

Le changement climatique : conséquences pour l'agriculture et la forêt *par Bernard Seguin*

Résumé - Quelle sera l'évolution de l'agriculture et de la forêt sous l'influence du changement climatique au cours du 21^e siècle ? Nous considérons en premier lieu la stimulation de la photosynthèse et de la croissance des plantes (avec une partition entre plantes en C3 et en C4) résultant de l'augmentation de la concentration en CO₂. Puis nous évaluons l'effet du changement climatique - à la fois augmentation des températures et modification de la pluviométrie - sur les différentes espèces végétales, en fonction bien sûr du scénario climatique et de la caractéristique bioclimatique de départ dans différentes régions du monde. Dans ce cadre général, nous portons une attention particulière aux évolutions récentes des cultures en différentes parties du territoire français, en examinant les changements observés dans les décennies récentes - floraison plus précoce, avancée des dates de vendange, allongement de la saison de végétation, extension de l'aire de certains ravageurs. Nous évoquons aussi les impacts d'événements extrêmes - gel d'hiver et de printemps, sécheresses, pluies intenses et inondations, orages violents. En conclusion, nous analysons les stratégies possibles d'adaptation, sur place ou en considérant des déplacements géographiques des cultures et des forêts.

Climate change: its consequences for agriculture and forests.

Abstract - How will climate change influence agriculture and forests in the 21st century? We consider first how rising CO₂ concentrations will stimulate photosynthesis and affect growth of plants (C3 versus C4). We then examine how climate change - both rising temperatures and changing rainfall - will affect different plant species, depending of course on the climate change scenario and on the bioclimatic zone in different parts of the world. Particular attention is given to likely changes in crop yield in different parts of France. We examine observed trends of past decades - earlier blooming, earlier wine harvests, extension of the growing season, expanded range of some insect pests. We also comment on the impacts of extreme events - winter and spring frosts, droughts, intense rainfall episodes and flooding, violent storms. As a conclusion, we discuss possible strategies for adaptation, with or without shifting areas of cultivation and forestry.

Le changement climatique n'est, bien sûr, qu'un des déterminants qui vont conditionner l'évolution de l'agriculture et celle de la forêt au cours du XXI^e siècle. Pour la première, la remise en question de sa vocation unique de production d'alimentation, déjà largement entamée depuis quelques années par la reconnaissance de sa multifonctionnalité, est fortement accentuée actuellement par l'ouverture des perspectives de l'utilisation de la biomasse pour la substitution d'énergie fossile (biocarburants, cultures énergétiques). Le tout se situe dans un contexte de transformation profonde du contexte économique, incluant les réformes de la PAC (Politique agricole commune). Il en va de même pour la forêt, dont la composante de productivité est dans bien des cas mise en retrait par rapport aux déterminants écologiques.

Cependant, ces deux activités restent sans aucun doute parmi celles qui sont le plus directement influencées par le climat. Le changement climatique aura donc un impact sur la composante biotechnique de la production. Accroissement de la teneur en gaz carbonique et

autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère, élévation de la température, modification des régimes pluviométriques, et donc des différents termes du bilan hydrique (évaporation, drainage, ruissellement), évolution de la couverture nuageuse, et donc du bilan radiatif : l'ensemble des facteurs bioclimatiques qui régissent le fonctionnement des écosystèmes est amené à se modifier. Il faut donc en premier lieu prévoir et quantifier ces modifications et leurs conséquences.

Quel impact sur le fonctionnement des cultures ?

Avant d'en venir à l'impact du réchauffement climatique proprement dit, il est nécessaire de prendre en compte un effet spécifique aux couverts végétaux qui concerne la stimulation de la photosynthèse par l'augmentation du gaz carbonique (ou dioxyde de carbone : CO₂) atmosphérique. Avec l'hypothèse d'un doublement du CO₂ pour la fin de ce siècle, les travaux permettent de prévoir une stimulation de la photosynthèse de l'ordre de 20 à 30 %, conduisant à une aug-

mentation résultante de l'assimilation nette de l'ordre de 10 à 20% (en prenant en compte l'augmentation de la respiration liée à l'effet de l'augmentation de la température) (fig.1). Il devrait également s'en suivre

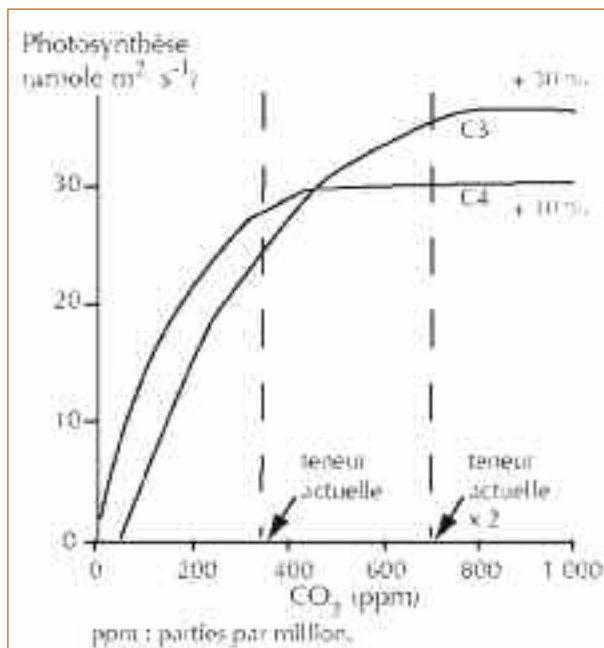


Figure 1 : influence de la concentration en CO₂ sur la photosynthèse de plantes en C3 et en C4

une baisse de la transpiration des plantes et, en conséquence, un accroissement de la biomasse produite et des rendements potentiels pour les plantes d'intérêt agricole. Cette réponse positive de la photosynthèse à un enrichissement en carbone de l'atmosphère dépend toutefois de différents facteurs. Le type de métabolisme carboné, la température et la disponibilité en eau interfèrent ainsi avec l'accroissement de la photosynthèse consécutif à une augmentation de la teneur en carbone. Par exemple, alors que les plantes en C3 (comme le riz, blé, betterave, pois, etc.), majoritaires dans les zones tempérées, répondent fortement à une augmentation de la teneur en carbone atmosphérique dans la gamme de concentrations considérée, la réponse des plantes en C4 (comme maïs, sorgho, canne à sucre...) à un enrichissement de l'atmosphère est très faible au-delà de 400 ppm, proche de la teneur actuelle de l'atmosphère.

