique ?

C'est à ces quelques questions auxquelles les auteurs de ce numéro ont cherché à répondre en présentant leurs travaux.

La première partie de ce numéro spécial témoigne d'observations sur le « comment se manifeste aujourd'hui le changement climatique sur nos forêts métropolitaines ». Les auteurs développent les observations sur la croissance des arbres et des peuplements forestiers, puis sur la santé des forêts et terminent par un focus sur les forêts méditerranéennes, particulièrement concernées.

La deuxième partie du numéro traite des options d'adaptation : l'Office national des forêts explicite sa stratégie, le Réseau mixte technologique pour l'adaptation des forêts au changement climatique (AFORCE), qui réunit tous les acteurs du monde forestier mobilisés sur le changement climatique, présente les actions menées depuis près de dix ans pour adapter les forêts et former leurs gestionnaires et propriétaires. Puis suivent des témoignages d'ingénieurs et de chercheurs qui présentent des réflexions et initiatives nationales ou régionales développées pour accompagner la filière et les territoires dans ces changements.

La troisième partie aborde la question du rôle de la forêt et du bois dans les stratégies d'atténuation du changement climatique et met en avant les outils de suivi et de caractérisation des forêts (l'inventaire forestier de l'Institut national de l'information géographique et forestière, les outils de télédétection), mais aussi évalue l'impact possible des différentes stratégies d'adaptation ou d'atténuation.

Enfin, ce numéro se termine par une attention sur la biodiversité forestière placée au croisement d'enjeux de conservation et d'atténuation, et qu'il ne faut pas négliger.

Au moment de boucler ce numéro, nous sommes bien conscients de ne pas avoir fait le tour de cette question complexe, regrettant que tous les auteurs sollicités n'aient pu s'exprimer dans un délai de réalisation relativement court ; un grand merci à tous les auteurs de ce numéro. La question forêt et changement climatique nécessite encore bien des travaux de recherche ; il est cependant urgent d'agir et de décupler nos forces pour convaincre et entraîner propriétaires, gestionnaires et décideurs dans une politique engagée contre le changement climatique en donnant au secteur forêt-bois tous les moyens et la place dont il a besoin. INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement), nouvel acteur de la recherche créé par fusion de l'INRA et d'Irstea, compte bien jouer son rôle dans ce challenge !

Christian GINISTY

*INRAE, UR Écosystèmes forestiers,
coordinateur scientifique du numéro*



Biomasse morte en forêt méditerranéenne.

LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FORÊT

En métropole, la superficie des forêts a progressé de 0,7% par an depuis 1980 (selon les chiffres 2019 de l'Institut national de l'information géographique et forestière) et la productivité des espèces forestières majeures (sapin, épicéa, chênes, hêtre...) a augmenté en raison notamment de la hausse du taux de CO₂ dans l'atmosphère. Ces bonnes nouvelles sont cependant à nuancer. En effet, les experts scientifiques estiment que les conditions climatiques de plus en plus variables et drastiques pourraient se traduire prochainement par un ralentissement notable de la croissance, voire à des mortalités accrues dont les premiers signes sont identifiables aujourd'hui, en particulier dans la région méditerranéenne.

- 08 **La croissance des forêts et les changements environnementaux**
François LEBOURGEOIS, Marie CHARRU, Jean-François DHÔTE et Jean-Daniel BONTEMPS
- 12 **Comment agir dans un contexte d'incertitude lié aux effets possibles du changement climatique sur l'état de la santé de la forêt ?**
François-Xavier SAINTONGE et Bernard BOUTTE
- 18 **Forêts et changement climatique – Le constat en région méditerranéenne**
Michel VENNETIER

La croissance des forêts et les changements environnementaux

Les forêts de l'hémisphère nord sont plus productives qu'il y a plusieurs décennies. Telle est la tendance observée et quantifiée dans différentes études menées depuis les années 1970 et qui mettent en cause plusieurs facteurs : les modifications des régimes pluviothermiques, les dépôts azotés et l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. À partir de données de l'inventaire forestier national, les auteurs de cet article se sont penchés sur l'évolution des forêts françaises. Leurs résultats à des échelles plus fines mettent en évidence des variations extrêmes (négative et positive) liées aux espèces et au contexte environnemental local qu'il conviendrait de suivre en « temps réel » compte tenu des grandes incertitudes futures liées au climat.

