Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émissions de GES

Bernard Seguin, Jean-François J.-F. Soussana

▶ **To cite this version:**

Bernard Seguin, Jean-François J.-F. Soussana. Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émissions de GES. Prairies, élevage, consommation d'énergie et GES, Mar 2006, France. hal-02816737

HAL Id: hal-02816737
https://hal.inrae.fr/hal-02816737

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émisions de GES

B. Seguin[1], J.F. Soussana[2]

1 : INRA Mission 'Changement climatique et effet de serre', unité Agroclim, site Agroparc, domaine Saint-Paul, F-84914 Avignon cedex 9 ; seguin@ avignon.inra.fr
2 : INRA, Unité d'Agronomie, 214, avenue du Brézet, F-63039 Clermont-Ferrand cedex 2

Résumé

Les interrogations sur l'influence possible des activités humaines sur le climat de la planète sont apparues dans les années 1970, en lien avec les observations sur l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone CO_2, dont le niveau actuel dépasse les 370 ppm, contre 260 à l'époque préindustrielle.

Depuis 1750, la concentration atmosphérique de gaz carbonique (CO_2) s'est accrue d'un tiers. D'autres gaz, présents naturellement à l'état de traces, comme le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O), s'accumulent également dans l'atmosphère et contribuent donc au renforcement de l'effet de serre naturel. Pour la fin du siècle, les modèles prévoient des concentrations atmosphériques en CO_2 situées entre 540 et 970 ppm. L'accroissement moyen de la température de surface est estimé devoir être de 1,5 à 6°C de 1990 à 2100.. Il est presque certain que toutes les surfaces continentales se réchaufferont plus rapidement que la moyenne, particulièrement celles situées à haute latitude en saison froide. Les prédictions sur la pluviométrie sont un peu plus incertaines, compte-tenu de la complexité du cycle de l'eau, mais elles font état en général d'une légère augmentation de la pluviométrie, avec une tendance à la diminution de la pluviométrie estivale dans les zones tempérées de moyenne latitude, qui serait plus marquée autour du pourtour méditerranéen. Par ailleurs, en dehors de ces variations de climat moyen, il est vraisemblable que le changement climatique s'accompagne d'un accroissement de la variabilité et des extrêmes.
Au niveau des impacts, le changement climatique va modifier la donne en créant des conditions, souvent plus favorables, parfois plus défavorables suivant les productions. L'augmentation du CO_2 va potentiellement stimuler la photosynthèse des couverts végétaux et créer des conditions permettant d'augmenter la production de biomasse de l'ordre de 20%. 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. Une adaptation locale basée sur les composantes techniques (choix des variétés, pratiques culturales), qui a fait ses preuves dans le passé, paraît en mesure d'amplifier les positifs et de limiter les effets négatifs, sous réserve que l'eau soit disponible pour l'irrigation. Un déplacement géographique vers le nord est à anticiper, mais il n'est pas directement envisageable pour les productions liées au terroir, comme le sont les AOC.

La confrontation des prédictions isues des scénarios climatiques et des observations récentes renforce de plus en plus notablement la conviction sur l'attribution de ces changements, au-delà des facteurs naturels, à l'accroissement de l'effet de serre par l'action anthropique. La température moyenne de surface a augmenté de 0,6°C (avec une incertitude en plus ou en moins de 0,2°C) depuis 1860. Le XX^{e} siècle a probablement été le siècle le plus chaud depuis 1 000 ans et la décennie 1990 a connu le réchauffement le plus important de ce siècle. Ces données purement climatiques sont corroborées par des observations sur des indicateurs qui en dérivent directement : diminution de la surface de couverture neigeuse et des glaciers de montagne ou de la glace de mer, élévation du niveau de la mer, etc. ……Par ailleurs, même s'il est généralement très délicat d'isoler l'action éventuelle du réchauffement climatique de celui d'un grand nombre d'autres facteurs, les impacts déjà observés sur les écosystèmes, en particulier au niveau de leur phénologie mais aussi, dans certains cas, de leur productivité, attestent de la réalité d'un climat actuel significativement différent de celui des années 1940-1970 et très vraisemblablement en cours d'évolution sous l'action de l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère.

Introduction

Les questions sur la stabilité du climat, au-delà de sa variabilité que l'on pourrait qualifier de naturelle, ne datent pas d'aujourd'hui, et les progrès des sciences ont permis progressivement d'en reconstituer l'histoire marquée par des fluctuations de grande ampleur (ACOT, 2003). Pour en rester à l'épisode le plus récent (l'holocène) qui a suivi la dernière grande glaciation, il s'est traduit par un retour à des conditions moins froides, en gros supérieures de 4 à 5° en température moyenne, qui sont restées globalement stables (dans une fourchette de 1° à 2°) depuis environ 12 000 ans.. Dans les années 1970, le climat apparaissait globalement stable, à condition que l'on élimine les fluctuations inter-annuelles par la prise en compte d'une durée minimale de 30 années, suivant les normes fixées par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Et les projections futures pariaient sur un retour inéluctable à des conditions glaciaires… dans 10 ou 20 000 ans. C'est alors que sont apparues les interrogations sur l'accroissement de l'effet de serre par l'action de l'homme et ses conséquences sur un réchauffement du climat, du coup tout aussi inéluctable, avec des ordres de grandeur de la même ampleur (de l'ordre de 4 à 5°), mais cette fois à l'échéance du siècle à venir.

