

■ POUR LA
SCIENCE

Mars 2015

www.inra.fr

Ne peut être vendu

Édition française de Scientific American

**L'ADAPTATION
AU CHANGEMENT
CLIMATIQUE**



L'INRA, pour une Science... ...belle, utile, partagée & responsable

Créé en 1946, l'Institut national de la recherche agronomique (INRA)
– organisme de recherche public placé sous la tutelle du ministère de l'Éducation nationale,
de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Agriculture,
de l'Agroalimentaire et de la Forêt – a pour missions de :



Produire et diffuser des connaissances scientifiques
Contribuer à l'élaboration de la stratégie nationale de recherche
Éclairer les politiques publiques et les décisions des acteurs privés
Contribuer à concevoir des innovations
Contribuer à la formation à et par la recherche
Participer aux débats sur la Science en société
Promouvoir éthique et déontologie de la recherche

- Dans les trois grands domaines que sont l'alimentation, l'agriculture et l'environnement, les recherches de l'INRA ont pour ambition de développer une agriculture à la fois compétitive, respectueuse de l'environnement, des territoires et des ressources naturelles, et mieux adaptée aux besoins nutritionnels de l'homme ainsi qu'aux nouvelles utilisations des produits agricoles. Elles ont pour objectif majeur de contribuer à la sécurité alimentaire dans un contexte de changement global à l'horizon 2050.
- En 2014, l'INRA rassemble 8 290 agents titulaires, dont 1 840 chercheurs et 1 756 ingénieurs. Ses 186 unités de recherche et 48 unités expérimentales sont réparties sur 13 départements scientifiques et dans 17 centres régionaux.
- En termes de publications scientifiques, l'Institut se situe en 3^e position mondiale dans le domaine de l'agriculture et au 4^e rang mondial en sciences des plantes et de l'animal. De plus, l'INRA se positionne parmi les premiers organismes mondiaux en microbiologie, en écologie et en environnement.

AVANT-PROPOS	4
F. Houllier	
L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	6
J.-M. Guehl, J.-F. Soussana	
LES DÉFIS DE L'AGRICULTURE	10
F. Debaeke, S. Pellerin, J. Le Gouis, A. Bispo, T. Eglin, A. Trévisiol	
ACCOMPAGNER L'ADAPTATION DE L'ÉLEVAGE	14
A. Mottet, D. Renaudeau, J.-F. Soussana	
VERS UNE GESTION ADAPTATIVE DES FORÊTS	18
F. Lefèvre, D. Loustau, B. Marçais	
PRÉSERVER LA RICHESSE DES MILIEUX AQUATIQUES	22
M.-É. Perga, É. Prévost, J.-L. Baglinière	
ANTICIPER UNE DIMINUTION DE LA RESSOURCE EN EAU	26
F. Habets, Ph. Mérot, B. Itier, A. Thomas	
VERS UNE ÉCOLOGIE DE LA SANTÉ	30
O. Plantard, L. Huber, J.-F. Guégan	
COMMENT GÉRER LES FLUX MIGRATOIRES ?	36
F. Gemenne	
LES ENJEUX ÉCONOMIQUES	38
P.-A. Jayet, S. de Cara, N. de Noblet-Ducoudré	
DES MENACES AUX SOLUTIONS	42
J.-F. Soussana, T. Caquet, J. Mousset	
LE MÉTAPROGRAMME ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORÊT (ACCAF) DE L'INRA	46
T. Caquet, J.-M. Guehl, N. Breda	

En partenariat avec



Les recherches sur l'adaptation au changement climatique : une priorité !

Les rapports successifs du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le GIEC, l'ont montré: des changements climatiques majeurs sont en cours et leurs effets sont aujourd'hui avérés. Quelles que soient les politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre qui seront mises en œuvre, ces effets vont s'amplifier durant plusieurs décennies du fait de la double inertie du système climatique et des trajectoires de nos sociétés.

Des changements profonds affecteront ainsi non seulement les systèmes naturels continentaux et océaniques et la production primaire, agricole, forestière ou halieutique, mais aussi de nombreuses autres activités économiques et humaines. Autrefois objet de recherches scientifiques concernant un avenir plus ou moins défini, la question du changement climatique est ainsi devenue un enjeu majeur pour nos sociétés. Au-delà de l'avancée des connaissances sur les différentes facettes du sujet – ce besoin évident demeure – c'est un « agenda de solutions » qui est aujourd'hui attendu: certes, la communauté scientifique n'est pas la seule concernée par son élaboration, mais elle a une responsabilité et un rôle à jouer.

Dans ce cadre, les recherches sur les interactions entre les changements climatiques et les cultures, les prairies, les forêts, les zones humides ou les milieux naturels sont évidemment essentielles. Plus ou moins anthropisées, ces surfaces continentales couvrent en effet une fraction majeure des terres émergées de notre planète et sont le support de services essentiels pour nos sociétés: la sécurité alimentaire, les ressources en eau et la santé globale en dépendent plus ou moins directement.

Ces surfaces continentales sont profondément impliquées dans les cycles qui déterminent l'évolution de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, dont nous savons qu'elle est à l'origine des changements climatiques observés et prévus. Naturels ou directement liés aux activités humaines, les nombreux processus

et facteurs mis en jeu font l'objet de recherches depuis quelques décennies: mécanismes biogéochimiques et écologiques; suivi, quantification et modélisation des émissions de gaz à effet de serre et du cycle du carbone, avec un intérêt particulier pour les sols et la biomasse ainsi que les produits qui en dérivent; effets des pratiques agricoles et forestières. Rapidement apparue comme une priorité, la lutte contre les changements climatiques demeure essentielle: des engagements ont ainsi été pris au niveau international (Protocole de Kyoto, en 1997, et ses suites) et des politiques publiques européennes et nationales ont été engagées afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Dans leur diversité de nature et d'usage, ces surfaces continentales sont affectées par les changements de la composition atmosphérique et du climat. En France, dans les années 2000, le constat de l'avancement des dates de vendange par Isabelle Chuine ou

L'adaptation au changement climatique est un complément indispensable aux politiques d'atténuation. Elle doit combiner des disciplines, des technologies et des approches différentes.

le diagnostic de la part du climat dans la stagnation des rendements du blé par Nadine Brisson ont contribué à la reconnaissance de l'existence et de l'ampleur du phénomène; la sécheresse et la canicule de l'été 2003 ont aussi joué un rôle majeur dans la prise de conscience du fait que l'accroissement prévu de la variabilité climatique était au moins aussi important que les tendances moyennes sous-jacentes. Au-delà de ces exemples emblématiques, la caractérisation des risques dus aux changements climatiques demeure un enjeu scientifique important sous plusieurs angles: la fréquence, la magnitude et les cascades d'impacts dus aux événements extrêmes; l'évaluation de leurs conséquences économiques et sociales.

Le constat de l'existence des changements climatiques étant maintenant établi et partagé, la diversité et l'amplitude de leurs impacts étant progressivement révélées, c'est bien l'adaptation aux changements climatiques qui émerge depuis quelques années comme un domaine de recherches prioritaire. En 2006, le rapport de Nicholas Stern a démontré l'intérêt économique d'être adapté: il a souligné que l'adaptation devait être anticipée afin d'en réduire les coûts et d'en anticiper les bénéfices. Lors de la conférence de Cancun de 2010 sur le climat, l'adaptation aux changements climatiques est ainsi apparue comme un complément indispensable aux politiques d'atténuation. Selon la nature des systèmes concernés l'adaptation pose évidemment des questions scientifiques différentes. Dans tous les cas, il apparaît cependant qu'elle doit combiner des disciplines, des technologies et des approches différentes: la diversification, l'agronomie et la génétique, pour les cultures; l'alimentation animale, la génétique, la méthanisation des effluents et la conception des bâtiments, pour l'élevage; une gestion adaptative, pour les forêts et de nombreux milieux naturels. La prise en compte d'une variabilité climatique accrue et l'anticipation des risques sanitaires apparaissent aussi comme des défis majeurs.

Compréhension du rôle des surfaces continentales agricoles et forestières dans les grands cycles biogéochimiques, dissection et évaluation des impacts des changements climatiques, conception et évaluation de stratégies couplées d'atténuation et d'adaptation: ces différents domaines de recherches sont évidemment liés les uns aux autres. Tous appellent au dialogue entre les disciplines – entre sciences de la nature, de l'univers et de la vie, d'une part, et sciences humaines, économiques et sociales, d'autre part – comme au dialogue entre observation, expérimentation et modélisation. Tous appellent également à dépasser l'étude des mécanismes pris isolément, à appréhender les phénomènes à différentes échelles, à développer des approches systémiques et à renforcer la collaboration entre organismes de recherche et la coopération internationale. On observe ainsi la prolifération d'initiatives scientifiques nationales, européennes et internationales, dont l'alignement et la mise en cohérence constituent certes un défi, mais dont



Christophe Maître

François Houllier,
Président Directeur Général de l'INRA

la diversité est aussi le témoin de l'ampleur du spectre des questions posées et de la mobilisation croissante de la communauté scientifique.

Cet ouvrage est le fruit d'une collaboration éditoriale avec *Pour la Science* et d'un travail scientifique collectif, le métaprogramme Adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt, coordonné et stimulé par Jean-Marc Guehl, Thierry Caquet et Jean-François Soussana dont je salue ici l'initiative. Au travers du prisme des recherches et des compétences de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) et de ses collaborations, cet ouvrage reflète les évolutions des recherches sur la transition climatique: il rend compte de l'avancée des connaissances et illustre le mouvement engagé vers l'adaptation aux changements climatiques; je suis heureux qu'il contribue ainsi à apporter une pierre à la construction de l'agenda de solutions qui est aujourd'hui attendu. C'est d'autant plus important que, s'agissant de sécurité alimentaire, de ressources en eau, de biodiversité ou de santé globale, la transition climatique s'inscrit dans un cortège de transitions et changements globaux – transition démographique, transition alimentaire et nutritionnelle, changements d'usage des terres, transition énergétique – dont la conjonction est un véritable défi.



Shutterstock / Artens

Face au réchauffement enregistré à la surface du globe depuis quelques décennies et à la multiplication des événements extrêmes, l'heure n'est plus seulement à la lutte contre l'effet de serre et à l'estimation de l'amplitude du changement climatique. Il s'agit aujourd'hui d'évaluer les conséquences des modifications pour anticiper les adaptations qu'il convient d'envisager. Dans ce cadre, l'Institut national de la recherche agronomique, INRA, a créé un métaprogramme nommé Adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt, ACCAF.

La parution du cinquième rapport du GIEC fournit l'occasion d'un tour d'horizon des principales recherches réalisées sur l'adaptation au changement climatique. Ce cahier spécial regroupe une série d'articles faisant un bilan des adaptations des différents types de milieux ou d'activités (forêts, milieux aquatiques, agriculture, élevage) et des principaux enjeux pour les sociétés (ressources en eau, santé, migrations humaines, économie).

AGRICULTURE, FORÊTS ET ÉCOSYSTÈMES

L'adaptation au changement climatique

Jean-Marc Guehl

Directeur du métaprogramme ACCAF de l'INRA,
Directeur de l'UMR Écologie et écophysologie forestières
INRA-Université de Lorraine à Nancy

Jean-François Soussana

Directeur scientifique environnement de l'INRA

Le premier volume du cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le GIEC, a été publié le 27 septembre 2013. Il porte sur le système climatique et l'évolution du climat. Ce rapport confirme le réchauffement observé depuis les années 1950 (0,6 °C). Les projections pour 2100 dépendent des activités humaines et des incertitudes sur les modèles, de sorte que le réchauffement prévu varie entre 1,1 et 4,8 °C. Un deuxième volume publié le 29 mars 2014 a été consacré aux impacts du changement climatique, aux adaptations possibles et à la vulnérabilité des systèmes et des populations humaines exposées. Un troisième volet consacré aux recherches visant à atténuer les impacts du changement climatique est paru le 11 avril 2014. Enfin, en octobre 2014, une synthèse a été diffusée. Ses conclusions seront examinées par la Conférence des parties sur le climat, à Paris en décembre 2015.

Cet exercice d'expertises scientifique collective et de raisonnement prospectif a impliqué plus de 800 chercheurs de par le monde. Il est fondé sur l'analyse minutieuse des publications scientifiques et des méthodes utilisées. Chaque conclusion est caractérisée par un indice de confiance et un indice d'incertitude. Si le premier rapport de 1990 n'avait impliqué que des spécialistes des sciences du climat, le nouveau met en relief le caractère interdisciplinaire des approches. Sciences de la nature et sciences de la société y ont participé, ce qui dénote le souci d'éclairer au mieux les orientations politiques, économiques et sociales que les impacts du changement climatique, variant notablement selon les régions du monde, imposeront de prendre.

Les surfaces continentales, dans leur diversité de nature ou d'usage, qu'elles soient cultivées ou proches des milieux naturels (forêts, prairies

permanentes, milieux aquatiques, zones humides et sauvages), ont un statut complexe quand il s'agit de changement climatique. D'abord, les impacts et les risques potentiels sont considérables, puisqu'ils touchent les ressources végétales et animales, les milieux, les activités économiques qui y sont liées, la sécurité alimentaire, le fonctionnement des écosystèmes, la biodiversité, les ressources en eau, la santé. Ensuite, ces surfaces sont émettrices de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote), en raison de processus naturels, mais aussi du fait des activités humaines (agriculture, élevage, déforestation). Mais nous verrons que, simultanément, elles peuvent absorber et séquestrer des quantités importantes de carbone et ainsi atténuer l'importance du changement climatique.

Le chimiste suédois Svante Arrhenius a été le premier à prévoir, en 1896, que l'accumulation du

dioxyde de carbone dans l'atmosphère liée à l'utilisation de combustibles fossiles entraînerait un réchauffement de la planète. Mais c'est en 1958, à l'occasion de l'année géophysique internationale, que les géochimistes Charles Keeling et Roger Revelle, de l'Institution Scripps d'océanographie, ont installé à l'Observatoire de Mauna Loa, situé au sommet de l'île volcanique de l'archipel d'Hawaii, le premier système de mesure en continu de la concentration du dioxyde de carbone atmosphérique. Ces mesures représentent la série la plus longue dont on dispose aujourd'hui.

Des sources et des puits de dioxyde de carbone en évolution

Quels en ont été les principaux résultats ? La concentration atmosphérique du dioxyde de carbone augmente de façon spectaculaire depuis 1958. Voisine de 315 ppm (nombre de molécules par million de molécules d'air hormis la vapeur d'eau) en 1958, elle a dépassé 400 ppm pour la première fois en mai 2013. Les valeurs obtenues à partir de bulles d'air emprisonnées dans la glace de l'Arctique et de l'Antarctique avant l'ère industrielle (à la fin du XVIII^e siècle), sont proches de 280 ppm. La vitesse d'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone croît aussi : de 0,7 ppm par an au début des années 1960, elle est passée à 2,0 ppm par an entre 2000 et 2010. Cette accélération est à rapprocher de l'emballement des émissions de dioxyde de carbone d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz), dû notamment à la production de ciment : ces émissions ont atteint 35 gigatonnes (milliards de tonnes) en 2011. La déforestation, autre source d'émission de dioxyde de carbone, présente une contribution par les forêts tropicales de quatre gigatonnes de dioxyde de carbone par an.

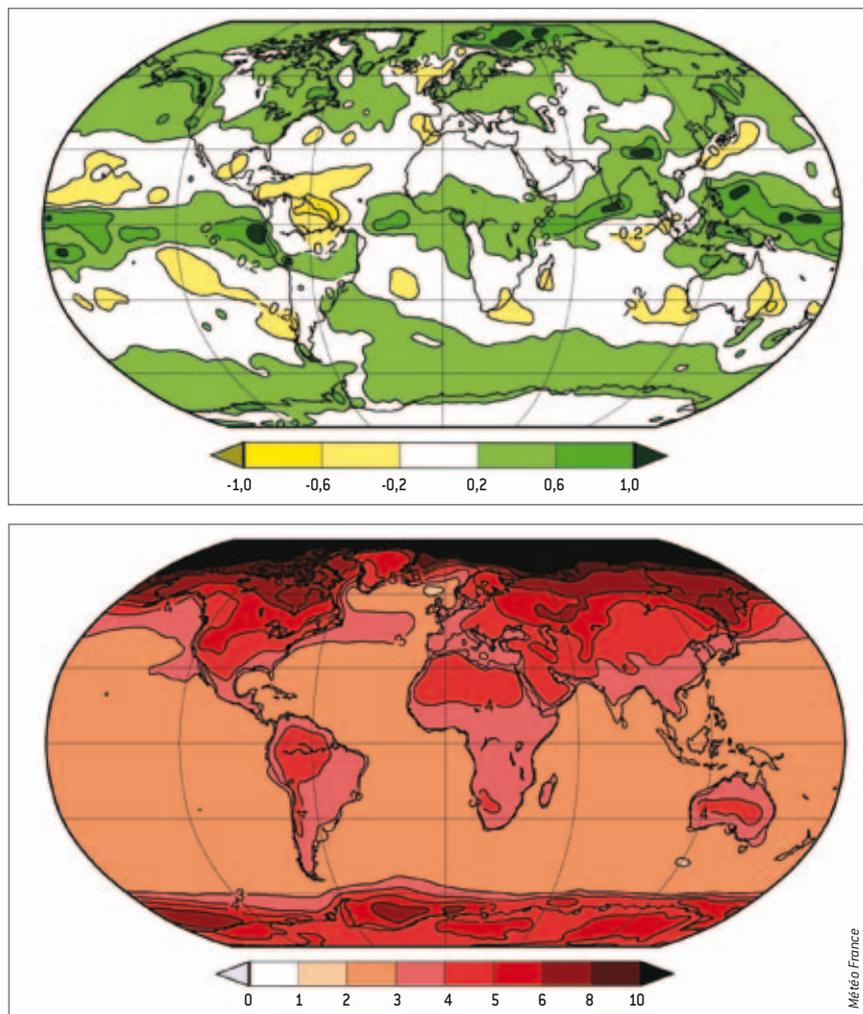
Mais à côté de ces chiffres inquiétants, les recherches révèlent qu'il existe des « amortisseurs » limitant l'ampleur de ces augmentations. Ainsi, on ne retrouve dans l'atmosphère que la moitié environ des quantités de dioxyde de carbone émises. Ce phénomène s'applique aux bilans réalisés au cours de la dernière décennie, mais aussi aux chiffres enregistrés depuis le début de l'ère industrielle. On estime que 2000 (±312) gigatonnes de dioxyde de carbone ont été émises dans l'atmosphère de 1750 à 2011, du fait des acti-

vités humaines, dont 1340 (±110) sont attribuées à l'utilisation de combustibles fossiles et à la production de ciment, et 660 (±295) à la déforestation et au changement d'usage des terres ; 880 gigatonnes « seulement » se sont accumulées dans l'atmosphère.