Cet effet sur la photosynthèse sera combiné à l'effet propre du réchauffement climatique sur la température

en premier lieu, mais également sur les autres facteurs, en particulier la pluie. Bien que la réponse physiologique des plantes à un enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique et à une augmentation concomitante de la température entraîne en théorie une production plus importante de biomasse, les effets sur le rendement des espèces cultivées, à l'échelle du peuplement, risquent d'être beaucoup plus contrastés. Cela est particulièrement vrai pour le sud, où l'optimum thermique pour la photosynthèse est souvent déjà atteint, sinon dépassé dans certaines conditions. Dans les conditions tempérées, l'augmentation de température peut favoriser la plupart des processus physiologiques. Mais elle aura également un impact négatif pour les plantes à cycle déterminé, comme les cultures annuelles, en accélérant leur rythme de développement et donc en raccourcissant les cycles de culture et, par suite, la durée de fonctionnement de l'usine photosynthétique. A l'inverse, pour les végétations à cycle non déterminé comme les prairies ou la forêt, l'avancée des stades de développement au printemps s'accompagne d'un retard dans l'arrêt physiologique à l'automne, et la durée de la saison de végétation devrait s'en trouver augmentée. Au bout du compte, le bilan résultant en la production de biomasse, et au-delà, le rendement peuvent prendre des aspects variés.

Quelles conséquences pour la production agricole et forestière ?

Elles varient beaucoup en fonction du type de couvert et des conditions climatiques associées aux conditions culturales pour les plantes cultivées. Mais la tendance générale est claire: si les régions tempérées peuvent s'attendre à des effets tantôt positifs, tantôt négatifs sur le rendement, le changement climatique aura quasi-systématiquement des effets négatifs dans les zones tropicales ! C'est effectivement ce qui ressort du grand nombre d'études consacrées ces vingt dernières années à la prédiction de l'impact du réchauffement climatique sur l'agriculture à l'échelle mondiale (voir par exemple Rosenzweig et Hillel 1998, Reddy et Hodges 2000). Elle a été clairement confirmée par celle du 4^e rapport de 2007, dont nous reproduisons ci-dessous les principales conclusions contenues dans le «Résumé à l'intention des décideurs» du Groupe de travail II (GIEC 2007) « *Les rendements agricoles devraient augmenter légèrement dans les régions de moyenne et haute latitude pour des augmentations moyennes locales de température allant de*

1 à 3° selon la culture considérée, et devraient diminuer au-delà dans certaines régions. Aux latitudes plus basses, particulièrement dans les régions ayant des saisons sèches et dans les régions tropicales, les projections montrent des rendements agricoles décroissants, même pour de faibles augmentations locales de température (1 à 2° C), ce qui augmenterait les risques de famine. Globalement, le potentiel de production alimentaire devrait croître avec l'augmentation de température moyenne locale pour une gamme de 1 à 3° C, mais au-dessus de ces valeurs, il devrait diminuer».

Une illustration précise peut être tirée de la synthèse par les auteurs du chapitre 5 de ce Groupe de travail II, qui fait bien apparaître ces caractéristiques pour le blé et le maïs en fonction du réchauffement, analysés séparément pour les zones tempérées et les zones tropicales, et avec indication du potentiel d'adaptation (Easterling et al 2008) (fig2). En milieu tropical, l'absence d'effet réellement posi-

tif est liée à la prépondérance des plantes en C4 et à l'impact négatif de l'élévation des températures (raccourcissement du cycle et basculement du fonctionnement photosynthétique vers des gammes thermiques défavorables). La grande variabilité des résultats semble davantage provenir des scénarios climatiques que des modèles de culture : transition ou à l'équilibre (550 ou 750 ppm de CO₂), variabilité climatique actuelle du même ordre de grandeur que la perturbation prévue, prise en compte ou non de la dissymétrie de réchauffement entre températures minimale et maximale, résolution spatiale du modèle climatique, prise en compte ou non des effets cumulatifs d'une année sur l'autre pour les scénarios de transition.

Dans ce contexte général, l'agriculture européenne correspond pour l'essentiel au cadre géographique des régions tempérées, avec cependant une différenciation majeure entre les pays plus froids du nord de l'Europe

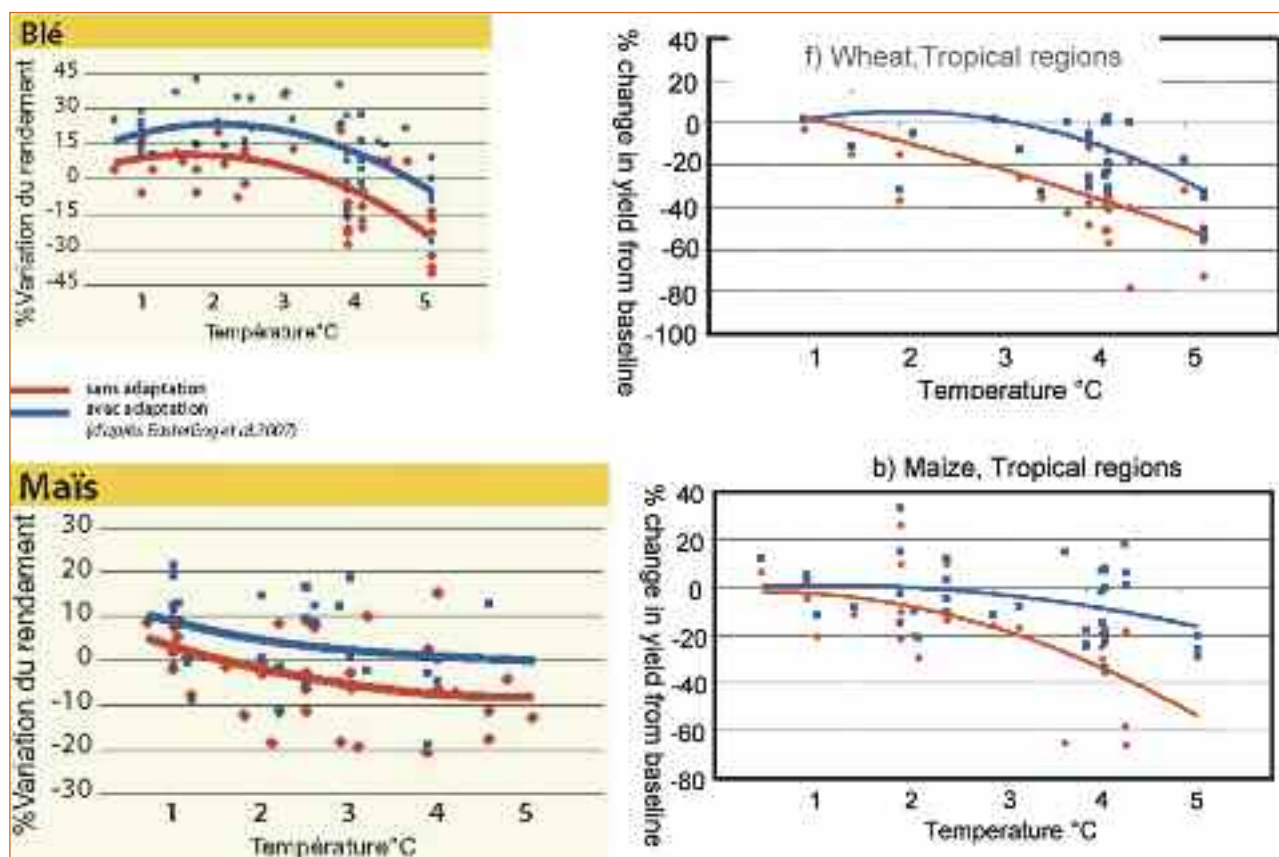
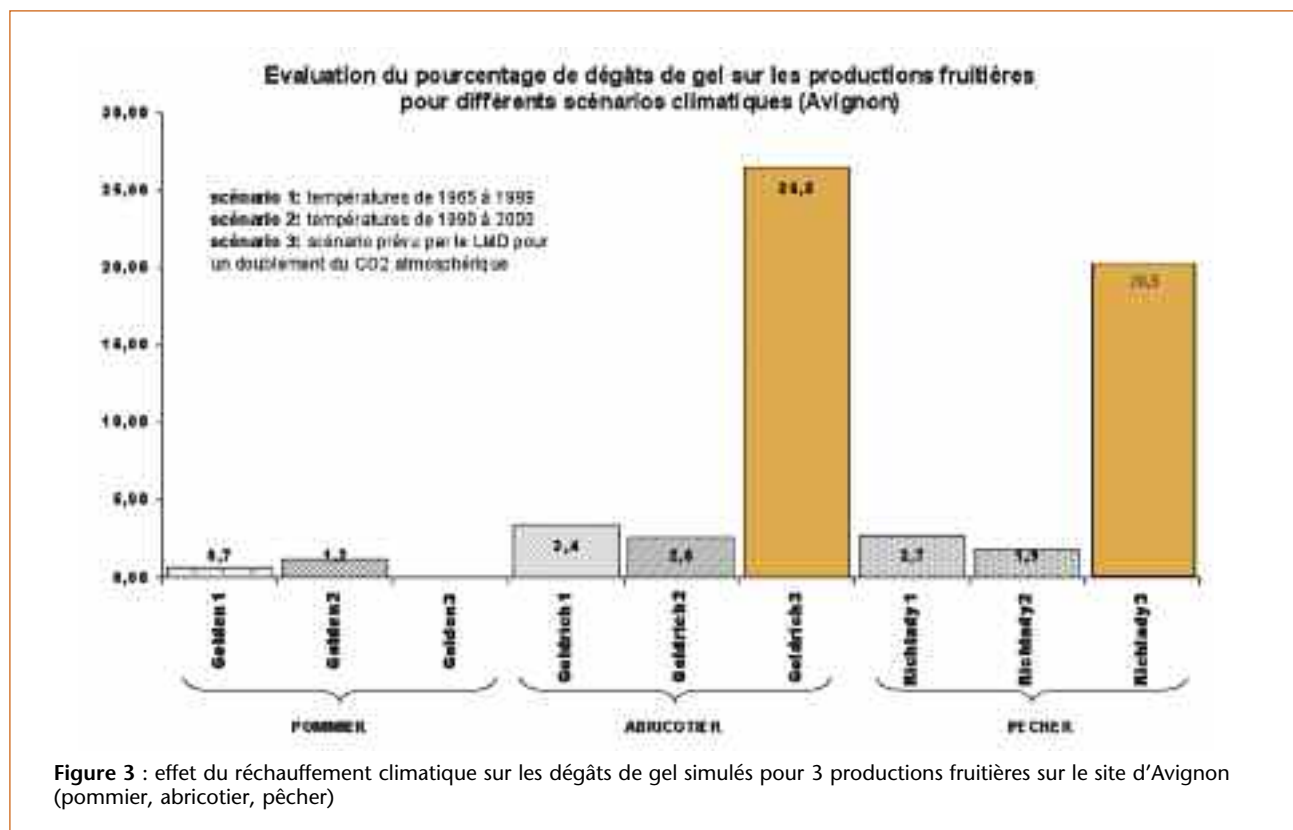