1. Le contexte de l'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel, qui résulte de la présence dans l'atmosphère de gaz absorbant le rayonnement infrarouge thermique émis par les surfaces terrestres, et sans lequel la température moyenne du globe s'établirait aux alentours de –18°C au lieu de +15°C. C'est l'observation, au début des années 70, d'une augmentation notable de la concentration de certains de ces gaz à effet de serre (GES), en lien évident avec l'activité anthropique, qui a conduit à envisager l'éventualité d'un changement climatique par le renforcement induit de cet effet de serre. Au premier rang de ces gaz figure le dioxyde de carbone CO_2, dont le niveau actuel avoisine les 370 ppm (parties par million), contre 260 à l'époque préindustrielle, et qui devrait atteindre de 450 à 1 000 ppm à la fin du siècle, suivant l'évolution des politiques énergétiques. Depuis la prise de conscience de cette influence de l'homme sur le climat global (qui n'est d'ailleurs qu'une des composantes de ce qu'on dénomme changement global), les prévisions des spécialistes du climat se sont progressivement à la fois affinées et affermies, au travers des rapports successifs du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat, GIEC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, en anglais).

2. Le renforcement anthropique de l'effet de serre

On sait que l'effet de serre naturel est dû à la propriété de certains gaz de l'atmosphère (dont les molécules contiennent au moins trois atomes) d'absorber le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, et de le renvoyer vers cette surface, entraînant son réchauffement. La différence entre ce rayonnement émis par la surface (390 $W.m^{-2}$ en moyenne) et le rayonnement émis par la Terre vers l'espace (240 $W.m^{-2}$) représente le forçage radiatif (150 $W.m^{-2}$) lié à l'effet de serre naturel de l'atmosphère. Ce forçage est augmenté par l'accroissement des concentrations en gaz à effet de serre provoqué par les activités humaines, qui augmente l'opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge. On a pu ainsi calculer qu'un doublement de concentration du seul CO_2 par rapport à sa concentration préindustrielle entraînait un forçage additionnel de 4 $W.m^{-2}$ environ (d'après DUPOUEY *et al.,* 2005).

Depuis 1750, la concentration atmosphérique de gaz carbonique (CO_2) s'est accrue d'un tiers. La concentration actuelle n'a jamais été dépassée depuis 420 000 ans, comme l'indique l'analyse de bulles d'air piégées dans les glaces polaires. Le taux d'augmentation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère a atteint 0,4% par an durant les deux dernières décennies. Ce taux n'a jamais été aussi élevé depuis au moins 20 000 ans (IPCC, 2001). L'accroissement de 30% de la concentration en CO_2 pendant les cent dernières années résulte de la combustion de combustibles fossiles et des changements d'utilisation des terres, notamment la déforestation.

Outre le dioxyde de carbone, appelé communément gaz carbonique, d'autres gaz, présents naturellement à l'état de traces, comme le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O) s'accumulent dans l'atmosphère. Les sources de méthane sont à la fois naturelles (agriculture, rizières, zones humides, feux de biomasse) et industrielles (gaz naturel, charbon). Quant au protoxyde d'azote (N_2O), s'il est émis en partie par l'industrie, ce sont les sols agricoles et les décharges qui sont responsables de la majorité des émissions en France.

Les capacités de réchauffement de l'atmosphère par ces gaz sont **caractérisées par 2 indicateurs** :

- le **coefficient de forçage radiatif additionnel** (en $W.m^{-2}$), qui traduit la relation entre l'énergie reçue et l'augmentation de température qu'elle engendre dans le système surface terrestre - troposphère, selon la définition spécifique qui en a été donnée par l'IPCC (TEGART *et al*., 1990 ; HOUGHTON *et al*., 1992).

- le **potentiel de réchauffement global** (PRG), un indicateur qui intègre à la fois les propriétés de forçage radiatif des composés actifs et leur durée de vie dans l'atmosphère. Il a été défini comme le rapport entre le forçage radiatif intégré dans le temps consécutif à l'émission instantanée d'un kg de substance trace dans l'atmosphère et le forçage radiatif correspondant lié à l'émission d'une quantité équivalente du gaz de référence, à savoir le CO_2 (TEGART *et al*., 1990). Cet indicateur permet ainsi d'établir des équivalences entre les gaz impliqués dans l'effet de serre sur une période de temps choisie et de les convertir en équivalents CO_2.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (tableau 1) mélangés de façon homogène à la troposphère est maintenant admise comme la première cause du réchauffement (IPCC, 2001). Même si les travaux récents font intervenir un effet complémentaire de l'ozone et des aérosols ou du volcanisme et des modifications de l'énergie solaire absorbée par la surface terrestre par suite des modifications de l'occupation du sol dans la modélisation du climat, leur effet reste dominant. Au niveau global, leur part respective dans le renforcement anthropique de l'effet de serre reste proche des estimations de l'IPCC (2001) traduites dans la figure 1, à savoir environ 60% pour le dioxyde de carbone, 20% pour le méthane et 6% pour l'oxyde nitreux. Il faut noter qu'au niveau de la France, les estimations du CITEPA pour la même période faisaient apparaître des parts respectives assez différentes, car, si le premier reste largement majoritaire en s'approchant des 70%, c'est l'oxyde nitreux qui se trouve au deuxième rang avec presque 16% (essentiellement du fait des émissions en agriculture), le méthane n'intervenant que pour 12%.

TABLEAU 1 – La concentration des principaux GES anthropiques mélangés de façon homogène à la troposphère et évaluation de leur contribution respective au forçage radiatif (d'après IPCC, 2001).

