

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

B. Seguin<sup>1</sup>, J.F. Soussana<sup>2</sup>

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](mailto: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<sub>2</sub>, dont le niveau actuel avoisine les 370 ppm, contre 260 à l'époque préindustrielle.

Depuis 1750, la concentration atmosphérique de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub> 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. D'autres gaz, présents naturellement à l'état de traces, comme le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), s'accumulent également dans l'atmosphère et contribuent donc au renforcement de l'effet de serre naturel. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, on peut estimer que le dioxyde de carbone contribue pour 60% à l'effet de serre, le méthane pour 20% et l'oxyde nitreux pour 6%. Enfin, les chlorofluorocarbones (CFC) et d'autres gaz traces d'origine industrielle interviennent pour 14%.

Pour la fin du siècle, les modèles prévoient des concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub> 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. 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. 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.

La confrontation de ces prédictions du futur 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, la première date pour laquelle on dispose de données météorologiques suffisantes pour des estimations globales. Le XX<sup>e</sup> 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.

Les 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. Et ceci, malgré des fluctuations locales assez rapides (jusqu'à 10° en une centaine d'années, découverte récente à partir d'analyses de sédiments) ou des variations plus globales correspondant, de manière schématique et pour l'Europe, aux périodes de l'optimum médiéval des X<sup>e</sup> au XIII<sup>e</sup> siècle ou du petit âge glaciaire allant du XIV<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup>, bien mises en évidence par les historiens à partir de l'analyse des séries historiques d'avancée des glaciers ou de dates de ban de vendange (LE ROY LADURIE, 1983). 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<sub>2</sub>, 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 affirmées, au travers des rapports successifs du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat, GIEC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, en anglais). On peut admettre un consensus assez large de la communauté sur la très forte probabilité de réalisation des scénarios présentés par les experts de l'IPCC dans leur 3<sup>e</sup> rapport (2001) : augmentation de la température du globe entre 2° et 6° (suivant les modèles, mais aussi suivant les hypothèses d'évolution du CO<sub>2</sub>) ; effet plus incertain pour la pluviométrie, avec une tendance à l'augmentation en contexte déjà humide et, inversement, un renforcement des situations sèches ; par ailleurs, tendance également à l'accroissement de la variabilité et de la fréquence des épisodes extrêmes.

### 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<sup>2</sup> en moyenne) et le rayonnement émis par la Terre vers l'espace (240 W/m<sup>2</sup>) représente le forçage radiatif (150 W/m<sup>2</sup>) 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<sub>2</sub> par rapport à sa concentration préindustrielle entraînait un forçage additionnel de 4 W/m<sup>2</sup> environ (d'après DUPOUEY *et al.*, 2005).

Depuis 1750, la concentration atmosphérique de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) s'accumulent dans l'atmosphère. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, on peut estimer que le dioxyde de carbone contribue pour 60% à l'effet de serre, le méthane pour 20% et l'oxyde nitreux pour 6%. Enfin, les chlorofluorocarbones (CFC) et d'autres gaz traces d'origine industrielle interviennent pour 14%. La concentration en méthane (CH<sub>4</sub>) dans l'atmosphère a été multipliée par 2,5 et elle continue à s'accroître actuellement. 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<sub>2</sub>O), 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<sup>2</sup>), 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<sub>2</sub> (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<sub>2</sub>.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (tableau 1) mélangés de façon homogène à la troposphère est la première cause du réchauffement (IPCC, 2001). Leur forçage radiatif global depuis l'ère pré-industrielle est évalué à 2,43 W/m<sup>2</sup>, soit 1,46 W/m<sup>2</sup> pour CO<sub>2</sub>, 0,48 W/m<sup>2</sup> pour CH<sub>4</sub>, 0,15 W/m<sup>2</sup> pour N<sub>2</sub>O et 0,34 W/m<sup>2</sup> pour les dérivés halogénés et leurs produits de substitution. La concentration atmosphérique de ces gaz est suivie avec attention par les atmosphériciens et l'incertitude sur leurs concentrations est faible.