Figure 2 : effet du réchauffement sur le rendement du blé et du maïs en zone tempérée (à gauche) et en zone tropicale (à droite), avec indication des effets possibles de l'adaptation (d'après Easterling et al., 2008)

et ceux plus chauds du sud, ce contraste se retrouvant clairement dans le cas de la France qui se situe assez bien à la charnière de ces deux grandes zones climatiques. Les simulations effectuées pour le blé et le maïs (Delecolle et *al* 1999, Seguin et *al* 2004) font apparaître un effet légèrement positif dans le nord, même sans adaptation (de l'ordre de 10%), alors que des chutes de rendement dans le sud peuvent apparaître, avec les effets combinés de températures excessives et de la sécheresse. Pour les prairies, dans le cas du Massif central, Soussana (2001) fait état d'une production fourragère augmentée de 20% qui permettrait d'augmenter d'autant le chargement animal, sous réserve que la pluviométrie ne soit pas trop diminuée. A priori, les grandes cultures et les prairies devraient être plutôt favorisées, sauf dans le sud où apparaît le risque de sécheresses accentuées, accompagnées de températures élevées.

Pour les arbres fruitiers et la vigne, l'avancée généralisée de la phénologie peut poser des problèmes de risque de gel au moment de la floraison, et de qualité par avancée des stades sensibles (Domergue et *al* 2004) (fig 3).

Pour les forêts, le schéma général est assez semblable : stimulation de la photosynthèse par l'accroissement du CO₂ atmosphérique, allongement de la saison de croissance et températures plus favorables vont donner, dans un premier temps, des conditions de croissance plus favorables pour les forêts tempérées, à l'inverse des forêts tropicales. Par contre, pour des valeurs de réchauffement plus élevées (de l'ordre de 2 à 3° C), le mouvement va s'inverser et la productivité des forêts tempérées diminuera, alors que celle des milieux tropicaux sera fortement réduite par l'effet combiné des fortes températures et de la sécheresse accentuée. Ce schéma général est bien illustré par les projections sur la forêt française effectuées dans le cadre du projet Carbofor soutenu par le projet GICC (Loustau et *al.* 2004) : les modèles de fonctionnement des couverts forestiers montrent que la stimulation de la croissance des arbres par la seule réponse de la photosynthèse brute à l'augmentation du gaz carbonique devrait atteindre environ 40 %, pour l'ensemble de la phase juvénile. Ce chiffre est plus élevé chez les feuillus que chez les résineux. Lorsque, à l'aide des modèles, on combine ces effets à ceux des modifications climatiques, on obtient, comme pour les cultures, des résul-



tats contrastés suivant les espèces et les régions. Le débourrement serait plus précoce de 6 à 10 jours pour les feuillus, et de 15 à 20 jours en moyenne pour le pin maritime. Pour le pin sylvestre et l'épicéa, qui ont des besoins en froid plus élevés, l'avancée du débourrement ne serait perceptible qu'en altitude ; en plaine il y aurait un retard. Pour toutes les espèces, le risque de gel tardif serait diminué. Au total, si la production nette en France devrait bien augmenter, l'augmentation se situerait nettement en dessous des chiffres donnés par le seul effet de stimulation de la photosynthèse (de 2 à 15 %), avec surtout une forte variabilité suivant les localisations en fonction des conditions hydriques et thermiques locales et de la fertilité des sols. Les effets prédits sont globalement positifs dans le Nord de la France pour les feuillus sociaux avec une réponse décroissante de l'Est vers l'Ouest, la façade Nord-Ouest présentant même une anomalie de production nette négative. Dans le Sud Ouest ils sont positifs en début de siècle puis s'inversent avec une anomalie négative augmentant vers l'intérieur des terres en fin de siècle. En zone méditerranéenne, l'accentuation de sécheresse estivale conduirait aux mêmes effets négatifs, renforcés par l'augmentation des risques d'incendie. Outre l'aggravation du risque météorologique dans les régions affectées traditionnellement, il faut s'attendre à une extension géographique vers des régions qui n'y sont, ni préparées, ni habituées (Rigolot 2008).

