



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.

Préserver la richesse des milieux aquatiques

Marie-Élodie Perga
Chercheur à l'UMR 042 CARRTEL
INRA, Université de Savoie

Étienne Prévost
Chercheur à l'UMR 1224 ECOBIOP INRA,
Université de Pau et des pays de l'Adour

Jean-Luc Baglinière
Chercheur à l'UMR 0985 ESE INRA
Agrocampus Ouest

L'eau est une ressource vitale. Mais soumise aux conséquences du changement climatique, à la pollution, à une surexploitation, elle est fragile. Des modèles permettent d'étudier les conséquences des mesures prises pour la préserver.

Les rivières, lacs et zones humides, encore nommés hydrosystèmes d'eau douce ne représentent que 0,6 pour cent de l'eau mondiale, mais contiennent 6 pour cent de la totalité des espèces animales et végétales. Ils représentent donc une réserve importante de biodiversité et jouent un rôle clé dans divers cycles biologiques, mais ils sont tout aussi sensibles au changement climatique que les environnements terrestres auxquels ils sont connectés. Ils sont vulnérables, parce que le changement climatique agit à l'échelle globale et qu'ils sont sensibles à l'impact des activités humaines à l'échelle locale.

L'augmentation des températures de l'air contribue au réchauffement des eaux et perturbe les transferts hydriques, par exemple la date de la fonte des neiges. Or ces transferts contrôlent à la fois la quantité de l'eau en transit, mais aussi les éléments organiques et minéraux qu'elle véhicule. Cela modifie la composition des sols et de la végétation des bassins versants des cours d'eau (les environnements terrestres auxquels l'hydrosystème est connecté). Suite aux modifications de volume, de

nature et d'intensité des précipitations, la quantité et la disponibilité de l'eau parvenant aux hydrosystèmes changeront. Les organismes aquatiques seront alors confrontés à diverses modifications des conditions physico-chimiques de leur environnement, par exemple la baisse de la concentration de l'oxygène dissous dans l'eau.

Pour limiter les conséquences du changement climatique sur les hydrosystèmes, il faut les étudier. Toutefois, le nombre et la complexité de ces impacts limitent notre capacité à les recenser et à les prévoir. Faisons le point sur les recherches concernant l'adaptation de ces milieux au changement climatique, même si elles sont moins avancées que pour les écosystèmes terrestres.

L'impact sur la quantité d'eau

Le changement climatique a une conséquence immédiate : la réduction de la disponibilité de l'eau douce. Dans de nombreuses régions, les ressources d'eau sont déjà insuffisantes, voire utilisées de façon trop intense pour que les réserves aient le temps de se reconstituer. À l'avenir, l'agriculture aura be-

soin de plus d'eau pour satisfaire une population humaine en augmentation (19 pour cent d'ici 2050). On peut prévoir un renforcement de la compétition pour l'accès aux ressources en eau destinée à l'agriculture, l'industrie, la consommation domestique et la conservation des écosystèmes.

L'augmentation des températures stimule à la fois l'évaporation et l'évapotranspiration (la perte d'eau par les feuilles), ce qui, combiné à la diminution des précipitations, menace d'assèchement certains hydrosystèmes dans les zones tempérées européennes, par exemple les marais de l'Ouest de la France. On estime que la baisse des débits des cours d'eau sera de l'ordre de 20 à 25 pour cent d'ici la fin du siècle, ce qui devrait s'accompagner d'un allongement des périodes d'étiage.

Les événements de pluviométrie extrêmes devraient multiplier les crues ou les périodes de hautes eaux. En réduisant les quantités d'eau circulant dans les hydrosystèmes, le changement climatique conduirait aussi à diminuer la connexion hydrologique entre les différentes parties d'un fleuve (amont, aval, estuaire et affluents). L'habitat aquatique en serait d'autant plus fragmenté.

Les adaptations écologiques

Par ailleurs, l'augmentation des températures moyennes de l'air provoque un réchauffement des eaux, dont l'amplitude varie selon l'altitude du bassin versant et son type d'alimentation. Entre 1977 et 2006, la température moyenne annuelle de l'eau du Rhône a augmenté de 1,5°C, et les températures estivales du cours moyen de la Loire de 1,5 à 2°C. Dans le lac Léman, comme dans une dizaine de lacs suisses, les eaux profondes se sont réchauffées de 1°C en 40 ans ; la température hivernale de la masse d'eau totale du lac est passée de 4,5°C en 1963 à 5,15°C en 2006.

Les hydrosystèmes hébergent de nombreuses espèces animales à sang froid, notamment les poissons, dont la physiologie dépend directement de la température. Ainsi, le réchauf-

fement des eaux a des répercussions sur la composition des populations. Le maintien des populations de poissons face à ces changements environnementaux dépend de la capacité d'adaptation des espèces, qui peut s'exprimer par leur plasticité phénotypique (avec, par exemple, une modification de la forme ou de la taille, sans que les caractéristiques génétiques ne changent), ou bien être influencée par des mécanismes de sélection, avec, éventuellement, des modifications du génome (à condition qu'il existe une certaine richesse génétique et que la population soit de taille suffisante).

Ainsi, pour les ombles, le déclenchement de la reproduction, le développement des œufs et la survie des alevins nécessitent des températures comprises entre 3 et 7°C. Des eaux plus chaudes en hiver compromettraient la reproduction et le maintien de ces populations dans les grands lacs alpins français, zone la plus méridionale de leur habitat en Europe. En revanche, quand, en décembre, dans ces mêmes lacs, la reproduction du corégone est retardée de deux semaines environ, la durée de son développement embryonnaire est raccourcie, avec des conséquences plutôt favorables pour ces populations.

Le suivi des populations de saumon

Le suivi depuis une quarantaine d'années de la population des saumons d'un petit fleuve breton a révélé une forte croissance. Elle a d'abord été attribuée à l'élévation de la température de l'eau suite au changement climatique, mais on a finalement montré qu'elle résultait de l'augmentation de la productivité du fleuve liée aux apports de nitrates. D'autres observations faites depuis 20 ans indiquent que le premier facteur agissant sur la croissance des salmonidés en Bretagne n'est effectivement pas le réchauffement des eaux.

Comment explorer de façon fiable les effets du changement climatique sur les populations de poissons ? L'expérimentation virtuelle par simulation informatique apporte des informations intéressantes. L'INRA développe un simulateur des populations de saumon atlantique, espèce menacée dans les cours d'eau français. Le simulateur intègre les diverses modalités d'action du changement climatique, les facteurs environnementaux et les phases du cycle biologique de cette espèce. Il permet de modéliser l'adaptation des populations sans modification du génome, et les conséquences d'une évolution du génome.

Les premières simulations montrent que, dans un premier temps, l'augmentation de la température de l'eau en rivière favorisera la survie des individus, mais aussi qu'elle aboutira à une maturation sexuelle plus précoce, tendant à diminuer la survie. L'expérimentation virtuelle permet aussi de hiérarchiser les composantes du changement climatique en fonction de leurs effets. Ainsi, pour les 30 prochaines années, la modification du régime hydraulique (notamment le débit) des rivières serait plus préoccupante pour la pérennité des populations de saumon que l'élévation de la température.



Sekar/B/Shutterstock