

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 LÉBOURGEOIS, 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 :

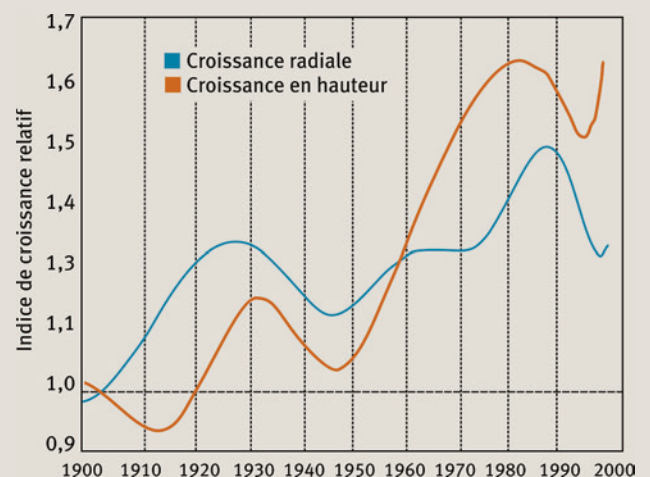
- la croissance à des valeurs de référence issues de tables de production,
- la productivité de deux générations successives de peuplement sur un même site,
- ou encore la croissance en surface terrière² du peuplement telle que caractérisée sur les points de sondage du programme d'inventaire forestier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

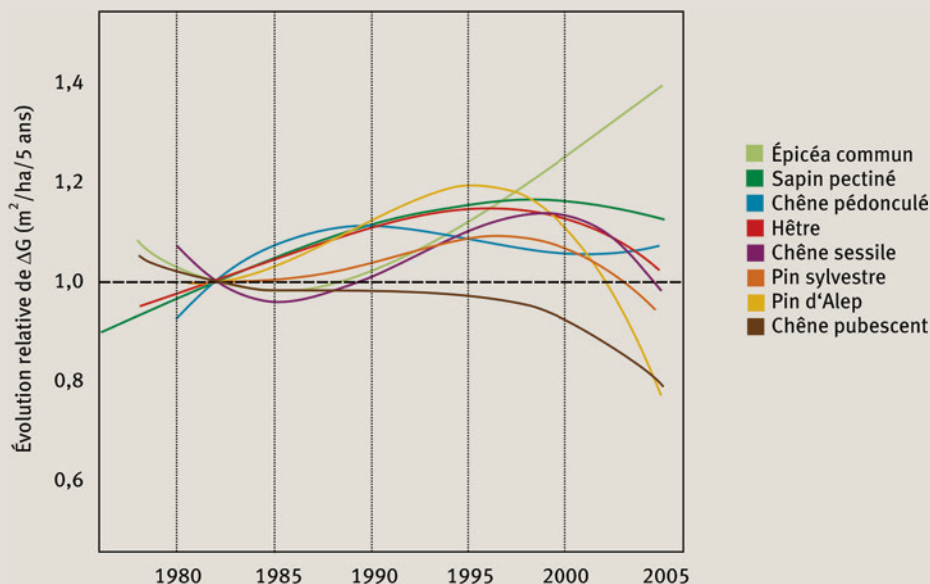
La concomitance des changements de productivité avec les modifications environnementales a immédiatement posé la question du lien entre deux phénomènes, faisant de la recherche des causes de ces évolutions une préoccupation majeure de la communauté scientifique. Sur des arbres forestiers longévifs et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

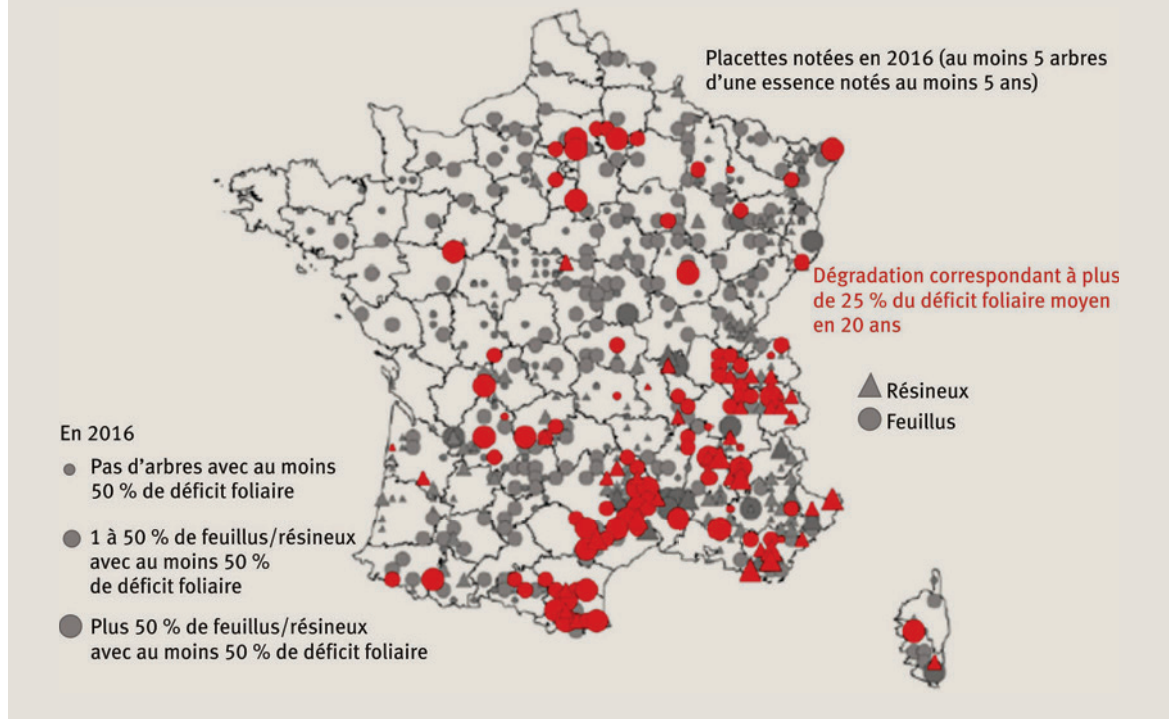
politain. Le changement climatique ne constitue donc qu'un aspect des changements globaux et tous ces bouleversements interagissent entre eux. D'autres évolutions impactent la santé de la forêt :

- 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.

❶ Réseau 16 x 16 km de suivi de l'état des cimes ; état du déficit foliaire en 2016 et tendance de l'évolution du déficit foliaire moyen entre 1997 et 2016, pour les essences principales (au moins cinq arbres) sur les placettes du réseau.



Des premiers effets des changements climatiques visibles sur la santé de certaines essences forestières

Certains paramètres du milieu sont facilement et précisément mesurables. Quantifier l'état de la santé de la forêt est au contraire aussi difficile que soumis à des approximations majeures. Parmi les questionnements initiaux pour approcher cette question figurent celle des objectifs assignés à la forêt : par exemple et pour certains, la présence d'arbres morts volontairement préservés en forêt constituera un gage de bonne santé (en lien avec une biodiversité large) alors que pour d'autres, il s'agira de la résultante d'un processus de dépérissement, souvent accompagné de pertes économiques.

L'échelle du questionnement est également un élément d'appréciation majeur. Actuellement, les indicateurs macroscopiques montrent plutôt une forêt en bonne santé, comme le confirme la figure ❶, alors que des essences majeures (comme le frêne) peuvent se trouver en grande difficulté.

L'évolution temporelle constitue également une donnée importante. En effet, la présence d'un certain pourcentage d'arbres morts ou dépérissants constitue la norme dans la majorité des massifs forestiers français gérés. Mais c'est bien l'évolution pluriannuelle de ce pourcentage qui représente une inquiétude chez le gestionnaire. Sur ce point, le grand pourtour méditerranéen semble se démarquer du reste de la France comme l'illustre la carte de la figure ❶.

Parmi les essences dont la santé s'est fortement dégradée ces dernières années, figurent le frêne commun, le châtaignier et plus récemment les pins dans le Sud de la France et l'épicéa commun en plaine.

Les facteurs expliquant cette situation sont parfois simples (cas du frêne et de l'épicéa), parfois plus complexes (cas du châtaignier). Même si les agents biotiques sont très souvent liés à des facteurs du milieu (climat, sol...), leur impact sur les arbres est plus simple à interpréter que les cas de dépérissements plurifactoriels où les facteurs biotiques interagissent entre eux et avec les facteurs du milieu, le tout accompagné de décalage variable entre l'événement et son impact visible voire mesurable sur l'arbre. Parmi ces agents figurent ceux issus d'introduction relativement récente : c'est par exemple le cas de la chalarose (encadré ❶, photo ❷, figure ❷).

Concernant le châtaignier, la situation est plus complexe avec l'intervention de plusieurs agents biotiques (l'encre en priorité, mais aussi le chancre et le cynips) interférant avec le climat et des contraintes pédologiques (le climat du sol agit beaucoup sur les deux pathogènes responsables de l'encre). En effet, les cas d'encre sont à la fois beaucoup plus nombreux ces dernières années et beaucoup plus graves (photo ❷, figure ❷). Difficiles à détecter, ils expliquent bon nombre de situations dégradées dans le nord de la France. Pour le sud, c'est essentiellement le couple station inadaptée et sécheresse qui explique la situation. Au global, l'état de santé du châtaignier est très mauvais, ce qui en fait l'essence ayant le plus d'arbres morts et dépérissants actuellement en France.

1 LE CAS DE LA CHALAROSE DU FRÊNE

Le changement climatique n'est pas la cause de tous les maux en forêt ! Le nombre d'agents biotiques introduits dans l'environnement ne cesse de croître comme l'a démontré le programme DAISIE il y a quelques années (<http://www.europe-aliens.org/>). Fort heureusement, la majorité d'entre eux reste sans effet notable, soit à cause d'un déficit d'implantation, soit à cause d'un impact économique ou environnemental mineur. Le cas de l'introduction de la chalarose du frêne (photo 1) est illustratif des effets majeurs potentiels de la mondialisation. Alors qu'aucun dispositif d'alerte n'avait anticipé ni son arrivée possible ni son impact sur le frêne, son introduction dans les années 1990 en Europe centrale s'est traduite par une progression rapide et continue au sein du territoire entraînant sur son passage des mortalités conséquentes. Actuellement, de grandes zones au sein de la moitié nord de la France portent des frênes très dépérissants (figure 2).

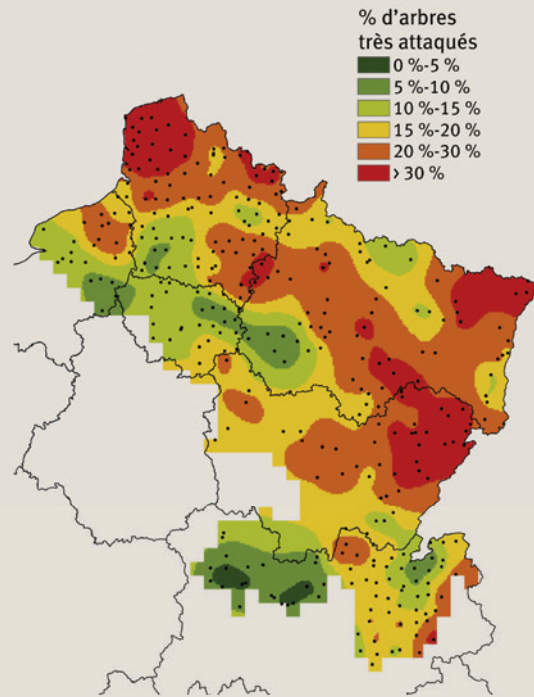
1 Frêne fortement affecté par la chalarose.



© F.-X. Saintonge

2 État de santé des frênes du nord et de l'est de la France en 2017 (enquête Département de la santé des forêts/CHALFRAX).

Enquête sur l'impact de la chalarose en zone contaminée
% de frênes très atteints estimé par krigeage ordinaire



Enfin, concernant l'épicéa commun en plaine, c'est avant tout le climat de l'été 2018 qui est à l'origine de mortalités intenses par l'intermédiaire des scolytes cambio-phages, le typographe et le chalcographe (photo 3). La conjonction des fortes températures ayant augmenté le nombre de générations d'insectes d'une part et l'affaiblissement des capacités de défense des arbres par manque d'eau d'autre part ont généré fin 2018 des mortalités d'épicéas à l'échelle de l'Europe. Il s'agit probablement d'un des premiers impacts majeurs du changement climatique sur une essence de production à l'échelle de l'Europe. Même si ces plantations des années 1950-1980 sont artificielles et que l'essence a été implantée dans des conditions climatiques éloignées de son aire d'origine, l'essence qui avait déjà subi un fort à-coup en 2003 a subi un nouvel et important choc, entraînant des mortalités intenses qui devraient augmenter durant les prochains mois de 2018, voire au-delà.

D'importantes incertitudes pour l'avenir

Comme on pouvait s'y attendre, les premiers effets des changements climatiques sur la santé des arbres forestiers sont donc désormais visibles à large échelle et pour certaines essences : le cas de l'épicéa commun de plaine en est un exemple récent.

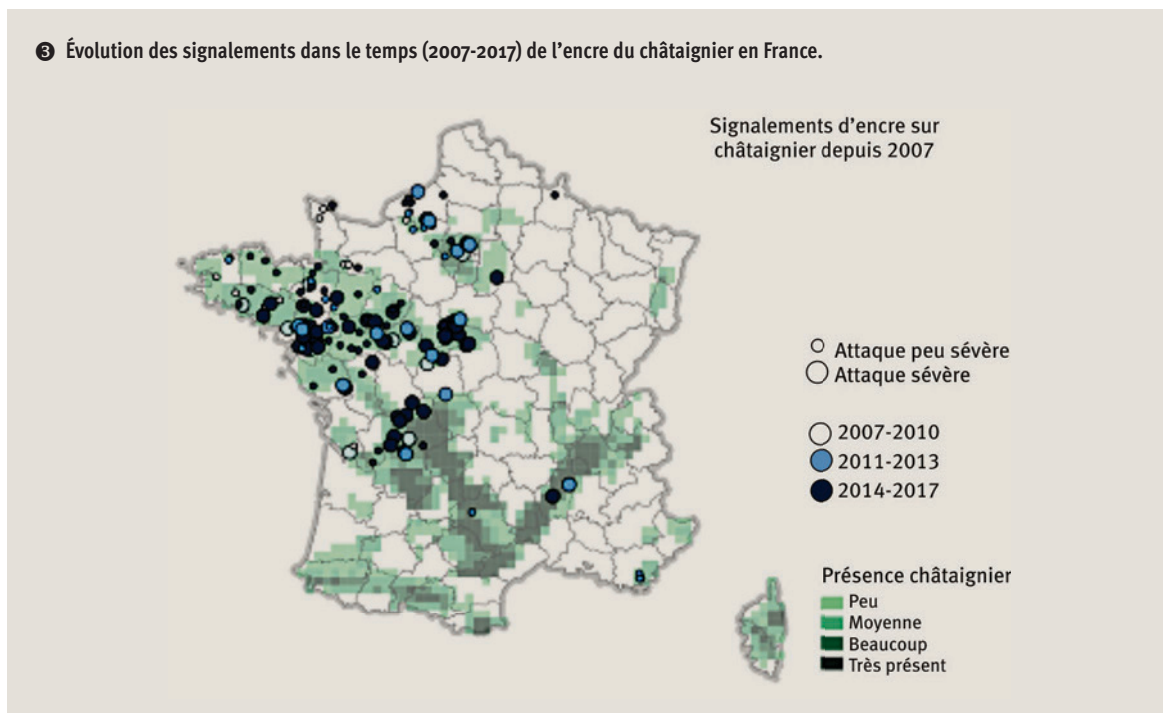
Ce cas concrétise des craintes passées et alerte les gestionnaires sur leurs choix passés et actuels.



© F.-X. Saintonge

3 Mortalité totale de châtaignier due à l'encre. Il est à noter que le seul arbre vivant au fond est un chêne pédonculé.

3 Évolution des signalements dans le temps (2007-2017) de l'encre du châtaignier en France.



Mais la marge d'incertitudes est telle que la traduction en terme de gestion des effets probables des changements climatiques constitue un véritable casse-tête pour ces gestionnaires. La principale incertitude est liée à celle relative aux climats à venir : les prévisions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prennent bien évidemment en compte les différents scénarios de rejets de gaz à effets de serre dans l'environnement et produisent un faisceau de grands schémas climatiques, significativement divergents entre eux. De plus, les projections sont souvent inférieures au durée de révolution des grands feuillus sociaux, comme les chênes et les hêtres qui constituent la majorité des surfaces forestières de production du territoire métropolitain. Enfin, la traduction au niveau local de l'évolution du climat est à l'heure actuelle difficile à évaluer précisément.

En conséquence, le gestionnaire qui doit prendre des décisions en fonction des contraintes très locales se trouve face à ces incertitudes, le climat local de demain pouvant tout simplement n'exister nulle part sur terre actuellement.

À défaut de certitudes, de nombreux travaux apportent des éléments de réflexions aux décideurs mais ils sont souvent contradictoires. Pour certains, la variabilité génétique de certaines essences est telle qu'une partie de la population d'arbres est capable de s'adapter aux climats de demain alors que pour d'autres, l'évolution climatique sera si importante et si rapide que ses effets seront considérables sur certaines essences forestières.

La tentation d'anticiper ces évolutions climatiques en substituant les espèces actuelles par des espèces plus méridionales est légitime. Mais cette tentation se heurte vite au fait que le potentiel de production – quantitatif

et qualitatif – de la plupart de ces espèces méridionales est plus faible que celui des essences présentes sur une majorité du territoire national. C'est en particulier pour cette raison et à cause des problèmes phytosanitaires exotiques que les surfaces reboisées et régénérées naturellement sont en forte baisse.

La gamme d'essences de reboisement montrant un intérêt économique pour les investissements tend à se restreindre au moment où ces incertitudes devraient inciter à diluer le risque en augmentant la gamme d'essences potentielles. Cette tendance se traduit en chiffre : au cours de l'hiver 2006-2007, les dix premières essences de reboisement représentaient 75 % des plants vendus en France ; ces dix premières essences représentent 86 % des plants vendus au cours de l'hiver 2016-2017, dix ans après. Le risque de constitution de grands massifs monospécifiques (pin maritime, douglas, chêne sessile) existe donc bien ce qui paraît contre-productif compte tenu des risques – notamment climatiques – annoncés.

Cet état de fait est en contradiction avec le fait que le mélange d'essence est désormais reconnu comme un facteur majeur de résilience des peuplements forestiers. La bibliographie argumentant ce point est désormais volumineuse. Mais l'implantation de peuplement mélangé sur des sols contraints sur le plan hydrique ou chimique est souvent une gageure et les cas de réussite sont malheureusement trop rares.

Pour la majorité des essences forestières d'intérêt actuellement en France, des conseils sur leur utilisation sont accessibles sur le site « Graines et plants forestiers : conseils d'utilisation des ressources génétiques forestières »¹, et particulièrement dans la rubrique « Effets supposés du changement climatique sur les boisements ».

1. <https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-dutilisation-des-provenances-et-varietes-forestieres>

⊗ Mortalités d'épicéas à l'automne 2018 dues au typographe (forêt domaniale de Samoussy, Aisne).



© F.-X. Saintonge

Mécaniquement, le risque lié au changement climatique augmente avec la durée de révolution des essences. À ce titre le peuplier et les résineux à rotation relativement courte sont moins vulnérables que les grands feuillus sociaux (chênes blancs, hêtre). Sur ce point, les grandes orientations du Programme national de la forêt et du bois intègrent bien ce risque.

Le risque de dépérissement accompagné de mortalités significatives est important chez le chêne pédonculé, les épicéas, le sapin pectiné. Il est probablement significatif chez le châtaignier, le douglas voire le pin sylvestre, cette dernière essence montrant d'ores et déjà des mortalités importantes en zone méditerranéenne.

En conclusion, les effets des changements climatiques sur la forêt française, attendus depuis plusieurs années, sont bien là : les derniers étés (2017 dans le sud-est, 2018 dans le nord-est) en sont la traduction. Les incertitudes sur ces changements climatiques sur le long terme sont grandes, en lien avec l'effectivité des mesures de baisse des rejets de gaz à effets de serre à l'échelle planétaire. Corrélativement, les effets probables de ces changements climatiques sur la santé des essences forestières sont difficiles à prédire d'autant qu'ils interagissent avec une multitude d'agents biotiques.

Ces incertitudes influent sur le comportement des acteurs, et en particulier des investisseurs forestiers. Or ne rien faire constitue un risque important. Le risque de constitution de grands massifs portant une gamme d'essences réduite existe bien et génère un grand risque qu'il convient de limiter autant que possible. ■

Les auteurs

François-Xavier SAINTONGE

Département de la Santé des Forêts (DSF/DGAL),
INRAE - URZF, 2163 avenue de la Pomme de Pin,
45075 Ardon, France.

✉ francois-xavier.saintonge@agriculture.gouv.fr

Bernard BOUTTE

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation,
Département de la santé des forêts,
INRAE - URFM, Domaine St Paul,
84914 Avignon Cedex 9, France.

✉ bernard.boutte@agriculture.gouv.fr

Note des auteurs

L'article a été rédigé mi-2018.

En 2019, la crise scolytes épicéas s'est amplifiée. Des dépérissements de pin sylvestre sont observés dans de nombreuses régions françaises et de hêtre dans l'Est de la France (notamment en Franche Comté), phénomènes qui confirment le contenu de l'article.



Le pin sylvestre, une essence rencontrant des mortalités importantes en zone méditerranéenne.

Forêts et changement climatique Le constat en région méditerranéenne

La région méditerranéenne est particulièrement concernée par le changement climatique pour deux raisons. D'une part, ce changement y est plus rapide que la moyenne mondiale, et cette tendance devrait s'accroître dans le futur. D'autre part, la combinaison d'une sécheresse marquée avec la saison la plus chaude est la principale composante définissant le climat méditerranéen. Elle constitue déjà la plus grande contrainte pour la végétation.

Bien que cette végétation y soit adaptée, du moins dans les conditions du passé, les changements en cours risquent de l'aggraver au-delà de la résistance connue des plantes.

Dans cet article, l'auteur fait le point des changements en cours et de leurs impacts sur les arbres, et au-delà sur tout l'écosystème forestier.

Les points clefs du climat et leurs effets sur la végétation

Le changement climatique actuel est un phénomène complexe sur la région méditerranéenne (Rossello *et al.*, 2016) : l'été s'y réchauffe plus vite que l'hiver (+ 0,5 °C contre + 0,2 °C par décennie), et pour chacune de ces saisons, les températures minimales journalières (+ 0,7 et + 0,3 °C) augmentent plus vite que les maximales (+ 0,25 et + 0,15 °C). Ces différences accentuent les effets néfastes pour la végétation. Le stress estival déjà très fort devient progressivement insupportable pour de nombreuses espèces. Mais l'augmentation plus rapide des minimales n'est pas non plus une bonne nouvelle. En été, les nuits très chaudes et l'absence de rosée ne permettent pas à la végétation de se réhydrater entre deux journées de canicule. En fin d'automne et en hiver, moins de froid conduit à un arrêt tardif de la croissance des végétaux, et à une reprise précoce dès la fin d'hiver, voire aucun arrêt pour certaines espèces [20]. En conséquence, on constate déjà une augmentation des risques de dégâts de gel lors des rares épisodes de froid intense qui sont inévitables, même s'ils sont très courts : d'une part en altitude [24], d'autre part dans la zone basse méditerranéenne

(Vennetier, 2018). Un hiver plus chaud, c'est aussi moins de neige sur les montagnes méditerranéennes [16], donc plus de ruissellement et moins de réserves en eau dans le sol, ce qui contrarie l'effet positif d'un démarrage avancé de la croissance [26]. L'utilisation plus précoce de la réserve d'eau du sol, et un besoin d'eau important à cause des températures plus élevées au printemps, conduisent à l'épuisement rapide de cette réserve. Ces deux phénomènes accentuent la durée et l'intensité de la sécheresse estivale, d'autant que les pluies d'été tendent à diminuer. Enfin, des séries inédites d'années sèches et très chaudes ont été enregistrées depuis vingt ans : cinq années successives de 2003 à 2007, trois années de 2015 à 2017, et l'année 2019 a battu de nouveaux records absolus pour le mois de juin (45,9 °C en Occitanie), conjugués avec une forte sécheresse.

Des projections du climat futur indiquent que le climat méditerranéen devrait gagner vers le nord l'équivalent de 25 à 50 % de sa surface actuelle selon les scénarios RCP4.5 and RCP8.5 respectivement [0], dans des zones où la végétation n'est pas adaptée à la sécheresse d'été, mais aussi perdre jusqu'à 16 % de cette surface côté sud au profit de zones arides et désertifiées.

❶ Le changement climatique a déjà des effets négatifs sur la plupart des composantes physiques et biologiques de la forêt méditerranéenne.



© M. Vennetier

En pratique, le changement climatique a déjà des effets, majoritairement négatifs, sur la plupart des composantes physiques et biologiques de la forêt méditerranéenne. Les principaux impacts sont détaillés ci-après.

Croissance des arbres et productivité des forêts

Au cours du vingtième siècle, la croissance des forêts méditerranéennes a augmenté progressivement, comme dans la plupart des forêts du monde : par exemple + 100% de productivité pour le chêne blanc [12] et + 40% pour la croissance en hauteur pour le pin d'Alep [22]. Ces changements s'expliquent entre autres par l'augmentation des températures, du taux de CO₂, des dépôts azotés, etc. L'allongement de la durée annuelle de croissance est visible dans le pourcentage de bois final des cernes de croissance (+ 15 à 20% chez les pins) grâce à un polycyclisme¹ d'automne plus fréquent et plus marqué. Mais cette tendance s'est progressivement inversée, une vague de ralentissement gagnant du sud vers le nord. Les premiers signes sont apparus à la fin des années 1970 au Maghreb [4], avec le dépassement d'un seuil critique de stress hydrique en été, qui contrebalance tous les effets favorables observés précédemment. Elle a atteint désormais les limites nord du climat méditerranéen, jusqu'aux montagnes du Sud de la France. Si les vagues de chaleur et la répétition pluriannuelle de fortes sécheresses en sont les causes principales, le développement épidémique de maladies et parasites y contribuent également (cf. ci-après le chapitre « Santé des forêts »).

La croissance individuelle des arbres subit également des changements temporels : la croissance en hauteur et l'allongement des branches du pin d'Alep, par exemple, ne se sont plus arrêtés en hiver depuis 2010 et l'apparition des boutons floraux s'est avancée de deux à trois mois par rapport aux années 1970 [19]. À l'inverse, l'arrêt de croissance en été, pour les branches et le diamètre, est de plus en plus long, les arbres étant trop stressés pour reprendre rapidement leur croissance en automne.

Sur la croissance en diamètre, on a noté une multiplication des cycles intra-annuels chez de nombreuses espèces, que ce soit au milieu du printemps dans le cas de sécheresse en début d'année suivie par des pluies abondantes en mai-juin, ou en automne avec des alternances d'accélération et d'arrêts de croissance pilotées par l'évolution des pluies et températures [10]. Par rapport à la fin du vingtième siècle, en opposition avec la tendance passée, on note une réduction globale de la croissance automnale, notamment caractérisée par une diminution du pourcentage de bois final.

À cause de l'activité hivernale des rameaux, des dégâts de gels ont été observés à plusieurs reprises depuis 2010, notamment en 2012, quand des nécroses ont été notées sur beaucoup d'espèces, feuillus comme résineux (relevés Irstea, désormais INRAE). La floraison de printemps des plantes mellifères a été réduite de 50 à 80% cette année-là. D'autres années, ce sont les champignons pathogènes qui ont tué, plus tard dans la saison de croissance, les rameaux dont les tissus avaient été partiellement lésés par le gel.

Santé et reproduction des arbres

L'impact des changements climatiques sur la santé des arbres se traduit à la fois par des dépérissements, notamment la défoliation partielle et des mortalités de branches, et par des mortalités parfois massives, ces deux phénomènes ayant des causes multiples et interactives (Landmann, 1994). Ils résultent d'une combinaison de stress climatiques, de conditions stationnelles défavorables, d'un peuplement trop dense ou inadapté à la sécheresse, et souvent de la pression d'agents biotiques (parasites, insectes, maladies). Ces derniers évoluent eux-mêmes avec le changement climatique : certains s'étendent en surface, ou deviennent beaucoup

1. Capacité d'une espèce végétale ou d'un axe (rameau, pousse, etc.) à produire plusieurs unités de croissance par an.

▶ plus abondants et agressifs, alors que d'autres montrent probablement une tendance inverse. De nouvelles menaces apparaissent, car le climat devient favorable à des espèces jusqu'alors limitées par le froid, et des introductions accidentelles comme la pyrale du buis ou plus anciennement la cochenille du pin maritime, conduisent à des mortalités massives à l'échelle régionale.

Le gui et la chenille processionnaire sont de bons exemples d'espèces favorisées par le changement climatique [2] [6] : espèces thermophiles, ils gagnent rapidement en altitude et vers le nord, et leur densité de

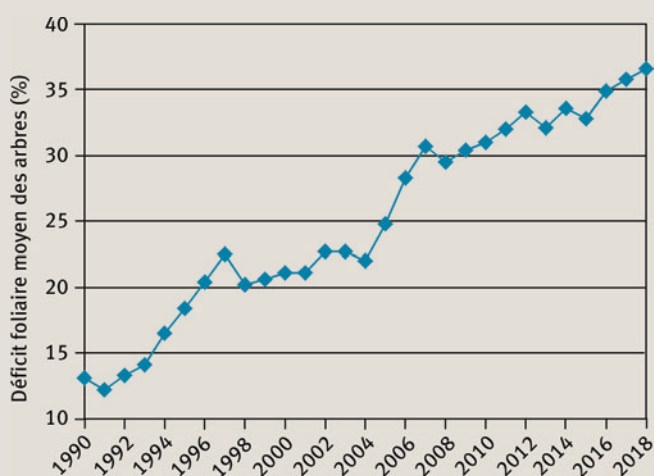
population augmente. Ils mettent maintenant en danger le pin sylvestre, mais aussi le pin noir, alors que dans le passé, ils n'avaient qu'un effet limitant et temporaire sur sa croissance. Manquant parfois de nourriture lors de ses dernières pullulations massives, la chenille processionnaire s'est attaquée à des espèces qu'elle délaissait habituellement, comme les sapins ou le cèdre. Une invasion inédite des cédraies d'altitude s'est en particulier produite en Algérie en 2015, plusieurs centaines de mètres au-dessus de sa limite connue précédemment.

De façon globale, on note une forte aggravation des dépérissements en forêt méditerranéenne : d'après le département « Santé des forêts », le taux moyen de défoliation sur le réseau systématique en région Sud est passé de 12,5 % en 1990 à 37 % en 2018 (figure 1), avec des accélérations marquées sur de courtes périodes correspondant aux effets directs et différés des sécheresses fortes ou répétées, entrecoupées de périodes de stabilisation relative. Le cas particulier des principales espèces de la forêt méditerranéenne française est discuté ci-après.

Le chêne pubescent est l'espèce décidue la plus présente en forêt méditerranéenne française. Sa productivité a doublé au cours du vingtième siècle [12], traduisant sa parfaite santé à cette époque et son adaptation au climat passé. Son dépérissement a commencé au début du vingt-et-unième siècle avec la longue sécheresse de 2003 à 2007. En 2010, les houppiers comptaient 30 % de branches mortes en Provence, mais en 2019, 60 % des arbres sont dépérissants (photo 2), dont 16 % mourants [25]. Sa limite inférieure semble être remontée de plusieurs centaines de mètres en altitude, et de près de cent kilomètres vers le nord par rapport au vingtième siècle.

Le pin sylvestre est pour sa part le résineux le plus abondant de la région méditerranéenne française. Des dépérissements, apparus en Espagne tout d'abord dans les années 1990, sont remontés vers le nord jusqu'en Suisse dans les années 2000 [14]. En France, il a mal supporté les sécheresses de 2003 à 2007 [23] (photo 3, cf. aussi les rapports du département « Santé des forêts », de 2003 à 2007), et surtout la canicule de l'été 2003 pendant laquelle certains arbres, à très basse altitude, sont directement morts de chaud (les aiguilles brûlées sur leur face supérieure). La mortalité a ensuite gagné les peuplements situés dans des situations favorables (sols profonds, versants frais, vallons, altitude élevée), où des arbres, peu habitués au stress hydrique, sont morts de soif entre 2004 et 2005 (cavitation des vaisseaux conducteurs de sève). Enfin, une troisième vague de mortalité a touché entre 2006 et 2010 les stations défavorables d'altitude basse à moyenne, sur sols superficiels ou en versant chaud : affaiblis par la succession de sécheresse ayant épuisé leurs réserves, ils sont morts de faim (manque de carbone pour subvenir à leur métabolisme et se défendre contre les attaques d'insectes et les champignons opportunistes). En 2018, une étude sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur [10] montre que 52 % des peuplements de pin sylvestre y sont dépérissants, avec un fort taux de mortalité récente (7 %). La productivité du pin sylvestre y a fortement diminué, depuis 1970 pour les arbres âgés, et depuis 2000 pour les plus jeunes. Outre les mauvaises conditions stationnelles, qui aggravent le stress clima-

1 Évolution du déficit foliaire en forêt méditerranéenne de 1990 à 2008, toutes espèces confondues (source : Département Santé des Forêts).



2 Le chêne blanc est capable de survivre longtemps avec un gros déficit foliaire, résultant d'une mortalité importante des branches, mais sa croissance est alors très faible. Son taux de mortalité est inférieur à celui d'autres espèces pour un niveau similaire de défoliation moyenne, les très vieux arbres et les plus gros individus situés dans les fonds de vallons étant les plus vulnérables.



⊕ Mortalité massive du pin sylvestre dans la haute vallée du Verdon suite à la sécheresse 2003-2007.

© M. Vennetier

tique, l'abondance du gui et l'intensité des attaques de chenille processionnaire sont les principaux facteurs explicatifs de ces pertes de croissance, dépérissements et mortalités, accentués par des pathogènes de faiblesse. En région méditerranéenne, le dépérissement du sapin pectiné a commencé dans les Pyrénées espagnoles et en Italie dans les années 1980 [7]. Puis il est apparu vers 1990 dans les Alpes Maritimes, et s'est étendu après 2003 sur l'ensemble des montagnes méditerranéennes françaises. Dans la fin des années 2000, la mortalité atteignait 21 % des arbres dans certaines sapinières du Mont Ventoux, de l'Aude et des Pyrénées Orientales [11]. Bien que les versants chauds de basse altitude soient généralement les plus touchés, ce sont principalement les conditions stationnelles (profondeur du sol, texture, topographie) et l'enracinement qu'elles permettent qui sont déterminantes dans le dépérissement et la mortalité [1]. Les sapins situés dans des stations très favorables, ayant eu des croissances rapides dans le jeune âge sans développer d'enracinement profond, sont autant exposés que ceux ayant eu une croissance lente en raison des conditions locales difficiles. La sécheresse d'été est la principale contrainte sur sa croissance, expliquant son ralentissement depuis vingt ans. Le sapin exigeant une forte humidité relative de l'air, des coupes trop fortes dans le passé, suite aux premiers dépérissements, ont parfois accentué le phénomène sur le moyen terme. Le chêne vert est l'une des espèces arborées les plus résistantes à la sécheresse en forêt méditerranéenne

française. On le trouve majoritairement dans les stations difficiles, à basse altitude sur les versants chauds et sols superficiels, où il est moins concurrencé par des espèces à croissance plus rapide, et plus compétitives pour la lumière. Mais ces stations sont des pièges : avec le changement climatique, les conditions y dépassent sa tolérance au stress hydrique. Des dépérissements ont été constatés au début des années 1990, mais c'est surtout depuis 2003 que le processus s'est accéléré. En Provence en 2019, 65 % des peuplements inventoriés ont un déficit foliaire moyen supérieur ou égal à 50 %, en réponse à la sécheresse extrême de 2016 et 2017 [25].

Le pin d'Alep, premier résineux méditerranéen à basse altitude, est l'essence autochtone la plus résistante à la sécheresse. Mais son taux moyen de défoliation augmente avec le temps (40 % sur la Provence en 2019), bien qu'il montre, contrairement aux autres espèces principales, des périodes de rémission partielle. La sécheresse n'est pas seule en cause. Avec les automnes de plus en plus chauds, les années humides se traduisent par des attaques massives du chancre à *Crumenulopsis* [3], qui tue de nombreux jeunes rameaux : jusqu'à 80 % sur les branches basses en quelques années. S'y ajoutent les dégâts de gel, qui touchent les aiguilles et souvent des rameaux entiers, notamment en fin d'hiver, les jeunes pousses portant des fleurs mâles qui sont en pleine elongation, donc très vulnérables. Suite aux sécheresses de 2015 à 2017, des attaques de scolytes ont tué de nombreux pins d'Alep affaiblis, un risque qui pourrait augmenter dans l'avenir.

▶ Parmi les autres espèces durement touchées par les dépérissements en France, figure le chêne liège. En Provence siliceuse (Maures, Esterel), des suivis après la canicule et les incendies de 2003 [18] ont montré qu'il était particulièrement vulnérable lorsque les conditions stationnelles étaient défavorables (combinaison de sol superficiel, exposition chaude, basse altitude). Il avait été jadis favorisé sur ces stations en sous-étage du pin maritime, en deçà de son optimum naturel. La disparition de l'étage dominant protecteur, et l'intensification des sécheresses nous ont rappelé ses limites. La répétition d'incendies sur de courtes périodes, combinée avec la répétition des sécheresses (2003-2007) l'a aussi fragilisé dans les zones plus favorables, de même que dans les autres massifs français. Dans la plus grande suberaie de Tunisie en Kroumirie, le chêne liège a largement dépéri suite à une sécheresse historique entre 1988 et 1995 [17] et cette dégradation se poursuit, confirmant qu'il est menacé avec le changement climatique.

Le cèdre de l'Atlas n'est pas une essence autochtone en France, mais il a été largement introduit : il représente une alternative aux espèces moins méditerranéennes menacées par le changement climatique dans le sud de leur aire, comme le pin sylvestre ou le pin noir. Mais il est aussi proposé plus largement dans les régions de climat tempéré dont le futur sera plus sec et chaud en été. Des mortalités significatives lors des derniers épisodes

de sécheresse intenses, ainsi que l'échec de quasiment toutes les plantations à basse altitude, montrent qu'il convient de rester prudent car c'est une espèce montagnarde [8]. Pour preuve au Maghreb, dans son aire d'origine, la limite inférieure du cèdre est remontée de 200 mètres en quarante ans, avec, au-dessus de la zone de disparition, des pertes de 30 à 80 % sur les versants peu favorables à proximité du Sahara, et une forte baisse de sa productivité là où il survit [9] [15]. La tolérance du cèdre à la sécheresse réside essentiellement dans sa capacité à puiser l'eau en profondeur, et dépend donc de la capacité du sol à y stocker de l'eau et laisser pénétrer ses racines. De plus, le cèdre est sensible aux gelées tardives : il risque donc d'en souffrir plus fréquemment, comme le pin d'Alep, et une sélection génétique sur sa précocité de débourrement est nécessaire.