Les moyennes et les extrêmes

Les éléments qui viennent d'être présentés s'appuient uniquement sur les valeurs moyennes des facteurs climatiques. L'éventualité d'événements extrêmes et, de façon plus large, la prise en compte de la variabilité de ces facteurs pourraient conduire à des impacts différents de ce réchauffement moyen continu par le dépassement de valeurs-seuils encore mal cernées. C'est assez évident pour les sécheresses (comme l'ont récemment montré 2003, puis 2005 et 2006) ou les fortes pluies (qui affectent l'agriculture par l'érosion et l'inondation des parcelles), mais c'est également vrai pour la température. D'abord par ses valeurs basses pour les gels d'hiver ou de printemps (évoqué ci-dessus) : si les scénarios s'accordent pour prévoir des hivers plus doux en moyenne, l'éventualité d'épisodes de froid dévastateurs (tels qu'en 1956 ou en 1987) pour les oliviers, les agrumes ou le mimosa n'est pas à écarter, alors que les seules températures moyennes leur permettraient de

remonter vers le Nord le long de la vallée du Rhône, par exemple. Ensuite par les températures élevées : la fréquence des canicules, avec des températures dépassant les 35°C, est prévue comme devant atteindre une année sur deux vers 2050 (Planton 2005), et la tolérance des écosystèmes actuels, qu'ils soient cultivés ou naturels, est bien mal connue.

Enfin, pour les forêts, et comme cela a été clairement démontré par les épisodes de 1999, puis 2008, les tempêtes sont à coup sûr un élément majeur à prendre en compte, tant elles sont capables de mettre à bas en quelques instants une part significative de la production forestière accumulée sur plusieurs années. A ce niveau, et un peu comme pour les ouragans, le débat est encore ouvert chez les spécialistes sur leur renforcement dans le cadre du changement climatique ; mais il faut de toute évidence adapter la sylviculture, comme on doit l'adapter aux situations de sécheresse persistante, comme cela a été le cas dans le sud-est de 2003 à 2008 (voir le numéro spécial de *Forêt méditerranéenne* 2008).

Récoltes et vendanges : le passé récent, préfiguration de l'avenir ?

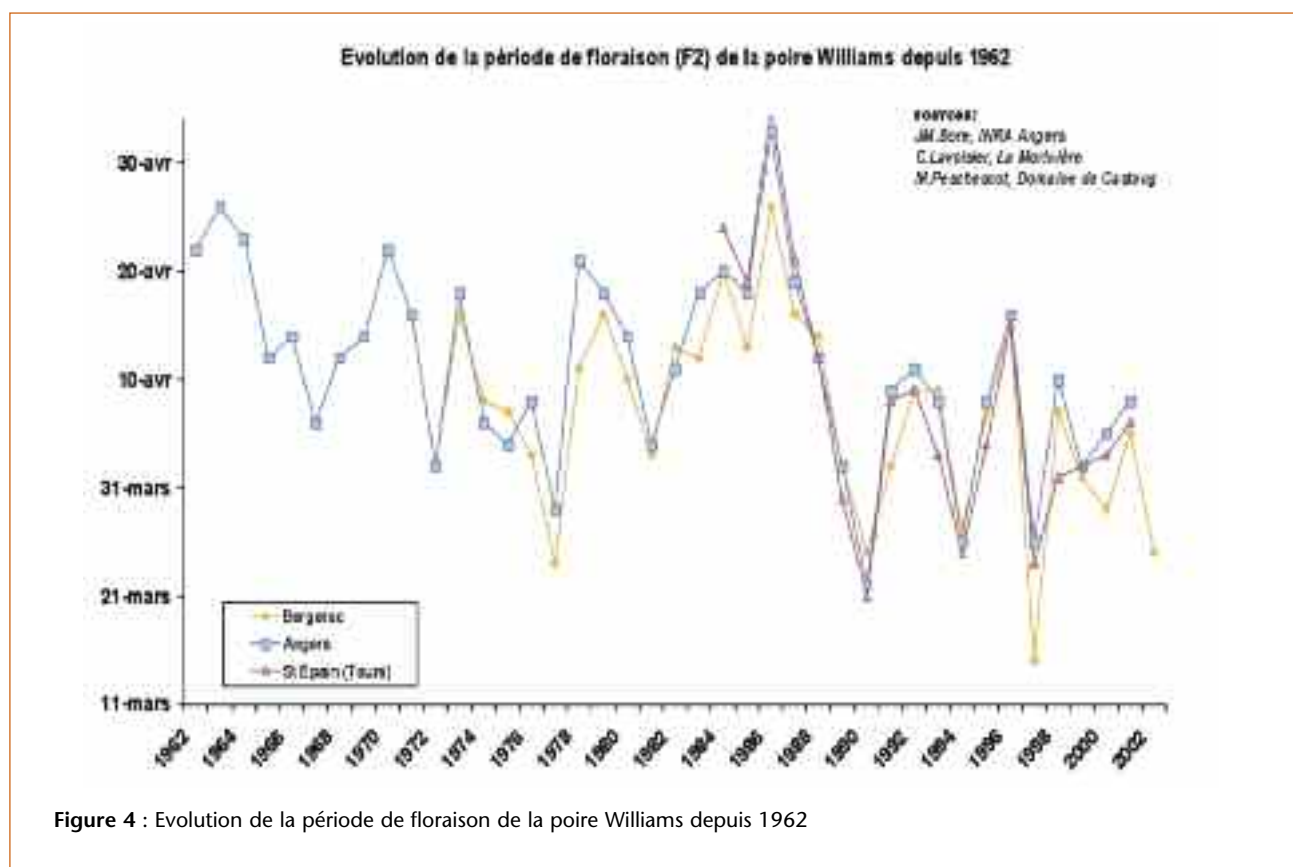
Comme le climat, et en partie à cause de lui, les écosystèmes terrestres, surtout s'ils sont cultivés, conjuguent une variabilité à différentes échelles temporelles et une évolution à long terme qui traduit un déplacement de l'état d'équilibre qui permet de le considérer comme stationnaire sur une période donnée. L'attribution d'un changement au réchauffement climatique récent attesté par le 4^e rapport du GIEC n'est pas une question scientifique facile, d'une part parce que de nombreux facteurs autres que le climat agissent sur les réponses des différents secteurs, d'autre part parce que les impacts éventuels ne se répercutent pas forcément en réponse immédiate au forçage climatique, et qu'un temps de latence de durée variable caractérise l'inertie de différents systèmes.

