

Cahier spécial

Agriculture Élevage
Forêts Milieux aquatiques

L'adaptation au changement climatique

L'heure n'est plus au constat, mais à l'évaluation des impacts du changement climatique et à l'élaboration des mesures à prendre pour lutter contre ses effets. Comment l'agriculture qui subit le changement climatique, mais y contribue, peut-elle s'adapter ? Même interrogation pour l'élevage, acteur important du changement, mais qui en pâtit. Quant aux forêts, pour s'adapter, elles « migrent », mais leurs déplacements sont lents, à l'aune des évolutions. Enfin, pour l'eau, le changement climatique s'ajoute à la pollution et à la surexploitation. L'eau est une ressource fragile.

Mais des solutions existent. Il faut les inventorier, les évaluer et en suivre les effets. C'est l'objet de cette deuxième partie du Cahier spécial : Adaptation au changement climatique.

LES DÉFIS DE L'AGRICULTURE 70

F. Debaeke, S. Pellerin, J. Le Gouis, A. Bispo, T. Eglin, A. Trévisiol

ACCOMPAGNER L'ADAPTATION DE L'ÉLEVAGE 74

A. Mottet, D. Renaudeau, J.-F. Soussana

VERS UNE GESTION ADAPTATIVE DES FORÊTS 78

F. Lefèvre, D. Loustau, B. Marçais

PRÉSERVER LA RICHESSE DES MILIEUX AQUATIQUES 82

M.-É. Perga, É. Prévost, J.-L. Baglinière

En partenariat avec



Les défis de l'agriculture



**Philippe Debaeke
et Sylvain Pellerin**
Directeurs de recherche
au Département Environnement
et Agronomie de l'INRA

Jacques Le Gouis
Directeur de recherche
au Département Biologie
et Amélioration des Plantes
de l'INRA

**Antonio Bispo, Thomas Eglin
et Audrey Trévisiol**
Ingénieurs de recherche
au Service Agriculture
et Forêts de l'ADEME

L'agriculture subit le changement climatique et, en même temps, elle y contribue par l'émission de gaz à effet de serre. Par conséquent, elle doit s'y adapter, mais aussi en atténuer les effets. Des solutions sont à rechercher du côté de la génétique et de l'agronomie.

Sous l'impact du changement climatique, la production agricole risque d'être notablement perturbée. Cela pourrait avoir de lourdes conséquences sur la sécurité alimentaire comme sur l'activité des marchés, à l'échelle tant locale que globale, dans un contexte de croissance démographique et de raréfaction des ressources – en eau, énergie, sols et phosphates.

L'agriculture doit impérativement s'adapter aux changements, réduire la vulnérabilité des cultures en les rendant moins sensibles et plus résilientes face aux évolutions de fond aussi bien qu'aux événements extrêmes. Cette adaptation passe par une modification des pratiques agricoles, une amélioration des variétés, mais aussi par le déplacement des aires de culture.

L'urgence reste toutefois la diminution des émissions de gaz à effet de serre. À l'échelle mondiale, l'agriculture est responsable de 13,5 pour cent de ces émissions – 31 pour cent si l'on tient compte des acti-

vités liées aux changements d'usage des sols, telle la déforestation. En France, cette contribution s'élève à 20 pour cent. La France veut diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre. Pour le secteur agricole une division par deux semble plus réaliste, même si elle reste ambitieuse.

Des cycles plus précoces

Pour quantifier les impacts du changement climatique sur la production des espèces cultivées, les chercheurs utilisent plusieurs méthodes, que ce soit des observations, des expérimentations ou des modélisations (voir l'encadré page ci-contre). Elles ont permis de comprendre quel est l'impact du changement climatique sur l'agriculture depuis plusieurs décennies déjà. La température étant le principal moteur du développement végétal, les chercheurs ont constaté une anticipation des stades clés, par exemple le bourgeonnement, la floraison ou la récolte pour l'ensemble des cultures, sous les climats

méditerranéens et tempérés. Ainsi, pour le blé, la sortie des épis se produit de 8 à 10 jours plus tôt qu'il y a 20 ans. Variable selon les espèces, l'avancement des cycles n'est pas sans conséquences sur la production agricole: il entraîne une diminution du nombre de jours pendant lesquels les plantes captent le rayonnement du soleil qui assure la photosynthèse, ce qui réduit les rendements. Depuis 20 ans également, les déficits en eau ont augmenté pendant la phase de remplissage des grains de blé. Conjugués à une augmentation du nombre de jours où la température maximale dépasse 25°C, ils conduisent à des grains mal remplis, abaissant, là encore, les rendements.

