



Vers une gestion adaptative des forêts

François Lefèvre

Directeur de recherche dans l'Unité
Écologie des forêts méditerranéennes
de l'INRA

Denis Loustau

Directeur de recherche dans l'UMR
Interaction sol-plante-atmosphère,
INRA - Bordeaux Sciences Agro

Benoît Marçais

Directeur de recherche dans l'Unité
Interactions arbres-micro-organismes
INRA, Université de Lorraine

Les forêts sont sensibles au changement climatique. Réseaux d'observation, nouvelles données génétiques et simulations numériques permettront de définir les scénarios de leur évolution et de proposer les conditions d'une gestion appropriée.

La forêt n'est pas épargnée par le changement climatique. Certains effets se révèlent parfois bénéfiques, mais le changement climatique, dans son ensemble, risque de causer des dommages importants. Depuis les premiers programmes de recherche lancés dans les années 1990, l'ampleur du changement en cours et de ses impacts a toujours été révisée à la hausse. Mais c'est la multiplication d'événements climatiques extrêmes, les tempêtes et sécheresses successives au début des années 2000 notamment, qui a fait prendre conscience qu'il faut agir vite.

On a aussi réalisé que les stratégies d'adaptation des forêts au changement climatique doivent être évolutives. Il faut les envisager comme des processus dynamiques, et non comme la recherche d'un équilibre, d'une adaptation stable aux conditions locales qui règnent à un instant donné. En effet, les arbres présents aujourd'hui devront affronter des conditions climatiques qui évoluent et continueront à évoluer dans plusieurs décennies, voire plus

d'un siècle. En raison des aléas climatiques à venir, il faut se préparer à avoir à gérer de nombreuses incertitudes. On doit donc repenser en profondeur les modèles sur lesquels repose la gestion forestière.

La dynamique des forêts

Les forêts sont des écosystèmes complexes et divers selon les zones climatiques. Leur fonctionnement et leur dynamique sont régis par de multiples organismes qui interagissent, mais ont des cycles de vie très différents – des champignons aux arbres, en passant par les insectes et les grands herbivores. Les forêts agissent sur leur milieu, modifiant la température, les précipitations, les sols, les vents, ou encore la pression de vapeur d'eau atmosphérique.

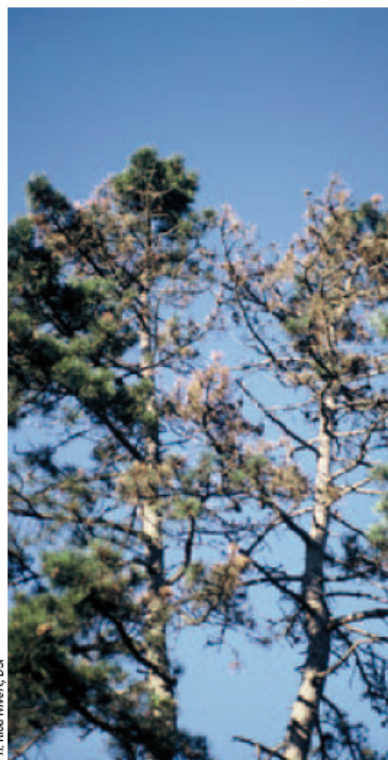
Soulignons d'emblée que les forêts actuelles ne sont que des états « instantanés » inscrits dans des dynamiques plus ou moins rapides. Certaines évoluent vite, par exemple les forêts soumises au régime des feux, ou les forêts de montagne issues des

grands reboisements du XIX^e siècle, ou encore celles des abords des cours d'eau où les cycles de colonisation, de maturation et d'extinction sont conditionnés par le régime des crues. Les forêts qui nous paraissent stables sont elles aussi marquées par une dynamique plus lente qui leur est propre.

Or le changement climatique peut avoir des effets en cascade qui modifient les dynamiques forestières. Des hivers plus doux et des étés plus secs ont par exemple favorisé l'explosion épidémique du dendroctone du pin ponderosa, un petit coléoptère qui a colonisé d'Ouest en Est le Nord du continent américain en s'adaptant progressivement à différentes espèces de pins. Les pins ont déper, ce qui a facilité la propagation des incendies et, ce faisant, la destruction de pans entiers de forêts. Plus généralement, l'évolution du climat et des modes de propagation des organismes pathogènes a modifié le nombre et la nature des ennemis naturels auxquels les arbres des forêts sont aujourd'hui confrontés. L'aire de répartition de certains ravageurs s'est notablement agrandie, soit parce que les contraintes qui menaçaient leur survie hivernale ont été levées, soit parce qu'ils se reproduisent plus facilement pendant la saison chaude.