Au niveau global, les effets observés peuvent être résumés ainsi : pour l'agriculture et la forêt, une avancée similaire de la phénologie en Europe et en Amérique du nord, avec une saison de végétation sans gel allongée maintenant confirmée par des observations satellitaires. En dehors de l'avancée systématique des dates de floraison des arbres fruitiers, l'illustration la plus

nette se situe en viticulture : l'ensemble des régions viticoles de ces mêmes zones montre une avancée des stades phénologiques, qui se répercute sur les dates de vendange, ainsi qu'une augmentation de la teneur en sucre et du degré alcoolique qui conduit, pour les vingt dernières années, à des vins généralement de haute qualité. Ces tendances sont confirmées au niveau européen (EEA 2004), avec une augmentation de la saison de végétation de 10 jours entre 1962 et 1995 et de la productivité de la végétation de 12%, et la migration de plantes vers le nord et vers le haut (diversité enrichie de l'Europe du nord-ouest et en montagne pour 21 de 30 sommets alpins).

Au niveau français, les agriculteurs et les éleveurs font état d'une modification des calendriers culturels qui pourrait être liée à cette particularité climatique, d'ailleurs confirmée par des analyses récentes sur les dispositifs expérimentaux de l'Inra (pratiquement un mois d'avance depuis 1970 sur les dates de semis du maïs pour quatre sites couvrant l'ensemble du territoire), mais il n'a pas encore été possible de l'apprécier de manière objective, pas plus que d'évaluer son poids

éventuel dans l'évolution récente des rendements. Par contre, l'analyse des données phénologiques sur les arbres fruitiers et la vigne, cultures a priori beaucoup moins dépendantes sur ce point des décisions culturelles, a permis de mettre en évidence des avancements significatifs de stades tels que la floraison des arbres fruitiers (une dizaine de jours en trente ans sur des pommiers dans le sud-est, (fig. 4) (Seguin et al 2004) ou la date de vendange pour la vigne (presque un mois dans la même région au cours des cinquante dernières années (Ganichot 2002, voir figure 5). Pour la vigne, l'augmentation de température moyenne s'est traduite par des conditions globalement plus favorables, avec moins de variabilité interannuelle pour tous les vignobles français, qui ont permis une augmentation de la teneur en alcool (de 1 à 2 degrés) et une diminution de l'acidité (voir Duchêne et Schneider 2004 pour l'Alsace), suffisamment accentuée ces dernières années pour commencer à poser des problèmes aux viticulteurs. Outre le fait que la tendance est plutôt à rechercher une baisse de la teneur en alcool, jusqu'où sera-t-il possible de garder la typicité qui fait la réputation de certaines productions ?



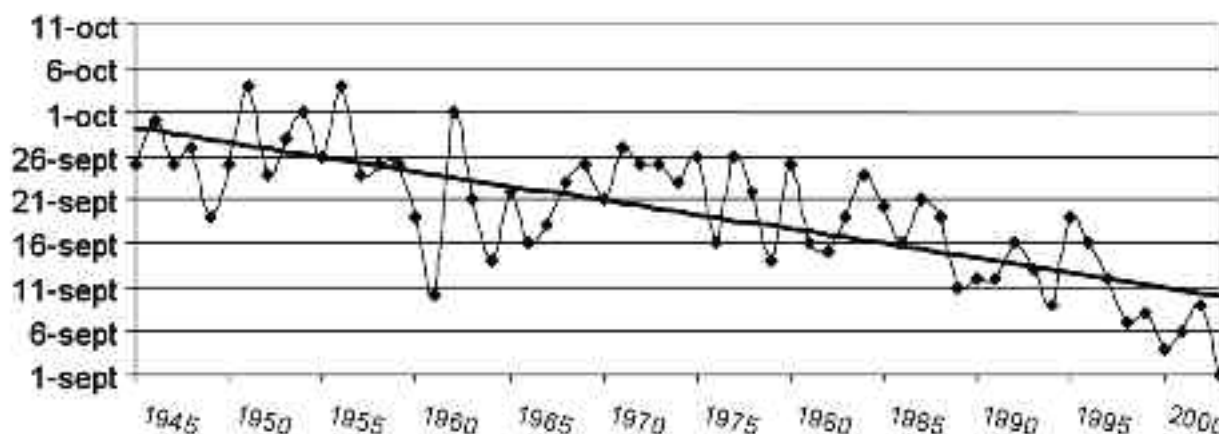


Figure 5 : Evolution des dates de vendange à Châteauneuf-du-pape (Ganichot 2002)

La même avancée phénologique est également détectable pour les forêts, qui ont aussi notablement augmenté leur productivité depuis 1960 (de l'ordre de 30 à 40 %), sans qu'il soit encore possible de séparer les effets de l'augmentation du gaz carbonique, du réchauffement ou des dépôts atmosphériques d'azote dans cette augmentation. Il faut aussi noter les premières observations de modification de la fréquence de certaines espèces dans les forêts françaises (Cluzeau et al. 2001) et européennes (Klötzli et Walther 1999) qui pourraient être reliées au réchauffement climatique récent. De façon générale, on constate que les espèces à feuilles persistantes et larges ont eu tendance à progresser au cours des dernières années. Le houx par exemple a vu sa surface d'extension doubler dans les Ardennes entre les années 1980 et 1990, d'après les données de l'Inventaire forestier national. Cette espèce est bien connue pour être régulée par la fréquence et l'importance des gels hivernaux. La limite de son aire de répartition en Europe peut-être reliée de façon satisfaisante à la température moyenne du mois le plus froid de l'année. Dans les Ardennes, où on est proche de cette limite de présence de l'espèce, la température du mois le plus froid a augmenté de plus de 2°C pendant la décennie étudiée, passant de valeurs négatives à des valeurs positives. Quelques observations commencent à être publiées dans la littérature internationale à propos de migrations géographiques : ainsi pour l'étude de (Lenoir et al 2008) qui ont détecté une tendance vers le haut de l'ordre de 29 m par décennie pour l'altitude optimale de 171 plantes forestières dans les montagnes de l'ouest de l'Europe. Comme l'indiquent Dupouey et Robin (2007), il s'agit pour le moment de cas emblé-

matiques, mais pas encore d'un processus massif.

Au niveau des insectes, il apparaît encore peu de signes indiscutables dans le domaine de l'agriculture, car l'extension bien documentée vers le Nord et en altitude de la chenille processionnaire concerne le pin et donc la forêt. Il a seulement pu être observé une évolution sur le cycle du carpocapse des pommes, qui a vu l'apparition d'une troisième génération, et une augmentation de la diversité des populations de pucerons, accompagnée d'une précocité accrue des périodes d'activité. A l'inverse, on a pu noter une extinction (temporaire) du phoma du tournesol dans le sud-ouest, fortement défavorisé par l'augmentation des températures supérieures à 32° C et éradiqué après la canicule de 2003.

