

Impact agronomique et sylvicole du changement climatique

Emmanuel Cloppet

Météo-France - Direction de la production
42, avenue Gaspard-Coriolis - 31057 Toulouse Cedex 01
emmanuel.cloppet@meteo.fr

Résumé

Les interrogations sont nombreuses au sujet de l'impact du changement climatique sur l'agriculture, alors que les enjeux sont immenses. La réponse des agrosystèmes devrait fortement varier en fonction des variétés et des régions. Pour la sylviculture, une tendance à la hausse de la production se dégage nettement. Il apparaît aussi que la réponse est très inégale entre les pays des latitudes moyennes ou élevées et ceux des régions tropicales. Ces derniers sont à priori ceux qui souffriront le plus de l'impact d'un changement climatique sur leur agriculture. Cependant, il ressort à terme que les capacités d'anticipation et d'adaptation devraient primer sur la réponse des écosystèmes.

Abstract

Assessing the response of agriculture and forestry to climate change

Many uncertainties remain regarding the agricultural consequences of climate change. It seems obvious that any significant change in climate on a global scale should impact agriculture and world's food supply. However there is a strong uncertainty regarding the response of agroecosystems. Primary production of forests should keep on rising. Responses should be very different between mid-latitude countries and tropical ones; in the latter, where food production is still precarious, climate change should be most damaging. However, adaptive policies would, in general, reduce these impacts.

Les enjeux

Des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années dans la compréhension de l'impact potentiel d'un changement climatique sur la production agricole et les ressources forestières. L'objectif de cet article est de dégager les principales tendances admises à l'heure actuelle, mais aussi de pointer les zones d'ombre et les perspectives d'anticipation et d'adaptation. Les enjeux sont colossaux. Tout d'abord, l'agriculture et la sylviculture façonnent une grande part des paysages de notre planète, étant donné que les **agrosystèmes** et les **écosystèmes** forestiers (encadré ci-contre) couvrent 41 % des terres émergées (Houghton, 1990). Ensuite, au-delà du poids économique du secteur agricole dans son ensemble, en y incluant les activités en amont telles que l'industrie phytosanitaire et, en aval, l'ensemble de l'industrie agroalimentaire, ce sont la suffisance alimentaire et la sécurité des marchés qui sont en jeu. Dans les pays les plus démunis, nourrir les hommes reste et restera encore au XXI^e siècle un défi. L'agriculture étant le secteur d'activité le plus dépendant qui soit du climat, l'impact d'un changement climatique est devenu une problématique majeure qui va bien au-delà du cadre scientifique.

Champ de blé. Une très faible proportion des végétaux et des animaux a été domestiquée et sert à nourrir l'homme. Les trois grandes céréales, le blé, le maïs et le riz, fournissent la moitié des calories alimentaires consommées sur la planète. L'adaptation des variétés cultivées aux nouvelles potentialités agroclimatiques est un défi majeur.
(Photo Météo-France)

Écosystèmes, pathosystèmes et agrosystèmes

Le terme d'écosystème définit de manière générale un milieu naturel. Il s'agit de l'unité fondamentale d'étude de l'écologie, qui comprend l'environnement physique, les espèces vivantes et les interactions qui les unissent.

Le pathosystème se compose de la plante et du pathogène, qui sont en constante interaction.

Enfin, l'agrosystème est un écosystème particulier organisé par l'homme pour répondre à des objectifs économiques ou écologiques (ce peut être une exploitation agricole, une forêt exploitée...). Il est intéressant de noter que l'agrosystème est un système dont l'équilibre est par nature instable, car mis en place à travers la destruction des équilibres naturels.



À ce titre, l'intérêt de la compréhension et de la prévision de l'impact d'un changement climatique sur le couvert végétal est double. Cela permet d'anticiper la réponse des écosystèmes agricoles et forestiers, mais aussi, le cas échéant, d'en prévenir les impacts négatifs par le biais d'adaptations, à moyen ou à long terme. Par la suite, il sera nécessaire de distinguer d'un point de vue méthodologique les cultures annuelles et les cultures pérennes (en y incluant la sylviculture). En effet, les mécanismes d'adaptation à un environnement changeant sont de nature différente. Ils reposent pour les cultures annuelles sur les possibilités de migrations des écosystèmes, l'introduction de nouvelles variétés ou la généralisation de nouvelles pratiques culturales. En ce qui concerne les cultures pérennes, formant des écosystèmes de forte longévité, leur capacité d'adaptation à des changements de leur biotope est faible et repose essentiellement sur leur plasticité phénotypique, c'est-à-dire la capacité du végétal à adapter sa phénologie (encadré ci-dessous) – manifestation visible du développement – aux nouvelles conditions.

La phénologie

La phénologie est la science qui étudie les phénomènes périodiques des plantes, le cycle annuel des végétaux se décrivant à partir des différents stades phénologiques définis afin de jalonner de manière sûre le développement du couvert (débourement des bourgeons, floraison, chute des feuilles...). La phénologie a connu un nouvel essor dans les années 1990 grâce à la problématique du réchauffement planétaire (Chuine, 1998).

Changement climatique et obstacles méthodologiques

Les activités humaines ont modifié de manière sensible la composition chimique de l'atmosphère depuis le milieu du XIX^e siècle. La perturbation de l'équilibre radiatif a comme conséquence l'augmentation de la température de la surface de la planète (+0,6 °C sur le XX^e siècle, selon le Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique ou **Giec**⁽¹⁾). Cette modification du climat et de la composition de l'atmosphère peut affecter l'ensemble des processus de la biosphère terrestre. Il est

impossible d'évaluer directement a priori l'impact d'un changement climatique, ne serait-ce que de manière qualitative. En effet, certains paramètres ont indéniablement un impact positif. Par exemple, une augmentation de la concentration du CO₂ associée à un climat plus chaud favorise la production de matière sèche, étant donné que le CO₂, au-delà de son impact sur le climat en tant que gaz à effet de serre, a une influence directe sur l'activité photosynthétique des plantes en tant que source de carbone. En revanche, la température pourrait avoir aussi comme effet de réduire la durée de la période de végétation, et la tendance des scénarios climatiques à accentuer les déficits de précipitations dans certaines parties du globe suggère une augmentation du stress hydrique. C'est pourquoi la modélisation du fonctionnement des couverts est une approche nécessaire afin d'intégrer les différents effets climatiques et les influences biotiques et ainsi de pouvoir dégager une réponse des écosystèmes.