L'accentuation de l'effet de serre est aussi la résultante des modifications de la composition de l'atmosphère en différents autres composés, gazeux ou particuliers, distribués de façon beaucoup moins homogène que les précédents :

- En premier lieu l'ozone qui intervient, d'une part par la destruction de l'ozone stratosphérique qui contribue à un forçage radiatif négatif évalué à  $-0,15 \pm 0,10$  W/m<sup>2</sup>, avec les incertitudes liées à l'évolution de cette couche d'ozone ; d'autre part par la production d'ozone troposphérique qui entraîne un forçage positif estimé à  $0,35 \pm 0,15$  W/m<sup>2</sup>. Cette production d'ozone troposphérique a un caractère régional, conséquence de la localisation des émissions de composés chimiquement actifs impliqués dans sa synthèse, principalement CH<sub>4</sub>, CO, NO<sub>x</sub> et des hydrocarbures autres que le méthane. La contribution de chacun de ces gaz est actuellement très mal connue.

- Ensuite, les aérosols auxquels une attention particulière a été portée au cours des dernières années. En effet, ils dispersent le rayonnement solaire et exercent dans l'ensemble un forçage radiatif négatif, à l'exception des poussières de noir de carbone qui exercent un forçage positif. Les estimations de ces valeurs de forçage sont considérées actuellement comme entachées d'une très grande incertitude : les sulfates ( $-0,4$  W/m<sup>2</sup>), les composés carbonés issus de la combustion de la biomasse végétale ( $-0,2$  W/m<sup>2</sup>), les composés carbonés organiques issus de la combustion des carburants fossiles ( $-0,1$  W/m<sup>2</sup>), le carbone particulaire (noir de carbone) issu de la combustion des carburants fossiles ( $+0,2$  W/m<sup>2</sup>), les poussières minérales ( $-0,6$  à  $+0,4$  W/m<sup>2</sup>). A ces modifications de la composition de l'atmosphère, les physiciens ajoutent des effets des aérosols, actuellement évalués

aussi avec une grande incertitude, mais dont certains auraient un important forçage radiatif négatif, ainsi que le forçage radiatif dû à la variation d'irradiance totale du soleil évaluée de 1 750 à aujourd'hui à  $0,3 \pm 0,2 \text{ W/m}^2$ .

On peut encore ajouter le forçage ponctuel lié au volcanisme tel qu'il s'est manifesté dans les années 1990 avec l'éruption du Pinatubo. Enfin, les modifications des couverts végétaux, notamment la déforestation, se traduisent par une augmentation de l'albédo (pourcentage du rayonnement solaire incident réfléchi par la surface terrestre) et une réduction du forçage radiatif évaluée à  $-0,2 \pm 0,2 \text{ W/m}^2$  avec une grande incertitude.

**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 <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CFC-11	CFC-12	HCFC-22	CF <sub>4</sub>
<b>Concentration pré-industrielle*</b>	280 ppmv	700 ppbv	275 ppbv	0	0	0	40 pptv
<b>Concentration en 1998*</b>	365 ppmv	1745 ppbv	314 ppbv	268 pptv	533 pptv	132 pptv	80 pptv
<b>Augmentation annuelle*</b>	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
<b>Durée de vie (années)</b>	50 à 200	8,4 à 12	114 à 120	45	100	12	>50 000
<b>Contribution au forçage radiatif</b>							
(W.m <sup>-2</sup> )	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
<b>Potentiel de réchauffement global</b>							
	1	62	275	6300	10200	4800	3900

\* ppmv : partie par million en volume (10<sup>-6</sup>) ; ppbv : partie par milliard en volume (10<sup>-9</sup>) ; pptv : partie par trillion en volume (10<sup>-12</sup>). 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<sub>2</sub>. Par exemple, une tonne de CH<sub>4</sub> aura, à cet horizon, 62 fois le PRG d'une tonne de CO<sub>2</sub>.

### 3. Le changement climatique : les prédictions pour le futur

A la fin du siècle, les modèles prévoient des concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub> 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 élévation du niveau des mers de 0,14 à 0,80 m est prévue de 1990 à 2100, ce qui est deux à quatre fois le taux observé pendant le XX<sup>e</sup> siècle. En revanche, une perte majeure de glace de l'Antarctique et une élévation accélérée du niveau des mers sont maintenant jugées comme très peu probables au XXI<sup>e</sup> siècle.

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.

