

# Évolution du climat depuis 1850

Serge Planton<sup>1</sup>, Laurent Bopp<sup>2</sup>, Éric Brun<sup>1</sup>, Julien Cattiaux<sup>1</sup>, Fabrice Chauvin<sup>1</sup>, Matthieu Chevallier<sup>1</sup>, Philippe Ciais<sup>2</sup>, Hervé Douville<sup>1</sup>, Gérald Giraud<sup>3</sup>, Jean-Michel Soubeyroux<sup>4</sup>, Laurent Terray<sup>5</sup>

- 1 Centre national de recherches météorologiques —Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique, Météo-France / CNRS, Toulouse
- 2 Laboratoire des sciences de l'environnement et du climat, Institut Pierre-Simon Laplace, CEA / CNRS/ Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Gif-sur-Yvette
- 3 Centre national de recherches météorologiques —Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique, Météo-France / CNRS, Grenoble
- 4 Direction de la climatologie, Météo-France, Toulouse
- 5 Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique, Toulouse

serge.planton@meteo.fr

## Résumé

Les observations de température à la surface de la Terre réalisées depuis 1850 et les observations tant atmosphériques qu'océaniques qui se sont multipliées au cours des dernières décennies donnent l'image cohérente d'un réchauffement climatique sans équivoque depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Ce réchauffement se manifeste aussi à l'échelle de la France métropolitaine où il s'accompagne d'une augmentation sensible de la sévérité des sécheresses depuis la fin des années 1980. Certaines tendances, concernant notamment la plupart des événements extrêmes, sont indiscernables de la variabilité climatique des échelles décennale à multi-décennale. Cependant, l'attribution de l'essentiel du réchauffement en surface du dernier demi-siècle aux activités humaines ne fait quasiment plus aucun doute et l'empreinte anthropique est détectable dans nombre de tendances observées dans les différents composants du système climatique sur la même période. L'interprétation du ralentissement du réchauffement sur les quinze dernières années reste un enjeu de recherche dont les premières conclusions commencent à se dessiner.

Nous nous intéressons dans cet article aux changements climatiques observés dans les différentes composantes du système climatique de 1850 à nos jours. Le choix de cette date particulière est essentiellement guidé par la date de début de la plus longue série disponible de la température moyenne planétaire en surface établie à partir de mesures thermométriques (Morice *et al.*, 2012). Certaines séries locales reconstituées à partir de mesures de thermomètres couvrent bien sûr des périodes plus longues. C'est le cas de la série de températures mensuelles à Paris qui est la plus longue série continue, basée sur des mesures thermométriques, aujourd'hui existante (Rousseau, 2013). Mais, en deçà de 1850, ces séries étant trop peu nombreuses ou trop mal réparties, l'évaluation des températures moyennes sur des domaines étendus repose sur des marqueurs indirects aussi appelés *proxies* (Khodri *et al.*, 2015, ce numéro). Il faut en effet attendre 1856 pour voir apparaître le premier réseau d'observations météorologiques géré par Emmanuel Liais à l'Observatoire de Paris sous la direction de l'astronome français Urbain Le Verrier (Locher, 2009).

La température en surface fait exception, car les autres indicateurs d'évolution du climat, issus d'observations instrumentales, sont loin de couvrir notre période d'intérêt. Les séries de mesures de précipitations couvrent des périodes de temps parfois séculaires, mais au détriment de la couverture spatiale. L'observation de l'atmosphère est quant à elle limitée par la disponibilité

de mesures à partir de radiosondages dont les séries, corrigées de défauts importants d'homogénéité, ne débutent qu'en 1958. Le réseau dense d'observation de l'océan intermédiaire (jusqu'à 2000 m de profondeur) constitué par les flotteurs Argo n'a été mis en place qu'au début des années 2000. Par ailleurs, les données satellitaires ne peuvent renseigner qu'au plus quelques décennies et nécessitent une interprétation et une homogénéisation afin d'en déduire les variables d'intérêt climatique. Pour autant, grâce aux nouvelles études d'acquisition et de traitement de données, nous verrons que l'image de l'évolution du climat récent est devenue encore plus fidèle et complète qu'elle n'était après la publication du 4<sup>e</sup> rapport du Giec en 2007.

Outre la disponibilité de données instrumentales, une autre raison de se focaliser sur la période de 1850 à nos jours est que le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle correspond aussi à une accélération de l'activité industrielle ayant débuté environ un siècle plus tôt en Europe. La connaissance des facteurs d'évolution du climat, et en particulier le rôle singulier que jouent les gaz à effet de serre en lien avec cette activité industrielle, a donc amené la communauté scientifique à se poser la question d'un éventuel lien entre cette accélération de l'activité industrielle et les tendances climatiques. Ce lien de causalité, jugé très probable dans le 4<sup>e</sup> rapport du Giec pour les températures en surface depuis 1950, a pu être récemment revisité et recherché dans les tendances observées des différentes composantes du système climatique.

## Abstract

### The climate evolution since 1850

Observations of the Earth's surface temperature since 1850, and atmospheric or oceanic observations that have increased in number over the past decades, provide a coherent picture of a unequivocal climate warming since the middle of the 20<sup>th</sup> century. This warming also manifests itself across metropolitan France where it is accompanied by a significant increase in the severity of droughts since the end of the 1980s. Some trends, including those of most of extreme events, remain indistinguishable from climate variability at the decadal to multi-decadal time scale. However, there is almost no doubt on the attribution of the most part of the Earth's surface warming to human activities, and anthropogenic fingerprint is detectable in a large number of observed trends in the different components of the climate system over the same period. The interpretation of the slowdown of global warming over the last fifteen years remains a research challenge whose first findings begin to emerge.