Les progrès réalisés dans l'évaluation des flux et des bilans de carbone à l'interface océan-atmosphère et à l'interface continents-atmosphère, par des mesures et la modélisation des processus, ont permis d'élucider ce phénomène. Il existe des échanges de dioxyde de carbone intenses entre les océans et les surfaces terrestres, d'une part, et l'atmosphère, d'autre part. Ces échanges qui ont lieu dans les deux sens sont de l'ordre de 290 gigatonnes de dioxyde de carbone par an pour les océans et de 440 pour les surfaces

terrestres. Toutefois, le bilan fait apparaître un léger déséquilibre se traduisant par une accumulation nette de l'ordre de 9 gigatonnes par an dans les océans et à peu près autant dans les systèmes terrestres. Ainsi, ces systèmes atténuent l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique.

La décomposition des flux par régions a révélé que les forêts tempérées et boréales de l'hémisphère Nord représentent un puits de carbone important. De fait, ces surfaces sont globalement en expansion, accroissant le stock de carbone dans la biomasse. En outre, l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone a un effet « fertilisant », c'est-à-dire qu'elle stimule la photosynthèse et la productivité forestière, donc améliore l'efficacité du « piège ». De surcroît, les dépôts



Résultats des modélisations (modèle CNRM-CM5) indiquant en moyenne annuelle la différence des précipitations (en millimètres par jour, en haut) et des températures (en °C, en bas) entre la période 1970-2000 et la période 2071-2100 dans le scénario RCP8.5 du 6^e rapport du GIEC. Il pleuvrait moins sur certaines régions intertropicales, dont l'Amazonie. La température pourrait augmenter de dix degrés dans les régions les plus septentrionales.



Station météo miniature dans le vignoble argentin. Monter en altitude ou changer de latitude peut être un moyen de s'adapter au changement climatique.

Hervé Duénoal, CNRS

atmosphériques d'éléments minéraux issus de la pollution atmosphérique, tels que l'azote et le soufre, pourraient renforcer cet effet fertilisant. La contribution des surfaces agricoles est plus variable : en Europe, les prairies représenteraient un puits de carbone, mais les cultures une source.

Le puits de carbone terrestre continuera-t-il à être aussi efficace dans le futur ? Cela n'est pas certain. Il pourrait l'être de moins en moins, voire cesser de fonctionner en raison de deux mécanismes : d'une part, la biomasse forestière et les sols des écosystèmes terrestres risquent d'être saturés, ce qui réduirait la capacité de séquestration du carbone. D'autre part, le réchauffement climatique futur et l'accentuation des sécheresses risquent de faire basculer ces écosystèmes de l'état de puits à celui de source de dioxyde de carbone, car la photosynthèse serait réduite et la décomposition de la matière organique des sols serait stimulée. La réduction de la productivité et de la séquestration de carbone observée à l'échelle de l'Europe à la suite de la sécheresse et de la canicule de 2003 préfigure une telle évolution.

Le dioxyde de carbone n'est pas le seul gaz à effet de serre qui participe au réchauffement climatique. C'est aussi le cas, entre autres, du protoxyde d'azote (N_2O) et du méthane (CH_4), dont les concentrations atmosphériques

sont mesurées en continu depuis 1976 pour le premier et depuis 1983 pour le second.

D'autres gaz à effet de serre

Ces gaz s'accumulent rapidement dans l'atmosphère et contribuent notablement au réchauffement, malgré leurs faibles concentrations atmosphériques, car leur capacité moléculaire de piégeage du rayonnement infrarouge lointain émis par la Terre est supérieure à celle du dioxyde de carbone. Le méthane est pour la moitié environ (entre 35 et 50 pour cent) d'origine naturelle : il est émis par les zones humides. Le reste est issu de l'agriculture (fermentation entérique des ruminants, effluents d'élevage, rizières), de la fermentation des déchets et d'émissions liées aux énergies fossiles et à la combustion de la biomasse. De surcroît, le réchauffement climatique futur prévu aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord aboutirait à la disparition d'une partie des pergélisols, ce qui pourrait entraîner la libération de quantités importantes du méthane actuellement piégé dans ces sols gelés en permanence. Quant au protoxyde d'azote, il est pour les deux tiers d'origine naturelle, lié à la dénitrification des sols et des océans, et pour un tiers d'origine anthropique en lien avec l'utilisation des engrais azotés, de la combustion de biomasse et d'émissions associées aux dépôts atmosphériques d'azote.

Ainsi, la biomasse et les sols permettent aujourd'hui d'atténuer en partie les impacts du changement climatique parce qu'ils séquestrent du carbone. Toutefois, non seulement les puits de carbone terrestres actuels risquent de devenir moins efficaces, mais d'autres sources de gaz à effet de serre pourraient apparaître au moment où les émissions liées à l'agriculture ne cessent de croître. Dès lors, s'il faut continuer à tenter d'atténuer les impacts du changement climatique, il faut aussi chercher comment s'y adapter.

Comment s'adapter au changement climatique ?

D'abord en anticipant mieux l'évolution du climat. Les modèles climatiques ont été notablement améliorés, grâce à une meilleure prise en compte de l'ensemble des gaz à effet de serre et de l'ensemble des phénomènes dits de forçage radiatif, c'est-à-dire de la différence entre l'énergie reçue et celle émise par le système climatique planétaire qui, *in fine*, détermine le réchauffement planétaire. Les puissances de calcul ont été renforcées, les méthodes de modélisation améliorées et on a assisté à une mobilisation sans précédent de la communauté des modélisateurs avec une approche dite ensembliste, permettant de comparer divers modèles. Enfin, la résolution spatiale des modèles a été considérablement améliorée. Par exemple, la maille élémentaire du système de simulation Euro-CORDEX est égale à 12 kilomètres sur 12, de sorte que la représentation des phénomènes locaux et des événements extrêmes – telles les vagues de chaleur et les sécheresses – est bien plus fine.

Quatre nouveaux types de scénarios climatiques, ou plutôt d'hypothèses de scénarios formulées par le GIEC, sont fondés sur différentes valeurs de forçage radiatif, liées à autant d'hypothèses d'atténuation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Les simulations faites à partir de ces modèles ont montré que le réchauffement depuis 1950 (+ 0,6 °C), ainsi que la fréquence des événements extrêmes ne peuvent être expliqués que par le forçage externe (lié aux activités humaines) du climat. D'après les simulations, le réchauffement à moyen terme (2035) resterait assez

limité quel que soit le scénario ; le réchauffement à long terme (2100) serait important et contrasté en fonction des scénarios, mais pourrait dépasser 4 °C en Europe.

L'Europe du Sud devrait subir un réchauffement beaucoup plus rapide que l'Europe du Nord en été, et le réchauffement hivernal serait plus rapide sur l'Est et le Nord de l'Europe. Les précipitations devraient être plus fortes sur le Nord de l'Europe et plus faibles sur le Sud (y compris sur la partie méridionale de la France). Des périodes sèches plus prononcées et nombreuses et des vagues de chaleur plus fréquentes surviendront vraisemblablement.

À court et moyen termes, la concentration atmosphérique élevée du dioxyde de carbone et le réchauffement pourraient avoir des conséquences positives sur la production des écosystèmes et de l'agriculture sous les latitudes élevées notamment. En revanche, à plus long terme, les effets négatifs liés aux températures élevées et aux sécheresses pourraient l'emporter. Ils menacent déjà les zones tropicales sèches et la Méditerranée.

L'adaptation aux changements climatiques nécessite aussi une bonne connaissance des réponses des organismes, populations et communautés vivantes et plus largement des écosystèmes, qu'ils soient naturels ou plus ou moins artificiels. Des processus biologiques et écologiques essentiels risquent d'être modifiés, à commencer par la production, ainsi que le début et la fin de périodes actives, qui, chaque année, déterminent les interactions des espèces au sein des écosystèmes. Par ailleurs, les aires de répartition des espèces risquent d'être modifiées. Aux latitudes de la France, une augmentation de 1°C est associée à un déplacement des zones thermiques de 150 kilomètres vers le Nord en plaine ou de 150 mètres d'altitude en montagne.

Cet effet déclenche une migration des organismes les plus mobiles (micro-organismes, animaux, végétaux à dispersion rapide et cycle de reproduction court), alors que les organismes moins mobiles, tels les arbres, ou confinés dans leur milieu, comme les espèces lacustres, subiront des déséquilibres menaçant leur survie. Dans certains cas, des réponses naturelles, telle l'ap-

titude d'une population ou d'une espèce à s'acclimater sans variation génétique quand le milieu varie, ou des adaptations génétiques rapides, pourraient réduire ces impacts. Mais il sera nécessaire d'assister ces phénomènes, par exemple en établissant des corridors pour favoriser les migrations d'espèces, ou en déplaçant artificiellement des espèces par le transfert de graines, la régénération assistée ou les plantations forestières.



Pavel Barsukov, Russian Academy of Sciences

L'impact du changement climatique sur les sols gelés de Sibérie est suivi avec attention.

Les progrès réalisés dans la modélisation du fonctionnement des cultures ou de la dynamique des forêts et des écosystèmes seront utiles à la définition des options d'adaptation au changement climatique futur. Ainsi, dans le projet CLIMATOR, les scientifiques ont croisé modèles climatiques et modèles d'impacts agronomiques et forestiers. Les impacts agricoles et forestiers futurs du changement climatique ont été analysés aussi bien en termes de rendement, que de qualité des produits agricoles, de calendriers des cultures, de besoins en eau, ou encore de santé des plantes, sans

oublier les éventuels déplacements des cultures pouvant offrir de nouvelles opportunités.

L'ampleur limitée des modifications climatiques attendues à moyen terme (2035) pourra être palliée en grande partie par des adaptations relevant de la gestion courante des systèmes et favorisant leur résilience par rapport aux fluctuations interannuelles du climat. Toutefois, l'augmentation des événements extrêmes pourrait, dès maintenant, perturber les productions agricoles et avoir des conséquences économiques graves. Le changement climatique plus important prévu pour la seconde moitié du XXI^e siècle nécessitera des options d'adaptation et de changement plus radicales. Les zones de production devront être modifiées, ce qui imposera d'adapter les filières économiques et la gestion des territoires et de développer des innovations techniques acceptables par la société.

Anticiper les changements

Il est particulièrement important d'anticiper ces changements pour les systèmes à dynamique lente (forêts, prairies permanentes, lacs). La maîtrise des adaptations est plus aisée pour les systèmes très anthropisés dont les conditions sont plus contrôlables (cultures annuelles, élevage) que pour les systèmes plus naturels (prairies permanentes ou forêts non cultivées, lacs et rivières, zones sauvages) pour lesquels on ne peut envisager que des mesures d'accompagnement ou palliatives.

Ainsi, les défis posés par le changement climatique à la société et aux chercheurs sont considérables. Il est urgent de définir des modes de gestion appropriés des ressources, des milieux et des territoires (agriculture, sylviculture, milieux naturels) en anticipant les conséquences de ce changement. Il faudra notamment préserver tous les systèmes contribuant à l'atténuation du changement climatique, qui séquestrent le carbone et limitent les émissions de gaz à effet de serre.

Bibliographie

N. Brisson et F. Levrault (éd.), *Le livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : Simulations d'impacts sur les principales espèces*, Ademe, 2010.

J.-F. Soussana (coord.), *S'adapter au changement climatique, Agriculture écosystèmes et territoires*, Quae, 2013.

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.



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.

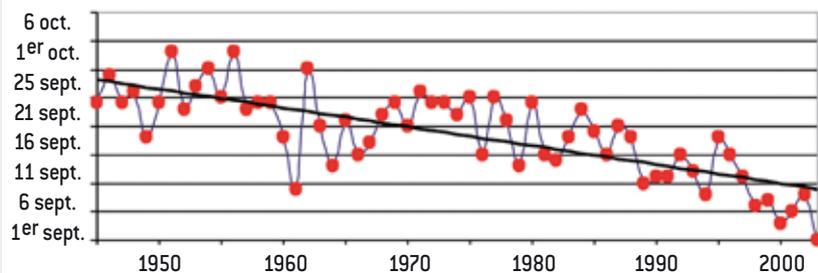
Les stratégies d'évitement visent, pour leur part, à limiter la sensibilité des plantes aux conditions défavorables. Il s'agit, par exemple, de favoriser l'accès à une ressource, via un système racinaire plus profond capable de capter de plus grandes quantités d'eau. Les pertes hydriques peuvent également 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.

rius. 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. Levrault [éd.], *Le livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : Simulations d'impacts sur les principales espèces*, Ademe, 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

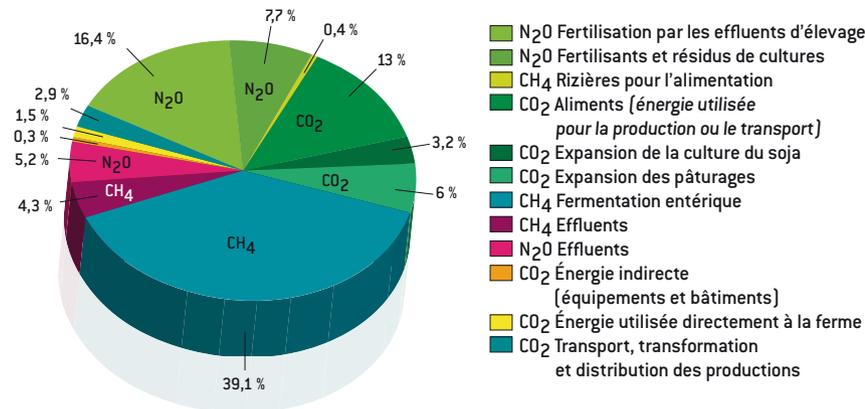
a des conséquences sur la production agricole et l’élevage. Ainsi, entre 1980 et 1999, de graves sécheresses ont entraîné la mort de 20 à 60 pour cent du cheptel de plusieurs pays d’Afrique subsaharienne. Durant l’été 2003, une canicule exceptionnelle en Europe a provoqué une chute des rendements des 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. Gerber *et al.*, *Tackling climate change through livestock. A Global assessment of emissions and mitigation opportunities*, FAO, 2013.
M. Mathieu *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.

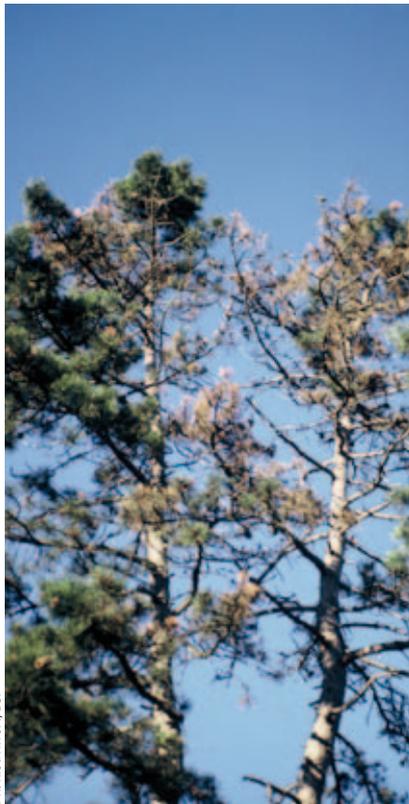
Soulignons d'emblée que les forêts actuelles ne sont que des états « instantanés » inscrits dans des dynamiques plus ou moins rapides. Certaines évoluent vite, par exemple les forêts soumises au régime des feux, ou les forêts de montagne issues des

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



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.



P. Frey, INRA

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.



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 luttaienent 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.



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

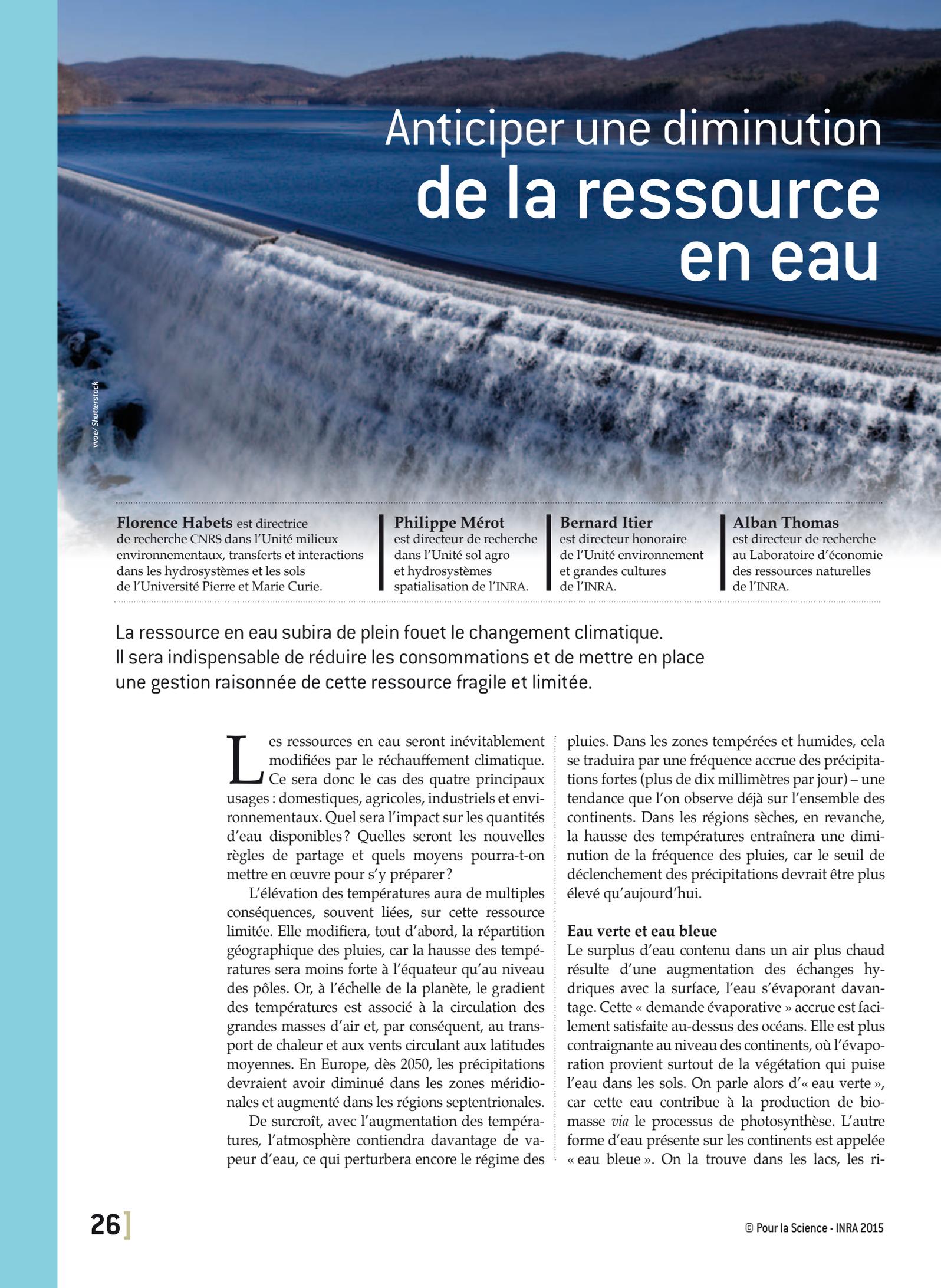
L'adaptation des hydrosystèmes d'eau douce au changement climatique est un enjeu crucial dont la réussite nécessite l'engagement tant des usagers que des gestionnaires. En raison des nombreuses voies par lesquelles le climat perturbe les hydrosystèmes, il est nécessaire de combiner diverses méthodes 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>



Anticiper une diminution de la ressource en eau

woe/Shutterstock

Florence Habets est directrice de recherche CNRS dans l'Unité milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols de l'Université Pierre et Marie Curie.