Au-delà des bouleversements des systèmes écologiques complexes que représentent les relations entre hôtes, il faut également prendre en compte la possibilité de mouvements géographiques rapides qui amènent certaines maladies ou ravageurs, véhiculés par les moyens modernes de transport, à s'installer dans des régions où les conditions climatiques le leur permettront. D'où les interrogations actuelles sur des maladies émergentes dans le monde animal (fièvre du Nil sur les chevaux en Camargue, fièvre catarrhale), mais aussi végétal : une mouche blanche (*Bemisia tabaci*) originaire des régions subtropicales a été repérée depuis une dizaine d'années en Europe, et a nécessité des mesures drastiques pour éviter sa prolifération et la transmission de viroses dans les cultures sous serre du Sud. Quel est le rôle du réchauffement climatique dans ces évolutions ? Difficile à dire à l'heure actuelle, mais la question est posée.

L'adaptation : changer sur place ou se déplacer ?

Les perspectives présentées plus haut ont, pour le moment, surtout considéré les systèmes tels qu'ils sont pratiqués actuellement. Mais, en admettant implicitement leur stabilité géographique, une marge appréciable d'adaptation apparaît possible en mobilisant l'expertise agronomique ou sylvicole au sens large pour les adapter aux conditions climatiques modifiées (recours au matériel génétique approprié, mise au point d'itinéraires techniques adaptés, ajustement de la fertilisation et de l'irrigation, etc.). De façon générale, on peut estimer que l'adaptation des grandes cultures pourrait s'effectuer sans trop de problèmes, dans la mesure où les années passées ont montré la capacité des agriculteurs à les faire évoluer rapidement en fonction, en particulier, des contraintes résultant de la PAC. De même pour les prairies et l'élevage. Il faut cependant relativiser cette vision optimiste sur une capacité d'ajustement rapide (quelques années), en soulignant une fois de plus les incertitudes actuelles sur la pluviométrie et le bilan hydrique. Pour les cultures pérennes, si le diagnostic sur l'adaptation des systèmes de culture reste identique dans ses grandes lignes, la capacité d'adaptation paraît moins forte. Elle nécessite de prendre en compte une durée plus longue, de l'ordre de dix à vingt années. D'ores et déjà, pour les arbres fruitiers, devant les évolutions phénologiques constatées, il faut se préoccuper maintenant du choix du matériel végétal adapté. Quant à la vigne, elle pose des problèmes spécifiques, à cause du lien au terroir (Seguin et Garcia de Cortazar 2005).

Au-delà de ce premier niveau, il doit être envisagé cependant un deuxième niveau d'adaptation, passant par un déplacement géographique des zones de production ou de plantation. A l'heure actuelle, il n'apparaît pas encore de signe tangible de déplacement géographique des systèmes de production. Et pourtant, le réchauffement observé équivaut, sur le siècle, à un déplacement vers le Nord de l'ordre de 180 km ou en altitude de l'ordre de 150 m. Ce qui traduit la plasticité déjà évoquée, mais jusqu'où et jusqu'à quand ? On peut donc légitimement envisager l'éventualité de la remontée (vers le Nord ou en altitude) de certaines cultures, ou l'introduction de nouvelles cultures au Sud. Dans le premier cas, à l'échelle de l'Europe, on peut envisager de voir le pois et le colza remonter jusqu'en Scandinavie et Finlande, le maïs-grain (et la vigne !)

s'étendre vers la Grande-Bretagne, les Pays-Bas ou le Danemark, ainsi que vers l'est (Pologne, etc.), le soja et le tournesol suivre de près cette progression. Pour le sud, s'il ne paraît pas impossible d'envisager techniquement la possibilité d'une extension de l'aire de culture du coton et l'apparition de cultures tropicales comme l'arachide, leur opportunité économique apparaît faible actuellement. C'est plutôt la menace sur la ressource en eau qui représente l'élément essentiel: si la tendance des scénarios à une diminution de la pluviométrie estivale (de l'ordre de 20 à 30%) autour du bassin méditerranéen est confirmée dans le futur, elle pourrait entraîner un abandon de l'agriculture dans certaines zones traditionnelles de culture en sec, et une tension accrue sur l'utilisation de l'eau entre les différents utilisateurs, au détriment de l'irrigation.

Dans l'hypothèse de déplacements géographiques, la nature du lien avec le caractère local jouera un grand rôle : s'il apparaît possible, a priori, de cultiver du blé ou du maïs dans des régions différentes, cela n'irait pas de soi pour les productions plus typées (au premier rang, évidemment la vigne) dont une grande partie de la valeur ajoutée provient de l'existence d'une zone d'appellation ou d'un terroir. Dans la mesure où la notion de terroir implique une étroite adéquation entre le milieu physique (sol et climat), les variétés (cépages pour la vigne) et les techniques culturales, elle implique évidemment un risque de fragilité particulière par rapport à une évolution du climat. Il n'est pas envisageable de délocaliser les AOC (Appellations d'origine contrôlée) ! Par ailleurs, la période de sensibilité de la vigne à la température pour la qualité (en général, floraison-maturité) se situe en plein été où le réchauffement prévu est maximum, et l'avancée de ce stade de fin août à mi-juillet accentue encore l'effet à cette période, qui peut atteindre 6 à 8° C pour un réchauffement annuel de 2 à 3° C. Malgré ces interrogations, l'année 2003 a été plutôt rassurante sur ce point: la conjonction de la sécheresse et de la canicule a eu des effets néfastes par certains aspects, mais la vigne a démontré sa capacité d'adaptation à ces conditions exceptionnelles. L'adéquation à la typicité traditionnelle paraît encore pouvoir être assurée pour un réchauffement modéré (2 à 3° C), en conjuguant des efforts sur le mode de conduite et le microclimat. Au-delà, s'il atteint 4 à 5° C, la seule issue pour conserver la typicité traditionnelle serait, quand c'est possible, de jouer sur l'altitude et le relief. Autrement, l'évolution vers des cépages plus

méridionaux est une solution technique envisageable à terme, mais plutôt pour les terroirs de climat froid.

La gestion des forêts

Au niveau des forêts, des travaux récents, toujours menés dans le cadre du projet Carbofor évoqué plus haut, ont permis d'établir des cartographies des potentialités des différentes formations, dans l'hypothèse du réchauffement prévu par les scénarios climatiques. La distribution des aires géographiques potentielles des essences sur le territoire national telle qu'elle est projetée au travers du scénario climatique (Badeau et al 2007) fait apparaître un déplacement des groupes d'essences méridionaux vers le Nord et vers l'Est (Fig. 6). Les groupes montagnards et continentaux tendent à régresser fortement. Le cas de l'optimum climatique du hêtre qui est réduit à l'extrême nord-est du territoire national en 2100 est emblématique à cet égard. Cette conclusion confirme les résultats prédits en termes de fonctionnement et de production. Les espèces les plus sensibles et donc vulnérables sont les espèces en limite Sud de leur aire naturelle ou celles supportant mal la sécheresse.