Afin de répondre à cette problématique, les modèles les plus sophistiqués sont les modèles dynamiques simulant et intégrant l'écophysiologie des parties aériennes des plantes (croissance aérienne, élaboration du rendement), le fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines des plantes (croissance racinaire, bilan hydrique, bilan azoté, transferts en eau, en nitrates...) et la gestion des interactions entre les techniques culturales et le système sol-culture. Étant donné que les modèles de simulation des cultures ont été conçus, en règle générale, afin de répondre à des problématiques à l'échelle de la parcelle agricole, leur utilisation à l'échelle régionale afin d'évaluer l'impact d'un changement climatique nécessite l'agrégation des résultats (Hogenboom, 2000). Ce type d'applications nécessite un volume de données d'entrée important afin de tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle du paramètre étudié. Les bases de données (bases de données sol, inventaires, données météorologiques...) et les systèmes d'information géographique sont des outils indispensables pour la mise en œuvre de telles applications (Pérarnaud et al., 2002). Le couplage avec des scénarios climatiques issus des modèles de circulation générale permet alors la modélisation des impacts d'une modification climatique.

Il faut cependant souligner la difficulté d'interprétation des résultats obtenus. En effet, étudier l'impact d'une variable (le climat) suppose que les autres variables

soient constantes. Or, étudier l'impact d'un changement climatique en considérant les autres facteurs inchangés est irréaliste. C'est pourquoi l'adaptation, à l'échelle de l'exploitation agricole ou du territoire, est un facteur essentiel à prendre en compte. L'agriculteur lui-même adapte le choix de ses variétés, de son calendrier culturel et de son itinéraire technique aux conditions annuelles ou pluriannuelles. À terme, on peut supposer une migration des systèmes de production et la possibilité d'introduction de nouvelles cultures en réponse à la nouvelle donne climatique, mais une telle approche est complexe à mener. De plus, comment appréhender la réponse des variétés futures ? L'amélioration constante des variétés et leur adaptation très probable aux nouvelles potentialités agroclimatiques rendent très délicates les prévisions de rendement à une échéance de plusieurs décennies (l'industrie génétique est d'ailleurs déjà capable d'intervenir sur l'efficacité d'absorption du carbone de plants génétiquement modifiés). Enfin, le poids des critères économiques est souvent sous-estimé dans de telles études. À titre d'exemple, les critères de rentabilité ont un grand poids dans le choix des cultures au sein des pays à économie de marché, et il est très difficile d'émettre des projections sur l'évolution générale de la conjoncture agricole mondiale.

Quel impact sur les cultures annuelles ?

Une grande variabilité

Ces dernières années, de nombreuses études ont été menées afin de modéliser la réponse des principales cultures annuelles dans le monde. Selon les études, les espèces, les variétés, le scénario climatique ou la région du globe, les tendances sont extrêmement variables. Cela est illustré ici par une synthèse des résultats de différents travaux menés sur les grandes cultures céréalières, le riz, le blé et le maïs, extraite du troisième rapport d'évaluation du Giec (figure 1).

(1) Le Giec est un organisme créé conjointement par l'OMM et le Programme pour l'environnement des Nations unies, avec pour mission d'« expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le risque de changement climatique provoqué par l'homme ».

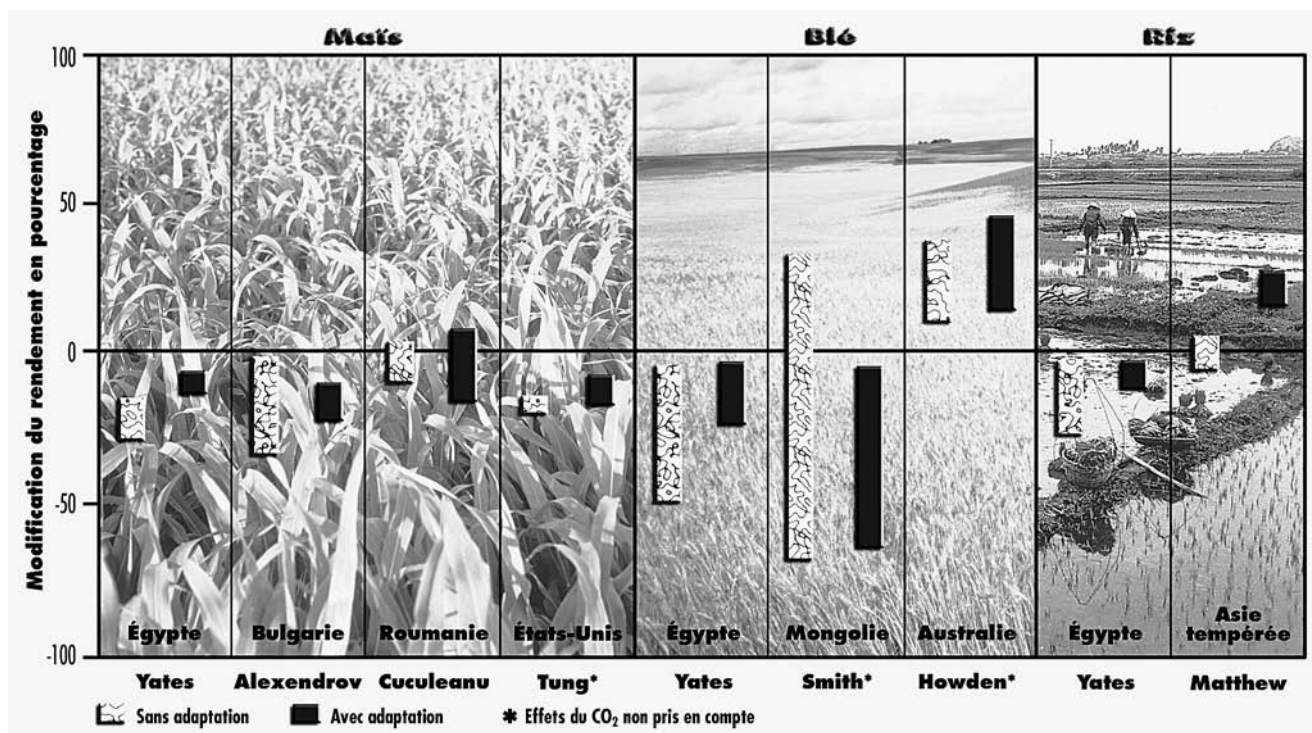


Figure 1 - Synthèse de l'impact d'un changement climatique sur le rendement des trois grandes céréales (Giec, 2001). Les échelles de pourcentage des modifications du rendement des cultures couvrent les scénarios de changements climatiques choisis – avec et sans adaptation agronomique – de différentes études. En abscisse, le nom de l'auteur principal est donné. Chaque paire d'échelles correspond à un lieu géographique et un type de culture. La variabilité au sein des différentes études provient de l'utilisation de plusieurs scénarios climatiques.