Gaz trace	CO_2	CH_4	N_2O	CFC-11	CFC-12	HCFC-22	CF_4
Concentration pré-industrielle*							
	280 ppmv	700 ppbv	275 ppbv	0	0	0	40 pptv
Concentration en 1998*							
	365 ppmv	1745 ppbv	314 ppbv	268 pptv	533 pptv	132 pptv	80 pptv
Augmentation annuelle*							
	1,5 ppmv/an	7 ppbv/an	0,8 ppbv/an	-1,4 pptv/an	4,4 pptv/an	5 pptv/an	1 pptv/an
	0,4%/an	0,6%/an	0,25%/an	0%/an	1,4%/an	5%/an	2%/an
Durée de vie (années)							
	50 à 200	8,4 à 12	114 à 120	45	100	12	>50 000
Contribution au forçage radiatif							
($W.m^{-2}$)	1,46	0,48	0,15	0,07	0,17	0,03	0,003
(%)	60	20	6,2	2,9	7,0	1,2	0,1
Potentiel de réchauffement global							
	1	62	275	6300	10200	4800	3900

* ppmv : partie par million en volume (10^{-6}) ; ppbv : partie par milliard en volume (10^{-9}) ; pptv : partie par trillion en volume (10^{-12}). La contribution au forçage radiatif est calculée depuis l'ère préindustrielle (1750) jusqu'à l'époque actuelle (fin des années 1990). Le potentiel de réchauffement global (PRG) est calculé pour un horizon de 20 ans en équivalents massiques CO_2. Par exemple, une tonne de CH_4 aura, à cet horizon, 62 fois le PRG d'une tonne de CO_2.

C'est en grande majorité sur des deux GES que peuvent porter les efforts de l'agriculture et de l'élevage pour réduire la contribution de ce secteur aux émissions à l'échelle nationale, comme le

montre l'ensemble des articles qui suivent. Il faut cependant noter que l'originalité de ce secteur est de pouvoir apporter une contribution significative par la fonction de puits de carbone que représente le couvert végétal du fait de l'absorption du dioxyde de carbone par le processus de photosynthèse.

Cela se traduit actuellement par un intérêt renforcé pour les différentes utilisations de la biomasse à des fins énergétiques diverses, ainsi que pour le stockage de carbone dans les sols agricoles (ARROUAYS et al 2002) : si celui-ci peut être augmenté par la mise en œuvre de techniques culturales appropriées, la conversion de terres arables en prairies apparaît comme la plus significative (en dehors de l'afforestation). Le stockage sur 20 ans permis par cette conversion s'élèverait à 0.5tC/ha/an, ce qui conduirait à une valeur allant de 0.06 à 0.45 Mt/C/an pour des hypothèses de conversion de 10.000 à 80.000ha/an. Il faut cependant noter que cette hypothèse haute, correspondant à réaffecter aux prairies sur 20 ans la moitié de la surface perdue depuis 1970, représenterait cependant seulement 0.5 environ 0.3 % d'économie par rapport à l'ensemble des émissions actuelles de GES à l'échelle du territoire français.

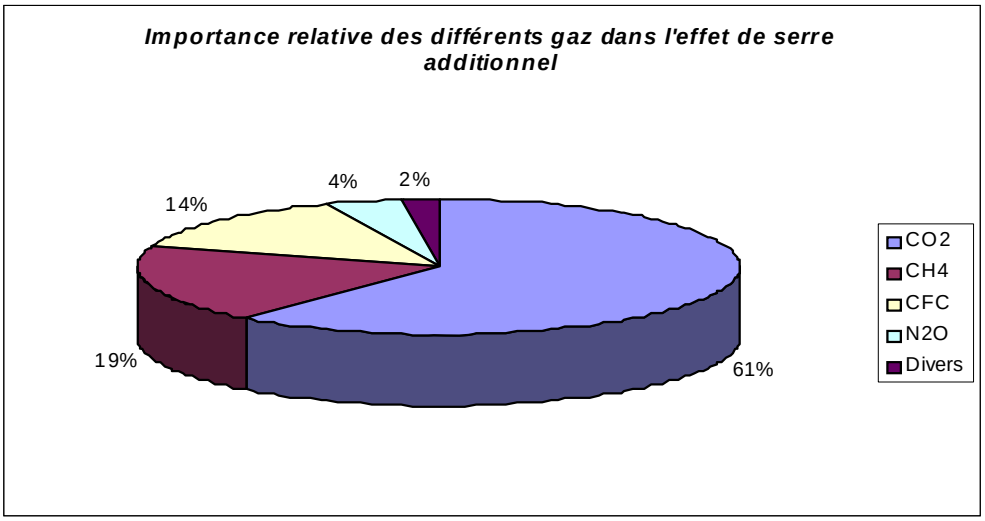


Figure 1. Contribution relative des différents GES dans l'effet de serre à l'échelle globale de 1850 à 2000 (d'après JOUSSAUME 1999)

3. Le changement climatique : les prédictions et les impacts sur la production végétale

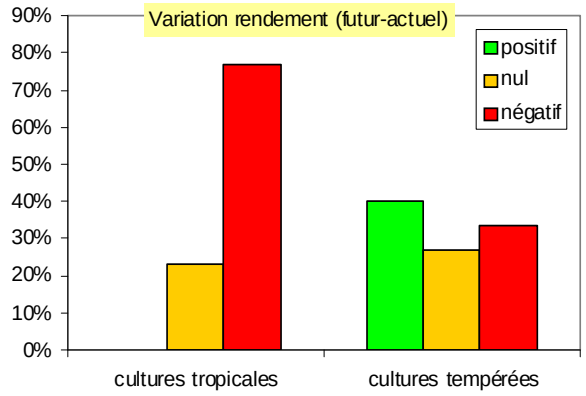
A la fin du siècle, les modèles prévoient des concentrations atmosphériques en CO_2 situées entre 540 et 970 ppm, à comparer avec une concentration avant la révolution industrielle de 280 ppm et avec une concentration actuelle d'environ 367 ppm. L'accroissement moyen de la température de surface est estimé devoir être de 1,5 à 6°C de 1990 à 2100. Cette augmentation serait sans précédent dans les 10 000 dernières années. Il est presque certain que toutes les surfaces continentales se réchaufferont plus rapidement que la moyenne, particulièrement celles situées à haute latitude en saison froide. Une comparaison des scénarios les plus récents d'évolution de la pluviométrie saisonnière dans 32 régions du monde faite par le groupe II de l'IPCC montre une tendance à l'augmentation pour l'Europe du Nord (0 à +3% par décennie) au printemps, à l'automne et en hiver. En revanche, pour la zone Europe du Sud et Afrique du Nord, les modèles prédisent une réduction de la pluviométrie estivale (de –0,2 à –6% par décennie), qui pourrait également intervenir en Europe du Nord (de –1,8 à +0,8% par décennie). Une tendance similaire à un assèchement estival se retrouve dans les simulations concernant d'autres régions de l'hémisphère Nord (Amérique du Nord, Chine, Méditerranée), même si cette tendance est loin de constituer une certitude.