Le cas le mieux documenté est celui de la chenille processionnaire des pins, un lépidoptère, mais on recense d'autres exemples, tels que l'encre du chêne et la maladie des bandes rouges du pin laricio, qui sont toutes deux liées à des champignons pathogènes.

Si les parasites sont généralement favorisés par la hausse des températures, ce n'est pas toujours le cas. La croissance de la chalarose du frêne, un autre champignon, est freinée par les étés trop chauds dans certaines régions d'Europe, par exemple en Slovénie ou dans la plaine du Pô, en Italie. On peut donc espérer que cette épidémie qui touche aujourd'hui les frênes des forêts tempérées s'estompera dans les zones les plus chaudes.



*Pins infestés par le champignon *Diplodia pinea*, favorisé par les sécheresses et qui est devenu une menace importante dans le Sud-Ouest de l'Europe.*

Plus encore que l'évolution progressive des températures, c'est la récurrence des événements extrêmes, tels que les sécheresses et les tempêtes, qui jouera un rôle déterminant pour l'avenir des forêts. L'impact d'un épisode de sécheresse se prolonge durant plusieurs années, et c'est souvent la succession d'années sèches dont les effets s'accumulent qui a des conséquences graves. Dans les Alpes du Sud, par exemple, les sécheresses survenues en 2003 et au cours des années suivantes ont entraîné le dépérissement massif de sapins. Sur le Mont Ventoux, les sapins qui sont morts sont ceux qui avaient bénéficié de bonnes conditions quand ils étaient jeunes, c'est-à-dire qu'ils étaient implantés dans des sols alors plutôt riches en eau.

Un tel constat laisse supposer que, malgré leur vigueur, ces sapins étaient moins bien acclimatés à la sécheresse que leurs voisins qui ont survécu. Mais cette relation entre vigueur juvénile et mortalité n'a pas été retrouvée dans d'autres massifs, où des mécanismes différents seraient donc à l'œuvre. À

La biomasse forestière, une source d'énergie renouvelable

On désigne par le terme de « biomasse » l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale issues du monde du vivant. En France, la biomasse est la première source d'énergie renouvelable, loin devant la géothermie, les éoliennes ou le photovoltaïque. Elle est aujourd'hui consommée essentiellement par des particuliers qui se chauffent au bois. Dans le cadre d'une politique française de développement des énergies renouvelables d'ici 2020, une des principales ressources en biomasse pourrait être issue de la forêt ; elle serait beaucoup plus utilisée dans les prochaines années pour des chaufferies collectives et industrielles à bois. En effet, aujourd'hui, seule la moitié de la production annuelle est utilisée dans les filières matériaux ou énergie.

Toutefois, une utilisation plus importante de la biomasse forestière soulève deux difficultés. La première est celle de la collecte, car les forêts françaises (16,3 millions d'hectares, soit 30 pour cent du territoire) sont détenues par de multiples propriétaires privés possédant des surfaces souvent trop petites pour donner lieu à une activité rentable, le bois énergie ne constituant qu'un débouché parmi d'autres. L'un des enjeux est donc de mieux valoriser le massif forestier français. L'autre difficulté est d'ordre environnemental. Il est essentiel d'intégrer l'ensemble des enjeux environnementaux dans l'exploitation de la biomasse, afin de préserver l'équilibre des écosystèmes. Il s'agit notamment de mettre en place des stratégies forestières combinant les objectifs d'adaptation au changement climatique et d'atténuation de ses effets. La recherche devra fournir les outils d'aide à la décision qui permettront, à terme, aux responsables locaux d'optimiser la gestion sylvicole tout en tenant compte des multiples enjeux environnementaux.

Caroline Rantien, ADEME

l'image de cet exemple, il est souvent très difficile d'identifier les causes du dépérissement d'arbres, processus multifactoriel où interviennent des facteurs physico-chimiques (plus généralement abiotiques) et parasitaires (biotiques).

La question de la vitesse du changement a d'autant plus d'importance que les différentes composantes des écosystèmes forestiers (arbres, champignons, insectes) ne réagissent pas à la même vitesse. Ainsi, *Diplodia pinea*, champignon parasite des pins favorisé par la sécheresse et les températures estivales élevées, et qui était autrefois une maladie mineure, est devenu, en moins de 20 ans, l'un des principaux problèmes sanitaires de la pinède.