Pour la plupart des espèces citées ci-dessus, la baisse de croissance et de vitalité des arbres s'accompagne aussi d'une baisse sensible de leurs capacités de reproduction, ce qui compromet le renouvellement des peuplements. Les pins (d'Alep, pignon et sylvestre) montrent une réduction de 50 à 80 % des cônes arrivant à maturité lors des épisodes de sécheresse pluriannuelle, mais aussi une réduction du nombre de graines par cône et un allongement du temps de germination. Il arrive même qu'il n'y ait quasiment aucune graine viable certaines années [19]. Des suivis sur le chêne vert et le chêne kermès ont aussi confirmé une forte réduction du nombre de glands et de leur taille, compromettant leur capacité germinative et la survie des semis.

⚡ Mortalité forte de jeunes pins d'Alep et de nombreuses espèces de la garrigue (romarin, cistes, ajoncs) sur la Côte Bleue (Bouches-du-Rhône) en 2016. Cette mortalité peut toucher parfois plusieurs hectares d'un seul tenant. Par endroits, 90 % des végétaux sont morts, seuls des pins et genévriers adultes ayant survécu.

Biodiversité

Les dégâts de sécheresse ou de gel sur la végétation du sous-bois passent parfois inaperçus, alors qu'ils sont tout aussi importants que sur les arbres. Entre 1997 et 2008, près de 15 % de la flore du sous-bois a changé, les espèces exigeant de l'humidité disparaissant ou réduisant leur recouvrement au profit d'espèces plus résistantes à la sécheresse et à la chaleur. Les changements ont été d'autant plus importants que les sites étaient plus mésophiles, tandis que les stations défavorables étaient peu touchées (Vennetier *et al.*, 2010 ; [5]). Cela s'explique par la vulnérabilité des plantes poussant dans des milieux qui, jusqu'alors, compensaient la sécheresse climatique par un bilan hydrique local favorable, n'imposant pas d'enracinement lointain ou profond. Avec le changement climatique, un premier seuil critique a été franchi : les conditions locales ne compensent plus entièrement le déficit hydrique estival. Sur les stations xérophiiles, les plantes déjà habituées à un stress hydrique annuel ont mieux résisté. Par contre, suite aux sécheresses répétées et records de chaleurs de 2015 à 2017, des dépérissements importants se sont produits dans les milieux xérophiiles le long de la côte [21] (photo ⚡). Ils montrent que l'on a franchi un nouveau seuil critique, au-delà duquel même les espèces locales réputées très résistantes sont vulnérables, dans les stations actuellement les plus chaudes et sèches du Sud de la France.

Les sécheresses et les gels tardifs réduisent parfois considérablement la floraison. Les conséquences peuvent être dramatiques sur les pollinisateurs, ce qui entraîne en retour une baisse de la reproduction. Avec la baisse de la



© M. Vennetier

productivité végétale et la raréfaction/disparition de certaines espèces, c'est aussi toute la chaîne alimentaire qui pourrait être impactée, des herbivores de toutes tailles aux carnivores qui en dépendent (Vennetier, 2018).

Fertilité des sols et incendies

Les principaux acteurs de la vie des sols sont aussi soumis à la sécheresse sur des périodes de plus en plus longues, ce qui réduit leur temps d'activité et leurs abondances. La faune et microfaune du sol, notamment les vers de terre, les champignons et les bactéries sont concernés. Le sol moins travaillé par leur activité, donc moins poreux et moins structuré, perd partiellement sa perméabilité et sa capacité de rétention de l'eau [18], limitant la productivité végétale. Cette végétation réduite restitue moins de matière organique au sol, ce qui dans un cercle vicieux, contribue aussi à limiter l'activité biologique et la qualité du sol. Toute la chaîne trophique perd donc en vitalité et en diversité.

Plus de sécheresse et de canicule augmente directement le nombre de jours à risque élevé d'incendie. Ces mêmes sécheresses produisent, comme on l'a vu précédemment, de grosses quantités de biomasse morte très combustible dans la canopée et dans le sous-bois. L'intensité potentielle de ces incendies augmente, et donc leur effet destructeur pour la végétation et pour le sol. La continuité du combustible sur de grandes surfaces avec l'abandon des terres agricoles, et sa densification dans les nombreuses forêts non gérées, induisent un risque de feux de grande ampleur.

Les incendies causés par la sécheresse sont des processus communs et naturels en forêt méditerranéenne, mais une interaction nouvelle apparaît : les sécheresses pluriannuelles rendent les populations moins résistantes et moins résilientes au feu, et l'augmentation de la fréquence des feux rend la forêt et les sols moins résistants à la sécheresse.

Les enjeux du futur

Le bilan hydrique est le point clef de la réponse des forêts méditerranéennes au changement climatique. Or, sauf très localement, on ne peut changer ni la quantité d'eau apportée par la pluie, ni les conditions locales de sol et de topographie qui régulent la distribution et le stockage de cette eau dans le sol. Les seules options consistent donc à réguler la consommation d'eau par la végétation et l'évaporation en jouant sur la composition, la structure et la densité de la forêt.

Pour cela, trois solutions complémentaires sont possibles : éclaircir, rajeunir, diversifier :

- éclaircir, car on réduit ainsi la consommation d'eau et la compétition entre arbres et plus généralement entre végétaux. L'éclaircie a déjà fait ses preuves dans quasiment tous les écosystèmes forestiers du monde pour limiter les dépérissements (Sohn *et al.*, 2016) ;
- rajeunir, car les vieux arbres sont plus vulnérables et moins résilients que les jeunes, qui ont une capacité d'adaptation morphologique et physiologique aux conditions futures. La sélection naturelle dans les régénérations favorise aussi, directement, les génotypes les plus efficaces dans l'utilisation en eau ;
- diversifier, enfin, car l'amplitude du changement climatique futur est inconnue, ses conséquences indirectes (maladies, parasites...) imprévisibles, parce qu'il est dangereux de « mettre tous ses œufs dans le même panier » et que les mélanges d'espèces ayant des stratégies différentes d'enracinement et de consommation d'eau sont, parfois, plus résilients.

Enfin, il est nécessaire d'intensifier le suivi de l'état de santé et de la croissance des forêts, afin d'observer et quantifier l'adaptation des milieux et des espèces, de détecter des problèmes inattendus, et d'adapter la gestion à leur évolution réelle. ■

L'auteur

Michel VENNETIER

Aix Marseille Univ, Irstea, UR RECOVER,
13182 Aix-en-Provence, France.

michel.vennetier@irstea.fr

Remerciements

Certains résultats mentionnés dans cet article viennent de travaux ayant bénéficié de divers soutiens financiers :
Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB – www.fondationbiodiversite.fr), réseau AForce (projet Sylforclim), Agence nationale de la recherche (projet Drought+), Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, Irstea, Conservatoire du littoral (projet Romarin), Union européenne (projet IRISE).

EN SAVOIR PLUS...

- LANDMANN, G., 1994, Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers, *Revue Forestière Française*, (XLVI) 5: 405-415.
- ROSSELLO, P., BIDEY, Y., BRICHE, E., CARREGA, P., DEMARQUE, C., DUBOIS, G., GIRAUD, X., GUIOT, J., MARTIN, N., YOHIA, C. eds., 2016, *Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, AIR PACA, Marseille.
- SOHN, J.A., SAHA, S., BAUHUS, J., 2016, Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis, *For. Ecol. Manag.*, n° 380, p. 261-273.
- VENNETIER, M., 2018, Changement climatique et forêt méditerranéenne : quels impacts actuels et futurs sur la grande faune ?, *Forêt Méditerranéenne*, (34) 2, p. 77-86.
- VENNETIER, M., RIPERT, C., 2010, Flore méditerranéenne et changement climatique: la course-poursuite est engagée, *Forêt Méditerranéenne*, (XXXI) 1, p. 15-24.

BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE...

Les numéros correspondent aux [renvois] dans le texte.

- [0] BARREDO, J.-I., MAURI, A., CAUDULLO, G., DOSIO, A., 2018, Assessing Shifts of Mediterranean and Arid Climates Under RCP4.5 and RCP8.5 Climate Projections in Europe, *Pure and Applied Geophysics*, (175) 11, p. 3955-3971.
- [1] CAILLERET, M., 2011, *Causes fonctionnelles du dépérissement et de la mortalité du sapin pectiné en Provence*, PHD Dissertation, École doctorale Sciences de l'Environnement, URFM – UR629 –INRA Avignon, Université Paul-Cézanne – Aix-Marseille III.
- [2] DOBBERTIN, M., HILKER, N., REBETEZ, M., ZIMMERMANN, N.-E., WOHLGEMUTH, T., RIGLING, A., 2005, The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album ssp austriacum*) in Switzerland – the result of climate warming?, *Int. J. Biometeorol.*, (50) 1, p. 40-47.
- [3] DSF, 2015, *Le dessèchement des rameaux de pin d'Alep dû à *Crumenulopsis sororia*, agent de la maladie chancreuse du pin d'Alep*, DRAAF PACA, 2 p., disponible sur : http://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/no78-CRUMSOR_PIN_ALEP_cle43a521.pdf
- [4] EL KHORCHANI, A., GADBIN-HENRY, C., BOUZID, S., KHALDI, A., 2007, Impact de la sécheresse sur la croissance de trois espèces forestières en Tunisie (*Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinea* L. et *Pinus pinaster* Sol.), *Sécheresse*, (18) 2, p. 113-121.
- [5] FICARA, L., 2019, *Évolution de la biodiversité végétale forestière sous l'effet du changement global en région méditerranéenne française*, Mémoire de Master 2, Université de Lorraine, Irstea, 35 p.
- [6] GAUDRY, J., LAUBRAY, S., 2018, *Le front d'expansion de la chenille processionnaire du pin progresse toujours*, Ministère de l'agriculture, Département Santé des Forêts, 4 p.
- [7] GAZOL, A., CAMARERO, J.-J., GUTIERREZ, E., POPA, I., ANDREU-HAYLES, L., MOTTA, R., NOLA, P., RIBAS, M., SANGUESA-BARREDA, G., URBINATI C., CARRER M., 2015, Distinct effects of climate warming on populations of silver fir (*Abies alba*) across Europe, *J. BIOGEOGR.*, (42) 6, p. 1150-1162.
- [8] COURBET, F., LAGACHERIE, M., MARTY, P., LADIER, J., RIPERT, C., RIOU-NIVERT, P., HUARD, F., AMANDIER, L., PAILLASSA, E., 2012, *Le cèdre en France face au changement climatique : bilan et recommandations*, RMT AForce, disponible sur : <https://prodirna.inra.fr/ft?id={ADOC5978-137F-41C1-A0E0-E6E406EB2301}>
- [9] LINARES, J.-C., TAÏQUI, L., CAMARERO, J.-J., 2011, Increasing drought sensitivity and decline of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan middle atlas forests, *Forests*, (2) 3, p. 777-796.
- [10] MARTY, P., VENNETIER, M., LEMAIRE, J., PONCET, M., H.P., JOURDAN, A., 2018, *Forêts méditerranéennes et alpines face aux changements climatiques : le cas du pin sylvestre en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, CNPF, Irstea, IDF, Marseille, France, 83 p.
- [11] NOURTIER, M., 2011, *La vulnérabilité du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) à la sécheresse en milieu méditerranéen selon les propriétés hydriques du sol*, Université d'Avignon, INRA, Thèse de doctorat, Université d'Avignon, Avignon.
- [12] RATHGEBER, C., GUIOT, J., ROCHE, P., TESSIER, L., 1999, Augmentation de productivité du chêne pubescent en région méditerranéenne française, *Ann. For. Sci.*, (56) 3, p. 211-219.
- [14] REBETEZ, M., DOBBERTIN, M., 2004, Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps, *Theor. Appl. Clim.*, (79) 1-2, p. 1-9.
- [15] RHANEM, M., 2011, Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) aux confins de la plaine de Midelt (Maroc), *Physio-Géo*, (5), p. 143-165.
- [16] SPANDRE, P., FRANÇOIS, H., VERFAILLIE, D., LAFAYESSE, M., DÉQUÉ, M., ECKERT, N., GEORGE, E., MORIN, S., 2019, *Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts*, Scientific Reports: www.nature.com/articles/s41598-019-44068-8
- [17] TOUHAMI, I., CHIRINO, E., AOUINTI, H., EL KHORCHANI, A., ELAIEB, M.-T., KHALDI, A., NASR, Z., 2019, Decline and dieback of cork oak (*Quercus suber* L.) forests in the Mediterranean basin: a case study of Kroumirie, Northwest Tunisia, *Journal of Forestry Research*: in press.
- [18] VENNETIER, M., CECILLON, L., GUÉNON, R., SCHAFFHAUSER, A., VERGNOUX, A., BOICHARD, J.-L., BOTTÉRO, J.-Y., BRUN, J.-J., CARRARA, M., CASSAGNE, N., et al., 2008, *Étude de l'impact d'incendies de forêt répétés sur la biodiversité et sur les sols : recherche d'indicateurs*, Rapport final, Cemagref, Ministère de l'Agriculture et de la pêche, Union Européenne, 238 p.
- [19] VENNETIER, M., ESTEVE, R., GARCIN, R.-M., GRIOT, S., RIPERT, C., VILA, B., 2001, *Dynamique spatiale de la régénération des forêts après incendie en basse Provence calcaire: cas particulier du pin d'Alep*, 51 p.
- [20] VENNETIER, M., GIRARD, F., DIDIER, C., OUARMIM, S., RIPERT, C., ESTÈVE, R., MARTIN, W., N'DIAYE, A., MISSON, L., 2011, Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique, *Forêt Méditerranéenne*, (32) 2, p. 151-166.
- [21] VENNETIER, M., GUERRA, F., ESTÈVE, R., LOPEZ, J.-M., TRAVAGLINI, C., AUDOUARD, M., ROCHE, P., 2017, *Gestion et restauration de la qualité des peuplements de romarin sur le site de la Côte Bleue du Conservatoire du Littoral au profit des polinisateurs sauvages*. Irstea Aix-en-Provence, 21 p., disponible sur : <https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00061626>
- [22] VENNETIER, M., RIPERT, C., BROCHIERO, F., CHANDIOUX, O., 1999, Évolution à court et long terme de la croissance du pin d'Alep en Provence. Conséquence sur la production de bois, *Forêt méditerranéenne*, (tome XX), 4, p. 147-156.
- [23] VENNETIER, M., THABEET, A., GADBIN HENRI, C., RIPERT, C., PRÉVOSTO, B., BORGNIET, L., VILA, B., GUIBAL, F., CARAGLIO, Y., REY, R., BURON, V., ZANETTI, C., 2007, Conséquences de la canicule et de la sécheresse 2003 sur les pins méditerranéens, in: *Sécheresse et canicule 2003, contribution des dispositifs de suivi et d'observation des forêts à la quantification des effets immédiats et à court terme*, Quae, Versailles, p. 15.
- [24] VITASSE, Y., SCHNEIDER, L., RIXEN, C., CHRISTEN, D., REBETEZ, M., 2018, Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades, *Agricultural and Forest Meteorology*, (248), p. 60-69.
- [25] VUILLERMET, F., 2019, *Dépérissement de la végétation et production de biomasse morte des forêts méditerranéennes françaises : Rôle des conditions topographiques et climatiques*, Mémoire de Master 2, Université de Nice-Sophia-Antipolis, Irstea, 50 p.
- [26] ZHANG, X., MANZANEDO, R.-D., D'ORANGEVILLE, L., RADEMACHER, T.-T., LI, J., BAI, X., HOU, M., CHEN, Z., ZOU, F., SONG, F., PEDERSON, N., 2019, Snowmelt and early to mid-growing season water availability augment tree growth during rapid warming in southern Asian boreal forests, *Glob. Change Biol.*, in press, <https://doi.org/10.1111/gcb.14749>



Mortalité massive du pin sylvestre dans la haute vallée du Verdon suite à la sécheresse 2003-2007.



Adapter les forêts au climat futur : un défi pour la gestion forestière en Europe.

ADAPTATION DE LA FORÊT AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : COMMENT ON S'Y PRÉPARE ?

Différentes voies sont explorées pour adapter les forêts françaises au changement climatique : faire évoluer la composition des peuplements vers des essences plus adaptées au climat futur, développer une sylviculture pour l'adaptation, consolider la chaîne d'approvisionnement en nouveaux matériels forestiers de reproduction... Sur le terrain, des réseaux d'acteurs initient des projets de recherche-développement et des formations pour concevoir de nouveaux outils et accompagner les forestiers à leur prise en main. Enfin, dans le Sud de la France, où les effets combinés du climat, du développement des villes et des infrastructures rendent les forêts plus vulnérables aux incendies, un des enjeux majeurs des recherches est de rendre les peuplements plus résilients et plus résistants au feu.

- 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 RIGOLOTT

Comment l'Office national des forêts anticipe les effets du changement climatique ?

En charge de la gestion de onze millions d'hectares de forêts publiques, dont 4,6 millions d'hectares en métropole, l'Office national des forêts (ONF) est un acteur majeur de la filière forêt-bois en France. Depuis 2005, le changement climatique s'est imposé à l'ONF comme une priorité de recherche et de développement. Pour adapter les forêts au climat de demain et préserver les stocks de carbone, son département « Recherche développement et innovation » s'est rapproché des acteurs de la recherche en France. Dans cet article, les auteurs font le point des travaux et actions menés au cours des quatorze dernières années et de leur appropriation par les services de gestion.



L'anticipation des impacts du changement climatique et l'adaptation font l'objet à l'Office national des forêts (ONF) d'une démarche formalisée depuis 2005. La publication du rapport Carbofor (projet financé par le programme « Gestion des impacts du changement climatique ») avait en effet rendu publiques les premières projections d'impacts du changement climatique sur la forêt française, et notamment des cartes présentant l'évolution de la niche climatique du hêtre, ainsi que celle de la répartition des grands types de végétation de la France (Badeau *et al.*, 2004). Le changement climatique sortait de l'abstraction pour entrer dans l'horizon spatio-temporel de réflexion de l'aménagement forestier.

C'est logiquement dans le cadre de la planification forestière que les premières réflexions ont débuté en 2005, à l'occasion d'un atelier de travail réunissant les chercheurs de l'Inra (désormais INRAE¹) et les managers techniques de l'ONF, travaillant à l'époque à la rédaction de la première génération de directives et schémas régionaux d'aménagement (DRA-SRA²; Legay et Mortier, 2006). Ces échanges ont permis de dresser la liste des connaissances sur les impacts à prendre en

compte dans la rédaction des DRA-SRA, et de tracer les grands axes d'adaptation :

- identifier les impacts potentiels et les peuplements vulnérables ;
- faire évoluer la composition des peuplements vers des ressources plus adaptées au climat futur ;
- dynamiser la sylviculture ;
- gérer les crises et atténuer leurs impacts ;
- suivre en continu l'évolution de la forêt.

En 2008, une directive sur l'adaptation au changement climatique, nourrie des conclusions de cet atelier, a donné un caractère institutionnel à la démarche. Cette même année, les partenaires de la recherche et du développement se sont organisés en consortium, sous la forme du réseau mixte technologique (RMT) AFORCE³ (voir l'article de Perrier, page 36 de ce numéro) pour structurer leurs collaborations et mobiliser des financements.

Les orientations dégagées suite à l'atelier de 2005 ont servi de fil rouge aux travaux du département « Recherche, développement et innovation » (RDI) de l'ONF, en lien avec ses partenaires du RMT AFORCE, au fil de ces quatorze années. Leur passage en revue donne un aperçu des travaux et actions déployés, sans en masquer les difficultés.

1. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

2. DRA : directives régionales d'aménagement (pour les forêts domaniales) ; SRA : schémas régionaux d'aménagement (pour les forêts des collectivités).

3. AFORCE : Adaptation des FORêts au Changement climatiqueE.

Identifier les impacts potentiels et les peuplements vulnérables

Cette étape de diagnostic précède les étapes d'action. L'évaluation des impacts potentiels et l'identification des vulnérabilités (combinaisons essence-stations vulnérables ; systèmes de production vulnérables) s'est alimentée à deux sources :

- la veille et la synthèse des résultats de recherche,
- la remontée des observations de terrain.

Le premier bilan, fait à l'occasion de l'atelier, avait surtout mis l'accent sur la vulnérabilité du hêtre, du chêne pédonculé, de l'épicéa et du sapin. Les collègues en charge de la rédaction des DRA-SRA ont retranscrit et décliné dans leurs régions respectives ce diagnostic général, en prenant en compte les gradients écologiques régionaux. La Directive régionale d'aménagement Rhône-Alpes, par exemple, dès 2006⁴, comportait une analyse de vulnérabilité par essences et par zones écologiques.

La remontée d'informations de terrain a été particulièrement active en 2006, alors que la visibilité dans les paysages forestiers des dégâts consécutifs à la sécheresse caniculaire de 2003 culminait, et donnait lieu à la mise en place d'un observatoire des peuplements de sapin et de pin sylvestre impactés dans les Alpes Maritimes (Ladier et Tessier, 2016). Les travaux de modélisation ont confirmé plus tard la vulnérabilité du pin sylvestre, non seulement en marge méditerranéenne de sa distribution où elle avait été déjà pointée par des travaux d'Irstea⁵ (Vennetier *et al.*, 2007 ; voir également l'article de ce même auteur page 19 de ce numéro), mais aussi dans les plaines du nord de la France, où le pin sylvestre avait été considéré dans un premier temps, sur la base des connaissances empiriques de son écologie, comme « une valeur refuge ». Cet exemple illustre que ce diagnostic de vulnérabilité est à revisiter périodiquement, en fonction de l'évolution des observations et des connaissances (pour une synthèse des effets attendus sur l'arbre et le climat, voir Legay *et al.*, 2015).

Le partenariat avec l'Inra s'est poursuivi notamment dans le cadre d'un poste d'interface, à l'occasion duquel des travaux ont été entrepris pour observer le comportement du hêtre en limite sud-ouest de son aire de répartition, rechercher les éventuels marqueurs de recul de l'essence (E Silva *et al.*, 2001), étudier l'impact de l'homme sur la limite de répartition (E Silva *et al.*, 2012) et étudier les adaptations aux conditions locales.

Faire évoluer la composition des peuplements

L'idée d'une transition dans la composition des peuplements pour favoriser ou installer des essences mieux adaptées aux conditions futures a été introduite avec beaucoup de prudence, les forestiers connaissant bien la difficulté et le coût d'une telle entreprise, ne serait-ce qu'à l'échelle d'un peuplement. Ont d'abord été envisagés des changements d'équilibre entre essences en

place : recul du chêne pédonculé ou du hêtre au profit du chêne sessile, ou encore recul de l'épicéa ou du sapin aux altitudes et expositions les plus chaudes et sèches. La Directive régionale d'aménagement Rhône-Alpes de 2006 considérait par exemple l'épicéa vulnérable en dessous de 1 000 mètres d'altitude. Pour une région comme l'Île-de-France, le mouvement de substitution du chêne au hêtre prolongeait des orientations antérieurement prises pour limiter la dominance du hêtre, notamment suite à la crise traversée dans les années 1980 avec les attaques de cochenille.

Certains dépérissements ont imposé aux forestiers d'agir immédiatement. Ainsi, le dépérissement du chêne à Vierzon (Cher) (photo 1) dans les années 2000-2010 (Gauquelin *et al.*, 2010)⁶ a amené l'ONF à remplacer des peuplements de chêne pédonculé détruits par des plantations de chêne sessile, de pin sylvestre ou maritime, selon les conditions de sol.

1 Le dépérissement du chêne à Vierzon en 2008. La contribution de l'évolution du climat dans ce dépérissement complexe est difficile à évaluer, mais l'épisode a rappelé la vulnérabilité de cette futaie soumise à des conditions écologiques très contraignantes et appelées à se dégrader sous l'effet du changement climatique.



© M. Legay (ONF)

4. Directive régionale d'aménagement Rhône-Alpes, juin 2006, renouvelée en 2018, dans le cadre de la nouvelle région Auvergne-Rhône-Alpes : http://www1.onf.fr/lire_voir_ecouter/++oid++1eec/@@display_media.html

5. Désormais INRAE, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

6. Comme généralement les dépérissements de chêne, son déterminisme était complexe et multifactoriel, et pas seulement climatique.

▶ Devant l'ampleur des changements climatiques potentiels, le changement de matériel vivant pourrait bien apparaître comme une des seules options efficaces à long terme. Dès lors, deux questions sont devenues prégnantes : comment évaluer l'évolution des conditions environnementales pour étayer ce choix, notamment en prenant en compte les scénarios de changement climatique produits par les modélisateurs du climat ? À quelles ressources génétiques faire appel pour s'adapter aux conditions futures ?

Caractériser l'évolution des conditions écologiques et des enveloppes climatiques des espèces

Le choix des essences est un sujet clé des DRA et SRA auxquels les aménagistes forestiers se réfèrent. L'identification des essences-objectifs s'appuyait jusqu'à présent sur les catalogues de stations, dans lesquels le climat était considéré comme constant et uniforme (avec des variantes selon la topographie), et sur la connaissance des gestionnaires quant au comportement des essences dans ces différents contextes stationnels. La prise en compte de l'évolution du climat imposait de nouvelles méthodes de description des conditions écologiques. L'ONF a ainsi soutenu les travaux développés au LERFOB (Laboratoire d'études des ressources forêt-bois d'INRA-AgroParisTech), puis dans l'UMR Silva (AgroParisTech, INRAE et Université de Lorraine), sur la caractérisation analytique des stations forestières, à partir de données spatialisées sur les facteurs du milieu (topographie, climat, caractéristiques du sol par bioindication floristique).

La nécessité de se projeter dans un climat différent a cruellement révélé la fragilité de nos connaissances sur l'autécologie des essences forestières, plus souvent empiriques et qualitatives que quantitatives, avec des références climatiques imprécises, parfois controversées, et souvent reconduites d'un auteur à l'autre sans véritable remise en cause scientifique. Étayer ce corpus de connaissances relatives et qualitatives par une démarche systématique de modélisation est apparu comme la voie d'avenir. La recherche et développement (R&D) forestière a donc porté ses efforts vers le développement de modèles accessibles aux organismes de gestion forestière, et déployables pour les principales essences ayant un potentiel de production de bois d'œuvre. L'ONF s'est orienté vers le modèle IKS (Le Bouler, 2014) caractérisant le domaine de compatibilité climatique d'une essence par trois facteurs limitants : le besoin de chaleur, le besoin d'alimentation en eau et la limitation par le froid. Il permet de projeter les évolutions des zones de compatibilité climatique des essences en fonction de scénarios d'évolution du climat. Après plusieurs années de travail au sein du RMT AFORCE, le modèle IKSMAPS sera très prochainement mis à la disposition de la communauté forestière (Bertin *et al.*, 2019).

Le défi le plus complexe, dans cette caractérisation des conditions futures de croissance des arbres, est d'atteindre l'échelle de travail du forestier, pour caractériser les conditions futures et leurs variations au sein d'un massif jusqu'au niveau de l'unité élémentaire de gestion. La question est en principe hors de portée (la climatologie est incapable de simuler l'évolution du climat futur à des échelles aussi fines), et pourtant pousser la projection jusqu'à ce niveau de résolution (y compris avec des



© V. Boulanger (ONF)

📍 Située dans les Alpes de Haute-Provence, la chênaie sessiliflore de Vachère, est l'une des unités de conservation des ressources génétiques du chêne les plus méridionales. Des glands y ont été récoltés pour le projet Giono.

hypothèses climatiques simplificatrices, comme la transposition de la variabilité locale actuelle) est nécessaire si on veut projeter le climat futur en prenant en compte la variabilité topo-édaphique locale. C'est donc également une voie de travail pour les équipes R&D de l'ONF, en interaction avec les gestionnaires. Le choix s'est porté sur la réutilisation des cartes de station quand elles sont disponibles et que le catalogue de station identifie bien le réservoir en eau comme un des facteurs limitants. Le réservoir en eau du sol utilisable par la végétation (RU) est calculé pour chaque station à partir des propriétés de leurs exemples-types. Un bilan hydrique est alors réalisé par massif ou par station à partir des informations issues des cartes/catalogues de station (sol) et des cartes de climat à fine résolution⁷. Ce bilan hydrique permet de positionner la station/ le massif par rapport aux observations nationales et d'aider à prioriser les zones d'action.

La recherche de ressources génétiques pour l'adaptation

Très conscients de la difficulté d'introduire avec succès de nouvelles ressources génétiques, les forestiers privilégient dans un premier temps des changements progressifs, par la sylviculture, des proportions des essences en place. Une autre proposition consiste à faire appel, pour les essences en place, à des sources de graines issues

⁷ Voir notamment les cartes climatiques développées au sein de l'UMR Silva : <https://silvae.agroparistech.fr/home/>

de climats plus chauds et plus secs. Cette approche dite de « migration assistée » est souvent évoquée théoriquement, mais très peu mise en pratique. La R&D de l'ONF, en s'appuyant sur l'implication de l'ONF dans l'ensemble de la filière des matériels forestiers de reproduction, l'a entreprise à l'échelle expérimentale, dans le cadre du projet Giono. Des plantations expérimentales de hêtre et de chêne sessile (à Verdun), de sapin (à Levier), dans des zones climatiquement favorables⁸, ont été mises en place dès 2013. Elles permettent de comparer le comportement du matériel génétique local avec des sujets issus de graines récoltées en limite d'aire de compatibilité climatique, dans des unités des réseaux de conservation des ressources génétiques des essences concernées (photo ②). Au-delà de la comparaison, l'expérience assure une « copie de conservation » de peuplements originaux, très vulnérables au réchauffement du climat, car déjà soumis à un climat extrême pour l'essence. Enfin, elle vise à terme à enrichir la diversité génétique locale (avec des compositions génétiques provenant de populations adaptées à des climats plus chauds et plus secs). Ajoutons que ce projet s'est révélé être un formidable outil de communication⁹ et de pédagogie sur l'adaptation des forêts au changement climatique.

Cependant, les scénarios de changement climatique, surtout les plus sévères, projettent dans nos régions un climat qui souvent sort de l'enveloppe climatique des essences en place. Que se passera-t-il dans ces cas-là ?

La discussion de cette question difficile dépasse le cadre de cet article, mais on ne peut envisager ces évolutions sans conclure au besoin de rechercher des espèces susceptibles de prospérer sous des climats inconnus sur notre territoire – de façon à pouvoir faire face à une probable dégradation des peuplements d'essences natives. La recherche de nouvelles essences pour l'adaptation est ainsi devenue une voie de travail. Une diversité d'approches est mise en œuvre : revisite des expérimentations d'essences et de provenances existantes, valorisation scientifique des arboretums, recensement des introductions d'espèces réalisées dans le cadre de la gestion, installation de nouvelles expérimentations (photo ③). La démarche a pris sa pleine ampleur avec les projets RENEssences (projet interne ONF) et Esperence (projet multipartenaires coordonné par le RMT AFORCE et soutenu par le Fond stratégique forêt bois), articulés entre eux. Ces projets visent à raisonner à l'échelle du territoire national et de l'ensemble de la communauté forestière un réseau expérimental cohérent pour rechercher et tester de nouvelles essences ou provenances. À l'ONF, le projet associe les gestionnaires dans une démarche participative : le dispositif expérimental proprement dit a vocation à être complété par des plantations expérimentales intitulées « îlots d'avenir », mises en place par les gestionnaires, avec un suivi au long cours qui s'appuiera notamment sur le sommier de la forêt (le sommier est le registre, en cours d'informatisation, dans

8. Zones climatiquement favorables actuellement et pour une durée variable selon le scénario climatique envisagé.

9. <https://www.onf.fr/+14e::le-grand-exode-climatique-des-arbres-du-projet-giono.html>

③ Expérience de stress hydrique au stade juvénile, au Pôle national des ressources génétiques forestières. Les anciennes « pépinières administratives », aujourd'hui pépinières expérimentales intégrées au département Recherche, Développement et Innovation, sont pleinement mobilisées dans la recherche de ressources génétiques pour l'adaptation, en lien avec l'ensemble des instituts de recherche forestière.



© B. Musch (ONF)

lequel sont collectées les principales données de gestion de la forêt). La Direction territoriale Grand Est (à l'origine de la dénomination « îlot d'avenir » et très motrice sur la question) travaille ainsi à la mise en place d'une centaine d'îlots d'avenir.

Pour rechercher ces nouvelles essences potentielles, le modèle IKS a été associé à une démarche de structuration systématique (projets IKSMAPS1 et IKSMAPS2 du RMT AFORCE) et de mise à disposition des informations sur l'autécologie des essences (projet Caravane du RMT AFORCE). Les deux approches alimentent un outil unique, dont le développement, en cours de finalisation, permettra aux gestionnaires de parfaire leurs connaissances sur les évolutions climatiques, sur les essences natives et non natives et leur niveau de compatibilité avec le climat futur, selon différents scénarios d'évolution (Bertin *et al.*, 2019).

Développer une sylviculture pour l'adaptation

La dynamisation de la sylviculture (c'est-à-dire l'augmentation des prélèvements en éclaircie conduisant à un abaissement relatif de la densité du peuplement) a été motivée par les augmentations de productivité constatées (Dhôte *et al.*, 2007). Elle permet également de réduire le risque lié à l'aléa tempête. Avec des peuplements moins denses, le bilan hydrique est également amélioré dans un contexte où les étés sont de plus en plus secs et chauds. Depuis 2004, les référentiels sylvicoles sont ainsi progressivement réajustés et déployés sous forme de guides sylvicoles établis par régions biogéographiques. Certains guides prennent en compte de façon plus ou moins poussée la question de l'adaptation au changement climatique (voir notamment Sardin *et al.*, 2011).

La question complexe de l'optimisation de la densité à des fins de régulation du bilan hydrique a fait l'objet de plusieurs travaux, dont certains menés avec l'appui ou la contribution de l'ONF (Gobin *et al.*, 2015). Elle a également donné lieu à un effort remarquable de mise en relation des questions pratiques avec les connaissances scientifiques, mené dans le cadre du RMT AFORCE (Bertin *et al.*, 2016).

Au-delà de la gestion de la densité, le mélange d'essences a concentré l'attention des scientifiques. Si le mélange ne semble pas généralement améliorer le comportement des peuplements face à la sécheresse, il présente néanmoins de nombreux intérêts adaptatifs. Il permet par exemple de ménager des transitions, mais aussi d'atténuer certains risques biotiques, qui peuvent s'installer de façon opportuniste dans les peuplements affaiblis. C'est dans cette perspective qu'une collaboration de long terme a été mise en place avec les équipes d'INRAE sur la sylviculture des peuplements mélangés, qui a conduit à la mise en place du dispositif OPTMix¹⁰ (Korboulewsky, 2015). Installé dans la forêt domaniale d'Orléans, ce dispositif permet d'étudier les effets du climat, de la gestion sylvicole (mélange et densité) et de la présence des grands herbivores, et leurs interactions sur le fonctionnement des forêts de plaine.

D'une façon plus générale, la question de l'atténuation de certains risques biotiques émergents, qu'ils soient favorisés directement ou non par le réchauffement (maladie des bandes rouges, hannetons forestiers, che-

nilles processionnaires...) a fait l'objet de collaborations scientifiques. Ainsi l'étude des effets de la composition des chênaies mixtes sur leur vulnérabilité à la processionnaire du chêne a fait l'objet d'une thèse à INRAE avec le soutien et la collaboration de l'ONF¹¹.

Parmi les interactions biotiques influant sur la dynamique des peuplements forestiers, on doit faire état du déséquilibre sylvo-cynégétique. Assez généralisé, ce déséquilibre atteint un niveau de crise dans le Grand Est. Il compromet dans bien des cas le renouvellement adéquat de la forêt et rend plus difficile la mise en œuvre des plantations forestières nécessaires pour l'adaptation au changement climatique (changement d'essences ou de provenances). Il appauvrit la diversité des espèces ligneuses et influe sur l'équilibre des espèces en ne privilégiant pas toujours les plus adaptées au climat futur (le hêtre est favorisé au détriment du chêne par exemple). Restaurer l'équilibre sylvo-cynégétique est ainsi une condition préalable à la mise en place de mesures d'adaptation au changement climatique. Ce sujet très prégnant a été bien identifié dans le programme national de la forêt et du bois (PNFB) et ses déclinaisons régionales (PRFB).

Enfin, envisageant délibérément le très long terme, plusieurs collaborations avec INRAE entreprennent de modéliser, du point de vue démo-génétique, les effets de la sylviculture sur la faculté d'adaptation des peuplements¹². Sont envisagées les différentes opérations sylvicoles d'éclaircie et de récolte, mais aussi les modalités d'introduction de nouvelles ressources forestières apparentées aux essences actuelles, de façon à favoriser l'hybridation avec les peuplements en place, pour préparer la suite de la démarche Giono (photo 4).

Monitoring et gestion de crise

Le changement climatique se caractérise par une dérive des conditions moyennes, difficilement perceptible à court terme, émaillée d'événements climatiques extrêmes qui occasionnent brutalement des dégâts très visibles. L'année 2019, marquée par de nombreuses atteintes dans les peuplements (scolytes sur épicéa, dépérissement de sapins, de hêtres, dégâts brutaux liés aux canicules et sécheresses des dernières années) en est une illustration.

Suivre et caractériser les effets du changement climatique dans les peuplements fait ainsi appel à un effort soutenu à très long terme de monitoring des peuplements, ainsi qu'à des actions de court terme, en réponse à une crise. La caractérisation des phénomènes dans les situations de crises est ainsi l'une des questions traitées par les télédéTECTEURS du département RDI de l'ONF, en lien avec ses partenaires (DFS, INRAE), avec un intérêt renforcé par la disponibilité récente de données satellitaires exhaustives et fréquentes (notamment les satellites européens Sentinel). Ce sujet est d'autant plus difficile qu'il fait l'objet d'efforts intermittents : passant au premier plan

10. https://optmix.irstea.fr/?page_id=25

11. Interactions entre les chênes et la chenille processionnaire du chêne, *Thaumetopoea processionea* L. : de l'arbre à la forêt par Thomas Damestoy, 2019 (<http://www.theses.fr/s203180>).