Si le blé a été pénalisé par les évolutions récentes du climat, il n'en a pas été de même pour d'autres espèces, telles que la betterave sucrière. Cultivée dans le Nord de l'Europe, elle a profité du réchauffement et de l'avancement de son cycle, sans être perturbée par une baisse de la disponibilité en eau. À l'image de la betterave sucrière, certaines espèces bénéficieront

du changement climatique, tandis que d'autres, plus nombreuses, en pâtiront, surtout dans les pays du Sud.

Toute la complexité est là: les conséquences du changement climatique sont variables selon les espèces et les zones géographiques. Pour la France, le projet CLIMATOR conduit par l'INRA et soutenu par l'Agence nationale de la recherche (ANR) prévoit une hausse des rendements du blé compris entre 0,9 et 1 tonne par hectare. Cette hausse résulterait de l'accroissement de la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique, favorable à sa photosynthèse. À l'inverse, les rendements du maïs irrigué baisseraient de 1 à 1,5 tonne par hectare, en raison du raccourcissement de son cycle et du fait que son métabolisme est insensible à l'enrichissement de l'atmosphère en dioxyde de carbone.

Pour les années à venir, les modélisations font apparaître des déplacements possibles des aires de culture. Dans certains cas, de nouveaux territoires deviendront cultivables. Au contraire, d'autres terroirs cesseront

de l'être. La vigne et les cultures fruitières en pâtiront, car leur valeur économique est souvent associée au terroir de production.

Les stratégies d'adaptation

Pour limiter la vulnérabilité des cultures au changement climatique, plusieurs voies d'adaptation peuvent être envisagées. La première, explorée en priorité et facile à faire accepter, est la voie génétique. Elle consiste à sélectionner, chez les plantes, des stratégies dites d'esquive, d'évitement et de tolérance. L'esquive vise à décaler les stades les plus sensibles d'une culture, afin qu'ils n'adviennent pas en même temps que des conditions météorologiques défavorables. Ainsi, en cultures d'hiver, les grains de variétés plus précoces seraient mieux remplis, car soumis à des conditions plus tempérées. Ces stratégies sont parmi les plus étudiées aujourd'hui, parce qu'elles laissent espérer de bons résultats et que les mécanismes génétiques qui contrôlent les stades du développement sont de mieux en mieux connus.



Pti Jan/Shutterstock

En jouant sur une gamme de paramètres, tels que luminosité, température ou humidité, on étudie en laboratoire le développement de plantes dans de multiples conditions.

Comment prévoir les effets du changement climatique ?

Pour identifier les meilleures voies d'adaptation au changement climatique, il faut pouvoir mesurer l'impact de ses différentes composantes. À cette fin, les chercheurs disposent essentiellement de trois méthodes.

La première consiste à étudier le développement des cultures en fonction des évolutions antérieures du climat. C'est grâce aux chroniques historiques, par exemple, que la stagnation des rendements du blé observée en Europe depuis une quinzaine d'années, a pu être corrélée à une dégradation des conditions thermiques et hydriques lors des phases sensibles des cultures.

Deuxième méthode, l'expérimentation en conditions contrôlées. On utilise notamment des phytotrons où les paramètres environnementaux sont modulables – température, humidité, concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, rayonnement. L'évolution des fonctions physiologiques des cultures en fonction de ces paramètres peut ainsi être tracée. Toutefois, coûteux et de petite taille, ces dispositifs ne permettent pas de couvrir l'ensemble des combinaisons associant le climat, les sols, les espèces, les variétés et les pratiques agricoles.

La troisième méthode repose sur la modélisation. Il s'agit de simuler le comportement des espèces cultivées en réponse aux différents scénarios du changement climatique. Cette approche est la seule qui permette d'explorer le champ des possibles lié aux conditions futures. Ses résultats n'en demeurent pas moins soumis à de grandes incertitudes, en raison de la simplification des modèles et de l'incertitude inhérente aux modèles climatiques et socio-économiques.