## Les changements dans l'état moyen du système climatique

### Atmosphère et surface

Selon la dernière évaluation du Giec (2013), la température moyenne de la planète a augmenté en surface de près de 0,9 °C entre 1901 et 2012 (avec une probabilité de 90 % pour que le réchauffement soit compris entre 0,69 et 1,08 °C). Pour bien prendre la mesure de ce réchauffement, il suffit de le mettre en rapport avec celui qui sépare le dernier maximum glaciaire (il y a environ 21 000 ans) et la période actuelle. Les chercheurs évaluent cet écart comme étant probablement compris entre 3 et 8 °C. La figure 1 permet de confronter, sur une même échelle de valeurs, les évolutions de la température planétaire moyenne annuelle en surface et celle de la France métropolitaine disponible à partir de 1900. Il apparaît clairement que la variabilité interannuelle, mais aussi décennale et multi-décennale, de la température est beaucoup plus importante à l'échelle de notre pays qu'à l'échelle mondiale.

Cependant, l'évolution des moyennes décennales suffit à illustrer la similarité de l'évolution de la température sur l'ensemble de la période avec une première phase de réchauffement au début du siècle, suivie d'un palier des années 1940 aux années 1970, puis à nouveau une phase de réchauffement. Le réchauffement est pour la France de l'ordre de 1,3 °C sur la période 1901-2012, donc supérieur à celui de la planète.

Le constat d'un ralentissement du réchauffement sur les quinze dernières années peut être fait à partir des courbes de moyennes décennales de la figure 1, tant à l'échelle planétaire qu'à celle de notre pays. Nous reviendrons dans la suite sur les hypothèses actuellement émises par les scientifiques pour tenter d'expliquer ce ralentissement. Mais d'ores et déjà, force est de constater que, comme l'ont affirmé les experts du Giec et comme l'Organisation météorologique mondiale l'a rappelé dans son rapport sur le climat de la première décennie du XXI<sup>e</sup> siècle (OMM, 2013), celle-ci a été la plus chaude de toutes les décennies qui se sont succédé depuis la mise en place des systèmes modernes de relevé des températures instrumentales, et donc depuis 1850.

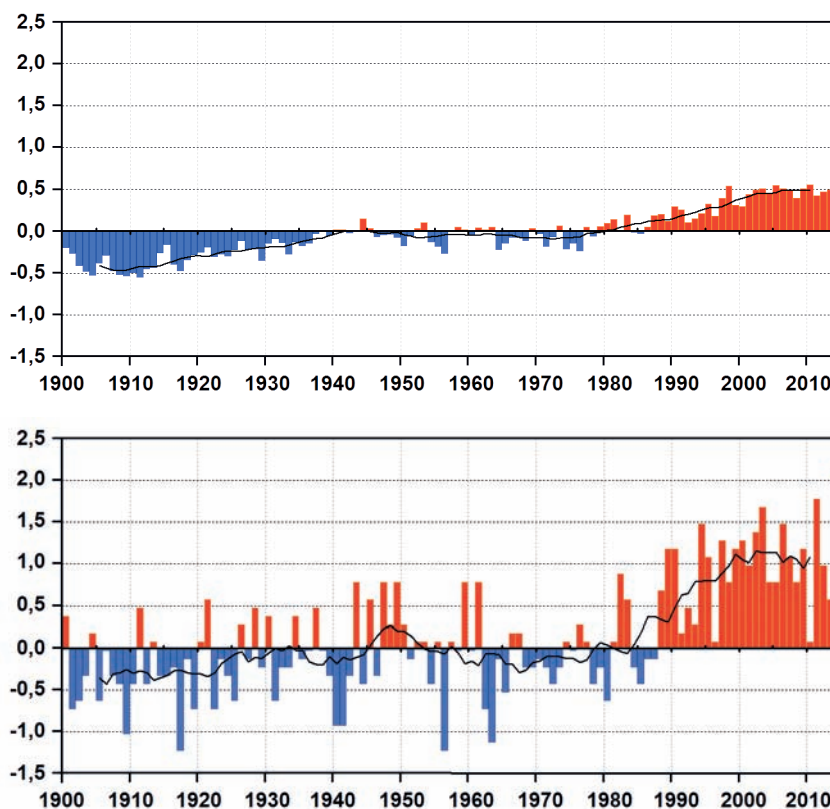


Figure 1. Anomalies de la température moyenne annuelle en surface entre 1900 et 2014 en moyenne planétaire (haut) et en moyenne sur la France métropolitaine (bas). Ces anomalies représentent des différences par rapport aux moyennes correspondantes de la période 1961-1990 et sont exprimées en °C. Les traits continus noirs représentent l'évolution des moyennes décennales calculées chaque année à partir des températures de la décennie débutant cinq années auparavant. Sources : données HadCRUT4 du Hadley Centre et indicateur thermique de Météo-France.

Depuis le milieu du xx<sup>e</sup> siècle, les observations par radiosondages et par satellites montrent que la partie basse de l'atmosphère s'est aussi réchauffée et que la stratosphère s'est refroidie. Une évaluation précise des tendances se heurte toutefois aux difficultés de reconstruction évoquées en introduction. Les écarts sur les tendances restent importants en dehors des régions des latitudes extratropicales de l'hémisphère Nord. Ces mêmes modes d'observation montrent que la masse de vapeur d'eau atmosphérique (l'humidité spécifique) a augmenté au moins depuis les années 1970. Le rythme d'augmentation est compatible avec ce que prévoit la théorie lorsqu'on fait l'hypothèse d'une humidité relative constante (7 % d'augmentation par degré de réchauffement). Les précipitations, qui dépendent d'autres facteurs, n'ont cependant pas augmenté au même rythme. Elles auraient probablement augmenté en moyenne sur les continents des moyennes latitudes de l'hémisphère Nord depuis 1900, et la France n'y fait pas exception avec dans ce cas une accentuation du cycle saisonnier. En l'état actuel des analyses, il n'est cependant pas possible de tirer de conclusion aussi nette pour ce qui concerne les tendances de long terme dans la plupart des autres régions du globe, notamment dans les tropiques.