Convergence des approches : une croissance plus soutenue...

La problématique des changements environnementaux sur les écosystèmes forestiers remonte aux années 1970-1980. Les premiers travaux ont abordé les changements de croissance à partir des accroissements mesurés au niveau de l'arbre en utilisant des approches rétrospectives de nature dendrochronologique (croissance radiale) ou fondées sur des analyses de tige (croissance en hauteur). Les études initiales ont concerné l'augmentation du CO₂ atmosphérique, attestée par des mesures à l'observatoire d'Hawaii dès les années 1970 et ses conséquences sur la croissance des forêts naturelles subalpines de conifères dans l'ouest des États-Unis. À la même période, des chercheurs finlandais constataient aussi des augmentations de la croissance des pineraies sylvestres boréales ; augmentation également attribuée au CO₂ atmosphérique. En Allemagne, et dans le contexte européen des impacts potentiels de la pollution atmosphérique acide (H₂SO₄ et HNO₃/NH₄), ce sont les travaux menés aussi sur résineux (épicéa, pin sylvestre, sapin) qui ont illustré pour la première fois, et au niveau du peuplement forestier, des croissances plus soutenues dans les périodes récentes. Contrairement aux

études précédentes, les auteurs évoquaient également l'effet des apports azotés atmosphériques pour expliquer leurs résultats. De façon simultanée en France, ce sont les travaux de dendroécologie menés par Michel Becker sur la sapinière vosgienne dans le cadre des recherches sur les dépérissements forestiers en relation avec la pollution atmosphérique (programme DEFORPA¹) qui ont constaté, d'une façon tout à fait inattendue, des évolutions très nettes de la croissance depuis la fin du dix-neuvième siècle. Au vu de l'importance du phénomène, des recherches complémentaires ont été rapidement menées dans d'autres contextes et pour d'autres espèces forestières. Elles ont illustré une tendance générale à l'augmentation de la croissance dans l'hémisphère nord des espèces forestières majeures (sapin, épicéa, chêne, hêtre... photo 1). En revanche, peu de travaux ont été menés dans les forêts tempérées de l'hémisphère sud ou en contexte intertropical. Les estimations de croissance avancées, de l'ordre de +100% sur le siècle, ont toutefois paru être d'un ordre de grandeur soumis à caution.

1. Programme DEFORPA :
« Dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique ».

❶ Les forêts de l'hémisphère nord plus productives qu'il y a plusieurs décennies : une tendance observée et quantifiée par plusieurs études scientifiques.



© D. Gauthier (INRAE)

En France, c'est à partir de ces années que l'on a commencé à parler des changements de productivité forestière pour aborder la question « des forêts qui poussent mieux maintenant qu'il y a quelques décennies », mais également à mettre en œuvre de nouvelles approches et analyses sur des jeux de données originaux : réseaux de placettes permanentes d'expérimentations sylvoles et analyses de tiges permettant d'échantillonner la croissance en hauteur dominante, données issues des inventaires forestiers nationaux, avec le point commun de dépasser l'échelle de l'arbre pour poser un diagnostic représentatif à l'échelle du peuplement forestier et de sa capacité productive. Ainsi, contrairement aux travaux précédents, ces études ont abordé la productivité du peuplement en comparant :