On observe des fortes variations du rendement simulé en fonction du continent. Pour le blé par exemple, l'impact sur le rendement varie entre -70 % en Mongolie et +30 % en Australie. De même, les résultats diffèrent en fonction de l'espèce. L'impact est toujours négatif en ce qui concerne le maïs, mais par contre est occasionnellement positif pour le blé. Sans surprise, l'adaptation agronomique limite la baisse de rendement et accentue en général les gains. Le principal enseignement reste cepen-

dan t l'énorme variabilité des tendances espérées. Les études réalisées en France sur les grandes cultures ne contredisent pas ces conclusions. Les résultats obtenus à l'aide des modèles de culture Ceres et Stics (modèles qui simulent les cycles de croissance des plantes en tenant compte de paramètres biologiques et environnementaux) permettent de conclure à des effets légèrement positifs sur le blé (augmentations de rendement allant de 2,5 % à 5,7 %) et à des effets plus variables sur le maïs

(entre -16 % et +10 %) (Delecolle et al., 1999). Les effets varient en fonction de la région et surtout de la disponibilité en eau, cruciale dans la réponse. Cela devrait s'accompagner d'une amélioration de l'efficacité de l'eau, avec une réduction simulée de la consommation en eau allant de 0 à 16 %.

Un avantage compétitif pour les C3

Deux grands types de plantes composent la quasi-totalité du règne végétal, les plantes en C3 et les plantes en C4 (encadré ci-contre). Cette distinction fait référence à deux mécanismes de photosynthèse différents (différence d'ordre biochimique au niveau du cycle d'absorption du carbone). Les plantes en C3 comprennent la majorité des espèces de la planète, surtout dans les habitats tempérés et humides, et la plupart des cultures telles que le blé, le riz, l'orge, le manioc et la pomme de terre. Les plantes en C4 englobent des cultures tropicales telles que le maïs, la canne à sucre, le sorgho et le millet, qui sont importantes pour la sécurité alimentaire de nombreux pays en développement, ainsi que des graminées de pâturage et de fourrage. Ces plantes sont recherchées pour l'agriculture vu leur productivité élevée et leur efficacité pour la fixation du CO₂.

Plantes en C3, plantes en C4

Le terme de photosynthèse désigne la capacité des végétaux chlorophylliens à assimiler le dioxyde de carbone à l'aide de l'énergie lumineuse afin de synthétiser des substances organiques. Si toutes les plantes absorbent du CO₂, elles ne l'utilisent pas toutes de la même manière. Deux mécanismes de photosynthèse permettent l'assimilation du carbone pour la très grande majorité des plantes. Ce sont les voies en C3 et en C4.

Les plantes dites en C3 fixent le CO₂ sur un composé à 5 atomes de carbone pour former 2 molécules à 3 atomes de carbone, d'où leur nom. La fixation du CO₂ est catalysée par une protéine (enzyme), la rubisco. Ces deux molécules en C3 sont ensuite unies pour donner un glucose en C6. Les plantes possédant le mécanisme en C3 représentent environ 85 % de l'ensemble des espèces végétales et comprennent tous les arbres et toutes les plantes ligneuses.

Les plantes dites en C4 captent le CO₂ pour former une molécule à 4 atomes de carbone. Cette réaction a lieu uniquement dans la partie profonde de leurs feuilles. Le composé en C4 est transporté dans un autre compartiment de la feuille où du CO₂ sera alors libéré par une réaction chimique pour être refixé et utilisé comme chez les plantes en C3. Ce type de photosynthèse requiert cependant des températures et une intensité lumineuse plus élevées que la photosynthèse en C3. Cela explique que les plantes en C4 ont pour la plupart une origine tropicale (maïs, canne à sucre, sorgho, millet...).

