

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 luttaient 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-

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-

tières 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.