La traduction de ces scénarios climatiques en termes d'impact sur l'agriculture a fait l'objet, pour la France, de travaux combinant expérimentation et modélisation des cultures (DELECOLLE et al, 1999, SOUSSANA 2002). Un bilan actualisé de ces travaux a été récemment établi (SEGUIN et al 2005), et nous en présentons ci-après les grandes lignes.

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) atmosphérique CO_2. Avec l'hypothèse d'un doublement du CO_2 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 augmentation 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). Par ailleurs, il faut s'attendre à une amélioration de l'efficience de l'eau par suite de la diminution de la conductance stomatique.

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 (par exemple pour le riz, dont la fertilité des épillets décroît fortement au-delà de 34 °C, ou pour le maïs, dont la viabilité du pollen baisse au-delà de 36°C), 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 sur les cultures telles que pratiquées actuellement 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. Au bout du compte, le bilan résultant en la production de biomasse peut prendre des aspects variés, en fonction du type de couvert et des conditions climatiques associées aux conditions culturales pour les plantes cultivées (fig 2).

Figure 2: effet du changement climatique sur le rendement des cultures, à partir de 43 études répertoriées dans le 3ème rapport de l'IPCC (d'après SEGUIN et al 2005)



Au niveau des grandes cultures, les résultats des simulations effectuées avec les modèles de culture sur le blé et le maïs permettent de conclure à des effets légèrement positifs sur le premier (avec des augmentations de rendement allant de 2.5 % à 5.7 %), et des effets plus variables sur le maïs (+ 10 % à - 16 % dans le cas d'une culture irriguée dans le sud-est). Au niveau des prairies (SOUSSANA et al 200 ?), la conjugaison de travaux expérimentaux (sous serre et en enrichissement naturel à l'extérieur) et de modélisation à partir d'un modèle d'écosystème prairial conduit à envisager, dans les conditions du Massif Central, une augmentation de la production de biomasse aérienne de l'ordre de 25 % (dont 18 % attribuables au seul doublement de CO_2). En termes de système d'élevage, la valorisation de cette augmentation de production devrait permettre une augmentation du chargement

animal (en gros de 20%) ou une augmentation de la saison de pâturage de l'ordre de trois semaines, avec un accroissement de l'ingestion de 7 à 20 % et de 2 à 20 % pour la production de viande.
En ce qui concerne les cultures pérennes (arbres fruitiers et vigne), le facteur primordial devrait être l'avancée des stades phénologiques, d'autant plus marquée que l'on s'éloigne en cours de saison de la levée de dormance, qui risque elle d'être plus tardive à cause du manque de froid. Pour certaines espèces telles que l'abricotier, les hivers doux risquent même de créer des troubles physiologiques (chute de bourgeons, fruits avortés). Ensuite, l'action de la chaleur reprendra vite le dessus et l'avancée de la date de floraison peut conduire paradoxalement à augmenter le risque de gel, et à envisager des conditions climatiques moins favorables pour la fécondation et la pollinisation, en dépit du réchauffement des températures. Pour la vigne, la période de la maturation sera décalée d'après le 15 août à courant juillet, avec des conséquences certaines sur la qualité de la vendange, plus chargée en sucre (et donc en degré alcoolique) et moins en acide.

Il faut relativiser la portée de ces prévisions en notant que la disponibilité de l'eau peut devenir un facteur limitant prédominant, susceptible de fortement handicaper les cultures en cas de sécheresse forte et récurrente comme le montre l'expérience des années récentes, en particulier bien sûr 2003. Par ailleurs, les éléments qui viennent d'être présentés s'appuient uniquement sur les valeurs moyennes des facteurs climatiques. L'éventualité d'évènements extrêmes et, de façon plus large, la prise en compte de la variabilité de ces facteurs pourraient conduire à des impacts différents, par le dépassement de valeurs-seuils encore mal cernées. Enfin, il faudrait considérer l'impact sur les adventices (mauvaises herbes) et les insectes et maladies cryptogamiques, encore mal cerné à l'heure actuelle. Il a ainsi pu être constaté que, dans certains cas, le carpocapse des pommes est passé, dans le midi, de deux à trois cycles par an. A l'inverse, le phoma du tournesol a été sans doute limité ces dernières années dans le Sud-ouest par les fortes températures, et pratiquement éradiqué pour le moment par la sécheresse de 2003. Au-delà des bouleversements des systèmes écologiques complexes que représentent les relations entre hôtes et parasites (il est possible que les décalages de cycles en réponse à l'augmentation de température soient significativement différents pour les deux composantes), il faut également prendre en compte la possibilité de mouvements géographiques 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. Des recherches sont en cours pour établir, par exemple, le rôle du réchauffement sur l'apparition dans les serres du sud d'une aleurode (Bemisia tabacci)

4. Adaptation de l'agriculture

sur place … 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 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, qui seront abordés dans le paragraphe suivant.

ou se déplacer … 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 ou 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.