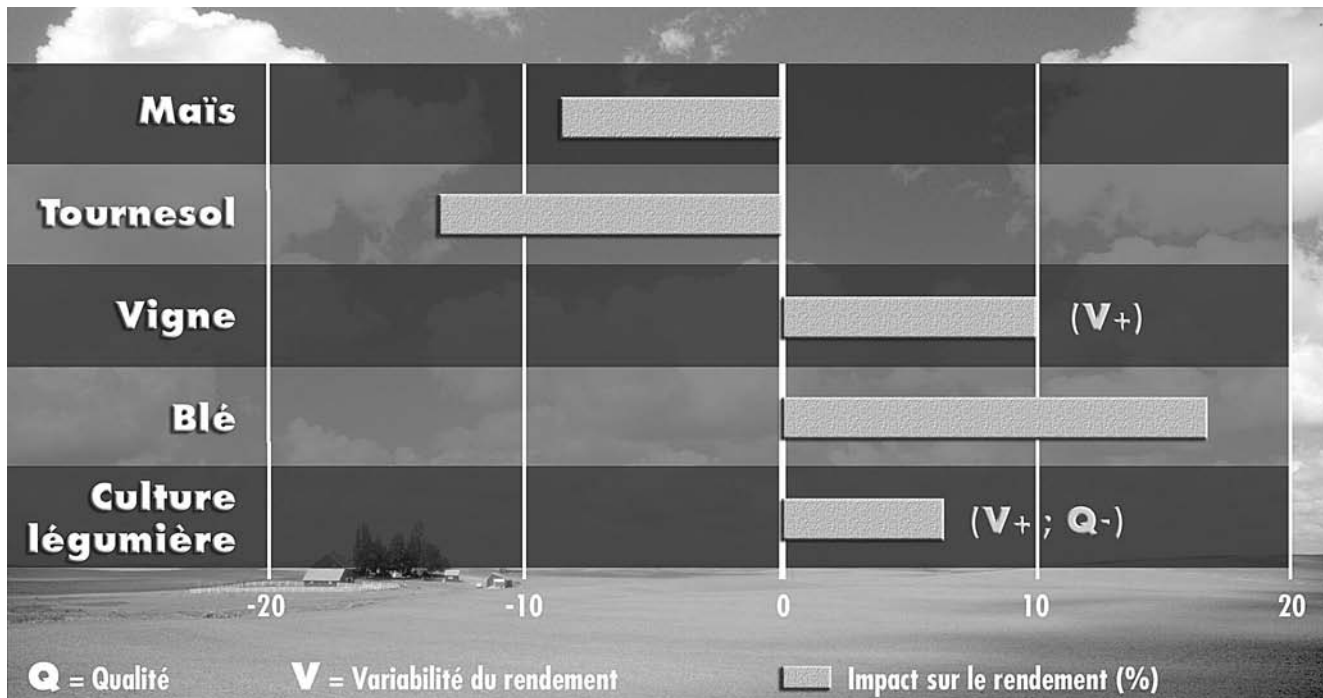


Figure 2 - Tendence modélisée du rendement de plusieurs espèces végétales sur l'Europe. Comparaison période actuelle et période 2066-2075 (Harrison et Butterfield, 1995). Les données climatiques sont issues du modèle du Met Office pour un taux de CO₂ atteignant 617 ppm.

Les modèles font apparaître une réponse inégale entre les plantes en C3 et les plantes en C4. La figure 2 illustre pour l'Europe les réponses différentes de ces deux types de plantes. Deux groupes s'individualisent nettement : le maïs et le tournesol (C4) ont une tendance à la baisse, alors que la vigne, le blé et les cultures légumières (C3) présentent un rendement en hausse.

En effet, à la concentration actuelle de CO₂, les plantes en C4 ont une meilleure efficacité d'utilisation du gaz carbonique que les plantes en C3. L'augmentation du taux de CO₂ (effet direct) aura dès lors pour ces plantes un impact certes positif, mais beaucoup plus faible que pour les plantes en C3, dont le potentiel de gain est nettement supérieur. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, il est bien établi qu'un changement climatique (combinant effet direct du CO₂ et impact de la modification du climat) se traduira par un avantage compétitif pour les plantes en C3.

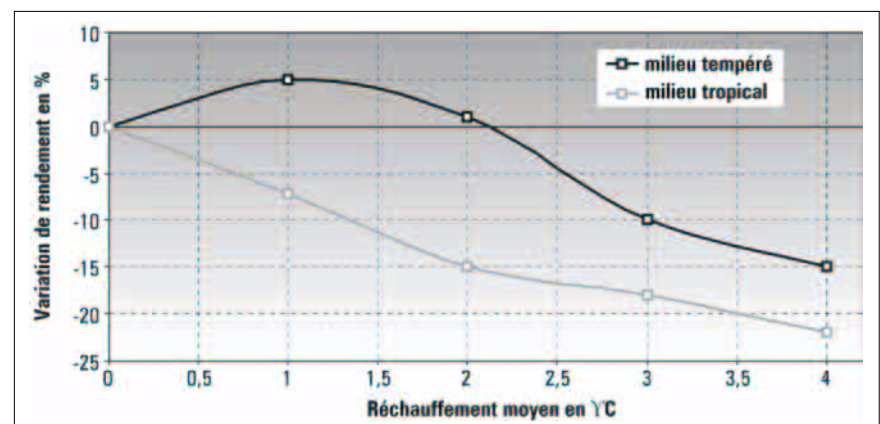
Vers un déséquilibre croissant Nord-Sud ?

Une tendance également admise est la réponse différente des agrosystèmes des régions tempérées et tropicales. À chaque espèce, correspond une température optimale de croissance (en l'absence d'autre stress). Plus la variété est

actuellement loin de son optimum thermique, plus l'impact du changement climatique sera positif. Il est relativement bien établi que les rendements des cultures tempérées, en l'absence d'adaptation, tolèrent un réchauffement de 2 à 3 degrés avant de décliner, alors que les rendements des cultures tropicales déclinent immédiatement (Easterling et App, 2002). Ce phénomène est bien illustré par la figure 3. La tendance devient négative pour un réchauffement bien plus faible dans les régions tropicales que dans les régions tempérées. Par exemple, pour le maïs, l'impact est nul en milieu tempéré pour un réchauffement de l'ordre de 2,2 °C. Pour un réchauffement équivalent, la tendance est de -16 % en milieu tropical.

À ce phénomène s'ajoute le fait que les plantes en C4 sont cultivées majoritairement en zone tropicale. L'impact d'un réchauffement étant beaucoup plus néfaste pour ce type de plantes, cela renforce donc le déséquilibre potentiel d'impact entre les régions tempérées et tropicales. Enfin, ce sont souvent les pays des régions tropicales et équatoriales qui présentent le potentiel d'adaptation le plus faible, car il dépend aussi énormément des ressources disponibles et de la présence d'institutions stables (source Giec). L'adaptation risque de s'y limiter à des mesures peu coûteuses à l'échelle des exploitations (modification des dates de semis ou des variétés). Cependant, dans les zones où domine l'agriculture

Figure 3 - Variation simulée du rendement des cultures de maïs en fonction de l'augmentation moyenne de la température (troisième rapport du Giec, chapitre 5.3). Les études incluent les effets directs du CO₂, une anomalie positive des précipitations et font l'hypothèse de non-adaptation.



non irriguée, le développement d'infrastructures d'irrigation pourrait permettre de réduire un éventuel impact négatif (Pérarnaud et al., 2002). Les études de ce type s'appuyant sur des modèles liés économie-culture sont encore très peu nombreuses. Toutefois, ces tendances convergent pour conclure à un renforcement très probable des déséquilibres en termes de potentiel agronomique entre les pays des zones tempérées et ceux des zones tropicales, du moins sans réelles modifications des politiques de transfert technologique entre pays.

