



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 CARTEL
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

Chez le saumon, on observe une diminution de la taille, qui semble liée aux modifications des milieux marins (élévation de la température et acidification) et d'eau douce (élévation de la température et modification du débit). Dans les grands hydrosystèmes, les espèces s'adaptent en modifiant leur répartition spatiale. Sur le Rhône, à hauteur du Bugey, les espèces thermophiles, telles que le barbeau et la vandoise, remplacent progressivement les espèces d'eau plus froide, tel le chevesne, situées en amont. Nous avons donné quelques exemples des impacts du changement climatique, mais, au-delà de ces quelques effets, la prévision de ses conséquences sur les populations de poissons vivant en eau douce reste un champ de recherche très ouvert.



Les estuaires et les golfes, tel celui de Riga, sur la mer Baltique, risquent de disparaître. Ils ne joueront plus le rôle qui est le leur aujourd'hui, celui de nurserie des poissons marins.

Les modifications des hydrosystèmes

En raison des effets de la température sur la densité de l'eau (elle passe par un maximum à 4°C, puis diminue quand la température augmente), le changement climatique influe aussi sur la dynamique des lacs. Habituellement, des périodes de stratification, au cours desquelles une couche d'eau chaude flotte sur une couche d'eau froide, et des périodes de brassage du lac alternent, mais cette alternance est aujourd'hui modifiée. Le printemps plus précoce conduit à une mise en place de la stratification un mois plus

tôt qu'il y a 30 ans, de sorte que la durée de stratification a été allongée.

Dès lors, la succession des espèces planctoniques en fonction des saisons a été modifiée. Il y a 30 ans, les espèces d'algues ou de cyanobactéries adaptées à une croissance en profondeur et qui luttaien contre la sédimentation proliféraient surtout en automne. Aujourd'hui, elles apparaissent dès la fin de l'été et persistent plus longtemps. Mais il s'agit d'espèces filamenteuses, voire toxiques, qui tendent à s'accumuler au fond des lacs et perturbent l'approvisionnement en eau potable. Par ailleurs, la modification du régime des vents et la diminution des débits des affluents sont autant de processus limitant le brassage efficace de la masse d'eau en hiver, et l'oxygé-

nières solubles issues des sols et transportées par les fleuves. La sensibilité des sols à l'érosion augmentera d'ici la fin de XXI^e siècle, se traduisant par une augmentation des sédiments charriés par les eaux sur les bassins versants. Combinée à la diminution des débits, l'augmentation du flux des particules solubles est susceptible de diminuer la transparence et la qualité de l'eau, ainsi que la diversité des habitats pour les poissons et les invertébrés. De surcroît, la solubilité des gaz, notamment du dioxyde de carbone et de l'oxygène, décroît quand la température augmente, ce qui renforce le risque que les eaux soient insuffisamment oxygénées et que du dioxyde de carbone supplémentaire soit émis dans l'atmosphère.

Enfin, l'élévation du niveau des océans a pour conséquence que les zones côtières risquent d'être plus ou moins recouvertes par de l'eau salée. Si les estuaires et les aquifères côtiers sont envahis par l'eau de mer, ils cesseront de jouer leur rôle essentiel de nurseries des poissons marins, car une partie des espèces végétales et animales qu'ils hébergent disparaîtra.

Le changement climatique perturbe déjà les hydrosystèmes, mais les réarrangements observés n'aboutissent pas toujours à une perte de la biodiversité ou de la qualité du milieu. Au cours des 15 à 25 dernières années, la richesse des communautés de poissons des grands fleuves a augmenté, car on y trouve davantage de poissons méridionaux. Certaines de ces espèces sont invasives, c'est-à-dire qu'elles se multiplient au détriment des populations locales. Cela modifie la biodiversité, mais ces nouvelles espèces pourraient constituer un atout dans le futur, car elles seraient mieux adaptées aux milieux changeants.

À l'accélération climatique enregistrée depuis plus de 50 ans, s'ajoutent les pressions humaines locales. Il est donc nécessaire d'évaluer la part respective du changement climatique et des pressions humaines dans les changements des écosystèmes, afin de choisir les actions les plus efficaces.

nation des eaux profondes. Ainsi, les couches d'eau appauvries en oxygène sont de plus en plus importantes dans les grands lacs alpins depuis 20 ans, menaçant la vie profonde.

Les modifications de la pluviométrie sur les bassins versants altèrent la quantité et la nature des matières organiques ou des nutriments transportés. En Europe du Nord et en Grande-Bretagne, les eaux des ruisseaux sont devenues de plus en plus brunes en 20 ans, en raison des étés plus chauds et plus secs, et des orages violents qui contribuent à augmenter la quantité de ma-



erapictures/Shutterstock

Les orages violents charrient des sédiments, renforçant l'érosion des sols. La qualité de l'eau pourrait en pâtir.

