

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.



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.