Une problématique différente pour les cultures pérennes

Les enjeux et les voies d'adaptation sont tout à fait différents en ce qui concerne les cultures pérennes. C'est pourquoi l'arboriculture et la sylviculture sont traitées séparément. Soulignons également que les cultures pérennes ont un poids particulièrement important dans les pays tropicaux (cacaoculture, caféiculture, hévéaculture, sans oublier la culture du palmier à huile ou du cocotier). Dans certains pays, la balance commerciale repose même pour une part importante sur une monoculture.

Phénologie et arboriculture

Le changement climatique a tout d'abord un impact sur la phénologie des cultures pérennes. Si la modélisation de la phénologie est une étape indispensable afin d'estimer l'impact d'un réchauffement global sur la dynamique de la forêt tempérée ou pour affiner les modèles de production primaire (Cloppet, 2002), l'analyse des modifications induites sur la floraison et la maturation des fruits est aussi un domaine d'étude pour lequel convergent les intérêts scientifiques et économiques. En effet, une exposition plus ou moins longue selon les espèces à



Cocotiers. Les cultures pérennes sont d'une importance majeure pour de nombreux pays en développement. (Photo Météo-France)

La dormance et le débourrement

La dormance est définie comme l'incapacité d'un bourgeon à croître lorsque toutes les conditions d'environnement sont favorables. Le débourrement est la phase d'éclosion des bourgeons pour une plante, et on considère que la dormance est levée lorsque 100 % des bourgeons ont pu débourrer. Cependant, une exposition plus ou moins longue selon les espèces à des températures basses (comprises entre -5 °C et +5 °C) est nécessaire pour lever la dormance des bourgeons. Pour les cultures annuelles, l'équivalent existe et prend le nom de vernalisation. Un réchauffement pourrait donc se traduire par une non-éclosion des bourgeons au sein des vergers.

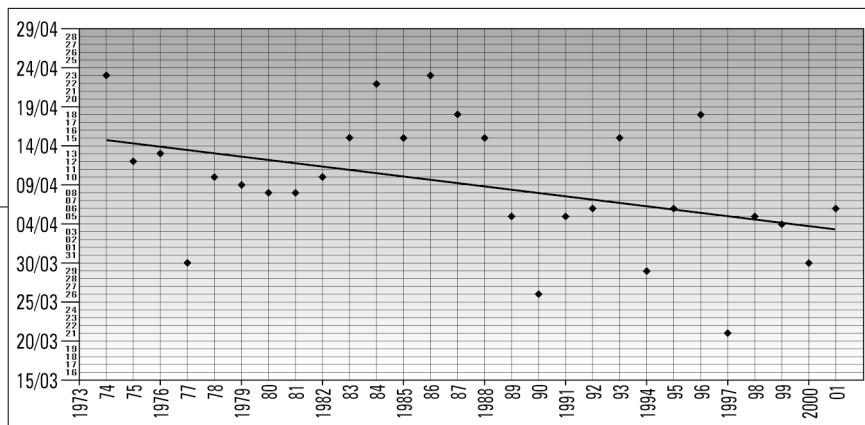
comme conséquence une inhibition du **débourrement** (encadré ci-contre) des bourgeons, pouvant conduire à des chutes ou à des nécroses florales. Ce phénomène pourrait se traduire à terme par des déplacements de vergers, voire même de régions arboricoles entières, alors que l'on note actuellement une tendance à un débourrement et une floraison plus précoces (figure 4). La non-linéarité de la réponse du débourrement au climat se traduirait alors par une brusque inversion de tendance. De nombreuses études sont actuellement en cours afin de comprendre et anticiper ce phénomène.

Vers une augmentation de la biomasse

Au sein de la biosphère continentale, les forêts occupent une place à part, à la fois au titre de leur effet sur le climat et de leur vulnérabilité à un changement climatique. Il existe une forte interaction entre le climat et les forêts : celles-ci

des températures basses est nécessaire pour lever la **dormance** (encadré ci-dessous) des bourgeons et ainsi permettre leur éclosion. Un réchauffement de grande échelle pourrait donc avoir

Figure 4 - Évolution des dates de floraison du pommier (variété *Golden delicious*) dans le sud-est de la France (Balandran) sur la période 1974-2001 (Domergue, 2001). Les points correspondent aux observations. La droite est une droite de régression ($R^2 = 0,18$). On constate la tendance à une avancée significative des dates de floraison, mais le poids de la variabilité climatique interannuelle reste important.



ont un fort impact sur le cycle de l'eau (évapotranspiration), le bilan énergétique (via l'albédo et la rugosité de surface) et surtout sur le cycle du carbone. Elles renferment plus de la moitié (57 %) du carbone de la biosphère (Loustau, com. pers.). De plus, étant donné la longévité des peuplements, il est nécessaire d'intégrer dès maintenant le climat à venir dans les schémas de gestion sylvicole. L'augmentation de la productivité des forêts est un phénomène bien connu des forestiers à l'heure actuelle. Cependant, cette réponse positive des peuplements forestiers à la légère hausse des températures ne peut être extrapolée au cas d'un réchauffement de grande ampleur du fait de la non-linéarité de la courbe de réponse. Là encore, la modélisation est un outil nécessaire. Si de nombreuses études concluent à une hausse de la production primaire (stockage de carbone) sous les effets conjugués de la hausse de la température et de la concentration de CO₂, il existe des incertitudes vis-à-vis des modifications du régime hydrique et de l'impact de ces modifications sur la croissance.

