

Annexe : résumé du Livre Blanc

Modélisation globale et évolution du climat (chapitre 1)

Dans le cadre de la préparation du 4^{ème} rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le groupe de travail sur les modèles couplés (WGCM) du programme mondial de recherche sur le climat (WCRP) a lancé en 2004, sous les auspices du GIEC, une action d'envergure pour encourager les équipes de modélisation à réaliser des simulations d'évolution du climat selon un protocole précis. Les résultats de ces simulations devaient être écrits selon un format standard et mis à disposition de l'ensemble de la communauté scientifique afin d'encourager les analyses croisées entre plusieurs modèles.

Pour la première fois, les équipes françaises ont réalisé l'ensemble des simulations requises et ont ainsi pu contribuer plus fortement à la préparation du rapport. La France possède deux modèles climatiques, l'un développé par Météo-France et le CERFACS, l'autre par l'IPSL, qui diffèrent principalement par leur composante atmosphérique. Depuis le précédent rapport du GIEC en 2001, toutes les composantes de ces modèles climatiques ont été améliorées: l'atmosphère (représentation de la convection, des nuages, des aérosols et de l'orographie), l'océan (formulation en surface libre), la glace de mer (rhéologie) et les surfaces continentales (utilisation des sols). La résolution des modèles a été accrue et le couplage entre les composantes a été amélioré. Enfin plusieurs travaux ont été entrepris pour coupler ces modèles climatiques à des modèles de chimie, d'aérosols et des cycles biogéochimiques.

Les simulations réalisées pour le GIEC couvrent l'évolution du climat de 1860 à nos jours, ainsi que des projections pour le 21^{ème} siècle. Pour le 20^{ème} siècle, les tendances des températures simulées par les modèles sont cohérentes avec les observations aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle de la France. De nombreuses études ont été réalisées pour caractériser et évaluer les qualités et les limites des modèles aussi bien en termes d'état moyen que de variabilité, en se comparant aux observations récentes. Pour le futur et pour le scénario SRES-A2 (scénario de croissance continue des émissions), les deux modèles simulent une évolution des températures assez semblable. Pour les précipitations par contre, les divergences sont plus importantes, notamment au-dessus des continents, et sur la distribution géographique du changement des précipitations.

Rétroactions et variabilité climatique

- *Rétroaction et nuages (chapitre 2)*

Les modèles climatiques divergent dans l'ampleur du réchauffement global de la Terre qu'ils prévoient en réponse à un doublement du CO₂ atmosphérique. Il est reconnu depuis longtemps que cette incertitude provient avant tout des différences inter-modèles dans la réponse radiative des nuages au changement climatique. Le développement de nouvelles méthodologies d'analyse des mécanismes physiques de rétroaction dans les modèles climatiques a permis de montrer que c'est principalement la réponse des nuages de couche limite (stratus, stratocumulus

et cumulus) qui est au cœur de ces incertitudes. Ceci ouvre la voie à de nouvelles stratégies d'évaluation des nuages et de leur sensibilité dans les modèles de climat.

- *Cycle du carbone (chapitre 7)*

La possibilité d'une rétroaction positive entre changement climatique anthropique et cycle du carbone a été mise en évidence depuis peu : l'évolution future du climat pourrait diminuer de façon drastique l'efficacité des puits naturels, biosphère continentale et océans, à absorber le CO₂ anthropique avec pour conséquence une accélération de l'augmentation du CO₂ et une amplification du changement climatique.

Les estimations à l'aide du modèle couplé climat-carbone de l'IPSL montrent que pour le scénario SRES-A2, cette rétroaction pourrait amplifier l'augmentation du CO₂ de 35 ppm en 2100. Les études menées dans le cadre d'un projet international de comparaison de modèles couplés climat-carbone, coordonné par l'IPSL, ont montré que cette amplification, toujours positive, variait entre 20 et 200 ppm en 2100. Elle pourrait correspondre à un réchauffement induit de 1.5°C supérieur aux estimations faites à l'aide des modèles climatiques traditionnels.

- *Cycle hydrologique (chapitre 5)*

La réponse des précipitations aux forçages anthropiques, bien que cruciale pour de nombreuses études d'impacts du changement climatique, demeure encore incertaine dans de nombreuses régions. Elle est en effet plus difficile à prévoir que celle des températures pour de multiples raisons. Au-delà des inconnues liées aux différents scénarios d'émissions, qui jouent principalement sur l'amplitude des anomalies simulées, les projections demeurent très variables d'un modèle à l'autre, y compris à l'échelle globale continentale. Parmi les diverses méthodes envisageables pour contraindre la réponse des modèles, la validation de la variabilité interannuelle du cycle hydrologique et de ses relations avec les températures de surface de la mer semble une piste intéressante à explorer.