## Océan

Un élément nouveau du dernier rapport du Giec concerne la correction des mesures du profil de température dans l'océan faites à partir de sondes dites XBT (*Expendable Bathythermographs*). Ces mesures nécessitent en effet l'application d'un modèle d'estimation de la vitesse de chute de la sonde dont il a été démontré qu'il était affecté par des erreurs importantes, à l'origine de biais chauds évoluant au cours du temps (Hamon *et al.*, 2012). Après corrections et l'ajout des données les plus récentes, les observations montrent une tendance plus nette à l'augmentation du contenu thermique des 700 premiers mètres de l'océan mondial au cours des 40 dernières années.

Sur cette période, les calculs utilisant les observations disponibles montrent que la Terre a reçu plus d'énergie qu'elle n'en a perdue. D'après ces estimations, les océans dans leur ensemble, du fait de leur inertie thermique et de leur volume important, auraient absorbé l'essentiel de ce gain énergétique (environ 93 %) en accord

avec le réchauffement observé. Si les 700 premiers mètres à eux seuls représentent 64 % du gain énergétique terrestre, les quelques 30 % restant auraient été absorbés en dessous, contribuant à réchauffer certaines couches profondes comme le montrent les observations (en général jusqu'à 2000 m de profondeur, mais aussi en dessous de 3000 m dans certaines régions de l'océan Austral).

Les changements de salinité à la surface de l'océan viennent confirmer un changement du cycle hydrologique qui ne peut pas être mis en évidence à partir d'observations de précipitations trop rares au-dessus des océans. Depuis les années 1950, les régions océaniques subtropicales où l'évaporation l'emporte sur les précipitations sont ainsi devenues plus salées, alors qu'à l'inverse les régions océaniques polaires et tropicales où les précipitations l'emportent sont devenues moins salées. Ces observations vont dans le sens d'une intensification du cycle hydrologique à l'échelle planétaire, en accord avec l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau atmosphérique déjà mentionnée.

Concernant la circulation océanique, du fait du manque d'observations dans l'océan intermédiaire et profond, il n'est pas possible de mettre en évidence des tendances de long terme se distinguant d'une variabilité d'échelle multidécadennale. C'est le cas pour la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC, en anglais, Kuhlbrodt *et al.*, 2007), l'un des plus importants modes de variabilité de l'Atlantique que l'on associe pour partie à la variabilité du Gulf Stream.

## Cryosphère

Les observations satellitaires ont révélé un déclin de l'étendue de la banquise de l'océan Arctique entre 1979 et 2014, plus prononcé en été et en automne : en septembre 2012, l'étendue observée représentait 50 % de l'étendue moyenne de la période 1979-2000, ce qui correspond à une perte de surface équivalente à cinq fois la superficie de la France. Cette diminution en surface s'accompagne d'un amincissement qui s'est accéléré au cours des dix dernières années. Le déclin du volume de glace peut être relié à la disparition progressive de la glace pérenne, plus épaisse, qui fond sur place ou est exportée vers l'océan Atlantique nord.

La banquise antarctique, essentiellement saisonnière, a connu par contre une tendance légèrement positive au cours des 35 dernières années. Des études récentes ont montré que des changements dans la direction et l'intensité des vents, ainsi qu'une baisse de la salinité des eaux de surface en lien avec la fonte de la calotte continentale étaient des causes possibles de cette tendance. Les changements de l'épaisseur de la banquise antarctique sont mal connus à l'heure actuelle, ce qui ne permet pas encore de quantifier sa réponse au changement climatique.

Le manteau neigeux saisonnier, qui couvre plus de 40 millions de kilomètres carrés de l'hémisphère Nord au cœur de l'hiver, est également très sensible à l'évolution récente du climat. Le suivi de son étendue dans sa globalité n'est vraiment fiable que depuis les premières données satellitaires à la fin des années 1960. Ces données, en accord avec les observations locales et les reconstitutions, montrent principalement une très forte diminution de l'enneigement au printemps, en particulier en mai-juin dans les régions arctiques. La tendance sur les 40 dernières années correspond à une perte de surface par décennie équivalente à la superficie de la France. Aucune baisse significative de la hauteur de neige n'est détectée en plein hiver dans les régions de permafrost, ce qui maintient l'effet très isolant de la neige. La fonte plus précoce au printemps et la persistance de la neige en plein hiver contribuent sans aucun doute au réchauffement observé du permafrost en Sibérie et au Canada. Les régions tempérées, aux enneigements épisodiques, voient également ceux-ci diminuer fortement.

Dans les Alpes françaises, depuis le milieu des années 1980, tous les paramètres qui caractérisent l'enneigement hors couvert forestier – hauteur de neige, durée et fin de l'enneigement – sont à la baisse, baisse remarquable à très basse altitude (< 1000 m), plus faible au fur et à mesure que l'altitude augmente et devenant quasi nulle à partir de 2400 m (figure 2). Les données du col de Porte, laboratoire de Météo-France situé dans le massif de la Chartreuse, à 1325 m d'altitude, confirment cette tendance avec une baisse de 12 cm par décennie des hauteurs de neige moyennes, ainsi qu'une diminution significative des durées d'enneigement non nul (6 jours par décennie) et supérieur à 1 mètre (15 jours par décennie).

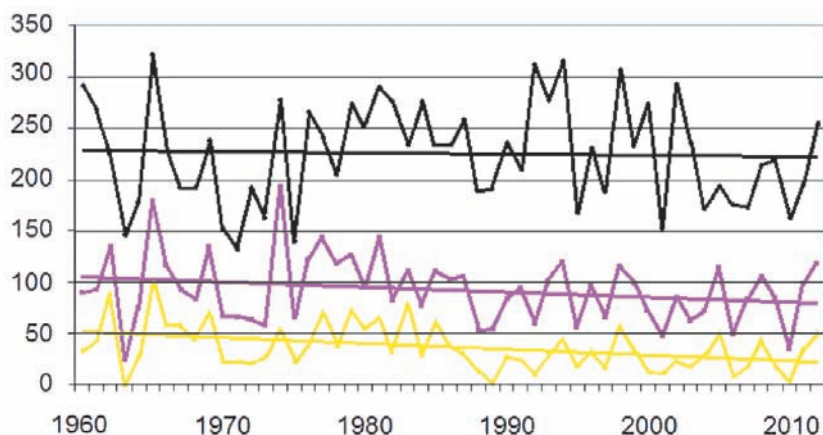


Figure 2 : Enneigement moyen du massif du Mont-Blanc à 1200 m (en jaune), 1800 m (en rose) et à 3000 m (en noir) sur la période 1960-2013. Les valeurs sont exprimées en cm. Les droites représentent les tendances linéaires sur la période. Source : Centre d'études de la neige, CNRM/Météo-France.