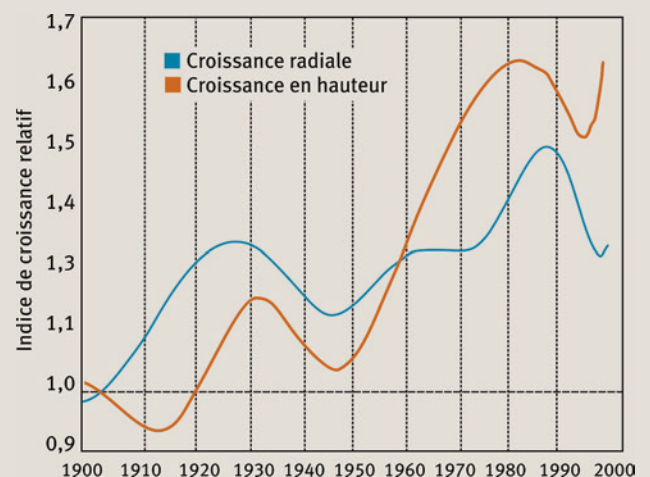
- la croissance à des valeurs de référence issues de tables de production,
- la productivité de deux générations successives de peuplement sur un même site,
- ou encore la croissance en surface terrière² du peuplement telle que caractérisée sur les points de sondage du programme d'inventaire forestier français.

Ces approches originales ont apporté des éclairages nouveaux sur les changements de productivité. Ainsi, dans le quart nord-est, la croissance des hêtraies est apparue supérieure de l'ordre de + 50 % entre le début et la fin du vingtième siècle, et ceci à la fois pour l'accroissement en diamètre et en hauteur (figure ❶). Ces travaux ont également montré que ces tendances n'étaient pas constantes mais pouvaient se ralentir voire disparaître pendant certaines périodes : réduction entre les années 1940 et 1950 ou diminution depuis les années 1990. Elles ont encore démontré la plausibilité d'un effet stimulant des dépôts atmosphériques azotés. Enfin, des comparaisons méthodologiques entre méthode dendrochronologique (notamment méthode de standardisation dite « RCS »³) et une modélisation simultanée des effets des détermi-

nants de la croissance a permis de conclure que les plans d'échantillonnages de la méthode dendrochronologique étaient biaisés, du fait d'un échantillonnage excessif dans des conditions stationnelles peu favorables à des âges avancés d'arbre ou de peuplement. ▶

2. La surface terrière d'un peuplement, notée G, correspond à la surface de toutes les sections transversales des troncs, à 1,30 m de hauteur, des arbres présents sur un hectare de forêt. Elle s'exprime en m² par hectare.
3. RCS : *Regional Curve Standardization*.

- ❶ Évolution de la croissance radiale et en hauteur (exprimée ici en indice relatif) sur le vingtième siècle pour des hêtraies du quart nord-est de la France poussant en peuplements purs réguliers (arbre moyen) (modifié d'après Bontemps *et al.*, 2010a, figure 4). L'indice relatif correspond à la croissance observée par rapport au niveau de référence de 1900.



▶ À une échelle plus large, les données de l'Inventaire forestier national explorées sur huit espèces forestières poussant dans des larges gradients écologiques (climat et sol) ont aussi permis d'analyser les variations décennales et régionales des tendances de croissance. Ainsi, l'étude des variations de surface terrière (G) sur la période 1982-2005 (ΔG en $m^2/ha/5$ ans) a mis en évidence une forte variabilité interspécifique allant d'une augmentation continue pour l'épicéa commun ($\sim +40\%$) à une diminution continue pour le chêne pubescent ($\sim -17\%$), en passant par une augmentation (jusque dans les années 1995) puis une stagnation pour le chêne pédonculé et le sapin à un déclin pour le chêne sessile, le hêtre, le pin sylvestre et le pin d'Alep (figure 2). Comme les résultats précédents sur les seules hêtraies du quart nord-est, il apparaît bien des changements de croissance mais dont l'intensité semble cependant diminuer, voire s'inverser, depuis les dernières années. Dans ces études fondées sur les données d'inventaire, la mise en correspondance avec les normales climatiques et les changements climatiques simultanés à la croissance a permis de démontrer le rôle désormais majeur joué par le climat et ses changements dans la structuration de ces tendances, avec des inflexions dans des contextes chauds et secs, et des progressions spectaculaires dans les conditions fraîches et humides de montagne.