- *Modes de variabilité (chapitre 3)*

La variabilité climatique simulée et son changement sous l'action anthropique se caractérise par une grande diversité entre modèles. Cette disparité peut s'expliquer par des interactions spatio-temporelles différentes en particulier entre la variabilité interannuelle de type El Niño, le cycle saisonnier dans le Pacifique Tropical et l'activité intra-saisonnière de l'atmosphère tropicale. Elle s'explique aussi par la difficulté des modèles à simuler correctement les téléconnexions liées au phénomène El Niño-Oscillation Australe (ENSO). Ces dernières ont tendance à être surestimées dans de nombreux modèles, dominant alors la variabilité des moussons (Afrique, Amérique du Sud) voire des latitudes extratropicales. En particulier, les changements du cycle hydrologique simulé en réponse au forçage anthropique semblent être contrôlés en grande partie par la nature de ces téléconnexions ENSO.

L'analyse des scénarios montre que les caractéristiques de l'ENSO ne changent pas en climat perturbé. Les changements aux moyennes et hautes latitudes se caractérisent par une dynamique plus zonale qui se projette pour une majorité de modèles sur la phase positive de l'Oscillation Nord Atlantique, entraînant une augmentation des précipitations hivernales sur l'Europe de l'Ouest.

- *Cryosphère (chapitre 6)*

Il est crucial de comprendre l'évolution actuelle et future des glaces continentales et marines. Des observations satellitaires montrent que les premières contribuent par leur fonte à une

élévation du niveau des océans de près d'1 mm/an sur la période 1993-2005, qui s'ajoute aux 2 mm/an dus à la dilatation thermique des océans en phase de réchauffement.

Pour la fin du 21^{ème} siècle, les modèles indiquent que la fonte de la calotte groenlandaise devrait nettement s'accélérer. L'élévation associée du niveau de la mer devrait cependant être modérée en raison d'une augmentation de l'accumulation de neige sur l'Antarctique, cohérente avec le réchauffement des températures sur cette région. La glace de mer quant à elle est actuellement en régression rapide, et selon les modèles climatiques les plus récents cette tendance devrait se poursuivre : ainsi en été, l'Océan Arctique pourrait être totalement libre de glace à la fin du 21^{ème} siècle.

Régionalisation et détection du changement climatique

- *Régionalisation et extrêmes (chapitre 4)*

Une évaluation de l'impact d'un changement climatique d'origine anthropique sur la fréquence des phénomènes de vent, de température et de précipitations sur la France a été réalisée en utilisant des simulations à haute résolution sur l'Europe par les modèles de l'IPSL et du CNRM sous l'hypothèse du scénario SRES-A2. L'accent a été mis sur la fréquence des vagues de chaleur, des tempêtes et les phénomènes de pluies abondantes ou de sécheresses sur le territoire métropolitain. En outre l'impact sur la fréquence des cyclones tropicaux dans l'Atlantique Nord a été étudié. Trois approches ont été utilisées pour évaluer l'impact du changement climatique : l'approche directe qui utilise directement les variables du modèle, l'approche statistique qui établit sur les observations une relation empirique entre les variables observées de grande échelle et le risque météorologique associé et l'approche dynamique qui prend une situation météorologique dans son ensemble sur l'Atlantique Nord et l'Europe un jour donné et identifie les phénomènes extrêmes associés. Les résultats montrent une réponse très claire de l'augmentation des vagues de chaleur, une augmentation modérée du risque de forte pluie l'hiver, et un impact quasi négligeable sur les vents forts. La réponse de la fréquence des cyclones dépend de l'hypothèse sur l'évolution de la température des océans, mais les précipitations associées aux cyclones sont en augmentation.

- *Détection et attribution (chapitre 8)*

Les études menées au sein de la communauté française sont les premières à suggérer qu'il est possible de détecter, dans les observations des températures minimales d'été en France, une empreinte spatiale du changement climatique d'origine anthropique à des échelles sous-régionales. Les travaux d'attribution montrent que la majeure partie de ce réchauffement est dû à l'action combinée des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés. Les analyses réalisées semblent indiquer que les non-linéarités entre l'eau du sol et la température, via les changements d'évapotranspiration, sont responsables de la structure spatiale du réchauffement. D'autre part, les études sur les précipitations montrent qu'il est également possible de détecter un signal anthropique sur les tendances hivernales des dernières décennies. La séparation du signal sur les précipitations en une partie dynamique d'échelle régionale et un résidu, montrent que cette composante dynamique capture presque complètement la tendance observée.