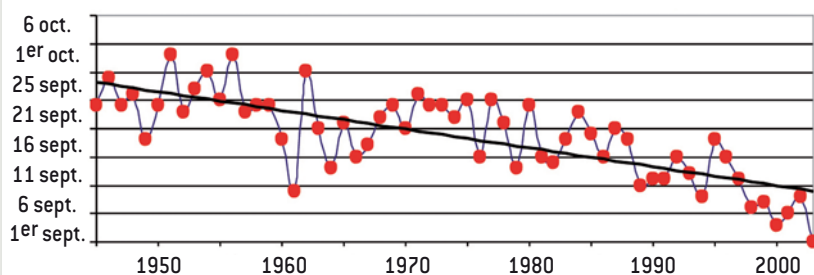
Les stratégies d'évitement visent, pour leur part, à limiter la sensibilité des plantes aux conditions défavorables. Il s'agit, par exemple, de favoriser l'accès à une ressource, via un système racinaire plus profond capable de capter de plus grandes quantités d'eau. Les pertes hydriques peuvent également être limitées en diminuant la surface des feuilles, ce qui a pour conséquence de restreindre l'évaporation. Enfin, les stratégies de tolérance reposent sur des processus physiologiques ou biochimiques qui facilitent

L'autre voie d'adaptation passe par l'agronomie. Pour répondre à l'avancement des stades de développement, des adaptations « tactiques » peuvent être mises en œuvre. Pour les cultures de printemps, par exemple, tels le maïs et le tournesol, on sème plus tôt des variétés tardives. Cette adaptation, déjà adoptée par les agriculteurs, a contribué à l'augmentation du rendement du maïs depuis une dizaine d'années en France. L'augmentation des températures précoces favorise la photosynthèse pour cette espèce d'origine tropicale.

Concernant la période 2030-2050, les simulations indiquent que l'avancement des cycles permettra de compenser, du moins en partie, l'élévation des risques liés aux précipitations.

Après 2050, le manque d'eau devrait se faire sentir, et l'effet des températures élevées serait plus marqué. Par la génétique et l'agronomie, on cherchera à sélectionner des espèces tolérantes aux températures extrêmes et à esquisser les périodes où le risque thermique est le plus élevé (décalage des dates de semis, variétés plus précoces). La demande en eau devrait augmenter pour compenser l'évaporation (par les feuilles) et la diminution des précipitations. Mais les ressources en eau sont déjà soumises à de fortes pressions, et il n'est pas évident que le recours à l'irrigation puisse être augmenté, ni même maintenu, étant donné l'augmentation de la demande.

Évolution du début des vendanges à Châteauneuf-du-Pape



Depuis 1945, la date du début des vendanges à Châteauneuf-du-Pape, dans le Vaucluse, a été avancée de près de trois semaines. Le cycle de développement des vignes s'est décalé en raison de la hausse progressive des températures moyennes ambiantes.

le développement de la plante dans des conditions défavorables : on sélectionne, par exemple, des enzymes dont le fonctionnement n'est pas altéré par des températures élevées.

Toutes ces approches font appel à la variabilité génétique naturelle des espèces cultivées, aux ressources génétiques conservées dans les collections ainsi qu'aux possibilités offertes par les biotechnologies. Elles se heurtent néanmoins à deux difficultés : d'une part, pouvoir anticiper précisément les conditions climatiques à venir pour sélectionner au mieux des variétés adaptées, notamment pour les espèces pérennes plantées pour plusieurs décennies ; d'autre part, réussir à combiner, au sein d'une même variété, des mécanismes d'adaptation à plusieurs contraintes, dont l'occurrence et l'intensité varient d'une année à l'autre et d'un endroit à l'autre

Plus généralement, l'accentuation des aléas climatiques nécessitera de revoir le calendrier habituel des cycles culturaux, pour éviter au mieux les événements extrêmes pendant les périodes de croissance. Si le risque de gel diminue encore et si l'amélioration des variétés le permet, on pourrait aussi envisager des semis d'automne (qui nécessitent moins d'eau) pour des espèces semées jusqu'alors au printemps. C'est déjà le cas pour le pois.

Toutefois, l'avancée des cycles pourrait avoir d'autres conséquences néfastes, telles que des attaques d'organismes nuisibles, des maladies émergentes ou les dégâts causés par des températures trop basses. Cela compliquerait la recherche de solutions optimales. C'est pourquoi, malgré leurs imperfections, les modélisations aideront à identifier les voies les plus prometteuses et à tester divers scénarios.