Les grandes calottes glaciaires (le Groenland et désormais l'Antarctique) et les glaciers de montagne perdent de la masse depuis une, voire plusieurs décennies, offrant un signal climatique sans ambiguïté. Leur contribution à la hausse du niveau des mers avoisine la moitié de la hausse constatée sur la période 1993-2010 (Giec, 2013 ; Cazenave *et al.*, 2015, ce numéro). Pour les deux grandes calottes, l'accélération de la fonte des neiges et glaces superficielles et celle de la fonte au contact des océans liée souvent à l'accélération des glaciers émissaires, sont les deux principales causes de leur diminution.

## Le carbone

Le cycle du carbone est constitué de l'ensemble des processus physiques, biologiques et chimiques qui transfèrent du carbone sur notre planète. Pour des échelles de temps allant jusqu'au millénaire, les principaux réservoirs sont l'océan, la biosphère continentale et l'atmosphère. Les trois réservoirs sont couplés par des échanges importants : photosynthèse et respiration entre atmosphère et biosphère continentale, et échanges cinétiques entre atmosphère et océan qui dépendent de la teneur en  $\text{CO}_2$  dissous dans l'eau de la couche de surface, teneur elle-même variable en fonction de l'état physique et de la biologie marine. La photosynthèse de la biosphère continentale représente par exemple un flux annuel d'environ 15 % de la masse de  $\text{CO}_2$  atmosphérique.

En dépit de ces échanges incessants entre les différents réservoirs, les mesures de  $\text{CO}_2$  sur les derniers millénaires montrent une concentration très stable, avec des variations de moins de 10 ppm<sup>1</sup>, ce qui montre que le flux net de  $\text{CO}_2$

vers l'atmosphère était proche de zéro à l'échelle de la planète à l'époque pré-industrielle, ou autrement dit que le cycle du carbone était alors en équilibre avec le climat.

L'activité humaine exerce deux perturbations majeures sur le cycle du carbone. La première est la combustion de carbone fossile (donc d'origine géologique et extérieur au système couplé océan-atmosphère-biosphère continentale) et son injection dans l'atmosphère. Ce processus est irréversible, même à l'échelle du millénaire, car il rajoute du carbone à un cycle existant. La deuxième est l'utilisation par l'homme de la biosphère continentale, principalement par l'expansion de l'agriculture, un phénomène qui a fortement augmenté depuis 1850. La suppression des forêts conduit à une source de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. Ce processus est en principe réversible, car les stocks de carbone perdus peuvent être reconstitués à l'échelle du siècle, mais en pratique, la surface agricole nécessaire pour nourrir l'humanité continue à augmenter, y compris dans la dernière décennie.

Les émissions de carbone fossile cumulées depuis 1750, estimées à l'aide de statistiques de consommation de l'énergie avec une précision de 10 %, sont de 365 GtC<sup>2</sup>. Les émissions de carbone liées à l'expansion de l'agriculture sont plus incertaines et sont estimées à 180 GtC, avec une erreur de 40 %. Sur la période récente, les émissions de  $\text{CO}_2$  fossile ( $8,6 \pm 0,4$  GtC par an entre 2003

et 2012) dominent celles liées à la déforestation (seulement  $0,9 \pm 0,5$  GtC par an sur la même période).

Ces émissions historiques de  $\text{CO}_2$  représentent au total 545 GtC. Elles ont provoqué une augmentation du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère qui est mesurée dans les bulles d'air des carottes de glace et par des mesures représentatives de l'atmosphère planétaire depuis 1958. L'accroissement total de  $\text{CO}_2$  atmosphérique entre 1750 et 2013 est de  $250 \pm 10$  GtC, soit 118 ppm. À noter donc que les puits naturels, océan et biosphère continentale ont absorbé plus de la moitié du carbone émis sur cette période, limitant de fait l'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. Cette teneur est cependant la plus élevée observée ou reconstruite à partir de proxies depuis 2 millions d'années. L'accroissement du  $\text{CO}_2$  lié aux émissions anthropiques depuis 260 ans est 20 % plus élevé que celui qui a eu lieu pendant les 5 000 ans des transitions climatiques entre climat glaciaire et interglaciaire du Quaternaire récent.

Le  $\text{CO}_2$  n'est pas le seul gaz à effet de serre dont la concentration ait augmenté du fait d'émissions anthropiques. C'est aussi le cas d'autres gaz comme le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) dont les concentrations ont aussi atteint des niveaux inégalés depuis au moins 800 000 ans. Les émissions anthropiques de  $\text{CO}_2$  sur la période industrielle sont cependant celles qui ont contribué le plus (pour 59 %) à la modification du bilan d'énergie au sommet de l'atmosphère directement induite par les changements de concentrations des gaz à effet de serre (34 % pour le  $\text{CH}_4$  et 6 % pour le  $\text{N}_2\text{O}$ ).

## Les changements dans les extrêmes climatiques

### À l'échelle mondiale

Le réchauffement global observé depuis 1850 ne concerne pas seulement la moyenne, mais bien toute la distribution statistique des températures. Aux extrêmes de celle-ci se trouvent les événements les plus rares – les extrêmes froids et chauds – dont la survenue s'accompagne généralement d'impacts socio-environnementaux importants. Mécaniquement, on s'attend à ce qu'un

1. ppm (partie par million) : ratio du nombre de molécules de gaz sur le nombre total de molécules d'air sec.