Cela peut être illustré par une étude effectuée dans le cadre du projet de recherche Carbofor, réalisé en collaboration entre l'Inra, l'IFN (Inventaire forestier national), le CNRS, Météo-France, le Cirad (Centre de coopération internationale sur la recherche agronomique pour le développement) et le CEA. Elle met en évidence l'apport de la modélisation de la croissance forestière pour la forêt des

Landes de Gascogne (figure 5). L'étude a été réalisée à l'aide du scénario climatique Arpege-Climat, suivant le scénario B2 du Giec (encadré ci-contre). Sont comparées les périodes 1961-1990 et 2070-2099 (passage de 320 à 570 ppm). Le modèle inclut des contraintes hydriques qui limitent la croissance par le biais de la diminution du contenu moyen en eau du sol et de l'augmentation du déficit moyen de l'air en vapeur d'eau. Malgré l'augmentation moyenne entre les deux périodes du CO₂ (250 ppm) et de la température (entre 2 et 2,5 °C sur les températures moyennes), l'effet négatif de la hausse du stress hydrique est localement prépondérant (entre -30 et -60 mm durant la période estivale sur les Landes). Le modèle indique des baisses de production qui peuvent atteindre 8 m³.ha⁻¹.an⁻¹, soit 30 % (figure 5a). Si l'on retire du modèle les contraintes hydriques (figure non montrée), la tendance devient alors nettement positive (entre +4 et +12 m³.ha⁻¹.an⁻¹). On voit d'autre part (figure 5b) qu'une fertilisation optimisée permet de maintenir, voire d'améliorer, les rendements forestiers. Cela illustre les principaux enjeux de la gestion sylvicole dans la seconde moitié du XXI^e siècle : la gestion des contraintes hydriques et nutritionnelles et le choix des espèces et variétés utilisées pour la régénération. Ce contexte nécessitera le développement de nouvelles pratiques culturales pour atténuer les effets des déficits en eau (améliorer la profondeur d'enracinement, contrôler l'indice foliaire des peuplements et la végétation de sous-bois...), la sélection d'espèces

Les scénarios d'émission du Giec

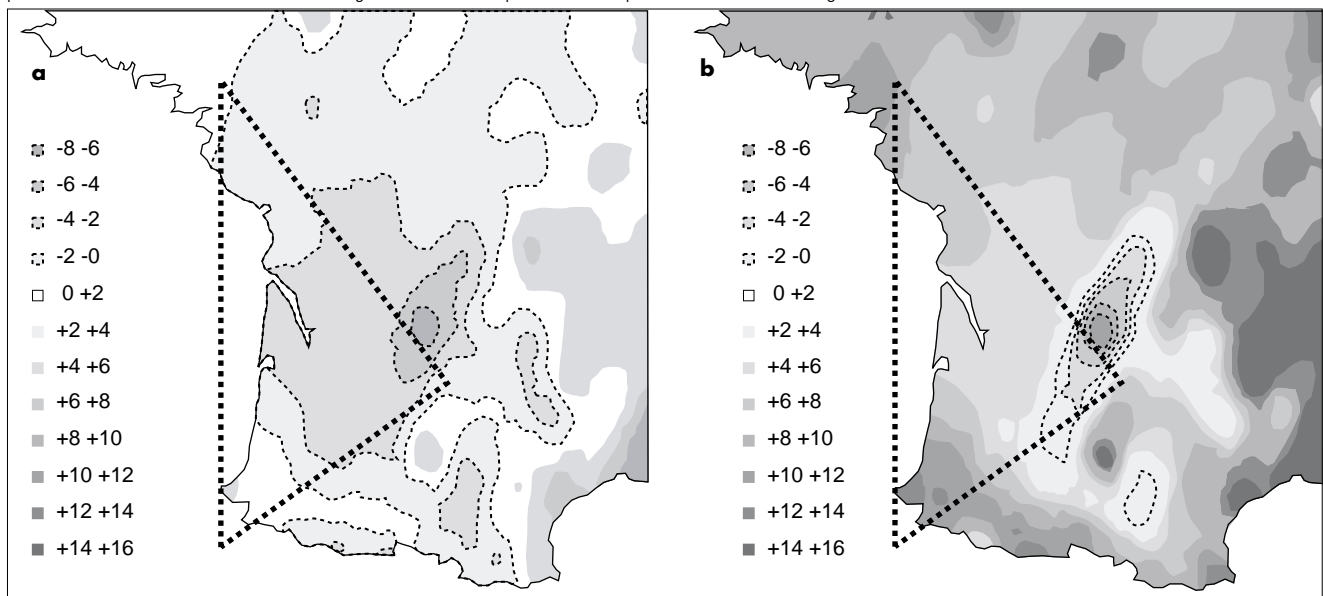
Ce sont des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, pour le XXI^e siècle, déterminés à l'aide d'hypothèses sur les développements économiques, les consommations d'énergies fossiles et l'utilisation des terres. Plusieurs scénarios, reflétant différentes évolutions possibles de la société, ont été établis par le Giec. Le scénario B2 est relativement modéré en termes d'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre (économie qui évolue rapidement, forte prise en compte des problématiques environnementales).

et de variétés mieux adaptées à la sécheresse et une meilleure gestion des nappes phréatiques, tant au niveau local que régional.

Le carbone n'est pas le seul enjeu

Enfin, si les résultats précédents s'appuient sur des modèles statiques (les écosystèmes et les systèmes de production y sont supposés statiques), une autre approche est l'utilisation de modèles dynamiques. La modélisation dynamique permet de simuler la migration des écosystèmes ainsi que leur productivité. Ce type de modèle conclut le plus souvent à une augmentation de biomasse, mais surtout à un bouleversement des écosystèmes et des paysages (Easterling

Figure 5 - Anomalie moyenne 1960-2100 de la productivité primaire nette du pin maritime sur le sud-ouest de la France en m³.ha⁻¹.an⁻¹. Le triangle en pointillés délimite l'aire de répartition actuelle du pin maritime (*Pinus pinaster*). Les données climatiques sont issues du modèle Arpege-Climat de Météo-France sur les données du scénario B2 du Giec. La carte de gauche (a) correspond à des hypothèses de modélisation faisant référence à une croissance sans fertilisation, la carte de droite (b) donne la tendance pour une croissance sur sol très fertile. Les régions entourées de pointillés correspondent aux anomalies négatives.