Agir sur les causes du réchauffement

Quoi qu'il en soit, les possibilités d'adaptation au changement climatique dépendront avant tout de son ampleur, et donc de notre capacité à agir sur ses causes en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Responsable d'un cinquième de ces émissions à l'échelle de la France, l'agriculture joue un rôle important. Le protoxyde d'azote, dont le pouvoir de « réchauffement » est 300 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone, représente 50 pour cent de ces émissions. Étroitement associé à l'utilisation des engrais, il est produit par les sols cultivés lors des réactions de transformation de l'azote (nitrification et dénitrification). Le méthane contribue pour 40 pour cent, mais il est surtout associé à l'élevage. Quant au dioxyde de carbone, il correspond à seulement 10 pour cent du total des émissions et provient des énergies fossiles utilisées notamment par les machines agricoles.

En juillet 2013, l'INRA, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, ADEME, et les ministères en charge de l'agriculture et de l'éco-

logie ont présenté les résultats d'une étude indiquant comment une série de mesures permettraient de réduire les émissions de gaz à effet de serre de près de 32 millions de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone par an.

Un tiers des actions préconisées donne lieu à un gain financier pour les agriculteurs. Elles correspondent surtout à des ajustements techniques : une utilisation mieux raisonnée des fertilisants azotés notamment, qui réduirait d'environ 25 pour cent les émissions de protoxyde d'azote. De même, des efforts plus soutenus en termes d'économies d'énergie (par exemple, une meilleure isolation des serres chauffées et des bâtiments d'élevage) conduiraient à diminuer de 20 pour cent les émissions de dioxyde de carbone, pour un gain estimé à 170 euros par tonne « évitée ».

Une deuxième série d'actions est envisageable et ce pour un coût limité : moins de 25 euros par tonne de dioxyde de carbone évitée. À titre d'exemples, citons la réduction de la fréquence des labours (coûteux en énergie), la production de biogaz à partir des effluents d'élevage (par le processus de méthanisation), le développement de l'agroforesterie pour favoriser le stockage du carbone dans les sols et la biomasse, ou encore l'accroissement de la part des légumineuses (espèces qui fixent l'azote) dans les cultures, afin de diminuer les besoins en engrais. Certaines de ces mesures nécessitent des investissements. Elles peuvent aussi entraîner une baisse modérée des productions, partiellement compensée par une diminution des charges. Les subventions associées à la tonne de dioxyde de carbone évitée auront donc une influence décisive pour la mise en œuvre de ces actions.

Enfin, la troisième série de mesures nécessiterait des dépenses plus élevées, supérieures à 25 euros par tonne de dioxyde de carbone évitée. Elle requiert l'achat de produits agricoles spécifiques, tels des inhibiteurs de nitrification, pour réduire les émissions de protoxyde d'azote, ou du



B. Brown/Shutterstock

Dans le Nord de l'Europe, les rendements de la betterave sucrière (pour le sucre, l'alcool ou des biocarburants) augmentent avec le réchauffement climatique.

temps de travail supplémentaire, tel que la culture de haies fixatrices de carbone. Bien que coûteuses, ces mesures contribueraient à la réduction des émissions, mais aussi à la qualité des paysages, la biodiversité et la lutte contre l'érosion.

Si l'agriculture doit réduire ses émissions, elle doit également gérer les sols qui sont des réservoirs de carbone. À l'échelle mondiale, le premier mètre de sol séquestrerait quelque 2000 gigatonnes de carbone organique, c'est-à-dire plus que la biomasse végétale et l'atmosphère réunies, représentant ainsi le premier réservoir de la biosphère. Les matières organiques, tels les débris végétaux ou les organismes qui peuplent le sol, sont les principaux acteurs du stockage et du déstockage. Le stock de carbone correspond au bilan entre les entrées (litière, résidus de culture, fumiers) et les sorties (respiration par les organismes du sol). Il est très variable selon le type de sol, le climat, l'occupation et la gestion des sols. Il est très élevé dans les pelouses d'altitude, dans les zones humides ou les

prairies, mais assez faible en viticulture, dans les zones méditerranéennes et de cultures intensives. L'enjeu est donc de préserver les sols qui représentent un « stock de carbone » important, mais fragile.

Par ailleurs, les mesures envisageables pour adapter les cultures et atténuer les effets du changement climatique étant souvent compatibles, elles pourraient être mises en œuvre simultanément. Toutefois, ce ne serait pas toujours le cas : l'accroissement des légumineuses réduirait les émissions de protoxyde d'azote, mais ces plantes sont très sensibles au manque d'eau. De même, les pratiques visant à augmenter les stocks de carbone dans les sols ou la biomasse, grâce à un couvert végétal plus important, risquent d'être remises en cause si la demande pour l'eau destinée aux cultures principales se renforce. La mise en œuvre et le suivi des mesures d'adaptation au changement climatique et d'atténuation nécessiteront de définir et d'examiner attentivement un ensemble de paramètres pour s'assurer de leur compatibilité.