2. 1 gigatonne de carbone (GtC) correspond à 3,667 GtCO<sub>2</sub>.

décalage de la distribution vers un climat plus chaud rend les extrêmes froids moins probables et les extrêmes chauds plus probables ; c'est bien ce que l'on observe.

Le dernier rapport du Giec (2013) confirme une hausse significative du nombre de jours chauds depuis 1950 et, symétriquement, une baisse du nombre de jours froids. Les résultats se déclinent aux échelles régionales, même si la disponibilité des mesures ne permet pas de conclure partout, notamment en Afrique. En parallèle, on observe une tendance globale à battre davantage de records quotidiens et mensuels chauds que froids, en particulier en Europe (Wergen *et al.*, 2014). L'évolution globale des caractéristiques d'événements extrêmes d'une durée de plusieurs jours consécutifs va dans le même sens : les vagues de chaleur ont tendance à être plus fréquentes, plus intenses ou plus longues, tandis que le nombre de vagues de froid a significativement diminué depuis 1950.

À l'échelle globale, l'évolution observée des sécheresses a notamment été étudiée sur la base d'un indicateur empirique suggérant une évolution à la hausse au cours du xx<sup>e</sup> siècle. Les limites de tels indices ont cependant été mises en évidence et cette évolution globale a été remise en cause par d'autres auteurs. À l'instar des changements constatés sur les précipitations ou l'évapotranspiration, les tendances observées sont en fait avant tout régionales.

L'analyse des tendances concernant les cyclones tropicaux est particulièrement dépendante de l'évolution des systèmes d'observation. Ce n'est que depuis les années 1970, avec l'avènement des satellites, qu'un décompte exhaustif des cyclones a pu être entrepris et que les vents maximaux associés ont pu être estimés. Les méthodes d'estimation font cependant encore l'objet de discussions parmi les scientifiques. De plus, il reste difficile de distinguer des tendances sur les caractéristiques des cyclones sur une période d'une quarantaine d'années compte tenu de la variabilité décennale et multidécaennale du climat des régions concernées. Les conclusions sur l'augmentation probable de l'intensité des cyclones depuis les années 1970, figurant dans le 4<sup>e</sup> rapport du Giec, ont ainsi été révisées. Le constat de tendances à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des cyclones les plus intenses sur cette période, est désormais limité au bassin Atlantique nord (Giec, 2013).

Les moyennes latitudes sont le théâtre de nombreuses perturbations dont un petit nombre seulement atteint le stade de tempêtes. Les observations montrent depuis les années 1970 des tendances au déplacement vers les pôles des régions de passage des tempêtes. Cependant, l'évolution de leur intensité depuis la moitié du xx<sup>e</sup> siècle diffère selon les études et les régions, pour partie en raison des différences entre les méthodes de détection des tempêtes et en raison de la qualité variable des ensembles de données utilisées. Le niveau de confiance dans les résultats concernant l'intensité des tempêtes est donc faible.

## En France

Comme à l'échelle mondiale, en France, le nombre de jours chauds a augmenté et le nombre de jours froids a diminué au cours de la deuxième moitié du xx<sup>e</sup> siècle (Moisselin et Dubuisson, 2006). L'étude réalisée montre notamment que 80 % des séries d'observations analysées sur cette période présentent une hausse du nombre de jours de vagues de chaleur avec, en particulier, une augmentation d'au moins un jour par décennie pour un quart des séries. La diminution des extrêmes froids se traduit par une diminution du nombre de jours de gel de plus de 3 jours par décennie pour la moitié des séries. Par ailleurs, on observe une baisse du nombre de jours de vagues de froid au cours de la même période.

Si la canicule d'août 2003 illustre bien ces tendances de long terme, les récentes vagues de froid hivernales (hiver

2009-2010, décembre 2010, février 2012) pourraient paraître incompatibles avec les tendances observées. C'est le cœur de la problématique « signal sur bruit » : même dans un climat qui se réchauffe, la variabilité interne, responsable des événements extrêmes, reste capable de produire ponctuellement des épisodes froids. Mais ces épisodes sont modulés par le réchauffement de long terme : compte tenu de ses conditions synoptiques, l'hiver 2009-2010 aurait dû être aussi froid que les hivers glaciaux de 1939-1940 et 1962-1963 (Ouzeau *et al.*, 2011). De même, l'année 2011 n'aurait pas été le record chaud en France sans le réchauffement de long terme (Cattiaux et Yiou, 2012).

Les sécheresses se définissent comme un déficit hydrique anormal sur une période prolongée et se déclinent en différents types. Elles sont météorologiques pour un déficit de cumul de précipitations, agricoles ou édaphiques pour l'humidité des sols, hydrologiques pour les débits des cours d'eau ou le niveau des nappes. Grâce à un calcul d'indice approprié à chaque cas (Soubeyrou *et al.*, 2012), un suivi des sécheresses a pu être réalisé à l'échelle de notre pays ou pour quelques très longues séries.

La figure 3 montre l'évolution des sécheresses météorologiques de longue durée à Paris depuis 1873. Sans tendance climatique, la série est marquée par une forte variabilité interannuelle à décennale. La sécheresse de 1921 qui s'est étalée de décembre 1920 à mai 1922 est de loin la plus sévère des 150 dernières années, avec un pic en janvier 1922. Elle est suivie en termes