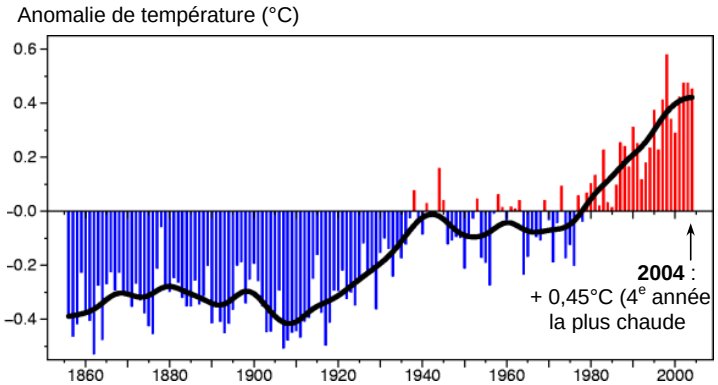
Cependant, dans l'hypothèse de déplacements géographiques, la nature du lien avec le caractère local jouera un grand rôle : s'il apparaît possible, a priori, de cultiver du blé ou du maïs dans des régions différentes, cela n'irait pas de soi pour les productions plus typées (au premier rang, évidemment 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. Les A.O.C ne se délocalisent pas !!! L'année 2003 a été plutôt rassurante sur ce point: même s'il est encore trop tôt pour en connaître le millésime, et si la conjonction de la sécheresse et de la canicule a eu des effets néfastes par certains aspects, la vigne a démontré une capacité certaine d'adaptation à ces conditions exceptionnelles.

5. Le changement climatique : les évolutions récentes à l'échelle globale et leur attibution

L'analyse de séries historiques provenant de milliers de stations réparties sur l'ensemble du globe a nécessité la mise en œuvre de procédures complexes d'homogénéisation (pour prendre en compte les problèmes causés par les évolutions techniques des stations et des capteurs, ainsi que des changements de site ou d'environnement de ces sites). C'est donc seulement depuis quelques années qu'il a été possible d'établir sans ambiguïté les éléments suivants (voir le dernier rapport de l'IPCC en 2001, repris par SALINGER, 2005) :

- **pour la température**, **un réchauffement de l'ordre de 0,6 °C depuis 1860**, la date la plus ancienne pour laquelle des données suffisantes existent à l'échelle du globe. Le réchauffement du XX^{e} siècle est probablement le plus important de ceux constatés depuis les dernières mille années, et la dernière décennie est la plus chaude de toutes celles considérées : 9 des années les plus chaudes se situent entre 1995 et 2004 (la plus chaude étant 1998, avec 0,58°C au dessus de la moyenne 1961-1990), avec la seule année 1996 remplacée par 1990 dans ce classement (JONES et MOBERG, 2003, figure 3). **Deux périodes de réchauffement** apparaissent à partir de ces travaux: de 1910 à 1945, avec une augmentation de 0,14 °C, puis 0,17°C pour 1976-1999.

FIGURE 3 – Evolution de la température de l'air depuis 1860 (site http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/).



Au niveau de la distribution spatiale, la première phase a vu un réchauffement plus marqué de l'hémisphère Nord, contrairement à la phase suivante. Par contre, depuis 1976, le réchauffement est le plus net aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, et sur les surfaces continentales, qui se réchauffent plus que les surfaces océaniques. Il faut également noter que **les températures minimales augmentent deux fois plus vite que les maximales** ;

- **pour les précipitations, la tendance est moins claire** : les mêmes sources indiquent une tendance à la hausse de la pluviométrie annuelle à l'échelle globale, cependant très modérée (2%) et surtout très variable dans le temps et l'espace : elle peut atteindre 7 à 12% dans les latitudes élevées de l'hémisphère Nord, surtout à l'automne et en hiver pour les régions boréales. La pluie a diminué sur la plupart des terres intertropicales (–0,3% par décennie), quoiqu'il y ait une reprise durant les dernières années. Il est probable qu'une augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes s'est produite dans les latitudes moyennes et hautes de l'hémisphère Nord. Les épisodes chauds du phénomène *El Niño* ont été plus fréquents, plus durables et plus intenses depuis le milieu des années 1970.

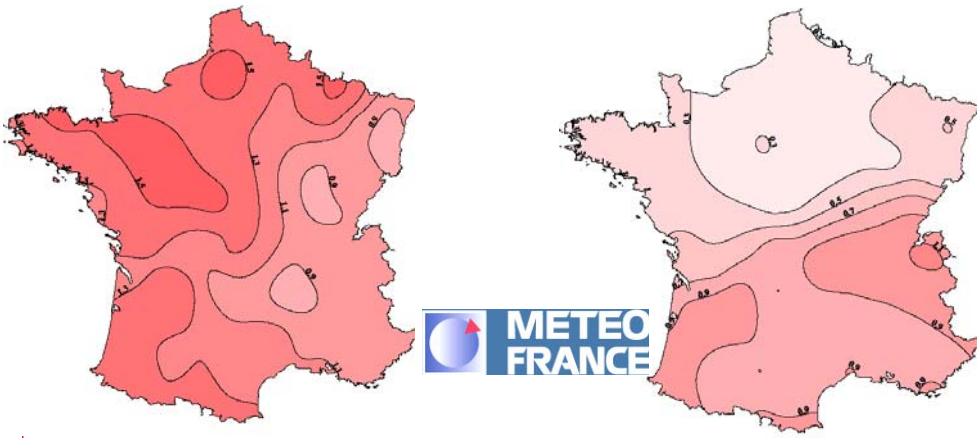
En Europe, les observations sont plus contrastées (EEA, 2004) : elles font état d'un accroissement pouvant aller de 10 à 40% sur le siècle passé pour les régions du nord, en particulier en hiver, et d'une baisse significative (jusqu'à 20%) de la pluviométrie en zone méditerranéenne (jusqu'à 20%, dont 10% en période estivale) ;

- au niveau des **autres facteurs**, il a surtout été détecté une baisse (de 4 à 6%) du rayonnement solaire global sur la période 1950-1990 (RODERICK et FARQUAHR, 2002), mais cette tendance paraît s'inverser pour une augmentation sur les 15 dernières années (WILD *et al.,* 2005).