12. Voir par exemple <https://www.reseau-aforce.fr/n/igs/n:3406>



❖ Récolte de faînes dans une hêtraie atypique : la hêtraie de la vallée du Ciron, en Aquitaine. Des plants issus de ces graines sont installés dans la plantation expérimentale Giono en forêt domaniale de Verdun, où elles pourraient, à terme, en s'hybridant avec la ressource de hêtre locale, accroître sa capacité d'adaptation.

lors d'une saison de gradation de scolytes, comme 2018-2019, il peut difficilement faire l'objet de travaux de fond en dehors de ces épisodes, faute de données à traiter. Les questions adressées sont multiples : bilan des impacts (aspect actuellement le plus traité dans les divers cas étudiés), mais aussi – et de plus en plus – suivi dynamique de ces impacts, afin de fournir une aide au diagnostic et à la gestion des peuplements concernés. La complexité des phénomènes et des peuplements concernés (souvent hétérogènes, certaines essences ou individus étant touchés, alors que les voisins restent indemnes) rend toute généralisation de méthode précédemment établie délicate.

La gestion de la crise quant à elle soulève des questions touchant à de nombreux aspects, traités dans le guide de gestion des forêts en crise sanitaire, rédigé dans le cadre du RMT AFORCE (Gauquelin *et al.*, 2010), et qui a fait déjà l'objet de plusieurs déploiements (par exemple suite aux atteintes de processionnaire en Lorraine, ou de hannetons forestiers en Picardie et dans les Vosges du Nord). Sa mise à jour et son enrichissement sont en cours.

Enfin, le suivi au long cours des peuplements soumis aux diverses composantes des changements globaux est l'objet même du réseau RENECOFOR (réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers). Au fil de ces vingt-cinq ans d'existence¹³, RENECOFOR a contribué à de nombreuses avancées, en permettant notamment de développer ou d'ajuster des modèles, ou encore de déployer leurs projections à l'échelle de l'ensemble de la forêt française. L'ONF renouvelle son engagement dans cet effort de long terme au-delà des trente années initialement prévues, et la réflexion sur la nécessaire évolution des modalités de ce suivi est en cours, sous l'égide du comité de pilotage scientifique du réseau.

En conclusion

Le département RDI, en prise directe avec la recherche, a joué un rôle important, souvent moteur, dans la mise en place progressive d'une stratégie d'adaptation au changement climatique. Mais la réflexion s'est toujours faite en lien avec les services de gestion, le réseau RDI échangeant avec le réseau en charge du management technique afin de proposer des outils pertinents et, réciproquement, de transcrire les questions opérationnelles en problématiques scientifiques. Souvent, les services de gestion ont pris l'initiative, proposé des cas d'étude, ou tout simplement poussé le département RDI à avancer.

La tâche pour les gestionnaires est immense : les outils de gestion doivent évoluer en prenant en compte le changement climatique (choix des essences ou provenances par exemple), de nouveaux outils sont à mettre au point (guide pour la sylviculture des peuplements mélangés), l'équilibre sylvo-cynégétique doit être restauré, l'effort de plantations forestières doit être amplifié dans un contexte climatique plus difficile pour leur réussite, la chaîne d'approvisionnement en nouveaux matériels forestiers de reproduction doit être consolidée, le dialogue avec les parties intéressées doit être développé (risque de rejet de certaines solutions d'adaptation alors que toute la palette des solutions doit être mise en œuvre), de nouvelles modalités de décision en contexte incertain doivent être développées, il sera nécessaire d'anticiper de manière raisonnable, d'éviter l'immobilisme et de ne pas se contenter de réagir aux crises.

¹³. Les présentations du colloque anniversaire de 2017 sont disponibles sur Youtube : <https://www.youtube.com/playlist?list=PLdYbwaW5V5XcgDmCHyu7ffzhsrWs6olpt>

► Pour le département RDI comme pour les acteurs du RMT AFORCE dans son ensemble, un compromis est toujours difficile à trouver entre livrer rapidement une information partielle, au risque de susciter des frustrations, ou bien de prendre le temps nécessaire pour fournir des outils achevés, au risque que d'autres initiatives aient été développées entre-temps, entraînant dispersion des moyens et parfois une certaine confusion. La sortie de projections nouvelles ne se fait jamais sans la crainte de susciter le découragement ou le rejet des gestionnaires. Elle nécessite un accompagnement, avec des actions de communication et des formations.

Enfin de nouveaux résultats imposent parfois de corriger ou d'ajuster les décisions précédentes, en déployant un nécessaire effort d'explication.

Aujourd'hui, l'adaptation au changement climatique est devenue la problématique centrale du département RDI de l'ONF, et une préoccupation majeure de nos collègues gestionnaires, difficile à oublier en cette année 2019 où de nombreuses atteintes marquent les forêts. ■

Les auteurs

Myriam LEGAY, Brigitte MUSCH, Noémie POUSSE, Anne JOLLY, Jean LADIER, Vincent BOULANGER, Christine DELEUZE, Patrice MENGIN-LECREULX, Alexandre PIBOULE, Yves ROUSSELLE et Claudine RICHTER

Office national des forêts,
2 avenue de Saint-Mandé,
75570 Paris Cedex 12, France.

✉ myriam.legay@agroparistech.fr

✉ brigitte.musch@onf.fr

✉ noemie.pousse@onf.fr

✉ anne.jolly@onf.fr

✉ jean.ladier@onf.fr

✉ vincent.boulanger@onf.fr

✉ christine.deleuze@onf.fr

✉ patrice.mengin-lecreulx@onf.fr

✉ alexandre.piboule@onf.fr

✉ yves.rouselle@onf.fr

✉ claudine.richter@onf.fr

EN SAVOIR PLUS...

▣ **BADEAU, V., DUPOUEY, J.-L., CLUZEAU, C., DRAPIER, J., LE BAS, C., 2004, Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises, in : *Rapport final du projet CARBOFOR « Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France »* (éd. D. Lousteau), Bordeaux-Pierroton, Inra, p. 101-113, disponible sur : <http://www.gip-ecofor.org/gicc/?p=592>**

▣ **BERTIN, S., LEGAY, M., MUSCH, B., PAILLASSA, E., PERRIER, C., PIBOULE, A., 2019, Un outil en ligne pour accompagner le choix des essences forestières dans un contexte de changement climatique : Caravane et lksmaps, *Forêt Entreprise*, n° 249, p. 33-34.**

▣ **BERTIN, S., PERRIER, C. (coordination), BERTIN, S., BALANDIER, P., BECQUEY, J., BONAL, D., BRÉDA, N., PERRIER, C., RIOU-NIVERT, P., SEVRIN, E., 2016, *Le bilan hydrique des peuplements forestiers. État des connaissances scientifiques et techniques. Implications pour la gestion*, RMT AFORCE, 190 p.**

▣ **DHÔTE, J.-F., BONTEMPS, J.-D., HERVÉ, J.-C., RITTIÉ, D., VALLET, P., 2007, Changements de productivité à long terme dans les hêtraies du Nord de la France, *Rendez-Vous techniques*, vol. hors-série n° 3, p. 74-80.**

▣ **E SILVA, D., REZENDE MAZZELLA, P., CORCKET, E., LEGAY, M., DUPOUEY, J.-L., 2012, Does natural regeneration determine the limit of European beech distribution under climatic stress?, *Forest Ecology and Management*, vol. 266, p. 263-272.**

▣ **E SILVA, D., BADEAU, V., LEGAY, M., CORCKET, E., DUPOUEY, J.-L., 2011, Tracking human impact on current tree species distribution using plant communities, *Journal of Vegetation Science*, vol. 23(2), p. 313-324.**

▣ **GAUQUELIN, X., BRÉDA, N., LEGAY, M., NAGELEISEN, L.-M., PICARD, O., et al., 2010, *Guide de gestion des forêts en crise sanitaire*, MAAP, ONF, IDF, Inra.**

▣ **GOBIN, R., BALANDIER, P., KORBOULEWSKY, N., DUMAS, Y., SEIGNER, V., RICHTER, C., 2015, Une strate herbacée monopoliste: quelle concurrence vis-à-vis de l'eau pour le peuplement adulte ?, *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, n° 48, p. 17-22.**

▣ **KORBOULEWSKY, N., PEROT, T., BALANDIER, P., BALLON, P., BARRIER, R., BOSCARDIN, Y., DAUFFY-RICHARD, E., DUMAS, Y., GINISTY, C., GOSSELIN, M., HAMARD, J.-P., LAURENT, L., MARELL, A., NDIAYE, A., PERRET, S., ROCQUENCOURT, A., SEIGNER, V., VALLET, P., 2015, OPTMix – Dispositif expérimental de suivi à long terme du fonctionnement de la forêt mélangée, *Rendez-Vous Techniques de l'ONF*, n° 47, p. 60-70.**

▣ **LADIER, J., TESSIER, C., 2016, Dépérissement des forêts : un observatoire départemental dans les Alpes-Maritimes, *Rendez-vous techniques de l'ONF*, n° 53, p. 3-10.**

▣ **LE BOULER, H., 2014, Forêt et changements climatiques : Associer les concepts de niche écologique et de station forestière pour comprendre et préparer l'avenir, *Innovations Agronomiques*, p. 129-139.**

▣ **LEGAY, M., et al., 2015, Effets attendus du changement climatique sur l'arbre et la forêt, in : *L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change*, p. 34-65, ONERC.**

▣ **LEGAY, M., MORTIER, F., 2006, *La forêt face au changement climatique : adapter la gestion forestière*, Paris, ONF, Direction technique, Inra, Coll. Les Dossiers forestiers, n° 16, 39 p.**

▣ **SARDIN, T., LEGAY, M., BOCK, J., CONRARD, F., 2011, *Hêtraies continentales - référentiels sylvicoles*, ONF.**

▣ **VENNETIER, M., VILA, B., LIANG, EY, GUIBAL, F., RIPERT, C., CHANDIOUX, O., 2007, Impact du changement climatique et de la canicule de 2003 sur la productivité et l'aire de répartition du pin sylvestre et du pin d'Alep en région méditerranéenne, *Rendez-vous techniques de l'ONF*, n° hors-série 3, p. 67-73.**



Installé dans la forêt domaniale d'Orléans, le dispositif expérimental OPTmix : un exemple de collaboration entre le département RDI de l'ONF et les équipes d'INRAE, pour mieux comprendre les effets du climat, de la gestion sylvicole et de la présence des grands herbivores sur le fonctionnement des forêts de plaine.

Focus

AFORCE, le réseau français pour l'adaptation des forêts au changement climatique

En dix ans d'existence, le réseau AFORCE est devenu une référence dans le secteur de l'adaptation des forêts au changement climatique. Il s'appuie pour cela sur son réseau de dix-huit partenaires apportant chacun une expertise, un savoir-faire et/ou des connaissances nouvelles sur trois thématiques : choix des essences et provenances, risque et évaluation économique des décisions de gestion, stratégies d'adaptation, nouvelles sylvicultures et innovations techniques. Aujourd'hui, ce sont aussi trente-deux projets de recherche et développement et sept formations qui ont été financés par le réseau afin de concevoir de nouveaux outils d'aide à la décision et d'accompagner les acteurs à leur prise en main.

Les changements climatiques en cours et les impacts associés affectent la croissance, la santé, la stabilité voire la survie des forêts françaises. Ces évolutions posent depuis déjà plusieurs années des problèmes de gestion grandissants. Il est aujourd'hui impossible de rester inactif et nous devons anticiper ces bouleversements sans attendre de certitudes. Mais sommes-nous suffisamment bien organisés pour relever ce défi et pour mettre en place les actions nécessaires à la préservation de la forêt et de tous les services qu'elle procure à la société ?

C'est pour faire face à ces questionnements et pour optimiser l'organisation des forestiers autour de cet enjeu que, dès 2009, le réseau mixte technologique (RMT) AFORCE a été créé. Il a pour mission l'accompagnement de l'adaptation des forêts françaises au changement climatique. Il est

coordonné par l'Institut pour le développement forestier, service R&D du Centre national de la propriété forestière. Il bénéficie d'un appui financier du ministère en charge de l'agriculture et de l'Interprofession nationale France Bois Forêt. Il regroupe dix-sept partenaires¹ travaillant ensemble à une meilleure circulation des connaissances et des innovations vers le sylviculteur.

Les organismes forestiers producteurs de connaissances et en charge de leur mise à disposition y sont impliqués. Les formateurs et praticiens y tiennent une place importante. Ils constituent des maillons essentiels pour la circulation et la diffusion de l'information. Ils sont aussi les témoins des impacts du changement climatique et de la réussite ou de l'échec des nouvelles pratiques. Ils sont enfin les acteurs et garants de l'adaptation.

L'action du réseau s'organise autour des quatre grands axes suivants.

1. AgroParisTech Nancy, APCA (Assemblée permanente des chambres d'agriculture), CNPF (Centre national de la propriété forestière), INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement), Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, EFF (Experts forestiers de France), EFI (*European Forest Institute*), GIP ECOFOR, IEFC (Institut européen de la forêt cultivée), IGN (Institut national de l'information géographique et forestière), FCBA (Institut technologique forêt cellulose bois-construction ameublement), lycées forestiers de Meymac et de Mirecourt, Météo-France, ONF (Office national des forêts), GCF (Groupement coopération forestière) et SFCDC (Société forestière de la caisse des dépôts et consignations).

1 Colloque 2019 du réseau AFORCE à Montpellier.



© C. Forissier (CNPF)

Animer le partage d'expériences

Afin de faciliter les échanges et le partage d'expériences, le réseau AFORCE organise régulièrement des colloques (photo 1) et des ateliers thématiques, soit un total de vingt-cinq événements depuis 2009. L'objectif est de faire connaître les démarches mises en place autour de l'adaptation. Le réseau souhaite ainsi jouer un rôle de déclencheur de l'action tout en favorisant la diversité des solutions qui constitue la meilleure garantie en situation de risque et d'incertitude. Le retour d'expérience de ceux qui ont déjà été confrontés aux effets du changement climatique ou qui ont déjà testé des actions d'anticipation est aussi très précieux et riche d'enseignement pour la communauté. Les témoignages restitués lors de ces rencontres peuvent aussi contribuer à lever d'éventuels blocages à l'action. Des temps de débat et d'échanges permettent à la diversité des acteurs présents (gestionnaires, chercheurs, enseignants, décideurs publics, agents de développement, animateurs du territoire, etc.) d'exprimer leurs besoins et attentes. Enfin, ces manifestations constituent des temps privilégiés pour la mise en place de nouvelles collaborations et l'émergence de nouvelles idées. C'est pourquoi le réseau s'est aussi investi à l'échelle européenne (Focus Group, Partenariat européen pour l'innovation (PEI), etc.) et encourage un partage d'expérience au-delà des frontières via notamment l'organisation d'ateliers internationaux. Il a animé des réunions de mobilisation interrégionale dans le cadre d'une expertise pour la valorisation des PEI. L'objectif était d'accélérer l'appropriation en région par les forestiers des outils pour l'innovation et d'inciter le développement de groupes de travail associés.

Diffuser l'information et les connaissances

Le réseau AFORCE joue un rôle de veille sur le thème du changement climatique et de la forêt et constitue une plateforme documentaire de mise en commun des projets et outils existants (www.reseau-aforce.fr). L'objectif est de faire connaître ces travaux et d'accélérer leur mise à disposition auprès du plus grand nombre et notamment des décideurs. Cette circulation de l'information et des connaissances est stratégique et déterminante pour l'engagement d'actions d'adaptation. La mise en place de ces canaux de transmission ne doit pas être à sens unique, c'est pourquoi le réseau s'organise aussi pour faire remonter les attentes et besoins des agents de terrain. Ces informations sont indispensables pour mieux guider les travaux de recherche et de développement, définir des priorités et organiser une diffusion plus ciblée et efficace de certains outils.

Mobiliser une expertise pluridisciplinaire

Le réseau AFORCE organise son action autour de trois thématiques :

- choix des essences et provenances,
- risque et évaluation économique des décisions de gestion,
- stratégies d'adaptation, nouvelles sylvicultures et innovations techniques.

Elles structurent le programme scientifique et technique sur lequel s'appuient les membres du réseau pour élaborer les programmes d'action annuels. L'urgence et la gravité de la situation obligent la mutualisation des moyens

▶ et des compétences. Ainsi, chacun des organismes partenaires met à disposition du réseau des experts compétents sur ces thématiques, à même d'apporter un savoir-faire, une expertise et/ou des connaissances nouvelles.

Le réseau les réunit autant de fois que nécessaire pour :

- répondre aux demandes des pouvoirs publics,
- participer à des évaluations ou des relectures,
- produire des synthèses de connaissance,
- évaluer les priorités d'action à mettre en place au sein du réseau (figure 1).

Le réseau est aussi amené à faire appel à des experts externes, en France et à l'étranger, pour contribuer à ses travaux ou pour les confronter à d'autres approches. Enfin, cette expertise pluridisciplinaire est mise à profit dans le cadre des projets initiés ou soutenus par le réseau. Ces projets obligatoirement multipartenaires mobilisent les experts identifiés sur ces thématiques.

L'intervention de cette expertise au sein d'AFORCE est essentielle : elle assure la qualité et la rigueur de ses travaux, contribue à la mise en œuvre de productions innovantes et enfin détermine sa capacité à répondre efficacement et de manière concertée aux sollicitations qui lui sont faites.

Accompagner l'aide à la décision

Le réseau AFORCE encourage la production d'outils d'aide à la décision et l'accompagnement à leur utilisation. Il propose pour cela régulièrement des appels à projets de R&D. Au total, trente-deux projets ont déjà été soutenus par AFORCE, dans le cadre de six appels à projets². En outre, le réseau a soutenu depuis sa création l'organisation de sept formations visant à une meilleure compréhension du changement climatique et de ses effets, ou visant à aider à l'appropriation d'outils d'aide à la décision. Il travaille, par ailleurs, en étroite collaboration avec l'enseignement technique et supérieur pour évaluer les besoins des formateurs.

Trois des dernières productions phare du réseau en cours de finalisation ont été présentées lors de son dernier colloque³ :

- un site Internet pour aider les praticiens dans leur choix d'espèces en tenant compte des éléments de connaissances les plus récents (potentialités, exigences, compatibilité climatique) ;
- un outil de simulation des impacts génétiques liés aux pratiques sylvicoles qui sera utilisé à des fins pédagogiques pour comparer différents itinéraires techniques sylvicoles ;

2. Ces appels à projets ont été financés via AFORCE par le ministère en charge de l'agriculture, l'interprofession France Bois Forêt et les partenaires du réseau. Certains ont en plus bénéficié d'un co-financement par le Labex ARBRE géré par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme « Investissement d'avenir » portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01.

3. <https://www.reseau-aforce.fr/n/colloque-de-restitution-n/n:3616>

1 Organisation de la mobilisation de l'expertise pluridisciplinaire au sein du réseau AFORCE.

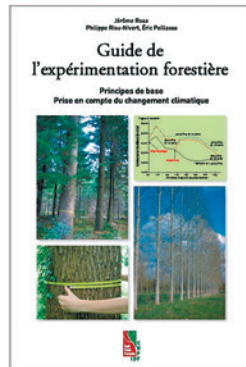


1 QUELQUES PRODUCTIONS DU RÉSEAU AFORCE

- Fiches d'information sur les outils dédiés à la gestion de la végétation concurrente et du travail du sol, utilisés lors de la plantation afin d'être plus efficaces dans la gestion des conditions de sécheresse (PILOTE).
- Clés d'aide à la décision pour l'évaluation de l'état sanitaire des peuplements sur la base de l'architecture des arbres afin de déterminer la réversibilité ou l'irréversibilité du dépérissement des forêts (ARCHI).



- Guide expliquant le bilan hydrique journalier des peuplements forestiers et sa prise en compte pour améliorer la gestion forestière.



- Guide de l'expérimentation forestière répertoriant les principes de base de l'expérimentation et les recommandations spécifiques pour l'étude du changement climatique.



- Guide pour la gestion des forêts touchées par une crise sanitaire, présentant les bonnes pratiques forestières à mettre en place pour faire face à de telles situations (réédition augmentée en cours).

- des cartes numériques (pour le nord-ouest de la France) pour l'évaluation des conditions de croissance des espèces (sol, climat, exposition, etc.).

Conclusion

Après dix ans d'activité, le réseau aborde un nouveau virage et prépare son programme d'activités pour la période 2020-2025. Pour établir ses priorités scientifiques et techniques, il s'appuie sur le bilan de ses actions passées, sur une analyse de l'évolution du contexte national et international, sur une évaluation des besoins des forestiers en matière d'adaptation et enfin sur l'analyse du niveau de satisfaction de ses différents publics cibles. Une rétrospective des activités permet de mettre en évidence le chemin parcouru. Des relations durables ont été construites et les réflexes de collaboration entre les différents organismes forestiers ont été renforcés. Le réseau a aussi contribué à une évolution de la prise de conscience des décideurs opérationnels qui sont de plus en plus sensibles, concernés et motivés. Le travail d'AFORCE doit évoluer : il doit aujourd'hui apporter des éléments concrets de décision, s'engager autour d'études de cas pour mettre en pratique les enseignements déjà rassemblés et insister sur la nécessité d'agir, même sans avoir toutes les réponses souhaitées. Il doit aussi être plus présent en région, et encourager une diversification des initiatives d'adaptation pour assurer à terme une meilleure résilience de l'ensemble de la forêt française. ■

L'auteur

Céline PERRIER
Réseau AFORCE,
Centre national de la propriété forestière - Ile-de-France,
47 rue de Chaillot, 75116 Paris,
France.
✉ celine.perrier@cnpf.fr



2 FINANCEURS PRINCIPAUX DU RÉSEAU AFORCE

- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
<https://agriculture.gouv.fr/>
- France Bois Forêt - Interprofession nationale
<https://franceboisforet.fr/>

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 ?

Dans le cadre de sa mission d'appui au ministère de l'Agriculture, un groupe de travail de la section « arbres forestiers » du Comité technique permanent de la sélection (CTPS) a passé en revue les principales essences forestières utilisées en reboisement ; il a statué « à dire d'expert » sur les besoins futurs et évalué les risques de pénurie. Dans une perspective d'accroissement des besoins en plants forestiers, en réponse notamment aux nouveaux enjeux de la forêt face au changement climatique, il ressort de cette analyse que des tensions pourraient apparaître dans la fourniture de graines et plants pour plusieurs espèces résineuses et feuillues.

Les dernières orientations de politique forestière traduites dans le plan national forêt-bois 2016-2026 prévoient une augmentation sensible de la récolte de bois et, en parallèle, un effort conséquent de renouvellement et de reconstitution des peuplements forestiers dégradés. Un plan consistant à créer en dix ans cinq cent mille hectares de nouvelles plantations a même été élaboré dans l'un des scénarios imaginés dans le cadre de la stratégie nationale de lutte contre le changement climatique. Dans cette perspective d'accroissement des besoins en plants, le ministère de l'Agriculture, en charge de la forêt, via la section « arbres forestiers » du CTPS (Comité technique permanent de la sélection), a souhaité disposer d'une analyse de la capacité de production actuelle de la filière « graines et plants forestiers », de son adéquation aux besoins prévisibles et, le cas échéant, de recommandations pour ajuster l'offre à la demande. La réflexion a été conduite au sein d'un groupe de travail du CTPS associant marchands grainiers, pépiniéristes, entrepreneurs de travaux et coopératives forestières, gestionnaires de forêts publiques et privées, chercheurs et représentants du ministère.

L'état actuel des outils de production de semences et plants forestiers

Les semences destinées à l'approvisionnement des pépiniéristes forestiers ont deux origines possibles : des peuplements porte-graines, regroupés au sein de régions de provenances écologiquement homogènes, et des vergers à graines. Les premiers sont sélectionnés parmi les forêts françaises sur la base de leur pureté spécifique et de leur phénotype. Les vergers à graines, généralement composés de génotypes sélectionnés dans les programmes d'amélioration de la recherche forestière, sont des plantations créées spécialement pour la production de graines. Environ 300 ha de vergers à graines de l'État ont ainsi été constitués dans les départements du Lot et du Tarn à partir des années 1970 grâce aux moyens du Fonds forestier national, avec le soutien scientifique de la recherche (INRA, Irstea à l'époque Cemagref)¹ et le soutien technique de l'Office national des forêts. À cette surface, il convient d'ajouter 429 ha de vergers gérés principalement sur fonds privés, qui concernent essentiellement le pin maritime.

1. Désormais INRAE, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, qui rassemble depuis 2020, les ex-organismes Inra et Irstea.

La plupart des semences utilisées en France sont récoltées sur le territoire national mais les marchands grainiers ont parfois recours à des importations pour certaines espèces. La récolte et le commerce des graines forestières sont particulièrement encadrés par des réglementations communautaire et nationale mises en place depuis 1966 et actualisées régulièrement (directive n°1999/105/CE, code forestier, circulaires, arrêtés régionaux).

Le ministère de l'Agriculture a délégué à Irstea (désormais INRAE) la gestion du registre national des « matériels de base des essences forestières ». Ce registre inventorie et décrit les peuplements porte-graines sélectionnés, les vergers à graines et les variétés clonales autorisées à la récolte. Les graines récoltées dans ces structures ainsi que les plants produits en pépinières sont appelés « matériels forestiers de reproduction (MFR) ». Là encore, Irstea (désormais INRAE) assure pour le compte du ministère le suivi des productions de MFR grâce à deux enquêtes annuelles auprès des professionnels déclarés portant sur les récoltes et flux de graines et sur la production et la vente de plants forestiers. Ces données statistiques sont très précieuses pour analyser l'évolution du commerce des graines et plants forestiers. Le tableau 1 présente,

de façon synthétique et pour les principales essences de reboisement, les surfaces de peuplements porte-graines et de vergers à graines répertoriés au registre, les quantités de graines récoltées en moyenne par an sur les dernières années et les quantités de plants produits et vendus en France pour l'année 2017-2018. Les figures 1 et 2 présentent l'évolution des quantités de plants vendus en France pour les reboisements résineux et feuillus.

La situation pourrait être résumée ainsi : un portefeuille de peuplements porte-graines très important, représentant près de 62 500 ha et un dispositif vergers à graines lui aussi important mais pour partie vieillissant et qu'il faut probablement renouveler.

Les risques de pénurie de matériels forestiers de reproduction, pour quelles essences ?

Le groupe de travail a pu passer en revue les principales essences forestières utilisées en reboisement et statuer « à dire d'expert » sur les besoins futurs et, au regard de l'outil de production de graines (peuplement et/ou verger), évaluer les risques de pénurie.

1 Principales essences de reboisement : nombre et surfaces de peuplements porte-graines et de vergers à graines répertoriés au registre des « matériels de base », quantités de graines récoltées et quantités de plants produits et vendus pour l'année 2017-2018.

Essence	Nombre (et surfaces) de peuplements porte-graines	Nombre (et surfaces) de vergers à graines admis au registre	Quantité de graines récoltées en France (moyenne des campagnes 2007-08 à 2016-17, en kg)	Vente de plants (France + export) 2017-2018
<i>Pinus pinaster</i>	114 (12 125 ha)	17 (429 ha)	6 879,6	40 127 940
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	50 (275 ha)	8 (89 ha)	686,4	10 355 453
<i>Quercus petraea</i>	177 (10 676 ha)	–	66 300	3 223 550
<i>Picea abies</i>	77 (6 476 ha)	3 (16 ha)	134,1	2 382 233
<i>Pinus taeda</i>	25 (214 ha)	–	151,2	1 923 606
<i>Abies nordmanniana</i> et <i>bornmuelleriana</i>	–	1 (4,5 ha) (<i>d'Abies bornmuelleriana</i>)	459,9 (<i>nordmanniana</i> hors réglementation)	14 350 97
<i>Picea sitchensis</i>	14 (134 ha)	–	4,3	1 255 613
<i>Larix eurolepis</i>	–	3 (13 ha)	12,2	1 018 811
<i>Larix decidua</i>	46 (919 ha)	1 (13 ha)	52,4	902 764
Peupliers clones (plançons)	–	–	–	786 590
<i>Pinus nigra</i> var. <i>corsicana</i>	44 (3 056 ha)	2 (55 ha)	62,3	604 777
<i>Robinia pseudoacacia</i>	–	–	0	593 808
<i>Pinus sylvestris</i>	123 (5 195 ha)	3 (17 ha)	21,3	583 460
<i>Fagus sylvatica</i>	135 (5 509 ha)	–	3 200	559 271
<i>Quercus rubra</i>	73 (372 ha)	–	9 100	378 445
<i>Cedrus atlantica</i>	30 (595 ha)	3 (146 ha)	190	383 508
<i>Quercus robur</i>	96 (2 496 ha)	–	9 600	525 632
<i>Carpinus betulus</i>	–	–	319,4	327 696
<i>Castanea sativa</i>	48 (495 ha)	–	8 000	269 210
Eucalyptus hybride <i>gunnii</i> x <i>dalrympleana</i>	–	–	–	164 780

Parmi les essences résineuses, le douglas, les mélèzes et le cèdre

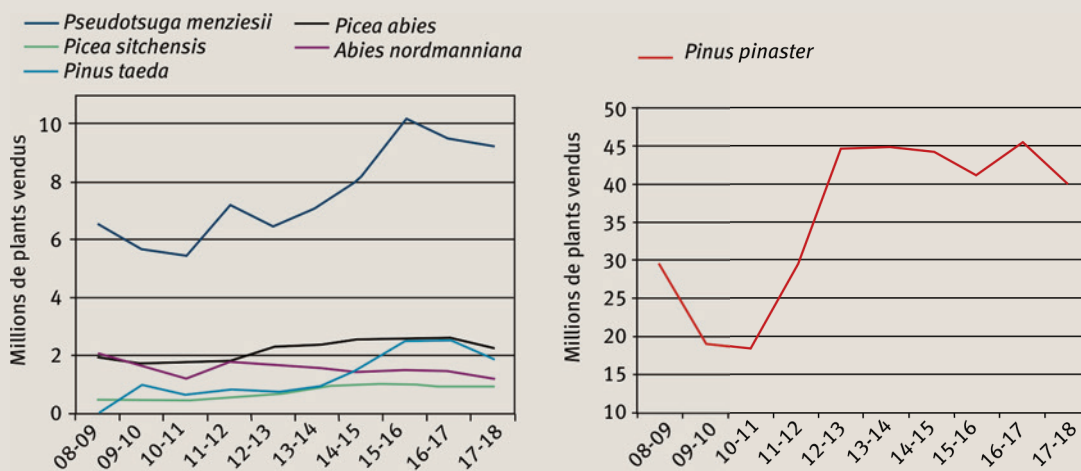
Le douglas : pour l'instant, les marchands grainiers parviennent à répondre à la demande en graines des pépiniéristes français alors même qu'une partie des semences est dirigée vers l'exportation. De l'avis général du groupe de travail, la demande est appelée à augmenter dans les dix années à venir. Diverses raisons sont invoquées : augmentation des densités de plantation, renouvellement en hausse des plantations des années 1950-1980, substitution d'essence au profit du douglas qui est à la fois productif et doté d'un bois de grande qualité, notamment en termes de durabilité naturelle. La quasi-totalité des graines provient à présent des huit vergers à graines de l'État. Une projection de la capacité de production des vergers actuels et futurs montre qu'une pénurie de graines pourrait survenir à partir de 2035, lorsque les vergers les plus anciens auront cessé d'être exploités et que les nouveaux vergers du programme « Douglas Avenir » ne seront pas encore productifs. En anticipation, les marchands grainiers ont pris la décision d'aug-

menter leurs stocks (objectif d'au minimum trois années d'utilisation, la graine se conservant bien pendant une dizaine d'années) et, pour cela, d'accroître la fréquence des traitements d'induction florale dans les vergers. Cette mesure devrait permettre d'atteindre la production cible de une tonne de graines par an.

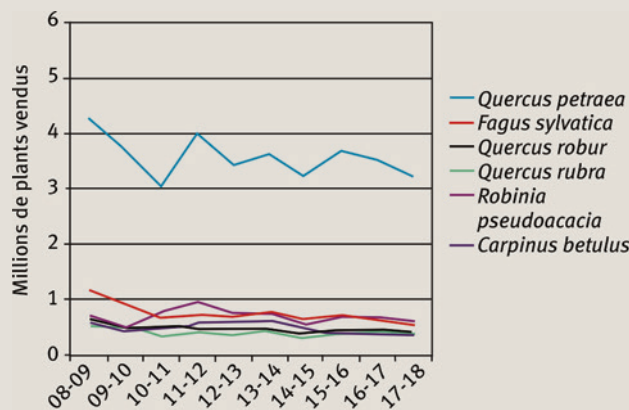
Le mélèze d'Europe : le verger à graines « origine Sudètes » produisant peu, et de manière irrégulière (25 kg /an en moyenne sur dix ans), le recours aux importations de graines de République Tchèque ou de Slovaquie est nécessaire pour satisfaire la demande nationale (30 kg/an en moyenne sur dix ans). La récolte en peuplements classés reste délicate et nécessiterait le classement de nouveaux peuplements après vérification de leur origine et de leur pureté génétique. On s'oriente donc plutôt vers la création de nouveaux vergers, ce qui imposera des délais avant leur entrée en production.

Le mélèze hybride : l'offre en graines est insuffisante pour satisfaire la demande actuelle, d'où le recours à des importations en provenance de vergers belges et danois. Ce contexte défavorable est lié à la difficulté de produire

❶ Évolution des ventes en France des principaux résineux de 2008 à 2018 (d'après « Synthèse des résultats de l'enquête « Statistiques sur la production et la vente en France de plants forestiers - Campagne 2017-2018 », Cécile JOYEAU, Irstea, mai 2019).



❷ Évolution des ventes en France des principaux feuillus de 2008 à 2018 (d'après « Synthèse des résultats de l'enquête « Statistiques sur la production et la vente en France de plants forestiers - Campagne 2017-2018 », Cécile JOYEAU, Irstea, mai 2019).



des graines par pollinisation artificielle dans le seul verger d'hybridation productif. L'installation de protections contre le gel, en cours de test depuis ce printemps, devrait permettre de régulariser la production de graines F1². Par ailleurs, les risques de pénurie sont moins prégnants depuis l'admission en 2018 du verger du domaine des Barres, composé de clones eux-mêmes hybrides et produisant donc une variété F2³. La très bonne récolte de 2018 va contribuer à détendre la tension sur la graine de mélèze hybride pour quelques années.

Le cèdre de l'Atlas : essence dont la demande est en hausse, il présente le double inconvénient d'être une espèce difficile à récolter (par « grimpage » ou sur coupe) et de produire des graines résineuses difficiles à conserver. Le groupe s'interroge sur les possibilités de classer des surfaces de peuplements supplémentaires et de transformer d'anciennes plantations comparatives en verger à graines. Par ailleurs, un verger à graines doit être installé d'ici quelques années.

Pour les autres espèces résineuses (pins maritime, taeda et laricio, sapins, épicéas commun et de Sitka...), le groupe n'a pas identifié de risque majeur de pénurie. Les pépiniéristes regrettent cependant la faible disponibilité chronique de la variété de pin sylvestre Taborz (issue du verger à graine Tabórz-Haute-Serre-VG).

Parmi les essences feuillues, des chênes à l'eucalyptus

Les chênes sessile et pédonculé ont des fructifications irrégulières selon les années et les régions, ce qui est d'autant plus problématique que les glands appartenant à la catégorie des semences récalcitrantes, se conservent mal. Le groupe considère qu'il subsistera des risques de pénurie certaines années ; il faut maintenir la politique actuelle de classements de peuplements et recommander aux reboiseurs de mieux intégrer la disponibilité effective de plants dans leur programmation. Aussi, l'idée germe de constituer des vergers à graines...

Le chêne pubescent connaît un engouement récent. Son utilisation progresse. La difficulté réside dans la recherche de peuplements suffisamment purs et de qualité satisfaisante ; en effet, la commercialisation de lots de graines d'hybride naturels sessile-pubescent n'est pour le moment pas autorisée par la réglementation nationale.

2. Graines issues de variétés hybrides de première génération.
3. Hybride de deuxième génération.

Le chêne rouge d'Amérique ne paraît pas poser de problème d'approvisionnement ; il présente des fructifications abondantes et fréquentes (tous les deux ans). Une demande est cependant portée par les pépiniéristes et marchands grainiers pour qu'on augmente le portefeuille de peuplements classés pour certaines régions de provenance.

Pour les eucalyptus, plusieurs membres du groupe de travail pressentent une possible augmentation de la demande pour les futurs reboisements. Des risques de pénurie pourraient donc apparaître sachant qu'un besoin de diversification est aussi à prendre en compte puisque seulement trois clones sont actuellement admis au registre national des « matériels de base ».

Conclusions

Il ressort de l'analyse du groupe que des tensions pourraient apparaître dans la fourniture de graines et plants, pour les espèces résineuses, sur douglas, mélèze d'Europe, mélèze hybride et cèdre de l'Atlas et, pour les espèces feuillues, sur chêne sessile, chêne pédonculé, chêne pubescent et eucalyptus. L'analyse est plus délicate pour les pins noirs, le pin sylvestre et le châtaignier, l'appréciation de l'évolution de la demande étant plus incertaine et parfois dépendante de l'évolution du contexte phytosanitaire.

Ce travail d'analyse, appelé à se poursuivre au cours des réunions à venir, débouche sur des recommandations à l'intention du ministère de l'Agriculture (soutien à la politique de vergers à graines, efforts particuliers de classement de peuplements porte-graines) et des professionnels de la filière (gestion des stocks de graines, amélioration des rendements graines-plants et de la qualité des reboisements, meilleure programmation des reboisements et contractualisation entre acteurs de la filière). ■

Les auteurs

Christian GINISTY, Cécile JOYEAU,
Monique GUIBERT et Gwenaél PHILIPPE
INRAE, UR EFNO,
45290 Nogent-sur-Vernisson, France.

- ✉ christian.ginisty@inrae.fr
- ✉ cecile.joyeau@inrae.fr
- ✉ monique.guibert@inrae.fr
- ✉ gwenael.philippe@inrae.fr

EN SAVOIR PLUS...

Alim'Agri, site internet du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation :

- 📄 <https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers>
- 📄 <https://agriculture.gouv.fr/fournisseurs-especes-reglementees-provenances-et-materiels-de-base-forestiers>
- 📄 <https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-dutilisation-des-provenances-et-varietes-forestieres>

Adapter la gestion pour répondre au défi climatique : l'exemple de la forêt méditerranéenne

La forêt méditerranéenne est particulièrement vulnérable au changement climatique et aux perturbations qui y sont associées comme les sécheresses et les incendies.

La gestion est un moyen efficace d'adapter la forêt à ces changements en renforçant en particulier sa résilience. Dans cet article, trois pistes de gestion sont évoquées : la régénération naturelle qui nécessite des interventions car elle est souvent difficile à obtenir, le rôle de l'éclaircie qui permet une sélection des individus et une amélioration du bilan hydrique des peuplements et enfin, le rôle du mélange dont les effets sont nombreux sur la biodiversité, la croissance, la vulnérabilité aux pathogènes ou encore la résilience après feu.