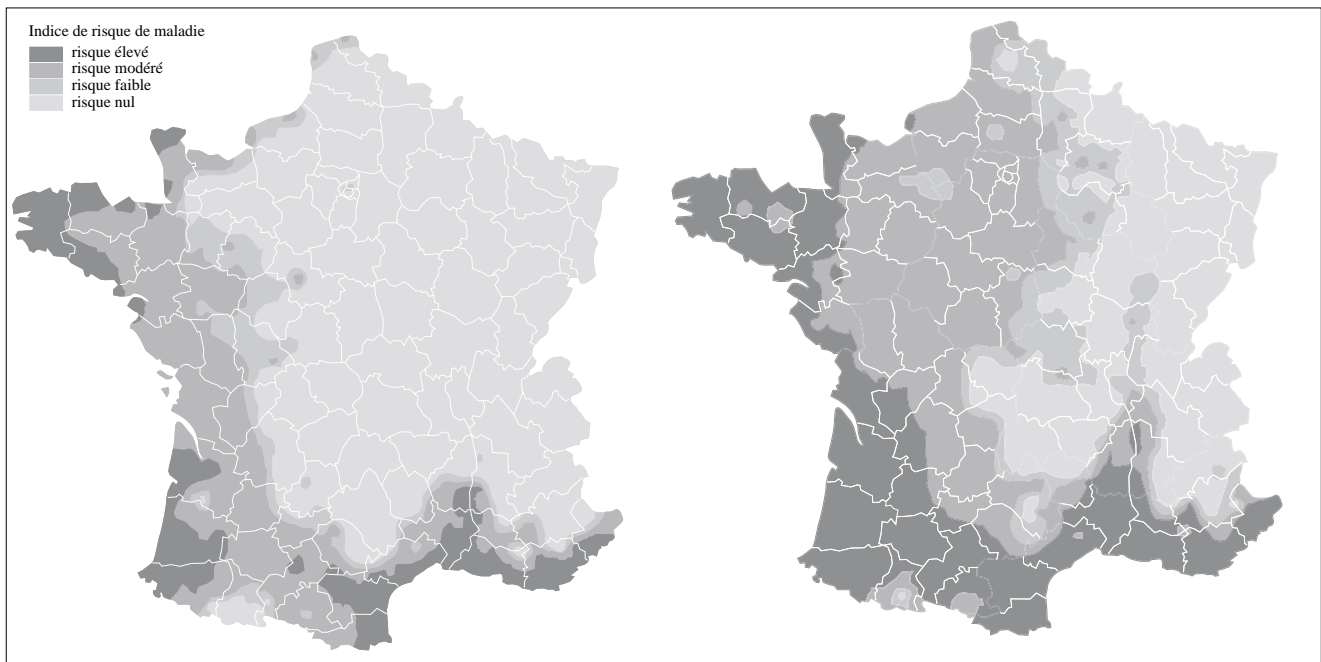


Figure 6 - Zonage des risques d'encre sur chêne rouge sur la France métropolitaine. Comparaison des périodes 1968-1998 (carte de gauche) et 2070-2099 (carte de droite). Les données de la période 1968-1998 sont des données observées. Pour la période 2070-2099, il s'agit de données reconstituées à l'aide du modèle climatique Arpège-Climat utilisant les données du scénario B2 du Giec.

et App, 2002). Iverson et Prasad ont montré qu'aux États-Unis, le réchauffement global risquait de se traduire par un déplacement de l'optimum écologique de plus de 100 km vers le nord pour la moitié des espèces, et de plus de 250 km pour 10 % d'entre elles (Iverson et Prasad, 1998). Cependant, de nombreux paramètres entrent en jeu dans la détermination de la répartition des espèces : choix culturaux, microclimat, contraintes édaphiques (contraintes liées au sol), aménagements... Le seul paramètre climatique ne peut nous permettre d'avancer de réelles prévisions des déplacements des aires de répartition des différentes espèces. Cela montre en tout cas que l'évolution de la productivité et du stock de carbone (la biomasse) n'est pas le seul enjeu. La déstabilisation des grands équilibres des biomes (ensembles homogènes de communautés végétales et animales occupant de vastes unités géographiques, tels l'océan, la prairie...), caractérisés par des conditions similaires de milieu, ou la disparition d'espèces endémiques (espèces propres à une localité ou à une région) sont des problématiques plus difficiles à appréhender mais non moins essentielles.

Prendre en compte l'impact sur les maladies

Si les études relatives à l'impact d'un changement climatique sur la production primaire ou la phénologie sont

nombreuses, les études d'impact sur les principaux pathosystèmes sont en revanche beaucoup plus rares. Cet aspect de la réponse de la couverture végétale aux changements climatiques est pourtant essentiel étant donné le poids des maladies et des autres nuisibles dans la limitation de la production agricole ou forestière (Coakley et Scherm, 1996 ; Péronnaud et al., 2002) et l'importance des parasites dans la biodiversité et la dynamique des populations et écosystèmes naturels. Un changement climatique peut affecter un parasite de quatre manières différentes (Brasier et Scott, 1994) : par les effets directs sur le développement du parasite (le pathogène), par les effets directs sur le développement de l'hôte (le végétal), par les effets indirects sur l'interaction hôte-parasite (il est bien établi, par exemple, qu'un stress hydrique rend les arbres plus vulnérables à l'attaque d'un parasite) et enfin par les effets indirects via la modification des cycles dans l'écosystème. Dans la plupart des études, seul l'effet direct du climat sur la survie du parasite est pris en compte.

À titre d'exemple, la division d'agro-météorologie de Météo-France a réalisé en 2002 une étude portant sur la pathologie forestière, qui présente la particularité d'associer un modèle climatique régionalisé et un modèle épidémiologique (Bergot et al., 2001 ; Bergot et al., 2003). Cette étude présente les répercussions d'un réchauffe-

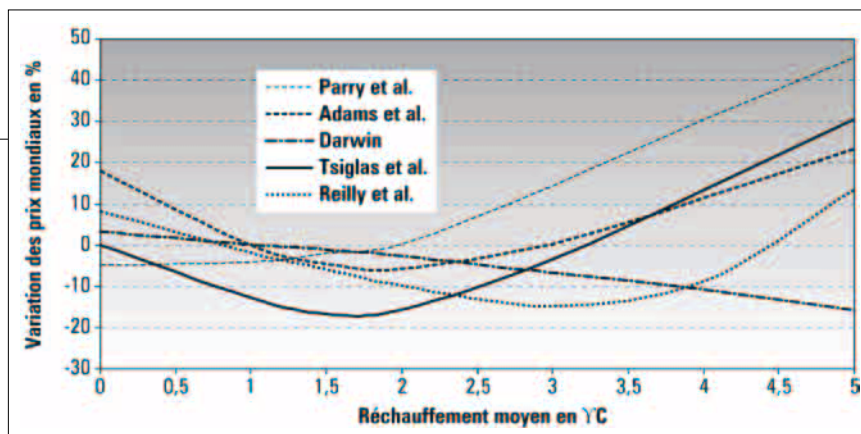
ment sur le développement de la maladie de l'encre du chêne rouge en France métropolitaine, maladie causée par le pathogène *Phytophthora cinnamomi*, particulièrement nuisible compte tenu de sa large gamme d'hôtes, en particulier ligneux, et de sa vaste distribution géographique.