Des stratégies pour l'adaptation

Les hydrosystèmes d'eau douce et les espèces qui les peuplent ont des capacités naturelles d'adaptation aux évolutions climatiques, notamment leur adaptabilité et la migration des populations. Néanmoins, de trop fortes pressions humaines locales (agricoles, industrielles et urbaines) sur le milieu réduisent ce potentiel adaptatif, les milieux se dégradant trop vite pour laisser le temps aux espèces de s'adapter, et rendant les hydrosystèmes vulnérables.

Les stratégies d'adaptation ont pour enjeu de restaurer la résistance des hydrosystèmes face aux contraintes climatiques, en privilégiant une gestion de la disponibilité en eau et de la biodiversité qui soit économiquement viable et fondée sur le partage des ressources et l'optimisation des usages. Il s'agit de réaliser des économies *via*

des actions techniques (réduction des fuites, recyclage), financières (tarification progressive encourageant les économies d'eau), un changement des pratiques (agricoles, industrielles ou domestiques) et une répartition plus équitable et responsable des ressources. Par ailleurs, l'aménagement du territoire doit être repensé pour éviter de concentrer les prélèvements dans les mêmes zones ou pour favoriser la rétention naturelle de l'eau.

Pour préserver la continuité du cycle de l'eau et répondre aux besoins de l'agriculture, il est nécessaire de veiller au maintien du bilan hydrique des sols, c'est-à-dire au bilan entre les entrées (précipitations, ruissellement, remontée capillaire à partir des nappes phréatiques) et les pertes (ruissellement, évaporation au niveau du sol et par évapotranspiration, drainage). On pourrait ralentir la vitesse des écoulements et favoriser l'infiltration par la création d'ouvrages spécifiques, la limitation des zones imperméabilisées, ainsi que le maintien des dépressions du sol et du tracé naturel des cours d'eau, des plaines inondables et des zones humides.

En ce qui concerne la biodiversité, il convient de favoriser les mécanismes naturels d'adaptation. Dans un premier temps, il apparaît essentiel de maintenir une taille et une diversité génétique suffisantes, maintien qui peut être assuré de différentes façons : limiter l'exploitation des composantes les plus vulnérables, contrôler les facteurs de stress (pollution, destruction des habitats, introduction d'espèces invasives) et renforcer les échanges des populations et des individus *via* l'entretien ou le rétablissement des voies de

migration (aménagement de passes à poissons, suppressions d'obstacles, par exemple). On peut conforter les mécanismes naturels d'adaptation par des interventions directes, par exemple aider à la migration des espèces les plus vulnérables. Soulignons que la stratégie d'adaptation la plus efficace consiste toujours à préserver les milieux de bonne qualité et à restaurer ceux qui ont été dégradés.

Une ressource vitale

L'adaptation des hydrosystèmes d'eau douce au changement climatique est un enjeu crucial dont la réussite nécessite l'engagement tant des usagers que des gestionnaires. En raison des nombreuses voies par lesquelles le climat perturbe les hydrosystèmes, il est nécessaire de combiner diverses méthodes dans le temps et dans l'espace (restriction saisonnière de l'utilisation de l'eau, gestion des épisodes pluvieux au quotidien, gestion raisonnée des fertilisants et des produits phytosanitaires), tant au niveau local (la parcelle cultivée) que plus global (le bassin versant).

Face à des intérêts parfois contradictoires, il est nécessaire de continuer à développer des modèles permettant de simuler le comportement des hydrosystèmes et celui des populations des espèces qu'ils hébergent, mais aussi l'effet des mesures de gestion prises pour favoriser leur adaptation. Ces modèles permettent également de comparer l'impact des mesures préconisées, qu'il s'agisse de protéger ou de restaurer les milieux, ou encore d'améliorer la connectivité et les interactions de tous les acteurs pour qui l'eau est simplement... vitale.

Bibliographie

- C. Piou et E. Prévost, *Contrasting effects of climate change in continental vs. oceanic environments on population persistence and microevolution of Atlantic salmon*, *Global Change Biology*, vol. 19, pp. 711-723, 2013.
- J.-P. Amigues et B. Chevassus-au-Louis, *Évaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels*, coll. Comprendre pour agir, ONEMA, 2011.
- Téléchargeable sur : <http://www.onema.fr/Evaluer-les-services-ecologiques>

HISTOIRE DES SCIENCES

Louis Pasteur et Claude Bernard, entre respect et controverse

Ou comment l'amitié et les querelles de deux figures majeures de la biologie du XIX^e siècle ont servi les sciences biomédicales.