La forêt méditerranéenne constitue un poste avancé de la forêt française au regard des changements climatiques à venir. En effet, la région méditerranéenne à l'échelle globale se réchauffe 20 % plus vite que les autres régions. Les modèles prédisent qu'en cas de poursuite de la trajectoire actuelle en termes d'émission de gaz à effet de serre, celle-ci se réchauffera en 2100 de + 4 à + 6 °C par rapport à la période industrielle, avec une diminution des précipitations que l'on estime à 4 % par degré de réchauffement (Guiot, 2018). Le dérèglement climatique impactera donc lourdement les quatre millions d'hectares de forêt méditerranéenne française. Elle sera confrontée en particulier à des épisodes de canicules et de sécheresses intenses conduisant à des dépérissements, des migrations d'espèces, et accentuant le régime de feu avec des incendies plus fréquents et de plus grande intensité. La gestion forestière se doit donc d'anticiper les conséquences de telles perturbations afin de limiter leurs impacts. Dans le même temps, cette forêt doit répondre à une demande sociétale diverse et parfois contradictoire : fournir des produits ligneux et en particulier de la biomasse pour accompagner le développement de chaufferies à bois ou de centrales à biomasse, préserver le paysage dans une zone à forts enjeux touristiques et protéger une biodiversité élevée. Dans cet article, nous présentons succinctement quelques pistes principales de

gestion qui peuvent permettre d'adapter la forêt méditerranéenne aux changements climatiques annoncés et de renforcer sa capacité de résilience. Nous évoquerons la question de la régénération naturelle, du rôle de l'éclaircie et enfin celle du mélange.

Renouveler les peuplements les plus vieux

La régénération est une phase clé dans la vie du peuplement et un moyen d'adaptation aux changements environnementaux. La régénération naturelle permet un brassage génétique et les semis ainsi obtenus sont ensuite soumis à la pression de la sélection environnementale. Ce processus permet donc de sélectionner les individus les plus adaptés pour faire face aux nouvelles contraintes climatiques. Cependant, en région méditerranéenne, ce processus est délicat. Une régénération réussie nécessite en effet la conjonction de facteurs favorables : pluie de graines suffisamment abondante, réceptivité du sol, absence de forte sécheresse pour limiter la mortalité, une concurrence par la végétation et une prédation modérées. Ces conditions sont rarement réunies de telle sorte que pour de nombreux peuplements, la régénération naturelle ne s'opère pas ou très difficilement, même après une coupe de régénération. Nous l'illustrons à travers deux exemples représentatifs : la forêt de pin d'Alep et les taillis de chênes méditerranéens.

Le pin d'Alep, dont les forêts s'étendent sur environ trois cent mille hectares, est une essence spécifique de la région méditerranéenne. Cet arbre est très adapté à la sécheresse grâce à une régulation de sa transpiration efficace et il est très plastique pour les conditions édaphiques. Il tolère en effet les sols peu épais et peut se développer sur terrain calcaire ou acide. Il possède la capacité de se régénérer après un feu grâce à une banque de cônes fermés dans le houppier (cônes sérotineux¹) qui s'ouvrent sous l'effet de la chaleur permettant de libérer les graines. Cependant, en l'absence de feu, les peuplements vieillissent, les semis de pin n'apparaissent pas et seuls les chênes méditerranéens s'installent à un rythme très variable. Ce déficit d'auto-régénération se rencontre aussi fréquemment pour d'autres pins comme le pin sylvestre ou le pin pignon. Des expérimentations ont été conduites dans divers sites de Provence pour favoriser l'obtention d'une régénération naturelle dans les pinèdes matures à pin d'Alep (Prévosto *et al.*, 2012). Elles ont montré que la seule coupe de régénération (abaissement de la surface terrière entre 9 et 12 m²/ha) ne permet pas d'obtenir une densité de semis suffisante. En effet, même si la pluie de graines est abondante, les conditions de réceptivité du sol et de compétition par la végétation de sous-bois sont limitantes, notamment en raison de la présence de graminées ou d'une forte strate arbustive (photo 1). Des travaux de broyage de la végétation puis de crochitage du sol permettent de lever ces barrières à l'installation de la régénération. Le brûlage dirigé, s'il est suffisamment intense, est aussi une solution très adaptée bien que sa mise en œuvre soit plus contraignante (photo 2). Ces résultats illustrent que la seule dynamique naturelle n'est parfois pas suffisante si l'on veut piloter un système forestier vers le stade qui est désiré, ici conserver la présence du pin. La gestion forestière se doit alors d'introduire une perturbation d'une intensité suffisante pour favoriser la régénération naturelle.

Un autre exemple est le cas des taillis de chênes méditerranéens, chêne vert (*Quercus ilex*) et chêne pubescent (*Quercus pubescens*) qui couvrent au total huit cent mille hectares environ dans la zone méditerranéenne française. Ces taillis sont souvent peu productifs : ainsi, pour le chêne pubescent, la majorité des peuplements atteignent moins de huit mètres de haut à trente ans. L'exploitation de ces taillis qui était autrefois régulière a décliné fortement après la Seconde Guerre en raison d'une baisse drastique des besoins en bois de chauffage. Plus récemment, cette demande s'est accrue, mais les réticences sont fortes pour pratiquer à nouveau des coupes de taillis pour diverses raisons : paysagères, faible acceptabilité de la coupe, crainte de l'épuisement des souches. On a donc laissé vieillir les taillis et les forestiers se heurtent actuellement à leur régénération. Diverses expérimentations (Ladier *et al.*, 2014) ont montré que lorsque la coupe de taillis est réintroduite, on observe une mortalité des souches accrues dans les peuplements âgés (de l'ordre de 25 % pour le chêne pubescent) et un nombre de rejets par souche qui diminue. La coupe sur les taillis âgés perd donc beaucoup de son efficacité de renouvellement du peuplement. Un grand nombre de taillis ont été transformés en futaie pour éviter la coupe rase : des brins sont sélectionnés dans le taillis et sont conservés tandis que les autres sont éliminés. On forme

alors une futaie sur souche qui vieillit et qui ne peut être régénérée que par voie sexuée (graines) et non plus végétative (rejets). Les obstacles à la régénération de ces peuplements sont encore plus importants que ceux présentés pour le pin d'Alep (photo 3). La production de glands est variable dans le temps, surtout pour le chêne pubescent avec des productions fortes tous les quatre à cinq

1 Semis de pin d'Alep : l'obtention d'une régénération est une étape difficile à réaliser, ici en raison d'une forte compétition par des graminées.



© C. Ripert (INRAE)

2 Réalisation d'un brûlage dirigé destiné à faciliter la régénération naturelle.



© C. Ripert (INRAE)

1. Cônes enduits d'une cire, qui ne s'ouvrent qu'après une chaleur intense comme celle d'un feu.

ans. De plus, la prédation sur les glands est intense. Par exemple, dans une expérimentation en Espagne, Gomez *et al.* (2008) ont suivi le devenir de plusieurs milliers de glands de chêne vert soumis à la prédation par les petits rongeurs (mulots). Ils notent que 66 % des glands sont consommés immédiatement sur place et 26 % sont transportés, puis consommés plus tard. Au final, au bout d'une année, seuls 1,3 % des glands ont survécu. La prédation par les sangliers dont les populations sont en expansion considérable peut être également très forte.

④ Taillis de chêne éclairci : la régénération est très faible ou absente.



⑤ L'architecture en « microcépée » d'un semis de chêne pubescent (hauteur : 20 cm, âge : 19 ans) témoigne d'une croissance très difficile.



Même lorsque ces limitations sont franchies et que les plantules émergent, leur croissance est difficile (photo ④) et leur survie est aléatoire. Ainsi, dans des expérimentations conduites sur le chêne pubescent (Bourdenet *et al.*, 1996 ; Prévosto *et al.*, 2013), les éclaircies pratiquées dans les vieux taillis ou dans les futaies sur souche afin de provoquer la régénération ont montré une installation initiale de semis. Cependant, au bout de quelques années, les semis n'ont pas survécu et les raisons de cette mortalité restent à élucider. Des difficultés similaires de régénération ont été notées pour le chêne vert (Ducrey, 1996). En attendant d'inventer des trajectoires qui permettent d'obtenir une régénération naturelle, il semble important de maintenir des coupes de taillis régulières qui restent le seul moyen efficace pour rajeunir les peuplements.

Modifier la structure : rôle de l'éclaircie

L'éclaircie joue un rôle fondamental dans l'adaptation des peuplements au changement climatique en modifiant leurs structures (photo ⑤). L'éclaircie permet un double effet de sélection et sur les ressources. L'effet de sélection est lié au fait que les arbres les plus vigoureux sont préservés, c'est-à-dire ceux qui sont susceptibles de présenter la plus forte croissance dans les années futures. Il permet également de doser le mélange dans les peuplements plurispécifiques. L'effet sur les ressources vient de la diminution de la compétition entre les arbres. Celle-ci entraîne une augmentation de la disponibilité en lumière et de la ressource en eau permettant de limiter les impacts de la sécheresse. Dans une méta-analyse, Sohn *et al.* (2016) ont montré des effets bénéfiques nets de l'éclaircie sur la croissance des peuplements lors de sécheresses. Les auteurs notent cependant une différence entre les feuillus et les conifères. Pour les premiers, la croissance radiale est certes réduite dans les peuplements éclaircis lors des épisodes secs, mais beaucoup moins que dans les témoins. Pour les seconds, la diminution de la croissance est plus prononcée et l'écart avec la croissance des témoins plus faible. En revanche, le retour à une croissance normale est plus rapide pour les conifères. Les feuillus présentent donc plus une réponse de résistance et les conifères une réponse de résilience. Ces différences sont liées aux stratégies différentes mises en œuvre par ces deux types de végétaux. Par exemple, un pin va très vite limiter sa transpiration (fermeture des stomates) en cas de sécheresse, évitant ainsi efficacement une cavitation dans ses tissus conducteurs de sève (embolie). Ce mécanisme lui permet de reprendre une croissance normale rapidement avec le retour de la pluie. Il le fait cependant au détriment de la croissance car les échanges gazeux nécessaires à la photosynthèse sont alors limités. De façon contrastée, un chêne maintiendra un niveau de transpiration plus élevé lors d'une sécheresse (et donc une croissance moins diminuée) en utilisant son système racinaire profond. Cependant les risques d'embolie sont accrus lorsque la sécheresse s'intensifie.

L'éclaircie modifie le bilan hydrique du peuplement, ce qui explique en partie son effet bénéfique sur la croissance des peuplements. En effet, l'interception des pluies par le couvert forestier est diminuée ainsi que la transpi-

ration. Par exemple, l'interception s'élève en moyenne à 15% pour les chênaies décidues, 28% pour le chêne vert (sempervirent) (Llorens et Domingo, 2007), mais peut atteindre 40% pour des peuplements de pin d'Alep fermés (Molina et del Campo, 2012) ! La question qui se pose est la suivante : faut-il ouvrir fortement les couverts par des éclaircies intenses ? La mise en lumière brutale des houppiers modifie largement le microclimat et il a été montré que les arbres restants transpirent proportionnellement plus dans ces conditions. De plus, l'ouverture du couvert favorise largement le développement de la strate basse arbustive qui peut être très abondante en

région méditerranéenne. Cette strate atténue les effets bénéfiques sur le bilan hydrique en interceptant une partie supplémentaire des pluies et par sa transpiration (Prévosto *et al.*, 2018). Elle augmente également très fortement la vulnérabilité à l'incendie. En effet, dans un contexte de risque feu élevé, on cherchera plutôt à maintenir des couverts arborés relativement hauts et fermés afin de limiter le développement de la masse combustible en sous-bois et à accentuer la discontinuité verticale du combustible entre le sous-bois et le houppier des arbres.

Mélanger les peuplements

Le mélange des peuplements est souvent préconisé pour une gestion durable et pour augmenter la résilience des peuplements. Qu'en est-il vraiment ? Les études réalisées tendent à montrer que les essences présentent une croissance plus forte lorsqu'elles sont en mélange qu'en peuplements purs. C'est notamment le cas pour les mélanges pin-chêne comme par exemple les mélanges pin d'Alep, pin sylvestre et chêne vert (Vila *et al.*, 2007) ou pin sylvestre et chêne tauzin (del Rio et Sterba, 2009). Différents mécanismes peuvent expliquer ce résultat : la réduction de la compétition aérienne au niveau des houppiers (le chêne peut supporter un certain ombrage), une utilisation des ressources souterraines à différentes profondeurs, une nutrition favorisée aussi en raison d'une litière de chêne se décomposant plus facilement que celle du pin. Les forêts mélangées sont également moins vulnérables aux attaques de ravageurs. Ainsi, Jactel et Brockerhoff (2007), en analysant cent-dix-neuf études concernant des forêts pures ou en mélange, ont montré que les dégâts par les insectes spécialisés étaient moindres dans les peuplements mélangés. Par exemple, en Corse, la cochenille du Pin maritime est plus abondante dans les peuplements purs que dans les peuplements en mélange avec le Pin laricio. En effet, dans les peuplements mélangés, le ravageur spécialisé voit son accès à son essence cible limité par les autres essences qui agissent comme une barrière. Le décalage phénologique entre essences est aussi moins favorable au cycle biologique du ravageur et ses prédateurs naturels sont susceptibles d'être plus nombreux. En revanche, pour ce qui concerne l'effet du mélange sur la résistance à la sécheresse, les études sont encore peu nombreuses et contradictoires. Par exemple, Bonal *et al.* (2017), comparant des peuplements purs ou mélangés de chêne sessile et pin sylvestre dans le centre de la France ne notent pas d'effet du mélange. En revanche, Grossiord *et al.* (2015) notent un effet bénéfique du mélange pour des peuplements mixtes feuillus/résineux en Espagne. Il faut cependant noter que si les travaux ne trouvent pas nécessairement d'effets positifs, ils ne pointent pas non plus d'effets négatifs, et le mélange présente des avantages pour beaucoup de services écosystémiques (par exemple, la biodiversité).

Une question centrale en région méditerranéenne est celle de la vulnérabilité au feu et de la résilience. La vulnérabilité au feu est plus liée à la question de la structure qu'à celle de la composition. En analysant la susceptibilité au feu de plusieurs types de peuplements, Silva *et al.* (2009) montrent que les résineux forment à la fois les peuplements les plus vulnérables lorsqu'il s'agit du

© Effet de l'éclaircie sur un peuplement de pin d'Alep : a) peuplement fermé avant éclaircie ; b) peuplement un an après l'éclaircie ; c) peuplement huit ans après l'éclaircie, on peut noter le fort développement d'une strate basse.



▶ pin maritime ou le pin d'Alep (photo ⑥), mais aussi les moins vulnérables pour le pin pignon, les feuillus étant classés entre ces deux extrêmes. La structure a un poids considérable. Un peuplement pur fermé avec une strate basse peu développée et une hauteur de houppier élevée aura plus de chance qu'un feu ne se propage pas en cime et détruit le peuplement. En revanche, un peuplement mélangé pluristratifié sera beaucoup plus vulnérable. Qu'en est-il de la résilience : les peuplements mélangés le sont-ils plus que les peuplements monospécifiques ? En zone méditerranéenne, certaines espèces qui ont co-évolué avec le feu sont très résilientes. Les peuplements purs de pin d'Alep peuvent ainsi se régénérer après feu sous réserve que l'intervalle entre deux feux ne soit pas trop rapproché pour permettre la reconstitution de la banque de cônes dans le houppier (photo ⑦). Les chênes méditerranéens peuvent se régénérer facilement également grâce à leur capacité à rejeter des souches (photo ⑧). Les peuplements purs sont donc résilients pour de telles espèces. Cependant, l'intérêt du mélange prend tout son intérêt lorsqu'il associe une espèce non résiliente au feu (par exemple, le pin noir ou le pin sylvestre) avec une espèce résiliente (comme un chêne méditerranéen). En cas d'incendie, cette dernière, en se régénérant, permettra d'éviter une dynamique régressive vers des stades non

forestiers. Les peuplements mélangés offrent aussi une capacité d'accueil de la biodiversité supérieure bien que cela ne soit pas vérifié pour tous les taxons.

Conclusions

Leur faible productivité, le morcellement foncier, le manque de structuration de la filière bois expliquent entre autres que les forêts méditerranéennes soient peu ou pas gérées. Cependant, la question du changement climatique fait apparaître la gestion comme un outil indispensable d'adaptation des systèmes forestiers aux modifications environnementales brutales. Cela nécessite pour le forestier un retour aux fondamentaux. Tout d'abord l'étude de la station, qui permet de sélectionner l'essence appropriée à partir des catalogues de station ou en utilisant les outils numériques disponibles. Ensuite, le recours à l'éclaircie pour limiter la compétition entre les arbres, mais aussi pour doser et favoriser le mélange. La coupe est également un moyen pour faciliter l'installation d'une régénération dans les peuplements matures. Celle-ci étant souvent difficile à obtenir en milieu méditerranéen, des travaux complémentaires du sol et de la végétation sont souvent nécessaires. La forêt méditerranéenne a souvent une vocation multifonctionnelle plus affirmée que la forêt tempérée. Cependant, face à des risques incendie et sécheresse de plus en plus élevés, des compromis de gestion sont à définir. Par exemple, le mélange des essences est susceptible d'accroître la biodiversité et la résilience des peuplements, mais dans le même temps, il peut aggraver leur vulnérabilité à l'incendie. Une réflexion collective est donc nécessaire pour définir quels sont les enjeux de la forêt méditerranéenne et quelle vision nous partageons sur le devenir de cette forêt. ■

⑥ Peuplement de pin d'Alep après incendie.



© J.-M. Lopez (INRAE)

⑦ Apparition d'une régénération de pin d'Alep après feu.



© C. Tailleux (INRAE)

⑧ Rejet d'un chêne vert après feu.



© R. Schiano (INRAE)

EN SAVOIR PLUS...

- 📖 **BONAL, D., PAU, M., TOIGO, M., GRANIER, A., PEROT, T.**, 2017, Mixing oak and pine trees does not improve the functional response to severe drought in central French forests, *Ann. For. Sci.*, 74:72.
- 📖 **BOURDENET, P.**, 1996, Étude de la régénération naturelle du chêne pubescent à partir d'un taillis simple, *Forêt Méditerranéenne*, vol. 17, n° 3, p. 169-174.
- 📖 **DEL RIO, M., STERBA, H.**, 2009, Comparing volume growth in pure and mixed stands of *Pinus sylvestris* and *Quercus pyrenaica*, *Ann. For. Sci.*, n° 66, p. 502.
- 📖 **DUCREY, M.**, 1996, Recherches et expérimentations sur la conduite sylvicole des peuplements de chêne vert, *Forêt Méditerranéenne*, vol. 17, n° 3, p. 151-168.
- 📖 **GÓMEZ, J.-M., PUERTA-PIÑERO, C., SCHUPP, W.E.**, 2008, Effectiveness of rodents as local seed dispersers of Holm oaks, *Oecologia*, n° 155, p. 529-537.
- 📖 **GROSSIORD, C., FORNER, A., GESSLER, A., GRANIER, A., POLLASTRINIM, VALLADARES, F., BONAL, D.**, 2015, Influence of species interactions on transpiration of Mediterranean tree species during a summer drought, *Eur. J. For. Res.*, 134 (2), p. 365-376.
- 📖 **GUIOT, J.**, 2018, La forêt méditerranéenne a un rôle important à jouer si le réchauffement planétaire reste conforme aux accords de Paris, *For. Méd.*, 39 (4), p. 296.
- 📖 **LADIER, J., TESSIER, C., AMANDIER, L., PRÉVOSTO, B.**, 2014, Gestion du chêne pubescent dans le Sud-Est de la France. Quelle alternative au taillis simple ?, *RDV Techniques*, n° 44, p. 9-16.
- 📖 **LI, J., ROMANE, F.**, 1997, Effects of germination inhibition on the dynamics of *Quercus ilex* stands, *J. Veg. Sci.*, n° 8, p. 287-294.
- 📖 **LLORENS, P., DOMINGO, F.**, 2007, Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe, *J. Hydrol.*, n° 335, p. 37-54.
- 📖 **MOLINA, A.J., DEL CAMPO, A.D.**, 2012, The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations, *For. Ecol. Manage.*, n° 269, p. 206-213.
- 📖 **PRÉVOSTO, B., RIPERT, C., OSTERMEYER, R.**, 2013, Éclaircir est-il suffisant pour favoriser la régénération du chêne blanc ? Retour sur un dispositif expérimental installé il y a 27 ans en forêt domaniale de Lure (Alpes-de-Haute-Provence), *Forêt Méditerranéenne*, tome XXXIV, n° 1, p. 3-12.
- 📖 **PRÉVOSTO, B., AUDOUARD, M., HELLUY, M., LOPEZ, J.-M., BALANDIER, P.**, 2018, Le bilan hydrique en forêt méditerranéenne : influence des strates et de leur gestion. Application au pin d'Alep, *Forêt Méditerranéenne*, tome XXXIX, n° 1, p. 1-10.
- 📖 **SILVA, J.S., MOREIRA, F., VAZ, P., CATRY, F., GODINHO-FERREIRA, P.**, 2009, Assessing the relative proneness of different forest types in Portugal, *Plant Biosystems*, n° 143, p. 597-608.
- 📖 **SOHN, J.A., SAHA, S., BAUHUS, J.**, 2016, Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis, *For. Ecol. Manage.*, n° 380, p. 261-273.
- 📖 **VILA, M., VAYREDA, J., GRACIA, C., IBANEZ, J.J.**, 2003. Does tree diversity increase wood production in pine forests?, *Oecologia*, n° 135, p. 299-303.

L'auteur

Bernard PRÉVOSTO

Aix Marseille Univ, INRAE, UR RECOVER,
13182 Aix-en-Provence, France.

✉ bernard.prevosto@inrae.fr

Prévenir les risques d'incendies de forêt dans un contexte de changement global

Les changements climatiques associés aux évolutions des paysages, au développement des villes et des infrastructures conduisent à une augmentation de la zone exposée aux incendies de forêt, à un allongement de la durée de la saison favorable aux feux, et à une augmentation des grands incendies ou des incendies au comportement extrême. Les stratégies sylvicoles et territoriales sont essentielles pour atténuer les effets de ces évolutions sur le long terme et d'une manière durable, et rendre les forêts plus résilientes et plus résistantes au feu. Cet article présente et discute différentes stratégies d'atténuation des incendies de forêt et de leurs impacts qui ont été développées au cours des dernières décennies en Europe.



Chaque année, les incendies de forêt détruisent environ dix millions d'hectares de forêts dans le monde, soit l'équivalent de ce que causent la surexploitation forestière et le défrichement de la forêt primaire pour l'agriculture et l'élevage. Ce chiffre tend à augmenter dans

beaucoup de régions du globe, et notamment autour du bassin méditerranéen. En France, les forêts méditerranéennes sont touchées par les feux chaque année et les forêts de montagne ou tempérées sont aussi concernées plus localement.

L'incendie de forêt est à juste titre perçu par le grand public comme un risque, tant les dommages potentiels sur les biens et les personnes peuvent être importants. Mais le feu de végétation est aussi une perturbation naturelle millénaire à laquelle les écosystèmes, notamment forestiers se sont progressivement adaptés. De sorte que le passage du feu est parfois nécessaire au maintien de certains écosystèmes. Beaucoup de forêts méditerranéennes sont ainsi constituées d'essences adaptées au feu comme le chêne-liège ou le chêne vert, ou la plupart des pins méditerranéens. En montagne, les forêts de mélèze sont aussi soumises à des feux réguliers depuis des millénaires. Toutes ces espèces ont développé des stratégies d'adaptation pour résister au passage du feu ou se régénérer après feu : écorce épaisse, cônes sérotineux s'ouvrant pour libérer les graines après le passage du feu, croissance en

hauteur rapide pour mettre le houppier hors de portée des flammes. Chaque type d'écosystème forestier est ainsi adapté à un régime d'incendie (encadré 1) particulier caractérisé par des feux d'une certaine fréquence, intensité, saisonnalité ou taille.

Mais ces régimes d'incendies ont été profondément modifiés par l'Homme et par les changements climatiques au cours des dernières décennies. Les changements de régimes de perturbations peuvent avoir des effets négatifs sur le maintien de certaines forêts sur le long terme.

La problématique croissante des incendies de forêt en Europe

Les incendies de forêt sont présents dès lors que trois conditions minimales sont réunies : la présence d'une végétation combustible suffisante, des conditions météorologiques favorables, et la présence d'une source d'ignition qui cause le départ du feu. Les incendies sont particulièrement importants et fréquents quand ces trois facteurs sont au maximum. C'est le cas en région méditerranéenne en été : la végétation est abondante et sèche, la sécheresse et la chaleur (voire le vent) augmentent la probabilité d'ignition et rendent le feu très dynamique et intense, et les départs de feu sont très fréquents du fait de la densité humaine et touristique (95 % des feux sont allumés par l'Homme en Europe du Sud).

Les incendies de forêt étaient un processus naturel généré par la foudre au cours des millénaires précédents, mais ils sont devenus un phénomène contrôlé par l'action humaine et par l'environnement. En effet, si l'Homme génère actuellement la plupart des départs de feux, il est aussi très actif pour les prévenir et les combattre : les politiques forestières prévoient la prévention des incendies de forêt, et les stratégies de sécurité civile et de lutte visent à limiter l'extension des feux établis. Le régime d'incendies actuel évolue rapidement du fait des changements climatiques en cours, des évolutions des paysages (déprise agricole, fermeture des paysages, embroussaillage, extension des forêts), et du développement urbain et des infrastructures. Toutes ces évolutions conduisent depuis quelques décennies à une augmentation de la zone exposée aux incendies, à un allongement de la durée de la saison favorable aux feux, et à une augmentation des grands incendies ou des incendies au comportement extrême (Chatry *et al.*, 2010). Par ailleurs, les changements climatiques ont aussi un effet direct sur les forêts en augmentant les dépérissements et la mortalité des espèces les plus sensibles, ce qui accroît en retour leur vulnérabilité au feu (encadré ②).

Les conséquences humaines, économiques et environnementales de cette augmentation de l'aléa et de l'exposition des forêts aux incendies sont multiples : dommages aux biens et aux personnes, impacts directs sur les forêts, et conséquences à long terme sur le climat et les émissions de CO₂, de composés organiques volatils et de particules.

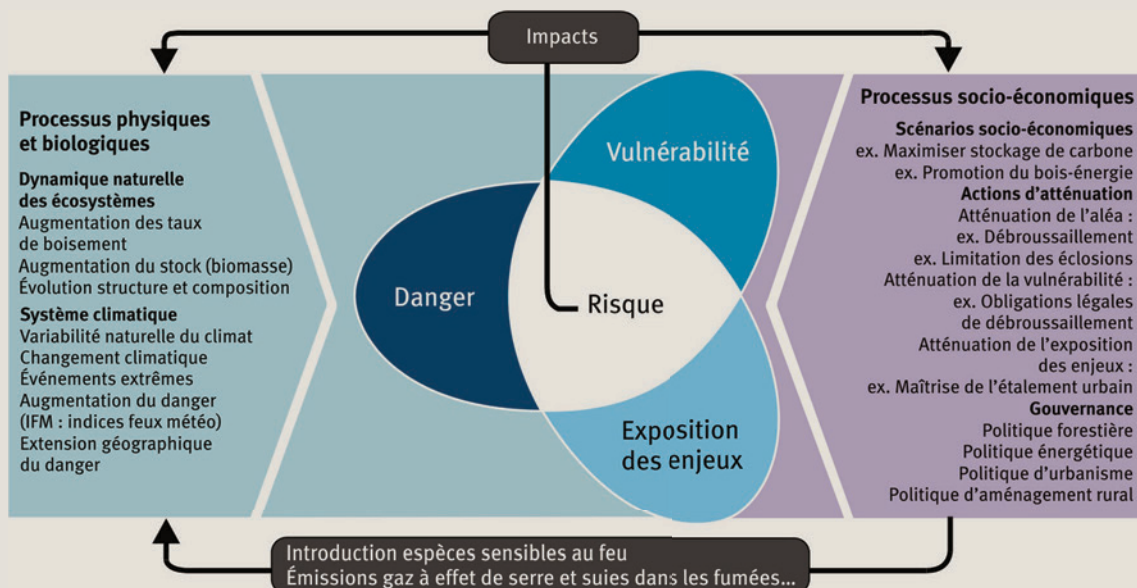
① DU RÉGIME DE PERTURBATIONS À LA PYRODIVERSITÉ

La notion de régime de perturbations s'applique à une échelle de temps et d'espace suffisamment vaste pour permettre d'analyser les interactions entre les perturbations et les écosystèmes forestiers. Les régimes de perturbations sont caractérisés par différentes modalités : distribution dans l'espace, distribution dans le temps, magnitude (intensité/durée). Pour les incendies de forêts, le régime est généralement défini par la fréquence, l'intensité, la saisonnalité et la taille des incendies. On peut définir plusieurs régimes de feux selon les types de végétation.

La plupart des écosystèmes des climats méditerranéens sont des zones arbustives ou arborées adaptées aux régimes de feux de cime, comme par exemple en région méditerranéenne française. Mais certains écosystèmes forestiers de Californie ou d'Australie occidentale sont adaptés aux régimes de feux fréquents d'intensité faible à modérée. Il s'agit là de grandes tendances de comportement du feu, mais en tant que perturbation, une occurrence d'incendie génère une large gamme d'impacts sur un écosystème donné selon différents facteurs agissant sur le comportement et la puissance locale du feu (végétation combustible, aérologie, topographie...). Cette variabilité locale combinée à la diversité des régimes de feux, permet d'aborder la notion de pyrodiversité qui mesure l'impact du feu sur la biodiversité. La pyrodiversité contribue à l'hétérogénéité locale et paysagère et de ce fait entretient une certaine diversité biologique.

② LE RISQUE INCENDIE DE FORÊT

Le risque incendies de forêt est classiquement défini comme l'interaction entre les trois composantes du risque : aléa, enjeux et vulnérabilité (schéma adapté du GIEC, 2014). L'aléa est défini principalement par la fréquence et l'intensité du feu. Les enjeux exposés à l'aléa sont les biens (écosystèmes forestiers, infrastructures, habitats...) et les personnes menacées, et ils s'évaluent en terme de pertes potentielles liées aux dommages et en fonction de leurs valeurs propres. La vulnérabilité est caractérisée par la propension du système à subir des dommages (inflammabilité et combustibilité de la végétation, taux de mortalité et difficulté de régénération après le passage du feu, précarité de certaines populations, fragilité au feu des infrastructures). Pour définir l'aléa, on distingue un aspect plutôt intrinsèque lié au territoire considéré (topographie, végétation, occupation du sol, historique...), qualifié souvent d'aléa structurel, et un aspect plutôt conjoncturel, le danger, composante quotidienne résultant de la météorologie qui conduit à la disponibilité au feu du combustible, caractérisée à un instant donné par sa teneur en eau.



Les limites des stratégies classiques de gestion des incendies de forêt

Beaucoup de pays européens ont été confrontés à une augmentation du nombre des incendies, de leur taille ou de leur intensité au cours des dernières décennies. Ils ont souvent opté pour une stratégie renforcée de suppression des feux. C'est le cas de la France qui a répondu aux multiples incendies des années 1990, dont certains sont dans le top 10 des plus grands incendies connus en métropole. La stratégie française a consisté à renforcer la prévention, la prévision journalière du risque, mais surtout de la lutte. Cette nouvelle stratégie a été efficace à court terme car elle a réduit d'un quart le nombre de feux, et de moitié la surface brûlée par rapport aux années 1970-1990. Pourtant, cette stratégie n'est pas durable sur le long terme : les changements climatiques et des paysages conduisent déjà à une recrudescence des grands incendies. Le dernier en date, l'incendie de Rognac-Vitrolles en 2016, a été un avertissement sans frais, ne faisant heureusement pas de victimes alors que plus de deux mille constructions étaient sous le feu et des centaines d'automobilistes piégés sur les axes routiers. Nos proches voisins n'ont pas eu cette chance : au Portugal, l'incendie de Pedrógão Grande en juin 2017, et la tempête de feux du 15 octobre la même année ont fait en deux jours plus de cent victimes et des dommages d'une ampleur jamais connue en Europe. D'autres mégafeux récents meurtriers ont touché l'Espagne ou la Grèce (Molina *et al.*, 2019). Ces très grands incendies intenses impactent fortement les enjeux humains et augmentent les coûts de la lutte. Dans ce contexte, la suppression massive des feux n'est pas la bonne solution sur le long terme, car elle permet paradoxalement l'augmenta-

tion de la biomasse dans le paysage (Sande Silva *et al.*, 2010). Tout système de protection a ses limites. Comme le démontrent les grands incendies récents dans les pays européens, l'amélioration des dispositifs est insuffisante pour empêcher les feux les plus intenses ou les plus dynamiques (Costa *et al.*, 2011).

Un rapide tour d'horizon des stratégies sylvicoles d'atténuation

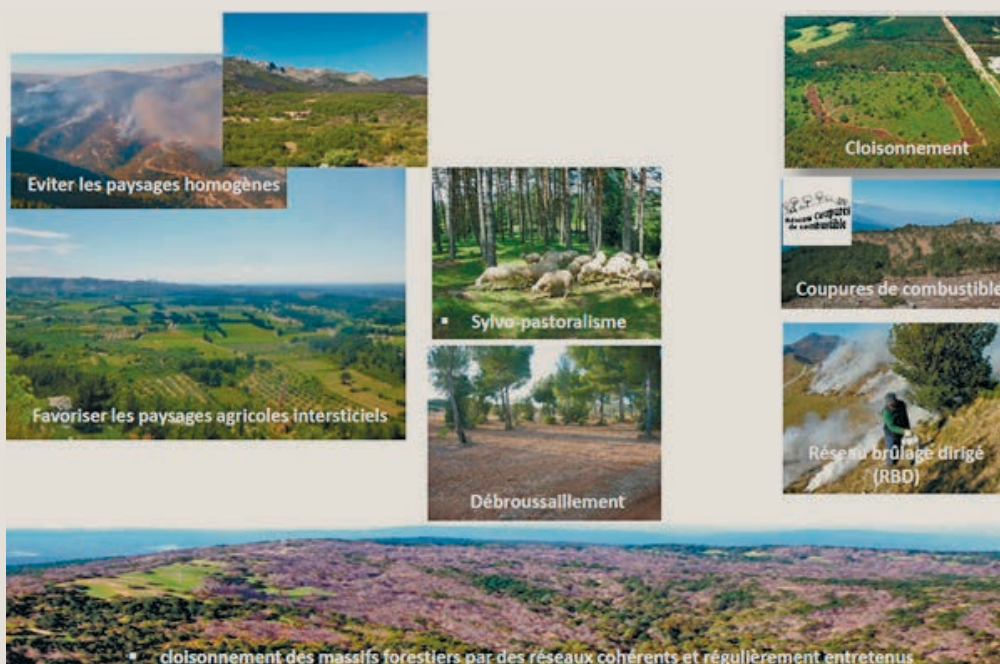
Les stratégies territoriales pour limiter le développement de grands feux

Face à ces constats de développement de grands incendies, un consensus se dégage de plus en plus clairement en Europe : pour limiter durablement le nombre de grands incendies et leurs impacts, il faut s'attaquer aux causes structurelles profondes et adapter les forêts et les territoires. Les stratégies sylvicoles et territoriales d'atténuation du risque incendie jouent un rôle crucial pour résoudre la problématique des grands feux incontrôlables.

Plusieurs concepts ou approches ont été développées et parfois testées en forêt : leur objectif est de réduire les grands incendies dévastateurs et indésirables tout en acceptant et en maintenant le régime de feux adapté et nécessaire à la forêt. Une traduction pratique de ces objectifs est de promouvoir des paysages moins inflammables (ou plus résistants aux feux), et surtout de minimiser les impacts sur les hommes et les forêts. Cette approche consiste à gérer l'espace rural et les zones de contact entre urbanisation et forêt de manière raisonnée à l'échelle du paysage :

- en fragmentant le paysage par des productions agricoles moins combustibles pour limiter la propagation du feu ;

1 Favoriser des paysages résistants à la propagation du feu.



- en débroussaillant localement pour créer des coupures de combustible qui, avec l'appui des pompiers, vont ralentir le feu et diminuer son intensité : dans les zones de départ de feux, en lisières de forêts, dans des positions topographiques favorables (crêtes), mais aussi dans les zones habitées exposées aux feux ;
- en développant le brûlage dirigé, une solution très efficace pour contrôler la végétation en sous-bois ou dans les formations non arborées ;
- en augmentant les prélèvements en forêt : produits bois et biomasse ;
- en sélectionnant des espèces moins inflammables et/ou résilientes après feu ;
- en favorisant les mélanges d'espèces, qui augmentent la probabilité de récupération post-feu.

Les paysages ruraux et forestiers entretenus selon ces modalités peuvent ainsi devenir des paysages gérés intelligemment pour éviter la propagation des feux (*fire-smart landscapes*) (figure 1).

La gestion forestière est un moyen très efficace de réduire les incendies de forêt et leurs impacts : la forêt landaise en est un bon exemple, avec des incendies rares et de faible surface. La gestion sylvicole y est permanente, et les revenus tirés de l'exploitation du bois permettent de mettre en place des voies d'accès, des tours de guet, des citernes et des débroussailllements qui rendent la lutte beaucoup plus efficace. La topographie plane favorise aussi la détection des feux et l'accès des pompiers.

La forêt méditerranéenne ne peut pas prétendre à la même gestion car elle est beaucoup plus morcelée, moins rentable économiquement, et la topographie et l'accès sont souvent complexes. Mais elle a aussi des atouts car elle produit des biens marchands et non marchands (tourisme, biodiversité, paysage) qui peuvent être valorisés. Le développement d'une forte bio-économie circulaire fondée sur des solutions basées sur la nature, des énergies renouvelables et la mobilisation et la valorisation des matériaux bois dans des circuits courts est une solution intéressante à long terme (Martinez de Arano *et al.*, 2018).

L'intégration de la prévention des incendies de forêt dans les programmes et les politiques forestières nationales et dans les stratégies d'adaptation aux changements climatiques doit se décliner de manière très volontariste au-delà des injonctions sans suite (EFIMED, 2011).

