

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.

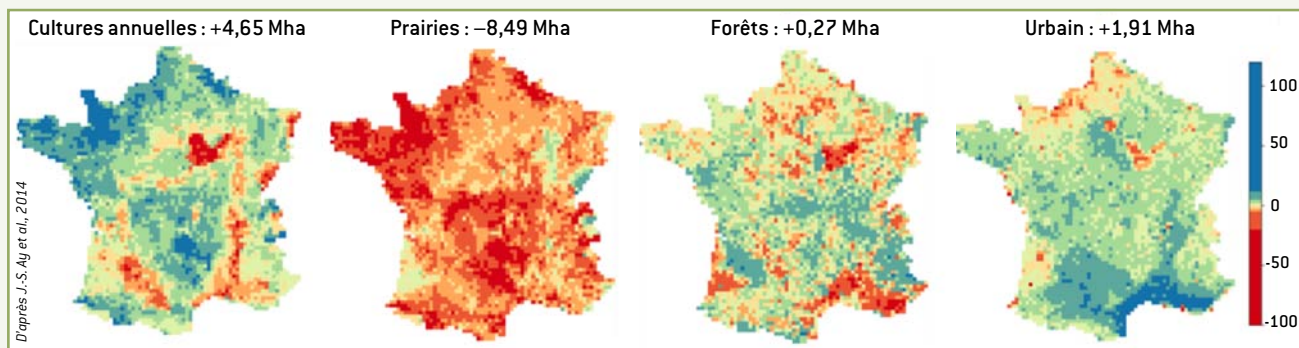
Le calcul de ces quantités de carbone libéré, combiné au bilan des biocarburants, est complexe et confronté à des incertitudes. Il fait appel à divers modèles, notamment économiques. Les différentes estimations de ces émissions réalisées à travers le monde sont variables, et le bilan en termes de gaz 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'adaptent 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 climatique 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 intergouvernemental sur le climat, le GIEC, sera publié le 30 mars 2014. Il sera consacré aux impacts du changement climatique, aux adaptations possibles et à la vulnérabilité des systèmes et des populations humaines exposées. En attendant cette publication, revenons, au terme de ce dossier, 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

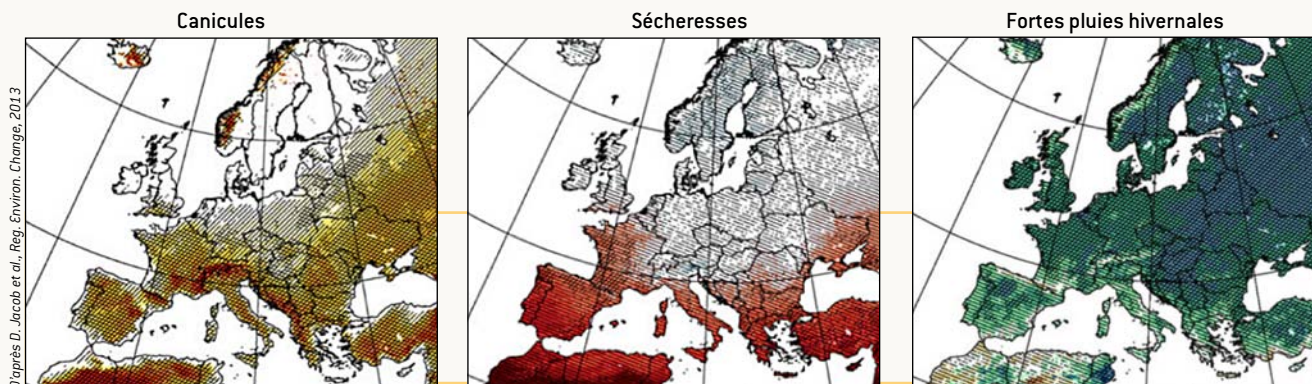
risques du changement climatique dans un tel scénario seront amplifiés par les rétroactions entre les ressources en eau et en sols, la végétation et le climat à l'échelle régionale. Des sécheresses et des canicules fréquentes réduisent la productivité des écosystèmes et des cultures, ce qui limite l'apport 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.





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 ci-contre). 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 [sous la direction de], *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.