Philippe Mérot est directeur de recherche dans l'Unité sol agro et hydrosystèmes spatialisés de l'INRA.

Bernard Itier est directeur honoraire de l'Unité environnement et grandes cultures de l'INRA.

Alban Thomas est directeur de recherche au Laboratoire d'économie des ressources naturelles de l'INRA.

La ressource en eau subira de plein fouet le changement climatique. Il sera indispensable de réduire les consommations et de mettre en place une gestion raisonnée de cette ressource fragile et limitée.

Les ressources en eau seront inévitablement modifiées par le réchauffement climatique. Ce sera donc le cas des quatre principaux usages : domestiques, agricoles, industriels et environnementaux. Quel sera l'impact sur les quantités d'eau disponibles ? Quelles seront les nouvelles règles de partage et quels moyens pourra-t-on mettre en œuvre pour s'y préparer ?

L'élévation des températures aura de multiples conséquences, souvent liées, sur cette ressource limitée. Elle modifiera, tout d'abord, la répartition géographique des pluies, car la hausse des températures sera moins forte à l'équateur qu'au niveau des pôles. Or, à l'échelle de la planète, le gradient des températures est associé à la circulation des grandes masses d'air et, par conséquent, au transport de chaleur et aux vents circulant aux latitudes moyennes. En Europe, dès 2050, les précipitations devraient avoir diminué dans les zones méridionales et augmenté dans les régions septentrionales.

De surcroît, avec l'augmentation des températures, l'atmosphère contiendra davantage de vapeur d'eau, ce qui perturbera encore le régime des

pluies. Dans les zones tempérées et humides, cela se traduira par une fréquence accrue des précipitations fortes (plus de dix millimètres par jour) – une tendance que l'on observe déjà sur l'ensemble des continents. Dans les régions sèches, en revanche, la hausse des températures entraînera une diminution de la fréquence des pluies, car le seuil de déclenchement des précipitations devrait être plus élevé qu'aujourd'hui.

Eau verte et eau bleue

Le surplus d'eau contenu dans un air plus chaud résulte d'une augmentation des échanges hydriques avec la surface, l'eau s'évaporant davantage. Cette « demande évaporative » accrue est facilement satisfaite au-dessus des océans. Elle est plus contraignante au niveau des continents, où l'évaporation provient surtout de la végétation qui puise l'eau dans les sols. On parle alors d'« eau verte », car cette eau contribue à la production de biomasse *via* le processus de photosynthèse. L'autre forme d'eau présente sur les continents est appelée « eau bleue ». On la trouve dans les lacs, les ri-

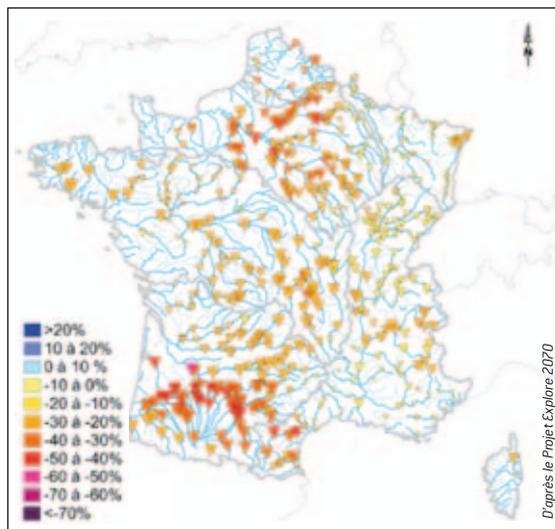
vières, les nappes souterraines et les zones humides. C'est celle qu'on utilise pour les besoins en eau potable, pour l'industrie et pour l'agriculture.

Or, qu'il s'agisse de l'eau bleue ou de l'eau verte, elles sont issues des pluies, et sont donc interdépendantes : une déperdition d'eau verte entraîne une diminution d'eau bleue. En France, on estime ainsi que le réchauffement climatique provoquera une baisse de 20 à 30 pour cent des débits annuels d'eau bleue dès 2050 (voir la carte ci-contre). Cette diminution devrait s'accompagner de sécheresses à la fois plus fréquentes et plus longues, sans pour autant diminuer le risque de crues. Au contraire, ce risque pourrait augmenter dans certaines régions, tel le Sud-Est de la France.

Les adaptations envisageables

Comment s'adapter à ces changements prévisibles? Une première voie d'adaptation consiste à mettre en place une politique de l'offre – c'est-à-dire à compenser les futures pénuries par de nouvelles ressources. Pour ce faire, on peut développer les dispositifs de prélèvement, tels que le pompage des nappes et la déviation de rivières. On peut aussi construire de nouvelles usines de dessalement, des barrages hydrauliques et des réserves artificielles servant à stocker l'eau de pluie. De telles infrastructures pourraient se révéler nécessaires pour maintenir l'irrigation dans les secteurs agronomiques clés, ainsi que de bonnes conditions de navigation fluviale (sur le Rhin ou le Danube), mais aussi pour préserver la sécurité des centrales nucléaires, qui exigent de grandes quantités d'eau.

Cette stratégie visant à développer l'exploitation des eaux bleues et celles issues des stations de traitement des eaux « grises » – les eaux usées – (via le recyclage) implique des financements massifs. En France, sa mise en œuvre incombe aux Agences de l'eau, aux



Évolution attendue du débit moyen annuel des cours d'eau français. On a comparé les moyennes des années 1961 à 1990 et des moyennes prévues entre 2046 et 2065. On voit que les régions Sud-Ouest et Nord subiront des baisses aux alentours de 50 pour cent. La taille des triangles indique le degré de convergence des 14 simulations moyennées.

Établissements publics territoriaux de bassin ainsi qu'aux compagnies d'aménagement. L'aspect financier n'est pas la seule difficulté à laquelle ces institutions sont confrontées. Au-delà des activités de production et de consommation, l'évaluation de l'intérêt collectif de ces nouvelles infrastructures doit intégrer des considérations écologiques et environnementales. À ce titre, l'opposition suscitée depuis près de 30 ans à la construction d'un barrage à Charlas, en Midi-Pyrénées, illustre bien comment de tels projets sont susceptibles d'exacerber les conflits locaux.

Les projets d'aménagement sont en général soumis à des analyses qui mettent en balance les coûts de construction avec les bénéfices escomptés. La construction du barrage de la Renaissance sur le Nil Bleu, en Éthiopie, qui a commencé au printemps 2013, a fait l'objet d'une telle analyse coûts-bénéfices. Elle détaillait les aspects financiers (liés aux investissements ou au déplacement des populations), les risques sismiques ainsi que les bénéfices attendus en termes de production hydroélectrique et d'extension des surfaces irriguées. Ce type d'analyse constitue un outil d'aide à la décision, qui s'ajoute aux enquêtes d'utilité publique, aux rapports parlementaires et aux études de faisabilité. L'ensemble permet d'arrêter un arbitrage sur les différents scénarios envisagés : *statu quo*, lancement du projet ou aménagements alternatifs.

Cette forme d'adaptation n'en demeure pas moins limitée. L'irrigation ne résoudra pas toutes les difficultés auxquelles sera confrontée l'agriculture. Des prélèvements excessifs dans les nappes, les lacs ou les rivières peuvent conduire à leur disparition temporaire, à l'instar de la mer d'Aral, en Asie centrale, qui a perdu 90 pour cent de son volume entre les années 1960 et le milieu des années 2000. L'assèchement des systèmes hydriques s'accompagne souvent d'un dépérissement des écosystèmes terrestres et aquatiques, ainsi que de mouvements de terrain.

Outre les risques d'assèchement, ce type d'adaptation nous rend plus dépendants de la ressource et moins résilients aux extrêmes climatiques. Ainsi, les pouvoirs publics ont progressivement réalisé que la mobilisation de nouvelles ressources devait être associée à des mesures de régulation. Elles consistent, notamment, à limiter notre dépendance à l'égard de la ressource. Un des éléments clés est la compétition entre l'eau verte et l'eau bleue, puisqu'une consommation accrue de la première entraîne une diminution de la seconde – celle qui est distribuée dans les réseaux d'alimentation.

Réduire les consommations

Les systèmes de production agricole ont déjà commencé à évoluer pour que notre consommation d'eau diminue. Une première approche vise à modifier les périodes de semis ou de récolte, afin d'adapter les cultures à l'évolution des températures saisonnières. Une autre méthode vise, par exemple, à introduire des espèces moins gourmandes en eau, telles que le soja et le sorgho.

Plus généralement, l'agroécologie et son succédané le plus récent, l'agriculture écologiquement intensive, apparaissent comme des solutions prometteuses pour adapter l'agriculture aux changements globaux et répondre à une demande croissante en produits

de qualité. Ces approches systémiques s'appliquent à augmenter les productions tout en respectant la santé humaine et l'équilibre des écosystèmes. Elles s'appuient sur des fonctionnalités écologiques naturelles, telle la biodiversité au sein des cultures afin de limiter la prolifération des ravageurs. Un autre exemple d'agriculture écologiquement intensive consiste à effectuer des semis sur des sols non la-

bourés présentant un couvert végétal permanent. Grâce à un système racinaire profond et puissant, ce couvert végétal fait remonter des nutriments vers la surface où ils sont utilisés par les cultures principales. Le ruissellement des eaux de pluie se trouve par ailleurs diminué. Une biomasse importante peut ainsi être produite avec de moindres quantités d'eau, pendant les saisons sèches notamment.



Chubiykin Arkady / Shutterstock

Construit sur la rivière Naryn, affluent du Syr-Daria, près de la frontière ouzbek, le barrage de Taktogul est le plus grand du Kirghistan.

Une source de coopération plus que de conflits

La géopolitique de l'eau est souvent présentée comme une compétition entre pays pour une ressource considérée comme stratégique et source de conflits. Cette concurrence concerne des pays situés le long d'un cours d'eau ou partageant des ressources souterraines. Mais, au cours des 50 dernières années, grâce aux relations interétatiques, des solutions de coopération ont été trouvées dans la majorité des cas.

Ainsi, Ariel Dinar, de l'Université de Californie à Riverside, et Pradeep Kurukulasuriya, un des experts du Programme des Nations unies pour le développement, ont montré que la rareté structurelle de la ressource joue un rôle positif sur la coopération entre États. D'autres facteurs, tels que la bonne gouvernance et les échanges internationaux, pèsent souvent davantage que les caractéristiques géographiques. Par ailleurs, on constate que les accords de coopération incluent souvent d'autres aspects, notamment la production d'hydroélectricité, la protection contre les crues et le contrôle de la pollution.

L'accord sur le fleuve Sir-Daria concerne par exemple trois pays d'Asie centrale : en amont, le Kirghizistan ; et en aval, l'Ouzbékistan et le Kazakhstan. Dans le cadre d'un accord hérité du modèle soviétique, le pays en amont s'engage à fournir de l'électricité et de l'eau d'irrigation en échange du pétrole fourni par les pays en aval.

Il existe plus de 200 cours d'eau transfrontaliers dans le monde, dont certains font l'objet d'accords internationaux dans des contextes de raréfaction de la ressource. Leur stabilité pourrait être remise en cause par le changement climatique. Ainsi, en 2008, des économistes ont constaté que les accords de partage étaient d'autant plus solides que les débits moyens des cours d'eau étaient importants, et, inversement, que des débits fluctuant tendaient à exacerber les tensions. Il est donc essentiel de déterminer des règles de partage considérées comme équitables par les différents pays concernés, ainsi que des mécanismes de compensations adaptés aux évolutions économiques et climatiques.

Ces nouvelles pratiques peuvent néanmoins conduire à une compétition accrue pour la ressource en eau – comme dans l'agroforesterie, par exemple, où des plantations d'arbres sont associées à l'exploitation des terres agricoles. Pour les optimiser, il faut intégrer une série d'approches : agronomique, économique, hydrologique, sanitaire et environnementale. L'intégration est réalisée à l'aide de simulations numériques, qui permettent d'élaborer des scénarios d'évolution proposant une palette d'adaptations biotechniques. En plus de cette approche virtuelle, l'adaptation passe par l'implication des acteurs de terrain dans des dispositifs expérimentaux imaginés avec des agriculteurs, pour faire en sorte qu'ils s'approprient au mieux les évolutions en cours.

Pour favoriser une adaptation limitant notre dépendance à la ressource, diverses actions pourront être déployées, et certaines le sont déjà en Europe. Elles concernent le secteur résidentiel et les régions semi-arides en particulier. Ces actions comprennent des tarifications adaptées à la raréfaction de la ressource, des restrictions réglementaires, ainsi que des politiques de sensibilisation et d'aide aux investissements dans des équipements plus économes en eau.

Des études ont montré que la sensibilité des usagers à l'égard du prix de la ressource est souvent assez faible, mais que cette sensibilité augmente rapidement avec les coûts d'accès – et ce d'autant plus que leur niveau est couplé à des mesures de restriction. La clarté des informations fournies dans les factures d'eau se révèle par ailleurs particulièrement importante pour transmettre un message fort sur la rareté de la ressource. On constate aussi que l'anticipation des coûts d'accès croissants à l'égard d'une ressource qui se raréfie incite souvent les usagers à se munir d'équipements sanitaires et électroménagers plus économes en eau.

De même, les agriculteurs qui pratiquent l'irrigation devraient pouvoir

anticiper les scénarios climatiques, afin d'opter pour les systèmes de production les mieux adaptés. Et ce d'autant que, depuis 2006, les aides compensatoires européennes ont été uniformisées : elles ne favorisent plus les cultures irriguées à forts rendements, tel le maïs. Des cultures de substitution pourront donc plus facilement être développées. Toutefois, elles devront s'appuyer sur des filières territoriales ou d'exportation viables. Le maïs pourrait ainsi être remplacé par le sorgho pour l'alimentation animale, mais la filière française demeure encore mal structurée dans ce secteur.

Événements extrêmes

Quelle que soit la stratégie d'adaptation choisie, il nous faudra aussi nous adapter aux événements climatiques extrêmes, dont la fréquence et l'intensité augmenteront. Il existe deux grandes stratégies : éviter ou accepter. Pour faire face aux risques de crue, par exemple, les stratégies d'évitement consistent à fabriquer des bassins de rétention en amont des cours d'eau ; dans les zones urbaines, on pourrait utiliser des matériaux poreux (graviers ou bitumes drainant) pour les trottoirs et les chaussées, valoriser la récupération des eaux de pluie, créer des zones d'expansion de crue (ce qui permet d'éviter les crues en aval, mais nécessite la submersion de terres agricoles en amont).

L'adaptation aux sécheresses passe par la réduction de la dépendance, mais aussi par la création de ressources de sécurité (barrages), ou des méthodes de recharge artificielle des nappes, l'eau ainsi stockée pouvant être utilisée en période critique (une telle possibilité est à l'étude pour le bassin de la Seine).

Quant aux stratégies d'acceptation, elles visent à adapter le milieu urbain aux inondations de certains quartiers, ce qui se traduirait par des constructions sur pilotis (par exemple au Bangladesh) ou des habitations « flottantes » (comme aux Pays-Bas),



Bateau échoué près de Moynaq, un ancien port situé au Sud de la mer d'Aral, en Asie centrale. Ce lac d'eau salée s'est en partie asséché, car les fleuves qui l'alimentaient ont été utilisés pour l'irrigation.

et à inciter les agriculteurs à renoncer à certaines parcelles pour favoriser les plus résilientes. Il faudra prévoir des types adaptés d'assurances dédiées aux agriculteurs, qui remplaceront progressivement les fonds de compensation. Des dispositifs publics de réassurance seront nécessaires étant donné les montants en jeu.

Précisons que l'adaptation aux sécheresses passe souvent par des restrictions d'usage. Ces dernières doivent être appliquées de façon uniforme sur une même zone géographique ou administrative, mais différenciées selon les usages – les usages résidentiels demeurant la priorité. Enfin, évoquons un dernier mécanisme d'adaptation : la gestion concertée de l'eau au niveau local, le plus souvent par des collectifs d'agriculteurs. Fondés sur des règles de partage de la ressource décidées collectivement, ces systèmes sont souvent mieux acceptés que les mesures tarifaires, mais ne résisteraient pas si l'eau venait à manquer.