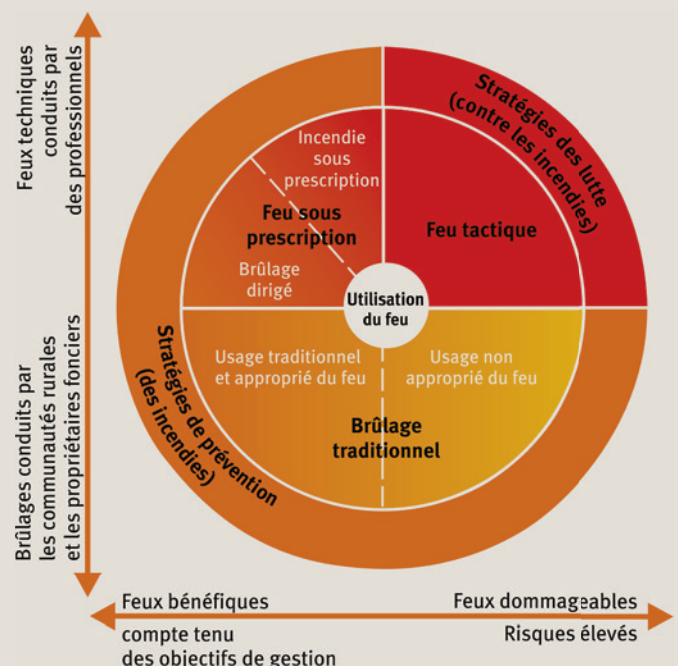
Une gestion paysagère et territoriale du risque incendie implique que non seulement la forêt, mais aussi l'agriculture et les autres activités anthropiques susceptibles de générer des départs de feux soient aussi gérées afin de limiter les éclosions en conditions favorables aux grands incendies. Le maintien de zones agricoles bien entretenues et dépourvues de combustible fin et sec en période à risque (par exemple, arboriculture ou viticulture pas ou peu enherbée) a montré son efficacité comme coupures de combustible dans le paysage, lors des retours d'expérience après feu. Les zones pastorales bien entretenues sont aussi très efficaces. Un autre sujet crucial est la question des zones d'interfaces habitat-forêts : il s'agit des zones dans lesquelles l'habitat (isolé ou groupé) tend à s'installer et à augmenter à proximité des forêts et des milieux naturels (garrigues, maquis, zones embroussaillées). Ces zones sont préoccupantes à deux

titres : elles génèrent beaucoup de départs de feux, et elles sont exposées aux incendies. Leur protection par les pompiers est souvent très difficile et accapare trop de moyens désorganisant complètement les secours. Ces interfaces augmentent depuis des décennies, notamment dans la région méditerranéenne très attractive. Un pré-requis est la mise en application de l'obligation légale de débroussaillage qui impose au propriétaire de tout bâtiment situé dans la zone exposée au risque d'incendie de forêts de maintenir un espacement entre les arbres, et de réduire les broussailles et bois morts dans un rayon de cinquante mètres autour de sa construction (Pimont *et al.*, 2019). Plus globalement, la maîtrise de l'urbanisation est un élément-clé dans ces paysages mixtes de forêts et d'habitations. Rendre ces paysages fire-smart ne concerne donc pas seulement la politique forestière, mais nécessite une vision et une coordination intersectorielle avec des incidences notamment en matière d'urbanisme (limitation de l'étalement urbain, favoriser l'utilisation du bois dans la construction), d'aménagement rural (maintien du tissu agricole) et de politique énergétique (développement du bois énergie).

Vers une gestion intégrée du risque incendies de forêt

Un concept clé développé au cours des dernières années est celui de la gestion intégrée du risque (Sande Silva *et al.*, 2010 ; EFIMED, 2010 ; EFIMED, 2011). La gestion intégrée du feu est une approche qui reconnaît et accepte les deux facettes du feu : le feu est un agent potentiellement très destructeur, mais par ailleurs, le feu a été de tout temps utilisé par l'Homme. Ces deux facettes du feu, constituent le paradoxe du feu. La gestion intégrée du feu vise à limiter les feux dommageables et à promouvoir les feux utiles. Dans ce concept, l'utilisation du feu est centrale (figure 2).

2 Le concept de gestion intégrée du risque incendie de forêt (d'après Sande Silva *et al.*, 2010)



Il s'agit de réguler les usages non acceptables du feu et développer les usages les plus appropriés. Parmi les usages appropriés du feu, il y a d'abord l'utilisation traditionnelle du feu par les populations rurales, bien entendu quand il s'agit de bonnes pratiques, conformes à la réglementation. Le besoin de ces populations à utiliser le feu pour la gestion des terres et des ressources doit être reconnu et accompagné. Les politiques européennes doivent passer d'une attitude systématiquement répressive vis-à-vis des usages du feu dans l'espace rural et pastoral, à une attitude positive, parce que ces feux contribuent, quand ils sont bien faits, à la gestion du combustible.

Le brûlage dirigé, l'utilisation du feu par des équipes spécialisées pour le débroussaillage, pour réduire le risque d'incendie, est aussi à développer ; il convient de rajouter cet outil à la palette des techniques de débroussaillage du forestier.

Enfin, l'utilisation du feu dans la lutte contre les incendies de forêt, le feu tactique, appelé aussi contre feu, est en plein développement en France et en Europe (Ribet *et al.*, 2018). C'est le seul outil de lutte dont l'efficacité augmente avec la puissance de l'incendie combattu.

Conclusion

La gestion intégrée du feu débouche sur un rééquilibrage des politiques nationale et européenne de gestion des feux avec plus de moyens alloués à la prévention des incendies et à la gestion du combustible. La gestion forestière, la prévention des incendies et les pratiques d'atténuation et de préparation des populations devraient être renforcées par rapport aux pratiques basées essentiellement sur la lutte.

Une gestion forestière adaptative – dans un cadre territorial élargi – est la meilleure garantie de réduire les incendies de forêts et leurs impacts sur le long terme face aux changements climatiques et de paysages. Il s'agit d'une gestion forestière qui se fonde sur la diversité des options de gestion, en testant à grande échelle des modalités innovantes de sylviculture préventive, directement intégrées dans des dispositifs en forêts publique et privée. La gestion adaptative, c'est aussi organiser des retours d'expériences, mettre en place une traçabilité pour surveiller les effets des actions testées afin d'informer les futures décisions de gestion, en y intégrant les nouvelles connaissances, dans un processus d'ajustement continu. Cette démarche doit s'appliquer aussi à la réduction de la biomasse combustible et la gestion paysagère du risque pour éviter le développement de grands incendies dynamiques dans le futur.

Cette approche appelle à un nouveau partenariat recherche-gestion, qui se met en place progressivement à l'échelle française, notamment dans le cadre de l'infrastructure de recherche In Sylva. Les besoins d'expérimentations et de recherches restent en effet importants pour identifier pour chaque décision les avantages et les risques à court et à long terme au plan écologique, économique, et sociétal et déboucher sur les meilleurs compromis pour la gestion intégrée des risques. ■

Les auteurs

Thomas CURT

Aix Marseille Univ, INRAE, UR RECOVER,
13182 Aix-en-Provence, France.

✉ thomas.curt@inrae.fr

Éric RIGOLOT

INRAE, URFM, UR629,
84914 Avignon Cedex, France.

✉ eric.rigolot@inrae.fr

EN SAVOIR PLUS...

- 📖 **CHATRY, C., LE GALLOU, J., LE QUENTREC, M., LAFITTE, J., LAURENS, D., CREUCHET, D., GRELU, J., 2010,** *Rapport de la mission interministérielle « Changements climatiques et extension des zones sensibles aux feux de forêts » (National Report on Climate Change and the Extension of Fire Prone Areas in France)*, Rapport Min. Alimentation Agriculture Pêche, n° 1796, 89 p. + annexes.
- 📖 **COSTA, P., CASTELNOU, M., LARRANAGA, A., MIRALLES, M., KRAUS, D., 2011,** *Prevention of large wildfires using the fire types concept*, Fire Paradox Report, EFI, 34 p.
- 📖 **EFIMED, 2010,** *Plan Stratégique de Recherche sur les Forêts méditerranéennes*, FAO - European Forest Institute Mediterranean Regional Office (EFIMED), 32 p.
- 📖 **EFIMED, F., 2011,** *Wildfire Prevention in the Mediterranean. A key issue to reduce the increasing risks of Mediterranean wildfires in the context of Climate Changes. A Position Paper*, in : *Second Mediterranean Forest Week*, Avignon (France) April 2011.
- 📖 **FUME, 2014,** *FUME Project: Forest fires under climate, social and economic changes in Europe, the Mediterranean and other fire-affected areas of the world. Lessons learned and outlook*, European Community 7th Framework Programme, José M. MORENO (Ed.), 32 p.
- 📖 **MARTINEZ DE ARANO, I. (Coordinateur), MUYS, B., TOPI, C., PETTENELLA, D., FELICIANO, D., RIGOLOT, E., LEFÈVRE, F., PROKOFIEVA, I., LABIDI, J., CARNUS, J.-M., SECCO, L., FRAGIACOMO, M., FOLLESA, M., MASIERO, M., LLANO-PONTE, R., 2018,** *A forest-based circular bioeconomy for southern Europe: visions, opportunities and challenges*, Jensuu, FIN : European Forest Institute, 124 p.
- 📖 **MOLINA-TERRÉN, D.M., XANTHOPOULOS, G., DIAKAKIS, M., RIBEIRO, L., CABALLERO, D., DELOGU, G.M., VIEGAS, D.X., SILVA, C.A., CARDIL, A., 2019,** *Analysis of forest fire fatalities in Southern Europe: Spain, Portugal, Greece and Sardinia (Italy)*, *International Journal of Wildland Fire*, January 2019, disponible sur : <https://doi.org/10.1071/WF18004>
- 📖 **PIMONT, F., DUCHÉ, Y., DUPUY, J.-L., RIGOLOT, E., REYMOND, B., SAVAZZI, R., LINN, R., 2019,** *Évaluation par un modèle de simulation d'incendie de l'intérêt du débroussaillage pour la sécurité des constructions et des personnels de secours, Forêt Méditerranéenne*, sous presse.
- 📖 **RIBET, N., BONTEMS, V., ESCUDIÉ, D., RIGOLOT, E., 2018,** *Feu : ami ou ennemi*, Ed. Dunod, 224 p.
- 📖 **SANDE SILVA, J., REGO, F., FERNANDES, P., RIGOLOT, E., (Eds.), 2010,** *Towards Integrated Fire Management – Outcomes of the European Project Fire Paradox*, European Forest Institute Research Report 23 (European Forest Institute), 228 p.



Le sylvo-pastoralisme, un des outils de prévention des risques d'incendie de forêt.



La forêt, moteur de l'atténuation du changement climatique.

LA FORÊT, MOTEUR DE L'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le plan climat présenté le 6 juillet 2017 par le gouvernement français s'est fixé un objectif de neutralité carbone en 2050. La gestion forestière peut contribuer activement à atteindre cet objectif en mettant en œuvre deux grands types de stratégies : les stratégies de séquestration du carbone dans la création de biomasse ligneuse et les stratégies de remplacement de matériaux à forte empreinte « carbone » par le bois-énergie et le bois-matériau. Pour s'assurer de la gestion durable des ressources et de la pérennité des approvisionnements, l'inventaire forestier national assure un suivi en continu des ressources et des prélèvements effectués en forêt.

En montagne, la technologie Lidar aéroportée est mobilisée pour cartographier à haute résolution les ressources et leur accessibilité. Des scientifiques français s'interrogent cependant sur la réelle capacité des forêts européennes à séquestrer le carbone à l'horizon 2050, dans un contexte d'intensification de l'exploitation du bois.

- 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 Henryi CUNY
- 64 La télédétection aéroportée pour la gestion des territoires forestiers de montagne**
Jean-Matthieu 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

L'inventaire forestier national pour un suivi permanent, multi-échelles et multi-thématiques de la forêt française et des ressources bois mobilisables

Depuis 1908, la surface forestière française a augmenté de 5,1 millions d'hectares, passant de 10,3 à 15,4 millions d'hectares. Le stock de bois sur pied a quant à lui progressé de 950 millions de mètres cubes au cours des trente-cinq dernières années. En parallèle, les attentes des acteurs économiques et de la société ont évolué pour répondre à de nouveaux défis : atténuation de l'effet de serre dans le contexte du changement climatique, émergence de la bioéconomie, biodiversité, etc. Pour accompagner ces évolutions sociétales, l'inventaire forestier national s'adapte en continu en s'appuyant de plus en plus sur l'expertise des partenaires de la filière.

P

our développer les filières forêt-bois, les pouvoirs publics et les acteurs économiques doivent s'appuyer sur des chiffres de volumes de bois disponibles qui soient objectifs et documentés. Ils doivent également disposer d'un système régulier de suivi

des coupes et pratiques en forêt, afin de s'assurer de la gestion durable des ressources et de la pérennité des approvisionnements.

À cet effet, la France a mis en place son enquête statistique permanente d'inventaire forestier national (IFN) dès 1958¹. Elle se place ainsi parmi les premiers pays s'étant dotés d'un inventaire forestier statistique, juste derrière les scandinaves, les États-Unis et l'Autriche. En 1961, les pères fondateurs de l'IFN français justifiaient l'importance pour l'État de disposer d'un inventaire en indiquant que « la connaissance des volumes annuellement utilisés par l'industrie en provenance de nos forêts est, certes essentielle, mais elle ne constitue pas une donnée suffisante pour fonder une politique forestière qui exigerait non pas seulement la constatation, a posteriori, de la coupe réalisée, mais encore, et surtout, la prévision des volumes de bois qui pourront être disponibles dans l'avenir, ce qui implique une exacte information sur le matériel sur pied et sur son accroissement. ». Ils mentionnaient également tout l'intérêt économique d'une bonne connaissance des disponibilités futures, en pointant « les

graves inconvénients résultant de l'absence de données précises qui se manifestent de façon évidente chaque fois que le projet d'installation d'une nouvelle usine pose le problème des possibilités d'approvisionnement. ». C'est à ce titre que trois départements constituant le premier bassin industriel du bois français ont été inventoriés en priorité : la Gironde (1961), les Landes (1961) et le Lot-et-Garonne (1962)

Depuis lors, l'IFN et ses équipes n'ont cessé d'évoluer et de s'étoffer pour répondre aux besoins croissants d'informations forestières exprimés par les acteurs de la filière et de la société au cours du temps : bois d'œuvre et industrie dans le contexte de la reconstruction d'après-guerre, biomasse énergie suite aux chocs pétroliers, carbone et atténuation de l'effet de serre dans le contexte du changement climatique, molécules dans le cadre de la bioéconomie et de l'émergence de la chimie verte, biodiversité, etc. Les attentes des acteurs concernent non seulement la nature des informations fournies, mais aussi leur niveau de détails et leur résolution spatiale. En effet, le rôle des territoires en matière de politiques forêt-bois et de climat s'accroît rapidement : par exemple, le Programme national de la forêt et du bois établi en 2017 fixe les orientations de la politique forestière pour une

1. L'inventaire forestier national (IFN) est une des missions de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) depuis 2012.

❶ En un siècle, la forêt métropolitaine a progressé de plus de cinq millions d'hectares.



© Ekaterina Pokrovsky (Adobe Stock)

période de dix ans, mais il doit se décliner en région par treize Programmes régionaux de la forêt et du bois. En parallèle, les collectivités (établissement public de coopération intercommunale, ou EPCI, de plus de vingt mille habitants) doivent se doter d'un Plan climat-air-énergie territorial. Aussi, les décideurs en région ont besoin de données de pilotage qui soient à la fois adaptées aux caractéristiques locales de leurs territoires (prise en compte de l'exploitabilité des massifs et de la qualité des bois, par exemple), mais aussi cohérentes à l'échelle nationale.

Cet article illustre quelques-unes des caractéristiques fondamentales des ressources forestières nationales à l'aune des résultats pluridécennaux de l'IFN et des études récentes. Il pointe également les enjeux pour faire de l'IFN un système de suivi permanent des écosystèmes forestiers via la production d'informations multi-échelles et multi-thématiques répondant aux besoins grandissants de la société.

Depuis 1908, la surface forestière française a augmenté de 5,1 millions d'hectares (soit l'équivalent des forêts suisses et autrichiennes cumulées), passant de 10,3 à 15,4 millions d'hectares (figure ❶). Cette hausse est la conséquence principale des déprises agricoles et rurales qui ont affaibli considérablement les pressions foncières qu'exerçaient le pastoralisme et l'agriculture vivrière.

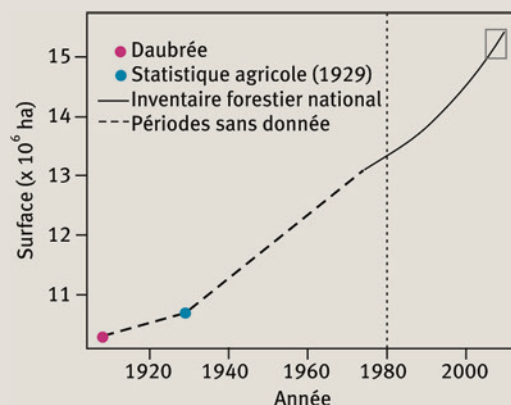
Le stock de bois sur pied a progressé de 950 millions de m³ au cours des trente-cinq dernières années, ce qui représente le stock total des forêts espagnoles contemporaines. La dynamique de transition forestière en cours dans notre pays se singularise par une augmentation du stock de bois sur pied deux fois plus rapide que la surface (+ 0,65 % par an entre 1990 et 2015 pour les surfaces contre + 1,3 % par an pour le stock, qui atteint actuellement 2 700 millions de m³). Ceci est la conséquence d'une capitalisation sur les terrains boisés au cours du siècle écoulé, avec un niveau de gestion souvent peu

La forêt française est dans une dynamique d'expansion dont les caractéristiques et l'intensité varient suivant les territoires

L'enquête quinquennale sur l'état des ressources forestières mondiales mise en place par la FAO² au lendemain de la Seconde Guerre mondiale révèle que le continent européen connaît une dynamique d'expansion forestière tout à fait singulière à l'échelle mondiale, et qu'en Europe la France présente un des taux d'accroissement les plus élevés.

En mobilisant conjointement la première statistique moderne que constitue l'enquête Daubrée de 1908 et les séries chronologiques de données de l'IFN, une thèse récente, menée à l'IGN (Denardou *et al.*, 2018) a permis de documenter les caractéristiques de cette dynamique et de décrire les facteurs sous-jacents.

❶ Évolution de la surface boisée depuis 1908 (source Denardou *et al.*, 2018).



2. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

► intensif. Le stock est ainsi passé de 130 à 168 m³ par hectare en moyenne à l'échelle nationale. Comme le nombre de tiges à l'hectare est resté stable au cours de la période, cette hausse s'explique surtout par le grossissement progressif des arbres³. Du fait de cette évolution démographique, et hors événements conjoncturels tels que tempêtes, dépérissements massifs ou épidémies, le stock de bois sur pied va donc continuer à croître au cours des prochaines années. Quant à la hausse des surfaces forestières, elle reste pleinement d'actualité. Une analyse plus fine de cette évolution relève que l'intensité de ces hausses varie selon les catégories de propriété, les territoires, les essences et les diamètres des arbres. L'expansion en surface et en stock est majoritairement issue de la propriété privée. Sa part en surface dans l'ensemble de la forêt française passe de 73 à 75 % et le stock moyen à l'hectare se rapproche progressivement de celui des forêts publiques, malgré un écart qui reste important entre les forêts privées sans PSG⁴ (150 m³/ha en moyenne) et les forêts domaniales (187 m³/ha en moyenne). L'augmentation de surface forestière est particulièrement prononcée dans la région méditerranéenne

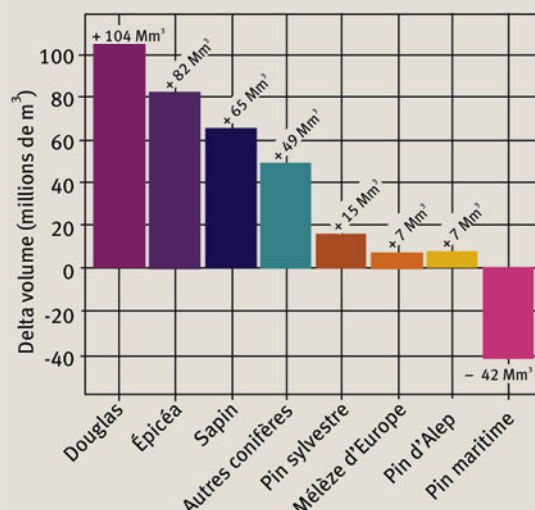
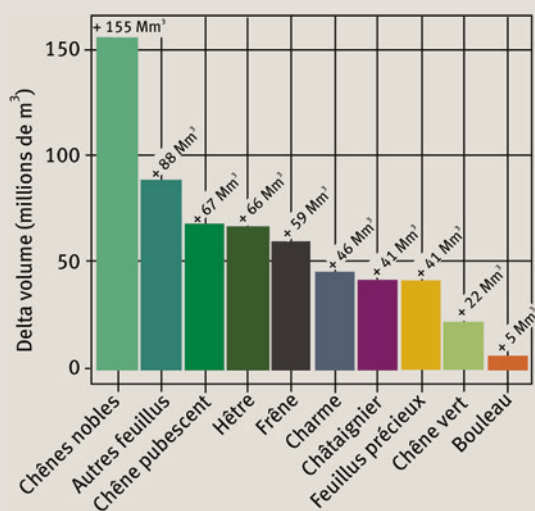
(où le taux d'évolution atteint + 60 % en trente ans soit + 700 000 ha) et dans les zones de moyennes montagnes (+ 22 %, soit + 900 000 ha) où les terrains privés dominent. La hausse est plus modérée dans les régions de plaines et collines (+ 13 %, soit + 1 200 000 ha), où le foncier disponible est proportionnellement moins important.

Au cours des trente dernières années, le stock de feuillus a progressé de 600 millions de m³ (soit le stock total de la Lettonie) et le stock de résineux a crû de 250 millions de m³. La hausse des feuillus étant plus rapide, la part des résineux dans le stock national baisse de trois points et atteint 36 % en 2015. À l'exception du pin maritime frappé successivement par les tempêtes de 1999 et 2009, toutes les essences voient leur stock augmenter (figure 2). Cependant, le stock des grandes essences de la sylviculture française augmente moins vite que celui des essences accompagnatrices et pionnières, si bien que ces dernières occupent une place de plus en plus marquée dans la ressource nationale. Ainsi, les dix premières essences françaises représentent séparément davantage que le stock total du Danemark (115 millions de m³), pour cumuler 73 % du stock total français. Ces chiffres illustrent à la fois le poids important de quelques types d'essences, mais aussi la grande diversité de la forêt française.

La hausse du stock sur pied touche inégalement les classes de diamètre, avec une capitalisation qui concerne en priorité les dimensions de moyens et gros bois. C'est le cas surtout chez les résineux où 59 % du stock est déjà constitué de moyens bois et 27 % de gros bois, signes de la maturité des plantations constituées il y a déjà quelques décennies.

L'analyse du fonds historique de l'IFN fait apparaître une forêt française marquée par de puissantes dynamiques d'expansion de sa superficie et de capitalisation de son bois sur pied, qui sont toujours à l'œuvre. Elle apparaît également diversifiée, en lien avec la variabilité des contextes pédo-climatiques, des modes de gestion et des passés forestiers. Cela implique de bien prendre en compte les contextes physiques et socio-économiques locaux lors de l'établissement des diagnostics sur les ressources exploitables.

2 Évolution du stock par essence depuis 1985.



Des données et expertises pour accompagner l'État dans ses programmations stratégiques

En 2016, l'IGN a réalisé en partenariat avec FCBA⁵ une étude sur les volumes mobilisables (les disponibilités) en bois d'œuvre, bois industrie et bois énergie des forêts françaises à l'horizon 2035. En s'inscrivant dans une longue tradition de prospectives basées sur les données de l'IFN, l'étude a mobilisé les informations les plus récentes pour confirmer la possibilité, pour la forêt française en général, de supporter une augmentation significative et durable des prélèvements. Ces résultats alimentent les programmations stratégiques de l'État en faveur du développement de la forêt, du bois,

3. Les moyens bois et les gros bois désignent les arbres dont le diamètre dépasse respectivement 30 et 50 cm.

4. Plan simple de gestion.

5. Institut technologique forêt cellulose bois-construction ameublement.

de l'énergie et de la lutte contre le changement climatique, comme le Programme national forêt bois (PNFB) et la Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB) qui ont retenu l'objectif de récolter 12 millions de m³ supplémentaires en 2026, ou leurs déclinaisons régionales (exemple des Programmes régionaux forêt bois, qui déclinent le PNFB à l'échelle régionale).

La définition des deux scénarios de développement sylvicole adoptés dans l'étude pour simuler l'évolution des pratiques de gestion jusqu'en 2035, s'est appuyée sur la mesure directe des prélèvements réalisée depuis 2010 sur le dispositif de l'IFN. Cette information permettait pour la première fois en France de connaître avec précision les prélèvements réalisés dans les forêts publiques et privées, en quantité et en qualité (essences, diamètres, etc.), et suivant les conditions d'exploitation, et ainsi de définir des scénarios statistiques robustes car directement basés sur des mesures de terrain.

Le scénario de « sylviculture constante » consiste à maintenir les taux de coupe actuels. Du fait du grossissement progressif de la ressource, le volume mobilisable augmente par rapport à la récolte actuelle allant jusqu'à 7,4 millions de m³ en 2035, hors menus bois (petites branches dans le houppier des arbres). Cette disponibilité supplémentaire est essentiellement constituée de feuillus et se situe majoritairement dans les forêts privées sans PSG.

Un second scénario (« dynamique progressif ») a simulé une gestion plus dynamique afin d'accroître progressivement les volumes récoltés en réponse à la demande des filières. L'hypothèse est celle d'une intensification de la gestion calquée sur les pratiques actuelles les plus dynamiques déterminées à partir des observations de l'IFN. Cela correspond à la mise en gestion de nouvelles forêts privées de petite superficie, au rattrapage de peuplements en retard d'éclaircie, ou à un certain ajustement des durées des révolutions pour se rapprocher des recommandations actuelles. Pour un meilleur réalisme des scénarios, les possibilités de dynamisation de la récolte à l'horizon 2035 ont tenu compte des zones à enjeux pour la protection de l'environnement et des paysages, la fréquentation du public, etc., et de la présence d'un PSG en forêt privée. Ces informations ont été rendues possibles par le croisement de l'échantillon de l'IFN avec des couches SIG⁶ thématiques. Sous ces hypothèses, les disponibilités supplémentaires pourraient atteindre 20 millions de m³ en 2035 (hors menus bois). Cette évolution de la récolte serait compatible avec une gestion durable de la ressource puisque le taux de prélèvement (rapport entre le volume prélevé et la croissance des arbres) atteindrait 70 % en 2035. Quel que soit le scénario mis en œuvre, la forêt française resterait un puits net de carbone – c'est-à-dire que le gain de volume résultant de la croissance des arbres reste supérieur aux pertes dues à la mortalité et aux prélèvements – avec cependant un effet moins important dans le scénario dynamique que dans le scénario tendanciel du fait des prélèvements de bois plus importants. En retour, les volumes utilisés dans les filières matériau et énergie contribueraient à l'atténuation de l'effet de serre via le stockage de carbone dans les produits mais surtout les effets de substitution.

L'étude a également montré que les niveaux de récolte projetés pourraient satisfaire une augmentation de la demande de bois d'œuvre feuillus, et surtout de bois industrie et énergie. *A contrario*, la disponibilité en bois d'œuvre résineux resterait en dessous de la demande envisagée, quel que soit le scénario. L'atteinte de ces objectifs de récolte supplémentaire repose sur la levée d'un certain nombre de verrous tant à l'amont qu'à l'aval de la filière, et notamment pour mobiliser les feuillus. Ce type d'études permet de documenter de manière factuelle chacun des enjeux à la lumière des connaissances disponibles, ce qui apporte des informations capitales pour éclairer le choix des décideurs.

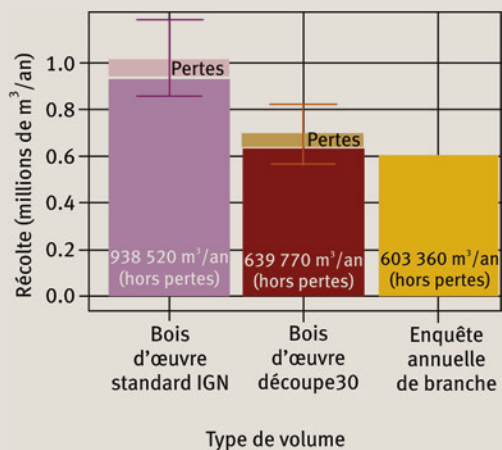
Enrichir les résultats de l'inventaire forestier national pour mieux répondre aux besoins de la filière

L'IGN développe depuis plusieurs années des partenariats pour produire des résultats adaptés aux attentes métier des différentes parties prenantes publiques et privées de la filière. Tout en restant des informations de portée stratégique, les résultats dérivés de l'IFN, et notamment les chiffres relatifs aux disponibilités supplémentaires en bois, doivent être fournis avec une meilleure résolution spatiale et tenir compte des conditions d'exploitabilité et des caractéristiques locales des bois desquelles découlent des familles d'usages. Pour cela, des données et expertises thématiques sont progressivement intégrées dans le système d'informations de l'IGN, comme les spécifications des scieurs français en matière de bois d'œuvre, la carte des forêts privées dotées d'un PSG ou celle des zones à enjeux pour la protection de l'environnement, les réseaux de desserte, etc.

En 2018, la fourniture par le Centre national de la propriété forestière (CNPF) de la couche des forêts privées dotées d'un PSG a étoffé, de manière inédite et substantielle, la connaissance des forêts privées françaises, en donnant la possibilité de décrire précisément les ressources des forêts privées, leur exploitabilité, et les prélèvements de bois, en fonction de la présence d'un PSG. Il ressort que les forêts sans PSG présentent des caractéristiques de forêts récentes, c'est-à-dire une prédominance d'essences pionnières et post-pionnières, des diamètres moins élevés, une qualité des bois moindre à diamètres et essences équivalents, et une exploitabilité physique souvent plus difficile puisque 37 % des forêts sans PSG se trouvent en conditions difficiles contre seulement 15 % pour les forêts avec un PSG. Cette analyse a également permis de mettre en lumière un taux de prélèvement moyen équivalent entre forêts privées dotées d'un PSG et forêts publiques, avec toutefois des écarts significatifs entre feuillus (taux plus fort en forêt publique) et résineux (taux plus fort en forêt privée avec PSG). La combinaison des données de l'IFN et de la carte du CNPF a apporté des informations quantitatives essentielles sur les propriétés sans PSG jusque-là mal connues alors même qu'elles représentent plus de la moitié de la forêt française (9 millions d'hectares), et a confirmé l'importance de les distinguer dans toutes les stratégies relatives au développement forestier.

6. Système d'information géographique.

⑤ Réévaluation des prélèvements de bois d'œuvre de chênes en Bourgogne-Franche-Comté.



Des informations précises et réalistes sur la ressource et les disponibilités futures en bois d'œuvre (BO) des essences françaises sont essentielles pour les acteurs économiques de la filière et les professionnels afin qu'ils puissent avoir une visibilité sur leur approvisionnement et sur la programmation de leurs investissements. Cependant, il peut exister pour certaines essences des inadéquations entre les chiffres sur la qualité des bois sur pied dérivés de l'IFN, et l'expérience des professionnels qui regardent les usages réels des bois compte tenu des critères du marché. Début 2018, une étude coréalisée par FCBA et l'IGN avec le soutien de la DRAAF⁷ Bourgogne-Franche-Comté et de la FNB⁸ a été conduite afin de mieux répondre aux besoins des professionnels du BO de chêne de cette région. Elle a permis de documenter l'origine précise des écarts et de trouver une solution pour adapter les informations produites en routine par l'IGN aux spécifications fournies par les professionnels (soit le classement en BO des chênes de plus de 40 cm de diamètre à 1,30 m et une découpe fin bout de 30 m). La ressource en BO de chêne a ainsi été révisée à la baisse d'environ 30% par rapport aux estimations précédentes (figure ⑤). Cette réévaluation du volume de BO selon une définition validée avec les professionnels

7. Direction régionale de l'agriculture et de la forêt.

8. Fédération nationale du bois.

donne des résultats cohérents avec d'autres sources de données comme l'enquête annuelle de branche (EAB). Cela montre toute l'importance de la prise en compte du cahier des charges des acteurs de la filière pour la publication de chiffres sur les usages des bois. En parallèle l'IGN élabore un protocole de mesure de la qualité des arbres sur pied, ce qui permettra à terme de publier à la fois des chiffres sur les usages correspondant aux caractéristiques des marchés et sur la qualité intrinsèque des bois dans la ressource.

Enfin, l'IGN développe, au travers d'actions de recherche et d'ingénierie, des méthodes statistiques et cartographiques pour améliorer la précision des résultats d'inventaire et ainsi fournir des informations opérationnelles à l'échelle des territoires, et pour spatialiser les ressources forestières dans les massifs. Ces développements s'appuient sur une valorisation conjointe des points de l'IFN, des modèles numériques d'élévation (MNE) élaborés à partir de photographies aériennes ou de levés Lidar des massifs forestiers, et de données auxiliaires sur les milieux forestiers. Un partenariat a été initié en 2017 avec la Fédération nationale des communes forestières (FNCOFOR) en vue de concevoir et déployer une méthode de connaissance des ressources forêt-bois disponibles dans les collectivités territoriales concernées par un plan climat-air-énergie territorial.

La forêt française évolue progressivement, et avec elle les attentes des acteurs économiques et de la société. La prise de conscience récente des effets du changement climatique et du rôle d'atténuation exercé par les forêts et la filière, ou l'émergence de la bioéconomie, tendent à modifier les paradigmes forestiers et font naître des besoins en connaissances et données nouvelles. Les informations développées depuis plusieurs décennies autour du dispositif de l'IFN s'adaptent en continu pour accompagner ces évolutions sociétales, en associant de plus en plus les partenaires de la filière pour mobiliser leurs données et expertises. ■

Les auteurs

Antoine COLIN et Henri CUNY

IGN, Institut national de l'information géographique et forestière,
Département Ressources forestières
et carbone, 1 rue des Blanches Terres,
54250 Champigneulle, France.

✉ Antoine.Colin@ign.fr

✉ Henri.Cuny@ign.fr

EN SAVOIR PLUS...

■ COLIN, A., THIVOLLE-CAZAT, A., 2016, Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035, Convention ADEME/IGN/COPACEL, disponible sur <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article931>

■ CUNY, H., THIVOLLE-CAZAT, A., COLIN, A., MONCHAUX, P., 2018, Réévaluation de la ressource et de la disponibilité en bois d'œuvre de chêne en Bourgogne-Franche-Comté, Étude réalisée par l'IGN et FCBA, avec le soutien financier de la Fédération nationale du bois et du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, disponible sur : <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article933>

■ DENARDOU, A., HERVÉ, J.-C., DUPOUEY, J.-L., BIR, J., AUDINOT, T., BONTEMPS, J.-D., 2018, L'expansion séculaire des forêts françaises est dominée par l'accroissement du stock sur pied et ne sature pas dans le temps, *Rev. For. Fr.*, LXIX, 4-5-2017, p. 319-339, disponible sur <https://doi.org/10.4267/2042/67864>

■ IGN, 2018, La forêt française, état des lieux et évolutions récentes. Panorama des résultats de l'inventaire forestier, disponible sur : <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique250>



Les données statistiques de l'inventaire forestier, élaborées à partir des nombreuses mesures réalisées sur le terrain, permettent d'évaluer le rôle des forêts dans les émissions et absorptions de gaz à effet de serre.

La télédétection aéroportée pour la gestion des territoires forestiers de montagne

Le Programme national de la forêt et du bois 2016-2026 affiche comme objectif « d'augmenter les prélèvements de bois en France tout en assurant le renouvellement de la forêt ». Les forêts de montagne qui représentent environ un quart de la surface forestière pourraient contribuer de manière significative à cet objectif. Les contraintes d'accès et de topographie rendent cependant difficile la gestion de ces forêts. En s'appuyant sur la technologie Lidar aéroporté, il est désormais possible de cartographier à haute résolution, sur des territoires de la taille d'un parc naturel régional, les caractéristiques forestières (ressource, accessibilité) intéressant les gestionnaires. La généralisation de l'outil pose cependant des questions de coût d'acquisition des données et de droit de leur diffusion auprès des acteurs de la filière.

Les territoires forestiers de montagne

Des forêts aux multiples fonctions

En France métropolitaine, les forêts de montagne représentent un quart de la surface forestière. Dans ces zones d'altitude supérieure à 600 m, le taux de boisement est largement supérieur à la moyenne nationale et les forêts sont à la fois un élément majeur du paysage et une ressource importante pour les habitants de ces territoires. Elles fournissent en effet un grand nombre de services écosystémiques : production de bois, protection contre les aléas naturels, régulation de la ressource en eau potable, espace de loisirs et de biodiversité ; que ce soit aux populations locales ou aux villes et vallées environnantes. Elles contribuent ainsi à l'attractivité des territoires et au maintien d'activités économiques en milieu rural.

Du fait de la topographie et des fortes variations d'altitude, ces forêts sont caractérisées par une forte hétérogénéité spatiale (photo 1) : diversité des essences et des structures. Comme elles sont difficiles d'accès à cause de la pente et d'un réseau de desserte souvent peu dense, les opérations d'inventaire et de sylviculture y sont plus coûteuses et moins fréquentes.

Une ressource sur pied à fort potentiel

Les forêts de montagne sont également caractérisées par un capital sur pied plus important qu'en plaine, avec un volume moyen de bois de 188 m³/ha contre 148 m³/ha, pour les forêts de production. La part de résineux y est également plus élevée qu'à basse altitude. Le volume de bois en forêts de montagne est de 745 millions de m³, ce qui représente 31 % du total en France (Inventaire forestier national).

Le Programme national de la forêt et du bois (PNFB) 2016-2026 affiche comme premier objectif « d'augmenter les prélèvements de bois en France tout en assurant le renouvellement de la forêt », objectif chiffré à la hauteur de 12 millions de mètres cubes de bois mobilisé supplémentaire d'ici 2026.

De par la capitalisation importante, associée à une production annuelle en volume comparable aux forêts de plaine, les forêts de montagne pourraient donc contribuer de manière significative à la réalisation de cet objectif.

Cependant, plusieurs points doivent être améliorés pour permettre la mise en œuvre opérationnelle de cet objectif :

- la connaissance précise des zones présentant un potentiel de récolte à moyen terme ;

❶ Les couleurs automnales mettent en évidence la diversité d'essences dans ce paysage du massif des Bauges. Les fortes pentes et les barres rocheuses rendent les forêts peu accessibles.



© Vincent (Adobe Stock)

- l'optimisation du réseau de desserte et des opérations de mobilisation ;
- la dynamisation de la gestion sylvicole, notamment dans les propriétés privées, qui sont plus morcelées qu'en plaine.

Par ailleurs, cette augmentation de la récolte doit être compatible avec le maintien des autres services écosystémiques fournis par la forêt, et prendre en compte les effets du changement climatique, comme rappelé dans les objectifs du PNFB.