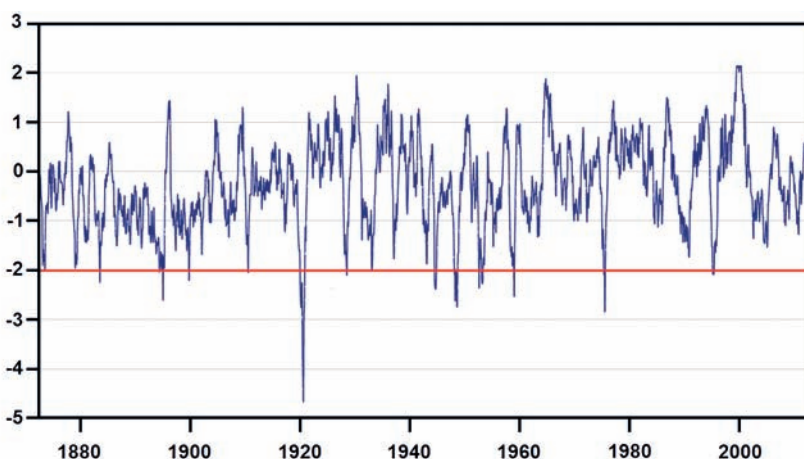


Figure 3. Évolution de l'indice mensuel *Standardized Precipitation Index* à Paris de 1874 à 2014, caractérisant les sécheresses météorologiques de longue durée (déficit de cumul de précipitations sur 12 mois glissants, en référence à la climatologie 1981-2010). Les sécheresses correspondent aux valeurs négatives de l'indice et les événements de sécheresse sévère sont repérés par une valeur de l'indice inférieure à -2.

de sévérité par deux sécheresses successives de la fin des années 1940 (octobre 1945 à mai 1946 et février 1949 à avril 1950). La sécheresse plus récente de 1976 n'arrive quant à elle qu'au 8<sup>e</sup> rang de la série. L'année 2003 n'a pas connu de sécheresse météorologique sévère (valeur de l'indice de l'ordre de -1), mais une sécheresse des sols exceptionnelle liée aux températures estivales caniculaires.

Le diagnostic sur l'évolution des sécheresses du sol, disponible depuis 1959 (début de la réanalyse Safran-Isba-Modcou, Vidal *et al.* (2010)), est assez différent. La figure 4, issue du nouvel indicateur sur les sécheresses du sol publié sur le site de l'Onerc<sup>1</sup>, représente le pourcentage du territoire en sécheresse au cours d'une année. Si les événements les plus forts sont ceux de la période 1989-1990, la tendance à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses est sensible depuis la fin des années 1980 (moyenne glissante décennale) et s'illustre notamment par la répétition des épisodes secs depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle (2011, 2003, 2005).

Les conclusions tirées des analyses spécifiques des données concernant les tempêtes et les cyclones en France métropolitaine et d'outre-mer corroborent les résultats des analyses menées à l'échelle mondiale tout en les précisant à l'échelle du territoire. À titre d'exemple, une étude datant de 2002 (Drevet, 2002) n'a montré aucune tendance à l'augmentation de la fréquence ou de l'intensité des tempêtes

sur la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, mais identifie une variabilité décennale et multidécennale.

## Le rôle des activités humaines

La question de l'origine de la variabilité climatique est traitée dans Khodri *et al.* (2015, ce numéro) et les techniques statistiques, dites de détection et d'attribution, y sont évoquées. Il s'agit notamment, par ces techniques, de détecter un éventuel effet des activités humaines dans les changements climatiques observés et, si possible, d'évaluer la contribution par rapport à celles des forçages naturels et de la variabilité interne.

Les études synthétisées dans les rapports du Giec jusqu'à 2007 avaient déjà permis de conclure que l'influence humaine a été très probablement la cause principale du réchauffement observé en surface depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Une nouveauté du dernier rapport du Giec synthétisant de nouvelles études est que cette affirmation est maintenant jugée extrêmement probable. Une estimation des contributions des différents facteurs au réchauffement moyen observé en surface entre 1951 et 2010 (figure 5) permet aussi au groupe d'experts de conclure qu'il est extrêmement probable que plus de la moitié de cette augmentation soit due aux effets anthropiques. Il reste toutefois difficile de séparer les effets des

forçages anthropiques dus aux gaz à effet de serre d'une part et aux particules d'aérosol en suspension dans l'atmosphère d'autre part. De même, le rôle des activités humaines sur le réchauffement en surface du début du XX<sup>e</sup> siècle reste difficile à distinguer.

Les effets anthropiques sont par ailleurs détectables sur les cinquante dernières années ailleurs dans l'atmosphère et dans d'autres composantes du système climatique. C'est le cas pour l'évolution du profil vertical de température (en prenant en compte l'effet anthropique sur l'ozone stratosphérique), le cycle de l'eau dont l'évapotranspiration à la surface des continents (Douville *et al.*, 2013), le réchauffement de l'océan superficiel, les changements de salinité (Terray *et al.*, 2012), la fonte de la banquise de l'océan Arctique, celle des glaciers et celle de la neige dans l'hémisphère Nord et probablement la fonte du Groenland.

Concernant les événements extrêmes, outre le fait que les derniers résultats confirment l'impact anthropique sur la fréquence et l'intensité des jours extrêmement chauds, pour la première fois une étude a permis de détecter l'empreinte anthropique dans les changements observés de l'intensité des pluies annuelles les plus fortes moyennées sur de larges étendues continentales de l'hémisphère Nord (Zhang *et al.*, 2013).

Par ailleurs, de plus en plus d'études cherchent à évaluer plus spécifiquement l'empreinte anthropique sur un événement extrême observé. Il ne s'agit pas d'imputer l'événement à cette unique cause, mais d'estimer de combien sa probabilité d'occurrence a été modifiée. Par exemple, Stott *et al.* (2004), dans la première étude publiée sur ce sujet, ont montré que les facteurs anthropiques auraient au moins doublé la probabilité d'occurrence de la canicule européenne de 2003.