Ces efforts de concertation ne se réduisent pas aux situations extrêmes. Une adaptation durable ne pourra se construire, en effet, qu'à la faveur

d'une vision territoriale des ressources et des besoins en eau. Cette approche a l'agrément de l'ensemble des acteurs et vaut pour les différents problèmes : approvisionnement en eau potable, agriculture, industrie, contraintes énergétiques et préservation des écosystèmes.

Le bassin-versant – une région où toutes les eaux convergent vers un même exutoire – est l'unité territoriale la mieux adaptée à cette réflexion collective. Dans ce cadre, il s'agit de privilégier l'usage des sols qui présentent les meilleures capacités d'adaptation et de résilience. Cette approche conduira au développement d'outils de gestion capables d'intégrer les considérations agronomiques et hydrologiques à différentes échelles.

La ressource en eau étant source de conflits (voir l'encadré page ci-contre), ces adaptations devront intégrer la notion d'équité entre les acteurs concernés. La gestion par bassin-versant devra s'attacher à une gestion solidaire entre bassins voisins, sans oublier que les aménagements ont des impacts non seulement locaux, mais aussi à grande échelle sur les écosystèmes fluviaux, côtiers et marins.

Bibliographie

- M. Chauveau et al., *Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ?*, La Houille Blanche, n°4, pp. 5-15, 2013.
 S. Ambec et al., *Water Sharing Agreements Sustainable to Reduced Flows*, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 66, pp. 639-655, 2013.
 Site internet sur le projet *Explore 2070* : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html>



Vers une écologie de la santé

Olivier Plantard est directeur de recherche dans l'Unité mixte de recherche INRA - Oniris Biologie, épidémiologie et analyse de risque en santé animale, à Nantes.

Laurent Huber est directeur de recherche dans l'Unité mixte de recherche INRA - AgroParisTech Environnement et grandes cultures, à Grignon.

Jean-François Guégan est directeur de recherche dans l'UMR IRD-CNRS, Université de Montpellier I et II, Maladies infectieuses et vecteurs : écologie, génétique, évolution et contrôle, et Laboratoire d'Excellence CEBA.

La santé est soumise à divers aléas, notamment climatiques. Pour gérer la santé de demain, il est urgent de concevoir des modèles intégrant les variables du climat, les caractéristiques des écosystèmes où se développent les maladies... sans oublier l'être humain !

Climat et santé sont liés. La santé humaine, mais aussi la santé végétale ou la santé animale sont soumises à la saisonnalité. Si le climat change, la saisonnalité des maladies devrait également évoluer. Dès lors, se pose la question des conséquences sanitaires du changement climatique. Sont-elles toujours négatives, comme certains articles ou reportages alarmistes le laissent penser ? La situation est complexe, donc forcément plus nuancée. Certes, des événements météorologiques extrêmes, tels que les canicules, les inondations ou les tempêtes violentes, se feront plus intenses et plus fréquents dans les années à venir, et pourraient entraîner une hausse de la mortalité et une baisse de l'efficacité des systèmes sanitaires.

Néanmoins, cet impact reste difficile à estimer, car on ne sait pas prévoir la fréquence de ces événements qui resteront rares. Une autre conséquence attendue du changement climatique sur la santé concerne la modification des risques environnementaux, *via* une exposition accrue aux rayonnements ultraviolets ou à des polluants atmosphériques, tels que l'ozone. Certains effets seront néfastes, mais

d'autres pourraient se révéler positifs en faisant disparaître, par endroits, des virus, des bactéries ou des champignons parasites. Là encore, l'impact général, peu étudié, demeure incertain.

Déclenchement des épidémies

Depuis une vingtaine d'années, les recherches concernant les conséquences sanitaires du changement climatique ont porté principalement sur les maladies infectieuses, du fait de la multiplicité des facteurs intervenant dans le déclenchement d'une épidémie et de l'intérêt que les écologues, entomologistes et zoologistes manifestent pour ce sujet.

Comme nous l'avons souligné, les systèmes sont complexes, car ils présentent de nombreuses interactions. Commençons par des systèmes biologiques simples, où deux espèces en interaction, l'hôte et l'agent pathogène, évoluent dans un écosystème naturel. Simplifions encore en considérant les hôtes dont la température corporelle n'est pas régulée – à l'instar des plantes, insectes, reptiles ou poissons –, et qui sont, par conséquent, très sensibles aux conditions météorologiques ambiantes et à leur évolution.

Dans le cas de l'encre du chêne, maladie infectieuse due à un champignon parasite, le réchauffement climatique semble bien responsable de la progression de cette maladie chez certaines espèces d'arbres, par exemple le chêne rouge d'Amérique et le chêne pédonculé. Au moyen de simulations numériques, permettant de modéliser la survie hivernale de l'agent pathogène en fonction de la température de son microhabitat (le phloème des arbres infectés, c'est-à-dire le tissu qui conduit un type de sève), des chercheurs de l'INRA et de Météo-France ont établi que ce champignon devrait se déplacer progressivement vers l'Est de la France, entraînant un accroissement du potentiel d'expansion de cette maladie sur la majorité du territoire d'ici la fin du XXI^e siècle.

Au contraire, d'autres travaux ont mis au jour une influence favorable du changement climatique sur la santé des plantes. C'est le cas d'une étude réalisée dans le cadre du projet CLIMATOR (2007-2010) sur trois maladies affectant des cultures annuelles : la septoriose du blé, la rouille brune du blé et le botrytis de la vigne – causées par des champignons pathogènes également. Des modèles numériques prenant en compte l'évolution de la température et du taux d'humidité de l'air ont permis d'estimer la durée au cours de laquelle de l'eau est présente à la surface des feuilles de blé, notamment. En effet, l'infection par le micro-organisme responsable de la maladie de la rouille brune requiert la présence d'eau liquide sur les feuilles pendant une durée minimale qui dépend de la température.

Pour les régions de Dijon et de Colmar, les simulations indiquent que la durée des périodes où l'infection sévit devrait diminuer d'environ 30 pour cent d'ici la fin du siècle, ce qui conduirait à une baisse des risques d'infection du blé par les spores de la rouille brune. Toutefois, pour connaître précisément la durée des infections, il faudrait considérer aussi l'influence du changement climatique sur la dynamique

des cultures, ainsi que l'avancée prévisible des dates de semis, ce qui n'a pas encore été réalisé. Même si ces travaux préliminaires sont encourageants, ils demandent à être confortés et élargis à d'autres maladies fongiques dont souffrent les cultures.

Citons maintenant un exemple chez l'animal, l'huître de Virginie, implantée sur les côtes atlantiques d'Amérique du Nord. Son évolution confirme le lien simple et direct entre le changement climatique et le développement d'une épidémie. Ainsi, l'élévation de la température des eaux de surface a favorisé la survie hivernale d'un

parasite responsable d'une maladie infectieuse, la perkinsose : depuis la fin des années 1940, l'aire de répartition de cette maladie a progressé de plus de 500 kilomètres vers le Nord.

Le rôle de la température

En termes d'impact du changement climatique, les experts s'accordent à dire que les variations de température joueront un rôle important sur le développement des maladies infectieuses. En influant sur le métabolisme des parasites et des organismes hôtes, ces variations conditionnent les vitesses de développement et, par conséquent,



Les campagnes de vaccination contre la grippe, qui touche plusieurs millions de Français chaque hiver, ont permis de diminuer notablement le nombre de décès de personnes fragiles.

Le paradoxe de la mortalité hivernale

En France, la canicule de 2003 a entraîné la mort d'environ 15 000 personnes, sans compter ses conséquences sur les écosystèmes et les infrastructures. Malgré cet épisode, le taux de mortalité dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord est beaucoup plus élevé en hiver que durant toute autre saison.

Selon une revue réalisée en 2012 par Patrick Kinney et ses collègues de l'Université Columbia, à New York, on meurt généralement plus en hiver dans les pays tempérés, telle la France. Dans un contexte de hausse globale des températures, cette mortalité hivernale pourrait même augmenter au sein des populations qui vivent dans les pays chauds. Pour expliquer ces effets encore mal compris, on évoque, tour à tour, des complications cardio-vasculaires, mais aussi inflammatoires après des infections respiratoires, comme c'est le cas avec la grippe.

Avant toute généralisation, précisons qu'il existe d'importantes disparités géographiques globales et locales dans les manifestations de cette mortalité hivernale. Par ailleurs, les chercheurs ne disposent que d'un petit nombre de données écologiques et épidémiologiques fiables, qui seraient pourtant indispensables pour prévoir les conséquences sanitaires du changement climatique, identifier les populations les plus vulnérables et définir les mesures de prévention et d'adaptation les mieux adaptées.

interviennent sur l'expansion ou la diminution des aires de répartition.

La température est plus facile à utiliser que d'autres variables physiques pour tester des scénarios de changement climatique. Cette variable d'état ne dépend pas de l'étendue du système considéré, et connaît des fluctuations beaucoup moins rapides que celles de la pluie, variable de flux cumulative. Par ailleurs, la température influe sur la vitesse de tout processus biologique, alors que la pluie agit plus spécifiquement, par exemple, sur l'infection fon-

Les maladies et leurs vecteurs

Examinons à présent le cas des maladies à transmission vectorielle, telles que le paludisme, la dengue ou la fièvre jaune. Ces systèmes infectieux plus complexes se propagent d'un individu hôte à un autre par l'intermédiaire de vecteurs, de petits arthropodes qui se nourrissent de sang : moustiques, moucheron, poux, punaises, tiques, etc. Chez l'homme, les maladies vectorielles sont responsables de près d'un quart des épidémies émergentes recensées dans le monde. Puisque les vecteurs ne régulent pas

Le changement climatique influe aussi sur la répartition des espèces « réservoirs » qui hébergent l'agent pathogène. Ainsi, en Amérique du Nord, l'aire de répartition de la souris à pattes blanches, principal réservoir de la bactérie *Borrelia burgdorferi* responsable de la maladie de Lyme, a progressé de 10 kilomètres par an vers le Nord.

Depuis les années 2000, la prédiction des changements d'aires de répartition des vecteurs est devenue un champ de recherche particulièrement actif, grâce à l'essor de la modélisation des niches écologiques, décrites par un ensemble de paramètres biologiques et physico-chimiques. Cependant, bien que la présence d'un vecteur soit indispensable à la diffusion de ce type de maladies, elle ne constitue pas une condition suffisante pour qu'une épidémie se développe. Même si le rôle direct du changement climatique est en cause dans les modifications des aires de répartition de certains vecteurs, il est difficile de mettre en évidence son rôle dans l'augmentation de la prévalence de ces maladies dans des régions où elles étaient déjà présentes.



Causée par un champignon pathogène, la maladie de la rouille brune du blé se manifeste à la surface des feuilles par de petites pustules orangées contenant des spores.

gique des plantes et la dispersion des spores et bactéries.

Même s'il est admis que la fréquence des événements extrêmes va augmenter, par exemple la fréquence des épisodes pluvieux de longue durée, le caractère intermittent de la pluie et les incertitudes sur les données à l'échelle de la journée rendent difficile l'obtention d'une répartition de la pluie par heure. C'est un enjeu pour la recherche météorologique, car il nous faut parfois ces données à une échelle temporelle très inférieure à la journée. Les sécheresses estivales plus longues constituent d'autres événements extrêmes, qui pourraient limiter, voire arrêter, la progression de mycoses fongiques transmises par l'air ou dans le sol, notamment chez les plantes-hôtes qui résisteront à la sécheresse.

leur température interne, les conditions météorologiques conditionnent leur développement, leur survie, leur fécondité et leur dispersion. Elles déterminent aussi la croissance du parasite et, dans une moindre mesure, les interactions du vecteur et de son agent pathogène, ainsi que du vecteur et de l'hôte.

Dans le contexte actuel du changement climatique, les maladies vectorielles sont observées avec attention par les épidémiologistes. Dans l'hémisphère Nord, la répartition de certains vecteurs, telle la tique *Ixodes ricinus*, est d'ores et déjà modifiée. Vectrice de nombreuses maladies, la maladie de Lyme et l'encéphalite à tique notamment, cette tique a progressé vers le Nord de la Suède. En 16 ans, l'aire de la zone où elle est présente a doublé (voir l'illustration page ci-contre).

Le rôle de l'homme

La situation se complique encore quand on tient compte des activités humaines. La fièvre catarrhale ovine, ou maladie de la langue bleue, illustre les liens complexes et parfois trompeurs entre le changement climatique et la propagation d'une épidémie. La fièvre catarrhale touche les ruminants, mais pas l'homme. Cette maladie vectorielle est causée par un virus, qui est lui-même transmis par des petits moucheron piqueurs du genre *Culicoides*. Des épidémies de fièvre catarrhale étaient recensées en Afrique du Nord, où le virus était véhiculé par une variété de moucheron (*Culicoides imicola*), dont la présence n'avait jamais été enregistrée sur le continent européen.

Or, dans les années 1980 et 1990, cette espèce a été détectée de plus en plus au Nord de son aire de répartition connue : en Italie, Sardaigne,

Corse, puis dans le Sud de la France. En Europe, on redoutait ainsi qu'une épizootie (épidémie animale) n'arrive par le Sud. Mais c'est aux Pays-Bas qu'elle s'est finalement manifestée, en août 2006. En quelques années, l'épizootie s'est propagée à une vitesse de cinq kilomètres par jour dans toutes les directions, causant des dommages économiques importants dans les élevages ovins et bovins d'Europe de l'Ouest : avortements, baisse de la production de lait et de viande, campagnes massives de vaccination, restriction des échanges commerciaux, etc.

En raison de la localisation du foyer d'origine, des directions qu'elle a suivies et du virus qui l'a causée (BTV8, une forme virale différente de celle présente en Afrique du Nord), cette épizootie présente une dynamique qui ne peut être directement liée au changement climatique. Par la suite, on s'est d'ailleurs aperçu que les moucheron impliqués dans la transmission du BTV8 correspondaient non pas à *Culicoides imicola*, mais à d'autres espèces, qui auparavant n'étaient pas considérées comme des vecteurs efficaces. Des études génétiques ont également établi que les moucheron détectés dans le Sud de l'Europe s'y trouvaient depuis longtemps. Ainsi, l'apparente progression des *Culicoides* vers le Nord de l'Europe est surtout imputable à une augmentation des efforts de surveillance et de recherche pour les trouver, c'est-à-dire à une meilleure connaissance de leur répartition géographique.

Le changement climatique n'est pas totalement hors de cause pour autant. Une analyse croisée de l'évolution des conditions climatiques depuis les années 1960 et d'un modèle décrivant la dynamique des vecteurs et des organismes hôtes de cette maladie a montré que l'été 2006 correspondait à une période de risque maximal pour le déclenchement d'une épidémie dans le Nord-Ouest de l'Europe. Et, au-delà des facteurs climatiques qui ont favorisé la transmission du virus, tout porte à croire que son introduction est

liée aux activités humaines telles que l'importation (illégale ou accidentelle) d'animaux ou de vecteurs. Cet exemple montre à quel point il est parfois difficile de séparer la part du changement climatique et celle d'autres évolutions où les activités humaines occupent un rôle central : transferts de populations ou de marchandises d'origines animale et végétale, changement d'usage des sols, auxiliaires de culture qui détruisent les ravageurs, baisse de la biodiversité touchant les espèces réservoirs et les prédateurs, etc.

raît comme le dernier facteur, du moins en 2005, date où ce travail a été publié !

L'évolution génétique naturelle des micro-organismes y occupe la cinquième place. À titre d'exemple, rappelons que la mutation du virus du Chikungunya, qui s'est produite en septembre 2005 à La Réunion, a déclenché une épidémie de grande envergure qui a frappé plus de 300 000 habitants des îles de l'océan Indien. Les changements démographiques, sociétaux et comportementaux (les pratiques à risque, notamment) figurent à la deuxième place.



B. Chauvet - INRA



Lindgren et al., Environmental Health Perspectives, 2000



La tique *Ixodes ricinus* (à gauche), principale espèce vectrice de maladies vectorielles chez l'homme en Europe, devrait continuer à s'étendre au cours du XXI^e siècle. En Suède, son aire de répartition (points blancs) a doublé entre les années 1980 (au centre) et 1990 (à droite).

Les principales causes d'émergence

Parmi la multitude de publications scientifiques et institutionnelles qui se sont efforcées de mettre en lumière l'impact du changement climatique sur la santé humaine, les travaux de Mark Woolhouse et de Sonya Gowtage-Sequeria, du Centre des maladies infectieuses de l'Université d'Édimbourg, en Écosse, sont particulièrement intéressants. En réunissant une base de données très complète, ils ont classé les principales causes d'émergence et de dispersion de 177 agents infectieux apparus depuis les années 1960. Leurs conclusions battent en brèche une idée reçue : le changement climatique ne joue pas un rôle déterminant dans l'émergence de nouvelles maladies infectieuses, bien au contraire. Dans le classement que ces épidémiologistes ont établi, il appa-

En se fondant sur des modèles de niches écologiques, une étude récente sur la transmission de la dengue a ainsi montré que son expansion était principalement due aux densités élevées de population, aux conditions d'insalubrité ainsi qu'aux réseaux de transport humains. Enfin, au premier rang, se situent les changements d'usage des sols ainsi que les pratiques agricoles et agronomiques. Par ses activités, par ses comportements et par ses modes d'organisation socio-économique, l'homme est le principal responsable de l'apparition et de l'expansion des nouveaux agents pathogènes.

Pour illustrer le rôle des changements des conditions socio-économiques sur la prévalence de certaines pathologies, revenons sur le cas des maladies vectorielles transmises par les tiques.

La prévalence de l'encéphalite à tique a augmenté dans les pays baltes à partir du début des années 1990. Contrairement à la maladie de Lyme, qui n'a jamais fait l'objet d'un recensement systématique, l'encéphalite à tique a été très bien répertoriée depuis une quarantaine d'années, offrant ainsi des données de qualité. Or, dans chacun des pays baltes étudiés (Lituanie, Lettonie, Estonie), on a observé une grande hétérogénéité des variations de la prévalence d'une année à l'autre entre cantons. Cela suggère que le changement climatique – qui se produit de façon relativement homogène sur de vastes zones – n'est pas le seul en cause.