L'apport des nouvelles technologies

Afin de mettre en œuvre des politiques forestières adaptées à l'échelle du territoire, il est donc nécessaire d'avoir des connaissances précises, à la fois quantitativement et spatialement, sur l'état des forêts et sur les services qu'elles procurent.

❶ LE PROJET PROTEST

Protest (PROspective TErritoriale SpaTialisée) est un projet de recherche appliquée financé par l'ADEME (programme GRAINE, convention C1703C0069). Il vise à construire une méthodologie d'analyse territoriale de la biomasse forestière en s'appuyant sur les avancées méthodologiques et scientifiques récentes dans les domaines de la cartographie forestière par télédétection Lidar, de la modélisation technico-économique sous système d'information géographique, de la simulation d'évolution forestière et de la prospective territoriale. Le territoire d'étude est le Parc naturel régional du Massif des Bauges. Le projet associe cinq partenaires pour une durée de trois ans (2018-2020).
<https://protest.inrae.fr/>



Alors qu'il n'est ni techniquement ni économiquement possible d'obtenir de telles données uniquement par des moyens humains sur le terrain, le développement rapide des technologies de télédétection et de traitement des données a fait émerger de nouvelles opportunités pour améliorer les connaissances sur les forêts à l'échelle d'un territoire.

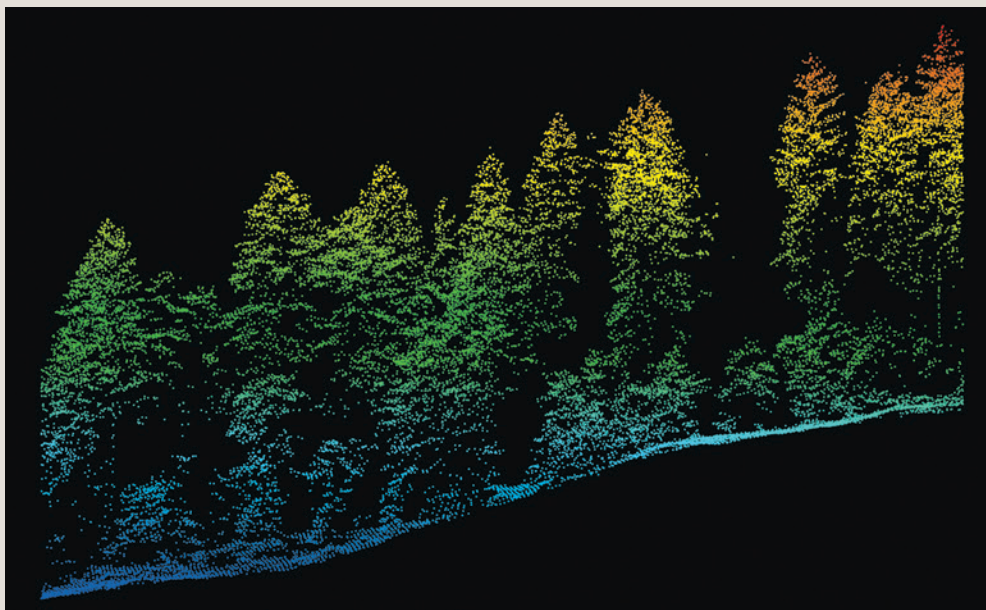
Parmi ces technologies de télédétection, le scanner laser aéroporté, ou Lidar aérien, a connu un essor rapide ces dernières années, initié dans les pays forestiers du nord. En France, des projets pilotes ont démontré l'intérêt de ces techniques depuis une dizaine d'années, tout d'abord sur des surfaces réduites (Munoz *et al.*, 2016), puis à l'échelle de territoires plus importants. Un projet pilote est actuellement en cours sur le territoire du Parc naturel régional (PNR) du Massif des Bauges (encadré ❶).

Le Lidar aéroporté : modéliser les forêts en trois dimensions

Télémétrie laser depuis le ciel

Le Lidar est une technologie de télédétection basée sur l'émission et la réception d'impulsions laser. Au cours de la progression de l'avion, l'appareil scanne latéralement la surface terrestre en envoyant des impulsions à très haute fréquence (plusieurs centaines de milliers par seconde). Pour chaque impulsion le capteur enregistre le temps écoulé entre le moment où il émet une impulsion et celui où il reçoit le signal réfléchi par un objet se trouvant dans la trajectoire de l'impulsion. On en déduit la distance entre l'objet et l'avion, puis, connaissant la trajectoire de l'avion enregistrée par GPS, la position de l'objet dans l'espace.

- ❶ Coupe transversale d'un nuage de points Lidar acquis en zone forestière. Avec une acquisition à haute densité, on distingue les branches des arbres dominants, les arbres de sous-étage ainsi que le sol (image : J.-M. Monnet, INRAE).



Pour modéliser la géométrie 3D de la surface terrestre

Cette technique permet donc de représenter les objets se trouvant à la surface de la Terre sous la forme d'un nuage de points en trois dimensions. Comme les impulsions laser éclairent une surface au sol d'un diamètre de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, il est possible qu'une partie de la lumière laser vienne se réfléchir sur des objets situés à l'intérieur du couvert forestier, voire au sol. Le nuage de points contient donc une information géométrique sur la hauteur du couvert végétal, mais également sur sa structure interne et sur la position du sol (figure ❶).

À partir de ce nuage de points tridimensionnel, sont habituellement calculés des modèles numériques d'élévation (MNE) synthétisant l'information en deux dimensions. La première est le modèle numérique de terrain (MNT), qui décrit l'altitude du sol nu. La seconde est le modèle numérique de surface (MNS), qui décrit l'altitude des éléments les plus hauts de la surface terrestre (haut de la canopée, toits des bâtiments). En soustrayant le MNT au MNS est obtenu le modèle numérique de hauteur (MNH), qui permet de s'affranchir de la topographie et donne directement la hauteur des objets par rapport au sol.

En France, une disponibilité des données encore hétérogène

Il n'existe pas véritablement de politique d'acquisition de données Lidar à l'échelle nationale. La première utilisation de ces données reste le MNT, qui est un élément important de la description du territoire pour les projets d'aménagement. L'IGN¹ s'est doté de capteurs qui ont été utilisés en priorité sur les zones littorales et inondables. Des partenariats sont effectués avec les collectivités territoriales et permettent de couvrir progressivement le territoire français. Les données MNT alimentent

le RGE ALTI^{®2}, et une réflexion est en cours pour mettre également à disposition le nuage de points, qui est le produit de base pour les applications forestières. Pour les projets forestiers, l'acquisition sur mesure ou la mise à disposition de données doit donc être réalisée au cas par cas.

Dans le cas du PNR du Massif des Bauges, qui se situe sur les départements de Savoie et Haute-Savoie, la partie savoyarde était couverte par un vol assuré par l'IGN en partenariat avec la Régie de gestion de données 73-74. Sur la partie haut-savoyarde, une acquisition a été commandée à un prestataire. Sur des territoires étendus, l'absence de données récentes et homogènes peut être problématique pour les analyses forestières.

Du nuage de points à la cartographie des forêts

Modéliser les caractéristiques des forêts à partir du nuage de points en 3D

Le MNH, qui est un produit directement dérivé d'une acquisition Lidar, est déjà très utile pour situer sur une carte les peuplements où les arbres sont les plus grands. Cependant, pour extraire des informations forestières nécessaires à l'inventaire des peuplements et à la planification des opérations de gestion, des étapes de modélisation sont effectuées. Les informations que l'on cherche à cartographier sont notamment :

- le diamètre quadratique moyen : lié à la taille des arbres, il renseigne sur la maturité du peuplement pour la récolte ;

1. Institut national de l'information géographique et forestière.

2. Le RGE ALTI[®] décrit la forme et l'altitude normale de la surface du sol à grande échelle.

- la surface terrière : somme des surfaces des sections des troncs s'ils étaient coupés à 1,3 m de haut, elle renseigne le forestier sur la quantité de bois présent sur une surface ;
- la densité de tiges : nombre d'arbres rapporté à une surface de référence ;
- le pourcentage de feuillus : indique si l'on est en présence d'espèces feuillues ou résineuses.

L'estimation de ces paramètres est basée sur une modélisation statistique qui met en relation :

- la forêt telle qu'elle est mesurée par le forestier, *via* le relevé des paramètres ci-dessus, effectué sur le terrain dans des placettes circulaires (surfaces de forêt de l'ordre de 700 m²) tirées au sort dans le territoire ;
- la forêt telle qu'elle est vue par le capteur Lidar, *via* des descripteurs géométriques du nuage de points en 3D, extraits à l'emplacement exact des placettes de terrain, dont la position est connue par GPS.

Avec un réseau de placettes mesurées sur le terrain

Selon la superficie du territoire et l'hétérogénéité des peuplements forestiers, il est donc nécessaire de relever sur le terrain de l'ordre d'une centaine de placettes qui servent pour la calibration des relations statistiques. Ces placettes, si elles sont échantillonnées de manière appropriée, peuvent également servir à décrire statistiquement les forêts présentes sur le territoire. Sur le territoire du PNR du Massif des Bauges, 400 placettes d'inventaire ont été réparties systématiquement et inventoriées avec pour objectifs :

- de servir à la calibration des modèles Lidar ;
- de constituer l'état initial d'un observatoire permanent des forêts du PNR.

L'inventaire de ces placettes a été précédé d'une phase de concertation et d'information afin de définir le cadre

réglementaire de réalisation des mesures et d'obtenir l'accord des propriétaires dont les parcelles contiennent une placette tirée au sort. Si elles décrivent statistiquement l'ensemble des forêts du massif, les informations récoltées ne permettent pas à elles seules de cartographier comment se répartissent les forêts et leurs caractéristiques.

Pour cartographier les forêts sur l'ensemble du territoire

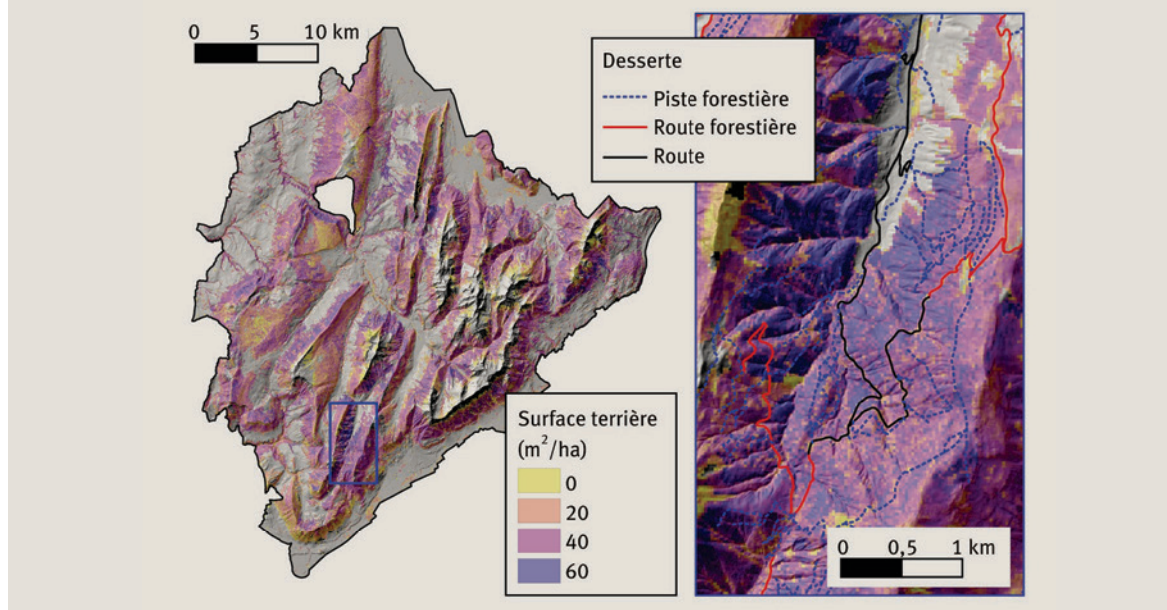
C'est ici qu'intervient la complémentarité entre les relevés de terrain, qui mesurent directement l'information voulue mais sur une partie seulement du territoire (les placettes) et les données Lidar, qui mesurent indirectement cette information *via* le nuage de points en 3D. La relation établie entre les paramètres forestiers et le nuage de points en 3D grâce aux placettes, permet de cartographier les caractéristiques des forêts sur tout le territoire (White *et al.*, 2014). Les cartes obtenues (figure 2) ont une résolution spatiale de l'ordre de 25 m, et une précision similaire à celle obtenue par mesure sur le terrain. Cette description très précise et exhaustive des forêts sur l'ensemble du territoire, est utile à la fois pour définir une politique forestière sur le territoire et pour la planification des opérations de gestion.

Du modèle numérique de terrain à la cartographie de l'accessibilité

Le débardage des bois en montagne

L'accessibilité des peuplements est l'un des points critiques pour la mobilisation de la ressource forestière en montagne. Une fois abattus, les bois doivent être amenés sur des places de dépôts en bordure de routes accessibles aux camions. Pour cela, ils sont le plus souvent traînés par des tracteurs forestiers. Ces engins peuvent circuler en forêt lorsque la pente n'est pas trop importante, sinon

2 Cartographie par modélisation Lidar de la surface terrière sur le Parc naturel régional. L'information est exhaustive sur le territoire avec une résolution de 25 m, ce qui permet d'identifier précisément les zones avec un fort capital sur pied et leur proximité à la desserte (carte : J.-M. Monnet, INRAE).



ils roulent sur des pistes forestières à partir desquelles ils peuvent treuiller les bois se trouvant à proximité. Une alternative largement mise en œuvre dans d'autres pays alpins est l'utilisation du transport par câble, qui consiste en l'installation de téléphériques temporaires pour treuiller les bois de part et d'autre du câble et ensuite les amener au point de dépôt.

L'effet structurant de la desserte

Que ce soit pour le câble ou le tracteur, l'accessibilité des forêts reste structurée par le réseau de routes forestières, dont le coût de construction est important et le plus souvent supporté par des subventions publiques. Le MNT tiré des données Lidar présente un fort intérêt pour évaluer l'accessibilité d'un massif forestier et optimiser la pertinence de nouveaux tracés de routes forestières (Munoz *et al.*, 2013). Le logiciel Sylvaccess développé au centre INRAE³ de Grenoble et en collaboration avec l'ONF⁴ simule les capacités techniques de circulation du tracteur et d'installation du transport par câble, à partir de l'information géographique sur la desserte existante et sur la topographie (MNT) (Dupire *et al.*, 2015). La capacité de la technologie Lidar à modéliser le sol même sous couvert forestier est capitale pour obtenir un rendu précis de la topographie et simuler correctement les possibilités des différents matériels. Le résultat de modélisation de l'accessibilité se présente sous la forme de cartes présentant la surface accessible aux engins et les caractéristiques techniques associées (distance de treuillage et de traînage pour le tracteur, schéma d'implantation pour le transport par câble) (figure 3). L'évaluation globale de l'efficacité du réseau se fait en calculant des indices tels que la surface de forêt ou le volume de bois accessible par linéaire de desserte existante. L'analyse cartographique est d'autant plus riche lorsque l'accessibilité peut être croisée avec les caractéristiques du peuplement

obtenues précédemment. Il est possible alors d'identifier des zones à fort capital nécessitant de nouvelles infrastructures pour la mobilisation, ou des zones à fort capital déjà desservies pour lesquelles d'autres freins à la mobilisation doivent être levés.

Des caractéristiques de la forêt aux services écosystémiques

De nombreux travaux ont été menés pour évaluer différents services écosystémiques à l'échelle d'un peuplement forestier, intégrant quelquefois la question des compromis de gestion à effectuer pour assurer simultanément la fourniture de plusieurs services. À l'échelle d'un territoire de la taille d'un PNR, la question du maintien d'un ensemble de services pose la question des échelles spatiale et temporelle à adopter pour évaluer les compromis. L'information forestière dérivée des données Lidar, exhaustive sur le territoire, offre en outre des perspectives intéressantes pour l'évaluation de certains services écosystémiques.

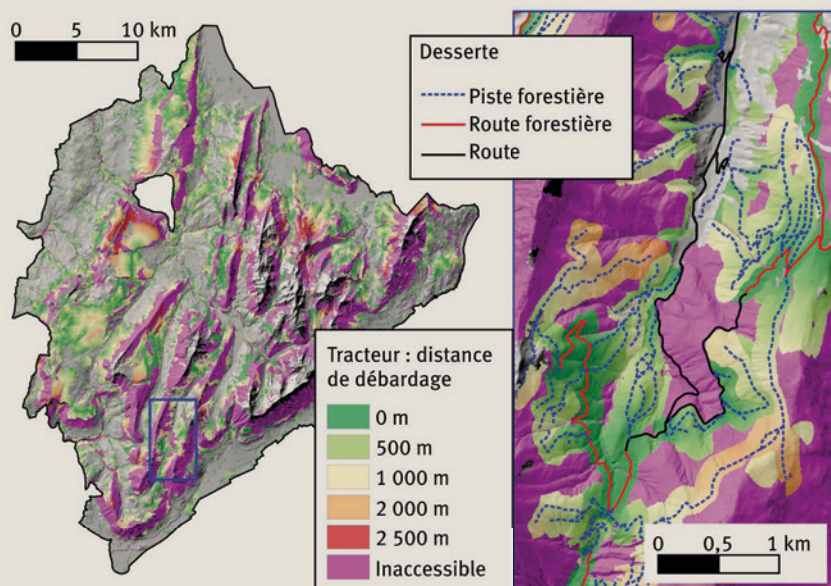
Protection contre les aléas naturels

Des modèles permettent d'identifier les zones de départ de chute de blocs rocheux et d'avalanches, puis de simuler leur propagation sur un versant. En croisant ces informations avec la carte des enjeux (habitat, zones d'activités et infrastructures de transport) et les caractéristiques des forêts, il est possible d'identifier les forêts qui jouent un rôle de stabilisation du manteau neigeux ou de pare-pierre naturel. La gestion forestière doit y être adaptée pour maintenir dans le temps et dans l'espace les capacités de protection de la forêt.

3. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, qui rassemble depuis 2020, les ex-organismes Inra et Irstea.

4. Office national des forêts.

3 Cartographie avec Sylvaccess de l'accessibilité au tracteur forestier sur le Parc naturel régional. L'accessibilité est fortement structurée par les routes et pistes, et une grande partie du massif reste inaccessible (carte : J.-M. Monnet, INRAE).



Biodiversité : trame de vieux bois et habitats forestiers

Les données Lidar permettent de cartographier certains habitats forestiers favorables à la biodiversité, tels que les forêts matures présentant des arbres de fort diamètre ou des arbres morts et sénescents. Il est possible de modéliser également la capacité des forêts à accueillir certaines espèces. Ces informations servent à cibler les forêts présentant un enjeu de conservation ainsi que les zones à gérer de manière à obtenir une trame d'habitats favorable à la biodiversité à l'échelle du territoire.

Production de bois : comment dynamiser la gestion ?

Même si les conditions techniques et économiques sont favorables à l'exploitation d'une forêt, seul le propriétaire peut déclencher des opérations de gestion. Cela suppose qu'il soit conscient de son statut de propriétaire, qu'il soit informé de l'état de sa forêt et de son potentiel, qu'il ait l'envie ou le besoin de la gérer et qu'il soit conseillé pour le faire. Si en forêt publique (État, communes), la taille des propriétés permet d'envisager une gestion et une planification forestière, en forêt privée de montagne, le parcellaire forestier est extrêmement morcelé. Sur le massif des Bauges, la taille moyenne d'une propriété n'est par exemple que de 1,5 ha, répartis en plusieurs parcelles. Sachant qu'une propriété peut avoir plusieurs propriétaires, qui le plus souvent n'habitent pas à proximité, la mobilisation des bois dans les forêts privées nécessite un travail considérable de communication et d'information. Si les cartographies obtenues par Lidar permettent de cibler les zones à enjeux et offrent un support pour sensibiliser les propriétaires, elles ne peuvent pas se substituer à un travail d'animation et de formation.

Vers la généralisation des cartographies Lidar ?

Une technique performante et ses alternatives

Le Lidar est probablement la technique de télédétection la plus performante pour la cartographie des forêts à l'échelle du massif (surface de l'ordre de 100 km²). En zone de montagne, l'acquisition de ces données se justifie ne serait-ce que pour l'obtention d'un MNT précis permettant d'identifier les zones accessibles et d'optimiser les opérations de desserte. Il est pour l'instant peu probable d'envisager des survols à intervalles réguliers pour l'actualisation des informations sur les peuplements forestiers. Une alternative pourrait être l'utilisation des

campagnes existantes de photos aériennes pour produire à bas coût des nuages de points 3D par stéréophotogrammétrie. Ces nuages de points offrent moins d'information sur la structure interne des forêts et quasiment pas sur le sol, mais dans les zones où un MNT précis est déjà disponible, ils permettent aussi d'estimer les caractéristiques des peuplements. Des travaux de recherche sont actuellement menés pour optimiser l'extraction d'information à partir de ces données. Il faut souligner que, selon le type d'information souhaité et selon l'échelle d'analyse, de nombreuses autres données de télédétection (imagerie infrarouge ou couleur, imagerie hyperspectrale, radar) et d'autres vecteurs (terrestre, drone, satellite) peuvent être considérés (ONF, 2011a, 2011b).

Quelle utilisation de l'information ?

La capacité à cartographier les caractéristiques de la forêt et les services qu'elle fournit sur l'ensemble d'un territoire offre d'importantes perspectives en termes d'inventaire forestier, d'élaboration de politiques forestières et de mise en œuvre opérationnelle. Cependant, l'existence de cette information pour chaque parcelle et sa possible diffusion suscite des inquiétudes, notamment chez les propriétaires privés. L'enjeu est de s'assurer qu'elle sera utilisée aux bénéfices des propriétaires, tout en s'inscrivant dans les politiques de gestion multifonctionnelle et durable soutenues par les collectivités locales ou services de l'État. Sur le PNR du Massif des Bauges, après une première présentation publique des cartographies des forêts obtenues sur le territoire, un groupe de travail intégrant les acteurs de la filière forêt-bois a été constitué pour définir les conditions de diffusion et de valorisation de ces données. ■

Les auteurs

Jean-Mathieu MONNET

Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM,
38000 Grenoble, France.

✉ jean-mathieu.monnet@inrae.fr

Pierre PACCARD

Parc naturel régional du Massif des Bauges,
73630 Le Châtelard, France.

✉ p.paccard@parcdesbauges.com

Catherine RIOND

Office national des forêts,
Pôle Recherche Développement et Innovation,
73000 Chambéry, France.

✉ catherine.riond@onf.fr

EN SAVOIR PLUS...

- 📖 **DUPIRE, S., BOURRIER, F., MONNET, J.-M., BERGER, F.**, 2015, Sylvaccess : un modèle pour cartographier automatiquement l'accessibilité des forêts, *Revue Forestière Française*, 70, 2, p. 111-126.
- 📖 **MUNOZ, A., CANTELOUP, D., JOLLY, A., RIOND, C.**, 2016, Estimations dendrométriques pour l'aménagement forestier à l'aide de LIDAR aéroporté : premier démonstrateur en forêts littorales dunaires, *ONF - Rendez-Vous Techniques*, n° 50, p. 37-46.
- 📖 **MUNOZ, A., VIARD-CRETAZ, G., FAY, J.**, 2013, Implantation d'un projet de desserte forestière en forêt de montagne : les apports du Lidar aérien, *ONF - Rendez-Vous Techniques*, n° 39-40, p. 3-6.
- 📖 **ONF**, 2011a, Télédétection appliquée à la gestion des forêts et milieux naturels, *Dossier thématique des Rendez-Vous techniques*, Numéro 31 (1, 17-73).
- 📖 **ONF**, 2011b, Télédétection appliquée à la gestion des forêts et milieux naturels, *Dossier thématique des Rendez-Vous techniques* Numéro 32 (2, 25-68).
- 📖 **WHITE, J.-C., ET AL.**, 2014, *Guide des meilleures pratiques pour générer des attributs d'inventaire forestier provenant de données obtenues par balayage laser aéroporté en utilisant une approche par zones*, Service canadien des forêts, Rapport d'information FI-X-010, 54 p.

Réchauffement du climat : est-ce que la forêt française peut apporter des solutions d'ici 2050 ?

Le plan climat présenté le 6 juillet 2017 par le gouvernement français s'est fixé un objectif de neutralité carbone en 2050. Dans ce contexte, le secteur forêt-bois est amené à prendre une importance stratégique. Cependant de grandes incertitudes persistent sur la stratégie à adopter comme l'illustre l'auteure de cet article. En faisant le point sur deux études indépendantes sur le sujet, son article montre en effet que la plupart des scénarios conduisent à une hausse temporaire des émissions de gaz à effet de serre du secteur forestier et pour finir à une absence d'amélioration du bilan carbone à l'horizon 2050, suivie cependant d'une amélioration potentielle à des horizons plus lointains, et donc plus proches des échelles temporelles de la gestion forestière.

D

epuis la révolution industrielle du dix-neuvième siècle, la déprise agricole, l'exode rural et l'utilisation des énergies fossiles ont permis aux forêts françaises de récupérer après des siècles de surexploitation. La surface de forêts est ainsi passée de 9 Mha environ en 1830 à près de 17 Mha en 2017 aboutissant à une forêt française aujourd'hui relativement jeune et productive. Dans ce contexte, le secteur forestier est appelé à jouer un rôle important dans les objectifs de décarbonation de l'économie pour ralentir le changement climatique. Cependant, les études scientifiques sont maintenant nombreuses à réfuter la neutralité carbone des produits bois et à montrer que les leviers d'atténuation du changement climatique en forêt sont plutôt modestes. Alors que les modèles globaux de climat estiment que les émissions planétaires de CO₂ doivent diminuer d'ici à 2030-2050 pour envisager un maintien des températures en deçà de 1,5° C de réchauffement (Lamontagne *et al.*, 2019; Millar *et al.*, 2017), l'année 2017 a vu paraître deux études indépendantes (Roux *et al.*, 2017; Valade *et al.*, 2018) s'intéressant au contexte français : comment augmenter la récolte de bois tout en augmentant la séquestration de carbone par la filière ?

Les pièces élémentaires du bilan carbone

Établir le bilan carbone du secteur forestier revient à faire la somme de tout le carbone séquestré et libéré lors des différentes étapes de la transformation du bois. On considère généralement trois processus : la séquestration du carbone par les arbres en forêt, le stockage du carbone dans les produits bois, et la substitution lorsque le bois remplace d'autres matériaux ou énergies plus émetteurs en carbone. La substitution fait souvent l'objet d'incompréhension car c'est l'effet le plus éloigné des mesures physiques et des inventaires statistiques (encadré 1). De par l'incertitude qui sous-tend l'estimation de la substitution liée aux évolutions biologique et socio-économique des scénarios de référence et alternatif, et en l'absence d'analyse approfondie de ces facteurs, cette étude limite les calculs de substitution à l'horizon 2050.

Caractériser la faible mobilisation dans les forêts françaises

Le taux de prélèvement moyen dans les forêts françaises est de 49% (Colin *et al.*, 2011), ce qui explique que le stock de bois en forêt augmente régulièrement. La difficulté d'accès aux parcelles et les conditions socio-éco-

nomiques sont fréquemment invoquées pour expliquer ce faible taux de prélèvement (Colin *et al.*, 2011) et suggèrent une diversité des niveaux de gestion sur le terrain qu'il est primordial de caractériser pour envisager une mobilisation supplémentaire de bois. Pour chaque essence et structure de forêt (taillis, futaie, taillis sous futaie), on peut définir un mode de gestion standard avec un diamètre de coupe, une densité de peuplement, et un niveau d'exploitabilité acceptable (pente, portance du sol...) correspondant aux recommandations sylvicoles. Ensuite, en comparant les caractéristiques de chaque placette avec l'itinéraire sylvicole standard pertinent, on estime le type de gestion le plus probable (plus de détails dans Valade *et al.* (2018)) :

- les placettes dont le niveau d'exploitabilité est en-deçà du seuil défini comme acceptable pour cette essence sont supposées « inexploitable » pour des raisons topographiques et on peut supposer qu'elles ne seront pas récoltées puisque leur exploitation demanderait d'importants investissements en infrastructures ou méthodes d'exploitation ;
- les placettes dont le diamètre est supérieur au diamètre de récolte standard sont identifiées comme « surmatures ». Pour des raisons diverses, qui peuvent être sociales ou économiques, la récolte a été négligée par les propriétaires qui ne semblent donc pas intéressés par la vente du bois. Sans action politique particulière, on suppose que ces forêts ne seront pas exploitées ;
- les peuplements dont le diamètre est inférieur au diamètre standard de coupe mais dont la densité est supérieure à la situation standard révèlent un comportement

différent. Les propriétaires manquent de formation ou d'intérêt pour les coupes intermédiaires d'amélioration de leurs peuplements mais peuvent tout de même être motivés par la coupe finale. Sans politique ciblée, on peut donc supposer qu'aucune éclaircie ne sera pratiquée dans ces forêts mais que leur bois sera mobilisé quand le diamètre standard de coupe sera atteint ;

- enfin, les placettes dont l'exploitabilité est estimée acceptable, dont le diamètre est inférieur au diamètre de coupe et la densité est inférieure à la densité standard sont supposées gérées activement. Les propriétaires pratiquent éclaircies et coupes selon les itinéraires sylvicoles standards.

On estime ainsi que 63 % de la superficie forestière française est en gestion active, 15 % surmature, 11 % en surdensité et 11 % inexploitable avec des différences importantes selon la localisation et l'essence (figure 1). La répartition entre forêts surmatures et en surdensité ne semble pas suivre de tendance régionale, ce qui est cohérent avec la nature socio-économique de cette catégorisation. En revanche la part majeure de forêts inexploitable dans les régions montagneuses est évidente avec jusqu'à 53 % des parcelles des Alpes. La répartition des niveaux de gestion par essence souligne les préférences de la filière bois pour quelques essences, avec 86, 77 et 68 % respectivement des parcelles de pin maritime, d'épicéa et de sapin pectiné gérées activement pour les conifères et 77 et 77 % respectivement des parcelles de chêne pédonculé et de châtaignier pour les feuillus.

1 COMPRENDRE LA SUBSTITUTION

Estimer le potentiel de substitution d'un produit bois revient à comparer deux scénarios, un scénario de référence (non-bois), et une alternative (bois) qui positionne le bois comme produit de remplacement. En calculant les émissions de gaz à effet de serre liées aux procédés de chacune de ces deux versions, on peut en déduire les émissions évitées en choisissant l'option basée sur le bois plutôt que l'option basée sur les énergies fossiles. Le coefficient de substitution ramène cette différence d'émissions à l'unité de bois supplémentaire utilisée dans le scénario bois par rapport au scénario de référence (équation 1). Derrière l'apparente simplicité du raisonnement se cachent cependant plusieurs hypothèses importantes pour s'assurer de la validité des résultats présentés.

Équation 1

$$S_{\text{coeff}} = \frac{\text{Émissions}_{\text{bois}} - \text{Émissions}_{\text{non-bois}}}{\text{Quantité}_{\text{non-bois}} - \text{Quantité}_{\text{bois}}}$$

Le choix de la référence est primordial

L'ADEME estime qu'en moyenne la construction d'une maison individuelle à ossature bois émet 140 kg CO₂-eq/m² alors que la construction d'une maison équivalente à ossature béton cellulaire émet 200 kg CO₂-eq/m² et à ossature brique 150 kg CO₂-eq/m² (Jayr *et al.*, 2011). Selon l'hypothèse choisie sur le type de maison substitué on aura donc économisé 60 ou 10 kg CO₂-eq/m².

Les différences de flux de carbone en forêt doivent être prises en compte

En comparant deux scénarios d'utilisation du bois on compare aussi, souvent de manière implicite, deux intensités de récolte. Dans le cas du choix d'une maison à ossature béton les arbres qui auraient été utilisés pour une ossature bois ne sont pas coupés, le carbone qu'ils contiennent reste stocké et davantage de carbone est séquestré tant qu'ils restent vivants.

Les coefficients de substitution choisis doivent être cohérents avec le choix de la référence

L'ADEME estime par exemple qu'1 m³ de bois énergie permet d'éviter l'émission de 0,5 t CO₂-eq m³ (ADEME, 2015). Le scénario de référence attaché à ce chiffre considère que le gaz est la principale alternative au bois*. Pour une application dans lequel le scénario de référence consisterait en l'absence totale d'utilisation du bois (Roux *et al.*, 2017), ce coefficient semble peu cohérent quand on sait que le bois énergie est principalement utilisé pour le chauffage domestique en zone rurale et que seul un quart des communes – les plus urbaines – sont raccordées au réseau GRDF.

* Ce chiffre serait cependant de 0,9 t CO₂-eq m³ pour le fuel qui représente les trois-quarts des modes de chauffage domestique en zone rurale en France.

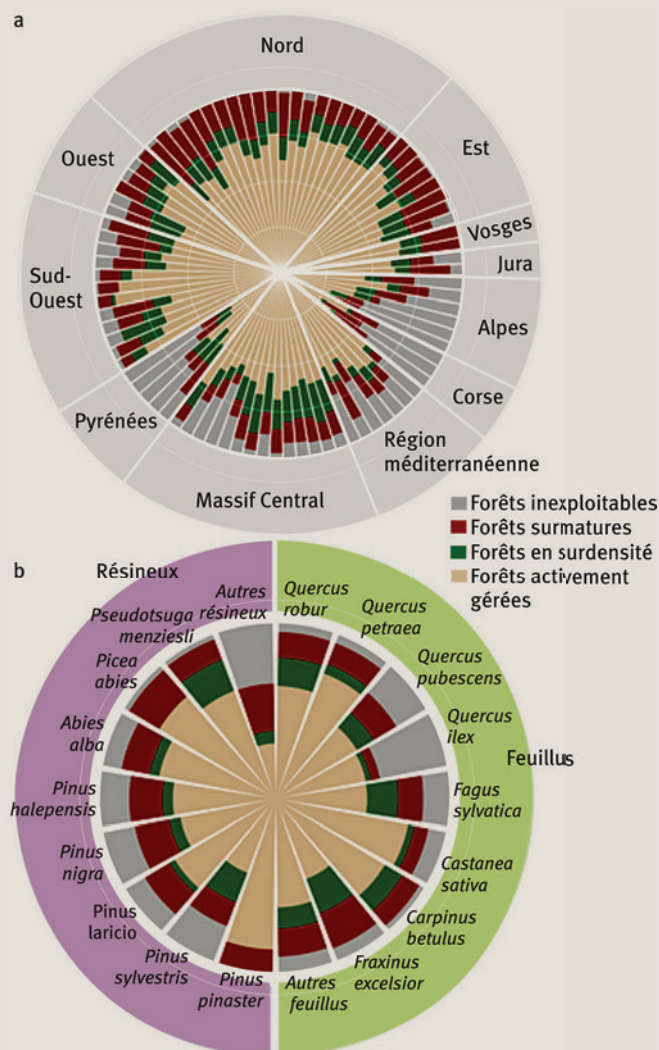
Modéliser les flux de carbone dans la filière forêt-bois : les scénarios

La catégorisation des forêts françaises selon leur niveau de gestion décrite ci-dessus permet de définir des scénarios pour la modélisation du secteur forestier. On peut ainsi projeter l'évolution de la ressource en maintenant les forêts dans leur mode de gestion actuelle, mais aussi envisager la mise en place de scénarios de mobilisation accrue qui atteignent chacun une catégorie de forêts en particulier. Cinq types de mobilisation sont envisagés dans cinq scénarios différents.

La simulation de référence reproduit les pratiques courantes de gestion. Cette simulation reproduit donc l'évolution de la ressource forestière française sous l'hypothèse d'une continuité de comportement des agents.

1 Répartition de la surface forestière française métropolitaine en forêts gérées activement, inexploitable, surmatures, en surdensité.

a) répartition par région. Chaque secteur correspond à une sylvoécocorégion IGN. Les sylvoécocorégions sont groupées par grande région écologique. b) répartition par essence (secteurs). Les essences sont groupées par type de bois, feuillu (droite) ou résineux (gauche).



Dans le modèle, les forêts identifiées comme activement gérées sont alors éclaircies et récoltées, les forêts en surdensité sont récoltées et ne sont pas éclaircies, les forêts surmatures ou difficilement exploitables ne sont ni récoltées ni éclaircies.

Les quatre autres scénarios ciblent une ou toutes des trois catégories de forêt : diminution du diamètre de récolte des forêts activement gérées, éclaircie des forêts en surdensité ou récolte des forêts surmatures. En arrière-plan, on imagine que la mise en œuvre de ces scénarios nécessiterait des politiques très différentes : des subventions à la coupe ou à la consommation de bois pour les forêts activement gérées qu'on peut supposer répondre au prix du marché, des incitations basées sur les travaux prévus dans les plans de gestions pour les forêts en surdensité, et de l'information, du regroupement de parcelles ou une fiscalité plus élevée sur le foncier forestier pour les forêts surmatures qu'on peut supposer délaissées voire ignorées par leurs propriétaires. Pour chaque catégorie de forêt ciblée, on considère que la mobilisation est réalisée progressivement à un horizon de trente ans.

La croissance des peuplements est simulée grâce à deux équations principales qui décrivent respectivement l'accroissement du volume et du diamètre quadratique moyen des peuplements de chaque placette de l'inventaire forestier national. Ces relations ont été obtenues par des régressions multi-variables par essence en suivant une approche de multiplication des facteurs de croissance (*multiplicative potential-modifier function*) (Charru *et al.*, 2010; Pretzsch, 2009; Wykoff, 1990). Pour considérer le puits de carbone biologique, on utilise les facteurs d'expansion globaux issus du projet CARBOFOR (feuillus : 2,063 ; conifères : 1,735 – Loustau, 2004). Les deux fonctions définissant l'incrément en diamètre et en volume utilisent comme facteurs explicatifs l'âge, l'indice de densité et l'indice de fertilité.

Pour chaque type de peuplement (essence et structure), des règles de gestion similaires aux seuils utilisés pour définir les niveaux de gestion permettent de simuler la récolte. Quand le diamètre quadratique moyen d'un peuplement atteint le diamètre standard de récolte pour ce type de forêt, le peuplement est récolté, une fraction de la biomasse aérienne est laissée en forêt et supposée décomposée en moins de cinq ans, une partie est transférée à la filière bois pour transformation. De même, à chaque pas de temps, les éclaircies et la mortalité sont appliquées par le retrait du peuplement d'une fraction fixe de biomasse.