Les adaptations et leurs limites

À l'échelle du siècle, le devenir des forêts dépendra avant tout de leurs capacités d'adaptation au changement climatique: résistance physiologique, évolution et diversité génétique des peuplements, migration vers des environnements plus favorables, en altitude comme en latitude, pratiques sylvicoles. La plasticité et la biodiversité des forêts constituent leurs meilleurs atouts, mais dans l'état actuel des connaissances, nous ne savons pas comment ni dans quelle mesure ces deux paramètres permettront aux arbres de s'adapter à des changements si rapides. En effet, les aires climatiques des espèces se déplaceront à une vitesse bien supérieure à celle de leurs migrations spontanées. Dès lors, les capacités de migration naturelles ne suffiront probablement pas à préserver tous les écosystèmes et leur biodiversité.

C'est là qu'intervient la sylviculture – ensemble de pratiques et de méthodes visant à gérer au mieux la croissance, l'entretien et l'exploitation des forêts. Une première voie d'adaptation programmée consiste à développer la biodiversité tout particulièrement dans les forêts européennes, qui

présentent une faible variété d'espèces par rapport à d'autres zones tempérées. Certains parasites favorisés par le changement climatique limitent le choix des forestiers. Causée par deux champignons, la maladie des bandes rouges a ainsi conduit à suspendre les plantations de pins laricio en Grande-Bretagne, et elle a limité leur utilisation dans l'Ouest de la France. Dans certains cas, cela peut justifier l'utilisation raisonnée d'essences forestières exotiques.

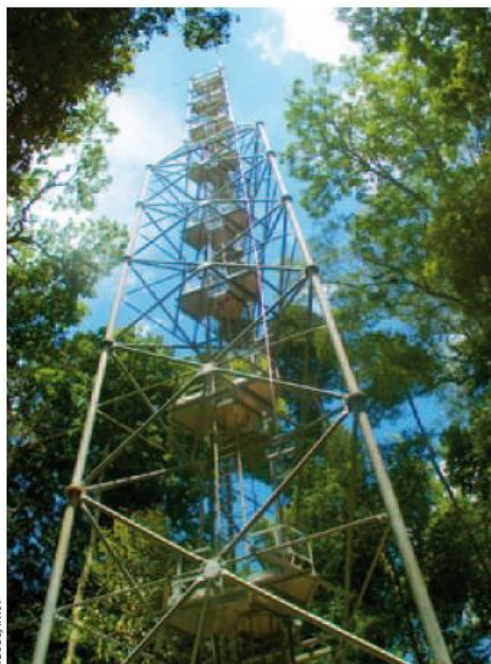
Une autre voie d'adaptation planifiée vise à favoriser des évolutions génétiques au sein d'une espèce forestière. Depuis longtemps, les sylviculteurs ont eu recours aux transplantations, qui ont fourni quelques précieuses indications sur la vitesse des évolutions génétiques possibles. Ils ont constaté que le pin radiata est capable de survivre, de pousser et de se reproduire dans des milieux très différents de son aire d'origine (la côte californienne), en faisant preuve d'un grand potentiel d'adaptation après quelques générations durant lesquelles

les variétés ont été améliorées. Un autre exemple concerne les populations d'épicéa transplantées d'Allemagne en Norvège au début du XX^e siècle. Les populations d'origine étaient mal adaptées au froid nordique : leurs bourgeons se refermaient trois semaines après les espèces locales, de sorte qu'ils étaient davantage exposés au gel. Certains arbres ont néanmoins survécu, et les cycles de leurs descendants étaient synchronisés avec ceux des arbres locaux.

Plusieurs processus ont concouru à cette évolution rapide : sélection des arbres les plus résistants, effets de l'environnement sur l'expression des gènes, transferts de gènes avec les arbres locaux. On en déduit qu'il faut éviter l'éradication hâtive et systématique des arbres qui survivent à des dépérissements massifs. Ces derniers résultent de très fortes pressions de sélection, qui, lorsqu'elles ne conduisent pas à la disparition complète des peuplements, favorisent l'évolution des ressources génétiques. Mais il y a bien sûr des limites au potentiel adaptatif. Dans beaucoup de régions, les capacités adaptatives ne permettront pas de maintenir la forêt dans son état actuel, mais il est important de valoriser les évolutions partout où elles se produisent.