Sarah Randolph et Dana Sumilo, de l'Université d'Oxford, ont montré que le changement climatique – avec une augmentation de la moyenne annuelle des températures maximales (passant de 10 à 11°C) entre 1988 et 1990 – constitue un des facteurs en cause, mais ne peut pas expliquer l'hétérogénéité observée dans l'espace et dans le temps. Elles avancent l'hypothèse suivante : la recrudescence de l'encéphalite à tique observée durant cette période résulterait de la transition

socio-économique que les pays baltes ont connue au début des années 1990 en sortant du communisme.

À cette époque, de nombreux habitants de ces pays ont augmenté leur risque d'exposition au vecteur de la maladie en fréquentant davantage les forêts : les populations les plus pauvres, en s'efforçant de trouver des revenus ou des ressources complémentaires *via* la cueillette de champignons et de baies ; mais aussi les plus riches, en raison d'un accès accru aux activités de loisir, dans les campagnes notamment. L'abandon des fermes collectives a aussi entraîné des modifications dans l'utilisation des sols (des mises en jachère, par exemple), qui auraient favorisé la propagation de ces maladies où les faunes sauvages et domestiques interagissent étroitement.

À travers tous ces exemples, on mesure combien l'impact du changement climatique sur les maladies infectieuses est complexe, variable et difficile à étudier. D'une part, il est lié à de multiples acteurs : agents pathogènes, organismes hôtes, vecteurs de transmission, espèces réservoirs et interventions humaines. D'autre part, il est soumis à plusieurs variables physiques

telles que la température, l'humidité de l'air, le vent et les précipitations, dont l'évolution doit être estimée par l'analyse de leurs valeurs moyennes, mais aussi de leurs valeurs extrêmes, et plus généralement de leur variabilité durant telle ou telle période.

Tous ces paramètres sont souvent interdépendants, et les relations qu'ils entretiennent avec la prévalence des maladies infectieuses ne sont pas toujours linéaires (les paramètres et la prévalence ne varient pas dans les mêmes proportions). Les échelles spatiales et temporelles permettant d'analyser ces maladies sont par ailleurs très variables : de quelques centimètres carrés pour la dispersion des spores par la pluie, à une échelle planétaire quand il s'agit de l'évolution du climat global. Cela pose d'épineux problèmes de changement d'échelles, car certaines propriétés dites émergentes ne sont observables qu'à des niveaux d'intégration supérieurs. Ces propriétés n'apparaissent que si l'on se place à l'échelle des populations ou à celle des écosystèmes, par exemple, mais ne sont pas perceptibles quand on étudie les individus séparément. Enfin, les systèmes responsables de maladies ne sont ni fixes ni constants au cours du temps, car chacun des acteurs évolue en raison des modifications de la composition génétique des populations sous l'effet des différentes pressions de sélection exercées par les interactions des hôtes avec les agents pathogènes, ou par l'environnement, dont une des facettes est le climat.

L'écologie de la santé

C'est pourquoi un cadre plus large, associant écologie et biologie évolutive, a été proposé pour étudier ces questions complexes. À côté de l'approche *One Health/One World*, prenant peu en compte l'environnement, citons l'approche *EcoHealth* qui met en avant « le partage des responsabilités et la coordination des actions globales pour gérer les risques sanitaires aux interfaces animal-homme-écosystèmes » et l'im-

Principales causes d'apparition des nouveaux agents infectieux

Rang	Facteurs d'émergence	Exemples
1	Changements d'usage des sols, pratiques agricoles et agronomiques	Virus Nipah en Asie du Sud-Est, ESB
2	Changements démographiques, sociétaux et comportementaux	Coqueluche, VIH, syphilis
3	Précarité des conditions sanitaires	Choléra, tuberculose
4	Liés à l'hôpital (nosocomiaux) ou à des erreurs de soins et de pratiques	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>
5	Évolution des agents pathogènes (Chikungunya, antibiotiques, mutations...)	A/H1N1, H5N1
6	Contamination par les aliments ou l'eau	<i>E. coli</i> , ESB, <i>Salmonella</i>
7	Voyages et échanges intercontinentaux	Dengue, grippe saisonnière, H5N1
8	Désorganisation des systèmes de santé et de surveillance	Maladie du sommeil en Afrique centrale, maladies à tiques et tuberculose, ex-URSS
9	Transports de biens et d'animaux	Virus <i>Monkeypox</i> , H5N1, <i>Salmonella</i> ...
10	Changement climatique	Paludisme en Afrique de l'Est, dengue en Asie du Sud-Est, leishmaniose viscérale dans le Sud de l'Europe (forte suspicion)

Ce classement a été réalisé à partir de 177 agents pathogènes responsables de maladies infectieuses émergentes touchant les populations humaines depuis les années 1960

portance du « renforcement des collaborations entre santé humaine, santé animale et gestion de l'environnement ». Il s'agit d'élargir le champ d'analyse, traditionnellement centré sur la santé des individus, en considérant les modifications des écosystèmes, l'influence des changements planétaires (climatiques notamment) et la perte de diversité biologique, avec toutes leurs interactions directes et indirectes.

L'écologie de la santé traduit une prise de conscience du partage des responsabilités et de la nécessité de renforcer les actions communes concernant la santé humaine, la santé animale et végétale, et la gestion de l'environnement. Cette approche intégrative permet d'éviter l'erreur qui consiste à isoler artificiellement l'effet du changement climatique d'autres modifications dues à l'homme, et impliquées elles aussi dans le développement d'épidémies (changement d'utilisation des sols, introduction d'espèces invasives liée aux déplacements humains ou au transport de marchandises, par exemple).

Dans le domaine animal et le domaine végétal, les conséquences sanitaires du changement climatique restent largement inexplorées, ce qui explique le lancement, début 2014, de nouveaux programmes de recherche par l'Agence nationale de la recherche et la Commission européenne. Dans ce cadre, l'augmentation de la résilience des écosystèmes, le rôle de la biodiversité et le développement d'une approche transdisciplinaire et participative (associant chercheurs, entreprises, agriculteurs, gestionnaires, etc.) figurent parmi les thématiques mises en avant dans plusieurs grands programmes de recherche.

Anticiper les évolutions

Dans le domaine végétal en particulier, les objectifs majeurs ont trait à la réduction de l'usage des pesticides et à la préservation des cultures face au réchauffement climatique. Une autre problématique importante a émergé : les rétroactions de la santé des plantes sur le climat. Une culture fortement at-

teinte, voire détruite, par une épidémie importante émet davantage de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, à cause du dépérissement des plantes et d'une minéralisation plus forte des matières organiques contenues dans les sols.

Étant donné la complexité des phénomènes considérés, la modélisation représente un outil incontournable.

surveillance sanitaire ne permet pas – ou très difficilement – de répondre aux interrogations sur l'influence du changement climatique en particulier, car cela nécessite de comparer des situations où la maladie est présente et d'autres où elle est absente.

Les dispositifs de suivis de longue durée, du type *Long Term Ecological*



Les moustiques du genre *Aedes* propagent le virus du chikungunya d'un individu à un autre en les piquant. Cette maladie tropicale est également nommée « maladie de l'homme courbé », car elle provoque de très fortes douleurs articulaires associées à une raideur musculaire.

Elle permet de se projeter dans le futur et d'établir des scénarios susceptibles de gérer et d'anticiper au mieux les évolutions attendues. Mais, pour être pertinents, précis et informatifs, les modèles doivent pouvoir se fonder sur des données de qualité et de longues séries temporelles et spatiales, ce qui fait actuellement défaut dans la recherche française, qu'elle ait lieu en France ou dans les pays tropicaux.

Pour les maladies infectieuses humaines, telles que le tétanos, l'anthrax et la légionellose, où l'agent pathogène peut persister dans l'environnement en l'absence de son hôte, il est impossible de conclure de façon certaine à l'absence totale de l'agent infectieux dans un endroit donné. Dès lors, la

Research Network (réseau de recherche écologique sur le long terme) sont particulièrement précieux. Ils devraient bientôt intégrer des recherches épidémiologiques relatives aux effets du changement climatique sur les maladies humaines, animales et végétales, ce qui permettra d'améliorer la précision des modèles numériques.

Enfin, insistons sur le fait que l'identification et la quantification des effets des changements globaux sur la santé représentent un défi qui ne pourra être relevé que si climatologues, épidémiologistes, modélisateurs, écologues, entomologistes, microbiologistes, parasitologues, immunologistes, socio-économistes, entre autres, travaillent ensemble sur un projet intégré.

Bibliographie

- C. Lepout et J.-F. Guégan, *Les maladies infectieuses émergentes. État de la situation et perspectives*, La Documentation française, 2011.
 N. Brisson et F. Levrault (éd.), *Le Livre Vert du projet Climator*, Ademe, 2010.
 K. Smith et J.-F. Guégan, *Changing Geographic Distributions of Human Pathogens*, *The Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 41, pp. 231-250, 2010.
 M. Delavrière et J.-F. Guégan, *Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France – Rapport de Groupe interministériel*, La Documentation française, 2009.
 K. Lafferty, *The Ecology of Climate Change and Infectious Diseases*, *Ecology*, vol. 90, pp. 888-900, 2009.



Comment gérer les flux migratoires ?

François Gemenne est chercheur en science politique, CEARC – UVSQ / CEDEM - ULg, expert associé et enseignant au CERI - Sciences Po.

Des zones littorales inondées ; des épisodes de sécheresse intenses. Il faudra aider les régions d'accueil à gérer la pression démographique due aux populations poussées à l'exode.

Les catastrophes naturelles imposant déplacements, exodes et évacuations ont été innombrables au cours des siècles. Le tremblement de terre qui détruisit Lisbonne en 1755, ou le grand incendie qui ravagea Londres en 1666, ont entraîné d'importants flux de réfugiés. Aux États-Unis, en 1927, l'inondation du delta du Mississippi déplaça 700 000 habitants, avant que la sécheresse du Dust Bowl et les tempêtes de poussière qui ont caractérisé cet épisode catastrophique des années 1930 ne poussent plus d'un million d'habitants des Grandes Plaines à migrer vers la Californie. Pendant longtemps pourtant, académiques comme décideurs ont considéré que les facteurs susceptibles d'entraîner des migrations – volontaires ou forcées – étaient avant tout d'ordre politique ou économique.

Aujourd'hui, le lien de causalité entre les dégradations de l'environnement et la décision migratoire est transformé par le changement climatique : à la fois parce que les mouvements de populations liés aux transformations de l'environnement sont appelés à prendre une ampleur sans précédent, mais également – et peut-être surtout – parce que le changement climatique pose la question de la responsabilité de ces déplacements. Alors qu'on invoquait auparavant la fatalité des catastrophes naturelles, la responsabilité des États industrialisés est désormais directement en cause.

On sait encore peu de chose, pourtant, quant à la façon dont les populations réagissent à la dégradation de leurs habitats. Si le phénomène des « migrations environnementales » n'est pas nouveau, ce n'est que récemment que le concept a émergé dans les milieux académiques et *a fortiori* politiques. Cette

émergence a été concomitante de celle du changement climatique dans les cénacles internationaux. S'il est difficile de prévoir l'ampleur des flux migratoires engendrés par le changement climatique, il est néanmoins possible d'identifier ses principaux impacts sur les établissements humains. Le changement climatique, en effet, n'est pas un changement uniforme et aura des conséquences diverses.

Les populations vulnérables : les plus touchées

On distingue généralement trois types d'impacts du changement climatique sur les flux migratoires : l'intensité accrue des catastrophes naturelles, la hausse du niveau des mers et la raréfaction des ressources d'eau potable – aussi appelée stress hydrique. Ces trois types de changements ne produiront pas des migrations similaires, et n'appellent pas des stratégies d'adaptation identiques.

En premier lieu, le changement climatique se traduira par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles : les inondations seront plus nombreuses, et les ouragans plus violents. Au cours des dernières années, le nombre de catastrophes naturelles a déjà augmenté de façon significative, en premier lieu à cause de la plus grande vulnérabilité des populations exposées : une catastrophe n'est jamais purement naturelle, mais résulte de la rencontre d'un risque naturel et d'une population vulnérable. Les catastrophes naturelles touchent particulièrement les pays du Sud, et l'Asie est de loin le continent le plus concerné. On a longtemps imaginé que les catastrophes naturelles ne provoquaient pas de flux migratoires, mais plutôt des déplacements temporaires de population.

Depuis l'ouragan Katrina, on sait que cette affirmation est fautive : un peu moins de la moitié de la population de La Nouvelle-Orléans n'est jamais revenue dans la ville. Les déplacements provoqués par les catastrophes naturelles n'offrent pas toujours la possibilité d'un retour dans la région d'origine.

Des conséquences peu prévisibles

Un autre impact du changement climatique sera la hausse du niveau des mers, provoquée à la fois par l'expansion thermique des océans et la fonte des calottes glaciaires. On estime ainsi que le niveau des océans montera d'environ un mètre d'ici 2100, même si des variations régionales se produisent. Or les régions côtières et des deltas comptent parmi les plus densément peuplées : de nombreuses métropoles y sont installées, et seront directement menacées d'inondation si des mesures d'adaptation ne sont pas prises (digues, restauration des littoraux, etc.). Les petits États insulaires sont également particulièrement vulnérables à toute hausse, même faible, du niveau des mers. Potentiellement, si des mesures d'adaptation importantes ne sont pas prises rapidement, les populations des régions de faible élévation pourraient être contraintes, à terme, de se déplacer.

Enfin, le changement climatique se traduira aussi par une raréfaction des ressources en eau potable : il s'agit sans nul doute d'un de ses impacts les moins directement visibles, mais parmi les plus dévastateurs. Cette raréfaction des ressources en eau résultera de trois facteurs concomitants : les nappes phréatiques seront contaminées par l'eau de mer ; la désertification s'intensifiera dans de nombreuses régions ; enfin, en raison de la fonte des glaciers, les ressources en eau douce diminueront.

Les effets du stress hydrique sur les mouvements migratoires sont difficiles à prévoir : plusieurs études ont ainsi montré que les migrations ont tendance à diminuer pendant les périodes de sécheresse. On peut néanmoins émettre l'hypothèse que des manques d'eau de

longue durée pousseraient à l'exil les populations touchées.

Les termes de réfugiés environnementaux, ou de réfugiés climatiques, sont trompeurs, car les populations contraintes à se déplacer à cause des changements de l'environnement ne sont pas considérées comme des réfugiés, au sens de la Convention de Genève de 1951. Si celles qui se déplacent à l'intérieur de leur pays sont normalement couvertes par les principes directeurs relatifs aux déplacements internes, adoptés par les Nations unies en 1998, celles qui se déplacent à l'extérieur de leur pays ne sont couvertes par aucun statut juridique.

Si la protection juridique de ces migrants reste, pour une large part, encore à construire, les différentes politiques d'adaptation s'imposent aujourd'hui comme la variable déterminante des flux migratoires à venir. Même si elles restent imparfaitement définies, ces politiques d'adaptation peuvent prendre des formes diverses, telles que renforcement des digues, transformation de l'habitat, diversification de l'économie, réorganisation des pratiques agricoles, etc.

Le développement de stratégies d'adaptation dans les régions d'origine sera le seul moyen de limiter l'ampleur des flux migratoires. Dans bien des cas, la migration sera l'option ultime, qui ne sera envisagée que dans l'hypothèse où les différentes stratégies d'adaptation auront échoué.

Toutefois, l'adaptation ne saurait être réservée à la région d'origine : les migrations, surtout quand elles sont soudaines et massives, entraînent une pression démographique accrue sur les ressources de la région de destination. Ces ressources ne concernent pas uniquement l'accès à la nourriture ou à l'eau potable, mais aussi l'emploi ou le logement. Les régions de destination sont généralement pauvres et souvent incapables de faire face à des afflux de migrants. Ce n'est qu'en développant des mesures d'adaptation que les régions d'accueil des migrants

pourront faire face à une pression démographique accrue.

Enfin, la migration elle-même, loin de représenter un échec de l'adaptation, peut aussi, dans certains cas, être développée comme une stratégie d'adaptation à part entière. Dans ce cas, le choix migratoire sera délibéré, et permettra aux migrants de réduire leur vulnérabilité aux impacts du changement



Évacuer les victimes des inondations sera un enjeu essentiel pour les responsables locaux (Bangkok, en Thaïlande, 4 novembre 2011).

climatique, tout en relâchant la pression démographique dans leur région d'origine. Ces stratégies peuvent être efficaces dans les cas de dégradations progressives de l'environnement, et notamment dans des situations de désertification. L'enjeu politique sera alors de faciliter la migration, plutôt que d'essayer de l'empêcher.

En conclusion, on peut affirmer que l'environnement, aujourd'hui, représente un facteur croissant de migrations, et surtout de migrations forcées. Mais *in fine*, ce sont bien les politiques qui seront mises en œuvre, et en particulier les politiques d'adaptation, qui détermineront l'ampleur et la nature des mouvements migratoires à venir.

Bibliographie

- F. Gemenne, *Why the numbers don't add up: a review of predictions and forecasts for environmentally-induced migration*, Global Env. Change, vol. 21 [S1], pp. 41-49, 2011.
F. Gemenne, *Géopolitique du Changement Climatique*, Armand Colin, 2009.



Les enjeux économiques

Pierre-Alain Jayet est directeur de recherche INRA, UMR Économie publique, INRA-AgroParisTech, Grignon.

Stéphane De Cara est directeur de recherche INRA, UMR Économie publique, INRA-AgroParisTech, Grignon.

Nathalie de Noblet-Ducoudré est directeur de recherche CEA, Unité mixte CEA-CNRS-UVSQ, Gif-sur-Yvette.

Modifier l'usage des sols pour concilier production agricole et maîtrise des émissions de gaz à effet de serre : les économistes cherchent à intégrer ces différents objectifs dans une approche globale.

Avec près de 6 gigatonnes d'équivalent dioxyde de carbone libérées chaque année dans le monde (sur un peu moins de 50 gigatonnes de dioxyde de carbone émises globalement en 2010), les sources agricoles de gaz à effet de serre pèsent plus que les transports. À ces émissions agricoles, il convient d'ajouter celles dues aux changements d'usage des sols, en particulier la déforestation. Ensemble, les secteurs liés à la terre (notamment l'agriculture et la forêt) comptent parmi les plus importants contributeurs à l'effet de serre au plan mondial. Par conséquent, l'agriculture et la forêt ont un rôle essentiel à jouer tant vis-à-vis de l'atténuation des émissions que de l'adaptation au changement climatique.

La nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en s'adaptant au changement climatique et en répondant aux besoins alimentaires et non alimentaires d'une population mondiale croissante soulève diverses questions : comment optimiser la production agricole et, plus largement, les usages des sols dans ce contexte ? Comment inciter producteurs et consommateurs à modifier efficacement

leurs modes de production et leurs comportements alimentaires ? Pour quel résultat environnemental ? Ces questions ne sont pas seulement d'ordre agronomique, écologique ou climatique. Elles impliquent également de prendre correctement en compte les conséquences du changement climatique sur les systèmes économiques, du niveau microéconomique (l'exploitation agricole par exemple) au niveau macroéconomique (implications pour les usages des sols au sens large, répartition de l'effort d'atténuation entre les secteurs, conséquences sur les marchés mondiaux). Ces différentes échelles d'analyse font appel à plusieurs types de modèles économiques, lesquels fournissent une approche quantitative des marges de manœuvre des politiques publiques en matière d'atténuation et d'adaptation.

Comment atteindre un objectif d'atténuation donné au coût le plus faible pour la société ? Cette question de l'efficacité en coût est à la base de l'économie de l'environnement. L'efficacité en coût implique de mobiliser en priorité les potentiels d'atténuation là où ils sont les moins coûteux. Parce que les conditions de production, et donc les coûts de réduction

des émissions sont hétérogènes, il n'y a aucune raison pour que la répartition de l'effort d'atténuation soit uniforme d'un individu, d'une région ou d'un secteur à l'autre. La difficulté est alors de s'assurer que les décisions prises par l'ensemble des agents permettent d'atteindre un objectif au coût total le plus faible. L'économie de l'environnement a montré que les instruments économiques sont efficaces pour orienter les décisions microéconomiques dans ce sens. Le principe est simple : en transmettant un signal (sous la forme d'une taxe ou du prix d'un marché de quota d'émissions) reflétant la valeur de l'effet causé par les émissions, on incite chaque agent à intégrer cette valeur dans ses choix de production ou de consommation, ce qui améliore l'efficacité globale.

Évaluer les coûts et les potentiels d'atténuation

Pour analyser la répartition efficace de l'effort d'atténuation au sein du secteur agricole, il est nécessaire de mesurer les coûts et les potentiels d'atténuation, ainsi que leur distribution dans l'espace et selon les types d'exploitations. De telles évaluations peuvent être fournies par des modèles microéconomiques de l'offre agricole. Ces derniers décrivent le comportement économique d'un grand nombre d'exploitations représentatives de la diversité des conditions de production agricole en fonction des prix, des dispositifs d'aides et des contraintes agronomiques et zootechniques qui s'appliquent aux différentes productions dans divers contextes. Ils permettent de simuler les conséquences de l'introduction de telle ou telle politique publique sur les choix de production, les émissions et les revenus des exploitants.

Ce type de modèle a été appliqué au secteur agricole français qui, malgré une contribution importante aux émissions (environ 20 pour cent des émissions françaises), est largement absent des dispositifs français de lutte contre l'effet de serre. En 2011, nous avons

montré que, même avec des hypothèses relativement conservatrices quant au potentiel d'atténuation, l'agriculture française serait à même de réduire ses émissions de 10 pour cent par rapport à 2005 à un coût de l'ordre de 35 euros par tonne d'équivalent dioxyde de carbone. Ce coût, comparable à celui qui prévaut dans les autres secteurs de l'économie, indique que l'agriculture a un rôle important à jouer pour que la France atteigne ses objectifs d'atténuation au moindre coût.

Le même modèle a été appliqué au niveau européen pour évaluer les gains en efficacité permis par la mise en place d'un marché des droits à émettre des gaz à effet de serre au sein de l'agriculture dans le cadre des objectifs du paquet énergie-climat. Ce dernier, adopté

par l'Union européenne en 2009, vise à augmenter la part des énergies renouvelables, réduire les émissions de dioxyde de carbone et accroître l'efficacité énergétique. Il contient des objectifs ambitieux de réduction des émissions à l'horizon 2020 pour les secteurs non couverts par le marché européen du carbone (agriculture, secteur résidentiel, transports). Ces objectifs ont fait l'objet d'un accord de « partage de l'effort » entre les pays européens.

Nos résultats montrent que le coût de l'atténuation pour le même objectif environnemental (10 pour cent de réduction au niveau européen en 2020 par rapport aux niveaux de 2005) pourrait être divisé par deux par rapport à ce qu'impliquerait le respect par chaque pays de ses objectifs fixés par



Quel rôle pour le consommateur ?

En France, l'alimentation, qui représente environ 30 pour cent des impacts « gaz à effet de serre », a aussi des effets – positifs ou négatifs – sur la ressource en eau, la biodiversité, l'emprise territoriale. La phase de production agricole représente la proportion la plus importante de la plupart de ces impacts, selon une approche « cycle de vie » de la chaîne alimentaire prenant en compte la production agricole, le stockage et la transformation des denrées alimentaires, leur transport, leur distribution, leur consommation et la gestion des déchets.

Les inventaires de cycle de vie des produits agricoles mettent en évidence des impacts très différents par kilogramme de produit, selon le type de denrée (produits végétaux ou animaux, type de viande), mais aussi selon le mode de production (plein champ ou sous serre chauffée, élevage extensif ou classique). Toutefois, chaque aliment, qui répond à des besoins nutritionnels différents et à des attentes économiques et sociales variées, peut avoir sa place dans une alimentation équilibrée.

Quel rôle peut jouer le consommateur ? Tout d'abord, il peut prendre conscience du lien entre son alimentation et l'environnement. Une première action simple et économique consiste à limiter le gaspillage alimentaire, qui représente environ 30 kilogrammes par personne et par an d'aliments jetés : autant d'aliments qu'il a fallu produire, transformer, stocker. Par ailleurs, il peut faire évoluer son régime alimentaire : la surconsommation alimentaire, l'alimentation de type occidental très riche en produits animaux, sucres et graisses, la consommation d'alcool ou de boissons sucrées, augmentent l'empreinte environnementale de la consommation alimentaire, mais constituent également des facteurs de risque pour la santé. Enfin, le consommateur peut favoriser certains modes et lieux de production, en sélectionnant des produits portant des labels reconnus, et en évitant les fruits et légumes hors saison.

Sarah Martin et Vincent Colomb, ADEME

le partage de l'effort. Cette réduction des émissions agricoles serait obtenue à un prix compris, à l'équilibre, entre 30 et 40 euros par tonne d'équivalent dioxyde de carbone.

En outre, l'efficacité ne doit pas être évaluée à l'aune des conséquences sur le seul secteur agricole. L'atténuation obtenue dans le secteur agricole pourrait se substituer en partie aux actions les plus coûteuses dans les autres secteurs de l'économie, permettant de réduire les coûts totaux d'atténuation. Ainsi, l'extension du marché du carbone européen aux émissions agricoles permettrait de réduire de 30 pour cent le coût d'atténuation consenti par les autres secteurs de l'économie (soit une économie annuelle de plus de deux milliards d'euros) pour le même objectif global de réduction des émissions à l'horizon 2020.

La participation de l'agriculture à l'atténuation peut également passer par la fourniture de biomasse, source d'énergie. À la faveur de prix élevés de l'énergie, les biocarburants sont apparus au cours des années 2000 comme un moyen de diversifier l'offre énergétique tout en assurant des débouchés aux agriculteurs et en réduisant les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports. Toutefois, les effets indirects du développement des biocarburants sur les changements d'usage des sols ont remis en cause le bilan net en termes d'émissions (*voir l'encadré ci-contre*). Au-delà de cette controverse, il apparaît que les liens complexes entre atténuation de gaz à effet de serre et usages des sols peuvent avoir des effets opposés en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Cela nécessite de prendre en compte simultanément l'ensemble des usages des sols (notamment l'agriculture et la forêt) dans les modèles économiques.

Les résultats confirment l'importance des instruments économiques pour inciter les exploitants à modifier leurs modes de production et, ce faisant, à réduire leurs émissions au meilleur coût pour l'ensemble de la société.

Sans de telles incitations, le coût total de l'effort peut apparaître trop important, favoriser l'inaction, alors même que des potentiels d'atténuation existent.

L'agriculture et la forêt sont influencées par le climat. Les projections faites à différents horizons sont conditionnées par les techniques que l'on connaît aujourd'hui, mais que l'on fait évoluer pour en améliorer l'efficacité. Ainsi, au prix d'un effort de recherche soutenu, la consommation d'énergie par unité de service rendu décroîtra.

En agriculture, par exemple, on anticipe une plus grande efficacité

dans l'utilisation des intrants (énergie, engrais, produits phytosanitaires, semences, irrigation), dans le cadre d'une agriculture raisonnée. Dans les modèles conçus pour être plus favorables à l'environnement, on travaille sur les systèmes où les intrants sont limités. En revanche, les modélisations sont plus compliquées quand il s'agit de prévoir l'apport des progrès de la génétique, du développement des OGM, de la mise au point de nouvelles variétés. Ce champ de l'adaptation relève pour une part des politiques de recherche et de développement. Or,

Les biocarburants en question

La contribution des biocarburants de première génération à l'atténuation des changements climatiques suscite, depuis plus de cinq ans, de vifs débats dans la communauté scientifique et dans les milieux politiques. Ce potentiel a été évalué par des analyses dites en cycle de vie qui comptabilisent les émissions de gaz à effet de serre de la phase de production jusqu'à la phase de consommation. Toutefois, il a été estimé de façon incomplète, car il ne considère pas les effets indirects du développement de ces filières. En effet, comme la demande de matières premières agricoles utilisées pour produire des biocarburants augmente, cela entraîne une tension sur les marchés, une hausse des prix, une incitation à produire, et donc potentiellement la conversion en terres agricoles de parcelles initialement non destinées à de tels usages. Ce changement d'usage libère le carbone stocké dans les sols et dans la biomasse qui s'y était développée.

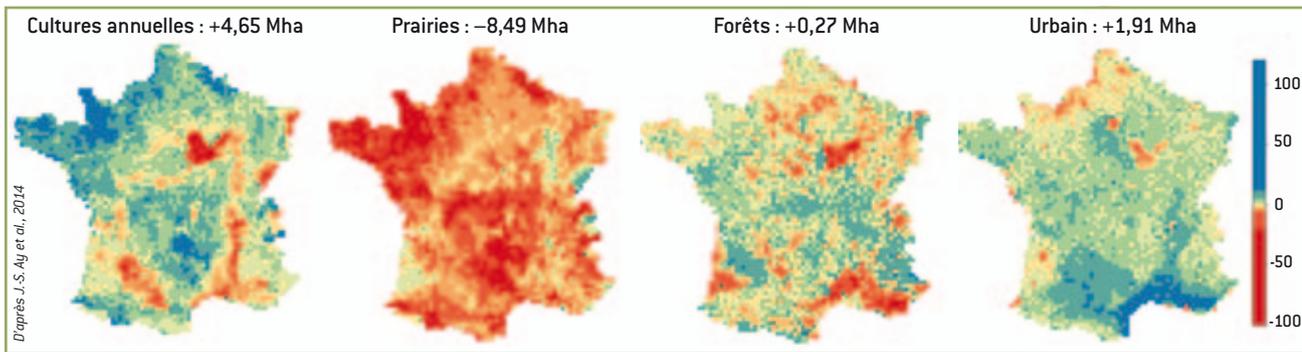
Le calcul de ces quantités de carbone libéré, combiné au bilan des biocarburants, est complexe et confronté à des incertitudes. Il fait appel à divers modèles, notamment économiques. Les différentes estimations de ces émissions réalisées à travers le monde sont variables, et le bilan en termes de gaz à effet de serre libéré par ces filières peut être notablement dégradé, comme le confirme l'évaluation réalisée en 2012 par l'INRA à la demande de l'ADEME. D'après la moitié des évaluations publiées, en tenant compte des émissions liées aux changements d'usage des sols, on constate que les émissions liées à l'usage des biocarburants de première génération seraient supérieures à celles des carburants fossiles. Les recherches sont à poursuivre pour préciser ces bilans et identifier des voies d'amélioration. Au-delà des biocarburants, il conviendra d'intégrer les émissions de gaz à effet de serre liées aux effets indirects des différentes politiques d'usage des sols, par exemple les autres cultures énergétiques, le développement de l'élevage ou encore l'urbanisation des terres agricoles.

Antonio Bispo, ADEME



La canne à sucre peut être utilisée pour produire des biocarburants.

SassyWitch-Studio / Shutterstock



Variations d'usage des sols prévues d'après l'un des scénarios utilisés pour modéliser les conséquences du changement climatique. Ces variations représentent l'évolution prévue entre 2003 et 2053 des surfaces dédiées à quatre usages (de gauche à droite : les cultures annuelles, les prairies, les forêts et les zones urbanisées). Sur ces cartes, les surfaces sont exprimées en dizaines d'hectares par maille de 12 kilomètres sur 12.

sous l'effet du changement climatique, les exploitants agricoles (tout comme les autres agents économiques), adapteront leur pratique agronomique aux nouvelles conditions, comme ils s'adapteraient à tout changement de politique publique. Ce changement se fera de façon autonome, et sera difficile à intégrer dans les modèles économiques globaux.

L'économie de l'adaptation

En 2013, David Leclère et ses collègues, de l'INRA et du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, ont mis en évidence les effets d'une adaptation autonome des exploitations agricoles à l'échelle de l'Union européenne dans deux scénarios climatiques. Les productions des terres agricoles et leur localisation changeraient, ainsi que les émissions agricoles de gaz à effet de serre, avec une évolution marquée des besoins en eau. Il n'est pas exclu qu'aux conditions actuelles de prix, les agriculteurs européens bénéficient de ces évolutions. C'est même le scénario associé à la hausse la plus marquée des températures qui semble le plus favorable. Au Sud comme au Nord, la disponibilité de la ressource en eau pourrait devenir l'enjeu principal. Inévitablement, se posera le problème de l'accès à la ressource en eau au bon endroit et au bon moment. Par ailleurs, avec l'augmentation de la demande alimentaire, les prix agricoles pourraient augmenter, comme on l'observe déjà depuis quelques années. Favorable dans un premier temps aux producteurs, cette évolution sera freinée par une augmentation des prix des intrants.

Les impacts du changement climatiques sur les conditions de pro-

duction sont susceptibles de modifier les revenus issus des différents usages des sols, qu'ils soient agricoles, forestiers, mais aussi urbains. Au-delà des impacts sur les systèmes agricoles et forestiers, les modifications du climat auront des conséquences sur les marchés fonciers et sur l'usage des sols. C'est ce qu'ont étudié Jean-Sauveur Ay et ses collègues de l'INRA. À partir de données historiques sur les usages des sols français, ils ont évalué les liens entre les revenus espérés de cinq usages (cultures annuelles, prairies, forêt, cultures pérennes et usage urbain) et les conditions climatiques. Leurs résultats indiquent que le changement climatique à l'horizon 2050 modifierait notablement les usages en France (voir la figure ci-dessus). Ils font apparaître une diminution des prairies (perdant environ 8,5 millions d'hectares) au profit de cultures annuelles (gagnant près de 5 millions d'hectares). Les prairies stockant d'importantes quantités de carbone, de telles évolutions auraient des conséquences notables sur les émissions dues aux usages des sols.

Ainsi, en s'adaptant, les systèmes vont modifier de façon sans doute notable, à la baisse ou à la hausse, les émissions de gaz à effet de serre. On estime que, chez beaucoup d'exploitants

agricoles européens, la hausse des rendements pourrait se traduire par une hausse des émissions d'oxyde d'azote, N_2O , liées à l'augmentation de l'utilisation d'amendements azotés. Cela influera sur les stratégies d'atténuation, qui sont elles-mêmes susceptibles d'engendrer une dynamique d'adaptation.

Cette dynamique dépend en grande partie de celle des émissions et de leur effet retardé sur le climat. Les gaz à effet de serre, avec des temps de présence dans l'atmosphère et des influences différents, contribuent à rendre cette dynamique complexe à analyser. Du point de vue économique, il faut aussi comparer les efforts et les bénéfices réalisés aujourd'hui à ceux qu'il faudrait consentir demain si l'on attend.

Mais la complexité ne doit pas servir de prétexte à l'inaction. Si l'on connaît les difficultés à mettre en œuvre la régulation d'une pollution, même quand elle est aussi simple à caractériser que celle des eaux naturelles par les nitrates, et quelle que soit la confiance que l'on puisse avoir dans le progrès technique, un principe élémentaire de précaution devrait nous obliger à agir rapidement pour limiter les conséquences localement incertaines, et globalement importantes, du changement climatique.

Bibliographie

- J.-S. Ay et al., *Integrated models and scenarios of climate, land use and common birds dynamics*, Proceedings of the Global Land Project, 2nd Open Science Meeting, Berlin, 2014.
D. Leclère et al., *Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change*, *Ecological Economics*, vol. 87, pp. 1-14, 2013.
S. De Cara & P.-A. Jayet, *Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost-effectiveness, and the EU non-ETS Burden Sharing Agreement*, *Ecological Economics*, vol. 70(9), pp. 1680-1690, 2011.
WRI (2014) : <http://cait2.wri.org/profile/World>
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Fr_RMS_2013_.pdf



Des menaces aux solutions

Jean-François Soussana
est directeur scientifique
Environnement - INRA.

Thierry Caquet dirige
le Méta-programme Adaptation
au changement climatique - INRA.

Jérôme Mousset
est chef du Service Agriculture
et forêts - ADEME.

Face au changement climatique, les recherches visent à conjuguer une baisse des émissions de gaz à effet de serre et des adaptations qui seront, quoi qu'il advienne, nécessaires dans un futur proche.

Le second volume du cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts inter-gouvernemental sur le climat, le GIEC, a été publié le 30 mars 2014. Il est consacré aux impacts du changement climatique, aux adaptations possibles et à la vulnérabilité des systèmes et des populations humaines exposées. Au terme de ce dossier, revenons sur les principales conclusions pour l'agriculture, la forêt, les écosystèmes et les populations rurales qui en dépendent.