Le modèle épidémiologique de survie du pathogène développé par l'Inra a été utilisé avec des données météorologiques observées et avec des paramètres météorologiques journaliers issus du modèle de circulation générale Arpège-Climat. Les résultats obtenus permettent de localiser des zones non touchées par la maladie à l'heure actuelle, mais potentiellement à risque, et montrent pour le futur une très forte tendance à l'accroissement des zones à fort risque de maladie (figure 6). Ce type d'étude, encore très rare dans le domaine de la pathologie végétale, devrait permettre d'anticiper les réponses des peuplements aux changements climatiques et se traduire par une aide à la décision pour la gestion future des peuplements forestiers.

Conclusions

À travers cette tentative d'approche multidisciplinaire de l'impact agronomique d'un changement climatique, il ressort bien qu'il s'agit d'un problème aussi complexe à traiter que crucial à

Figure 7 - Modélisation de l'évolution du prix mondial moyen des produits agricoles en fonction du réchauffement moyen de la planète (Easterling et App, 2002). Les différentes courbes font référence à différents travaux.



anticiper. Les perspectives de recherche dans ce domaine sont encore nombreuses à l'heure actuelle (Pérarnaud et al., 2002). Tout d'abord, des progrès restent à faire dans l'analyse des informations sur les écosystèmes et des longues séries de données climatiques et phénologiques, ainsi que dans la compréhension de l'impact du climat sur la couverture végétale. De même, l'amélioration des modèles de circulation générale doit être constante : utilisation de scénarios régionalisés (ce qui est préconisé par le Giec afin de mieux simuler les changements climatiques à l'échelle locale), couplages entre les modèles agronomiques, épidémiolo-

giques et climatiques. Enfin, il faut souligner la nécessité de ne pas sortir cette problématique de son contexte économique, déterminant dans les équilibres de l'agriculture mondiale. Cependant, ce contexte économique est lui-même dépendant de l'évolution du climat

(figure 7). Il est illustré ici par l'évolution prévue des prix agricoles en fonction du réchauffement moyen de la planète. Le sujet est donc complexe et ce n'est que par une approche globale, transversale, multidisciplinaire du problème que l'on pourra apporter des réponses adaptées.

Bibliographie

- **Bergot M., B. Marçais, V. Pérarnaud, M.-L. Desprez-Loustau et A. Lévy**, 2001 : Géographie de l'impact du gel sur la maladie de l'encre du chêne. *La Météorologie*, 8° série, 34, 45-52.
- **Bergot M., E. Cloppet, V. Pérarnaud, M. Déqué, B. Marçais et M.-L. Desprez-Loustau**, 2003 : Simulation of potential range expansion under climate change of oak disease caused by «*Phytophthora cinnamomi*» from a functional disease model integrated with a regionalised climate change scenario. Soumis à *Global Change Biology*.
- **Brasier C. M. et J. K. Scott**, 1994 : European oak declines and Global warming: a theoretical assessment with special reference to the activity of «*Phytophthora cinnamomi*». *Bulletin OEPP* 24, 221-232.
- **Cloppet E.**, 2002 : Impact d'un scénario climatique régionalisé 1960-2100 sur la phénologie et la production primaire de quelques espèces forestières françaises. Note de travail de l'École nationale de la météorologie, 808, 67 p.
- **Chuine I.**, 1998 : Modélisation de la phénologie des arbres de la zone tempérée et ses implications en biologie évolutive. Thèse de doctorat, École nationale supérieure Agronomique de Montpellier, 83 p.
- **Coakley S. M. et H. Scherm**, 1996 : Plant disease in a changing global environment. *Aspects of Applied Biology*, 45, 227-238.
- **Delecolle R., J.-F. Soussana et J.-P. Legros**, 1999 : Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *C.R.Acad.Agric.Fr.*, 85, 45-51.
- **Domergue M.**, 2001 : Impact du réchauffement climatique sur le parcours phénologique d'espèces/variétés dans la vallée du Rhône. Mémoire Esitpa effectué à l'unité CSE de l'Inra d'Avignon, 72 p.
- **Easterling W. et M. App**, 2002 : Assessing the consequences of Climate Change for food and forest resources: a view from the IPCC. Présenté lors de l'atelier international sur la réduction de la vulnérabilité de l'agriculture et de la sylviculture à la variabilité du climat et aux changements climatiques, 7-9 octobre 2002, Ljubljana, Slovénie
- **Harrison R. et R. Butterfield**, 1995 : Effects of climate change on Europe wide winter wheat and sunflower productivity. *Climate Research*, 7, 225-241.
- **Hogenboom G.**, 2000 : État de l'art de la modélisation de cultures. *Climate prediction and agriculture*. WMO, 69-75.
- **Houghton R. A.**, 1990 : Carbon. In Turner B. L., W. C. Clark, R. W. Kates, J. F. Richards, J. T. Matthews et W. B. Meyer (eds). *The Earth as transformed by Human action*, Cambridge U. Press, 393-408.
- **Iverson L. R. et A. M. Prasad**, 1998 : Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the Eastern United States. *Ecological Monographs*, 68(4), 99, 465-485.
- **Pérarnaud V., B. Seguin, E. Malezieux, M. Déqué et D. Loustau**, 2002 : Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry to 21st century climate change. En cours de publication. Présenté lors de l'atelier international sur la réduction de la vulnérabilité de l'agriculture et de la sylviculture à la variabilité du climat et aux changements climatiques, 7-9 octobre 2002, Ljubljana, Slovénie.
- Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec). Groupes de travail 1 et 2, 2001, Cambridge U. Press.