Peter Wise

Il est rare qu'une découverte scientifique soit le fruit d'un unique chercheur. L'esprit d'équipe est tout aussi important que les compétences d'un chef. Les confrontations avec d'autres chercheurs de même. La compétition, les controverses améliorent les projets, révélant au passage la personnalité des protagonistes. La relation de Claude Bernard et de Louis Pasteur fut de cet acabit. Malgré des caractères opposés et des approches différentes de la recherche, ces deux grands scientifiques français, qui se sont côtoyés pendant 20 ans dans le Paris foisonnant du XIX^e siècle, ont construit une relation symbiotique, émaillée de désaccords et de respect, qui s'est révélée fructueuse à plus d'un titre.

Des arts à la biologie

Au moment de leur rencontre, à la fin des années 1850, leurs parcours les ont tous deux menés à la renommée – par des voies différentes. En 1832, Louis Pasteur, petit jurassien de dix ans, montre un talent certain pour les portraits en pastel. Plus tard, au Collège royal de Besançon, l'excentrique Charles Flajoulot – aussi professeur du peintre Gustave Courbet – aide le jeune garçon à développer ses compétences en pastel et lithographie. Mais les mathématiques et la physique l'attirent plus (« Avec de la science, on s'élève au-dessus de tous les autres » écrit-il à ses parents en 1840). Le baccalauréat de sciences en poche, Pasteur abandonne l'art et le Jura pour l'École normale supérieure, à Paris, où il suit un cours de physique et de chimie.

En 1848, il est déjà reconnu pour ses travaux sur la dissymétrie moléculaire (il a montré que certaines molécules existent sous deux formes images l'une de l'autre dans un miroir). En 1849, il obtient son premier poste : professeur de chimie à l'Université de Strasbourg. Dans les trois mois suivant son arrivée, il rencontre et épouse Marie Laurent, la fille du recteur de l'Université – un événement qui a pu faciliter sa progression de carrière.

Pas plus à Strasbourg que plus tard à Lille (où il occupe une chaire de chimie), Pasteur n'apprécie l'enseignement : cet engagement académique interfère avec ses recherches. En revanche, il est enthousiaste et ambitieux pour le développement des cours et leur organisation, et sait convaincre ses collègues du bien-fondé de ses projets. Il apprend aussi l'art de faire fructifier son argent, développe ses liens avec l'industrie et fait jouer son aura.

Dans ses recherches, la biologie et la médecine prennent peu à peu le pas sur la chimie. S'étant convaincu, par une étude systématique, que les substances non biologiques sont dominées par la symétrie et que la dissymétrie est la marque du vivant, il tente d'en déduire l'origine de la vie. Il synthétise aussi la quinine, un dérivé moins coûteux de la quinine, dont il teste (sans succès) le pouvoir thérapeutique pour le traitement des fièvres. La fermentation alcoolique, un phénomène mystérieux et objet de nombreuses discussions, l'introduit dans le monde des brasseries et des levures. En 1858, ses capacités d'administrateur sont récompensées par un poste de directeur d'études scientifiques à l'École normale supérieure. Il se bat pour

obtenir aussi un laboratoire équipé – une condition indispensable pour devenir compétitif en biologie. Dans ce domaine, Claude Bernard, de dix ans son aîné, est déjà un grand nom, qui enseigne et mène ses recherches au Collège de France et dans les facultés de science et de médecine de la Sorbonne.

Fils de viticulteurs du Beaujolais, Bernard a lui aussi d'abord été attiré par les arts. Adolescent, il rêvait de devenir auteur de théâtre. Mais en 1831, âgé de 19 ans, il commence, suivant le choix de son père, un apprentissage en pharmacie à Lyon. Obsédé par le doute cartésien, que lui ont enseigné ses professeurs de philosophie du collège, il est dépité par l'adhésion aveugle à la tradition et par le manque de preuves associées à la pratique de son nouveau métier. Démotivé, il se tourne vers ses premières amours – le théâtre – et écrit en secret une pièce, *La rose du Rhône*. Sa représentation, par une école de théâtre lyonnaise, est un succès et lui rapporte 100 francs. Renvoyé de son officine, il se consacre avec enthousiasme à l'écriture d'une nouvelle pièce en cinq actes, *Arthur de Bretagne*, dont il présente le manuscrit à un critique de théâtre parisien. Mais celui-ci coupe court à son élan artistique, lui conseillant de retourner à ses études de médecine.

La dissection, l'anatomie et la toute récente physiologie fascinent Bernard, mais les médecins des hôpitaux parisiens s'appuient encore plus sur les hypothèses et la tradition que les pharmaciens de Lyon. Bernard ne s' imagine pas clinicien : seule la recherche pourrait satisfaire sa quête de preuve cartésienne et de vérité. Tout juste diplômé, il