Le premier volume, publié en 2013, a confirmé que le changement climatique est déjà en cours et que ses effets commencent à se manifester dans de nombreux systèmes naturels : réchauffement des surfaces terrestres et de la basse atmosphère ; réchauffement jusqu'à 2000 mètres de profondeur dans l'océan ; augmentation des températures maximales et réduction des températures minimales ; précipitations plus intenses ; montée du niveau de la mer ; acidification des océans ; réduction du manteau neigeux et des calottes glaciaires. Le réchauffement planétaire devrait s'accélérer au cours des prochaines décennies pour atteindre, dans

les années 2030, entre 1 et 2,5°C par rapport aux années 1900. Ce réchauffement est pratiquement inévitable, en raison de l'inertie du système climatique.

Maîtriser les options climatiques

À partir de 2050, s'ouvre la période des options climatiques au cours de laquelle la température mondiale dépendra d'émissions de gaz à effet de serre qui n'ont pas encore eu lieu. S'il est encore temps de limiter à 2°C le réchauffement moyen à cette période, seule une réduction drastique des émissions mondiales de gaz à effet de serre permettra d'y parvenir. Le secteur de l'agriculture peut contribuer à cet effort. En adoptant dans chaque région les meilleures pratiques disponibles, une baisse de l'ordre de 20 pour cent des émissions de méthane et de protoxyde d'azote serait possible sans réduction de la production. Le potentiel d'atténuation de l'agriculture mondiale d'ici 2030 est estimé à près de six milliards de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone par an et près de la moitié de ce potentiel serait accessible moyennant un financement de 50 dollars par tonne de dioxyde de carbone évitée.

Le stockage de carbone dans la matière organique des sols cultivés et des prairies, ainsi que la restauration des sols dégradés présentent probablement le potentiel le plus important pour la lutte contre l'effet de serre en agriculture. Viennent ensuite la réduction des émissions de méthane de l'élevage et des rizières, et la maîtrise du cycle de l'azote. En outre, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites en remplaçant les combustibles fossiles par des sous-produits agricoles, par exemple, du biogaz issu de la fermentation anaérobie de résidus de récolte et d'effluents d'élevage.

L'expansion des biocarburants aux dépens des cultures alimentaires participe à la déforestation et, de manière indirecte, aux émissions de dioxyde de carbone de l'agriculture. En limitant sous les tropiques l'extension des cultures et des prairies semées, il serait possible de ralentir les émissions de dioxyde de carbone causées par la déforestation tropicale, et la mise en culture des savanes et des prairies natives. De plus, les activités de boisement permettent de piéger le carbone, de réduire l'érosion des sols, et de créer des habitats favorables à la biodiversité.

S'adapter à la variabilité climatique

D'ici 2030, la concentration atmosphérique élevée du dioxyde de carbone et le réchauffement pourraient avoir des conséquences positives sur la croissance de la végétation (forêts, cultures) aux latitudes élevées notamment. Dans l'hypothèse d'un réchauffement progressif, sans augmentation de la variabilité du climat, ces effets positifs seraient dominants à l'échelle de l'Europe.

Toutefois, la variabilité du climat risque de se renforcer, avec selon les régions et les saisons une augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules et des sécheresses ou, au contraire, des précipitations intenses et des inondations. Face à ces risques climatiques, les systèmes de production doivent devenir plus résilients, c'est-à-dire capables de bonnes per-

formances malgré les perturbations. Les agriculteurs s'adaptent déjà au réchauffement climatique en faisant évoluer leurs pratiques agricoles. Ces adaptations aux aléas seront progressivement facilitées par la veille agrométéorologique, qui consiste à pronostiquer en cours de saison l'impact du climat sur la production, et par des prévisions climatiques améliorées aux échelles du mois ou de la saison. Améliorer la gestion du risque climatique en agriculture nécessite aussi la diver-

sification des cultures et des systèmes d'élevage. Enfin, il sera nécessaire de concevoir des systèmes d'irrigation plus économes en eau, de passer dans certains cas du maïs irrigué au sorgho (plus économe en eau) et de développer de petits aménagements hydrauliques tout en minimisant leur impact sur les milieux aquatiques.

Une autre piste concerne la génétique végétale et animale. S'il est possible d'améliorer la tolérance à des températures élevées des variétés



Andrey Kurmin / Shutterstock

Inventer les scénarios du futur

Face au changement climatique, la construction de scénarios prospectifs permet d'analyser différentes alternatives et de proposer des orientations. L'ADEME et d'autres organismes réalisent ce type de projections dont on peut dégager plusieurs enseignements généraux pour l'agriculture et la forêt. En conservant la capacité de l'agriculture à nourrir une population française croissante et à exporter, il ressort que le potentiel maximal de réduction des gaz à effet de serre pour l'agriculture se situera entre 30 et 50 pour cent en 2050 selon l'ampleur des modifications envisagées, alors qu'il pourra atteindre 90 pour cent pour d'autres secteurs. Les principales hypothèses des scénarios agricoles portent sur la gestion de l'azote, la simplification du travail du sol, la méthanisation, l'agroforesterie, l'alimentation animale, l'évolution vers une consommation alimentaire plus proche des recommandations nutritionnelles.

Les scénarios mettent en lumière l'enjeu de la gestion des stocks de carbone, car toute variation de stock, même faible, a un impact considérable sur les bilans de gaz à effet de serre. Aussi, la préservation du capital carbone dans les sols (maintien des prairies et des teneurs en matière organique) constitue un élément important dans les hypothèses retenues. Cela passe également par un arrêt d'ici 2030 de l'artificialisation des sols (étalement urbain, voirie, etc.), pour préserver l'espace agricole et forestier.

Par ailleurs, la plupart des projections montrent un rôle croissant et stratégique de la biomasse dans l'énergie. Dans le scénario ADEME, la biomasse pourrait fournir en 2050 30 pour cent de l'énergie consommée en France. Pour atteindre cet objectif, il faudrait d'abord réduire la consommation d'énergie de 50 pour cent, mieux valoriser la forêt et favoriser le développement de la méthanisation agricole. Enfin, les simulations mettent en exergue la question essentielle de la gestion de l'eau, avec un recours accru à l'irrigation, alors même que la ressource devrait être de plus en plus limitée.

végétales et des races animales – et de produire des plantes résistantes à la sécheresse ou à un excès d'eau –, il sera beaucoup plus difficile de le faire sans réduire le potentiel de production durant les années favorables. Un effort considérable de recherche doit donc être engagé, notamment pour sélectionner les meilleurs phénotypes dans des environnements modifiés pour correspondre aux conditions climatiques du futur. Plusieurs cycles de sélection seront nécessaires, chacun nécessitant une dizaine d'années environ, ce qui souligne l'urgence des efforts à entreprendre.

La question de la santé végétale, animale et humaine se posera également puisque les risques liés à des maladies vectorielles tendront à augmenter. Comme l'usage des pesticides et des antibiotiques en agriculture doit être réduit, la maîtrise de la santé animale et végétale deviendra plus exigeante. Les stratégies de surveillance épidémiologique et de gestion des risques sanitaires devront être renforcées en conséquence.

Les pistes d'adaptation seront plus restreintes pour les forêts, qui sont particulièrement sensibles aux aléas climatiques (sécheresses, tempêtes et incendies). Cette vulnérabilité menace non seulement la production de bois, de fibres et de bioénergie, mais elle risque également d'affaiblir le puits de carbone que représente la forêt au niveau mondial. Il sera nécessaire d'accroître la biodiversité des forêts, de guider l'évolution génétique au sein des espèces forestières, de favoriser le renouvellement des arbres par des rotations accélérées et de limiter l'ampleur des incendies par des aménagements.

Certains territoires seront particulièrement touchés : en zone littorale, en raison de la salinisation et de l'inondation d'une partie des sols et de l'érosion accélérée des côtes ; en zone de montagne, du fait d'un dépérissement accru des forêts ; dans les plaines inondables, où les dommages aux parcelles, aux bâtiments et aux infrastructures se

multiplieront. Mais des opportunités pourraient se développer pour l'agriculture aux latitudes élevées. Ainsi, les pays nordiques pourraient cultiver du maïs, même si les rendements seront vraisemblablement irréguliers du fait des risques de gelées. La vigne devrait pouvoir s'étendre au Royaume-Uni, au Danemark et remonter en Europe centrale. Toutefois, le potentiel des sols et la disponibilité en eau limiteront dans certains cas la remontée en latitude des zones de cultures.

Et si la température augmentait de 4 °C ?

Dans l'hypothèse d'un réchauffement global atteignant 4 °C à la fin du XXI^e siècle, les extrêmes climatiques se renforceraient notablement. En Europe, les canicules et les sécheresses estivales toucheraient surtout la moitié Sud du continent, tandis que les épisodes de précipitations intenses se généraliseraient principalement à l'automne et en hiver (voir la figure page ci-contre). Les

risques du changement climatique dans un tel scénario seront amplifiés par les rétroactions entre les ressources en eau et en sols, la végétation et le climat à l'échelle régionale. Des sécheresses et des canicules fréquentes réduisent la productivité des écosystèmes et des cultures, ce qui limite l'apport de matière organique au sol et le taux de couverture par la végétation. Il en résulte une dégradation des sols, qui réduit leur capacité à retenir l'eau, renforçant ainsi les risques de sécheresses.

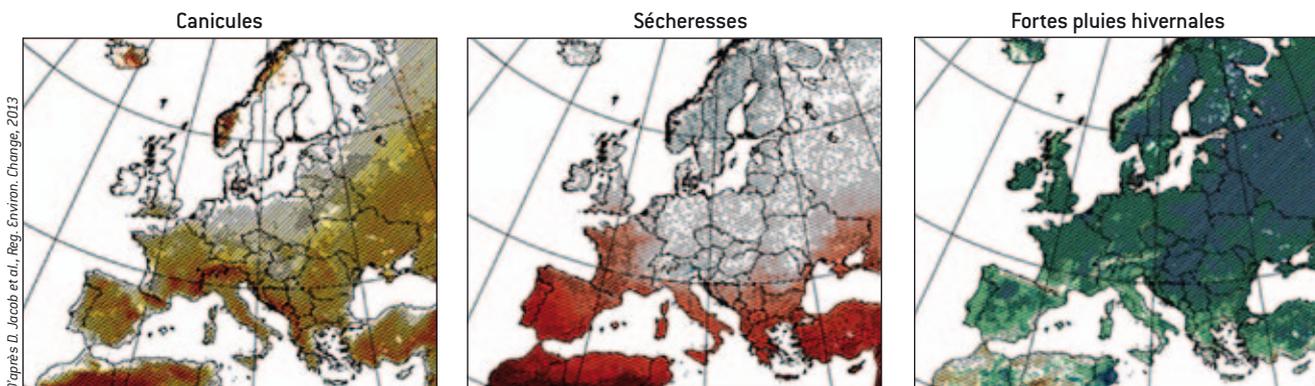
De plus, la sécheresse et la canicule entraînent d'importantes pertes de carbone des écosystèmes : on estime à quelque 0,5 milliard de tonnes la perte de carbone durant l'été 2003 en Europe. Une récurrence accrue de ces extrêmes pourrait transformer en savane des forêts aussi importantes que l'Amazonie. Le pourtour méditerranéen, qui sera particulièrement touché par les canicules et les sécheresses, serait également menacé par une dégradation marquée des sols et de la végétation.

Recherches pour l'adaptation au changement climatique

Sur la décennie 2010-2020, l'INRA développe un programme prioritaire sur l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt. Ce programme a trois objectifs : gérer les risques et les opportunités à moyen terme associés à la variabilité et aux extrêmes du climat ; prévoir et modéliser les impacts régionaux du changement climatique ; développer des options d'adaptation pour le long terme. Ces options concernent aussi bien la biodiversité sauvage et cultivée (ressources génétiques), la santé des écosystèmes, des plantes et des animaux d'élevage, la génétique végétale et animale, la capacité d'adaptation des systèmes de production, des territoires et des filières. Les technologies développées devront être compatibles avec la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la conservation des stocks de carbone des sols et des forêts. Les coûts et les bénéfices des mesures d'adaptation seront analysés en termes de compétitivité économique, de biodiversité, de ressources en eau et en sols, de satisfaction des besoins alimentaires, et de qualité et sécurité sanitaire des produits. Le programme aborde aussi les besoins de formation, les modes d'organisation collective et les politiques publiques.



Yu Lan / Shutterstock



Événements climatiques extrêmes en Europe à la fin du siècle (années 2071-2100 comparées aux années 1971-2000) pour un scénario de fortes émissions de gaz à effet de serre (les zones de forte augmentation sont en rouge pour les canicules et les sécheresses, en bleu pour les pluies).

Dans un scénario à +4 °C, on verrait apparaître des risques systémiques du changement climatique à la fin du XXI^e siècle : réduction des ressources en eau souterraines et superficielles exacerbant les concurrences entre l'agriculture et les autres secteurs, forte réduction du potentiel de production des forêts européennes et de la valeur du foncier, baisse des rendements agricoles et réduction de l'ensemble des services des écosystèmes en Europe du Sud. Les conséquences économiques d'un réchauffement de cette ampleur ont été estimées à une perte annuelle moyenne du produit intérieur brut de un pour cent par an pour l'ensemble de l'Europe, alors que la croissance moyenne historique du produit intérieur brut européen a été de deux pour cent par an.

À l'échelle mondiale, la hausse de la demande alimentaire liée à la croissance démographique et à l'accroissement des richesses pourrait dépasser dans ce scénario l'offre alimentaire étant donné les impacts négatifs du changement climatique. Il en résulterait une baisse de la sécurité alimentaire mondiale et une augmentation de la mortalité infantile.

Vers la transition écologique

Pour éviter ce scénario du pire, il faut trouver des solutions rendant compatibles la production agricole, la réduction des gaz à effet de serre et l'adaptation au changement climatique. L'agriculture intelligente face au climat a été définie comme une agriculture qui augmente durablement la productivité et la résilience (adaptation),

réduit les émissions de gaz à effet de serre (atténuation) et améliore la sécurité alimentaire et le développement. Des systèmes plus résilients peuvent avoir des effets secondaires bénéfiques comme la séquestration du carbone et des réductions de gaz à effet de serre par unité de produit. Une intensification agricole durable permettrait de combler les déficits de rendement et d'augmenter l'efficacité d'utilisation des ressources naturelles par l'agriculture, en particulier dans les pays en développement. Cette stratégie pourrait améliorer la sécurité alimentaire et contribuer à atténuer les changements climatiques en mettant un terme à la déforestation et à l'expansion de l'agriculture sur des écosystèmes sensibles.

Les changements alimentaires et les politiques bioénergétiques peuvent également contribuer. Par exemple, passer d'une consommation de viande d'animaux (bovins, ovins) nourris au grain à celle d'animaux nourris à l'herbe et ne pas utiliser les cultures alimentaires comme source de biocarburants pourrait améliorer la disponibilité mondiale de calories et réduire les impacts environnementaux de l'agriculture. Il s'agit aussi de réduire les pertes après récolte, par l'amélioration du stockage et du transport des aliments dans les pays en

développement. Dans les pays industrialisés, ce sont principalement les gaspillages d'aliments dans la distribution et la consommation qu'il faudra limiter.

À l'échelle d'un pays comme la France, des scénarios illustrent le potentiel d'une transition écologique qui permettrait de réduire d'ici 2050 de 30 à 50 pour cent les émissions de gaz à effet de serre en agriculture (voir l'encadré page 83). L'augmentation de la résilience des systèmes agricoles n'a pas encore été suffisamment explorée dans ces scénarios, même si plusieurs options ont été proposées.

Les efforts de recherche en cours devraient contribuer à combler cette lacune et à dégager les bases d'une transition écologique de l'agriculture, de la forêt et de la gestion de la biodiversité (voir l'encadré page 43). À brève échéance, ces recherches pourraient aussi contribuer à évaluer les potentiels des politiques à mener dans la perspective d'un nouvel accord de l'ensemble des pays, en développement, émergents et industrialisés. Cet accord sera discuté lors de la négociation internationale qui aura lieu à Paris fin 2015 dans le cadre de la XXI^e conférence des parties à la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique.

Bibliographie

- J.-F. Soussana [coord.], *S'adapter au changement climatique, Agriculture, écosystèmes et territoires*, Quae, 2013.
 S. Pellerin et al., *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?*, INRA, 2013.
 D. Jacob D. et al., *EURO-CORDEX : New high-resolution climate change projections for European impact, Regional Environmental Change*, 2013.
 J. Ciscar et al., *Physical and economic consequences of climate change in Europe*, PNAS, 2010.

Le métaprogramme

Adaptation au Changement Climatique
de l'Agriculture et de la Forêt (ACCAF)

de l'INRA

Thierry CAQUET, Directeur
du métaprogramme ACCAF et Chef
du département Ecologie des Forêts,
Prairies et Milieux Aquatiques de l'INRA.

Jean-Marc GUEHL,
Directeur de l'UMR Écologie
et Écophysiologie Forestières
INRA-Université de Lorraine à Nancy.

Nathalie BREDA, membre de la cellule
de coordination du métaprogramme ACCAF,
chercheur à l'UMR Écologie et Écophysiologie
Forestières INRA-Université de Lorraine à Nancy.

Le deuxième volume du 5^e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), publié en mars 2014, fait une synthèse des connaissances sur les impacts du changement climatique, les possibilités d'adaptation et la vulnérabilité de différents secteurs dont la production et la sécurité alimentaires. Il ressort de ces travaux que des effets négatifs, mais aussi parfois positifs, du changement climatique sur les cultures (notamment les céréales) et la production alimentaire sont clairement mis en évidence dans plusieurs régions du monde. Le changement climatique est en partie responsable de la stagnation des rendements de grandes cultures comme le blé en France, l'ampleur de cet impact variant selon l'espèce, la région, les scénarios de climat futur. Les projections des rendements attendus pour les prochaines décennies sont de plus en plus pessimistes à mesure que l'on se rapproche de la fin du 21^e siècle, le sud de l'Asie et de l'Afrique étant les régions les plus vulnérables. Une plus forte variabilité entre années et entre régions des rendements

est aussi attendue. Enfin, même si le déploiement des stratégies d'adaptation actuellement envisagées permettra de pallier en partie les effets adverses du changement climatique, leur efficacité variera fortement selon les cultures et selon les régions du globe. Dans ce contexte, il est essentiel de mobiliser les capacités de recherche, d'innovation et de transfert dans de nombreuses disciplines.