Les conclusions de l'IPCC concernant les tendances observées et prévues pour différents événements climatiques extrêmes peuvent être classées selon leur niveau de probabilité. On retiendra parmi les conclusions très probables (à plus de 95%) : une augmentation des températures maximales et de la fréquence des jours chauds, une augmentation des températures minimales et une diminution de la fréquence des jours froids (ou encore des gelées). Les conclusions probables (probabilité supérieure à 2/3) concernent une diminution de l'amplitude thermique journalière, des précipitations plus fréquentes et plus intenses, des vagues de chaleurs plus fréquentes et, inversement, des vagues de froid moins fréquentes, une augmentation des épisodes de fortes pluies hivernales et, enfin, une augmentation de la fréquence des sécheresses estivales dans les régions continentales situées à des latitudes intermédiaires. Enfin, la vitesse maximale du vent, ainsi que l'intensité des précipitations, devraient augmenter lors des cyclones tropicaux.

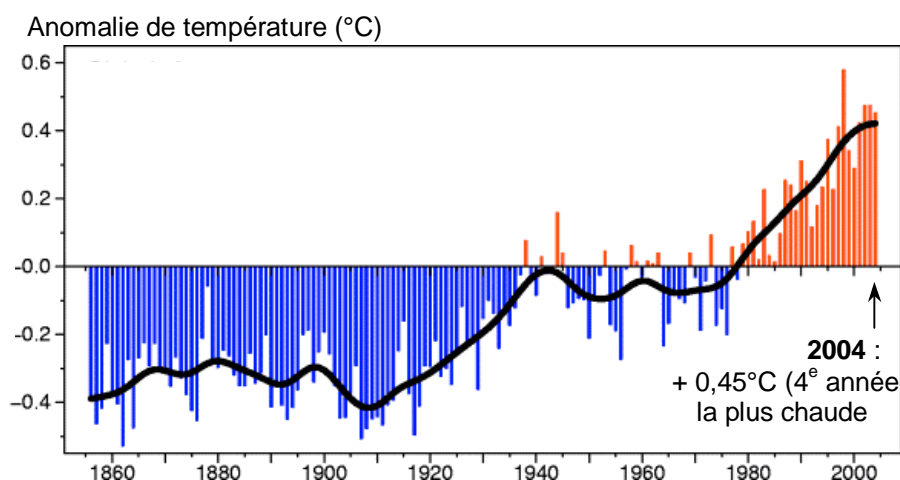
#### 4. Le changement climatique : les évolutions récentes à l'échelle globale et leur attribution

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<sup>e</sup> 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 1). **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 1 – 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**.

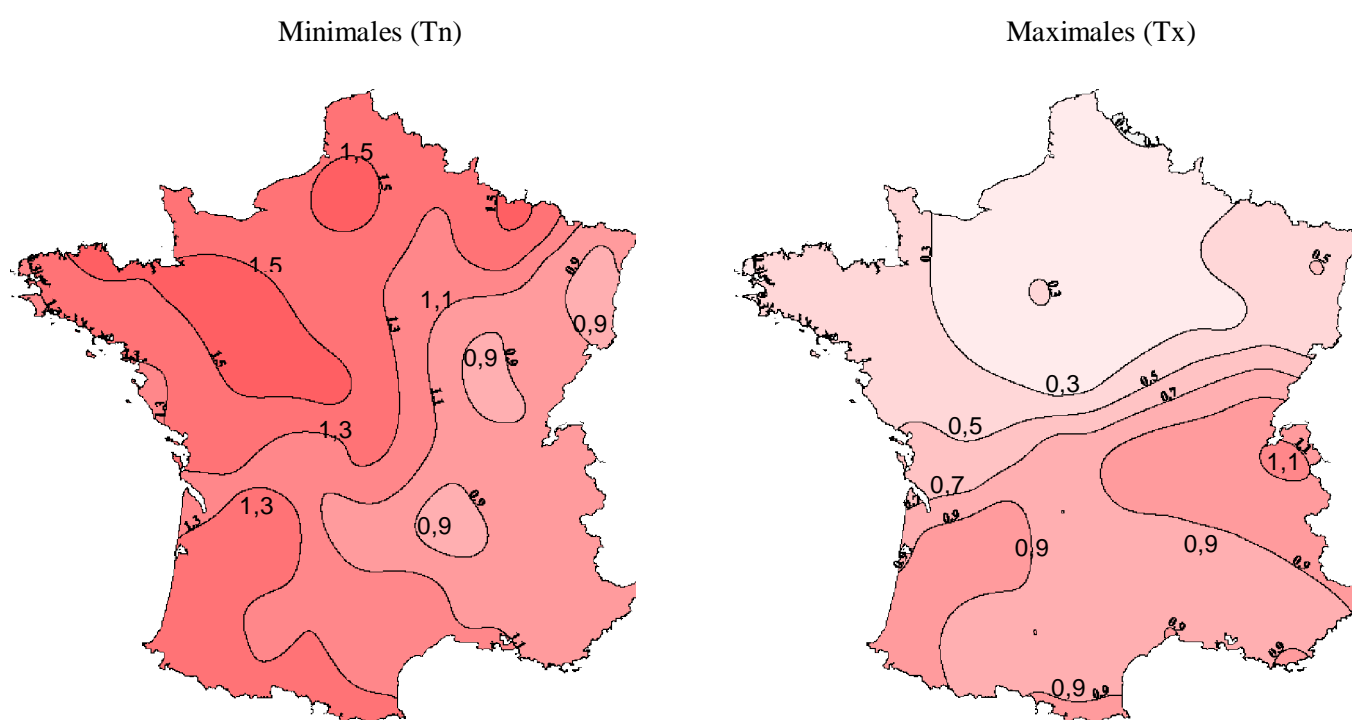
**Pour les précipitations, la tendance est moins claire** : les mêmes sources indiquent une tendance à la hausse de la pluviométrie annuelle à l'échelle globale, cependant très modérée (2%) et surtout très variable dans le temps et l'espace : elle peut atteindre 7 à 12% dans les latitudes élevées de 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).