Il est opportun de noter que l'évolution prédite se situe dans un laps de temps de 100 ans, du même ordre de

grandeur que la durée de révolution de la plupart des espèces forestières concernées et de rappeler le relatif optimisme du scénario climatique qui a servi de support à cette étude, basé sur une hypothèse d'accumulation en gaz à effet de serre plutôt lente comparée à d'autres scénarios considérés par le GIEC. Les travaux sur la génétique des principales espèces forestières tempérées ont mis en évidence récemment la capacité d'adaptation génétique importante et rapide du cortège d'espèces «chênes tempérés», mises en œuvre par exemple au cours de la dernière colonisation post-glaciaire ou consécutive à l'introduction d'espèces comme le chêne rouge (Kremer et Petit 2001). Néanmoins, la question est posée de savoir si ce potentiel d'adaptation pourra effectivement s'exprimer dans le contexte de la forêt européenne majoritairement gérée, morcelée et partiellement artificialisée. Par ailleurs, la plupart des essences résineuses ont un potentiel génétique adaptatif beaucoup plus faible dans ce contexte, par leur vitesse de migration réduite et leur diversité génétique moindre. Les arboretums et les divers tests de survie et de performances d'espèces ou de provenances déjà installés en dehors de leur aire de distribution actuelle pourraient fournir des informations précieuses.

Concernant la production et le cycle du carbone, l'extension de la forêt méditerranéenne, de productivité

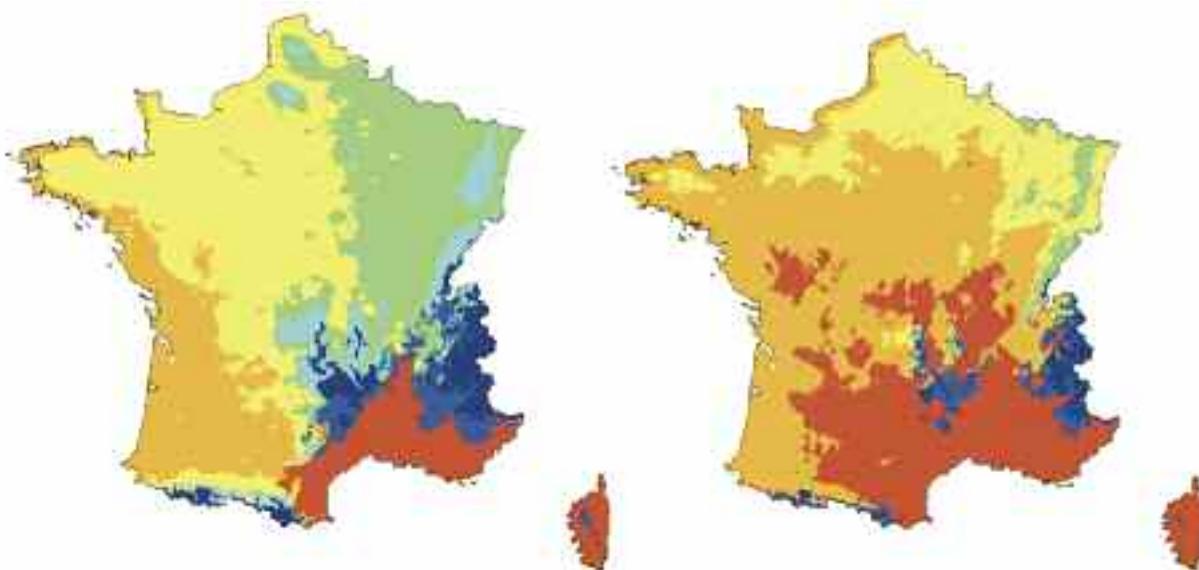


Figure 6 : Répartition géographique de 7 groupes estimée par analyse discriminante (A à gauche) en fonction du climat actuel et (B à droite) projetée en 2100 suivant le scénario climatique prédit par le modèle ARPEGE (Météo-France) utilisé dans le projet CARBOFOR (Badeau et al. 2007).

faible se ferait au détriment des forêts de production atlantique (les Landes de Gascogne) et des forêts de feuillus sociaux de plaine où se concentre actuellement le stock de biomasse sur pied le plus important. Les scénarios de gestion intensifs (révolutions courtes) et les stations les plus fertiles sont les plus sensibles au changement climatique analysé, aussi bien en positif qu'en négatif. Les cartes de production potentielle simulées par un modèle générique sur le territoire métropolitain entier confirment l'importance de ces interactions (Loustau et al. 2004). D'où l'importance de mettre au point et proposer des scénarios de gestion sylvicole d'adaptation à ces changements au niveau local (Legay et al 2007) jouant par exemple sur un ajustement de la composition spécifique, en classe d'âge ou génétique d'un peuplement ou d'une population d'arbres au cours de sa vie et éventuellement sur les facteurs du milieu interagissant avec le changement climatique.

Un point complémentaire concerne les maladies et ravageurs dont les aires d'extension peuvent se modifier et par suite handicaper certaines productions (dans le cas des forêts, voir Roques et Negeisen (2007) pour les insectes et Marçais et Desprez-Loustau (2007) pour les maladies). Il existe encore peu d'études prospectives, sans doute parce que les relations avec le climat sont moins clairement établies que pour les productions végétales, il a été possible dans certains cas de pronostiquer l'extension de certaines maladies: c'est le cas de l'encre du chêne (Marçais et al. 2004) et plus généralement des maladies provoquées par des pathogènes limités par les basses températures, ainsi que de la chenille processionnaire, dont la limite au nord et en altitude a déjà évolué en lien avec le réchauffement récent (Battisti et al. 2005).

Conclusion

Les observations récentes attestent, au minimum, d'un réchauffement significatif depuis 1860 au niveau global, avec une accentuation marquée depuis les années 1980. Il est évidemment variable à la fois dans le temps et dans l'espace, mais la tendance générale paraît indiscutable et bien établie par les impacts directs ou indirects sur les milieux naturels et certaines activités humaines. Il est maintenant fortement probable qu'il

soit causé par l'augmentation de l'effet de serre évalué dans les modèles climatiques, comme l'a établi clairement le rapport du GIEC de 2007. A l'issue de cette revue, plusieurs commentaires finaux nous paraissent de nature à accompagner ce diagnostic, par rapport à l'agriculture et la sylviculture dans le contexte français :

- les observations prennent en compte essentiellement les effets moyens du réchauffement observé depuis une vingtaine d'années (avec, pour les conséquences sur la phénologie, une rupture diagnostiquée à la période 1985-1989). Bien sûr, en complément de cette tendance de fond, les années récentes ont vu se manifester des événements climatiques que l'on peut qualifier d'exceptionnels (par leur écart avec les valeurs normales ou moyennes), avec en premier lieu la canicule et sécheresse de 2003, mais aussi les sécheresses ultérieures (en particulier 2005 et 2006), puis l'hiver doux de 2006. Manifestement, ces épisodes ont des impacts instantanés (ou même plus tardifs, compte-tenu des répercussions ultérieures) d'un ordre de grandeur égal ou notablement supérieur à celui de l'évolution moyenne. Il est certain que celle-ci sera déterminante à long terme, mais que la variabilité et son évolution en termes d'événements extrêmes jouera un rôle tout aussi important dans le futur. C'est, sans doute, à l'heure actuelle, le facteur limitant pour prétendre pronostiquer ou préfigurer l'impact du changement climatique sur les écosystèmes en général, et cultivés en particulier.