Bibliographie

- S. Pellerin et L. Bamière (coord.), *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?*, INRA, 2013.
N. Brisson et F. Levraut (éd.), *Le Livre Vert du projet CLIMATOR. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, Agroclim, INRA, et Agropole, 2010.

Accompagner l'adaptation de l'élevage



Anne Mottet

Chargée des politiques d'élevage
à la FAO

David Renaudeau

Chercheur dans l'équipe Alimentation
et Nutrition de l'INRA

Jean-François Soussana

Directeur scientifique environnement
de l'INRA

L'élevage libère une quantité notable de gaz à effet de serre. Il est acteur du changement climatique, mais y est, en retour, sensible. Il est urgent de mettre en œuvre des mesures d'adaptation, dont certaines existent déjà.

Devrions-nous réduire notre consommation de produits animaux (viande, lait, œufs) pour lutter contre le réchauffement climatique? Cette question fait débat depuis une dizaine d'années. En cause: les émissions de gaz à effet de serre causées par l'élevage qui représenteraient selon la *Food and Agriculture Organization*, FAO, près de 15 pour cent de la contribution totale de l'homme à l'effet de serre. Or ce bilan pourrait encore s'aggraver, car si la consommation de viande a commencé à diminuer dans certains pays occidentaux, la demande en produits animaux va augmenter dans les pays en développement. D'ici 2050, la consommation mondiale pourrait progresser de 70 pour cent. Mais que se passera-t-il si le climat change et si des vagues de chaleur et des sécheresses perturbent de plus en plus les bassins d'élevage?

La question est d'autant plus complexe que l'élevage est pratiqué sur près de 30 pour cent des terres émergées: 3,4 milliards d'hectares de prairies

et pâturages, auxquels s'ajoutent un demi-milliard d'hectares pour les cultures liées à l'alimentation animale. Plus de 800 millions de personnes vivant sous le seuil de pauvreté dépendent de l'élevage pour leur survie et le secteur contribue à employer plus de 20 pour cent de la population mondiale. L'élevage des ruminants permet de produire des aliments sur des terres non cultivables (en raison de la pente, de l'altitude ou du climat) et de valoriser des ressources qui ne sont pas comestibles pour l'homme, telles que l'herbe et les fourrages.

Grâce au pâturage et à la pérennité des prairies, l'élevage extensif, s'il est bien conduit, contribue à la biodiversité, à la lutte contre l'enrichissement, et à la protection des sols et des eaux de surface. L'élevage représente aussi 40 pour cent du secteur économique agricole et connaît une croissance dynamique (plus de 3 pour cent par an). La viande, le lait et les œufs fournissent 18 pour cent des calories consommées, et près de 40 pour cent des apports en

protéines et en micronutriments essentiels (vitamines, minéraux, acides gras insaturés, par exemple).

Les causes de l'empreinte

Du fait de la diversité des producteurs et des situations, quantifier les émissions de gaz à effet de serre provenant des activités agricoles est complexe et sujet à de nombreuses incertitudes. De plus, les processus microbiologiques à l'origine des émissions de méthane ou de protoxyde d'azote sont très variables et on ignore comment évolue le stock global de carbone dans la matière organique contenue dans les sols.

Malgré ces incertitudes, la FAO a estimé les émissions de l'élevage, depuis l'usage des terres jusqu'à la transformation et au transport des produits animaux, soit sur plusieurs secteurs économiques. L'ensemble de cette chaîne de production représenterait 7,1 gigatonnes d'équivalent dioxyde de carbone par an soit 14,5 pour cent des émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre. De son côté, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, a montré dans son quatrième rapport que l'ensemble du secteur agricole contribue directement à plus de 14 pour cent des émissions, tandis que les changements d'utilisation des terres, qui incluent la déforestation tropicale, y contribuent pour 17 pour cent.

Les principales sources d'émissions identifiées par la FAO concernent tout d'abord la production et la transformation des aliments du bétail : cela correspond à 45 pour cent du total, dont 9 sont liés à l'expansion des pâturages et des cultures au détriment des forêts. Vient ensuite le méthane issu de la digestion des ruminants (39 pour cent), puis les émissions des effluents d'élevage, fumiers et lisiers, à hauteur de 10 pour cent. Le reste provient de la transformation et du transport des produits animaux.