Face aux besoins de recherche liés non seulement au changement climatique mais aussi à d'autres grands enjeux, l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) s'est engagé dans le déploiement de programmes transdisciplinaires, les métaprogrammes (voir l'encadré page 49). Ces programmes transversaux, d'une durée minimale de cinq ans, ont été mis en place progressivement à partir de 2010. Ils sont destinés à structurer et à coordonner les activités et projets de recherche pour relever quelques défis majeurs scientifiques ou de la société. En particulier, un programme prioritaire sur l'Adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt, ACCAF, a été

lancé en 2011. Le premier objectif de ce programme est de coordonner, inciter et intégrer les efforts de la recherche agronomique pour contribuer à lever les verrous de connaissances et sociétaux qui pourraient freiner l'adaptation. Cette stratégie intégrative, associant des partenaires nationaux et étrangers, académiques ou socio-professionnels, devrait produire des résultats et des avancées rapides, par exemple dans l'évaluation multicritère des options d'adaptation. Le second objectif est de renforcer l'action de la recherche agronomique française dans le paysage national, européen et international.

Le prolongement d'une réflexion prospective

Alors que les travaux de la communauté française et internationale sur les impacts du changement climatique et sur la vulnérabilité des agro-écosystèmes montaient en puissance, l'INRA a piloté un atelier de réflexion prospective, baptisé ADAGE (Adaptation de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés au changement climatique), lancé en 2009 par l'Agence nationale de la recherche. Le métaprogramme ACCAF a largement bénéficié des conclusions de cette réflexion scientifique qui a identifié les recherches nécessaires à l'adaptation au changement climatique des milieux et des systèmes de production gérés par l'homme. Parmi les nombreuses questions, celles de l'adaptation de l'élevage aux évolutions du climat, des marges de manœuvre dans les itinéraires culturaux et sylvicoles pour faire face aux aléas climatiques extrêmes ou encore de la compréhension de la stagnation du rendement du blé ont été abordées. ACCAF constitue ainsi une mise en œuvre des priorités scientifiques identifiées dans les domaines pris en charge par l'INRA et ses partenaires du groupe thématique «Climat: évolution, adaptation, atténuation et impacts» de l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement, AllEnvi. En stimulant le dialogue entre

les disciplines, il constitue un cadre cohérent pour les différents projets à moyen terme liés à la thématique de l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt.

Pluridisciplinarité et intégration au cœur de la démarche

Dans le cas du métaprogramme ACCAF, des compétences en sciences humaines et sociales, agronomie, écologie, génétique, écophysiologie, zootechnie, économie, modélisation sont mobilisées pour couvrir une large part du spectre des problématiques posées par l'adaptation au changement climatique. La stratégie adoptée fait de plus la part belle aux approches intégrées par filière ou par territoire.

Ainsi par exemple, construire et accompagner les processus d'adaptation des filières agro-alimentaires au changement climatique représente un enjeu majeur. Par essence pluridisciplinaire, la démarche adoptée favorise les interactions entre les scientifiques, les acteurs du développement et ceux de la filière concernée. La construction d'une vision commune des futurs possibles et des questions principales pour la filière est une étape initiale indispensable pour l'élaboration de scénarios prospectifs d'adaptation. Ce type de démarche est fortement encouragé, par exemple dans le cas de la filière vigne et vin: Quels sont les leviers biotechniques pour maintenir la production de raisin, en quantité et qualité, sous climat futur? Quels risques et parades face à l'augmentation des aléas climatiques? Les méthodes de vinification peuvent-elles s'adapter pour faire face à une augmentation des teneurs en sucres des baies? Les goûts et préférences des consommateurs sont-ils susceptibles de changer? Comment accompagner ces évolutions? Toutes ces questions en cascade depuis le producteur jusqu'au consommateur s'accompagnent d'évaluations multicritères, d'innovation et de réflexions prospectives.

La modélisation des impacts du changement climatique sur l'agriculture constitue aussi un enjeu fort des

recherches en cours. Le recours à des démarches basées sur un ensemble de modèles (ou démarche ensembliste) permettant d'estimer le niveau de confiance d'une projection est une pratique courante en climatologie, comme par exemple dans le cas des travaux du GIEC. Elle est en revanche beaucoup plus récente en agronomie. Des programmes internationaux comme AgMIP (*Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project*) et MAC-SUR (*Modelling European Agriculture with Climate Change for Food Security*) concernant la modélisation de la productivité des grandes cultures ou des prairies sont actuellement en cours. La communauté scientifique soutenue par le métaprogramme ACCAF participe ainsi aux évaluations de rendement par les modèles français pour les prairies, le maïs ou le blé. La mise en commun de modèles permet de simuler l'impact des scénarios climatiques futurs avec une fiabilité nouvelle. Ces actions permettent aussi de comparer et d'améliorer les modèles, de renforcer les liens au niveau international entre les modélisateurs et de participer à de nouveaux projets. Par exemple, la communauté internationale discute des performances et robustesses comparées entre des modèles de différents types (semi-empiriques, corrélatifs ou basés sur les processus). Les premiers travaux montrent que le classement des modèles quant à leur capacité à évaluer les rendements change selon qu'ils sont utilisés en utilisant des données de climat passé et présent ou avec des données issues de scénarios de climat futur.

Des dimensions de travail multiples

Depuis 2011, le métaprogramme ACCAF a permis de soutenir plus de 25 projets de recherche nationaux et des réseaux internationaux permettant d'élargir les gammes climatiques ou la diversité des ressources animales ou végétales. Ils concernent les cultures annuelles et pérennes, l'élevage, la forêt, la biodiversité ainsi que les ressources en eau et en sol.

Il a aussi contribué au soutien à la formation de jeunes chercheurs grâce au financement de bourses de thèse et permis l'accueil de chercheurs post-doctorants.

Les actions du métaprogramme peuvent être classées selon un ordre qui correspond globalement à des temps de réponse croissants des systèmes, du court au long terme, et à une gradation de l'intensité et du caractère 'actif' de l'adaptation : depuis les mesures tactiques, palliatives ou d'accompagnement exploitant les marges de manœuvre et les progrès techniques, jusqu'à des ruptures techniques, des transformations de filière et d'organisation collective nécessitant une forte innovation socio-technique et des évaluations de faisabilité socio-économiques. Du point de vue de la démarche de recherche, les actions s'organisent aussi selon un gradient d'intégration qui associe des observations historiques et actuelles sur les agrosystèmes, les écosystèmes et les socio-systèmes, des expérimentations manipulant l'une ou l'autre des composantes des systèmes, de la modélisation permettant à la fois de l'intégration de connaissances et de la scénarisation sous climat ou pratiques modifiés. Des travaux d'accompagnement du transfert et d'analyse des stratégies des acteurs déjà mobilisés, associés à des évaluations multicritères sont mobilisés pour proposer des innovations pour s'adapter de manière efficace, économiquement réaliste et socialement acceptable.

Priorités définies

Les objectifs prioritaires identifiés pour le métaprogramme sont :

- l'évaluation et la gestion des risques et des opportunités à moyen terme associés à la variabilité et aux extrêmes du climat et la définition de stratégies visant à anticiper et pallier les crises climatiques ;
- la projection et la scénarisation (avec une quantification des incertitudes associées) des impacts régionaux du

changement climatique sur l'agriculture et les écosystèmes peu anthropisés (prairies permanentes, forêts) ;

- la compréhension et la maîtrise des principaux effets du changement climatique sur la biodiversité, son évolution ainsi que celle de la santé des écosystèmes, des agro-systèmes et des animaux d'élevage ;
- l'amélioration génétique des espèces cultivées ou domestiquées et des animaux d'élevage vis-à-vis des modifications du climat et de ses conséquences, et le renforcement de la capacité d'adaptation des systèmes de culture, des systèmes de production et des filières ;
- le développement de technologies innovantes de l'adaptation compatibles avec les enjeux d'atténuation par réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- l'identification des coûts et des bénéfices de mesures d'adaptation au regard de différents enjeux (compétitivité économique, biodiversité, ressources en eau et en sols, satisfaction des besoins alimentaires, qualité et sécurité sanitaire des produits) ;
- enfin, la définition de modes d'organisation collective (gouvernance des territoires, assurances, formation, innovation, valorisation) susceptibles de renforcer la capacité d'adaptation de l'agriculture et de la forêt au changement climatique.

Lors de la conférence tenue en 2010 à La Haye sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et le changement climatique, la FAO a présenté le concept d'une « agriculture intelligente face au climat ». Cette vision de l'agriculture repose sur trois piliers : augmenter de façon durable la productivité agricole et les revenus des agriculteurs afin d'atteindre les objectifs nationaux de sécurité alimentaire et de développement ; renforcer la résilience et la capacité d'adaptation des systèmes agricoles et alimentaires au changement climatique ; rechercher des possibilités d'atténuer les émissions de gaz à effet de

serre et d'augmenter la séquestration du carbone. Les travaux soutenus par ACCAF dans le domaine agronomique contribuent à cette démarche.

Une gouvernance adaptée

La gouvernance du métaprogramme est assurée par une cellule de coordination et un comité scientifique international. Ils définissent ensemble l'orientation stratégique du programme et s'assurent que les objectifs sont atteints. Un comité de porteurs d'enjeux permet d'impliquer les communautés de praticiens, les ONG et les décideurs publics intéressés par les activités du métaprogramme.

La cellule de coordination est composée de chercheurs et ingénieurs de l'INRA, choisis pour leurs compétences scientifiques ou leur connaissance des enjeux et outils internationaux. Elle élabore et gère les appels à projets de recherche, évalue et sélectionne les actions internationales, arbitre les bourses de thèses et sélectionne les thématiques confiées à des post-doctorants. Elle met en œuvre les recommandations du comité scientifique international et travaille en interaction directe avec les porteurs de projets. Enfin, elle assure la communication et l'animation de la communauté mobilisée sur les enjeux de l'adaptation à travers des interventions auprès des départements de recherche de l'INRA, dans diverses manifestations à destination de la communauté scientifique, des partenaires socio-économiques et des porteurs d'enjeux concernés par l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt.

Le comité scientifique international rassemble des personnalités scientifiques françaises et étrangères qui n'appartiennent pas à l'INRA. Son rôle est d'aider à élaborer et faire évoluer la vision stratégique à mettre en œuvre pour répondre aux enjeux scientifiques et aux innovations nécessaires pour adapter l'agriculture et la forêt au changement climatique.

Le regard extérieur à l'Institut et la notoriété scientifique internationale de ses membres permettent d'évaluer les projets à la fois sur leur qualité scientifique et sur leur originalité dans le contexte international. Ce comité aide aussi la cellule de coordination dans l'identification des fronts de sciences non couverts, pertinents et stratégiques.

Le comité des porteurs d'enjeu a été constitué afin de servir de point d'interaction privilégié avec les représentants des différentes communautés concernées (ministères et agences de l'état, instituts techniques agricoles, gestionnaires forestiers et des milieux aquatiques, représentants des filières agricoles, pôles de compétitivité, ONG,...). Son rôle est de fournir un avis sur l'adéquation entre les activités en cours et les besoins, ainsi que sur l'impact des activités du métaprogramme pour les porteurs d'enjeu. Il a plus spécifiquement pour mission de contribuer au déploiement des activités du métaprogramme et à l'évolution de celui-ci par la co-construction de propositions et de priorités pour la mise en place d'actions, l'élaboration de l'agenda stratégique du métaprogramme, et la fourniture d'avis sur la mise en œuvre de cet agenda, notamment en matière de formation et de transfert.

Un enjeu : contribuer au développement d'outils pour accompagner l'adaptation

Le changement climatique a suscité l'apparition d'un ensemble de nouveaux services, appelés services pour l'adaptation, au cœur desquels le métaprogramme ACCAF veut être acteur. Il existe d'ores et déjà un marché économique et des acteurs spécialisés (bureaux d'étude, fondations, compagnies d'assurances), qui proposent de nombreux services émergents, notamment de scénarisation et d'évaluation des impacts. Le métaprogramme ACCAF souhaite enrichir cette offre grâce à la création d'un portefeuille

LES HUIT MÉTAPROGRAMMES DE L'INRA

- ▶ **ACCAF** : Adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt
(Coordinateur : *Thierry Caquet*) www.accaf.inra.fr
- ▶ **DIDIT** : Déterminants et impact de la diète, interactions et transitions
(Coordinateur : *Jean Dallongeville*) www.didit.inra.fr
- ▶ **EcoServ** : Services écosystémiques
(Coordinateur : *Guy Richard*)
- ▶ **GISA** : Gestion intégrée de la santé des animaux
(Coordinateur : *Thierry Pineau*) www.gisa.inra.fr
- ▶ **GloFoods** : Transitions pour la sécurité alimentaire mondiale
(Coordinateur : *Alban Thomas*)
- ▶ **MEM** : Méta-omiques des écosystèmes microbiens
(Coordinateur : *Emmanuelle Maguin*) www.mem.inra.fr
- ▶ **SelGen** : Sélection génomique
(Coordinateur : *Denis Milan*) www.selgen.inra.fr
- ▶ **SMaCH** : Gestion durable de la santé des cultures
(Coordinateur : *Christian Lannou*) www.smach.inra.fr

CHIFFRES CLÉS ACCAF



Un budget d'environ **5** million d'euros par an, incluant les frais opérationnels et les salaires (2014).



25 projets soutenus, impliquant **95** unités et plus de **300** chercheurs Inra (2014).



12 départements scientifiques Inra impliqués: Biologie et amélioration des Plantes, Caractérisation et élaboration des produits issus de l'agriculture, Écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques, Environnement et agronomie, Génétique animale, Mathématiques et informatique appliquées, Microbiologie et chaîne alimentaire, Physiologie animale et systèmes d'élevage, Santé animale, Santé des plantes et environnement, Sciences pour l'action et le développement, Sciences sociales, agriculture et alimentation, espace et environnement.

de services à l'échelle nationale à différents horizons temporels selon les filières, reposant sur des outils, des cartes ou des graphiques issus de chaînes de modélisation agro-hydroclimatique. Le projet de portefeuille de services ACCAF entend donner forme à un portail générique permettant à des utilisateurs publics et scientifiques de tester des options d'adaptation. Ce portail a pour objectif à la fois de quantifier les impacts des évolutions du climat et des pratiques sur

les flux et rendements, mais il pourra aussi proposer des indicateurs des systèmes permettant à terme d'évaluer l'efficacité des mesures d'adaptation. À partir d'une chaîne de modélisation, le portefeuille balayera différents éléments, du climat à la ressource en eau, en intégrant les activités agricoles ou sylvicoles et leurs liens avec le climat, l'irrigation et le niveau des nappes. Il s'agit de développer des outils d'aide à la gestion intégrée et partagée de l'eau et à l'adaptation au



L'agroforesterie, comme ici cette parcelle blé-noyers, est l'une des pistes pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique, actuellement explorée sous toutes les latitudes.

Christian Dubraz/MIRA

changement climatique de l'agriculture et de la forêt dans les territoires, les bassins versants ou le territoire métropolitain (gestion adaptative et adaptation stratégique).

Cette chaîne de modélisation et le portefeuille de services devra répondre aux attentes diversifiées des porteurs d'enjeux qui doivent raisonner, planifier et anticiper des évolutions des systèmes de cultures, de la composition, de la productivité et de la santé des cultures et forêts, de leurs modes de gestion, des usages des sols et des eaux, et donc arbitrer entre différentes orientations.

Ce projet s'inscrit dans les feuilles de route des initiatives européennes de programmation conjointe sur l'eau et sur le climat et répond aux ambitions de la Communauté européenne

pour l'Innovation et la connaissance sur le climat.

Une dimension internationale indispensable

Le métaprogramme ACCAF s'insère également pleinement dans l'initiative européenne de programmation conjointe «Agriculture, sécurité alimentaire et changement climatique», initiée par la France et le Royaume-Uni, qui vise à coordonner les programmes nationaux de recherche. Au-delà de la rationalisation des

efforts de recherche entre états-membres, la dimension européenne constitue aussi souvent la bonne échelle d'analyse pour comprendre les phénomènes et couvrir une diversité de climat et de sols. En effet, certains processus comme les flux de gènes, la migration des espèces ou la progression des bioagresseurs nécessitent de disposer de données à grande échelle spatiale. Les partenariats internationaux fournissent aussi une vision prédictive intéressante. On sait par exemple que le climat méditerranéen aura tendance à s'étendre vers le Nord et l'Ouest. Les études sur ce climat peuvent donc nous permettre d'anticiper les futures conditions de cultures et les capacités d'adaptation dans certaines régions françaises. Il est aussi indispensable d'intensifier les partenariats afin notamment de valoriser tous les réseaux d'observatoires environnementaux sur le long terme présents en Europe et dans le monde. Dans ce contexte, le métaprogramme soutient diverses initiatives au niveau européen, sous la forme d'une contribution financière à certains programmes multilatéraux de type ERA-NETs. Les projets soutenus ont aussi parfois une dimension internationale (coopération avec l'Inde ou les pays du sud de la Méditerranée par exemple) ou mondiale (approches de modélisation ensembliste appliquée aux cultures). Compte tenu de l'ampleur des enjeux, la coopération internationale est, avec la pluridisciplinarité, l'un des enjeux majeurs de la recherche scientifique dans ce domaine.

Bibliographie

- N. Brisson, F. Levrault (ed.), *Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*. Ademe, 2010.
 FAO, *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*. FAO, 2013.
 J.-F. Soussana (coord.), *S'adapter au changement climatique, Agriculture, écosystèmes et territoires*, Quae, 2013.

POUR LA
SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Directrice des rédactions

Cécile Lestienne

Fabrication

Marianne Sigogne
 et Olivier Lacam

Directrice de la publication et Gérante

Sylvie Marcé

Publicité France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
 (jf.guillot@pourlascience.fr) Tél. : 01 55 42 84 28

Réalisation

Françoise Pétry (édition), Pauline Bilbault (maquette)

Ont également contribué à ce cahier spécial

Thierry Caquet, Jean-Marc Guehl,
 Barbara Lacor et Anne Jambois

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE DE L'ACTUALITÉ SCIENTIFIQUE POUR 1€* !



www.pourlascience.fr/testerlemagazine

**Offre spéciale incluant le 1er numéro au prix de 1 € puis les suivants au prix de 4,66 € par mois. Offre d'abonnement réservée aux nouveaux abonnés, sans engagement de durée et résiliable sur simple demande auprès de notre service abonnement.*



■ POUR LA
SCIENCE