Des causes qui se sont précisées

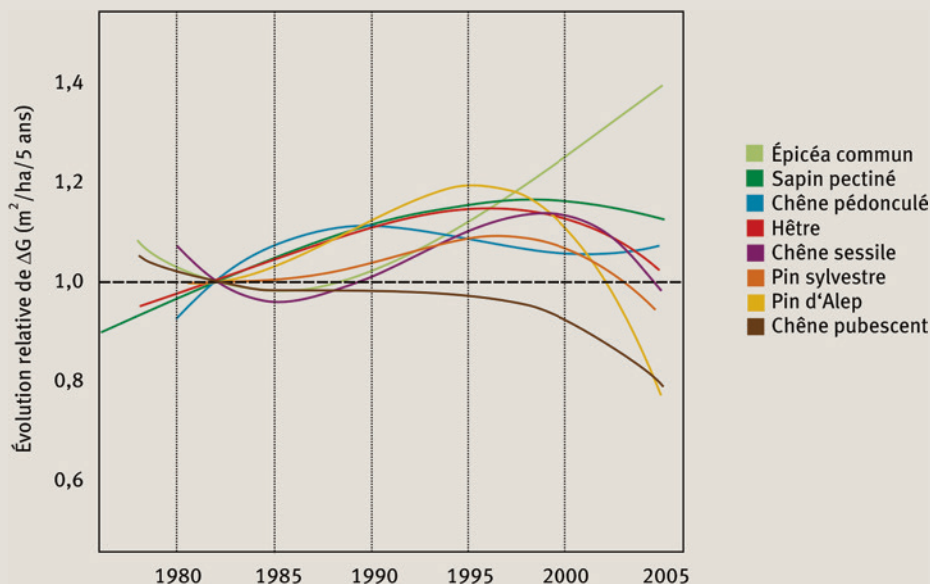
La concomitance des changements de productivité avec les modifications environnementales a immédiatement posé la question du lien entre deux phénomènes, faisant de la recherche des causes de ces évolutions une préoccupation majeure de la communauté scientifique. Sur des arbres forestiers longévifs et soumis à des perturbations

tout au long de leur vie, il est encore particulièrement difficile d'identifier les effets respectifs des facteurs expliquant potentiellement ces changements. Parmi les facteurs locaux, une sylviculture plus dynamique a souvent été évoquée pour expliquer une partie de ces changements, mais ce facteur n'apparaît pas un facteur explicatif majeur. Des peuplements jeunes poussant dans de meilleures conditions édaphiques (par exemple, dynamique naturelle ou plantation sur les anciennes terres agricoles présentant des sols plus riches que les sols forestiers « anciens ») est aussi un facteur local souvent évoqué. Concernant les facteurs externes au peuplement, les modifications des régimes pluvio-thermiques (notamment réchauffement), les apports azotés atmosphériques à courte et longue distance ou encore l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 sont les trois facteurs qui retiennent encore fortement l'attention de la communauté scientifique.

Si l'augmentation du CO_2 atmosphérique coïncide bien avec les augmentations globales de croissance à large échelle, elle ne peut pas expliquer à elle seule les différences régionales. Par exemple, pour les hêtraies, les différences nettes de statut nutritionnel azoté des peuplements apparaissent un facteur explicatif majeur des différences de tendances observées entre le nord-est et le nord-ouest de la France corroborant les observations faites sur le sapin pectiné dans le contexte vosgien ou sur les réseaux de suivis ou d'expérimentations à l'échelle européenne. Ce résultat est par ailleurs très cohérent avec ceux obtenus sur les expériences d'enrichissement en CO_2 (baptisées « FACE »⁴) et de fertilisation azotée qui ont démontré le caractère très transitoire ou inexistant

4. FACE : Free Air CO_2 Enrichment.

2 Comparaison des changements de productivité observés pour huit espèces forestières majeures poussant en peuplements purs réguliers par rapport à l'année de référence 1982 (période 1982-2005). Les données d'accroissements sont issues des données de l'Inventaire forestier national (IFN) (modifié d'après la thèse de Marie Charru 2012, figure 4.15).