Le changement climatique résultant de l'accumulation de gaz à effet de serre

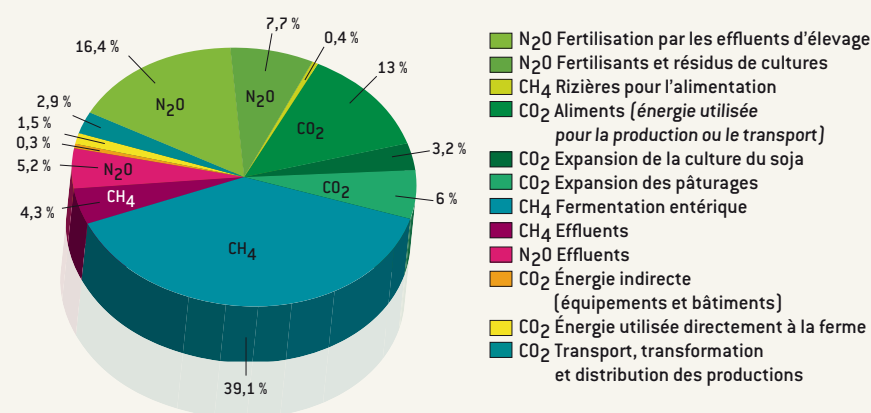
a des conséquences sur la production agricole et l'élevage. Ainsi, entre 1980 et 1999, de graves sécheresses ont entraîné la mort de 20 à 60 pour cent du cheptel de plusieurs pays d'Afrique subsaharienne. Durant l'été 2003, une canicule exceptionnelle en Europe a provoqué une chute des rendements des cultures de 20 à 30 pour cent et un déficit fourrager de 60 pour cent en France.

Or le nombre d'étés chauds pourrait augmenter au cours des 40 prochaines années. Les modifications du cycle de l'eau liées au réchauffement climatique devraient conduire à une répartition plus inégale des précipitations, plus intenses dans certaines ré-

atmosphérique devrait aussi limiter l'impact des sécheresses sur la végétation, car ce gaz provoque une fermeture partielle des stomates des feuilles. En se fermant, ces petits orifices réduisent la perte en eau des plantes.

Les animaux d'élevage sont, pour la plupart homéothermes : leur survie dépend de leur capacité à maintenir constante leur température interne. Exposés à la chaleur, ils réduisent leur prise alimentaire, leurs performances diminuent, leur mortalité augmente parfois. Ce type de situations, dont les conséquences sont graves, est notamment observé lors des vagues de chaleur estivales, telle celle qui a touché

Répartition des gaz à effet de serre produits par l'élevage



N₂O : protoxyde d'azote ; CH₄ : méthane ; CO₂ : dioxyde de carbone

gions, plus rares dans d'autres, entraînant des sécheresses prolongées, avec des risques accrus d'érosion des sols et de réduction de leur capacité à stocker l'eau et à fournir des nutriments.

En France, le projet VALIDATE, coordonné par l'INRA, a montré expérimentalement que le changement climatique peut réduire de 20 à 30 pour cent la productivité des prairies des zones tempérées. Toutefois, son impact serait plus limité dans des prairies semées de variétés méditerranéennes résistantes, mais aussi dans les alpages, où les variations de température et de pluviométrie sont déjà importantes. L'augmentation du dioxyde de carbone

l'Amérique du Nord en 2006 et a provoqué la mort de 700 000 volailles et de plus de 25 000 vaches laitières – et ce uniquement pour la Californie.

Un autre risque lié au changement climatique concerne les maladies des animaux d'élevage qui sont susceptibles d'émerger ou de ré-émerger, avec d'importantes conséquences sanitaires, écologiques, socio-économiques et politiques. Ainsi, le virus de la fièvre catarrhale, qui touche les ovins, se déplace déjà vers les zones tempérées d'Europe.

Dans ce contexte, réduire les émissions constitue une priorité pour le secteur de l'élevage. En témoignent diverses initiatives internationales,

telles que *AnimalChange*, un projet financé par l'Union européenne associant plus d'une centaine de chercheurs, de 21 pays européens, pour une recherche coordonnée en matière d'élevage, de changement climatique et de sécurité alimentaire. En France, une étude conduite par l'INRA a mis en évidence un potentiel d'atténuation important des émissions du secteur agricole français : d'ici 2030, les émissions pourraient être réduites de 32 millions de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone par an. L'élevage est concerné par plusieurs mesures : gestion des prairies et des effluents, modifications des rations alimentaires et méthanisation (voir l'encadré ci-contre).