6. Le changement climatique récent en France

Pour le territoire français, ces grandes lignes se retrouvent, avec des nuances (MOISSELIN *et al.,* 2002). Pour la température (figure 4), on observe un réchauffement plus marqué en moyenne, de l'ordre de 0,9°C, en particulier dans le nord et l'ouest pour les minimales et le sud pour les maximales.

FIGURE 4 – Réchauffement en France au cours du siècle passé (d'après MOISSELIN *et al.,* 2002).



Commentaire [CH1]: Il n'y a pas de légendes pour les isothermes de réchauffement ; Est-ce que ces cartes vont êtes lisibles après une impression en gris ?

Pour les pluies, les séries homogénéisées de précipitations dessinent une pluviométrie plutôt en hausse sur le XX^{e} siècle et un changement de sa répartition saisonnière : moins de précipitations en été et davantage en hiver. Des contrastes nord-sud apparaissent : on trouve quelques cumuls annuels de précipitation en baisse sur le sud du territoire français. L'étude de l'indice de sécheresse de De Martonne montre des noyaux de sécheresse accrue sur les régions les plus méridionales. Au nord du territoire, au contraire, l'augmentation conjuguée des précipitations et des températures conduit à un climat plus humide, ce qui traduit une accélération du cycle de l'eau.

Au niveau de l'insolation apparaît une tendance nette à une diminution dans le nord (–11%) et une augmentation dans le sud (+7%) (MOISSELIN *et al*., 2003).

Quant aux événements extrêmes, si l'on a pu noter un peu partout dans le monde et dans le cas de la France en particulier des épisodes récents ayant eu des conséquences dramatiques (tempête de décembre1999, plusieurs épisodes cévenols automnaux intenses, sécheresses fréquentes depuis

1976, avec la répétition de 2003, 2004 et 2005), il est encore difficile pour les climatologues de conclure à une tendance significative, malgré l'impact de plus en plus marqué, en particulier pour les compagnies d'assurance, qui est dû pour partie à une amplification des conséquences générées par les évolutions des modes d'occupation des sols et des modes de vie en général.

7. Les impacts observés sur les écosystèmes terrestres

Comme le climat, et en partie à cause de lui, les écosystèmes terrestres, qu'ils soient naturels ou 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 écologique à ce réchauffement climatique récent n'est pas une question scientifique facile, d'une part parce que de nombreux facteurs autres que le climat agissent sur les réponses de différents systèmes ou secteurs (en premier lieu les facteurs anthropiques allant de l'économie à l'utilisation de la surface ou la modification du type d'occupation, en passant par les pollutions diverses dans l'atmosphère, les eaux et les sols), 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. Il est donc logique que ces impacts soient seulement réellement identifiés depuis peu, avec quelques années de recul par rapport à la mise en évidence effective du réchauffement qui date seulement de la fin des années 90.

Au niveau global, et en nous nous limitant aux écosystèmes continentaux, les effets observés peuvent être résumés ainsi :

- **pour la cryosphère, une fonte accélérée** qui se traduit par un recul généralisé des glaciers, une augmentation du ruissellement et des débits dans les zones glaciaires ou nivales, ainsi que des avalanches de glaces et de rochers, le **déplacement des mammifères dans l'Arctique et de la faune de l'Antarctique**, la fonte du permafrost dans les hautes latitudes, le déplacement vers le haut de stations de ski, etc. ;

- **pour l'hydrologie et les ressources en eau, l'accroissement des sécheresses en zone aride** et semi-aride, les **inondations et les glissements de terrain pendant la saison chaude en zones montagneuses** ;

- **pour les eaux douces, fleuves et rivières se réchauffent**, avec des conséquences bien établies sur la stratification thermique et la composition chimique, l'abondance et la productivité, la composition des communautés, la phénologie, la distribution et la migration des espèces végétales et animales ;

- **pour les systèmes biologiques terrestres**, des réponses bien établies **dans l'hémisphère Nord** avec **une avancée généralisée de la phénologie au printemps, et une saison de végétation plus longue**. La population de certaines espèces a diminué ou même disparu, et des mouvements vers le nord ou des altitudes plus élevées ont été observés ;