Un défi pour la sylviculture

Tous ces exemples confirment qu'il faudra adopter un mode adaptatif de gestion des forêts, fondé sur l'ajustement en continu des pratiques testées. Cette gestion adaptative pourra s'appuyer sur les progrès de la recherche, des techniques de mesures environnementales, par exemple. Ainsi, on sait aujourd'hui détecter de très fines évolutions des variables climatiques (température, humidité ou rayonnement lumineux), ainsi que des concentrations en dioxyde de carbone et en polluants atmosphériques (ozone et dépôts azotés). Organisées en réseaux standardisés et intégrés, couvrant



Les capteurs situés au sommet de cette tour haute de 55 mètres dépassent la canopée de la forêt guyanaise. Ils permettent de mesurer les flux de dioxyde de carbone et de suivre si l'écosystème gagne ou perd du carbone au fil du temps.



P. Frey, INRA

La biomasse forestière est une source d'énergie, mais le morcellement de la forêt française de métropole, pour les trois quarts constituée de propriétés privées, rend difficile son utilisation.

la plus grande partie des continents, les stations de mesure permettent de suivre en continu le fonctionnement biogéochimique des forêts, avec une résolution de 30 minutes. Les capteurs embarqués sur des avions et des satellites complètent ces réseaux d'observation, et offrent une couverture globale.

Les données collectées sont utilisées pour modéliser les impacts du changement climatique et organiser un suivi plus précis du fonctionnement des écosystèmes terrestres. Les installations de type ICOS (*Integrated Carbon Observation System*) et ANAEE (*Analysis and Experimentation on Ecosystems*) en Europe, et NEON (*National Ecological Observatory Network*) aux États-Unis, ont été conçues à cet effet. Servies par une gigantesque puissance de calcul, elles ont pour vocation de révéler l'ampleur des perturbations écologiques en cours, et d'anticiper les situations les plus à risque.

Des modèles mathématiques permettent de simuler le rôle actuel et futur des forêts dans le cycle du carbone. Au niveau mondial, les forêts contiennent près de 50 pour cent du carbone emmagasiné dans les écosystèmes terrestres. Toute variation de ce stock modifie la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. La déforestation en zone tropicale et les

changements d'utilisation des terres libèrent du carbone. À l'inverse, le renouvellement du couvert végétal d'une partie des surfaces déforestées, et les plantations d'arbres le piègent temporairement dans la biomasse. Les forêts tropicales non perturbées, ainsi que les forêts boréales et tempérées, qui sont en expansion, accumulent du carbone. Le bilan net de ces phénomènes correspond aujourd'hui à une fixation d'environ 4,4 gigatonnes de dioxyde de carbone par an, soit 15 pour cent environ des émissions de dioxyde de carbone d'origine fossile. Par conséquent, la réduction des émissions nettes de dioxyde de carbone dépendra, en grande partie, de notre capacité à restreindre la déforestation. Quant aux sols qui stockent aussi le carbone, on ignore si le changement climatique modifiera leur composition en matières organiques, et donc leur capacité de stockage.

Les chercheurs développent aujourd'hui des modèles capables d'intégrer les processus d'adaptation, les

interactions des différents acteurs et même les interventions sylvicoles. Des scénarios plus vraisemblables, sur des échelles locales et globales, seront bientôt à disposition des sylviculteurs et des décideurs politiques.

Modèles dynamiques

Ils bénéficieront aussi d'autres progrès méthodologiques importants, notamment les nouveaux outils de la génomique qui donnent accès à des informations détaillées sur la diversité génétique des espèces. Cela nous renseigne sur les dynamiques des espèces étudiées, ainsi que leurs évolutions passées. L'avènement des techniques de séquençage à haut débit (NGS, pour *Next Generation Sequencing*) ouvre également de nouvelles perspectives. En théorie, elles permettent d'accéder à la totalité de l'information génomique de n'importe quel organisme, et non plus seulement d'un nombre restreint d'espèces modèles. Le génome de champignons et autres micro-organismes mal connus pourront ainsi être caractérisés. Ce sera par exemple le cas du génome des agents responsables de maladies émergentes notamment, telle la chalarose du frêne.

Mais l'innovation n'est pas à rechercher uniquement dans les nouvelles technologies, les méthodes d'analyse ou les simulations numériques. L'adaptation des forêts au changement climatique passera nécessairement par de nouvelles pratiques d'anticipation et d'accompagnement. La sylviculture adaptative devra faire évoluer les forêts en tenant compte des contraintes écologiques et socio-économiques. Tout l'enjeu de cette évolution consistera à se fonder sur des scénarios du futur plutôt que sur les savoir-faire du passé.

Bibliographie

- A. Cheaib et al., *Climate change impacts on tree ranges : model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty*, *Ecology Letters*, vol. 15, pp. 533-544, 2012.
J. Stenlid et al., *Emerging diseases in european forest ecosystems and responses in society*, *Forests*, vol. 2, pp. 486-504, 2011.