Une étude conduite par la FAO a constaté que les quantités de gaz à effet de serre varient considérablement entre exploitations d'élevage voisines. Constatation encourageante, car, en appliquant les techniques d'élevage des exploitations les plus « propres », on pourrait diminuer l'empreinte carbone d'environ 30 pour cent. En théorie, les émissions peuvent reculer dans tous les systèmes – de la production industrielle de volailles en Asie aux élevages transhumants d'ovins et de caprins des zones arides africaines.

Cet objectif pourrait être atteint grâce à des techniques déjà existantes, mais encore peu répandues. Par exemple, les systèmes extensifs ovins et caprins en Afrique de l'Ouest pourraient produire plus tout en émettant moins de gaz à effet de serre grâce à l'utilisation renforcée des résidus de cultures, à l'amélioration de l'état de santé des animaux, au moyen de vaccins ou de vermifuges, et à la gestion du pâturage. Cette étude souligne aussi le potentiel de stockage de carbone dans les sols des prairies, par l'intermédiaire des racines et du couvert végétal. Cela passe par une intensification modérée dans certaines régions et une restauration des prairies dégradées dans d'autres, ainsi que le développement des systèmes agropastoraux.

Des recherches pour s'adapter

Peut-on rendre le secteur de l'élevage moins vulnérable aux effets du réchauffement climatique ? De grandes stratégies apparaissent. La première s'appuie sur l'alimentation du bétail. Elle vise à limiter les fluctuations de productivité, d'une part, en sélectionnant des espèces fourragères plus résistantes pour les prairies temporaires et, d'autre part, en améliorant la gestion du pâturage des prairies permanentes. Il s'agit aussi, notamment pour les volailles et porcs, de

renforcer l'utilisation de ressources qui n'entrent pas en concurrence avec l'alimentation humaine (coproduits industriels type tourteaux, par exemple). En même temps, il est nécessaire d'améliorer l'efficacité avec laquelle les animaux utilisent leur ration pour la transformer en viande, en lait ou en œufs. Parmi les différentes voies possibles, citons par exemple l'amélioration de la qualité des rations ou la sélection d'animaux transformant plus efficacement leur ration en production (lait, viande).

La méthanisation prend de l'importance dans le monde



Ces unités de méthanisation (en Allemagne, à gauche, et au Ghana, à droite), de tailles très différentes, produisent une énergie renouvelable (biogaz) à partir des effluents d'élevage.

Sous l'action de micro-organismes et en l'absence d'oxygène, la méthanisation dégrade la matière organique issue des effluents d'élevage. Elle conduit à deux sous-produits. Le premier est nommé digestat : riche en matière organique, il est généralement utilisé comme engrais. Le second est un mélange gazeux (biogaz) composé surtout de méthane et de dioxyde de carbone. Une partie du méthane présent dans les fumiers et les lisiers se trouve transformée en dioxyde de carbone, dont le pouvoir de « réchauffement » est 25 fois inférieur à celui du méthane.

Capté dans les unités de méthanisation, le biogaz peut être valorisé de plusieurs façons : en combustion pour le chauffage ou la cuisson, en cogénération pour produire de l'électricité et de la chaleur, ou directement dans le réseau de gaz naturel. La méthanisation permet ainsi de produire une énergie renouvelable, tout en diversifiant les revenus des exploitants et en réduisant leur empreinte carbone.

En France, ce procédé se développe rapidement avec le soutien des pouvoirs publics. Près de 160 unités de méthanisation utilisent actuellement les effluents d'élevage : individuelles ou collectives, elles produisent une énergie primaire estimée à 650 mégawatt-heures. En 2030, selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, ADEME, l'énergie primaire issue de la méthanisation devrait être multipliée par plus de 100 000, et atteindre 69 térawatt-heures – soit 3 pour cent de la production énergétique. On estime que 78 pour cent de cette énergie proviendrait du monde agricole. En 2050, toujours selon l'ADEME, elle pourrait s'élever à 104 térawatt-heures : la méthanisation deviendrait alors la troisième source d'énergie renouvelable du pays.