Toutes les études mentionnées jusqu'ici analysent des observations sur des périodes de temps couvrant au moins une cinquantaine d'années. La question de l'attribution des causes du ralentissement récent du réchauffement en surface qui couvre moins de deux

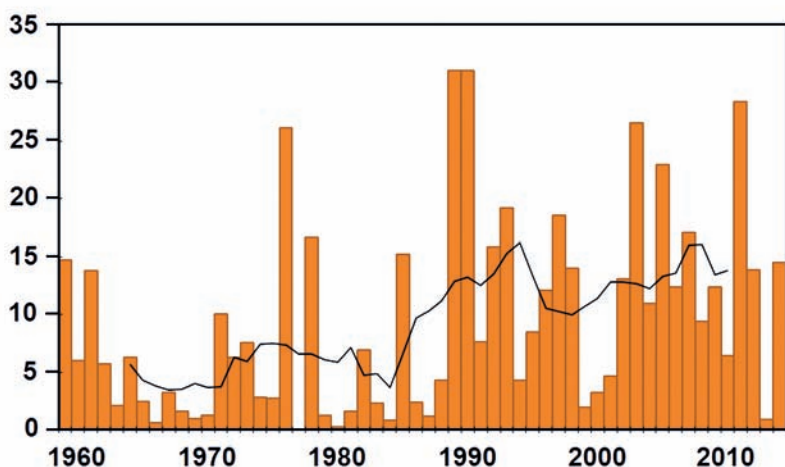


Figure 4. Évolution de l'indice moyen annuel de la surface du territoire métropolitain affectée par une sécheresse agricole sur la période 1959-2014. La sécheresse correspond ici à une période pour laquelle les valeurs du *Standardized Soil Wetness Index*, calculées mois par mois, sont les plus basses (durée de retour supérieure à 10 ans en référence à la climatologie 1961-1990). Le trait continu noir représente l'évolution des moyennes décennales de l'indice calculées chaque année à partir des valeurs de la décennie débutant cinq années auparavant.

1. Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

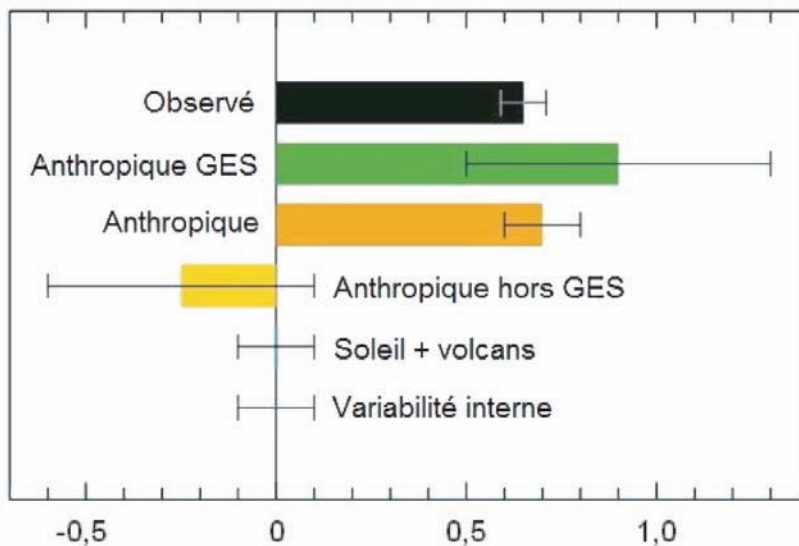


Figure 5. Évaluation des contributions à la tendance de température moyenne en surface sur la période 1951-2010 attribuables à différents facteurs. L'observation de la tendance est reproduite en noir. Les valeurs sont exprimées en °C sur la période. GES désigne les gaz à effet de serre. D'après Giec (2013).

décennies n'a par contre pas été résolue. Sur des périodes de temps aussi courtes, il est en effet beaucoup plus difficile de distinguer le signal du forçage anthropique du climat du bruit de la variabilité climatique interne, mais aussi des signaux liés aux forçages naturels.

Un premier bilan des études publiées jusqu'au printemps 2013 a conduit le Giec à conclure que la réduction de la tendance au réchauffement pourrait être due environ pour moitié à des facteurs naturels (diminution d'activité solaire et augmentation du nombre de petites éruptions volcaniques sur la période) et pour une autre moitié à la variabilité interne. D'autres causes évoquées comme l'augmentation de la concentration en particules d'aérosols d'origine anthropique ou la variation du contenu en vapeur d'eau de la stratosphère semblaient pouvoir être écartées.

Depuis ce premier bilan, de nombreuses publications sont parues sur le sujet. Certaines ont relativisé l'influence volcanique sur la période et un rôle important de l'activité solaire n'a pas pu être démontré. À l'inverse, la thèse d'un rôle de la variabilité interne s'est étayée jusqu'à très récemment avec la mise en avant de l'hypothèse d'un transfert de chaleur de l'océan superficiel vers l'océan profond qui refroidit de ce fait la surface. Reste que, à la date de rédaction de cet article, différentes thèses continuent de s'opposer à ce sujet, certains auteurs privilégiant le rôle de

l'océan Pacifique et de son oscillation décennale, d'autres privilégiant l'Atlantique et la variabilité multi-décennale de l'AMOC (voir par exemple Kintisch, 2014).

## Conclusion

Le changement climatique, dont nous venons d'évoquer les principales manifestations observables depuis que les réseaux d'observation météorologique ont été mis en place, se caractérise donc bien par un réchauffement climatique sans équivoque. Les données recueillies montrent la cohérence entre les tendances au réchauffement dans la basse atmosphère et en surface depuis le milieu du xx<sup>e</sup> siècle et d'autres tendances observées sur des périodes souvent plus courtes. C'est le cas pour les tendances à la fonte de la banquise arctique, à la diminution de l'enneigement dans l'hémisphère Nord, à la diminution de l'étendue des glaciers, à la fonte des calottes ou encore au réchauffement de l'océan superficiel et plus récemment des couches plus profondes. Ces tendances à la fonte des glaces et au réchauffement de l'océan sont aussi en accord avec celle de l'augmentation du niveau des mers à l'échelle mondiale (Cazenave *et al.*, 2015, ce numéro). Mais nous avons vu que le changement climatique se caractérise aussi depuis les années 1950 par une tendance à l'intensification du cycle hydrologique associée à une augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique au moins sur les

dernières décennies. Plus difficiles à mettre en évidence pour les événements climatiques extrêmes, les observations montrent cependant sur la même période des tendances nettes à l'augmentation du nombre d'épisodes chauds et à une diminution du nombre d'épisodes froids. Les changements climatiques en France vont dans le même sens que les tendances mondiales tant pour ce qui concerne les températures moyennes que pour l'enneigement ou la fréquence des épisodes chauds et froids. Mais une autre caractéristique du climat de notre pays, qui ne se décline pas de la même façon dans les autres régions du monde, est aussi une tendance marquée à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses sur les deux dernières décennies.