- quelle que soit l'action collective sur les émissions de GES, il apparaît maintenant très peu probable d'échapper à un réchauffement global d'au minimum 2 à 3° C pour la fin du siècle, et en conséquence inévitable de prévoir des mesures d'adaptation (Howden et al., 2007), évidemment variables suivant les productions et les régions, mais qui auront un socle commun. Celui-ci sera, pour partie, technique (avec une forte interaction entre la génétique et les pratiques culturales), mais devra évidemment tenir compte du contexte économique et social. Ainsi pour la question cruciale de l'utilisation de l'irrigation de complément, qui se pose maintenant avec des arguments techniques solides, mais dans un contexte délicat de compétition pour l'eau (Amigues et al., 2006).

Il est maintenant bien établi que, par notre action dans les vingt à trente prochaines années, nous avons collectivement le choix d'aller vers un réchauffement encore modéré, de l'ordre de 2 à 3° C (à mettre en rapport avec une gamme de variation de la température moyenne annuelle de la France métropolitaine depuis 1900 d'amplitude 2° C d'après Météo- France) ou au contraire vers les 5° C si on prolonge la tendance actuelle. Les impacts du second cas de figure sont beaucoup plus difficiles à cerner, mais sont porteurs dans tous les cas de risques notablement amplifiés. L'impérieuse nécessité de limiter l'ampleur de la perturbation engendrée par l'augmentation des GES apparaît de plus en plus clairement.

Bernard Seguin

Directeur de recherche Inra, mission
«Changement climatique et effet de serre», Avignon

Références

- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., éditeurs., *Sécheresse et agriculture. Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport*, Inra (France), 72 pp., 2006.
- Badeau V., Dupouey J.L., Cluzeau C., Drapier J., Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2010, rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série no3, «Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques», 2007, p.62-66
- Battisti A., Stastny M., Schopf A., Roques A., Robinet C., Larsson S., Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological applications*, vol.15, 2005, p. 2084-2096
- Cluzeau C., Drapier J., Virion R., Dupouey J.L., *Changements à long terme de la végétation forestière : apport des données de l'Inventaire forestier national*, Rapport final, Projet GIP-ECOFOR, Programme « Forêt et Modifications de l'Environnement », 2001.
- Delecolle R., Soussana J.F., Legros J.P., Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. C.R. Acad. Agric. Fr., vol. 85, 1999, p.45-51.
- Domergue M., Garcia de Cortazar I., Seguin B., Brisson N., Ripoche D., Le réchauffement récent du climat en France et ses conséquences sur l'agriculture. Actes du XVI^e colloque de l'Association internationale de climatologie, Varsovie (Pologne), 10-14 septembre 2003.
- Blazejczyk K., Adamczyk A.B. (éditeurs.), *Acad. Pol. Sci. doc.geogr.*, vol 39, 2003, p. 85-88.
- Domergue M., Legave J.M., Calleja M., Moutier N., Brisson N., Seguin B. Réchauffement climatique : quels effets sur la floraison chez trois espèces fruitières ? *Arboriculture fruitière*, vol.578, 2004, p.27-33.
- Duchêne E., Schneider C., *Grapevine and climate change: a glance at the situation in Alsace*, Agron.for sust.dev., vol.25, 2005, p.93-99
- Dupouey J.L., Bodin J., Déplacements déjà observés des espèces végétales : quelques cas emblématiques, mais pas de migrations massives, rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série no3, «Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques», 2007, p.34-39
- Easterling, W., Aggarwal, P., Batima, P., Brander, K., Erda, L., Howden, M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J. F., Schmidhuber, J., Tubiello, F. *Food, fibre, and forest products. In «Climate Change 2007: Climate Change Impacts, adaptations and vulnerability, IPCC Working Group II»*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 2008.
- EEA, *Impacts of Europe changing climate. An indicator-based assessment*, EEA report no2/2004, 2004, 107 pp. Forêt méditerranéenne (2008). *Changements climatiques en forêt méditerranéenne*, tome XXIX, vol.2., 2008, 264 pp.
- Ganichot B., *Evolution de la date des vendanges dans les Côtes du Rhône méridionales*. Actes des 6^e Rencontres Rhodaniennes. Institut Rhodanien. Orange, France, 2002, p.38-41.
- GIEC (2007a) : Climate change 2007: the physical science basis. Summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change, website: www.ipcc.ch

GIEC (2007b): Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change, website: www.ipcc.ch.

Howden M., Soussana J.F., Tubiello F.N., Chtetri N., Dunlop M., Aggarwal P.K., Adapting agriculture to climate change, *PNAS*, vol 104, 2007, p.19691-19696.

Klötzli F., Walther G.R. (eds.), Conference on recent shifts in vegetation boundaries of deciduous forests, especially due to generam global warming, Birkhäuser, Basel, 1999.

Kremer A., Petit R., L'épopée des chênes européens. *La Recherche*, vol. 342, 2001, p. 40-43.

Legay M., Mortier F. Mengin-Lecreulx P., Cordonnier T., La gestion forestière face aux changements climatiques: tirons les premiers enseignements; *rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série no3, «Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques»*, 2007, p.95-102

Lenoir J., Gégout J.C., Marquet P.A., de Ruffray P., Brisse H., A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century, *Science*, vol 320, 2008, p.1768-1771

Loustau D., ed., *Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France*, rapport final du projet Carbofor, Inra Bordeaux-Pierroton, 2004.

Marçais B., Bergot M., Péronaud V., Lévy A., Desprez-Loustau M.L., Prediction and mapping of the impact of winter temperatures on the development of *P. cinna-momi* cankers on red and pedunculate oak, *Phytopathology*, vol. 94, 2004, p. 826-831.

Marçais b. Desprez-Loustau M.L., Le réchauffement climatique a-t-il un impact sur les maladies forestières, *rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série no3, «Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques»*, 2007, p.47-52

Olesen J.E, Bindi M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy, *Eur.Journ.Agronomy*, vol. 16, 2002, p. 239-262.

Perarnaud V., Seguin B., Malezieux., Déqué M., Loustau D. Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry adapt to 21st century climate change, *Climatic change*, vol.70, 2005, p.319-340.

Reddy K.R., Hodges R.F., *Climate change and global crop productivity*, CABI Publishing, Wallingford, 2000.

Rigolot E., Impact du changement climatique sur les feux de forêt, *Forêt méditerranéenne*, tome XXIX, vol 2, 2008, p.167-176

Roques A., Negeilsen L.M., Impact du réchauffement global sur les populations d'insectes forestiers, *rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série no3, «Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques»*, 2007, p.40-46

Rosenzweig C., Hillel D., Climate change and the global harvest. Oxford University Press, Oxford, 1998.

Seguin B., Garcia de Cortazar.I , Climate warming : consequences for viticulture and the notion of terroirs in Europe, *Acta Horticulturae*, vol. 689, 2005, p.61-71)

Seguin B., Brisson N., Loustau D., Dupouey J.L. *Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt*. In «L'homme face au climat», actes du symposium du Collège de France, Paris, 12-13 oct 2004, ed Odile Jacob, 2006, p.177-204).

Soussana J.F., Changement climatique. Impacts possibles sur l'agriculture et adaptations possibles, *Demeter*, Armand Colin, Paris , 2001, p .195-222.