Marc Bardinal et Julien Thual, ADEME

Une deuxième stratégie consiste à développer des programmes de sélection pour rendre les animaux moins sensibles aux conditions d'élevage difficiles (chaleur, restriction hydrique ou alimentaire). Du fait de leur grande capacité d'adaptation, les races locales rustiques sont au cœur de ces programmes de sélection. Sur ce sujet, des programmes de recherches ambitieux sont actuellement conduits à l'INRA, notamment sur le porc et la volaille.

Une troisième voie d'adaptation repose sur la maîtrise des risques sanitaires qui tendent à augmenter avec le réchauffement. Il faut anticiper les changements de répartition géographique des agents pathogènes et limiter leurs conséquences sur les élevages. Cet objectif est poursuivi par des méthodes de diagnostic et de vaccination, et en favorisant de nouvelles conduites d'élevage *via* l'association d'espèces animales notamment. Pour lutter contre les vers intestinaux des ruminants, on peut, par exemple, associer, sur une parcelle infectée, de petits et de gros ruminants ; ces derniers sont moins sensibles aux parasites, ce qui réduit la contamination de la prairie et la mortalité des petits ruminants.

En agriculture, l'adaptation passe aussi par une meilleure gestion du risque climatique, ce qui nécessite souvent la diversification des cultures et des systèmes d'élevage. Les petits éleveurs, en particulier ceux situés dans des environnements difficiles, ont développé des stratégies qui les rendent moins vulnérables aux chocs climatiques et les aident à en gérer les impacts. Le partage des risques au sein des familles et des communautés rurales, les mesures d'anticipation (stockage de fourrages), ainsi que les mécanismes d'assurance font partie de ces stratégies autonomes, qui ne sont toutefois pas suffisantes pour faire face à des changements climatiques de grande ampleur.



Comme tous les ruminants, les moutons rejettent du méthane au cours de la digestion.

De nombreuses innovations seront donc nécessaires : utilisation accrue de la diversité biologique, écotechnologies pour mieux collecter et économiser l'eau, prévisions météorologiques saisonnières... Cependant, le succès de ces technologies dépendra de leur efficacité technique et de la proportion de ceux qui les adopteront, deux facteurs limités, dans de nombreuses régions en développement, par la pauvreté, la faim, le manque de ressources financières, la dégradation environnementale et les conflits.

Il est possible de combiner à la fois réduction des émissions et adaptation au changement climatique : par exemple, en évitant le surpâturage, on peut restaurer les stocks de carbone d'un sol tout en favorisant une meilleure résistance à la sécheresse. Ainsi, il existe des synergies, mais les antagonismes ne sont pas absents : la sélection des animaux pour améliorer leur potentiel de production a tendance à

augmenter leur sensibilité aux facteurs externes (par exemple la chaleur). Les solutions pour combiner adaptation et atténuation ne sont donc pas toujours faciles à trouver et elles devront être adaptées en fonction des systèmes d'élevage et des contextes climatiques.

Réagir vite

Conscient de l'urgence, le secteur réagit. De nombreuses initiatives associant acteurs privés et publics ont vu le jour au cours des dix dernières années. Les filières se mobilisent à l'instar du secteur laitier français. Ainsi, lancé fin 2013, le plan d'action *Carbon Dairy* vise à réduire de 20 pour cent en dix ans les émissions de gaz à effet de serre dans 3 900 fermes.

Au-delà des cadres politiques internationaux et des négociations, telles que le Protocole de Kyoto ou la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, il est essentiel de soutenir les actions concertées regroupant l'ensemble des acteurs : les producteurs, les transformateurs, les gouvernements, les ONG, la société civile et la recherche.

Aujourd'hui, les chercheurs doivent évaluer le potentiel des différentes approches susceptibles de réduire les émissions de gaz à effet de serre et les voies d'adaptation de l'élevage, afin de définir des priorités. Il leur appartient aussi de chiffrer les actions envisagées, de continuer à développer des innovations capables de réduire l'empreinte carbone, et d'élaborer des outils permettant de prédire précisément les conséquences du changement climatique sur l'élevage pour les 50 prochaines années tout en définissant les mesures à mettre en place... rapidement.

Bibliographie

- P. Berger et al., *Tackling climate change through livestock. A Global assessment of emissions and mitigation opportunities*, FAO, 2013.
M. Mahieu et al., *Intensive grazing system for small ruminants in the Tropics: The French West Indies experience and perspectives*, *Small Ruminant Research*, vol. 77, n° 2, pp. 195-207, 2008.

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 dépéri, 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.



Ph. Riou Nivert, DSF

*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



A. Bosc, INRA

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.

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-