Les volumes commerciaux récoltés (bois fort tige : jusqu'à la découpe 7 cm) simulés par le modèle de croissance sont utilisés en entrée d'un modèle de filière bois qui reproduit la production de bois d'œuvre (BO), bois d'industrie (BI) et bois énergie (BE) en prenant en compte les première et deuxième transformation, l'utilisation en cascade des produits, la réutilisation et le recyclage. Autant que possible, les paramètres ont été tirés de la littérature pour les années 2013 à 2015. La coupe rase de résineux est entièrement affectée à la filière BO alors que 45 % du bois issu de coupe rase de feuillus sont affectés aux filières BIBE. Le bois d'éclaircies est quant à lui affecté entièrement au BIBE pour les feuillus alors que 29 % des éclaircies de résineux sont dirigées vers le BO. Selon les données disponibles, environ 16 % de la production

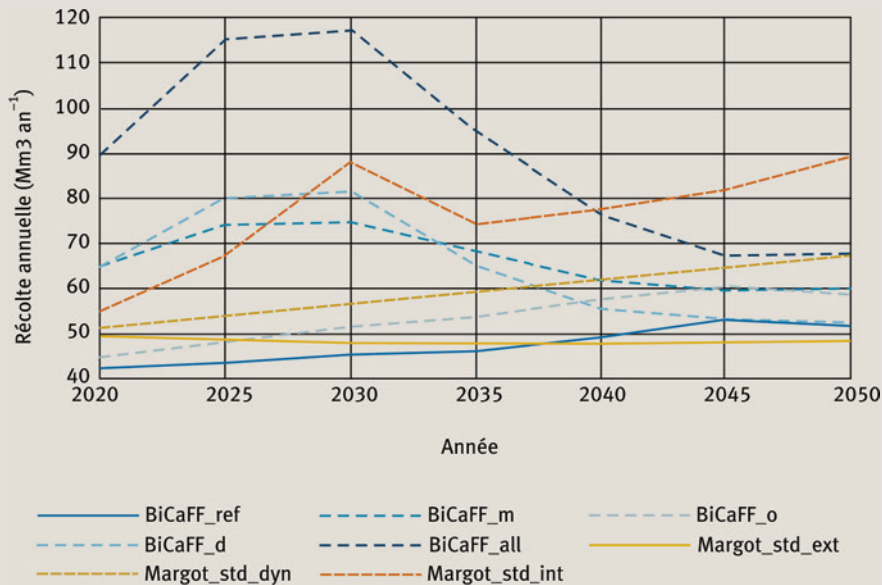
actuelle de bois énergie provient de la valorisation en fin de vie de produits BO ou BI. Pour le calcul du stockage de carbone dans les produits bois, les utilisations secondaires et tertiaires du bois (suite à l'utilisation en cascade) ne sont pas considérées pour éviter le double compte du carbone. La variation de stock de carbone dans les produits bois est régie par des équations de décroissance exponentielle. La durée de demi-vie est de 50 ans pour le BO, 4 ans pour le BI et 1,7 ans pour le BE.

Chaque produit bois produit au-delà du scénario de référence est supposé se substituer à un produit équivalent plus émetteur de carbone dans sa production et/ou son utilisation *via* un coefficient de substitution moyen selon l'utilisation du bois. Cette approche de la substitution est très simpliste et ne prend pas en compte la diversité réelle des produits bois, ni de leurs alternatives et n'a comme objet que de fournir un ordre de grandeur de cette composante du bilan carbone. L'ensemble du modèle (forêt et filière-bois) est décrit en détail dans Valade *et al.* (2018).

Plus de bois mobilisé ne signifie pas moins de carbone dans l'atmosphère

Les volumes récoltés peuvent être multipliés par 1,5 en ciblant une seule des trois catégories ou même triplés en ciblant simultanément les trois catégories surmatures, surdensité et activement gérées à la fois (figure 2) dans des ordres de grandeur comparables aux conclusions de Roux *et al.* (2017a). Cependant, cette augmentation de récolte ne peut pas être maintenue au-delà d'une décennie puisqu'elle provient pour l'essentiel de la mobilisation d'une partie du stock de bois sur pied jusqu'ici abandonnée – forêts surmatures – ou destinée à être coupée un peu plus tard – forêts activement gérées. Les niveaux de récolte atteints après le régime transitoire de mobilisation du stock sont toutefois supérieurs aux niveaux de récolte du scénario de référence en raison d'une augmentation de la production biologique due au rajeunissement moyen de la forêt. L'augmentation de la récolte se répercute dans l'augmentation de la production de produits bois BO, BI et BE.

2 Récolte annuelle dans les différents scénarios de récoltes des études récentes sur la France. BiCaFF et Margot renvoient aux modèles utilisés dans Valade *et al.* (2018) et Roux *et al.* (2017) respectivement. Les scénarios sont décrits dans le tableau 1. Pour les scénarios de Roux *et al.* (2017), les résultats de la version standard de Margot, sans densité-dépendance, sont représentés ici, mais la variante avec densité-dépendance n'affecte quasiment pas la récolte sur 2020-2050.



1 Description des scénarios analysés dans les études Valade *et al.* (2018) et Roux *et al.* (2017).

Étude	Modèle	Scénario	Description
Valade <i>et al.</i> (2018)	BiCaFF	ref	Scénario de référence : maintien des pratiques actuelles
		m	Intensification de toutes les forêts activement gérées
		o	Éclaircie de toutes les forêts en surdensité
		d	Mobilisation de toutes les forêts surmatures
		all	All à la combinaison des trois
Roux <i>et al.</i> (2018)	Margot sous deux versions : Std (standard) DD (avec densité-dépendance)	ext	Scénario de référence : extensification
		dyn	« Dynamiques territoriales »
		int	Intensification avec plan de reboisement

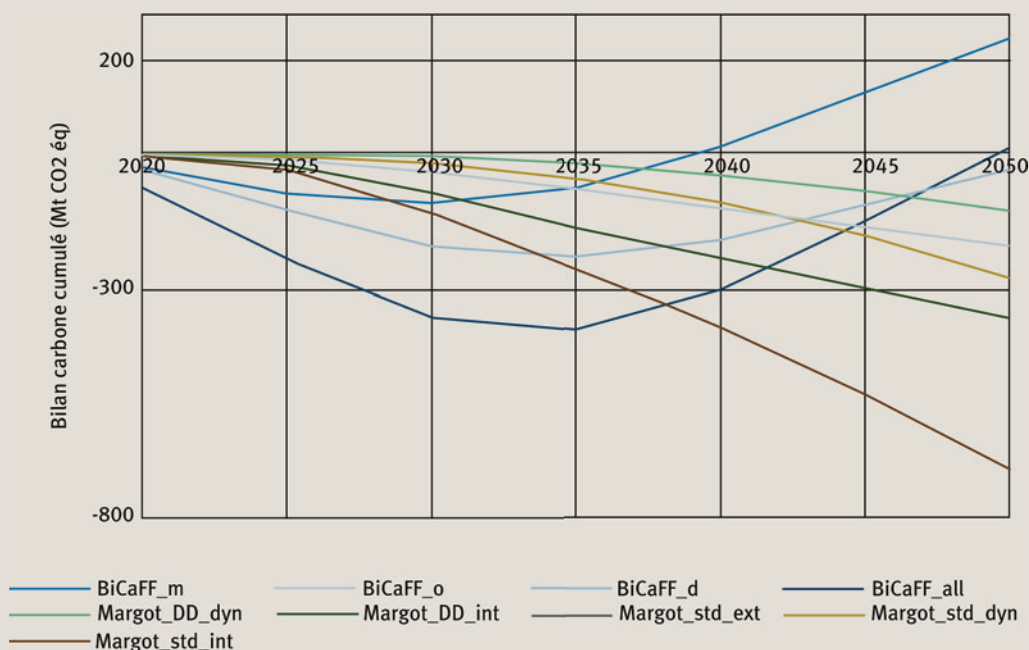
► Quand on intègre les différentes composantes du bilan carbone de la filière forêt-bois, on observe que tous les scénarios de mobilisation accrue présentent un bilan carbone moins bon que le scénario de référence entre 2015 et 2040 (figure 3), que ce soit avec les simulations de Valade *et al.* (2018) ou de Roux *et al.* (2017) (valeurs négatives sur la figure 3). Seule la mobilisation accrue des forêts activement gérées présente un bilan carbone meilleur que la référence à partir de 2040. Avec la mobilisation des forêts en surdensité, l'écart entre le bilan carbone des scénarios d'intensification et du scénario de référence augmente avec le temps en raison de la proportion importante de bois d'éclaircie affectée au BE et dont le carbone est donc rapidement émis dans l'atmosphère. Ce résultat est à nuancer : en effet, les parts de filière BO, BI et BE sont maintenues constantes alors qu'on pourrait attendre de ce scénario une augmentation de la part de la récolte destinée à la filière BO. Les scénarios qui ciblent les forêts surmatures et les forêts activement gérées montrent des profils d'évolution de leur bilan carbone assez proches dans les premières années avec une dégradation du bilan carbone par rapport au scénario de référence dans les premières années, puis un rattrapage progressif, plus rapide pour le scénario des forêts activement gérées que pour celui des forêts surmatures. La dégradation initiale du bilan carbone avec une mobilisation accrue est due aux coupes de peuplements de fort volume qui diminuent rapidement le stock de carbone en forêt, un effet qui n'est que partiellement compensé par la substitution et la séquestration dans les produits bois. Une fois que les peuplements coupés repoussent, leur potentiel de séquestration redevient important et s'ajoute aux bénéfices de substitution liés à l'utilisation des produits bois.

Ainsi, sous les hypothèses de modélisation de l'étude de Valade *et al.* (2018), parmi lesquelles le maintien de la filière bois à sa structure et son efficacité actuelles, on trouve que l'augmentation de la production de produits bois, et la substitution et l'augmentation de la production biologique en forêt qui en résultent, ne permettent de compenser les émissions liées à la diminution du volume de bois sur pied que pour un des scénarios testés. Pour plus de détails sur ces résultats, voir Valade *et al.* (2018) et Valade *et al.* (2017).

Deux approches de modélisation différentes

Le fait que mobiliser plus de bois n'est pas meilleur pour l'atmosphère à moyen terme est un résultat qui tend à se généraliser malgré des différences entre les réponses des modèles. Là où Valade *et al.* (2018) estime un temps de remboursement de la dette carbone entre vingt et trente ans pour trois des quatre scénarios et infini pour le quatrième, le cumul des effets de substitution ne contrebalance les pertes en forêt dans aucun des scénarios d'intensification étudiés par Roux *et al.* (2017) à l'horizon 2050. La dépendance de l'horizon de remboursement de la dette carbone en fonction des types de forêt et des hypothèses d'utilisation du bois trouvée ici est par ailleurs cohérente avec la revue de littérature du Joint Research Center qui indique un temps de remboursement allant de plusieurs décennies à plus d'un siècle suivant l'origine du bois (Agostini *et al.*, 2013). Plus particulièrement, les divergences de tendances entre les deux études françaises sont le résultat d'approches de modélisation différentes. Margot simule l'évolution de domaines d'étude construits à partir de l'agrégation de placettes, alors que BiCaFF simule explicitement chaque

3 Différence de bilan carbone cumulé avec un scénario « fil de l'eau » dans les études récentes sur la France. BiCaFF et Margot renvoient aux modèles utilisés dans Valade *et al.* (2018) et Roux *et al.* (2017) respectivement. Les scénarios sont décrits dans le tableau 1. Le bilan carbone représenté inclut le stockage en forêt et dans les produits bois, et la substitution.



placette. Alors que le scénario de référence de Margot est à volume récolté constant, celui de BiCaFF est à pratiques constantes, donc à volume récolté croissant. De plus, l'augmentation de la récolte avec Margot distingue seulement les forêts de conservation des forêts de production alors que BiCaFF distingue forêts surmatures, en surdensité et activement gérées.

Application à la prise de décision

Dès lors, on peut poser la question sous un autre angle : en partant du présupposé qu'une augmentation de la récolte est souhaitable – par exemple pour des raisons économiques, quel scénario permet de réaliser cette augmentation avec le moindre impact carbone ? Cette approche revient à corriger les coefficients de substitution usuels n'incluant que les procédés de transformation (entre 0,59 et 0,75 en pondérant BO, BI, BE par leurs volumes respectifs, tableau ②) en y intégrant l'impact d'une récolte supplémentaire sur le stockage de carbone en forêt et dans les produits bois (encadré ①). Ces nouveaux coefficients de substitution « filière entière » calculés ici pour l'horizon 2050 (tableau ②) poussent à orienter les politiques vers la réduction du diamètre de coupe dans les forêts déjà activement gérées (0,4 tCO₂-éq évitée par m³ récolté) plutôt que vers la mobilisation des forêts surmatures (0,1 tCO₂-éq émise par m³ additionnel récolté, substitution négative) et *a fortiori* des forêts en sur-densité (0,9 tCO₂-éq émise par m³ additionnel récolté, substitution négative ; tableau ②). Les deux scénarii étudiés par Roux *et al.* (2017) donnent des coefficients de substitution « filière-entière » équivalents en termes d'impact carbone par mètre cube supplémentaire (0,3 et 0,4 tCO₂-éq émise par m³ additionnel récolté).

En rapportant ces coefficients non plus au m³ récolté mais au m³ de BE produit, grâce une allocation économique (voir annexe ①), trois des quatre scénarios de Valade *et al.* (2018) donnent un potentiel de substitution faible mais positif pour le bois énergie, alors que les scénarii étudiés

par Roux *et al.* (2017) convergent sur un coefficient de substitution négatif. Pour des politiques publiques qui envisageraient de subventionner le bois-énergie à hauteur de son impact sur le climat, c'est la gamme de variation de ce coefficient corrigé, multiplié par la valeur tutélaire du carbone, qu'il conviendrait d'utiliser.

Conclusion

Les études françaises récentes sur le bilan carbone de scénarios d'augmentation de la récolte confirment les résultats à l'échelle européenne : une augmentation massive de la récolte augmentera les émissions de CO₂ pendant au minimum trois décennies, alors que les climatologues estiment que seule une diminution des émissions totales d'ici 2030 à 2050 peut nous permettre de rester sous le seuil des 1,5 degrés de réchauffement ciblés par l'Accord de Paris. Ces résultats vont également dans le sens de la relativisation du rôle du compartiment « forêt » dans l'atténuation du changement climatique, du moins en Europe (Luysaert *et al.*, 2018). Les leviers d'atténuation de la filière reposent donc sur l'orientation du bois vers les usages où la substitution est la plus efficace ou sur l'identification des situations forestières particulières où le laisser-faire a un bilan carbone négatif, et non sur l'augmentation massive de la récolte. ■

Les auteurs

Aude VALADE

CREAF, Ecological and Forestry Applications Research Centre, Campus UAB, Edifici C., 08193 Bellaterra, Barcelone, Espagne.

✉ a.valade@creaf.uab.cat

Valentin BELLASSEN

INRAE, AgroSup Dijon, UMR CESAER, Université Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France.

✉ valentin.bellassen@inrae.fr

② Dette carbone et correction des coefficients de substitution.

Les tirets indiquent que la dette carbone n'est pas remboursée à l'horizon temporel de la simulation. La dernière colonne propose une correction du coefficient de substitution pour le bois-énergie en retranchant à sa valeur originelle son impact sur le stockage en forêt et dans les produits-bois à l'horizon temporel 2015-2050. Cet impact suit une allocation économique entre BO et BIBE en pondérant l'impact d'un mètre cube moyen récolté par la valeur économique relative du bois énergie par rapport au bois d'œuvre (voir annexe ①). Une valeur négative du coefficient de substitution indique que le bois-énergie est plus émetteur que ses substituts fossiles.

Scénario	Échéance de la dette carbone	Récolte supplémentaire sur 2015-2050 (Mm ³)	Coefficient de substitution filière (tCO ₂ -éq m ⁻³)		Coefficient de substitution bois-énergie (tCO ₂ -éq m ⁻³)	
			hors forêt	avec compartiment forêt	hors forêt	avec compartiment forêt
BiCaFF_m	2040	660	0,66	0,4	0,5	0,33
BiCaFF_o	–	217	0,59	– 0,9	0,5	– 0,42
BiCaFF_d	2055	606	0,65	– 0,1	0,5	0,07
BiCaFF_all	2050	1 483	0,65	0,0	0,5	0,12
Margot_DD_dyn	–	391	0,75	– 0,3	0,5	– 0,15
Margot_DD_int	–	982	0,73	– 0,4	0,5	– 0,16
Margot_std_dyn	–	391	0,76	– 0,7	0,5	– 0,38
Margot_std_int	–	982	0,73	– 0,7	0,5	– 0,36

ANNEXE 1

Allocation économique pour la correction du coefficient de substitution du bois-énergie

Lorsqu'un procédé émetteur (ou séquestrant) – ici une récolte de bois – génère plusieurs produits – ici du BO, du BI et du BE – et qu'on ne peut compartimenter physiquement les émissions de chaque produit, il est nécessaire d'allouer les émissions du procédé entre les produits. La manière la plus courante et la plus logique de le faire est l'allocation économique : chaque co-produit se voit attribuer des émissions (ou de la séquestration) au prorata de sa valeur économique. Cette valeur est en effet le meilleur proxy de sa part de responsabilité dans l'existence du procédé, et donc des émissions qui en résultent.

Dans notre cas, l'allocation économique résulte de l'équation A1.

Équation A1

$$CS_{BE} = CS_{BE_{forêt}} + CS_{BE_{hors-forêt}}$$

$$CS_{BE_{forêt}} = (Bilan\ C\ forêt_{scénario} - Bilan\ C\ forêt_{ref}) \times \frac{Valeur\ BE}{Valeur_{BOBIBE}} \times \frac{1}{Récolte\ BE_{scénario} - Récolte\ BE_{ref}}$$

$$= (Bilan\ C\ forêt_{scénario} - Bilan\ C\ forêt_{ref}) \times \frac{Prix_{BE}}{(Récolte\ BE_{scénario} - Récolte\ BE_{ref}) \times Prix_{BO} \cdot Part_{BO} + Prix_{BIBE} \cdot Part_{BIBE}}$$

Variable	Définition	Valeur/unité	Source
CS _{BE}	Coefficient de substitution du bois énergie	t CO ₂ éq m ⁻³	Cet article (tableau 1)
CS _{BE_forêt}	Composante « forêt » du coefficient de substitution du bois énergie	t CO ₂ éq m ⁻³	Cet article (tableau 1)
CS _{BE_hors-forêt}	Composante « hors forêt » du coefficient de substitution du bois-énergie	0,5 t CO ₂ éq m ⁻³	Ademe (2015)
Bilan_C_forêt _{scénario}	Bilan carbone cumulé de « scénario » sur 2015-2050	t CO ₂ éq	Cet article (figure 2)
Récolte _{scénario}	Récolte cumulée de « scénario » sur 2015-2050	m ³	Cet article (figure 1)
Prix _{BE}	Prix du bois-énergie (approximé au prix des connexes de scierie)	33,3 euros m ⁻³	CEEB (2018) et FCBA (2012)
Prix _{BO}	Prix du bois d'œuvre (prix des sciages)	300 euros m ⁻³	CEEB (2018)
Part _{BO}	Part du bois d'œuvre dans les produits de la récolte totale	8,00 %	Valade <i>et al.</i> (2018)
Part _{BIBE}	Part du BIBE dans les produits de la récolte totale	92,00 %	Valade <i>et al.</i> (2018)

Réchauffement du climat : la forêt française peut-elle apporter des solutions d'ici 2050 ?

EN SAVOIR PLUS...

- ▣ **ADEME**, 2015, *Forêt et atténuation du changement climatique*, Les avis de l'ADEME.
- ▣ **AGOSTINI, A., GIUNTOLI, J., BOULAMANTI, A.**, 2013, *Carbon accounting of forest bioenergy (JRC Technical Report)*, European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy.
- ▣ **CEEB**, 2018, *Prix et indices nationaux sciages et bois énergie - 2^e trimestre 2018*, Centre d'études de l'économie du bois.
- ▣ **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, *For. Ecol. Manag.*, n° 260, p. 864–874, disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.005>
- ▣ **COLIN, A., HERVÉ, J.-C., LUCAS, S.**, 2011, *Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles*, 28 p.
- ▣ **FCBA**, 2012, *Mémento*, Institut technologique forêt, cellulose, bois-construction et ameublement.
- ▣ **JAYR, E., LAURENT, J., LEBERT, A., CHEVALIER, J.**, 2011, *Bilan carbone appliqué au bâtiment: Guide méthodologique*, Angers ADEME.
- ▣ **LAMONTAGNE, J.-R., REED, P.-M., MARANGONI, G., KELLER, K., GARNER, G.-G.**, 2019, Robust abatement pathways to tolerable climate futures require immediate global action, *Nat. Clim. Change* 1.
- ▣ **LOUSTAU, D.**, 2004, *Rapport final du projet CARBOFOR, Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts des différents scénarios climatiques et sylvicoles (n° GIP ECOFOR n°3/2001)*, GICC 2001, Bordeaux.
- ▣ **LUYSSAERT, S., MARIE, G., VALADE, A., CHEN, Y.-Y., DJOMO, S.N., RYDER, J., OTTO, J., NAUDTS, K., LANSØ, A.S., GHATTAS, J., MCGRATH, M.J.**, 2018, Trade-offs in using European forests to meet climate objectives, *Nature*, 562, 259, disponible sur : <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0577-1>
- ▣ **MILLAR, R.J., FUGLESTVEDT, J.S., FRIEDLINGSTEIN, P., ROGELJ, J., GRUBB, M.J., MATTHEWS, H.D., SKEIE, R.B., FORSTER, P.M., FRAME, D.J., ALLEN, M.R.**, 2017, Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 C, *Nat. Geosci.*, n° 10, 741.
- ▣ **PRETZSCH, H.**, 2009, *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*, Springer Science & Business Media.
- ▣ **ROUX, A., DHÔTE, J.-F., ACHAT, D., BASTICK, C., COLIN, A., BAILLY, A., BASTIEN, J.-C., BERTHELOT, A., BRÉDA, N., CAURLA, S., CARNUS, J.-M., GARDINER, B., JACTEL, H., LEBAN, J.-M., LOBIANCO, A., LOUSTAU, D., MEREDIEU, C., MARÇAIS, B., MARTEL, S., MOISY, C., PÂQUES, L., PICART-DESHORS, D., RIGOLOU, E., SAINT-ANDRÉ, L., SCHMITT, B.**, 2017, *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050*, INRA, IGN.
- ▣ **VALADE, A., BELLASSEN, V., MAGAND, C., LUYSSAERT, S.**, 2017, Sustaining the sequestration efficiency of the European forest sector, *For. Ecol. Manag.*, n° 405, p. 44-55.
- ▣ **VALADE, A., LUYSSAERT, S., VALLET, P., NJAKOU DJOMO, S., JESUS VAN DER KELLEN, I., BELLASSEN, V.**, 2018, Carbon costs and benefits of France's biomass energy production targets, *Carbon Balance Manag.*, 13, 26, disponible sur : <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0113-5>
- ▣ **WYKOFF, W.R.**, 1990, A Basal Area Increment Model for Individual Conifers in the Northern Rocky Mountains, *For. Sci.*, n° 36, p. 1077-1104.

Gérer les forêts pour atteindre les objectifs climatiques : des compromis à trouver

Mise en avant lors de la COP21 de Paris en 2015 pour sa capacité à absorber du carbone de l'atmosphère, la gestion durable des forêts est considérée comme un moyen de ralentir le réchauffement climatique. Or, une étude publiée en octobre 2018 dans la revue *Nature* a montré que la gestion des forêts européennes pour maximiser leur puits de carbone n'affecterait pas, ou peu, le climat et qu'une telle stratégie impliquerait une diminution considérable de la production de bois.

Les risques pour les sociétés humaines du changement climatique ont beau être évidents, les activités humaines émettent chaque année plus de carbone. En 2017, ce sont 36 Gt CO₂ (+1,3% par rapport à 2016) qui ont été libérées, s'ajoutant au carbone accumulé depuis la révolution industrielle pour augmenter encore la concentration atmosphérique de CO₂ évaluée à 409 ppm en décembre 2018. Pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris (UNFCCC¹, 2015) et limiter l'augmentation des températures à + 2°C par rapport à la période préindustrielle, de nombreux États misent sur la capacité des forêts à absorber du carbone et ainsi à compenser en partie des émissions qui ne diminuent pas assez. Contrairement aux émissions fossiles qui n'interagissent avec l'atmosphère que par le biais du carbone, les forêts transpirent par leurs feuilles l'eau qu'elles ont puisé dans le sol et interceptent le rayonnement solaire, en absorbant une partie, et en réfléchissant une autre, selon les caractéristiques de leur feuillage, de sorte que des changements de la structure de la forêt affectent non seulement le cycle du carbone mais aussi les bilans d'eau et d'énergie (Pielke *et al.*, 2011 ; Naudts *et al.*, 2016). Dans une étude publiée en octobre 2018 dans la revue *Nature* (Luyssaert *et al.*, 2018), une équipe menée par S. Luyssaert de la *Vrije Universiteit* aux Pays-Bas a simulé différents scénarios de gestion forestière en Europe en

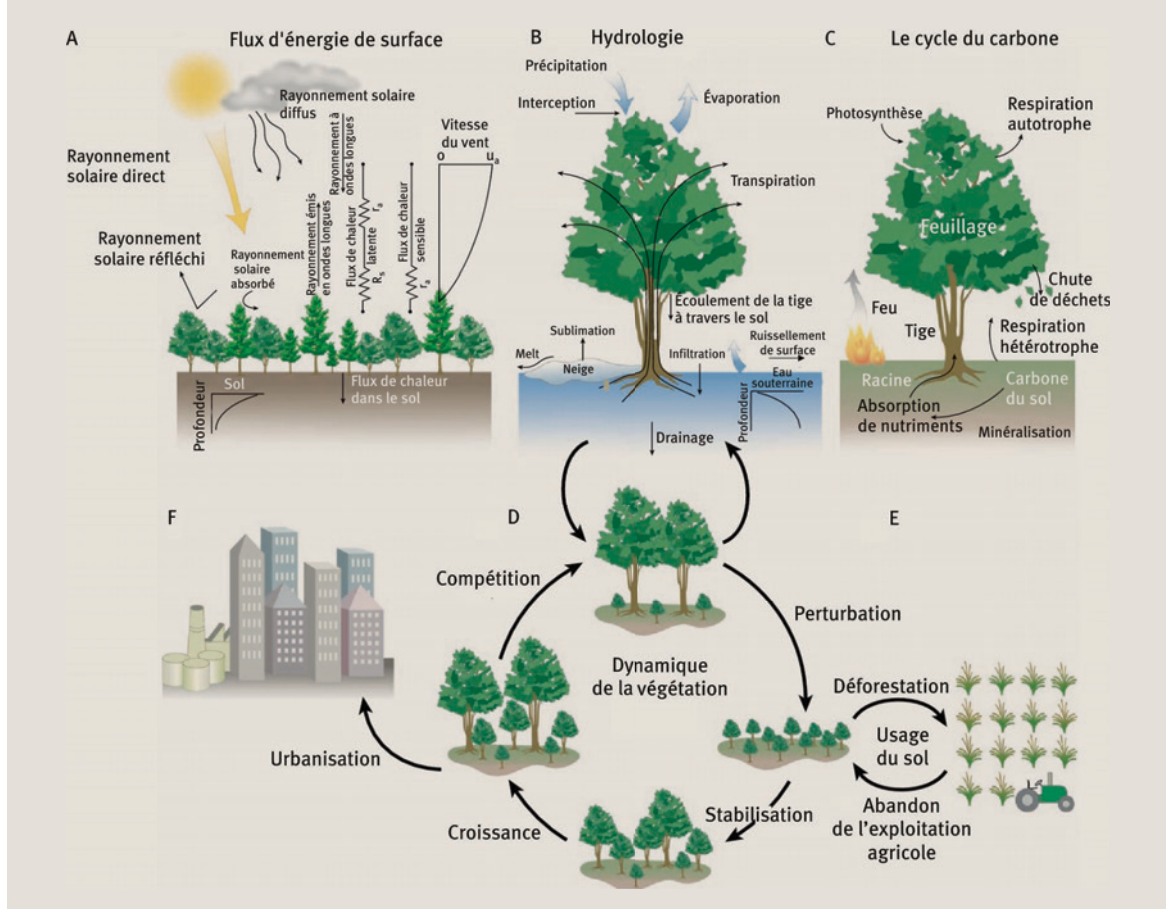
prenant en compte à la fois la séquestration de carbone et les effets biophysiques des forêts sur le climat pour estimer la contribution de la gestion forestière européenne à l'atteinte des objectifs de l'Accord de Paris.

Interprétation physique des objectifs de l'Accord de Paris

L'Accord de Paris ratifié par 183 pays à ce jour définit les objectifs de lutte contre le changement climatique dans une suite d'articles qui décrivent les mesures à mettre en œuvre. Les articles 2, 5 et 7 en particulier placent la forêt en position d'acteur majeur dans la lutte contre le changement climatique. La cible première des mesures de lutte contre le changement climatique est la température moyenne globale. En termes physiques, la température moyenne globale est le résultat de l'écart entre la quantité d'énergie solaire atteignant la surface terrestre et la quantité d'énergie solaire émise au sommet de l'atmosphère. Le secteur forestier contribue donc à l'article 2 si ses activités permettent de réduire le déséquilibre radiatif au sommet de l'atmosphère. L'article 5 de l'Accord de Paris mentionne explicitement les forêts parmi les réservoirs et puits de carbone à préserver et amplifier.

1. United Nations Framework Convention on Climate Change.

1 Échanges d'énergie et d'eau entre les forêts et l'atmosphère (d'après Bonan, 2008).



Le secteur forestier contribuerait donc à atteindre les objectifs de l'article 5 en augmentant la quantité de carbone stockée à la fois dans les forêts et *via* les produits bois et en évitant les émissions d'autres secteurs *via* la substitution. Dans l'article 7 qui décrit l'adaptation au changement climatique, un des objectifs mis en avant est celui de réduire au maximum le besoin d'adaptation, c'est-à-dire, de maintenir un climat local compatible avec le fonctionnement des sociétés humaines. Le secteur forestier pourrait contribuer à ce critère en limitant l'augmentation de la température dans la plus basse couche de l'atmosphère (figure 1).

Modéliser la gestion forestière européenne

Pour tester différents modes de gestion forestière à l'échelle de l'Europe et chercher celle qui permet de limiter au maximum le changement climatique selon les critères de l'Accord de Paris, les chercheurs ont amélioré un modèle numérique complexe qui calcule les quantités de carbone, d'énergie et d'eau capturées ou relâchées par les surfaces continentales (Naudts *et al.*, 2015). Le modèle contient les équations issues de la physique (changements de température, évaporation et précipitations) et de la biologie (photosynthèse, transformation du carbone du sol, distribution du carbone dans les racines, le tronc, les branches, les feuilles) qui décrivent le fonctionnement des écosystèmes et du climat. Des données sont fournies au modèle sous forme de carte pixellisée

(pixels de 50 km de côté) pour indiquer au modèle la distribution géographique des essences d'arbres et l'âge approximatif des peuplements, le type de sol, et la gestion forestière opérée. Ce modèle est associé à un module d'analyse de cycle de vie qui estime le devenir du bois récolté, la durée de vie au bout de laquelle le carbone est réémis dans l'atmosphère et les émissions évitées quand les produits bois remplacent des alternatives plus émettrices de carbone. Le modèle calcule donc non seulement la quantité de carbone séquestrée par le filière forêt-bois dans son ensemble mais aussi l'impact d'un changement de structure de la forêt sur le climat.

Dans le modèle, la gestion forestière de chaque pixel peut être modifiée quand une opportunité de récolte se présente, soit parce que le diamètre prédéfini pour la coupe rase est atteint, soit en cas de dépérissement. Plusieurs options sont alors testées : plantation d'un peuplement de l'essence récoltée ou son remplacement par l'essence feuillue ou conifère la plus présente dans ce pixel. Un type de gestion est choisi parmi futaie régulière, taillis et absence de gestion. En forçant le modèle successivement avec toutes les combinaisons de ces scénarios de gestion forestière, les chercheurs ont reconstruit trois portfolios alternatifs. Chaque portfolio combine les gestions de chaque pixel qui réalisent un même objectif : maximiser la séquestration de carbone, maximiser la réflexion du rayonnement solaire, ou minimiser la température à la surface.

► **Séquestration de CO₂ n'est pas toujours synonyme de refroidissement**

En 2010 en Europe, 56 % des forêts sont des conifères et 44 % des feuillus, 15 % de la surface forestière n'est sujette à aucune coupe, 14 % est gérée en taillis et 71 % en futaie. En maintenant cette distribution des essences et le type de gestion et d'utilisation du bois à l'identique, on estime que d'ici à 2100, le secteur forestier aura séquestré 4,7 PgC.

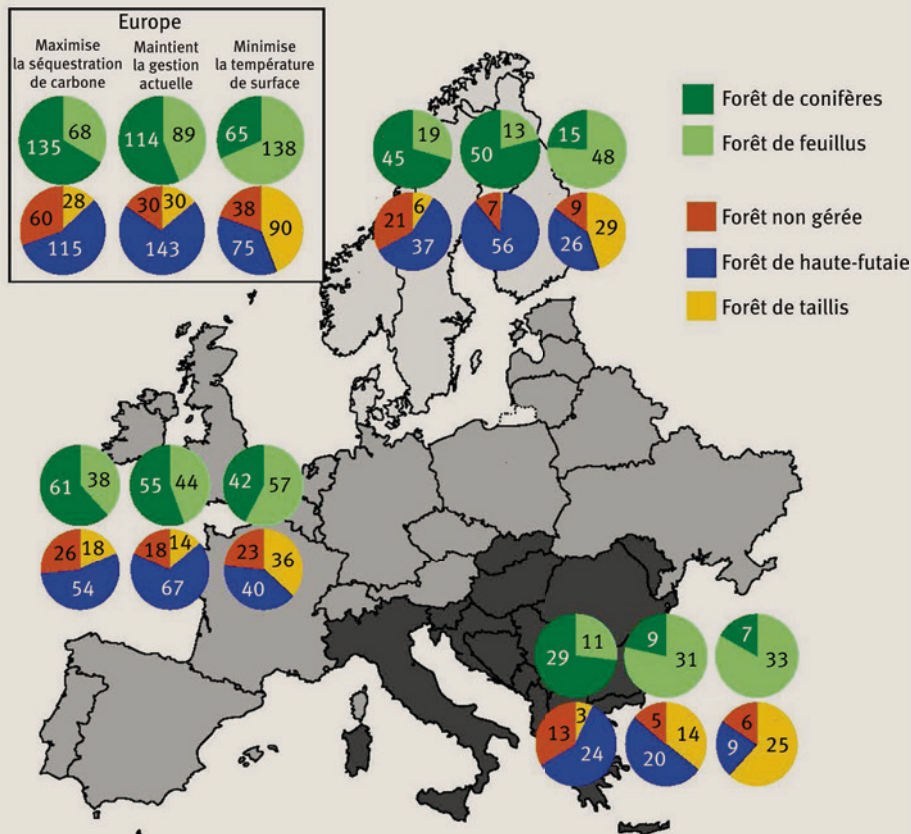
Le deuxième scénario qui permet de maximiser la séquestration de carbone demanderait la conversion de 209 000 km² de feuillus en conifères ainsi que l'arrêt de la gestion de 300 000 km² de forêt à l'échelle de l'Europe. Ce portfolio est cependant loin d'être idéal. En plus de conduire à une réduction de la récolte de bois à l'échelle européenne de 12 %, et malgré l'absorption additionnelle de 7 PgC de l'atmosphère d'ici 2100, le refroidissement imputable au CO₂ absorbé serait négligeable à la fois à l'échelle locale et à l'échelle globale. En effet, les effets biophysiques sur la vitesse du vent et l'humidité de l'air dans la basse atmosphère seraient réchauffant et compenseraient la diminution de l'effet de serre.

Alternativement, une gestion visant à diminuer la température locale est également possible. Il faudrait dans ce cas convertir principalement des forêts de conifères

en feuillus, pour provoquer un modeste refroidissement de 0,3°C au printemps en Scandinavie et dans les Alpes. En effet, dans ces régions enneigées une partie de l'année, les feuillus qui perdent leurs feuilles pendant la saison froide ont un effet refroidissant car le rayonnement solaire est réfléchi par la blancheur de la neige. Les conifères en revanche interceptent les rayons du soleil avant qu'ils n'atteignent la neige et provoquent ainsi un réchauffement de l'air qui les entoure. De plus, les feuilles sont en général plus claires que les aiguilles des conifères et réfléchissent donc d'avantage le rayonnement solaire. Si ce portfolio augmenterait la quantité de carbone séquestrée par le secteur forestier de 3,4 PgC par rapport au scénario de référence, ses effets locaux sur la température seraient cependant trop faibles pour être ressentis à l'échelle globale et conduiraient en outre à une diminution de 25 % de la récolte de bois.

Avec les scénarios de gestion testés, aucun portfolio permettant de diminuer le déséquilibre radiatif au sommet de l'atmosphère n'a pu être déterminé. En effet, dans le portfolio pour lequel la réflexion du rayonnement solaire à la surface était maximale, des nuages moins nombreux augmentent la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface, et le déséquilibre entre rayonnement entrant et sortant de l'atmosphère restait finalement le même.

② Composition en essences (disques haut) et en type de gestion (disques bas) des portfolios permettant de maximiser la séquestration de carbone (disques gauche) ou de minimiser la température de surface (disques droite).



① Adapter les forêts au climat futur : un défi pour la gestion forestière en Europe.



© V. Pagneux (INRAE)

Parmi les portfolios considérés, aucun ne permettait donc de remplir simultanément les critères de l'Accord de Paris, à savoir réduire la température globale, la température de surface et diminuer les émissions de carbone (figure 2). La réalisation de chaque critère vient au prix d'un compromis sur un autre des objectifs.

climat futur pour maintenir la production de bois et les services écologiques, sociaux et culturels fournis, tout en limitant les possibles dommages provoqués par les feux, tempêtes, maladies et sécheresses. ■

Conclusion

La gestion forestière n'affecte pas seulement le stockage de carbone de la filière bois. Via les modifications de la structure et des caractéristiques des forêts, le cycle de l'eau, les échanges d'énergie et la circulation des vents dans la basse atmosphère sont également modifiés. La prise en compte de tous ces effets met en évidence que la diminution des émissions du carbone forestier n'est pas toujours synonyme de refroidissement climatique. Les bénéfices climatiques de la gestion durable des forêts européennes seront modestes et locaux plutôt que globaux. Le rôle principal de la gestion forestière en Europe dans les prochaines décennies ne semble donc pas de protéger le climat, mais plutôt d'adapter les forêts au

Les auteurs

Aude VALADE

CREAF, Ecological and Forestry Applications Research Centre, Campus UAB, Edifici C., 08193 Bellaterra, Barcelone, Espagne.
✉ a.valade@creaf.uab.cat

Guillaume MARIE

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement LSCE/IPSL, UMR CEA-CNRS-UVSQ 8212, CEA Saclay, Site de l'Orme des Merisiers, Chemin de Saint Aubin, 91191 Gif sur Yvette Cedex, France.
✉ guillaume.marie@lsce.ipsl.fr

EN SAVOIR PLUS...