de cette stimulation par le CO₂ en l'absence d'augmentation conjointe de la disponibilité azotée. Concernant l'évolution du climat et particulièrement l'augmentation des températures, les tendances de croissance à leur début ne coïncident pas toujours avec celles du réchauffement (mais en revanche avec les émissions azotées). À l'échelle décennale, il apparaît même que les écarts importants par rapport à la moyenne (chaleurs élevées, sécheresses) ont été la cause des ralentissements des tendances (cas typique du « creux » pour les hêtraies du nord-est des années chaudes et sèches 1940-1950). Tous les travaux récents montrent par ailleurs un fort ralentissement depuis la fin des années 1990 et le début des années 2000 ; période coïncidant avec des sécheresses notables (2003) et des successions d'années climatiquement de plus en plus contrastées. L'interaction de ces derniers changements avec le climat moyen des contextes forestiers est par ailleurs avérée. De la sorte, on peut avancer l'idée d'une transition historique dans les facteurs dominants ayant influencé la productivité forestière, d'abord liés à la pollution atmosphérique azotée en interaction possible avec le CO₂ puis un rôle du changement climatique qui s'est récemment renforcé au point de dominer l'explication du signal dans les approches corrélatives.

Ces tendances ne doivent pas cacher la complexité causale du phénomène. Ainsi, des approches de spatialisation du changement de productivité ont démontré que même dans des contextes où le changement de croissance moyen était fort, il était possible d'identifier localement des variations extrêmes (négatives et positives) qui pointent le rôle, difficile à capturer en pratique, des conditions stationnelles locales dans la modulation de ces forçages. De la même façon, les effets sur la physiologie sont encore largement discutés et doivent être considérés dans un contexte de traits fonctionnels variables entre les espèces et les conditions dans lesquelles elles poussent. De ce point de vue, la question de savoir si ces changements sont « espèce-dépendants » (au sens fonctionnel) ou « contexte-dépendants » (au sens du contexte environnemental où croissent les espèces) reste une question scientifique ouverte.

À l'avenir, des conditions climatiques de plus en plus variables et drastiques pourraient se traduire par un ralentissement notable de la croissance, voire à des mortalités accrues dont les premiers signes sont identifiables, questionnant de nouveau la communauté forestière et scientifique sur les effets futurs des changements environnementaux, et la capacité à intégrer un contexte pluri-factoriel global et local, notamment à des fins prédictives. Les inventaires forestiers nationaux, parce qu'ils couvrent de grands territoires, et embrassent toute la diversité des espèces, et que leur fréquence de réalisation augmente fortement (notion d'inventaire continu) doivent aussi jouer à l'avenir un rôle-clé dans le monitoring « en temps réel » des impacts des changements environnementaux sur la croissance. ■

Les auteurs

François LEBOURGEOIS

Université de Lorraine, AgroParisTech,
INRAE, UMR Silva, 54000 Nancy, France.
✉ francois.lebourgeois@agroparistech.fr

Marie CHARRU

Bordeaux Sciences Agro, INRAE,
UMR ISPA,
33175 Gradignan, France.
✉ marie.charru@inrae.fr

Jean-François DHÔTE

INRAE, ONF, UMR BioForA,
45075 Orléans,
France.
✉ jean-francois.dhote@inrae.fr

Jean-Daniel BONTEMPS

IGN, Laboratoire d'Inventaire Forestier,
54000 Nancy, France.
✉ jean-daniel.bontemps@ign.fr

EN SAVOIR PLUS...

📖 **BONTEMPS, J.-D., HERVÉ, J.-C., DHOTE, J.-F.**, 2010, Dominant radial and height growth reveal comparable historical variations for common beech in north-eastern France, *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 8, p. 1455-1463.