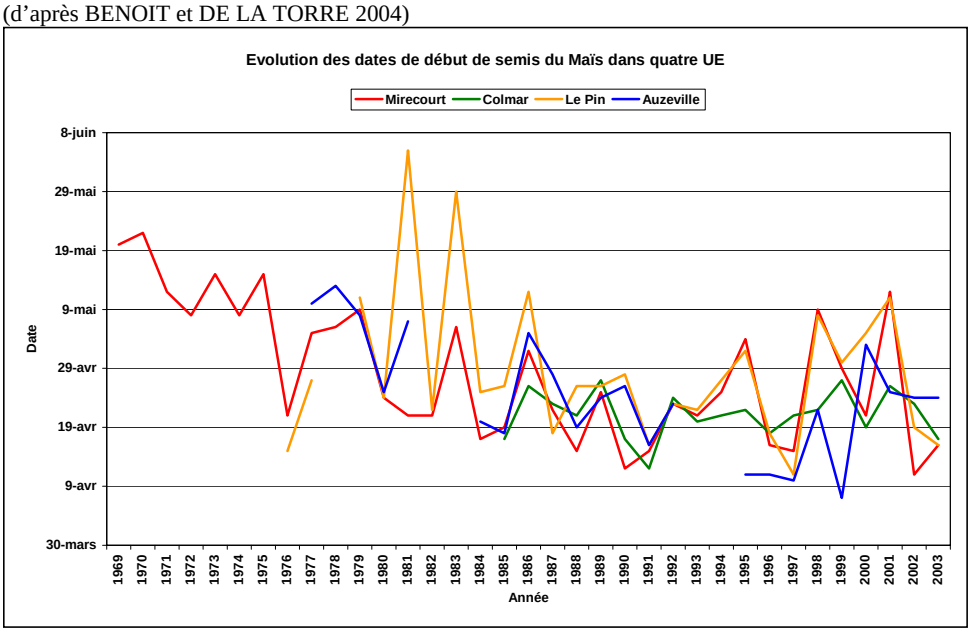
- **pour l'agriculture et la forêt, une avancée similaire de la phénologie en Europe et en Amérique du nord, avec une saison de végétation sans gel allongée** (en partie sans doute à l'origine de l'augmentation de la productivité forestière, de l'ordre de 30 à 40%, maintenant confirmée par des observations satellitaires). En dehors de l'observation d'une avancée systématique des dates de floraison des arbres fruitiers, l'illustration la plus nette se situe **en viticulture**, particulièrement sensible à ce réchauffement : 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. Pour **la forêt**, on a observé également une avancée des dates de débourrement de l'ordre de 5 à 8 jours sur l'Eurasie, une migration vers le nord de la limite forêt-toundra et une augmentation des feux de forêt au Canada, ainsi qu'une extension de certains insectes aux USA

Au niveau européen, le récent état des lieux effectué par l'Agence européenne de l'environnement (EEA, 2004) retient les tendances constatées sur une sélection d'indicateurs qui recoupe les systèmes et secteurs considérés par le GIEC : retrait des glaciers pour 8 sur 9 des régions concernées (avec un recul d'ensemble évalué à 1/3 de la surface et ½ de la masse entre

1850 et 1980, et 20 à 30% de perte supplémentaire depuis cette période, dont 10% pour le seul été 2003), diminution de la période de couverture neigeuse (entre 45 et 75 °N de 8,8 jours par décennie entre 1971 et 1994), augmentation de la saison de végétation de 10 jours entre 1962 et 1995 et de la productivité de la végétation de 12%, migration vers le nord et vers le haut de plantes (diversité enrichie de l'Europe du nord-ouest et en montagne pour 21 de 30 sommets alpins), accroissement du taux de survie de populations d'oiseaux hivernant en Europe, etc..

Au niveau français, si les agriculteurs (et les éleveurs) font état d'une modification des calendriers culturaux 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, voir fig 5), 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 (dates d'apparition des stades de développement) sur les arbres fruitiers et la vigne, cultures *a priori* beaucoup moins dépendantes sur ce point des décisions culturales, 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, 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).

FIGURE 5 – Evolution de la date de semis du maïs sur quatre domaines expérimentaux de l'INRA (d'après BENOIT et DE LA TORRE 2004)



Pour la vigne, l'augmentation de température moyenne s'est traduite par des conditions globalement plus favorables et avec moins de variabilité inter-annuelle pour tous les vignobles français, avec une augmentation de teneur en alcool (de 1 à 2 degrés suivant les régions) et une diminution de l'acidité. La même avancée phénologique est également détectable pour les forêts, qui ont par ailleurs notablement augmenté leur productivité depuis le début du siècle (de l'ordre de 30 à 40%), sans qu'il soit encore possible de l'attribuer à un effet déjà marquant de l'augmentation du gaz carbonique, du réchauffement ou d'une fertilisation par l'azote contenu dans les pluies.

Au niveau des **insectes et maladies**, il apparaît encore peu de signes indiscutables que l'on pourrait relier directement au changement climatique : extension vers le nord et en altitude de la chenille processionnaire du pin et observations sur le cycle du carpocapse qui a vu l'apparition d'une troisième génération ; à l'inverse, extinction du phomopsis du tournesol dans le Sud-Ouest après la canicule de 2003. Il faut également prendre en compte la possibilité de mouvements géographiques

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), mais aussi végétal : une mouche blanche (*Bemisia tabaci*) originaire des régions subtropicales a été repérée depuis une dizaine d'années en Europe, et menace actuellement les cultures sous serre du sud du continent.

Ces différentes observations proviennent, pour l'essentiel, des travaux de l'INRA dans les domaines de l'agriculture et de la forêt. Pour une vision plus large sur les milieux naturels, elles peuvent être complétées par celles rassemblées dans l'ouvrage de DUBOIS et LEFEVRE (2003) et le livret édité par le RAC-F (2005).

Conclusion : le réchauffement et l'effet de serre

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 soît causé par l'augmentation de l'effet de serre évalué dans les modèles climatiques, comme devrait l'établir encore plus clairement le prochain rapport du GIEC prévu pour 2007. L'impérieuse nécessité de limiter l'ampleur de la perturbation engendrée par l'augmentation des GES apparaît de plus en plus clairement.