Ces évolutions des facteurs climatiques s'accompagnent d'observations sur celles de la cryosphère et des océans. La surface de la couverture neigeuse a diminué d'environ 10% depuis la fin des années 1960 et la période de glaciation des lacs et des rivières a été réduite de deux semaines dans l'hémisphère Nord durant le XX<sup>e</sup> siècle. Il y a eu un retrait général des glaciers de montagne dans les régions non polaires durant le XX<sup>e</sup> siècle. La superficie de la glace de mer a diminué de 10 à 15% dans l'hémisphère Nord depuis les années 1950. Une diminution de l'épaisseur de la glace de 40% en Arctique s'est probablement produite à la fin de l'été pendant les dernières décennies, ce déclin étant beaucoup plus prononcé en hiver. Les données sur les marées montrent que le niveau moyen des mers s'est élevé de 10 à 20 cm pendant le XX<sup>e</sup> siècle. Il est très probable que cela est dû au moins en partie à l'expansion thermique de l'eau de mer et à la perte de glace associée au réchauffement. Ce rythme de variation du niveau d'élévation des mers a été environ dix fois plus important que pendant les derniers 3 000 ans.

**FIGURE 2 – Réchauffement en France au cours du siècle passé** (d'après MOISSELIN *et al.*, 2002 ; Météo France).



## 5. 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 2), 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.

Pour les pluies, les séries homogénéisées de précipitations dessinent une pluviométrie plutôt en hausse sur le XX<sup>e</sup> 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 décembre 1999, 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.

## 6. 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. Il faut aussi que des chercheurs de diverses disciplines soient stimulés afin de se mobiliser pour analyser une tendance éventuelle à travers leurs propres données, ce qui se fait progressivement actuellement.

**Au niveau global**, les impacts observés étaient ainsi pratiquement absents des deux premiers rapports du GIEC, et sont apparus en tant qu'information significative seulement pour le 3<sup>e</sup> rapport (IPCC, 2001). L'analyse effectuée alors, à partir de 2 500 articles publiés, portait uniquement sur les relations avec la température, en recherchant trois critères qui devaient être satisfaits simultanément : un changement observé sur au moins dix années, pouvant être corrélé de manière déterministe à un changement de température, et un changement simultané de température. Deux grandes catégories ont ainsi été mises en évidence : 44 études sur les plantes et les animaux, couvrant 600 espèces, dont 90% (plus de 550) ont montré des signes de changement, parmi lesquelles 80% (plus de 450) allaient dans le sens attendu. Et 16 études sur les glaciers, la couverture neigeuse et la glace sur les lacs ou les fleuves portant sur 150 sites : environ 100 sites (67%) montraient une évolution, dont 99 dans la direction attendue.

Les travaux préparatoires à la publication du 4<sup>e</sup> rapport du GIEC (prévue pour 2007) ont permis d'actualiser ces données globales (qui portent le nom de méta-analyses) : 13 études pour les changements dans la cryosphère, 22 pour l'hydrologie et les ressources en eau, 30 sur les processus côtiers, 37 sur les systèmes biologiques marins et d'eau douce, 156 sur les systèmes biologiques terrestres, et 32 sur l'agriculture et la forêt (soit 258 au total, à comparer aux 60 études mentionnées ci-dessus dans le 3<sup>e</sup> rapport).