Une autre singularité de la période de 1850 à nos jours est une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, et en particulier de CO<sub>2</sub>, liée aux activités humaines. Les études faisant le lien de cause à effet entre cette augmentation et les tendances observées dans les différentes composantes du système climatique, principalement depuis le milieu du siècle, se sont multipliées. Il est maintenant jugé extrêmement probable que l'essentiel du réchauffement des 60 dernières années soit attribuable à la cause anthropique.

Ce constat ne peut cependant être fait à l'échelle de temps d'une ou deux décennies, notamment les deux dernières. L'explication principale tient au fait que, sur des périodes de temps aussi courtes, il est beaucoup plus difficile de distinguer la variabilité climatique liée aux différents facteurs externes de la variabilité climatique interne. Pour autant, les recherches en cours sur l'interprétation du récent ralentissement du réchauffement en surface, si elles ne donnent pas encore matière à consensus, commencent à dégager une piste crédible. Celle-ci attribue un rôle prépondérant à la variabilité climatique interne et plus particulièrement celle du transfert de chaleur entre l'océan superficiel et l'océan profond. Ce ralentissement ne remet pas par ailleurs en cause le constat d'une augmentation constante de l'énergie reçue par l'ensemble du système climatique, dont la part essentielle est absorbée par les océans et dont atteste notamment l'augmentation continue du niveau de la mer et le réchauffement récent de couches océaniques profondes.

## Bibliographie

- Cattiaux J., Yiou P., 2012. Contribution of atmospheric circulation to remarkable European temperatures of 2011, in "Explaining Extreme Events of 2011 from a Climate Perspective". *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 1041-1067. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00021.1
- Cazenave A., Berthier E., Meyssignac B., Le Cozannet G., Masson-Delmotte V., Salas y Méria D., 2015. Le niveau de la mer : variations passées, présentes et futures. *La Météorologie*, 88, 69-82.
- Douville H., Ribes A., Decharme B., Alkama R., Sheffield J., 2013. Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration. *Nat. Clim. Change*, 3, 59-62. doi: 10.1038/nclimate1632
- Drevetton C., 2002. L'évolution du nombre de tempêtes en France sur la période 1950-1999. *La Météorologie*, 37, 46-56.
- Giec, 2013. *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 1535 p.. Disponible à l'adresse : <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Hamon M., Reverdin G., Le Traon P.-Y., 2012. Empirical correction of XBT Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 29, 960-973. doi: 10.1175/JTECH-D-11-00129.1
- Khodri M., Swingedouw D., Mignot J., Sicre M.A., Garnier E., Masson-Delmotte V., Ribes A., Terray L., 2015. Le climat du dernier millénaire. *La Météorologie*, 88, 36-47.
- Kintisch E., 2014. Is Atlantic holding Earth's missing heat? *Science*, 345, 860-861. doi: 10.1126/science.345.6199.860
- Kuhlbrodt T., Griesel A., Montoya M., Levermann A., Hofmann M., Rahmstorf S., 2007. On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation. *Rev. Geophys.*, 45, RG2001. doi: 10.1029/2004RG000166
- Locher F., 2009. Les météores de la modernité : la dépression, le télégraphe et la prévision savante du temps (1850-1914). *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 56, 77-103. [www.cairn.info/revue-d-histoire-moderne-et-contemporaine-2009-4-page-77.htm](http://www.cairn.info/revue-d-histoire-moderne-et-contemporaine-2009-4-page-77.htm)
- Moisselin J.-M., Dubuisson B., 2006. Évolution des extrêmes de températures et de précipitation en France au xx<sup>e</sup> siècle. *La Météorologie*, 54, 33-42.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Jones P.D., 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117, D08101. doi: 10.1029/2011JD017187
- OMM, 2013. *Le climat dans le monde (2001-2010), une décennie d'extrêmes climatiques*. Rapport de synthèse OMM-1119. [consulté le 13 septembre 2014]. Disponible à l'adresse : [http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_1119\\_fr.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1119_fr.pdf)
- Ouzeau G., Cattiaux J., Douville H., Ribes A., Saint-Martin D., 2011. European cold winter of 2009/10: How unusual in the instrumental record and how reproducible in the Arpege-Climat model? *Geophys. Res. Lett.*, 38, L11706. doi: 10.1029/2011GL047667
- Rousseau D., 2013. Les moyennes mensuelles de températures à Paris de 1658 à 1675. *La Météorologie*, 81, 11-22.
- Soubeyrou J.-M., Kitova N., Blanchard M., Vidal J.-P., Martin E., Dandin P., 2012. Sécheresse des sols en France et changement climatique. *La Météorologie*, 78, 21-30.
- Stott P.A., Stone D.A., Allen M.R., 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432, 610-614. doi: 10.1038/nature03089
- Terray T., Corre L., Cravatte S., Delcroix T., Reverdin G., Ribes A., 2012. Near-surface salinity as nature's rain gauge to detect human influence on the tropical water cycle. *J. Clim.*, 25, 958-977. doi: 10.1175/JCLI-D-10-05025.1
- Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Soubeyrou J.-M., Blanchard M., Baillon M., 2010. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 459-478.
- Wergen G., Hense A., Krug, J., 2014. Record occurrence and record values in daily and monthly temperatures. *Clim. Dyn.*, 42, 1275-1289. doi: 10.1007/s00382-013-1693-0
- Zhang X., Wan H., Zwiers F.W., Hegerl G.C., Min S.-K., 2013. Attributing intensification of precipitation extremes to human influence. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5252-5257. doi: 10.1002/grl.51010