📖 **BONTEMPS, J.-D., HERVÉ, J.-C., DUPLAT, P., DHOTE, J.-F.**, 2012, Shifts in the height-related competitiveness of tree species following recent climate warming and implications for tree community composition: the case of common beech and sessile oak as predominant broadleaved species in Europe, *Oikos*, vol. 121, n° 8, p. 1287-1299.

📖 **BONTEMPS, J.-D., HERVÉ, J.-C., LEBAN, J.-M., DHOTE, J.-F.**, 2010, Nitrogen footprint in a long-term observation of forest growth over the twentieth century, *Trees - Structure and Function*, vol. 25, p. 237-251.

📖 **CHARRU, M., SEYNAVE, I., HERVÉ, J.-C., BERTRAND, R., BONTEMPS, J.-D.**, 2017, Recent growth changes in Western European forests are driven by climate warming and structured across tree species climatic habitats, *Annals of Forest Science*, vol. 74, n° 2, DOI 10.1007/s13595-017-0626-1

📖 **CHARRU, M., SEYNAVE, I., MORNEAU, F., BONTEMPS, J.-D.**, 2010, Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France, *Forest Ecology and Management*, vol. 260, n° 5, p. 864-874.

Comment agir dans un contexte d'incertitude lié aux effets possibles du changement climatique sur l'état de la santé de la forêt ?

Comme on pouvait s'y attendre, les premiers effets des changements climatiques sur la santé des arbres forestiers sont désormais visibles à large échelle et pour certaines essences. C'est le cas par exemple, pour l'épicéa commun de plaine dont le déclin récent interroge les choix passé et actuel de reboisement en France et en Europe. Après avoir fait une série de constats des événements récents et de leur impact sur la santé des forêts, les auteurs de cet article proposent une approche plus prospective, prenant en compte les connaissances actuelles pour apporter des éléments de réflexions aux décideurs.



À la fin du siècle dernier, la notion de station forestière constituait un élément central de la gestion forestière. Derrière cette notion se cachait le concept d'invariance – de continuité dans le temps. C'était avant ! Depuis, cette notion s'est trouvée évincée par celle des changements globaux : changements climatiques bien évidemment, mais aussi

impacts des introductions de parasites exotiques, changements de pratiques sylvicoles, d'essences forestières... dont certains aspects impactent fortement la santé des forêts. Dans ce contexte, la seule certitude est qu'il va devoir gérer la forêt dans l'incertitude et intégrer l'échec dans la gestion.

Le changement climatique est devenu un état de fait. Localement, aux accidents climatiques (fort gel, tempêtes, sécheresses, pics de chaleur...) qui ont toujours existé succèdent des changements profonds, durables et en continue progression : à l'échelle de la France, c'est la température moyenne assortie de pics de chaleur mais aussi de périodes de gel plus faibles et plus rares qui constituent le principal facteur d'évolution.

Le régime hydrique lui est plus variable : alors que les précipitations annuelles sont – en moyenne trentenaire – plus faibles sur le pourtour méditerranéen, elles ont au contraire augmenté sur le reste du territoire métro-

politain. Le changement climatique ne constitue donc qu'un aspect des changements globaux et tous ces bouleversements interagissent entre eux. D'autres évolutions impactent la santé de la forêt :

- évolution des essences forestières liée à des reboisements prenant en compte les changements climatiques attendus,
- évolution naturelle de l'aire des essences, conséquence de l'évolution climatique passée,
- évolution de la biologie des insectes et champignons en lien avec les effets directs du climat.

Les données météorologiques précises et géographiquement localisées permettent d'objectiver la situation actuelle et son évolution. Même si les données moyennes caractérisent le climat et son évolution, ce sont souvent aussi et surtout les extrêmes qui marquent durablement les arbres (extrêmes et durée de ces extrêmes). Les quelques heures ou les quelques jours des tempêtes Lothar et Martin en 1999, les quelques jours de la canicule de l'été 2003... ont durablement marqué la forêt française ainsi que le comportement de ses gestionnaires.

Après avoir fait une série de constats des événements récents et de leur impact, une approche plus prospective, prenant en compte les connaissances actuelles, sera proposée.