Bien évidemment, les projections sur les impacts reposent sur la crédibilité des scénarios du futur. Si la perspective d'une augmentation significative de la température moyenne apparaît fortement crédible, sa répartition saisonnière et sa variabilité, ainsi que la fréquence des extrêmes demeure un sujet de questionnement, au même titre que les prévisions sur les pluies qui ont un impact tout aussi primordial.
Pour le moment, et de façon schématique, il est permis de penser qu'un réchauffement limité (de l'ordre de 2°) ne provoquerait qu'un léger déplacement d'équilibre, restant dans les limites des capacités d'adaptation presque traditionnelles : le siècle passé a bien surmonté des variations des températures estivales de l'ordre de + ou – 1°, et la génétique a permis de remonter la culture du maïs-grain au nord de Paris par rapport à l'ancienne limitation géographique au sud-ouest ou dans certaines régions de Rhône-Alpes. Par ailleurs, les régions du nord pourraient même bénéficier de ce réchauffement.
Au-delà, il est difficile de cerner les conséquences d'un réchauffement avoisinant les 4 à 5°.
Les travaux effectués dans le cadre du projet GICC- Seine avec le scénario A2 montrent une limitation plus forte de la stimulation du CO_2 sur la photosynthèse, mais avec des effets sur le rendement peu marqués. Ils sont d'ailleurs en accord les synthèses au niveau mondial, qui diagnostiquent des baisses de rendement plus fortes pour le blé et le maïs, sans faire cependant apparaître de rupture véritable (fig 4). L'effet direct de l'augmentation de température serait sans doute plus fort sur la production viticole et le terroir. Par ailleurs, la remontée possible vers le nord de certaines productions serait nettement accentué. Mais le principal bouleversement serait sans doute à attendre de l'accentuation de la sécheresse estivale, en particulier pour la partie sud de l'hexagone. L'exemple de l'été 2003 a montré un impact très significatif, plus fort que celui des températures élevées de l'épisode de canicule, même s'il est difficile de séparer les deux. Sur un épisode isolé, les conséquences à court terme ont pu être réduites, mais la perspective d'un retour fréquent de tels épisodes met au premier rang des préoccupations les tensions vraisemblables sur la ressource hydrique et la compétition de l'irrigation avec les autres usages.

Références bibliographiques

ACOT P.(2003) : *Histoire du climat , éd. Perrin*, 309p.

ARROUAYS D., BALESDENT J., GERMON J.C., JAYET P.A., SOUSSANA J.F., STENGEL P. eds.(2002). *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France* ? Expertise scientifique collective, Synthèse, INRA, 32 p.

BENOIT M., DE LA TORRE C.(2004). *Changement climatique et observation à long terme en unités expérimentales ; évolution des pratiques agricoles et des réponses physiologiques des couverts végétaux.* Journées MICCES 2004, http://www.avignon.inra.fr/MICCES

DELECOLLE R., SOUSSANA J.F., LEGROS J.P., *Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française*. C.R.Acad.Agric.Fr. 85 (1999), 45-51.

DUBOIS P.J., LEFEVRE P. (2003) : *Un nouveau climat. Les enjeux du réchauffement climatique*, éd La Martinière, 255p.

DUPOUEY J.L., ARROUAYS D., BALESDENT J, GABRIELLE B., GOSSE G., PIGNARD G., SEGUIN B., SOUSSANA J.F (2005) : "Rôle de l'agriculture et des forêts dans l'effet de serre", *Chimie verte,* P. Colonna éd., Lavoisier, ch 16, 447-486.

EEA (2004) : *Impacts of Europe changing climate. An indicator-based assessment*, EEA report n°2/2004, 107 pp.

GANICHOT B. (2002) : "Evolution de la date des vendanges dans les Côtes du Rhône méridionales", *Actes des 6e rencontres rhodaniennes*, Institut Rhodanien, Orange, 38-41.

HOUGHTON J.T., CALLANDER B.A., VARNEY S.K. (1992): *Climate change 1992, The supplementary report to the IPCC scientific assessment*, IPCC Scientific Assessment Working Group, Houghton *et al.* ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 200 p.

IPCC (2001) : *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC,* Cambridge University Press, Cambridge.

JONES P.D., MOBERG A.(2003) : "Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001", *Journal of Climate*, 16, 206-223.

JOUSSAUME S. (1999). *Climat d'hier à demain,* CNRS Editions, 143p.

LE ROY LADURIE E. (1983) : *Histoire du climat depuis l'an mil*, Collection champs, éd. Flammarion, deux volumes (tome I : 287 p., tome II : 254 p.).

MOISSELIN J.M, SCHNEIDER M., CANELAS M., MESTRE C.O. (2002) : "Les changements climatiques en France au XX° siécle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations", *La Météorologie*, 38, 45-56.

MOISSELIN J.M, CANELAS M ., SCHNEIDER M., DUBUISSON B. (2003) : "Les longues séries de référence pour l'étude des changements climatiques", *Actes des journées AMA édités par Météo-Franc*e, Toulouse, 95-98.

RAC-F (2005) : *Changement climatique : la nature menacée en France*, Brochure éditée collectivement avec FNE, WWF, LPO, Greenpeace, 24 pp.

RODERICK M.L., FARQUAHR G.D. (2002) : "The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years", *Science*, 298, 1410-1411.

SALINGER J.M. (2005) : "Climate variability and change :past, present and future- an overview", *Climatic change*, 70, 9-29.

SEGUIN B., DOMERGUE M., GARCIA DE CORTAZAR I., BRISSONN., RIPOCHE D. (2004) : "Le réchauffement climatique récent : impact sur les arbres fruitiers et la vigne", *Lettre pigb-pmrc France Changement global*, n° 16, 50-54.

SEGUIN B., BRISSON N., LOUSTAU D., DOUPOUEY J.L.(2005) *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, 177-203.

SOUSSANA J.F., *Changement climatique. Impacts possibles sur l'agriculture et adaptations possibles.* In : Demeter, Armand Colin, Paris (2001), 195-222.

SOUSSANA J.F., TEYSSONERE F., PICON-COCHARD C., CASELLA E., BESLE J.M., LHERM M., LOISEAU P. (200?). *Impacts des changements climatiques et atmosphériques sur la prairie et sa production.* Fourrages, xxx

TEGART W.J.MCG., SHELDON G.W., GRIFFITHS D.C. (1990) : *Climate change : the IPCC impacts assessment,* Tegart *et al.* ed., Australian Government Publishing Service, Canberra, Australie.

WILD M. *et al.* (2005) : "From dimming to brightening :decadal changes in solar radiation at earth's surface", *Science*, 308, 847-850.