LOGIQUE & CALCUL

Les preuves de travail

Donner à des ordinateurs des problèmes à résoudre permet de les freiner. Cette procédure est utile pour lutter contre les attaques sur le réseau Internet, pour limiter l'envoi de spams ou pour organiser des courses entre machines.

Jean-Paul DELAHAYE

Aujourd'hui, les ordinateurs qui sont à notre disposition sont très puissants et nous nous en réjouissons, car cela les rend plus utiles : ils manipulent de longs textes, des photos ou même de la vidéo, ils explorent rapidement des pages Internet à l'autre bout du monde, ils exécutent des programmes de jeux aux effets graphiques époustouflants, etc.

Cependant, cette puissance est parfois mal utilisée et crée des dysfonctionnements. Ainsi, n'importe qui peut envoyer des dizaines de milliers de messages électroniques qui encombrer les boîtes aux lettres au point de les rendre inutilisables : c'est le problème des courriels non sollicités, ou spams. Par ailleurs, quelques ordinateurs coordonnés sont en mesure de soumettre, plusieurs milliers de fois par seconde, des requêtes à un même service en ligne et ainsi d'en empêcher le fonctionnement : ce sont les attaques par « déni de service » ou DoS [pour *Denial of Service*].

Une idée étonnante a été proposée pour contrôler les effets de cet excès de puissance de nos machines. Il s'agit de soumettre aux ordinateurs des problèmes à résoudre, afin qu'ils calculent longuement pour trouver la solution ; alors seulement, ces ordinateurs ont le droit d'accéder à une boîte à lettres ou à un service informatique en ligne.

Ces « preuves de travail » jouent un rôle de plus en plus important. Elles sont combinées aux outils de base de la cryptographie

moderne (chiffrement, signature numérique, authentification, etc.) pour concevoir des protocoles complexes réalisant des opérations considérées comme impossibles il y a peu. Les monnaies numériques décentralisées, dont le célèbre et controversé *Bitcoin*, fonctionnent toutes selon un protocole où les « preuves de travail » jouent un rôle essentiel. Nous y reviendrons.

Ces preuves de travail sont toujours des problèmes dont la solution est difficile à trouver, mais facile à vérifier. L'ordinateur qui doit résoudre le problème soumis ne peut le faire rapidement, mais quand il propose une solution pour accéder au service qui l'exige, la vérification de la solution est immédiate. Il existe de nombreuses méthodes pour fabriquer les problèmes des preuves de travail. On préfère bien sûr celles dont il est facile d'ajuster la difficulté à la situation, pour que le temps de résolution ne soit ni trop court ni trop long.

Des preuves avec ou sans échanges de messages

Deux types de preuves de travail sont utilisés : les systèmes fonctionnant par échanges multiples de messages et les systèmes à un seul envoi.

Dans le cas des « preuves de travail par échanges multiples », voici les étapes du protocole. La machine D (pour *Demandeur*) qui souhaite accéder au service S le contacte ; le service S élabore un problème

et l'envoie à D ; la difficulté du problème est ajustée en prenant par exemple en compte la surcharge du service S à l'instant de la demande, ou ce que S sait déjà de D ; la machine D résout le problème, ce qui exige d'elle un certain travail, donc du temps ; quand D a résolu le problème, il envoie la solution au service S ; le service S vérifie que la solution soumise est bonne, ce qui est facile pour lui, et, si c'est le cas, donne accès au service, c'est-à-dire accepte de placer un message dans la boîte à lettres, ou ouvre la page d'accueil du service en ligne que demande D.

Dans le cas du protocole des « preuves de travail sans échange », tout se passe au cours d'un seul envoi. Selon des paramètres que le demandeur D connaît sans avoir à contacter le service S, un problème à résoudre est défini. La façon de le définir est fixée une fois pour toutes et connue d'avance. Le contenu du message que D veut envoyer détermine par exemple le problème (et donc le problème à résoudre change à chaque demande, ce qui est évidemment essentiel). Le demandeur D connaît donc, sans contacter le service S, le travail qu'il doit réaliser. Quand D a résolu le problème, ce qui lui prend un peu de temps, il envoie la solution trouvée au service S qui ne donne suite à sa demande que si la solution proposée est correcte.

La seconde méthode est souvent préférable : elle est plus simple pour le service qui n'a pas à s'occuper de définir un pro-