- **BONAN, G.B.**, 2008, Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, *Science*, vol. 320, n° 5882, p. 1444-1449.
- **JACKSON, R.B., JOBBÁGY, E.G., AVISSAR, R., ROY, S.B., BARRETT, D.J., COOK, C.W., FARLEY, K.A., LE MAITRE, D.C., MCCARL, B.A., MURRAY, B.C.**, 2005, Trading water for carbon with biological carbon sequestration, *Science*, vol. 310, n° 5756, p. 1944-1947.
- **LUYSSAERT, S., MARIE, G., VALADE, A., CHEN, Y., NJAKOU DJOMO, S., RYDER, J., OTTO, J., NAUDTS, K., LANSØ, A.S., GHATTAS, J., MCGRATH, M.J.**, 2018, Trade-offs in using European forests to meet climate objectives, *Nature*, vol. 562, n° 7726, p. 259-262, disponible sur : <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0577-1>
- **NAUDTS, K., RYDER, J., MC GRATH, M.J., OTTO, J., CHEN, Y., VALADE, A., BELLASSEN, V., BERHONGARAY, G., BÖNISCH, G., CAMPIOLI, M., GHATTAS, J., DE GROOTE, T., HAVERD, V., KATTGE, J., MACBEAN, N., MAIGNAN, F., MERILÄ, P., PENUELAS, J., PEYLIN, P., PINTY, B., PRETZSCH, H., SCHULZE, E.D., SOLYGA, D., VUICHARD, N., YAN, Y., LUYSSAERT, S.**, 2015, A vertically discretised canopy description for ORCHIDEE (SVN r2290) and the modifications to the energy, water and carbon fluxes, *Geosci. Model Dev.*, n° 8, p. 2035-2065, disponible sur : <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2035-2015>
- **NAUDTS, K., CHEN, Y., MCGRATH, M.J., RYDER, J., VALADE, A., OTTO, J., LUYSSAERT, S.**, 2016, Europe's forest management did not mitigate climate warming, *Science*, vol. 351, n° 6273, p. 597-600.
- **PIELKE, Sr, R.A., PITMAN, A., NIYOGI, D., MAHMOOD, R., MC ALPINE, C., HOSSAIN, F., GOLDEWIJK, K.K., NAIR, U., BETTS, R., FALL, S., REICHSTEIN, M., KABAT, P., DE NOBLET, N.**, 2011, Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence, *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, vol. 2, n° 6, p. 828-850, disponible sur : <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- **UNFCCC**, 2015, Adoption of the Paris agreement.



Changement climatique : la biodiversité forestière à la croisée des enjeux de conservation et d'atténuation.

RISQUES ENVIRONNEMENTAUX ASSOCIÉS AUX STRATÉGIES SYLVICOLES D'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique a des impacts directs sur les essences forestières, et au-delà sur l'ensemble des espèces végétales et animales qui vivent dans les forêts. Par ailleurs, les stratégies d'atténuation du changement climatique ne sont pas neutres pour la biodiversité forestière. Ainsi, par exemple, les vieux peuplements sont cruciaux pour la biodiversité forestière. Or leur maintien n'est pas toujours compatible avec le développement d'une filière courte d'exploitation du bois pour le bâti ou l'énergie.

Dans ce dernier article, les auteurs font le point sur le sujet, en explorant les potentiels d'antagonismes et de synergies entre conservation de la biodiversité et 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

Changement climatique : la biodiversité forestière à la croisée des enjeux de conservation et d'atténuation

On peut distinguer différentes stratégies de séquestration de carbone par la filière bois-forêt : celles fondées sur la volonté d'augmenter le stock de carbone contenu dans les forêts et celles fondées sur la volonté d'exporter rapidement du carbone des forêts gérées vers d'autres compartiments d'utilisation durable du bois comme le bois-énergie ou le bois de construction. Ces différentes stratégies de séquestration et leur combinaison, vouées à augmenter la fonction de puits de carbone des forêts, sont-elles favorables ou antagonistes à la conservation de la biodiversité ? Dans cet article, les auteurs font le point sur le sujet, en explorant de façon fine les potentiels d'antagonismes et de synergies entre conservation de la biodiversité et atténuation du changement climatique.

Le changement climatique affecte directement la biodiversité

Les changements climatiques agissent sur la biodiversité des forêts via deux grands types de phénomènes : d'une part, les variations interannuelles de paramètres climatiques relatifs à la température et au niveau de précipitation (par ex. moyenne annuelle, moyennes saisonnières etc.), d'autre part, l'augmentation en fréquence d'événements climatiques extrêmes, notamment les fortes chaleurs (figure 1). Ces changements affectent la croissance et l'état sanitaire des arbres forestiers. La hausse des températures annuelles et l'allongement des périodes de sécheresse estivales peuvent mener à une hausse locale de la mortalité des essences les moins robustes aux stress hydriques. De plus, les changements climatiques pourraient rendre les conditions locales favorables au développement de ravageurs et d'espèces exotiques envahissantes. Par exemple, dans l'est du Canada, la bourdaine (*Frangula alnus*) pourrait être à même de s'étendre vers le nord au-delà de sa distribution actuelle du fait d'hivers moins rigoureux. Elle pourrait alors nuire à la régénération forestière et altérer la biodiversité de la flore de sous-bois dans des régions jusqu'ici préservées. Plus généralement les changements du climat peuvent

modifier les relations compétitives entre les essences ligneuses et placer des espèces d'arbres jusqu'ici bien implantées dans une situation dominée menant à leur exclusion locale. L'ensemble de ces processus biotiques et abiotiques peut *in fine* mener à l'extinction locale des essences les plus affectées.

Les extinctions locales des essences ligneuses confrontées à de nouvelles conditions climatiques peuvent être en partie évitées par la plasticité phénotypique des essences (notamment via des décalages phénologiques) et la sélection génétique qui s'exerce sur la diversité des génotypes en leur sein. Le potentiel de résilience des peuplements aux changements du climat via le processus de sélection génétique est directement lié à leur diversité aux niveaux intra et inter-espèces (i.e. les mélanges d'essences).

Les extinctions d'origines biotique et abiotique, combinées au processus de dispersion des essences ligneuses, donnent lieu à un déplacement des aires de distribution des espèces d'arbres au fil du changement des conditions climatiques (Piedallu *et al.*, 2009). Dans un contexte d'augmentation de la température moyenne annuelle, on s'attend notamment à un décalage des distributions des essences vers les pôles et vers des altitudes plus élevées, ce

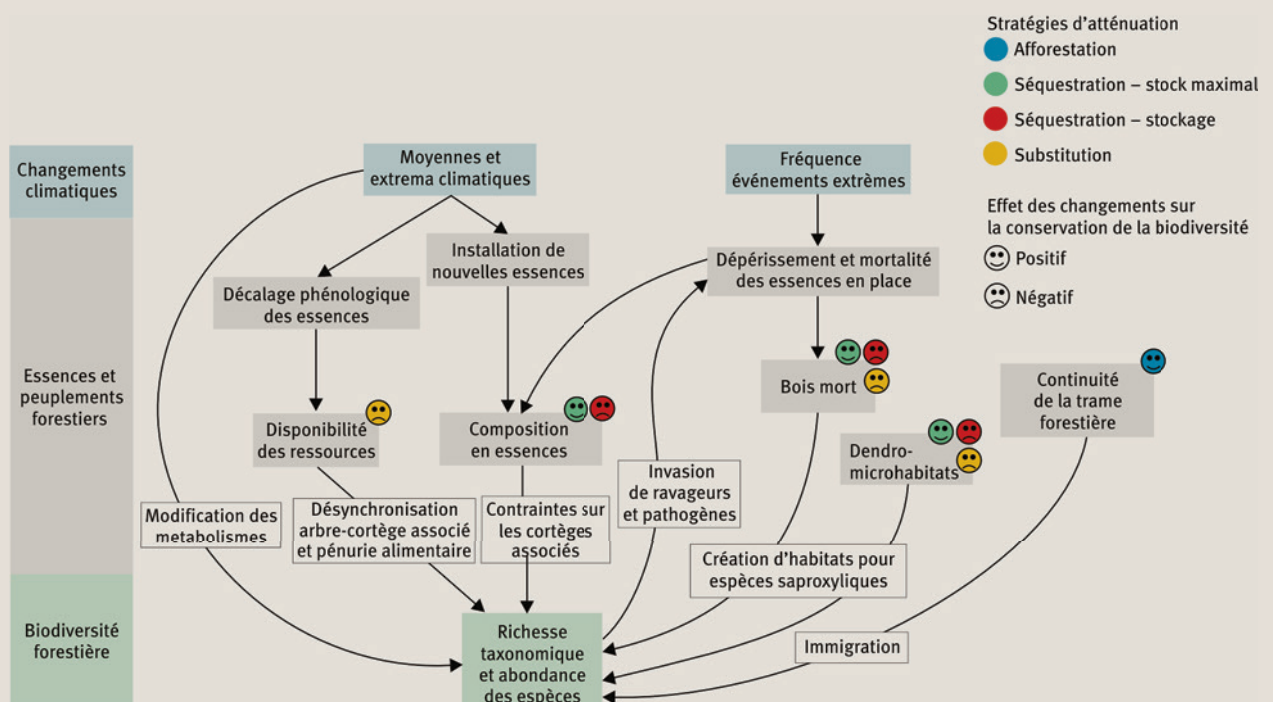
qui semble se vérifier dans les suivis de la flore à l'échelle européenne. On peut néanmoins trouver des exceptions à ces grandes tendances de déplacement suivant les contextes locaux, notamment lorsque la contrainte dominante qui s'exerce sur les arbres n'est pas la température (mais par exemple la ressource en eau). À l'heure actuelle, le développement d'approches prédictives intégrant l'ensemble des processus de réponse des essences ligneuses aux changements climatiques (adaptation et dispersion) constitue un front de recherche dynamique.

Les effets directs du changement climatique sont susceptibles d'affecter l'ensemble des espèces forestières (figure 1), au-delà du cas des arbres évoqué plus haut. Par exemple, dans un contexte de hausse des températures, les populations d'insectes forestiers sont susceptibles de voir leur métabolisme et leur cycle de vie s'accroître – leur permettant d'accroître le nombre de générations annuelles – et la mortalité hivernale baisser. Ainsi, de nombreuses espèces pourraient s'étendre dans des régions jusqu'ici trop froides (comme c'est déjà le cas pour la chenille processionnaire du pin en France, qui progresse à une vitesse de 2,6 km/an vers le nord en moyenne depuis 1972, avec une accélération à 5,5 km/an depuis le début des années 2000 (Roques et Augé-Rozenberg, 2019). En revanche, d'autres composantes des changements climatiques peuvent au contraire s'avérer négatifs pour les insectes : la multiplication des anomalies journalières de températures pourrait être une cause de mortalité accrue des œufs et des larves chez certaines espèces. Par ailleurs, certains insectes défoliateurs printaniers (par exemple, les chenilles de nombreux

lépidoptères) pourraient s'avérer incapables d'adapter leur cycle de vie au débourrement précoce des arbres, même si d'autres espèces montrent d'ores et déjà une remarquable capacité d'adaptation à ces changements phénologiques. Ainsi, on s'attend, chez les insectes mais plus généralement dans l'ensemble de l'écosystème forestier, à des changements de composition spécifique avec les changements climatiques (figure 1).

Néanmoins, la présence d'un couvert forestier est susceptible d'induire un effet tampon sur les conditions climatiques sous la canopée, comme cela a été observé sur la flore vasculaire. Cependant les effets indirects induits par (i) les changements de la composition en essences et de la structure des peuplements forestiers et (ii) les réponses physiologiques et phénologiques des essences sur les cortèges d'espèces associés sont potentiellement forts. Par exemple, la composition en essences des peuplements forestiers explique une part importante de la variabilité spatiale de la composition en espèces des communautés, notamment pour la flore et les bryophytes. On peut donc penser que les modifications de composition des peuplements à prévoir vont induire un décalage des aires de répartition des espèces spécialisées sur une ou un petit nombre d'essences. De plus, la redistribution spatiale des espèces forestières induite par le déplacement des essences ligneuses crée de nouveaux réseaux d'interaction entre les organismes au sein de l'écosystème forestier. Les conséquences de ces changements à l'échelle locale en matière de biodiversité et de fonctions écologiques restent difficiles à prédire en toute généralité.

1 Effets du changement climatique et des stratégies forestières de son atténuation sur la biodiversité associée aux peuplements forestiers. Les pastilles de couleur signalent les composantes de l'écosystème forestier affectées par ces stratégies, et le sens de l'effet sur la biodiversité.



► Comme rappelé plus haut, les changements climatiques ne concernent pas seulement l'évolution des variables climatiques moyennes, mais également l'augmentation en fréquence d'événements climatiques extrêmes tels que les fortes chaleurs. Ces événements climatiques extrêmes peuvent s'accompagner d'une forte mortalité ponctuelle des arbres, du fait du stress hydrique. Ils favorisent ainsi la création de bois mort, et peuvent s'avérer bénéfiques à différents groupes taxonomiques, notamment les organismes saproxyliques, qui dépendent du bois mort pour tout ou partie de leur cycle de vie. On a ainsi émergence d'une ambivalence des perturbations, pouvant s'avérer être un bénéfique pour le compartiment saproxylique de la biodiversité forestière, mais également un coût pour les services écosystémiques classiquement associés à l'écosystème forestier (par exemple, la production de bois ou le stockage du carbone). Elles constituent un véritable dilemme pour une gestion multifonctionnelle des forêts.

Les stratégies d'atténuation du changement climatique ne sont pas neutres pour la biodiversité forestière

L'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, notamment le CO₂, contribue aux processus sous-jacents au changement climatique. La gestion forestière peut contribuer activement à endiguer cette composante du processus, en mettant en œuvre deux grands types de stratégies. Les stratégies de séquestration d'une part consistent en la captation du CO₂ atmosphérique dans la création de biomasse ligneuse. Les stratégies de substitution sont des stratégies de remplacement : remplacement de combustible fossile par du bois-énergie, ou remplacement de matériaux à forte empreinte « carbone » par le bois matériau. Le rôle de ces stratégies pour atténuer le changement climatique a fait l'objet de synthèses (e.g. Roux *et al.*, 2017, à l'échelle nationale). Leur mise en œuvre peut contribuer à atténuer les implications du changement climatique pour la biodiversité forestière développées plus haut, mais aussi parfois constituer une pression supplémentaire pour les espèces forestières. Il s'agit donc d'explorer de façon fine les potentiels antagonismes et synergies entre conservation de la biodiversité et atténuation du changement climatique.

Effets des stratégies de séquestration du carbone en forêt sur la biodiversité

L'augmentation de la capacité de séquestration du carbone par la forêt est une des voies stratégiques d'atténuation du changement climatique. Lors de la photosynthèse, les arbres (et plus généralement toutes les plantes) fixent en effet le carbone du CO₂ atmosphérique pour construire leurs tissus carbonés, et contribuent ainsi à diminuer la concentration atmosphérique de ce gaz à effet de serre. Le carbone est alors séquestré pendant des durées variables dans la biomasse, puis dans les sols, avant de retourner à l'atmosphère lors de la décomposition (ou de la combustion). Chaque année, les forêts européennes absorbent ainsi l'équivalent de 10 % des émissions de CO₂ du territoire. Le taux de séquestration du carbone par les forêts du monde a été estimé entre 2000 et 2007 à 4,1 GtC/an, soit 30 % des émissions de combustion des énergies fossiles en 2010. Signalons

toutefois que plusieurs études récentes montrent que le ralentissement du réchauffement climatique par les forêts *via* la baisse de l'effet de serre et l'augmentation de la nébulosité atmosphérique, est annulé par la réduction d'albedo, sauf dans les forêts tropicales.

On peut distinguer différentes stratégies de séquestration : celles fondées sur la volonté d'augmenter le stock de carbone contenu dans les forêts (stratégies dites de « stock maximal ») et celles fondées sur la volonté d'exporter rapidement du carbone des forêts gérées vers d'autres compartiments d'utilisation durable du bois comme le bois de construction (stratégie de « stockage »). Ces différentes stratégies et leur combinaison, vouées à augmenter la fonction de puits de carbone des forêts, sont-elles favorables ou antagonistes à la conservation de la biodiversité ?

Stratégies de séquestration du stock maximal

La stratégie du stock maximal se consacre au maintien sur pied de peuplements forestiers détenant un important stock de carbone. Quel que soit le biome, le stock de carbone forestier (sol inclus) augmente avec l'âge des arbres en place (maturité du peuplement). Les stocks de carbone sont plus élevés (par hectare) dans les vieux peuplements et les peuplements dominés par de gros arbres. Or l'importance des vieilles forêts (« *old growth forests* ») et des forêts à dynamique naturelle pour la conservation de la biodiversité forestière sont reconnues de longue date. Ainsi, il existe un fort niveau de compatibilité entre stratégies du stock maximal fondées sur le vieillissement et conservation de la biodiversité forestière.

D'après une récente étude dans les forêts subtropicales du sud-est de la Chine, les peuplements riches en espèces ligneuses montrent des stocks et des flux de carbone plus importants que les forêts peu diversifiées. Pour chaque espèce d'arbre supplémentaire, le stock total de carbone augmente de 6,4 % ! D'autre part, le stock de carbone de futaies régulières mono-spécifiques n'atteint que la moitié (pour des forêts de 200 ans), voire le tiers (pour des forêts de 400 ans) du stock de forêts subnaturelles (plurispécifiques) du même âge. Par ailleurs, la diversité des essences serait un facteur favorable à la biodiversité dans les forêts gérées. Ici encore, on constate donc une compatibilité entre stockage fondé sur le mélange d'essences et conservation de la biodiversité.

À une échelle spatiale plus large, les peuplements résineux et feuillus ne peuvent être globalement hiérarchisés quant à leur capacité de séquestration du carbone (Inventaire forestier national, 2005). De plus, ils offrent des ressources complémentaires à la biodiversité d'un territoire. Par conséquent, une mosaïque paysagère de feuillus et de résineux peut s'avérer neutre en termes de stockage de carbone et favorable à la biodiversité.

Enfin, parmi les types de traitement majoritaires en France, ce sont les mélanges futaie-taillis et les futaies régulières qui stockent le plus de carbone à l'hectare : légèrement plus que les futaies irrégulières, et deux fois plus que les taillis simples (Inventaire forestier national, 2005). Cependant, la diversité des traitements est prônée, à l'échelle des paysages, pour conserver la biodiversité. Par conséquent, des objectifs de conservation de la biodiversité forestière et de séquestration fondés sur la structure peuvent mener à des choix de gestion divergents.

La stratégie de séquestration du stock maximal pourrait être réfléchiée en termes de longévité maximale (rétention longue durée du carbone) plutôt qu'en termes de densité. Nous ne connaissons pas de réflexions sur l'optimisation sylvicole de cette durabilité du stock, intégrant notamment le risque de déstockage rapide en cas de catastrophe naturelle (tempête, incendie...).

Stratégies de séquestration par stockage

La stratégie de séquestration par stockage repose sur l'idée d'extraire rapidement du carbone forestier – via l'exploitation des peuplements à stock fort et flux de stockage faible – pour le capitaliser dans des usages durables du bois, comme la construction, l'aménagement intérieur et extérieur. Cette perte de carbone des forêts est compensée à court terme par l'implantation de peuplements à forte capacité de croissance permettant un maintien du stock global de carbone forestier et une captation rapide du CO₂ atmosphérique. Il était en effet généralement admis que le flux de stockage (i.e. la vitesse de captation du CO₂) est maximal dans les peuplements jeunes et que le bilan carbone des peuplements âgés est neutre, dans la mesure où la respiration (émission de carbone) annulerait les effets de la photosynthèse (séquestration de carbone) chez les vieux arbres.

Cette stratégie mène à un rajeunissement des peuplements forestiers, ce qui a un effet négatif sur la biodiversité forestière. Cet effet est modulé suivant l'antécédent d'usage du sol sur les parcelles replantées avec des peuplements à croissance rapide. En particulier, l'afforestation de terres agricoles ou le renouvellement après coupe de peuplements forestiers ont un impact différent. Une plantation d'essence exotique à croissance rapide sera moins néfaste pour la biodiversité si elle remplace un peuplement déjà pauvre en espèces (e.g. forêt récente d'essence exotique) que si elle remplace une forêt ancienne ou alluviale d'essence autochtone riche en bois morts et dendromicrohabitats, à haute valeur écologique. On sait en effet que la biodiversité associée aux peuplements d'essences exotiques est en moyenne plus faible que dans les peuplements indigènes, notamment du fait de la faible durée de coévolution entre l'essence ligneuse exotique et le cortège d'espèces forestières autochtone.

Les postulats sur lesquels se fonde la stratégie de stockage sont néanmoins controversés. En effet, il a été constaté dans la littérature scientifique récente que le pic d'émission de carbone par respiration survient dans les jeunes et non dans les vieux peuplements. De plus, des méta-analyses, des travaux de modélisations et des expérimentations récentes vont dans le sens d'un flux de stockage de carbone accru dans les peuplements âgés (par rapport aux plus jeunes), en vertu des paramètres suivants : accroissement annuel, surface photosynthétique, activité biologique des sols... D'après Stephenson *et al.* (2014), à l'échelle de l'arbre, le flux de stockage du carbone augmente avec l'âge et la taille pour la plupart des espèces d'arbres. Les gros arbres sont donc non seulement d'importants puits de carbone, mais ils fixent également le carbone plus rapidement que les petits arbres. Toutefois, à l'échelle du peuplement, cette supériorité des gros arbres sur les petits est modérée par une densité d'arbres plus faible, mais le bilan carbone net des vieilles forêts (jusqu'à 800 ans, et incluant les sols) est positif et elles continuent

donc à assimiler du carbone, après un pic de flux de stockage net autour de 80 ans. Lors de la conversion de vieilles forêts en forêts jeunes, au déstockage immédiat est également associée la réduction de la capacité de stockage pendant au moins 200 ans. Le rôle important de l'activité biologique des sols dans les vieilles forêts est fréquemment mis en avant. Rappelons que le stock de carbone forestier se situe à 43 % dans la biomasse, et à 57 % dans les sols, et que 10 % du carbone du sol est contenu dans l'humus (incl. la litière) et 90 % dans les horizons organo-minéraux jusqu'à 30 cm de profondeur (Inventaire forestier national, 2005).

Comme soutenu dans le paragraphe précédent, les peuplements vieux et/ou dominés par les gros arbres sont cruciaux pour la biodiversité forestière. Ainsi, une préservation des vieux peuplements à la fois pour le stock de carbone qu'ils représentent et pour le flux de stockage qu'ils continuent à générer, pourrait s'avérer une stratégie de gestion pertinente tant pour des objectifs de conservation de la biodiversité que de séquestration du carbone.

Effet des stratégies de substitution (promotion du bois-énergie en remplacement des énergies fossiles) sur la biodiversité

Les stratégies de substitution consistent à promouvoir l'utilisation du bois-énergie en remplacement des usages de combustibles fossiles ou de bois matériau en remplacement de matériaux à forte empreinte carbone. À l'échelle internationale, l'utilisation accrue de sources d'énergie renouvelables en substitution des sources d'énergie fossile mène à des pratiques mobilisant toutes les parties de l'arbre, jusqu'aux plus petits branchages (appelés « menus bois ») ou aux souches, qui étaient traditionnellement maintenus en forêt. En France, le marché de la plaquette forestière est alimenté à plus de 40 % par des exploitations arbre-entiers en taillis simples, futaies régulières feuillues ou résineuses, mélanges futaies feuillues-taillis, ainsi que par des exploitations de houppiers après récolte de grumes. Les récoltes de souches, encore minoritaires, se développent (Landes, Limousin).

Questions soulevées

Par rapport à une exploitation traditionnelle, ces récoltes risquent de modifier à court et moyen termes la quantité et le profil de bois mort, non seulement par la récolte additionnelle de menus bois ou de souches, mais aussi par les effets d'une mécanisation accrue induisant la fragmentation des bois morts préexistants par les engins. Par ailleurs, le rajeunissement des peuplements promu par les stratégies de stockage et de prélèvements accrus pourrait se traduire par une baisse des âges d'exploitabilité (qui se traduirait par une moindre présence de gros et vieux arbres susceptibles d'alimenter le stock de bois mort par mortalité de grosses branches ou des arbres eux-mêmes). La combinaison des effets de ces stratégies sur le profil de bois mort reste à approfondir, notamment dans une perspective de conservation de la biodiversité. En effet, on sait que le bois mort est un support crucial de biodiversité forestière – un quart des espèces forestières sont saproxyliques. On sait aussi (cf. synthèses dans Landmann et Nivet, 2014 et Michaels, 2018) que ce n'est pas seulement le volume total de bois mort qui compte mais aussi la diversité des types de bois mort : même si la présence de chandelles et de grosses pièces de bois

► mort, maillons faibles en forêt exploitées, est particulièrement favorable à la biodiversité, les menus bois et les souches ont aussi leur rôle à jouer dans la capacité d'accueil de la biodiversité. Ainsi, petits et gros bois morts n'hébergent pas les mêmes communautés ; certains insectes sont spécialisés dans les petits bois morts ensoleillés, et les menus bois abritent une part importante des cortèges d'ascomycètes. Les tas de branchages fournissent aussi le gîte et le couvert à d'autres espèces : abri de rongeurs, hivernage d'insectes du sol, aire de chasse de mammifères carnivores, perchoirs et sites de nidification d'oiseaux. De même, les souches hébergent des assemblages d'espèces différents et plus riches que ceux des petits bois morts au sol, en particulier chez les conifères (Ranius *et al.*, 2018 ; en pessière boréale). Elles se décomposent lentement et constituent, dans un contexte forestier parfois pauvre en gros bois mort, un habitat de substitution pour des organismes saproxyliques. Ainsi, dans les plantations de pin maritime des Landes de Gascogne, les souches hébergent à elles seules plus de 80 % des espèces d'insectes rencontrées dans les bois morts de divers types. Dans les jeunes peuplements, elles constituent l'essentiel des grosses pièces de bois mort, assurant la continuité d'habitat dans l'espace et dans le temps au moment de la régénération. Pour l'Europe, la synthèse de Michaels (2018) conclut que la généralisation des récoltes de rémanents menacerait la quantité et la diversité des habitats requis par les espèces saproxyliques. Enfin, les branchages contiennent, à volume donné, trois fois plus d'éléments minéraux que les grumes : leur dégradation par les micro-organismes du sol est donc cruciale pour la fertilité des sols. Comme les autres sources de matière organique, ils participent aussi à la colonisation du sol par les mycorhizes, indispensables à la croissance des arbres.

Que sait-on de l'effet des exports de menus bois et souches sur la biodiversité ?

La plupart des études publiées concernent la récolte de rémanents (après récolte de grumes, et plus rarement par récolte d'arbres entiers) en forêts boréales. Très peu d'études concernent les forêts tempérées et encore moins le contexte français.

Les quelques études disponibles en forêt tempérée montrent que par comparaison avec une récolte conventionnelle, l'export de menus bois diminue à court terme et à l'échelle de la parcelle la diversité des communautés d'insectes saproxyliques, en modifiant aussi leur composition (Landmann et Nivet, 2014) ; en forêts tempérées et boréales, la méta-analyse de Riffell *et al.* (2011) citée dans Landmann et Nivet (2014) montre que l'export de rémanents de plus de 10 cm de diamètre affecte négativement les communautés d'oiseaux et l'abondance des invertébrés du sol, mais pas les mammifères, reptiles ou amphibiens. Si l'export de rémanents affecte peu les bryophytes communes, il a revanche des effets négatifs sur les hépatiques (plus sensibles à la sécheresse).

La flore est affectée par l'export de menus bois : à court terme le nombre d'espèces augmente *via* la mise en lumière, et à plus long terme la composition peut se modifier en réponse aux modifications de fertilité du sol (Ranius, 2018).

La récolte de menus bois et de souches est susceptible d'impacter non seulement les espèces qui vivent dans ces supports, mais aussi la faune du sol, par perturbation du sol lors du dessouchage ou du débardage. La littérature en forêt boréale documente aussi bien des effets négatifs que positifs (Landmann et Nivet, 2014) : impacts négatifs sur la mésofaune du sol (Ranius *et al.*, 2018), peu d'effets sur la diversité des coléoptères non

1 Recommandations pratiques encadrant l'intensification potentielle des récoltes de bois pour la production d'énergie en substitution des énergies fossiles.

ÉVITER	de généraliser les récoltes arbres-entiers ou de menus bois à toutes les coupes.
LIMITER	les quantités récoltées de menus-bois en fonction de la richesse minérale du sol (voire l'interdire dans les zones les plus sensibles).
LAISSER	une part de menus bois au sol et espacer les récoltes destinées à la production de plaquettes.
MAINTENIR	à l'échelle du paysage, des secteurs riches en menus bois mort, quitte à prélever plus ailleurs, plutôt que d'en appauvrir partout la quantité.
ÉPARGNER	les zones d'intérêt pour la biodiversité : zones cœurs de parcs nationaux, sites dédiés à la protection d'espèces dépendant du bois mort (réserves naturelles, arrêtés préfectoraux de protection de biotopes...), zones de protection spéciales et zones spéciales de conservation, îlots de vieux bois, espaces naturels sensibles, zones centrales de réserves de biosphère, zones aturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF) type 1 et zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO)...
RÉCOLTER	les rémanents en priorité dans des peuplements présentant des risques phytosanitaires.
RÉSERVER	la récolte de souches aux cas particuliers de récoltes sanitaires, en présence de pourritures racinaires.
MAINTENIR	une proportion de souches (10 % au moins) non récoltées, en l'absence de risques phytosanitaires.
MAINTENIR	les pièces de bois mort pré-existantes (chandelles, gros bois mort au sol, souches), sauf cas de force majeure lié à la sécurité ou aux risques sanitaires.
LAISSER	le bois mort des chandelles, qui seraient éventuellement abattues pour raison de sécurité, se décomposer sur place.

saprophytiques. La récolte de rémanents peut favoriser à moyen terme (7 ans) la diversité des communautés de carabes, avec toutefois un fort impact sur leur composition : plus d'espèces généralistes et moins d'espèces spécialistes des forêts.

En forêt boréale, les groupes les plus affectés par l'export de menus bois et souches sont les champignons, les insectes (notamment coléoptères), et dans une moindre mesure les lichens. Les espèces les plus sensibles sont des spécialistes (de gros bois morts ensoleillés, par exemple) ou des espèces à faibles capacités de dispersion. D'une manière générale, les effets négatifs sur les espèces d'intérêt conservatoire et sur la flore en forêt boréale sont dus avant tout à la coupe de vieux peuplements (en l'occurrence, coupe rase suivie de scarification du sol), et non à l'impact additionnel de la récolte de rémanents après coupe (Ranius *et al.*, 2018). Le contexte en France est sans doute différent, le modèle « coupe rase + scarification » n'étant pas prédominant.

Les impacts à long terme et à l'échelle du paysage sont mal connus. En forêt boréale, l'étude expérimentale de Allmer *et al.* (2009) citée dans Landmann et Nivet (2014) ne montre aucun effet de la récolte de rémanents sur la diversité des champignons saprophytes, vingt-cinq ans après. Des simulations en conditions boréales indiquent qu'une récolte intensive de menus bois et souches peuvent entraîner des extinctions d'espèces mais demandent à être validées empiriquement (Ranius *et al.*, 2018).

Actuellement, on manque en France de recul sur ces pratiques de récolte pour détecter des effets qui vont se produire dans les prochaines décennies. Il importe donc de suivre les effets de ces pratiques sur la biodiversité et, par précaution, de raisonner la récolte de ces compartiments (tableau 1).

Conclusion

Pour accompagner la transition énergétique sans nuire aux habitats d'espèces forestières, au stock de carbone et à la fertilité des sols, émerge en France un débat autour des intérêts d'une stratégie ségrégative (« *land sparing* »), comportant à la fois des territoires forestiers concentrant les récoltes intensives, et d'autres soumis à de contraintes fortes de prélèvement. Cette démarche remet en question le paragon de la gestion multi-fonctionnelle systématique. La contextualisation de la gestion forestière nécessitera la localisation des zones sur lesquelles imposer les contraintes, en raison de la sensibilité des sols ou des enjeux forts de biodiversité. ■

Les auteurs

**Christophe BOUGET, Marion GOSSELIN
et Fabien LAROCHE**

INRAE, UR EFNO, 45290 Nogent-sur-Vernisson, France.

✉ christophe.bouget@inrae.fr

✉ marion.gosselin@inrae.fr

✉ fabien.laroche@inrae.fr

EN SAVOIR PLUS...

- 📖 **BOUGET, C., BRUSTEL, H., ZAGATTI, P., NOBLECOURT, T.**, 2019, *Les coléoptères saproxyliques de France - Catalogue écologique illustré*, Éditions MNHN, collection Patrimoines Naturels, 738 p.
- 📖 **INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL**, 2005, La forêt française, un puits de carbone ? Son rôle dans la limitation des changements climatiques, *L'IF*, n°7.
- 📖 **KURZ, W.A., DYMOND, C.C., STINSON, G., RAMPLEY, G.J., NEILSON, E.T., CARROLL, A., EBATA, T., SAFRANYIK, L.**, 2008, Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change, *Nature*, vol. 452, p. 987-990.
- 📖 **LANDMANN, G., NIVET, C.** (Eds.), 2014, *Projet Resobio. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité*, ADEME, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, GIP Ecofor, Angers, Paris.
- 📖 **MICHAELS, N.**, 2018, *Production de bois énergie et impacts sur la biodiversité européenne. Synthèse de l'article BOUGET, LASSAUCE et JONSELL, 2012, « Effects of fuelwood harvesting on biodiversity - a review focused on the situation in Europe »*, Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité, Paris.
- 📖 **PIEDALLU, C., PEREZ, V., GÉGOUT, J.-C., LEBOURGEOIS, F., BERTRAND, R.**, 2009, Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France, *Revue Forestière Française*, 61, 6, p. 567-593.
- 📖 **RANIUS, T., HÄMÄLÄINEN, A., EGNELL, G., OLSSON, B., EKLÖF, K., STENDAHL, J., RUDOLPHI, J., STÉNS, A., FELTON, A.**, 2018, The effects of logging residue extraction for energy on ecosystem services and biodiversity: A synthesis, *Journal of Environmental Management*, vol. 209, p. 409-425.
- 📖 **ROQUES, A., AUGER-ROZENBERG, M.-A.**, 2019, Changement climatique et mondialisation, moteurs des invasions d'insectes, Encyclopédie de l'Environnement, disponible sur : <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/changement-climatique-mondialisation-invasion-insectes/>
- 📖 **ROUX, A., DHÔTE, J.-F., ACHAT, D., BASTICK, C., COLIN, A., BAILLY, A., BASTIEN, J.-C., BERTHELOT, A., BRÉDA, N., CAURLA, S., CARNUS, J.-M., GARDINER, B., JACTEL, H., LEBAN, J.-M., LOBIANCO, A., LOUSTAU, D., MEREDIEU, C., MARÇAIS, B., MARTEL, S., MOISY, C., PÂQUES, L., PICART-DESHORS, D., RIGOLOU, E., SAINT-ANDRÉ, L., SCHMITT, B.**, 2017, *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050*, Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN, 101 p.
- 📖 **STEPHENSON, N.L., DAS, A.J., CONDIT, R., RUSSO, S.E., BAKER, P.J., BECKMAN, N.G., COOMES, D.A., LINES, E.R., MORRIS, W.K., RÜGER, N., ALVAREZ, E.O., BLUNDO, C., BUNYAVEJCHEWIN, S., CHUYONG, G., DAVIES, S.J., DUQUE, A., EWANGO, C.N., FLORES, O., FRANKLIN, J.-F., GRAU, H.R., HAO, Z., HARMON, M.E.O., HUBBELL, S.P., KENFACK, D., LIN, Y., MAKANA, J.R., MALIZIA, A., MALIZIA, L.R., PABST, R.J.O., PONGPATTANANURAK, N., SU, S.H., SUN, I.F., TAN, S., THOMAS, D., VAN MANTGEM, P.J., WANG, X., WISER, S.K.O., ZAVALA, M.A.**, 2014, Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size, *Nature*, vol. 507, n° 7490, p. 90-93.

Sciences Eaux & Territoires
www.set-revue.fr

Numéro 33, année 2020
N°ISSN : 2109-3016

INRAE



Sciences Eaux & Territoires
est la revue de transfert d'INRAE

**Son objectif est de proposer une information claire et lisible
de haute qualité scientifique et technique**

qui permette de nourrir le processus de l'action et/ou de la décision
des différents intervenants publics et privés
dans le domaine du développement rural et de l'environnement.

La revue développe un lien entre la recherche et l'action.

Elle est envisagée comme un outil d'aide à la décision
et à l'accompagnement de l'action sur le terrain, en diffusant une information structurée
sur des méthodologies d'action, des synthèses sur les innovations techniques ou
technologiques et les dernières avancées de la recherche finalisée dans une optique
interdisciplinaire, dans les domaines couverts par INRAE et ses partenaires.

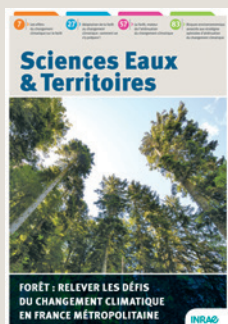
Le lectorat de la revue

Le lectorat visé est un public d'ingénieurs, de gestionnaires et de cadres des services
techniques des collectivités territoriales, des services déconcentrés de l'État,
des instituts techniques, des établissements d'enseignement technique et supérieur,
et des entreprises intervenant à leurs côtés.

De manière plus générale, cette revue s'adresse à tous les acteurs et praticiens
intervenant sur la gestion des espaces ruraux et périurbains,
qu'ils soient publics ou privés.

www.set-revue.fr

Télécharger librement les articles
sur le site de la revue Sciences Eaux & Territoires



Directeur de la publication : Philippe Mauguin

Coordination scientifique du numéro : Christian GINISTY

Comité éditorial : Stéphanie Gaucherand, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Ghislain Huyghe, Emmanuelle Jannès-Ober, Nicolas de Menthière, Sébastien Michel, Thierry Mougey, Christophe Roturier et Michel Vallance

Coordination éditoriale : Sabine Arbeille

Secrétariat de rédaction, mise en page et suivi d'édition : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Contact édition et administration :

INRAE-DipSO – 1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030 – 92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – E-mail : set-revue@inrae.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution

Impression : Jouve Mayenne

Illustration de couverture : S. De Danieli.

Illustrations du sommaire : M. Vennetier, S. De Danieli, D. Gauthier, Y. Paillet.