En 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 ;

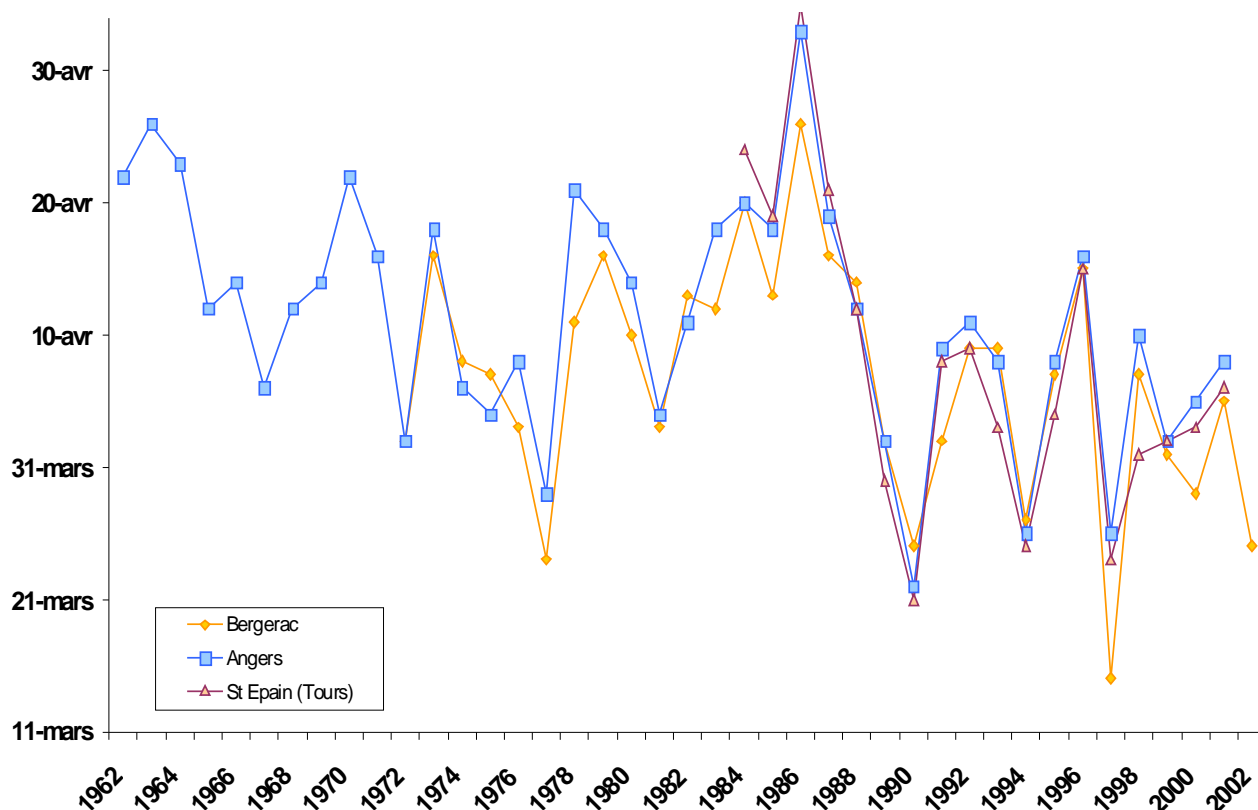
- **pour l'agriculture et la forêt, une avancée similaire de la phénologie en Europe et en Amérique du nord, avec une saison de végétation sans gel allongée** (en partie sans doute à l'origine de l'augmentation de la productivité forestière, de l'ordre de 30 à 40%, maintenant confirmée par des observations 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 1/2 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), 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, figure 3 ; 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 3 – Evolution de la période de floraison de la poire Williams depuis 1962** (à partir de la base de données Phenoclim ; sources : J.M. Bore, INRA ANGERS ; C. Lavoisier, La Morinière ; M. Peschescot, Domaine de Castang).



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 soit 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.

## Références bibliographiques

- ACOT P.(2003) : *Histoire du climat*, éd. Perrin, 309p.
- 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 6<sup>e</sup> 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.
- 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<sup>e</sup> siècle : 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 éditées par Météo-France*, 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., Brisson N., 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.
- TEGART W.J.MCG., SHELDON G.W., GRIFFITHS D.C. (1990) : *Climate change : the IPCC impacts assessment*, Tegar 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.